

---

## WQ- palkin poikkileikkauksen mitoitus normaali- ja palotilanteessa

---

Yhteyshenkilö: Jouko Kansa  
R&D Manager  
Ruukki Construction  
Seinäjoentie 11  
PL 900, 60100 Seinäjoki  
[jouko.kansa@ruukki.com](mailto:jouko.kansa@ruukki.com)

---

### Menetelmän kuvaus:

Tässä ohjeessa esitetään menetelmä, jolla standardin SFS-EN 1993 ohjeita sovelletaan WQ- palkin mitoitukseen. Täydennykset koskevat sekä normaalilämpötilan että palotilanteen mitoitusta. Menetelmässä esitellään molemmille mitoitusilanteille käytettävät eri kuormitusilanteiden ehtoyhtälöt. Palomitoitukseen liittyen esitellään poikkileikkauksen lämpötilajakauman huomioon ottamiseksi kaksi eri laskentamenetelmää: yksinkertaistettu ja tarkennettu. Ontelolaatan käyttö yhdessä WQ-palkin kanssa, ks. tämän normikortin kohta 5.

### Menetelmän rajoitukset:

Tätä ohjetta voidaan käyttää seuraavin edellytyksin:

- Rakenne on pääosin taivutettu, mutta siihen voi kohdistua aksiaalinen normaalivoima.
  - mikäli aksiaalisen normaalivoiman mitoitusarvo on enintään 50kN, sen vaikutus tämän normikortin pätevyysalueella voidaan jättää huomioon ottamatta poikkileikkauksen kestävyyttä laskettaessa
  - mikäli normaalivoima on edellä mainittua suurempi, sen vaikutus poikkileikkauksen kestävyteen otetaan huomioon standardin SFS- EN 1993-1-5 mukaan.
  - molemmissa em. tapauksissa nurjahdusta ei tarvitse tarkastaa erikseen, kun  $N_{Ed}/N_{cr} < 0,04$ .
- Rakenne on staattisesti kuormitettu.
- Rakenne on yksiaukkoinen tai jatkuva.
- Tämä Normikortti ei koske tapauksia, joissa puristettu alalaippa kuuluu poikkileikkauksluokkaan 4.
- Palkin oletetaan olevan päistään haarukkalaakeroitu.
- Palkissa käytetään uumien suhteen tasalujia hitsejä.
- Palkki mitoitetaan teräsrakenteena ilman liittovaikutusta liittyviin rakenteisiin, lukuun ottamatta käyttörajatilan mukaista taipuman laskentaa.
- Käyttörajatilan taipumat voidaan laskea liittorakenteena.
- WQ -palkit voidaan mitoittaa paloluokkiin R15- R120 tai mitoitus voidaan tehdä toiminnallisen palomitoituksen mukaisesti. Käytettäessä kokonaistarkastelua rakenteiden mitoittamiseksi palotilanteessa seuraavat asiat otetaan huomioon: vauriomuoto palotilanteessa, lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet ja sauvojen jäykkyys sekä termisten muodonmuutosten vaikutukset (epäsuorat vaikutukset palotilanteessa) (SFS-EN

1993-1-2 kohta 2.4.4). Kappaleissa 4.2 ja 4.3 esitetyt palkin lämpötilan nousua määrittävät kaavat ovat voimassa palosuojaamattomalle ja palosuojatulle palkille.

- WQ- palkki on valettu pääosin betonirakenteiden sisään siten, että vain sen alalaippa tai alaosa on palolle alttiina.
- Laskennassa käytetään standardien SFS-EN 1993-1-2, SFS-EN 1993-1-5 ja SFS-EN 1993-1-12 mukaisia materiaalimalleja.
- Normikortti kattaa teräslajit S355, S420, S460 ja S500, ja muut WQ-palkeissa mahdollisesti käytettävät teräkset, joille on voimassa oleva kansallinen tuotehyväksyntä.
- Teräslajille S500 murtovenymä on vähintään 10 % (SFS-EN 1993-1-12 kohta 5.4.3(1)).
- Normikorttia voidaan soveltaa palkeille, jotka tukevat joko ontelolaattoja, umpilaattoja tai kuorilaattaelementtejä.

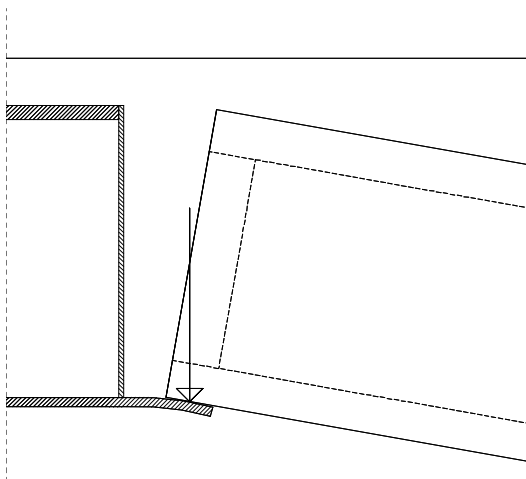
Tämän normikortin laskentamenetelmiä voidaan soveltaa WQ -palkeille, jotka täyttävät seuraavat suositusmitat:

Alalaipan leveys	$b_{f2}$	min 250 mm ... max 700 mm
Uuman korkeus	$h_w$	min 265 mm ... max 800 mm
Ylälaipan leveys	$b_{f1}$	min 120 mm ... max 390 mm
Ylälaipan paksuus	$t_{f1}$	min 10 mm ... max 60 mm
Alalaipan paksuus	$t_{f2}$	min 10 mm... max 35 mm
Uuman paksuus	$t_w$	min 5 mm ... max 10 mm

Mitta-alueen ulkopuolella olevat poikkileikkaukset tulee mitoittaa erikseen tapauskohtaisesti.

### Termien selvennykset:

Tässä normikortissa *alalaipan poikittaisella taivutuksella* tarkoitetaan kuvan 1 mukaista tilannetta, jossa alalaipan ulokkeelle tuleva kuormaresultantti taivuttaa alalaippaa poikittais-suunnassa WQ-palkin pituusakseliin nähden.



**Kuva 1:** Alalaipan poikittainen taivutus, joka lasketaan tässä normikortissa olettamalla alalaippa kahdesta pisteestä (uumista) tuetuiksi rakenneosaksi.

Teräsrakenneyhdistys ry:n Normitoimikunta on käsitellyt tämän Teräsnormikortin 27.1.2009 kokouksessa ja todennut sen täyttävän standardeissa SFS-EN 1993 ja niihin liittyvissä Suomen kansallisissa liitteissä.

Teräsnormikortin käyttäjällä on vastuu kortin ohjeiden käytöstä.

Tämä Teräsnormikortti on voimassa toistaiseksi.

Helsingissä maaliskuun 5. päivänä 2009

TERÄSRAKENNEYHDISTYS r.y.

Raimo Kotola  
Hallituksen puheenjohtaja

Markku Leino  
Toimitusjohtaja

<b>1. TAUSTA .....</b>	<b>6</b>
<b>2. MITOITUS NORMAALILÄMPÖTILASSA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Yleistä .....	6
2.2 Kuormaresultantin sijainti alalaipalla .....	7
2.3 WQ-palkin poikkileikkausluokan määrittäminen .....	8
2.3.1 WQ- palkin ylälaippa .....	9
2.3.2 WQ- palkin uuma .....	9
2.3.3 WQ –palkin puristettu alalaippa.....	10
2.4 Mitoitus murtorajatilassa.....	11
2.4.1 Leikkausvoimakestävyys, kun leikkauslommahdus ei ole määräävä.....	11
2.4.2 Vääntökestävyys, kun leikkauslommahdus ei ole määräävä.....	12
2.4.3 Leikkausvoima ja vääntökestävyys, kun leikkauslommahdus ei ole määräävä .....	12
2.4.4 Leikkauslommahdus leikkausvoimasta ja väännöstä .....	13
2.4.5 Taivutuskestävyys .....	16
2.4.6 Puristetun laipan lommahdus palkin taivutustason suunnassa .....	18
2.4.7 Palkin vääntö asennustilanteessa .....	20
2.4.8 Reunapalkin vääntö valmiissa rakenteessa.....	20
2.4.9 Keskipalkin vääntö lopullisessa tilanteessa.....	21
2.5 WQ- palkki käyttörajatilassa.....	22
2.5.1 Jännitykset kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa .....	22
2.5.2 Pystysuuntaiset taipumat .....	22
<b>3. MITOITUS PALOTILANTEESSA .....</b>	<b>23</b>
3.1 Yleistä .....	23
3.2 Kuormaresultantin sijainti.....	23
3.3 Ripustusraudoituksen huomioon ottaminen.....	23
3.4 Poikkileikkausluokan määrittäminen .....	24
3.5 WQ-palkin poikkileikkauksen kestävyys palotilanteessa.....	26
3.5.1 Leikkausvoimakestävyys .....	26
3.5.2 Vääntökestävyys .....	26
3.5.3 Leikkausvoima ja vääntö.....	26
3.5.4 Leikkausvoiman ja väännön aiheuttama uumalevyjen leikkauslommahdus .....	27
3.5.5 Taivutusmomentti .....	28
<b>4. POIKKILEIKKAUKSEN LÄMPENEMINEN .....</b>	<b>31</b>
4.1 Yleistä .....	31
4.2 Palosuojaamattoman alalaipan $A_m/V$ suhteen laskeminen .....	32
4.3 Palosuojatun WQ- palkin alalaipan $A_p/V$ suhteen laskeminen ja lämpötilan laskeminen.....	32
4.4 WQ- palkin mitoitus palotilanteessa yksinkertaistetulla menetelmällä .....	34
4.5 WQ- palkin mitoitus palotilanteessa tarkennetulla menetelmällä.....	35
4.5.1 Yleistä .....	35
4.5.2 Alalaipan lämpötilan laskeminen .....	35

4.5.3 Alalaipan yläpuoliseen betonirakenteeseen siirtyvä lämpöteho .....	35
4.5.4 Alalaipasta uumaan johtumalla siirtyvä lämpöteho .....	35
4.5.5 Alalaipasta kotelon sisään säteilemällä siirtyvä lämpöteho .....	35
4.5.6 Uumien ja ylälaipan lämpötilan laskeminen .....	36
4.5.7 Säteilylämmönsiirto .....	36
4.5.8 Lämmönsiirto johtumalla .....	36
4.5.9 Lämmönsiirto johtumalla uumasta ja ylälaipasta betoniin .....	36
<b>4.6 Kokeellisesti määritetty lämpötilan jakautuminen WQ-palkeissa, <math>h_{w1} = 265\text{mm}</math> .....</b>	<b>36</b>
<b>5. WQ- PALKIN KÄYTTÖ YHDESSÄ ONTELOLAATAN KANSSA.....</b>	<b>39</b>
<b>LIITTEET (JULKISIA).....</b>	<b>40</b>
<b>VIITTEET .....</b>	<b>40</b>

## 1. TAUSTA

Teräsrakentaminen Suomessa on jo pitkään perustunut yleisesti WQ- palkin ja ontelolaatan muodostamaan laattarakaisuun. Tämän järjestelmän etuja ovat matala rakennekorkeus sekä sileä ala- ja yläpinta, jotka helpottavat muiden asennuksien tekemistä.

WQ- palkin mitoituksessa on ollut muutamia ominaisuuksia, joita ei ole suoraan standardeihin dokumentoitu, kuten esim. väännön käsittely, poikkileikkausluokan määrittely sekä alalaipan poikittainen taivutus.

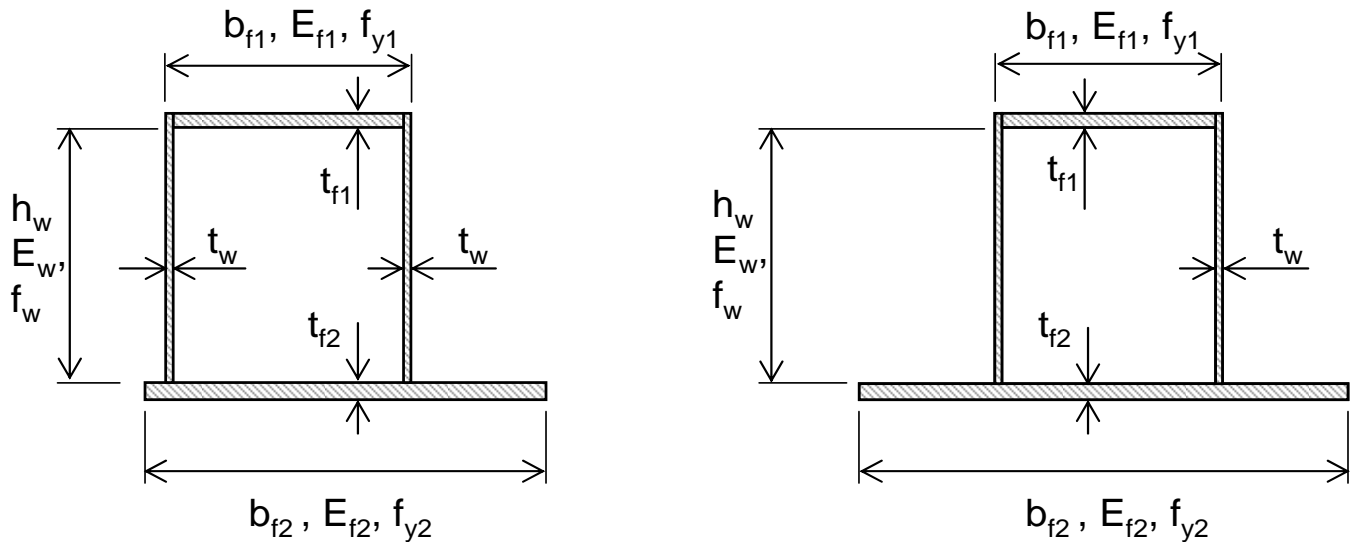
WQ- palkin palosuojaus on lisäksi ollut helppoa, sillä palkki on suurimmaksi osaksi betonin suojaamana ja vain alalaipan alapinta on tarvinnut suojata. Palomitoitus on kuitenkin tehty usein hyvinkin karkeasti ja ylimitoittaen. Teräsrakenneyhdistyksen palosuojamaalityöryhmän puitteissa on kehitetty normikortti palosuojamaalien ominaisuuksien tarkasteluun. Tämän työn perusteella useat maalinvalmistajat ovat hakenneet varmennettuja käyttöselosteita WQ -palkkien maalikalvon paksuuden määrittämiseen.

