
Palosuojamaalien lämmönjohtavuusarvojen määrittäminen, kun suojattava teräsosa on WQ-palkin alalaippa

Yhteyshenkilö: Jyri Outinen
Teräsrakenneyhdistys ry
Unioninkatu 14, 00131 HELSINKI
puh. 09-12991, fax 09-1299 214
e-mail: jyri.outinen@rakennusteollisuus.fi

Menetelmän kuvaus:

Teräsnormikortissa esitetään menetelmä palosuojamaalien lämmönjohtavuusarvojen määrittämiseen, kun suojattava rakenne on hitsatun WQ-palkin alalaippa. Teräsnormikortin perusteella lasketut lämmönjohtavuuden ominaisarvot on tarkoitettu ohjeiden B7 mukaisten mitoitusarvojen laskemiseen WQ-palkin alalaipan palosuojaukselle.

Menetelmän rajoitukset:

Menetelmä soveltuu WQ-palkin alalaipassa käytettävän palosuojamaalauksen lämmönjohtavuusarvojen määrittämiseen, kun

- palkin paloluokka on R15-R120
- palorasitus on ISO 834-standardin mukainen
- koejärjestelyt ovat teräsnormikortin mukaiset.

Tämän teräsnormikortin perusteella määritetyt palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvot perustuvat yksinkertaistettuihin yhtälöihin ja maalin kuivakalvonpaksuuteen, joten niitä ei saa olettaa palosuojamaalin todellisiksi aineominaisuuksiksi eikä käyttää elementtimenetelmään perustuvassa laskennassa.

Teräsrakenneyhdistyksen Normitoimikunta on käsitellyt ja hyväksynyt 8.3.2004 Teräsnormikortin. Teräsnormikortin käyttäjällä on vastuu kortin ohjeiden käytöstä.

Tämä Teräsnormikortti on voimassa toistaiseksi.

Helsingissä huhtikuun 20. päivänä 2004

TERÄSRAKENNEYHDISTYS RY



Simo Tunkelo
puheenjohtaja



Kai Rätty
toimitusjohtaja

1. JOHDANTO

1.1 Taustaa

Hitsattujen WQ-palkkien käyttö P1 ja P2 luokan rakennuksissa edellyttää tavallisesti palkin alalaipan palosuojausta. Palosuojamaalaus soveltuu WQ-palkin alalaipan palosuojaukseen ja palosuoja-maalattu pinta ei erotu tavanomaisilla maaleilla maalatusta pinnasta. Kantavien WQ-palkkien palo-luokkavaatimus on usein R60-R120, joka soveltuu palosuojamaalille.

WQ-palkkien alalaipan palosuojamaalien kalvopaksuuden määrittämisessä on aikaisemmin käytetty avoimille tai suljetuille teräsprofiileille määritettyjä mitoituskäyriä tai yksittäisiä polttokoetulok-sia. Palosuojamaalin paisumisreaktio on erilainen putki-, I- ja levymäisten (esim. WQ-palkin ala-laippa) teräsosien pinnalla. Palosuojamaalin suojausvaikutus on parempi WQ-palkin alalaipassa kuin suljettujen ja yleensä myös avoimien profiilien pinnalla. Suljettujen profiilien mitoituskäyriä voidaan siten soveltaa suoraan myös WQ-palkeille.

Avoimille ja suljetuille profiileille määritetyt mitoituskäyrät alkavat kuitenkin yleensä vasta poikki-leikkaustekijän A_p/V arvosta 60-80 $1/m$ ja jatkuvat poikkileikkaustekijän arvoon 300 $1/m$. WQ-palkkien alalaipan paksuudet vaihtelevat tavallisesti 10 ja 30 mm välillä ja näiden poikkileikkauste-kijän arvot ovat 38 - 104, kun alalaipan leveys on 450 mm. Avoimien ja suljettujen profiilien mitoi-tuskäyrät eivät siis yleensä kata koko WQ-palkkien käyttöaluetta.

Yhteismitallisten mitoituskäyrästäöjen määrittämiseksi Teräsrakenneyhdistys ry:n palosuojamaali-työryhmä on kehittänyt WQ-palkin alalaipan palosuojamaalaukselle soveltuvan polttokoe- ja las-kentamenetelmän.