## 2. MITOITUS NORMAALILÄMPÖTILASSA

### 2.1 Yleistä

WQ- palkki voidaan mitoittaa standardin SFS-EN 1993 mukaisesti, mutta näissä standardeissa ei ole kuitenkaan kaikilta osin kattavia ohjeita WQ- palkin tyyppisen rakenteen mitoittamiseksi. Tässä normikortissa esitetään menetelmä, jolla täydennetään standardin SFS-EN 1993 ohjeita WQ- palkin mitoituksen osalta.

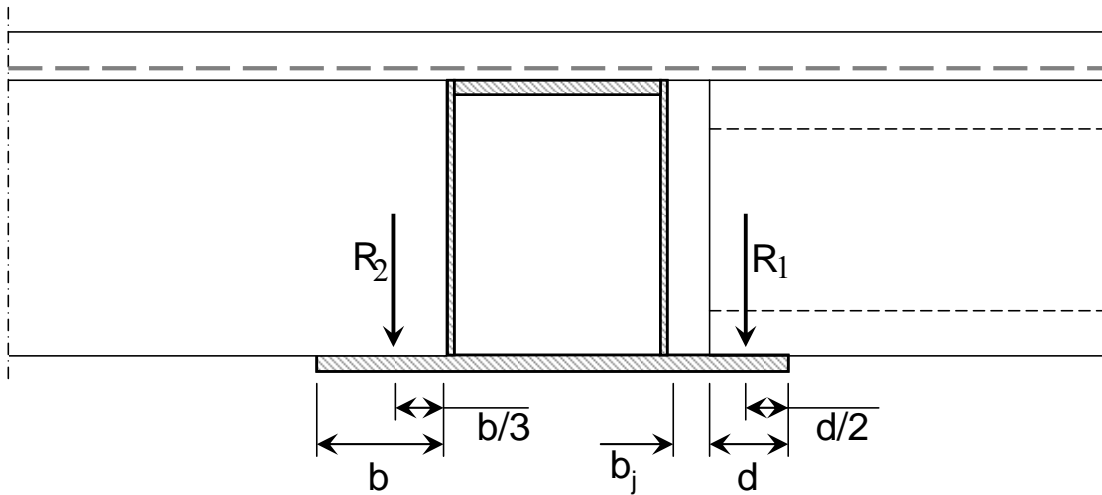
Esitetyn menetelmän rajoituksina ovat, että rakenteen tulee olla staattisesti kuormitettu ja että palkki mitoitetaan teräsrakenteena ilman liittovaikutusta liittyviin rakenteisiin, lukuun ottamatta käyttörajatilan mukaista taipuman laskentaa ja palkkiin tukeutuvien ontelolaattojen tarkastamista.



**Kuva 2.1:** WQ-palkin poikkileikkauksen dimensiot ja materiaaliparametrien merkinnät reuna- ja keskipalkilla. Alaindeksit  $f_1$  = ylälaippa,  $f_2$  = alalaippa,  $w$  = uuma.

## 2.2 Kuormaresultantin sijainti alalaipalla

Tukireaktion paikkana WQ- palkin alalaipalla ontelolaattarakenteissa voidaan TTY:llä (TRT/1648T/2008) suoritettujen tutkimusten mukaan pitää ontelolaatan tukialueen keskipistettä ( $d/2$ , kuva 2.2). Umpilaatoilla tukireaktio on etäisyydellä  $b/3$  palkin kyljestä, missä  $b$  on palkin ulokkeen leveys (kuva 2.2). Kuorilaatta-elementeillä tukireaktio voidaan asettaa varmalla puolella kohtaan  $b_j + (b - b_j)/3$ , missä  $b_j$  = saumavalun paksuus (kuva 2.2) (Oulun Yliopisto Lausunto RTL 0039).



**Kuva 2.2:** Ontelolaattojen tukireaktion oletetaan kohdistuvan WQ-palkin alalaipalla ontelolaattojen tukipinnan keskipisteeseen ( $d/2$ ). Umpilaattojen tukireaktion oletetaan sijaitsevan etäisyydellä  $b/3$  palkin uuman kyljestä. Kuorilaattaelementtien tukireaktion oletetaan vaikuttavan pisteessä  $b_j + (b - b_j)/3$ .

### 2.3 WQ-palkin poikkileikkausluokan määrittäminen

WQ- palkin poikkileikkausluokka määritetään standardien SFS-EN 1993-1-1, SFS-EN 1993-1-5, ja niiden kansallisten liitteiden mukaisesti. Normaalisti palkin laipat ja uuma ovat niin paksuja levyjä, että palkki kuuluu joko poikkileikkausluokkaan 1 tai 2 (kuva 2.3 a). WQ- palkin poikkileikkaus voi kuitenkin olla huomattavan epäsymmetrinen. Alalaipan poikkipinta-ala voi olla niin suuri, että palkin poikkileikkauksen plastinen neutraaliakseli sijaitsee alalaipassa. Tällöin uuman voi joutua käsittelemään puristettuna osana, eli uuma voi kuulua poikkileikkausluokkaan 3 tai 4. Koska koko palkin poikkileikkausluokka määräytyy hoikimman osan mukaan, saattaa liian epäsymmetrisissä tapauksissa tulla tilanne, jossa palkki helposti määräytyy epäedulliseen poikkileikkausluokkaan.

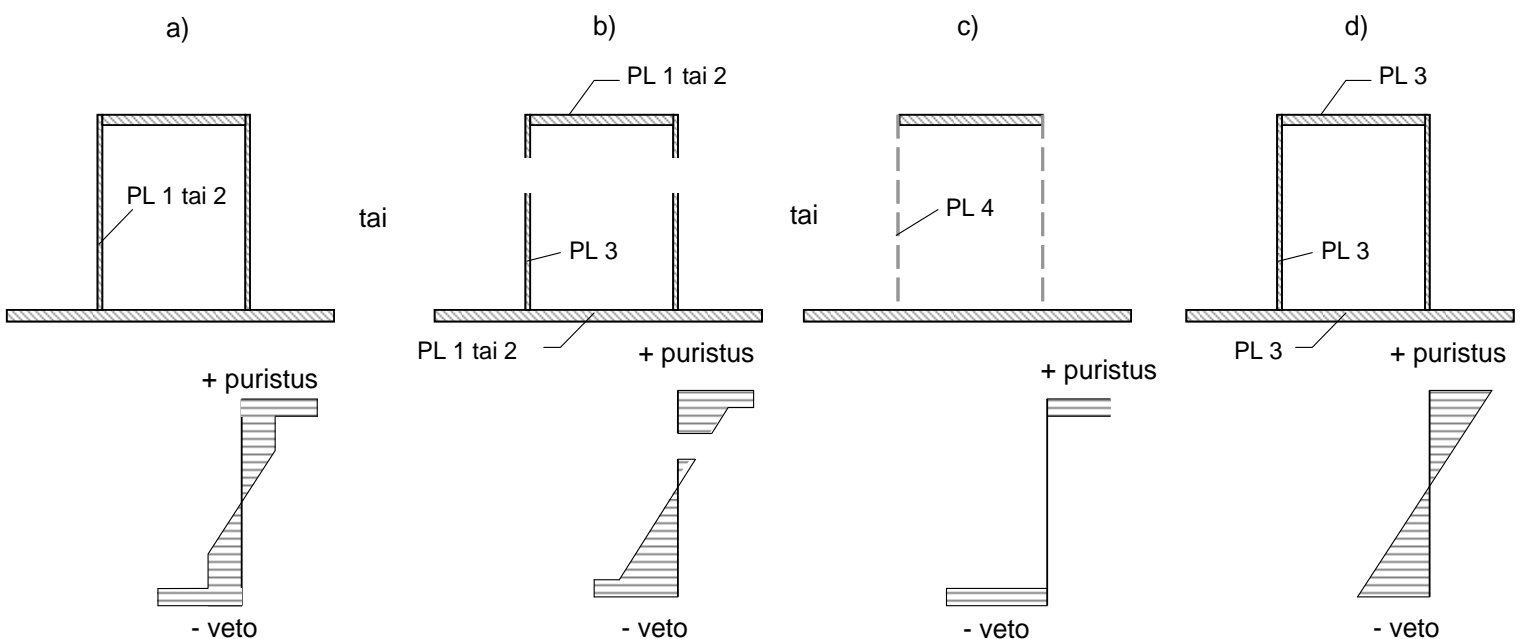
WQ- palkin poikkileikkausluokka määräytyy kokonaan tai osittain puristettuina olevien uumien ja laipan leveys-paksuussuhteista (SFS-EN 1993-1-1 Taulukko 5.2).

Poikkileikkaukset, joiden uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 3 ja laipat poikkileikkausluokkaan 1 tai 2, voidaan luokitella poikkileikkausluokkaan 2 käyttämällä tehollista uumaa (SFS-EN 1993-1-1 kohta 5.5.2(11), kuva 2.3 b).

Kun uuma mitoitetaan vain leikkausvoimille eikä uumaa mitoiteta taivutukselle, poikkileikkaus voidaan luokitella poikkileikkausluokkiin 2, 3 tai 4 vain laippojen luokituksen perusteella (SFS-EN 1993-1-1 kohta 5.5.2 (12)).

Hybridipalkeissa ylä- tai alalaipan myötöraja saa olla korkeintaan kaksi kertaa uuman myötöraja (SFS-EN 1993-1-5 kohta 4.3 (6)), edellyttäen että uuman tehollinen pinta-ala määritetään käyttäen puristetun laipan myötörajaa  $f_{yf}$  (SFS-EN 1993-1-5 kohta 4.3 (6b)).

Teräspalkin poikkileikkauksen taivutuskestävyys voidaan tarkistaa joko normaalitapaan määrittämällä tehollinen poikkileikkaus osan (laipat tai uuma) suurimman myötörajan mukaan tai määrittämällä koko palkin poikkileikkausluokka laippojen luokituksen perusteella (SFS-EN 1993-1-1 kohta 5.5.2 (12)) tai kuvan 2.3 mukaan (SFS-EN 1993-1-1 kohta 5.5.2(11)).



**Kuva 2.3:** Teräspalkin poikkileikkauksen taivutuskestävyyden tarkistaminen.



**Huom!**

Kuvassa 2.3b uuman tehoton alue lasketaan standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaan. Kuvassa 2.3a on hybridipalkki, jossa uuma ei ole täysin plastisoitunut.

Kuvan 2.3c palkki on piirretty siten, että vain laipat ottavat taivutusta ja uuma ottaa leikkausta. Tässä Normikortissa esitettyssä laskentamenetelmässä myös uumat voivat ottaa taivutusta, ks. esim. kohta 2.4.5 Tapaus 1. Standardien SFS EN 1993-1-1 ja SFS EN 1993-1-5 taivutuskestävyys voidaan laskea joko laipan painopistelinjan mukaan tai laipan yläreunan mukaan. Tässä normikortissa suositellaan keskiviivan käyttöä.

**2.3.1 WQ- palkin ylälaippa**

(SFS-EN 1993-1-1 taulukko 5.2)

$b_{f1}$  on ylälaipan leveys (kts. Kuva 2.1)

$t_{f1}$  on ylälaipan paksuus

$t_w$  on uuman paksuus

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_{y1}}$$

Poikkileikkausluokka 1 :  $(b_{f1} - 2t_w) / t_{f1} \leq 33\varepsilon$

Poikkileikkausluokka 2 :  $(b_{f1} - 2t_w) / t_{f1} \leq 38\varepsilon$

Poikkileikkausluokka 3 :  $(b_{f1} - 2t_w) / t_{f1} \leq 42\varepsilon$

Poikkileikkausluokka 4 :  $(b_{f1} - 2t_w) / t_{f1} > 42\varepsilon$

**2.3.2 WQ- palkin uuma**

$h_w$  on uuman korkeus

$t_w$  on uuman paksuus

$\alpha$  on puristetun uuman (tapauksesta riippuen puristettu uuma sijaitsee joko plastisen akselin ylä- tai alapuolella) suhteellinen osuus koko uuman pinta-alasta. Palkin plastinen akseli sijaitsee siten, että puristettu ja vedetty poikkileikkausala ovat yhtä suuret, kun  $N_{Ed} = 0$ .

$\Psi$  on levyn reunajännitysuhde

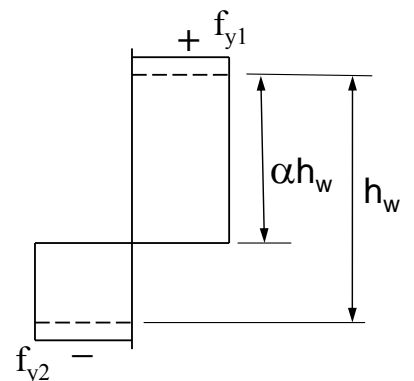
$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_{y, \max}}$$

Hybridipalkeilla  $f_{y, \max} = \max(f_{y1}, f_{y2}, f_{yw})$

Poikkileikkausluokka 1:

$$\text{kun } \alpha > 0,5 : h_w / t_w \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

$$\text{kun } \alpha \leq 0,5 : h_w / t_w \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$$



Poikkileikkausluokka 2 :

$$\text{kun } \alpha > 0,5: h_w / t_w \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

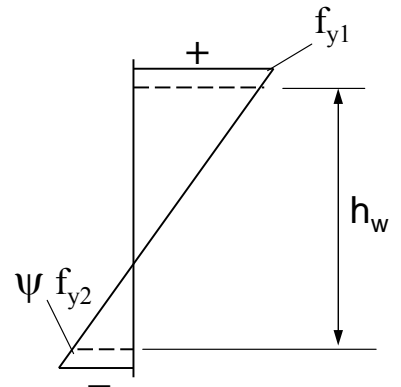
$$\text{kun } \alpha \leq 0,5: h_w / t_w \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$$

Osan jännitys jakauma  
(puristus positiivinen)

Poikkileikkausluokka 3 :

$$\text{kun } \psi > -1: h_w / t_w \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$$

$$\text{kun } \psi \leq -1: h_w / t_w \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$$



Poikkileikkausluokka 4 : Osa, joka ei täytä poikkileikkausluokan 3 raja-arvoja, kuuluu poikkileikkausluokkaan 4 (SFS-EN 1993-1-1 kohta 5.5.2(8))

### 2.3.3 WQ-palkin puristettu alalaippa

(SFS-EN 1993-1-1 taulukko 5.2)

$b_{f1}$  on ylälaipan leveys

$b_{f2}$  on alalaipan leveys

$t_{f2}$  on alalaipan paksuus

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_{y2}}$$

Poikkileikkausluokka 1:

$$(b_{f2} - b_{f1}) / 2t_{f2} \leq 9\varepsilon \quad \text{keskipalkilla}$$

$$(b_{f2} - b_{f1}) / t_{f2} \leq 9\varepsilon \quad \text{reunapalkilla}$$

Poikkileikkausluokka 2:

$$(b_{f2} - b_{f1}) / 2t_{f2} \leq 10\varepsilon \quad \text{keskipalkilla}$$

$$(b_{f2} - b_{f1}) / t_{f2} \leq 10\varepsilon \quad \text{reunapalkilla}$$

Poikkileikkausluokka 3:

$$(b_{f2} - b_{f1}) / 2t_{f2} \leq 14\varepsilon \quad \text{keskipalkilla}$$

$$(b_{f2} - b_{f1}) / t_{f2} \leq 14\varepsilon \quad \text{reunapalkilla}$$

Poikkileikkausluokka 4: Tämä normikortti ei koske tapauksia, joissa puristettu alalaippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 4.

## 2.4 Mitoitus murtorajatilassa

WQ- palkki mitoitetaan murtorajatilassa standardin SFS- EN 1990, standardin SFS-EN 1991 kyseeseen tulevien osien sekä standardin SFS-EN 1993 kyseeseen tulevien sekä em. standardien kansallisten liitteiden mukaan ottaen huomioon normikortin kohdassa 2.4 esitetyt lisäohjeet.

### 2.4.1 Leikkausvoimakestävyys, kun leikkauslommahdus ei ole määräävä

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.17})$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_w / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}, \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.18})$$

missä:

$A_v = \eta \sum (h_w t_w)$  on leikkauspinta-ala

$\eta = 1,20$  kun teräslaji on S235, S275, S355, S420 tai S460.

$\eta = 1,0$  kun teräslaji on S500.

**Huom !**

Palotilanteessa katso kohta 3.5

### 2.4.2 Vääntökestävyys, kun leikkauslommahdus ei ole määrävä

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.23})$$

WQ- palkin tapauksessa:

$$T_{Ed} = T_{t,Ed},$$

missä  $T_{t,Ed}$  on vapaan väännön mitoitusarvo (St. Venant).

$$T_{Rd} = \frac{2At (f_w / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

Huom. Kaavoissa on oletettu, että uuma on kriittinen. Jos laipat ovat kriittiset, niin myötöraja  $f_w$  korvataan kyseisen laipan myötörajalla.

Leikkausjännitykset väännöstä lasketaan:

$$\tau_{t,Ed} = \frac{T_{t,Ed}}{2At},$$

missä:

$\tau_{t,Ed}$  on leikkausjännitykset vapaasta väännöstä  
 $A$  on kotelon seinämän keskiviivan sisään jäävä pinta-ala  

$$A = (b_{f1} - t_w) \cdot \left( h_w + \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \right)$$
  
 $t$  on pienin seinämän paksuus (minimi arvoista  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  tai  $t_w$ )

### 2.4.3 Leikkausvoima ja vääntökestävyys, kun leikkauslommahdus ei ole määrävä

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,T,Rd}} \leq 1,0 \quad \text{Huom.1.}$$

$$V_{c,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_w / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] V_{c,Rd}, \quad \text{Huom.2.}$$

missä  $\tau_{t,Ed}$  on vapaasta väännöstä aiheutuvat leikkausjännitykset ja  $V_{c,Rd}$  lasketaan kohdan 2.4.1 mukaan.  $V_{Ed}$  sisältää sekä leikkauksen että väännön osuuden.

Huom.1 ja 2. SFS EN 1993-1-1 kaavoissa 6.25 ja 6.28 alaindeksi pl on korvattu indeksillä c.

Huom.3: Jatkossa käytetään merkintää  $V_{pl,T,Rd}$

#### 2.4.4 Leikkauslommahdus leikkausvoimasta ja väännöstä

Jäykistämättömät uumalevyt, joiden  $h_w/t_w$  on suurempi kuin  $\frac{72}{\eta} \varepsilon$  tulee tarkistaa leikkauslommahdukseksi ja tuilla tulee käyttää poikittaisjäykisteitä.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_w [N/mm^2]}}$$

missä:

$h_w$  on uuman korkeus (kuva 2.1)

$t_w$  on levyn paksuus

Todentaminen, kun mukana on sekä leikkaus että vääntö(  $V_{Ed}$  sisältää sekä leikkauksen että väännön osuuden):

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0, \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 5.10})$$

missä WQ- palkin uumien leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_w h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 5.1})$$

missä uuman osuus lasketaan kaavasta:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_w h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 5.2})$$

missä:

$\chi_w$  on uuman osuus leikkauslommahduskestävyydestä (Taulukko 2.1)

$h_w$  on uuman korkeus

$t_w$  on uuman paksuus

$f_w$  on uuman myötöraja.

Huom. Standardin SFS-EN 1993-1-5 kaavat 5.1 ja 5.2 on kirjoitettu ajatellen 1-uumaista profiilia. WQ -palkin tapauksessa otetaan huomioon, että palkissa on kaksi uumaa.

**Taulukko 2.1:** Uuman osuus  $\chi_w$  leikkauskestävyydestä (Ei- jäykkä päätyjäykiste)

$\bar{\lambda}_w$	$\chi_w$
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	$\eta$
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

Muunnettu hoikkuus lasketaan kaavasta:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{f_w / \tau_{cr}}, \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 5.3})$$

missä:

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 5.4})$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t_w^2}{12(1-\nu^2) h_w^2} = 190000 (t_w / h_w)^2 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava A.1})$$

$t_w$  on levyn paksuus

$h_w$  on uuman korkeus

$E_w$  on uumateräksen kimmokerroin (210000 MPa)

$\nu$  on teräksen suppeumaluku (0,30)

$k_\tau$  on leikkauslommahduskerroin, joka lasketaan levyille, joissa on poikittaiset jäykisteet tai kaavoista:

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w / a)^2, \quad \text{kun } \frac{a}{h_w} \geq 1 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava A.5})$$

$$k_\tau = 4 + 5,34(h_w / a)^2, \quad \text{kun } \frac{a}{h_w} < 1 \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava A.5})$$

missä:

$h_w$  on uuman korkeus

$a$  on kahden peräkkäisen pystyjäykisteen välinen etäisyys. Ulokepalkin tapauksessa tarkastellaan kuvan 2.4 mukaista ulokkeen osuutta, jolloin ulokkeen päässä tulee myös olla uumajäykiste.

**Kuva 2.4:** Etäisyys  $a$  ulokepalkin tapauksessa.

**Laippojen osuus** leikkauslommahduskestävyyteen voidaan ottaa huomioon, jos laipan kestävyttä ei hyödynnetä täysin taivutuskestävyyttä laskettaessa ( $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ ):

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right], \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 5.8})$$

missä:

$b_f$  ja  $t_f$  valitaan sen laipan mukaan, joka antaa pienimmän aksiaalisen kestävyuden

$b_f$  saa olla enintään  $15 \varepsilon t_f$  uuman molemmilla puolin

$f_{yf}$  (SFS-EN 1993-1-5 kohta 5.4(1))  
on laipan myötöraja

$M_{f.Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$  on plastisuusteorian mukainen poikkileikkauksen taivutuskes-

tävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon;

$$c = a \left( 0,25 + \frac{1,6b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_w} \right). \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kohta 5.4 (1)})$$

### 2.4.5 Taivutuskestävyys

**Tapaus 1: Leikkausvoiman ja väännön summa on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{pl,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutusmomentti on alle puolet alalaipan plastisuusteorian mukaisesta taivutuskestävyydestä (EN 1993-1-1 kohta 6.2.8 (2)). Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.**

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.12})$$

Poikkileikkausluokka 1 ja 2:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.13})$$

Poikkileikkausluokka 3:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.14})$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.15})$$

missä:

$W_{pl}$	on plastisuusteorian mukainen poikkileikkauksen taivutusvastus
$W_{el}$	on kimmoteorian mukainen poikkileikkauksen taivutusvastus
$W_{eff}$	on poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus
$\gamma_{M0}$	on poikkileikkauksen taivutuskestävyyden osavarmuusluku = 1.0.

$W_{el,min}$  ja  $W_{eff,min}$  voidaan laskea joko laipan painopistelinjan mukaan tai laipan yläreunan mukaan. Tässä normikortissa suositellaan keskiviivan käyttöä .

**Tapaus 2: Leikkausvoiman ja väännön summa on yli puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{pl,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutusmomentti on alle puolet alalaipan plastisuusteorian mukaisesta taivutuskestävyydestä (EN 1993-1-1 kohta 6.2.8 (4)). Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.**

Käytettävä plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden laskenta-arvo  $M_{V,Rd}$  määritetään arvosta  $M_{c,Rd}$  käyttämällä leikkauspinta-alalle  $A_v$  (kohta 2.4.1) pienennettyä myötörajaa

$$(1-\rho) f_w \quad , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-1 kaava 6.45})$$



missä:

$$\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2,$$

kuitenkin  $M_{V,Rd} \leq M_{c,Rd}$ ,

missä  $M_{c,Rd}$  lasketaan kohdan 2.4.5 tapaus (1) mukaan.

**Tapaus 3: Leikkausvoiman ja väännön summa on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{pl,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutusmomentti on yli puolet alalaipan plastisuusteorian mukaisesta taivutuskestävyydestä** (Design of Shallow Floor Construction to Eurocodes 3 and 4, SCI Document RT435 2.7 (20)). Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.