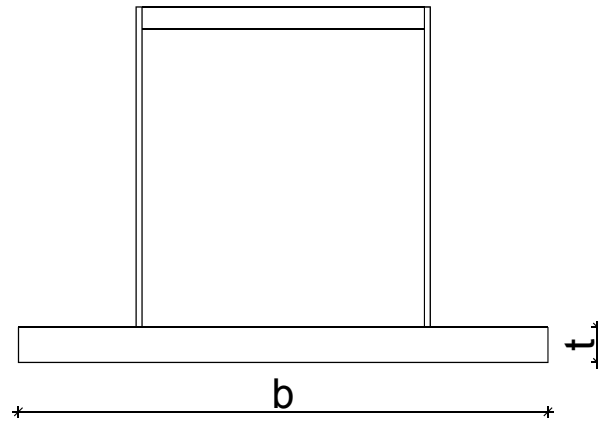
Normikortissa esitetty koe- ja laskentamenetelmä perustuu Nordtest NT FIRE 021 /1/ menetelmään ja palosuojamaaleja varten tehtyyn lisäohjeeseen Nordtest technical report 122 /2/. Koemenetelmän mukaan laskettujen lämmönjohtavuuden ominaisarvojen avulla on mahdollista määrittää Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden B7 /3/ mukaiset yleisesti hyväksytyt mitoituskäyrästäöt tai -taulukot WQ-palkin alalaipan palosuojauksen eristepaksuuden määrittämistä varten.

Polttokoemenetelmän avulla määritetään palosuojamaalin suojauskyky WQ-palkin alalaipassa stan-dardin ISO 834 /4/ mukaisessa palossa. Tämän ohjeen perusteella määritetyt palosuojamaalin läm-mönjohtavuusarvot perustuvat yksinkertaistettuihin yhtälöihin ja maalin kuivakalvopaksuuteen, jo-ten niitä ei saa olettaa palosuojamaalin todellisiksi aineominaisuuksiksi eikä käyttää elementtimene-telmään perustuvassa laskennassa.

1.2 Normikortin mukaisessa laskennassa käytettävä WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijä

Poikkileikkaustekijällä A_p/V tarkoitetaan palolle alttiina olevan teräsosan pinta-alan ja tilavuuden suhdetta [$1/m$].

WQ-palkin alalaippa on mitoiltaan yleensä samanlainen koko palkissa. Kuvassa 1.1 esitetään WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijän A_p/V määrittämiseen tarvittavat mitat, kun alalaipan poikki-leikkaus pysyy palkin pituussuunnassa muuttumattomana.



Kuva 1.1 WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijä A_p/V määritetään kaavasta (1), kun alalaipan poikkileikkaus palkin pituussuunnassa pysyy muuttumattomana.

$$\frac{A_p}{V} = \frac{b + 2 \cdot t}{b \cdot t} \quad (1)$$

missä b on alalaipan leveys [m]
 t on alalaipan paksuus [m]

2. LÄMMÖNJOHTAVUUSARVOJEN JA TERÄSLÄMPÖTILOJEN LASKENNAN PERUSTEET

Laskentamenetelmä perustuu WQ-palkeilla tehtäviin polttokokeisiin, jotka tehdään ISO 834 /4/ mukaiset vaatimukset täyttävässä polttouunissa. Polttokokeesta mitattujen teräs- ja palotilan lämpötilojen avulla määritetään palosuojamaalin lämmönjohtavuus matemaattisen mallin avulla. Laskennassa määritetään kunkin yksittäisen koekappaleen palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvot 350-900 °C lämpötiloissa 25 °C:n välein. Koesarjan tulosten avulla lasketaan lämmönjohtavuuksien keskiarvot lämpötilavälille 350-900°C.

Peruskoesarjan koekappaleilla määritettyihin lämmönjohtavuuden keskiarvotuloksiin lisätään koesarjan keskihajonta kerrottuna vakioarvolla $k = 1,0$. Mikäli käytetään kohdan 3.4 mukaista muunnetun lämmönjohtavuuden koe- ja laskentamenetelmää, käytetään keskihajontakertoimelle vakioarvoa $k = 0$.

Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden ominaisarvojen avulla voidaan määrittää teräsosan lämpötilat eri palonkestoajoille takaisinlaskennan avulla. Matemaattisen mallin käyttö mahdollistaa teräsosan lämpötilojen laskennassa interpoloinnin koetulosten rajoittamassa alueessa ja tässä ohjeessa esitetyissä rajoissa tapahtuvan ekstrapoloinnin suojattavan teräsosan poikkileikkaustekijän ja palosuojamaalin kuivakalvopaksuuden suhteen.