Vaaditaan, että

$$\left( N_{p,pl,Rd,eff} / N_{p,pl,Rd} \right)^2 + \left( M_{p,Ed} / M_{p,pl,Rd} \right)^2 \leq 1.0, \text{ missä}$$

$N_{p,pl,Rd,eff}$  on alalaipan pienennetty vetokestävyyden mitoitusarvo

$N_{p,pl,Rd}$  on alalaipan plastinen vetokestävyys

$M_{p,Ed}$  on alalaippaan vaikuttava poikittainen taivutusmomentin mitoitusarvo

$M_{p,pl,Rd}$  (tai  $M_{p,el,Rd}$ ) on alalaipan poikittainen plastinen taivutuskestävyys palkin poikkileikkaukseluokan mukaisesti. Lasketaan metrin pituiselle matkalle

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys lasketaan uudelleen alalaipan pienennetyn vetokestävyyden avulla. Pienennys voidaan ottaa huomioon taivutus- ja vetokestävyyden laskennassa pienentämällä alalaipan myötörajaa seuraavasti:

$$f_{y,alalaippa} = f_{y2} \sqrt{1 - \left( M_{p,Ed} / M_{p,pl,Rd} \right)^2}$$

On huomattava, että sama reduktio pätee myös puristetulle alalaipalle poikkileikkaukseluokissa 1-3.

**Tapaus 4: Leikkausvoiman ja väännön summa on yli puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{pl,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutusmomentti on yli puolet alalaipan plastisuusteorian mukaisesta taivutuskestävyydestä.** Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.

Lasketaan plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden laskenta-arvo  $M_{V,Rd}$  käyttämällä leikkauspinta-alalle  $A_v$  leikkausvoiman ja väännön yhteisvaikutuksesta pienennettyä myötörajaa  $(1-\rho)f_w$  ja alalaipalle pienennettyä myötörajaa

$$f_{y,alalaippa} = f_{y2} \sqrt{1 - \left( M_{p,Ed} / M_{p,pl,Rd} \right)^2}$$

On huomattava, että sama reduktio pätee myös puristetulle alalaipalle poikkileikkausluokissa 1-3.

Lisäksi lasketaan poikkileikkauksen poikkileikkausluokan mukainen taivutuskestävyys käyttäen vain alalaipalle poikittaisesta taivutuksesta johtuvaa redusoitua myötörajaa. Edelleen valitaan kestävyudeksi kahdesta lasketusta taivutuskestävyyden arvosta pienempi.

**Tapaus 5: Uuman leikkausvoiman ja väännön summa on yli puolet uuman leikkauskestävyydestä**  
( $\bar{\eta}_3 > 0.5$ ) (SFS-EN 1993-1-5 kohta 7.1 (1))

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus WQ- palkin uumassa tarkistetaan kaikissa poikkileikkausluokissa seuraavasta ehdosta:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{kun } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (\text{SFS-EN 1993-1-5 kaava 7.1})$$

missä  $M_{f,Rd}$  on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon;

$M_{pl,Rd}$  on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun poikkileikkaus koostuu tehollisista laipoista ja täysin tehollisesta uumasta poikkileikkausluokasta riippumatta

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

Taivutuskestävyyksiä laskettaessa on otettava huomioon alalaipalla poikittaisen taivutusmomentin aiheuttama reduktio.  $f_{y,alalaippa}$  lasketaan kohdan 4 mukaan.

**Tapaus 6: Kuvan 2.3 d mukaiset reunajännitykset tarkastetaan kimmoteorian mukaan. Alalaipan kestävyys tarkastetaan kuten tapaus kolme 3. Uuman leikkaus - ja vääntökestävyys tarkastetaan tarvittaessa tapauksen 5 mukaan.**

#### 2.4.6 Puristetun laipan lommahdus palkin taivutustason suunnassa

Palkin taipumisesta aiheutuvan uuman lommahduksen estämiseksi, uuman hoikkuuden  $h_w/t_w$  tulee täyttää seuraava ehto:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}, \quad (\text{SFS-EN1993-1-5 kaava 8.1})$$

missä:

$A_w$  on uumien yhteenlaskettu pinta-ala;

$A_{fc}$	arvona käytetään sitä pinta-alaa, joka vastaa suurempaa voimista: $A_{f1}f_{y1}$ ja $A_{f2}f_{y2}$
$h_w$	on uuman korkeus;
$t_w$	on uuman paksuus.
$f_{yf}$	on valittava $A_{fc}$ vastaavan laipan myötöraja

Tekijän  $k$  arvo valitaan seuraavasti (SFS-EN 1993-1-5 kohta 8(1)):

- plastista kiertymistä hyödynnetään:  $k = 0,3$
- plastisuusteorian mukaista taivutuskestävyyttä hyödynnetään:  $k = 0,4$
- kimmoteorian mukaista taivutuskestävyyttä hyödynnetään:  $k = 0,55$ .

### 2.4.7 Palkin vääntö asennustilanteessa

Palkin vääntö asennustilanteessa on tarkastettava ontelolaataston painolle ja muille asennustilanteen kuormille. Lisäksi tulee ottaa huomioon ainakin seuraavat seikat:

- asennusaikaisena hyötykuormana käytetään vähintään  $q_k = 0,50 \text{ kN/m}^2$ , ellei tapauskohtaisesti toisin sovi
- palkin pään liittyminen pilareihin tai muihin tukirakenteisiin otetaan huomioon tapauskohtaisesti
- asennusaikaisen muun tuennan tarve tulee tutkia tapauskohtaisesti.
- asennussuunnitelma tulee tehdä yhteistyössä rakennesuunnittelijan kanssa

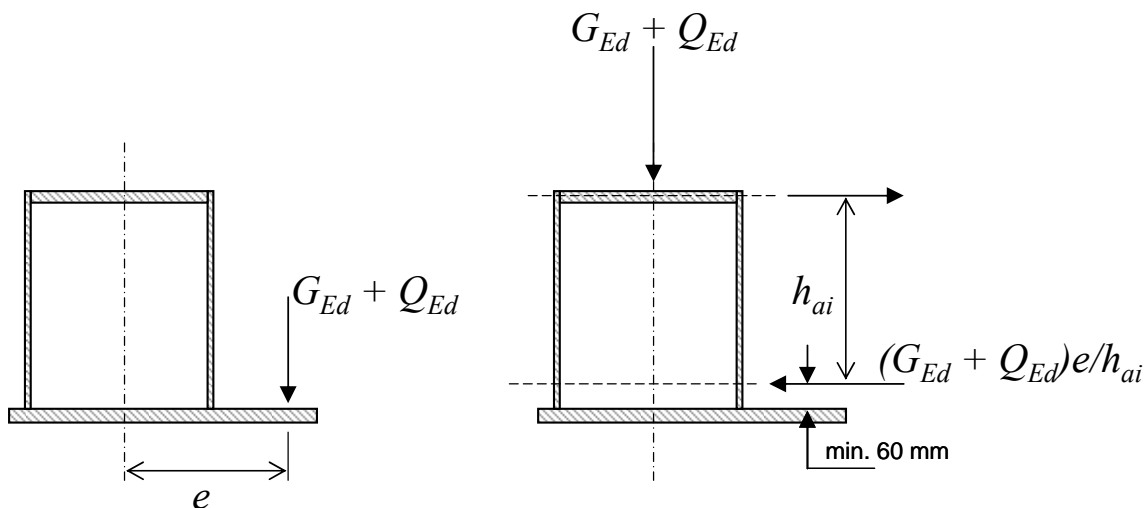
### 2.4.8 Reunapalkin vääntö valmiissa rakenteessa

Palkin vääntö asennustilanteessa tarkastetaan kohdan 2.4.7 mukaisesti. Palkin vääntö valmiissa rakenteessa tarkastetaan tämän kohdan (kohta 2.4.8) mukaisesti. Epäkeskisestä kuormituksesta aiheutuva reunapalkin vääntö muutetaan kuvan 2.5 mukaiseksi voimapariksi. Mitoituksessa palkin ylälaipan kuorma otetaan puristuksena betonille ja alaosan veto saumaraudoille, jotka vastaanottavat voiman saumavalun kovetuttua, ja jotka mitoitetetaan vetovoimalle:

$$F_{av,Ed} = (G_{Ed} + Q_{Ed})e / h_{ai}$$

missä:

$G_{Ed}$	on palkille tulevat rakenteiden omat painot sisältäen laataston ja saumabetonin painot
$Q_{Ed}$	on palkille tuleva laataston hyötykuorma
$e$	on kuormituksen epäkeskisyyden suhteeseen palkin vääntökeskiön suhteen
$h_{ai}$	on palkin ylälaipan betonin ja vetoraudoituksen painopisteakseliä välinen etäisyys.



**Kuva 2.5:** Epäkeskisen kuormituksen aiheuttama vääntö reunapalkissa.

Tässä normikortissa ei käsitellä muita tapoja reunapalkin väännöstä aiheutuvien vaikutusten huomioonottamiseksi.

### 2.4.9 Keskipalkin vääntö lopullisessa tilanteessa

- Jos keskipalkin epäkeskinen kuormitus on vähäinen, voidaan keskipalkin vääntö mitoittaa palkin ylittävällä ripustusraudoituksella lisäämällä leikkausvoimaa palkin mitoituksessa 1,1, jos ehto (1) on voimassa:

$$(G_{y1,Ed} + Q_{y1,Ed}) / (G_{y2,Ed} + Q_{y2,Ed}) \geq 0,7 \quad (1)$$

Alaindeksit  $1$  ja  $2$  ehto (1) voivat tarkoittaa myös kuormaresultanteja. Indeksit valitaan siten, että indeksi 1 vastaa pienempää kuormitusta. Ehtotarkastelu suoritetaan tapauskohtaisesti eri kuormitusyhdistelmille ottaen huomioon standardeissa SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1993-1-1 ja niiden kansallisissa liitteissä esitetyt säännöt. Huom. Ehto (1) sisältää vain yhden hyötykuorman.

- Jos ehto (1) ei ole voimassa, keskipalkin vääntö otetaan vastaan keskipalkin läpäisevillä saumaraudoilla, jotka sijoitetaan kuvan 2.6 mukaisesti. Mitoituksessa palkin ylälaipan kuorma otetaan puristuksena betonille ja alaosan veto palkin läpäisevälle saumaraudalle, joka mitoitetetaan vetovoimalle:

$$F_{av,Ed} = [(G_{y2,Ed} + Q_{y2,Ed})e_2 - (G_{y1,Ed} + Q_{y1,Ed})e_1] / h_{a1}$$

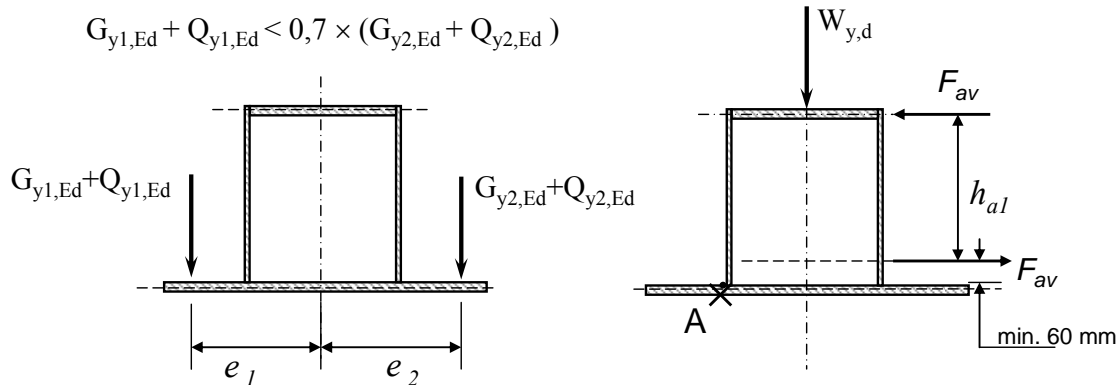
missä:

$G_{yi,Ed}$  on palkille  $i$  puolelta tulevat rakenteiden omat painot sisältäen laataston ja saumavalun painot

$Q_{yi,Ed}$  on palkille  $i$  puolelta tuleva laataston hyötykuorma

$e_i$  on kuormituksen epäkeskisyyden palkin  $i$  puolella vääntökeskiön suhteen

$h_{a1}$  on palkin ylälaipan betonin ja vetoraudoituksen painopistekselien välinen etäisyys



- Kriittinen piste A:  
Alalaipan alapinnassa uuman ja alalaipan liitoksessa (kts. Kohta 2.5.1)

- Ripustusteräksen minimietäisyys alalaipan yläpinnasta 60 mm

**Kuva 2.6:** Keskipalkin epäkeskisen kuormituksen ottaminen palkin läpäisevällä saumaraudoituksella.

Tässä Normikortissa ei käsitellä muita tapoja ottaa huomioon keskipalkin vääntö kuin ripustusraudoitukset ja uumien läpimenevät raudoitukset.

## 2.5 WQ- palkki käyttörajatilassa

### 2.5.1 Jännitykset kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa

Kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa käytetään seuraavaa myötöehtoa poikkileikkauksen kriittisessä pisteessä (vapaasti tuetulla yksiaukkoisella palkilla, jossa ei ole uloketta piste A, kuva 2.6):

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq f_{y2} \quad ,$$

missä:

$\sigma_x$	on normaalijännitys taivutuksesta y-akselin suhteen
$\sigma_y$	on normaalijännitys poikittaisesta taivutuksesta x-akselin suhteen
$\tau$	leikkausjännitys leikkausvoimasta ja väännöstä.

### 2.5.2 Pystysuuntaiset taipumat

WQ- palkin mitoitus murtorajatilassa perustuu teräsrakenteena tarkasteluun. WQ- palkin ja ontelolaattojen laatastokokeissa on kuitenkin osoitettu, että WQ- palkin ja ontelolaataston välille syntyy yhteisvaikutusta. Tämä yhteisvaikutus otetaan huomioon ontelolaatan mitoituksessa tämän normikortin kohdan 5 mukaisesti.

WQ- palkin lujuuteen tällä yhteisvaikutuksella ei ole merkitystä, mutta WQ-palkin, ontelolaataston ja pin-tabetonin välinen yhteisvaikutus voidaan ottaa huomioon WQ- palkin käyttörajatilan taipumaa laskettaessa. Käytettävän betoniosan tehollisten leveyksien summa on enintään:

$$b_{ef} = L_0/12.$$

Eurokoodin SFS-EN 1994-1-1 kansallisessa liitteessä (NA SFS-EN 1994-1-1 Taulukko 1-FI) annetaan välipohjien pääkannattajan lopputaipumalle raja-arvot käyttörajatilassa. Pysyvän kuorman osuus taipumasta voidaan yleensä kompensoida esikorotuksella. Taipumat lasketaan SFS-EN 1990 lausekkeiden (6.14) mukaisesta kuormien ominaisyhdistelmästä ja (6.16) mukaisesta pitkäaikaisyhdistelmästä.

**Taulukko 2.2:** WQ-palkkien taipumien enimmäisarvot käyttörajatilassa, kun sovelletaan NA SFS-EN 1994-1-1 (ote taulukosta 1-FI).

$w_{max} = w_1 + w_2 + w_3$ Suositeltavat taipumarajat	$w_{max}$	$w_2 + w_3$
Katot	L/200	L/250
Välipohjat yleensä	L/250	L/300
Välipohjat, jotka kannattavat pilareita tai helposti halkeile- via seinä kantavat rakenteet seinien asennuksen jälkeen	L/400	L/500

$L$  = jänneväli

$w_1$  = taipuma pysyvistä kuormista heti kuorman vaikutuksen alkamisen jälkeen (SFS-EN 1990 lausekkeet (6.14))

$w_2$  = pitkäaikaistaipuma pysyvistä kuormista (SFS-EN 1990 lausekkeet (6.16))

$w_3$  = taipuma muuttuvista kuormista (SFS-EN 1990 lausekkeet (6.16))

$w_{max}$  = kokonaistaipumasta näkyvä osuus, kun esikorotus otetaan huomioon.

### 3. MITOITUS PALOTILANTEESSA

#### 3.1 Yleistä

Palkki voidaan mitoittaa standardipaloluokkiin R15-R120 tai käyttäen toiminnallista palomitoitusta. Poikkileikkauksen lämpötilat määritetään standardin SFS-EN 1993-1-2 mukaan, kun palkki on valettu pääosin betonirakenteiden sisään siten, että vain palkin alalaippa tai alaosa on palolle alttiina. Laskennassa käytetään standardin SFS-EN 1993-1-2 mukaisia materiaalimalleja.

Käytettäessä kokonaistarkastelua rakenteiden mitoittamiseksi palotilanteessa seuraavat asiat otetaan huomioon: vauriomuoto palotilanteessa, lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet ja sauvojen jäykkyys sekä termisten muodonmuutosten vaikutukset (epäsuorat vaikutukset palotilanteessa) (SFS-EN 1993-1-2 kohta 2.4.4). Kappaleissa 4.2 ja 4.3 esitetyt palkin lämpötilan nousua määrittävät kaavat ovat voimassa palosuojaamattomalle ja palosuojatulle palkille. Tässä esitetyt kaavat ja menetelmät soveltuvat lähinnä määräysten mukaiseen standardi palomitoitukseen, toiminnallinen palomitoitus on aina tutkittava tapauskohtaisesti.

Luvussa 3 esitetyt kaavat on kirjoitettu suojaamattomalle teräsrakenteelle. Käytettäessä erilaisia palosuojauksia käytettävien teräksen myötörajojen pienennystekijät tarkistetaan tapauskohtaisesti riippuen käytettävästä palosuojamateriaalista. Luvussa 3 käytetyt merkinnät ovat SFS -EN 1993-1-2 mukaiset, jos ei toisin ole esitetty.

#### 3.2 Kuormaresultantin sijainti

Tukireaktion paikka WQ-palkin alalaipalla on ontelolaattarakenteissa ontelolaatan tukialueen keskipisteessä (kuva 2.2). Umpilaatan tukireaktio on etäisyydellä  $b/3$  palkin uuman kyljestä, missä  $b$  = palkin alalaipan ulokkeen pituus (kuva 2.2). Kuorilaattaelementeillä tukireaktio voidaan asettaa varmalla puolella kohtaan  $b_j + (b - b_j)/3$ , missä  $b_j$  = saumavalun paksuus (kuva 2.2).

#### 3.3 Ripustusraudoituksen huomioon ottaminen

Palotilanteessa ontelolaatan ripustusraudoituksen voidaan olettaa toimivan alalaipan poikittaista taivutusta vähentävästi. Tällöin tulee kyseeseen vain ripustusterästyyppi, jossa raudoite kulkee WQ -palkin yli.

Ripustusteräket lasketaan kahdessa vaiheessa:

**Vaihe 1:** Tarkastetaan, riittävätkö ripustusteräket kantamaan palkin alalaipalle tulevan palonaikaisen kuorman ilman alalaippaa.

Kuorma palkin tukipisteeseen  $R_{Ed} = (b_{hc} \times p_{fi,Ed})$

Ripustusteräksen mitoitusehto ( $A_b, f_{y,b}$ , terästen nousukulma 45 °)

$$A_b \times f_{y,b} \geq \sqrt{2} \times R$$

$p_{fi,Ed}$  = WQ -palkin kuorma palotilanteessa [kN/m]

$b_{hc}$  = ontelolaatan leveys (samalla saumaterästen jako)

$A_b$  = ripustusraudoituksen poikkileikkauksen ala (=  $\pi \cdot r^2$ )

$f_{y,b}$  = ripustusraudoituksen myötöraja, kun teräksen lämpötila on 20 °C.

Jos ripustusteräket eivät riitä, lasketaan ripustusteräket palotilanteessa vaiheen 2 mukaisesti.

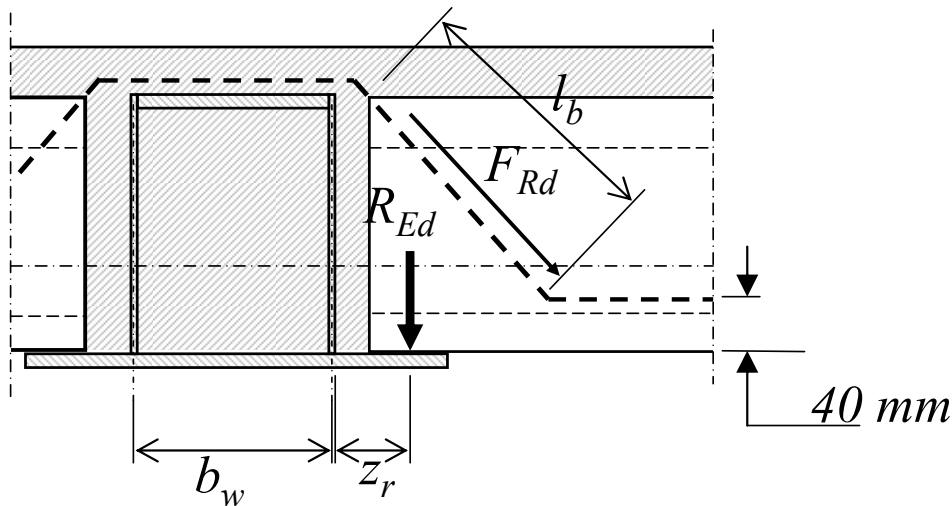
Palkki mitoitetetaan alennetulle alalaipan myötöjännitykselle samoin kuin ilman ripustusteräksiä.

**Vaihe 2:** Ripustusraudoituksen kestävyuden mitoitusarvo  $F_{Rd}$  WQ-palkin uuman lämpötilan funktiona:

$$F_{Rd} = f_{y2} (1 - k_{y,\theta}) \frac{z_r^2}{3E_{f2,\theta} I_{f2} l_b} (2z_r + 3b_w) E_b A_b^2 \leq f_{y,b} A_b ,$$

missä

$f_{y2}$	on WQ -palkin alalaipan myötöraja
$k_{y,\theta}$	on WQ -palkin alalaipan tehollinen myötörajan pienennystekijä lämpötilassa $\theta$ (SFS-EN 1993-1-2 taulukko 3.1)
$E_{f2,\theta}$	= $k_{E,\theta} E_f$ on WQ -palkin alalaipan kimmokerroin lämpötilassa $\theta$ (SFS-EN 1993-1-2 taulukko 3.1)
$I_{f2}$	= $(b_{hc} \cdot t_{f2}^3 / 12)$ palkin leuan jäyhyysmomentti, missä $b_{hc}$ = ontelolaatan leveys (= ripustusraudoitusten jakoväli) ja $t_{f2}$ = WQ -palkin alalaipan paksuus
$l_b$	on raudoitteen nousevan osan pituus ( $\approx \sqrt{2} \times h_w$ , missä $h_w$ = palkin uuman korkeus)
$E_b$	on ripustusraudoituksen kimmokerroin normaalilämpötilassa
$A_b$	on ripustusraudoituksen poikkileikkauksen ala (= $\pi r^2$ )
$f_{y,b}$	on ripustusraudoituksen myötöraja, kun teräksen lämpötila on 20 °C.
$z_r$	on laataston tukireaktion resultantin etäisyys palkin uuman kyljestä
$b_w$	on palkin uumien keskiviivojen väli väli.



**Kuva 3.1:** Ripustusraudoitteen kestävyuden määrittäminen palotilanteessa.

### 3.4 Poikkileikkausluokan määrittäminen

Poikkileikkausluokkien 1...4 raja-arvot määritetään samojen kaavojen perusteella kuin normaalilämpötilassa, mutta pienenedyn  $\varepsilon$ -arvon suhteen:

$$\varepsilon = 0,85 [235 / f_y]^{0,5} , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-2 kaava 4.2})$$



missä:

$f_y$  on tarkasteltavan levyosan myötöraja, kun lämpötila on 20 °C.

Pienennystekijä 0,85 ottaa huomioon lämpötilan kohoamisesta aiheutuvat vaikutukset.

### 3.5 WQ-palkin poikkileikkauksen kestävyys palotilanteessa

#### 3.5.1 Leikkausvoimakestävyys

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo  $V_{fi,t,Rd}$  hetkellä  $t$  lasketaan kaavalla:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} V_{Rd} \left[ \gamma_{M0} / \gamma_{M,fi} \right], \quad (\text{SFS-EN 1993-1-2 kaava 4.16})$$

missä:

$V_{Rd}$  on poikkileikkauksen leikkauskestävyys normaalilämpötilassa. Poikkileikkausluokissa 1-3 tarkastelu tehdään joko leikkaus- tai leikkauslommahduskestävyydelle  $V_{Rd} = \min(V_{c,Rd}, V_{b,Rd})$

$\theta_{web}$  on poikkileikkauksen uuman epälineaarista lämpötilajakaumasta laskettu keskimääräinen lämpötila

$k_{y,\theta,web}$  on teräksen tehollisen myötörajan pienennystekijä lämpötilassa  $\theta_{web}$  (Taulukko 4.1)

$\eta$  vastaa kohdan 2.4.1 mukaisia arvoja, kun teräksen lämpötila  $\leq 400$  °C;  
 $\eta = 1,00$ , kun teräksen lämpötila  $> 400$  °C.

$\gamma_{M0}$  määritetään standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaan

$\gamma_{M,fi}$  määritetään standardin SFS-EN 1993-1-2 mukaan

Lisäksi poikkileikkausluokassa 4 tarkastetaan leikkausvoimasta ja väännöstä aiheutuva leikkauslommahdus palotilanteessa kohdan 3.5.4 mukaisesti.

#### 3.5.2 Vääntökestävyys

Vääntökestävyyden mitoitusarvo  $T_{fi,t,Rd}$  hetkellä  $t$  lasketaan kaavalla:

$$T_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} T_{Rd} \left[ \gamma_{M0} / \gamma_{M,fi} \right]$$

missä:

$T_{Rd}$  on poikkileikkauksen vääntökestävyys normaalilämpötilassa

$\theta_{web}$  on poikkileikkauksen uuman epälineaarista lämpötilajakaumasta laskettu keskimääräinen lämpötila

$k_{y,\theta,web}$  on teräksen tehollinen myötörajan pienennystekijä lämpötilassa  $\theta_{web}$  (Taulukko 4.1).

Lisäksi poikkileikkausluokassa 4 tarkastetaan leikkausvoimasta ja väännöstä aiheutuva leikkauslommahdus palotilanteessa kohdan 3.5.4 mukaisesti.