3. KOEKAPPALEET

3.1 Yleistä

Polttokoesarjan koekappaleet valitaan siten, että niiden poikkileikkaustekijät ja palosuojamaalin kuivakalvopaksuudet kattavat käytännössä esiintyvän alueen. WQ-palkkien alalaippojen A_p/V -suhde valitaan tavallisesti 35 ja 115 l/m sekä palosuojamaalin kuivakalvopaksuus d_p 200 ja $1500 \text{ }\mu\text{m}$ väliltä. Koekappaleet valmistetaan S235, S275, S355, S420, S460 tai muusta vastaavasta rakenneteräslajista.

Polttokokeissa käytettävien koekappaleiden poikkileikkausmitat tarkistetaan. Poikkileikkaustekijän laskennassa käytetään nimellisiä poikkileikkausmittoja, mikäli mitatut poikkileikkausmitat ovat Rakentamismääräyskokoelman osan B7 /3/ toleranssien mukaiset.

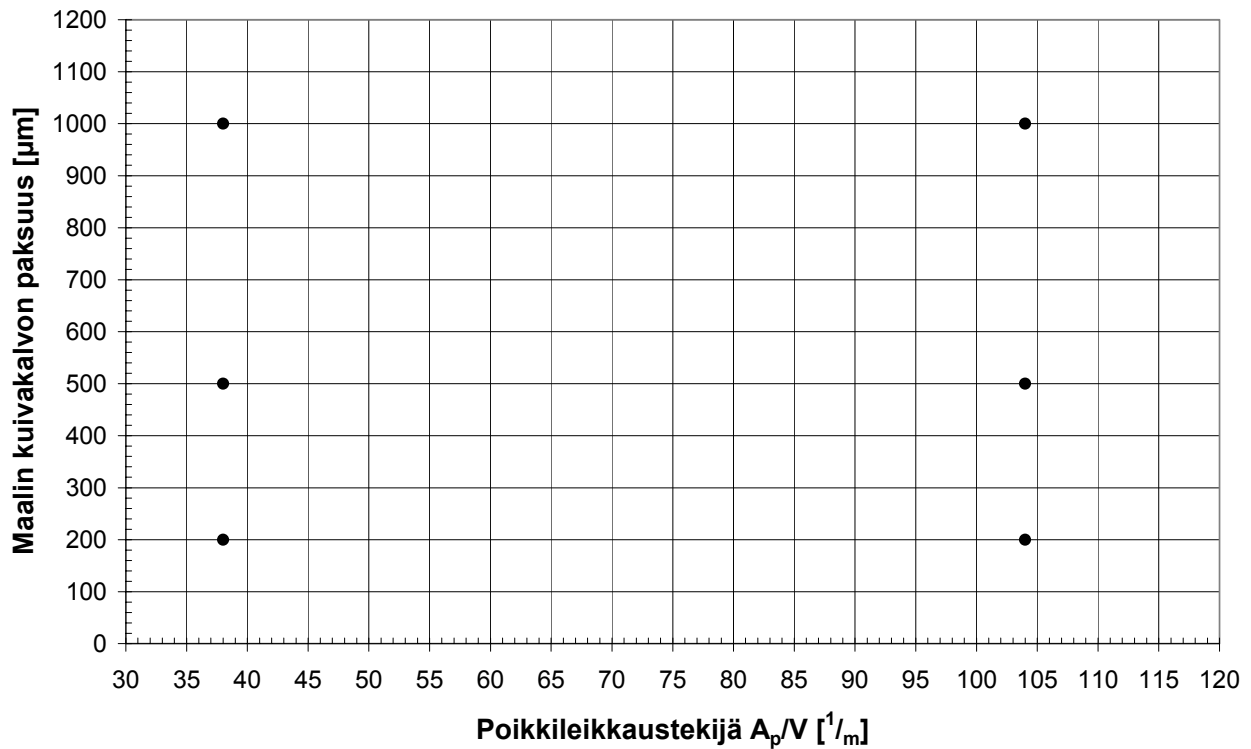
3.2 Peruskoesarja

Peruskoesarjan koekappaleiden lukumäärä on vähintään kuusi. Koekappaleet valitaan siten, että ne kattavat käytännössä esiintyvän alueen kalvopaksuuden ja poikkileikkaustekijän osalta. Palkkien vähimmäispituudeksi suositellaan 1250 mm ja ne voidaan testata kuormittamattomina.