#### 3.5.3 Leikkausvoima ja vääntö

Väännön vaikutuksen huomioon ottava pienennetty leikkauskestävyys lasketaan poikkileikkausluokissa 1- 3 kaavalla:

$$V_{fi,t,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{fi,t,Ed}}{k_{y,\theta,web} (f_w / \sqrt{3}) / \gamma_{M,fi}} \right] V_{fi,t,Rd},$$

missä:

$\tau_{fi,t,Ed}$  on leikkausjännitys vapaasta väännöstä palotilanteessa hetkellä  $t$

$\theta_{web}$	on poikkileikkauksen uuman keskimääräinen lämpötila
$k_{y,\theta,web}$	on teräksen tehollisen myötörajan pienennystekijä lämpötilassa $\theta_{web}$ (Taulukko 4.1)
$V_{fi,t,Rd}$	on poikkileikkauksen vääntökestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa kohdan 3.5.2 mukaisesti.

### 3.5.4 Leikkausvoiman ja väännön aiheuttama uumalevyjen leikkauslommahdus

Uumasta pystyjäykistämättömät levyt, joilla  $h_w/t_w$  on suurempi kuin  $\frac{72}{\eta}\varepsilon$  tulee tarkistaa leikkauslommahdukselle palotilanteessa. Palossa  $\eta$  arvoina käytetään kohdassa 2.4.1 suositeltavia arvoja, kun teräksen lämpötila on enintään 400 °C. Kun teräksen lämpötila on suurempi kuin 400 °C käytetään arvoa  $\eta = 1,00$ .

WQ- palkin uumien leikkauskestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa lasketaan kaavasta:

$$V_{fi,b,Rd} = V_{fi,bw,Rd} + V_{fi,bf,Rd} \leq \frac{\eta k_{p0,2,\theta,web} f_w h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}},$$

missä:

$\eta$  vastaa kohdan 2.4.1 mukaisia arvoja, kun teräksen lämpötila  $\leq 400$  °C;  
 $\eta = 1,00$ , kun teräksen lämpötila  $> 400$  °C.

**Uuman osuus** lasketaan kaavasta:

$$V_{fi,bw,Rd} = \frac{\chi_V k_{p0,2,\theta,web} f_w h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M,fi}},$$

missä:

$\chi_V$  on leikkauskestävyyden pienennystekijä. Arvo lasketaan perustuen materiaaliominaisuuksiin, jotka vastaavat 20 °C lämpötilaa.  
 $h_w$  on uuman korkeus  
 $t_w$  on uuman paksuus  
 $\theta_{web}$  on poikkileikkauksen uuman keskimääräinen lämpötila  
 $k_{p0,2,\theta,web}$  teräksen myötörajan pienennystekijä, kun mitoitusarvona käytetään 0,2-rajaa ja teräksen lämpötila on  $\theta_{web}$  ( Tämä merkintä ei ole standardin SFS-EN 1993-1-2 mukainen. )

**Laippojen osuus** leikkauslommahduskestävyyteen voidaan ottaa huomioon, jos laipan kestävyttä ei hyödynnetä täysin taivutuskestävyyttä laskettaessa ( $M_{Ed} < M_{fi,t,Rd}$ ):

$$V_{fi,bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 k_{p0,2,\theta,if} f_{yf}}{c \gamma_{M,fi}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{fi,t,Rd}} \right)^2 \right],$$

missä:

$b_f$  ja  $t_f$  valitaan sen laipan mukaan, joka antaa pienimmän aksiaalisen kestävyuden  
 $b_f$  saa olla enintään  $15\varepsilon t_f$  uuman molemmilla puolin  
 $f_{yf}$  on laipan myötöraja + 20 °C -asteen lämpötilassa

$M_{fi,t,Rd}$  on plastisuusteorian mukainen poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo ajan hetkellä  $t$ , kun vain teholliset laipat otetaan huomioon;

$$c = a \left( 0,25 + \frac{1,6b_f t_f^2 k_{p0,2,\theta,i} f_{yf}}{t_w h_w^2 k_{p0,2,web} f_w} \right)$$

$\theta_i$  laipan  $i$  lämpötila

$\theta_{web}$  on poikkileikkauksen uuman keskimääräinen lämpötila

$k_{p0,2,\theta,i}$  teräksen myötörajan pienennystekijä, kun mitoitusarvona käytetään 0,2-rajaa ja teräksen lämpötila on  $\theta$  ( Tämä merkintä ei ole standardin SFS-EN 1993-1-2 mukainen, )

Indeksi  $i$  tarkoittaa tarkasteltavaa laippaa.

### 3.5.5 Taivutusmomentti

**Tapaus 1: Leikkausvoiman ja väännön summa on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{fi,t,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutusmomentti on alle puolet alalaipan palotilanteen taivutuskestävyydestä. Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslomahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.**

#### Poikkileikkausluokka 1 ja 2 :

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo  $M_{fi,t,Rd}$  ajan hetkellä  $t$ , kun poikkileikkauksen lämpötilan jakaantuma on muuttuva, voidaan laskea kaavasta:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi} , \quad (\text{SFS-EN 1993-1-2 kaava 4.9})$$

missä:

- $z_i$  on tarkasteltavan pinta-alan  $A_i$  painopisteen ja plastisen neutraaliakselin välinen etäisyys;
- $f_{y,i}$  on tarkasteltavaa pinta-alaa  $A_i$  vastaava nimellinen myötöraja  $f_y$ , joka valitaan positiiviseksi plastisen neutraaliakselin puristetulla puolella ja negatiiviseksi vedetyllä puolella;
- $A_i$  on poikkileikkauksen osan, jonka lämpötila on  $\theta_i$ , pinta-ala;
- $k_{y,\theta,i}$  on teräksen tehollisen myötörajan pienennystekijä lämpötilassa  $\theta_i$  (Taulukko 4.1)
- $\theta_i$  on poikkileikkauksen osan  $A_i$  lämpötila.

#### Poikkileikkausluokka 3 :

Eurokoodissa SFS-EN 1993-1-2 esitetty menetelmä johtaa WQ palkeille varmallalla puolella olevaan ratkaisuun. Palotilanteessa käytetään kuvan 2.3 b mukaista menetelmää ja osien kestävyysredusointi tehdään osa kerrallaan kuten poikkileikkausluokassa 2 edellä, paitsi jos kaikki osat ovat PL 3:ssa

Poikkileikkaukset, joiden uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 3 ja laipat poikkileikkausluokkaan 1 tai 2, voidaan asettaa poikkileikkausluokkaan 2 käyttämällä tehollista uumaa (SFS-EN 1993-1-1kohta 5.5.2(12)).

#### Poikkileikkausluokka 4 :

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo  $M_{fi,t,Rd}$  hetkellä  $t$ , kun poikkileikkauksen lämpötilan jakaantuma on epätasainen, voidaan laskea kaavasta:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{p0,2,\theta_{max}} M_{Rd} \left[ \gamma_{M0} / \gamma_{M,fi} \right],$$

missä:

$M_{Rd}$  on poikkileikkauksen poikkileikkausluokan mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo normaalilämpötilassa

$k_{p0,2,\theta_{max}}$  teräksen myötörajan pienennystekijä, kun mitoitusarvona käytetään 0,2-rajaa joka vastaa teräksen suurinta lämpötilaa  $\theta_{max}$  ajan hetkellä  $t$  (Taulukko 4.1).

**Tapaus 2: Leikkausvoiman ja väännön summa on yli puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{fi,t,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutus on alle puolet alalaipan taivutuskestävyydestä Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.**

Käytettävä plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo  $M_{fi,t,V,Rd}$  lasketaan käyttämällä leikkauspinta-alalle  $A_v$  pienennettyä myötörajaa  $(1-\rho)f_{w,\theta,av}$

$$\rho = \left( \frac{2V_{fi,Ed}}{V_{fi,t,T,Rd}} - 1 \right)^2$$

kuitenkin  $M_{fi,t,V,Rd} \leq M_{fi,t,Rd}$ . Kaavassa  $f_{w,\theta,av}$  uuman painotettu keskimääräinen myötölujuus ajan hetkellä  $t$ .

**Tapaus 3: Leikkausvoiman ja väännön summa on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{fi,t,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutus on yli puolet alalaipan taivutuskestävyydestä Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.**

Vaaditaan, että:

$$\left( N_{p,fi,t,Rd,eff} / N_{p,fi,t,pl,Rd} \right)^2 + \left( M_{p,fi,t,Ed} / M_{p,fi,t,Rd} \right)^2 \leq 1.0, \text{ missä}$$

$N_{p,fi,t,Rd,eff}$  on alalaipan pienennetty vetokestävyys palotilanteessa

$N_{p,fi,t,Rd}$  on alalaipan vetokestävyys palotilanteessa

$M_{p,fi,t,Ed}$  on alalaippaan vaikuttava poikittainen taivutusmomentti palotilanteessa ripustusraudoituksen osuuden vähentämisen jälkeen (kohta 3.3)

$M_{p,fi,t,Rd}$  on alalaipan taivutuskestävyys palotilanteessa poikkileikkausluokan mukaan.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys lasketaan uudelleen alalaipan pienennetyn vetokestävyyden avulla. Pienennys voidaan ottaa huomioon taivutus- ja vetokestävyyden laskennassa pienentämällä alalaipan myötörajaa seuraavasti:

$$f_{y,alalaippa} = k_{y,\theta,i} f_{y2} \sqrt{1 - \left( M_{p,fi,t,Ed} / M_{p,fi,t,Rd} \right)^2}$$

**Tapaus 4: Leikkausvoiman ja väännön summa on yli puolet plastisuusteorian mukaisesta pienennetystä leikkauskestävyydestä  $V_{fi,t,T,Rd}$  ja alalaipan poikittainen taivutus on yli puolet alalaipan taivutuskestävyydestä Näin toimitaan, paitsi jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä tapauksen 5 mukaan.**

Lasketaan plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo  $M_{fi,t,V,Rd}$  käyttämällä leikkauspinta-alalle  $A_v$  leikkausvoiman ja väännön yhteisvaikutuksesta pienennettyä myötörajaa  $(1-\rho)f_{w, \theta,av}$  ja edelleen alalaipalle poikittaisesta taivutuksesta johtuvaa redusoitua myötörajaa:

$$f_{y,alalaippa} = k_{y,\theta,i} f_{y2} \sqrt{1 - \left( M_{p,fi,t,Ed} / M_{p,fi,t,Rd} \right)^2}$$

Lisäksi lasketaan poikkileikkauksen poikkileikkausluokan mukainen taivutuskestävyys käyttäen vain alalaipalle poikittaisesta taivutuksesta johtuvaa redusoitua myötörajaa. Kestävyudeksi valitaan kahdesta lasketusta arvosta pienempi.

**Tapaus 5: Leikkausvoiman ja väännön summa on yli puolet uumien leikkauslommahduskestävyydestä**

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus WQ- palkin uumassa tarkistetaan palotilanteessa analogisesti normaalitilanteen kanssa (kohta 2.4.5 [Tapaus 5]).

**Tapaus 6:**

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus WQ- palkin uumassa tarkistetaan palotilanteessa analogisesti normaalitilanteen kanssa (kohta 2.4.5 [Tapaus 5]).

## 4. POIKKILEIKKAUKSEN LÄMPENEMINEN

### 4.1 Yleistä

Rautaruukki Oyj on teettänyt polttokokeen raportti 404/2003/295, jolla on saatu selville lämpötilan jakautuminen WQ- palkissa sekä suojaamattomana että suojattuna. Tässä kokeessa saatuihin lämpötilajakautumiin perustuen on kehitetty kaksi laskentamenetelmää:

- Yksinkertaistettu menetelmä, joka soveltuu vain standardipalolle.
- Tarkennettu menetelmä, jolla voidaan laskea poikkileikkauksen lämpötilat eri pisteissä ja käyttää tätä mitoituksen perustana. Toiminnallista palomitoitusta voidaan tarkastella vain tarkennetulla menetelmällä.

Laskennassa käytettävät tehollisen myötörajan, suhteellisuusrajan ja kimmokertoimen pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa lasketaan SFS-EN 1993-1-2:n mukaan. Taulukossa 4.1 on esitetty nämä pienennystekijät. Väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti.

**Taulukko 4.1:** Tehollisen myötörajan, suhteellisuusrajan ja kimmokertoimen riippuvuus teräksen lämpötilasta (otteita taulukoista SFS-EN 1993-1-2 taulukko 3.1, ja SFS-EN 1993-1-2 taulukko E.1)

Teräksen lämpötila $\theta_a$	Pienennystekijä lämpötilassa $\theta_a$ suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin $f_y$ tai $E_a$			
	Tehollisen myötörajan pienennystekijä (suhteessa arvoon $f_y$ ) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon $f_y$ ) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Mitoituslujuuden pienennystekijä kuumavalssatuille ja hitsatuille poikkileikkauksen luokan 4 poikkileikkauksille (suhteessa arvoon $f_y$ ) $k_{p,0,2,\theta} = k_{p,0,2,\theta} / f_y$	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon $E_a$ ) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,0000	1,00	1,0000
100 °C	1,000	1,0000	1,00	1,0000
200 °C	1,000	0,8070	0,89	0,9000
300 °C	1,000	0,6130	0,78	0,8000
400 °C	1,000	0,4200	0,65	0,7000
500 °C	0,780	0,3600	0,53	0,6000
600 °C	0,470	0,1800	0,30	0,3100
700 °C	0,230	0,0750	0,13	0,1300
800 °C	0,110	0,0500	0,07	0,0900
900 °C	0,060	0,0375	0,05	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,03	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,02	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,00	0,0000

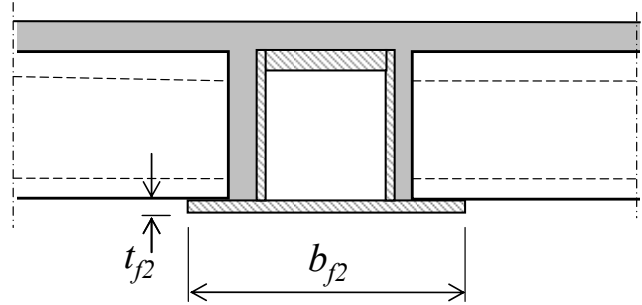
HUOM: Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarisesta interpolointia käyttäen

#### 4.2 Palosuojaamattoman alalaipan $A_m/V$ suhteen laskeminen

Poikkileikkaustekijä  $A_m/V$  on palolle alttiina olevan teräsosan pinta-alan ja tilavuuden suhde [1/m]. WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijä määritetään kaavasta:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{b_{f2} + 2 \cdot t_{f2}}{b_{f2} \cdot t_{f2}}$$

missä  $b_{f2}$  on alalaipan leveys [m]  
 $t_{f2}$  on alalaipan paksuus [m]



Palosuojaamattoman sisällä olevan teräsrakenteen lämpötilan nousu voidaan laskea standardin SFS-EN 1993-1-2 kaavaa (4.25) soveltaen asettamalla varjostusvaikutuksen korjaustekijä ykköseksi (varmalla puolella oleva ratkaisu) seuraavasti:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t, \quad \text{missä:}$$

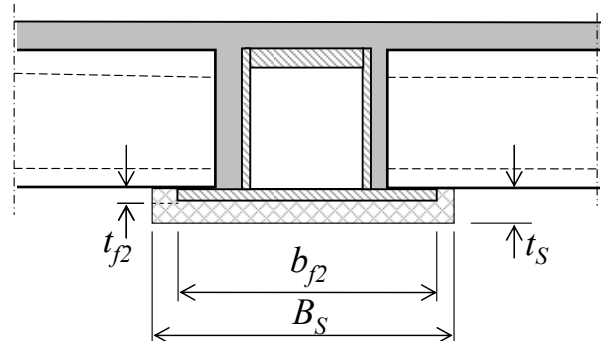
$A_m/V$  on suojaamattoman teräspalkin poikkileikkaustekijä [1/m] ( $A_m/V \geq 10 \text{ m}^{-1}$ )  
 $A_m$  on sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti [ $\text{m}^2/\text{m}$ ]  
 $V$  on sauvan teräsmateriaalin tilavuus pituusyksikköä kohti [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]  
 $c_a$  on teräksen ominaislämpökapasiteetti (SFS-EN 1993-1-2 kohta 3.4.1.2)  
 $\dot{h}_{net}$  on pinta-alayksikköä kohti laskettu nettolämpövuoto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 (lasketaan SFS-EN 1991-1-2 mukaan)  
 $\Delta t$  on aikaväli [s] (saa olla enintään 5 sekuntia)  
 $\rho_a$  on teräksen tiheys =  $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$  (SFS-EN 1993-1-2 kohta 3.2.2.)

#### 4.3 Palosuojatun WQ- palkin alalaipan $A_p/V$ suhteen laskeminen ja lämpötilan laskeminen

Poikkileikkaustekijä  $A_p/V$  on palolle alttiina olevan suojatun teräsosan pinta-alan ja tilavuuden suhde [1/m]. Suojatun WQ- palkin alalaipan poikkileikkaustekijä määritetään kaavasta:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{b_{f2} + 2 \cdot t_{f2}}{b_{f2} \cdot t_{f2}}$$

missä:  $b_{f2}$  on alalaipan leveys [m]  
 $t_{f2}$  on alalaipan paksuus [m]  
 $B_s$  on suojauksen kokonaisleveys [m]  
 $t_s$  on suojauksen paksuus [m].



Palosuojatun alalaipan lämpötila voidaan laskea joko suojausmateriaalin ominaisuuksien mukaan tai käyttäen eri tuotteiden tyyppihyväksynnän mukaisia tai varmennettujen käyttöselosteiden mukaisia valmistajien valmiiksi laskemia taulukoita. Palosuojatun sisällä olevan teräsrakenteen lämpötilan nousu voidaan laskea Eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 mukaan lämpötilan nousun kaavasta:



$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}, \quad (\text{SFS-EN 1993-1-2 kaava 4.27})$$

missä:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

ja

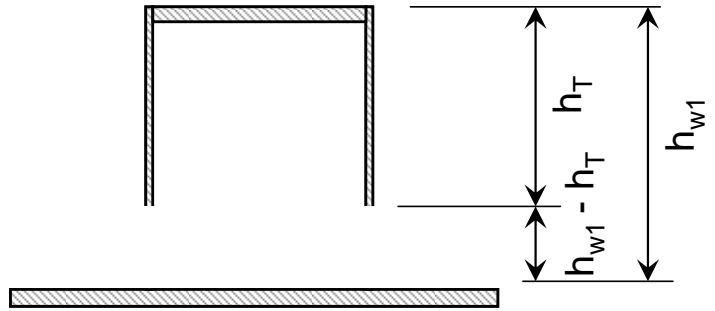
$A_p/V$	on palosuojamateriaalilla eristetyn teräspalkin poikkileikkaustekijä
$A_p$	on palosuojamateriaalilla suojatun pinnan pinta-ala sauvan pituusyksikköä kohti [ $\text{m}^2/\text{m}$ ]
$V$	on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]
$c_a$	on lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti (SFS-EN 1993-1-2 kohta 3.4.1.2) [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]
$c_p$	on palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]
$d_p$	on palosuojamateriaalin paksuus [m]
$\Delta t$	on aikaväli [sekuntia] (enintään 30 sekuntia)
$\theta_{a,t}$	on teräksen lämpötila ajan hetkellä $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\theta_{g,t}$	on palotilan lämpötila ajan hetkellä $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta\theta_{g,t}$	on palotilan lämpötilan nousu ajanjakson $\Delta t$ aikana [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\lambda_p$	on palosuojausjärjestelmän lämmönjohtavuus [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
$\rho_a$	on teräksen tiheys = $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ (SFS-EN 1993-1-2 kohta 3.2.2)
$\rho_p$	on palosuojauksen tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Jos käytetään varmennetun käyttöselosteen tai tyyppihväksynnän mukaisia palosuojamateriaaleja, lämpötilan määrittämisessä sovelletaan niissä esitettyjä laskentatapoja.

#### 4.4 WQ- palkin mitoitus palotilanteessa yksinkertaistetulla menetelmällä

Tässä kappaleessa esitelty yksinkertaistettu menetelmä ei ole voimassa poikkileikkausluokassa 4. Yksinkertaistettu menetelmä soveltuu vain standardipalon mukaisiin tarkasteluihin, ja siinä tehdään seuraavat oletukset:

- Palotilanteessa kuumista savukaasuista siirtyy lämpöä vain palolle alttiina olevaan alalaippaan.
- Alalaipasta lämpö siirtyy edelleen uumaan, mutta ei muualle ympäröiviin rakenteisiin.
- Alalaipassa on tulipalon seurauksena tasainen kohonnut lämpötila.
- Tietty osa uumasta on samassa lämpötilassa kuin alalaippa, eikä tätä osaa uumasta oteta laskennassa lainkaan huomioon.
- Uumasta vähennetyn osan yläpuolella sekä uumassa että ylälaipassa lämpötila on niin alhainen, ettei teräksen kimmokertoimelle ja myötörajalta tarvitse tehdä lämpötilasta aiheutuvia vähennyksiä.
- Kestävyys palotilanteessa määritetään käyttäen tällä tavalla syntynyttä redusoitua poikkileikkausta, jonka alalaipan kimmokertoimelle ja teholliselle myötörajalta tehdään sen lämpötilaa vastaavat vähennykset.



Uuman tehoton alue riippuu alalaipan lämpötilasta. Taulukosta 4.2 voidaan lukea tehottoman alueen ( $h_{w1} - h_T$ ) korkeus eri palonkestoajoille alalaipan lämpötilan mukaan. Taulukossa 4.2 annetaan arvot suojaamattomalle WQ- palkille. Palotilan lämpötilan nousu on standardipalon mukainen. Väliarvot voidaan interpoloida.

Alalaipan paksuuden ollessa yli 30mm käytetään 30mm paksuiselle alalaipalle annettuja arvoja. Ylälaipan paksuuden ollessa yli 30mm käytetään 30mm paksuiselle ylälaipalle annettuja arvoja. Tämä sääntö koskee kaikkia kappaleessa 4 esitettyjä taulukoita 4.3- 4.8.

Poikkileikkauksen kestävyyttä laskettaessa käytetään teräksen tehollista myötörajaa, joka vastaa 2% muodonmuutosta. Katso myös kohta 3.1.

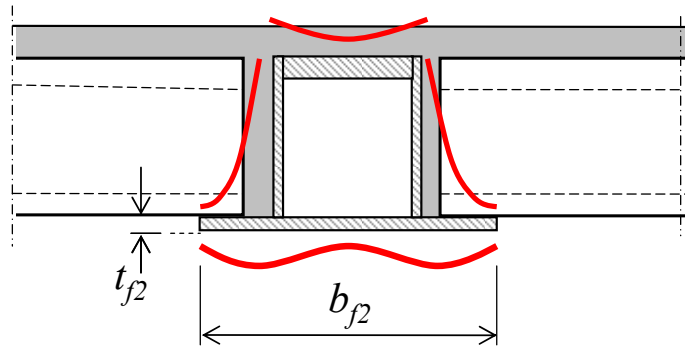
**Taulukko 4.2:** Uuman tehottoman alueen korkeus ( $h_{w1} - h_T$ ) eri palonkestoajoilla alalaipan lämpötilan mukaan. Väliarvot voidaan interpoloida suoraviivaisesti. Palkin korkeus  $h_{w1} \geq 265$  mm. Perustuu lausuntoon (TTY:n Lausunto No 404/2003/298 26.2.2003).

WQ-palkin alalaipan lämpötila	Palonkesto aika [min]			
	30	60	90	120
1000 °C	-	-	130	160
900 °C	-	80	90	110
800 °C	-	50	50	60
700 °C	20	25	25	30
600 °C	10	15	15	20
500 °C	5	10	10	10
400 °C	0	0	0	0

## 4.5 WQ- palkin mitoitus palotilanteessa tarkennetulla menetelmällä

### 4.5.1 Yleistä

Tässä esitetty WQ-palkin lämpötilojen laskentaan tarkoitettu tarkennettu menetelmä perustuu yleisiin termodynamiikan lakeihin, sekä toiminnallista paloa että standardipaloa voidaan tarkastella tämän tarkennetun menetelmän avulla. Tarkennetussa menetelmässä otetaan huomioon lämpötilojen jakautuminen WQ- palkin poikkileikkauksessa. Alalaipasta lämpö siirtyy WQ- palkin alalaipan päälle tuettuun betonirakenteeseen, uumaa pitkin palkin yläosaa kohti sekä WQ- palkin onttoon sisätilaan. Tässä esitetty laskentaperiaate soveltuu lähinnä tietokoneohjelmilla tehtävään mitoituksen.



### 4.5.2 Alalaipan lämpötilan laskeminen

Palotilasta alalaippaan siirtyvä lämpöteho lasketaan samoin kuin yksinkertaistetulla menetelmällä palosuojaamattomille laipoille kohdan 4.2 mukaisesti ja palosuojatuille kohdan 4.3 mukaisesti. Alalaipan lämpötilanousun aikaansaava nettolämpöteho saadaan vähentämällä palotilasta alalaippaan siirtyvästä lämpötehosta alalaipan yläpuolisiin rakenteisiin siirtyvä lämpöteho. Tämä lämpöteho koostuu alalaipoista yläpuoliseen betoniin siirtyvästä lämpötehosta, alalaipasta uumiin johtumalla siirtyvästä tehosta sekä edelleen alalaipasta uumiin ja ylälaippaan säteilemällä siirtyvästä tehosta. Konvektiolämmönsiirtoa kotelon sisällä ei tarvitse ottaa huomioon.

### 4.5.3 Alalaipan yläpuoliseen betonirakenteeseen siirtyvä lämpöteho

Palkin alalaipasta lämpö siirtyy johtumalla yläpuolisiin betonirakenteisiin. Laskentaa varten alalaippa jaetaan osiin, joista kustakin erikseen lasketaan siirtyvä lämpöteho. Tehon laskemiseen tarvittavia betonin lämpötiloja ei tässä menetelmässä lasketa erikseen vaan lämpötiloina käytetään polttokokeisiin sovitettujen elementtimenetelmälaskelmien tuottamia, varmalla puolella olevia lämpötiloja. Betonin termisissä ominaisuuksissa otetaan huomioon lämpötilariippuvuudet.

### 4.5.4 Alalaipasta uumaan johtumalla siirtyvä lämpöteho

Laskennassa uuma ja ylälaippa jaetaan osiin, joille jokaiselle lasketaan lämpötila jokaisena tarkasteluhetkenä. Alalaipasta uumaan johtumalla siirtyvä lämpöteho tarkasteltavana ajanhetkenä määräytyy alalaipan lämpötilan, uuman lämpötilajakauman ja uuman ainepaksuuden mukaan. Teräksen termisissä ominaisuuksissa otetaan huomioon lämpötilariippuvuudet.

### 4.5.5 Alalaipasta kotelon sisään säteilemällä siirtyvä lämpöteho

Lämpö siirtyy WQ- palkin kotelossa pääasiassa säteilemällä. Tässä menetelmässä säteilylämmönsiirto kotelon eri pintojen välillä lasketaan edellisessä kohdassa esitetyn uumien ja ylälaipan lämpötilajakaumien, alalaipan lämpötilan sekä pintojen mittojen ja keskinäisten näkyvyyskertoimien perusteella. Kotelossa oleva kaasun ei oleteta vaikuttavan säteilylämmönsiirtoon.

#### 4.5.6 Uumien ja ylälaipan lämpötilan laskeminen

Lasketun alalaipan lämpötilan nousun perusteella lasketaan uuman ja ylälaipan lämpötilajakaumat ajan funktiona. Lämpötilan nousun tarkasteltavassa uuman tai ylälaipan osassa aikaansaava nettolämpöteho on summa säteilylämpötehosta kotelon muiden pintojen välillä, johtumalla osaan tulevasta tai siitä poistuvasta tehosta sekä viereiseen betoniin johtumalla siirtyvästä tehosta.

#### 4.5.7 Säteilylämmönsiirto

Säteilylämmönsiirto pintojen välillä lasketaan kuten kohdassa 4.5.5.

#### 4.5.8 Lämmönsiirto johtumalla

Lämpö siirtyy johtumalla alalaipasta uumaan ja edelleen uumassa sekä lopuksi uumasta ylälaippaan. Johtumalla siirtyvät lämpötehot voidaan laskea, kun tunnetaan alalaipan lämpötila, uuman ja ylälaipan lämpötilajakaumat sekä uuman ja ylälaipan ainevahvuudet. Teräksen termisissä ominaisuuksissa otetaan huomioon lämpötilariippuvuudet.

#### 4.5.9 Lämmönsiirto johtumalla uumasta ja ylälaipasta betoniin

Uuman viereinen betoni mallinnetaan differenssiverkolla, jonka toinen reuna oletetaan lämpöeristetyksi. Uuman ja ylälaipan lämpötilajakautumien sekä viereisen betonin lämpötilojen perusteella voidaan betoniin teräksestä johtuva lämpöteho laskea. Sekä teräksen, että betonin termisissä ominaisuuksissa otetaan huomioon lämpötilariippuvuus.

### 4.6 Kokeellisesti määritetty lämpötilan jakautuminen WQ-palkeissa, $h_{w1} = 265\text{mm}$

Vaihtoehtoisesti teoreettisten laskelmien sijasta voidaan käyttää tässä kohdassa esitettyjä kokeellisia arvoja jäljempänä esitettyjen soveltuvuuksien rajoissa.

Jäljempänä esitetyt taulukot perustuvat TTY:n Lausuntoon No 404/2003/298 26.2.2003.

**Taulukko 4.3:** WQ-palkkien alalaippojen keskimääräiset lämpötilat  $\theta_{f2}$  [°C] 30, 60, 90 ja 120 minuutin kuluttua standardipolttokokeen alusta. Alalaippa on ilman palosuojausta (TTY:n Lausunto No 404/2003/295 7.2.2003). Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

Koekappale	30 min	60 min	90 min	120 min
10 mm paksun alalaipan lämpötila	566	743	833	912
15 mm paksun alalaipan lämpötila	586	762	850	930
30 mm paksun alalaipan lämpötila	500	705	806	889

**Taulukko 4.4:** WQ-palkkien ylälaippojen keskimääräiset lämpötilat  $\theta_{f1}$  [°C] 30, 60, 90 ja 120 minuutin kuluttua standardipolttokokeen alusta. Alalaippa oli ilman palosuojausta. (TTY:n Lausunto No 404/2003/295 7.2.2003). Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

Koekappale	30 min	60 min	90 min	120 min
Ylälaipan lämpötila, kun alalaipan paksuus on 10 mm	110	268	408	536
Ylälaipan lämpötila, kun alalaipan paksuus on 15 mm	125	279	440	572
Ylälaipan lämpötila, kun alalaipan pak-	73	208	337	489

suus on 30 mm				
---------------	--	--	--	--

**Taulukko 4.5:** WQ-palkkien uumien keskimääräiset lämpötila  $\theta_{web}$  [°C] 30, 60, 90 ja 120 minuutin kuluttua standardipolttokokeen alusta. Mittapisteiden etäisyydet alalaipan yläpinnasta olivat 20, 50, 120 ja 255 mm. Alalaippa oli ilman palosuojasta. (TTY:n Lausunto No 404/2003/295 7.2.2003). Taulukko soveltuu kaikille sallituille WQ –palkin uuman paksuuksille. Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

Koekappale	30 min	60 min	90 min	120 min
Uuman lämpötila, kun alalaipan paksuus on 10 mm				
etäisyys alalaipasta 20 mm	358	560	665	742
etäisyys alalaipasta 50 mm	276	486	602	689
etäisyys alalaipasta 120 mm	170	359	490	593
etäisyys alalaipasta 255 mm	104	248	379	500
Uuman lämpötila, kun alalaipan paksuus on 15 mm				
etäisyys alalaipasta 20 mm	379	576	680	757
etäisyys alalaipasta 50 mm	303	508	621	705
etäisyys alalaipasta 120 mm	176	376	504	608
etäisyys alalaipasta 255 mm	108	254	401	524
Uuman lämpötila, kun alalaipan paksuus on 30 mm				
etäisyys alalaipasta 20 mm	298	506	625	714
etäisyys alalaipasta 50 mm	224	429	558	679
etäisyys alalaipasta 120 mm	121	293	430	549
etäisyys alalaipasta 255 mm	66	188	308	447

**Taulukko 4.6:** WQ-palkkien alalaippojen keskimääräiset lämpötilat  $\theta_2$  [°C] 30, 60 ja 90 minuutin kuluttua standardipolttokokeen alusta. Alalaipassa Nullifire S607 palosuojamaali (TTY:n Lausunto No 404/2003/296). Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

Koekappale	Palosuojamaalin kuivakalvopaksuus	30 min	60 min	90 min
10 mm paksun alalaipan lämpötila	217 $\mu\text{m}$	340	543	662
15 mm paksun alalaipan lämpötila	191 $\mu\text{m}$	344	554	675
30 mm paksun alalaipan lämpötila	198 $\mu\text{m}$	308	490	634

**Taulukko 4.7:** WQ-palkin ylälaippojen keskimääräiset lämpötila  $\theta_{fl}$  [°C] 30, 60 ja 90 minuutin kuluttua standardipolttokokeen alusta. Alalaipassa Nullifire S607 palosuojamaalia (TTY:n Lausunto No 404/2003/296). Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

Koekappale	Palosuojamaalin kuivakalvopaksuus	30 min	60 min	90 min
Ylälaipan lämpötila, kun alalaipan paksuus on 10 mm	217 $\mu\text{m}$	57	128	217
Ylälaipan lämpötila, kun alalaipan paksuus on 15 mm	191 $\mu\text{m}$	59	141	242
Ylälaipan lämpötila, kun alalaipan paksuus on 30 mm	198 $\mu\text{m}$	45	100	187

**Taulukko 4.8:** WQ-palkin uumien keskimääräiset lämpötilat  $\theta_{web}$  [°C] 30, 60 ja 90 minuutin kuluttua standardipolttokokeen alusta. Mittauspisteiden etäisyydet alalaipan yläpinnasta olivat 20, 50, 120 ja 255 mm. Alalaipassa oli Nullifire S607 palosuojamaalia (TTY:n Lausunto No 404/2003/296). Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

Koekappale	Palosuojamaalin kuivakalvopaksuus	30 min	60 min	90 min
Uuman lämpötila, kun alalaipan pak- suus on 10 mm	217 $\mu\text{m}$			
etäisyys alalaipasta 20 mm		205	356	480
etäisyys alalaipasta 50 mm		161	290	412
etäisyys alalaipasta 120 mm		93	184	288
etäisyys alalaipasta 255 mm		53	112	193
Uuman lämpötila, kun alalaipan pak- suus on 15 mm	191 $\mu\text{m}$			
etäisyys alalaipasta 20 mm		228	390	519
etäisyys alalaipasta 50 mm		176	317	447
etäisyys alalaipasta 120 mm		103	212	330
etäisyys alalaipasta 255 mm		57	133	225
Uuman lämpötila, kun alalaipan pak- suus on 30 mm	198 $\mu\text{m}$			
etäisyys alalaipasta 20 mm		192	320	455
etäisyys alalaipasta 50 mm		148	256	383
etäisyys alalaipasta 120 mm		79	158	262
etäisyys alalaipasta 255 mm		43	94	175

## **5. WQ- PALKIN KÄYTTÖ YHDESSÄ ONTELOLAATAN KANSSA**

Käytettäessä WQ - palkkia yhdessä ontelolaatan kanssa noudatetaan soveltuvin osin voimassa olevaa Betoninormikorttia N:o 18 .

WQ- palkin konepajalla ennen asennusta tehtävän esikorotuksen vaikutus alalaipan venymätilaan voidaan ottaa huomioon.

## 6. ESIMERKIT (LISÄTÄÄN MYÖHEMMIN)

- 6.1 Palosuojaamaton palkki R30 yksinkertaistetun menetelmän mukaan
- 6.2 Palosuojattu palkki R60 yksinkertaistetun menetelmän mukaan
- 6.3 Ulokepalkin mitoitus
- 6.4 Hiiliteräksen 0,5 % venymää vastaava mitoituslujuus palotilanteessa

## LIITTEET (JULKISIA)

1. Tampereen Teknillinen Yliopisto raportti 404/2003/295, WQ- palkkien polttokoe 1
2. Tampereen Teknillinen Yliopisto raportti 404/2003/296, WQ- palkkien polttokoe 2
3. Tampereen Teknillinen Yliopisto raportti 404/2003/297, WQ- palkkien polttokoe 3
4. Tampereen Teknillinen Yliopisto raportti 404/2003/298, WQ- palkkien palomitoituksessa käytettävät palkin uumien vähennykset
5. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Lausunto 28.11.2007. Restrictions of limit state design given in concrete code card 18 based on new test results. (Markku Heinisuo 28.11.2007)
6. Heinisuo M. WQ keskipalkin kuormitusten rajasuhde. 13.4.2008.
7. Heinisuo M. Minimi päätylevyn vahvuus WQ palkille. 10.4.2008.
8. Heinisuo M. WQ palkin alalaipan poikittainen taivutus ja veto. 9.4.2008.
9. Heinisuo M. WQ palkin ripustusteräksen palonkesto. 10.4.2008.
10. Heinisuo M., Sivill A. Vääntörasitetun WQ palkin analyysi. 10.4.2008.

## VIITTEET

1. Eurocode 0 (SFS-EN 1990) Rakenteiden suunnitteluperusteet
2. Eurocode 3 (SFS-EN 1993-1-1) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
3. NA SFS-EN 1993-1-1. Suomen kansallinen liite. (1.11.2007)
4. Eurocode 3 (SFS-EN 1993-1-2) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus.
5. Eurocode 3 (SFS-EN 1993-1-5) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-5: Levyrakenteet.
6. NA SFS-EN 1993-1-2. Suomen kansallinen liite. (1.11.2007)
7. SFS-EN 1993-1-12. Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-12: EN laajennus teräslajeihin S 700 asti.(16.4.2007 in English)
8. NA SFS-EN 1994-1-1. Suomen kansallinen liite. (1.11.2007).
9. Oulun yliopiston Rakennetekniikan laboratorion lausunto RTL 0039 (Matti V. Leskelä 9.12.1997)
10. Betoninormikortti N:o 18. Palkkeihin tuetun ontelolaataston suunnittelu. BNK18. Versio 25.4.2007.
11. Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa B4 Betonirakenteet
12. SCI (1997). Design of Shallow Floor Construction to Eurocodes 3 and 4. Projects 7210/SA/837 & 7210/SA/621. Document RT435, Version 5.
13. Teräsrakenneyhdistys r.y. Hitsatut profiilit. Käsikirja. ISBN 952-9683-01-4. 276 s.
14. TRT/1648T/2008. Rantala J. and Heinisuo M. (2008) Composite WQ –Beam: Analysis report of the floor test. Research report, TTY, Structural engineering. 55 p.