Koekappaleiden poikkileikkaustekijät valitaan oletettujen käyttökohteiden mukaan siten, että kustakin profiiliryhmästä testataan ainakin pienin ja suurin A_p/V -suhde käyttäen vähintään kolmea eri maalikalvopaksuutta (pieni, suuri ja keskimääräinen käyttöalueen kalvopaksuus). Taulukossa 3.1 ja kuvassa 3.1 esitetään esimerkkikoesarja peruskoesarjan koekappaleista. Mikäli mitoituskäyrästöt on tarkoitettu pääasiassa paloluokkaan R60, taulukon 3.1 mukaisessa koesarjassa on tarkoituksenmukaista kasvattaa koekappaleen 1 kalvopaksuutta ja mahdollisesti pienentää koekappaleen 6 kalvopaksuutta jonkin verran. Kuivakalvopaksuudet tulee aina valita tapauskohtaisesti.

Taulukko 3.1 Esimerkki peruskoesarjan koekappaleista.

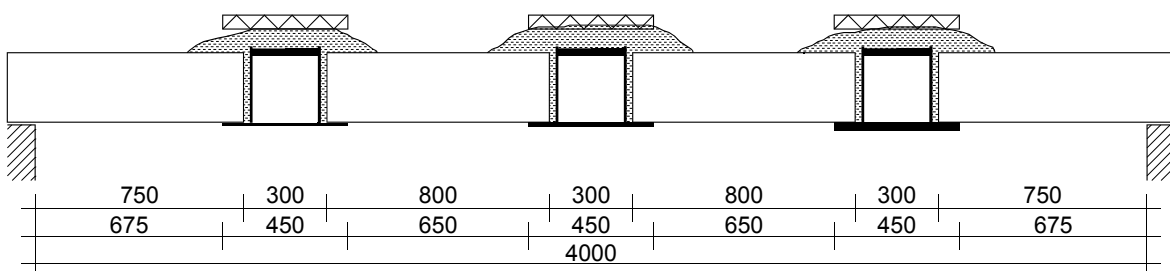
Nro	Alalaipan leveys [mm]	Alalaipan paksuus [mm]	Poikkileikkaustekijä A_p/V [l/m]	Kuivakalvo- paksuus d_p [μm]
1	450	10	104	200
2	450	10	104	500
3	450	10	104	1000
4	450	30	38	200
5	450	30	38	500
6	450	30	38	1000



Kuva 3.1 Esimerkki peruskoesarjan koekappaleista.

3.3 Koekappaleiden asennus uuniin

Koekappaleet asennetaan uuniin siten, että niiden alalaipan alapinta ja sivut ovat kokonaisuudessaan palolle alttiina. Alalaippojen päälle asennetaan höyrykarkaistusta kevytbetonista valmistetut elementit, kuvan 3.2 mukaisesti. Elementtien tulee olla asennettaessa kuivia. Elementtien ja WQ-palkin välinen sauma tiivistetään kuivalla hiekalla. WQ-palkin ylälaipan päälle asennetaan vähintään 50 mm kuivaa hiekkaa ja 50 mm luokan A2-s1,d0 vaatimukset täyttävää mineraalivillaa lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Mikäli koepalkit kannatetaan uunin seinärakenteista, tulee lämmön johtuminen estää palkeista uunin ulkopuolelle. Koekappaleet suositellaan ripustettavaksi uunin kattorakenteista.



Kuva 3.2 Esimerkki WQ-palkkien sijoittamisesta polttouuniin.

Väli- ja yläpohjissa WQ-palkin alalaippaan tukeutuu tavallisesti saumavalettu ontelolaatasto. Käytännöllä polttokokeissa välipohjassa betonirakenteiden sijasta kuivia höyrykarkaistusta kevytbetonista valmistettuja elementtejä ja kuivaa saumahiikkaa saadaan varmalla puolella olevia teräsosan lämpötiloja. Lämpö ei johdu niin helposti höyrykarkaistuun kevytbetoniin kuin tavalliseen betoniin ja betonin sisältämä kosteus hidastaa todellisissa rakenteissa alalaipan lämpötilan nousua.

3.4 Muunnetun lämmönjohtavuuden määrittäminen

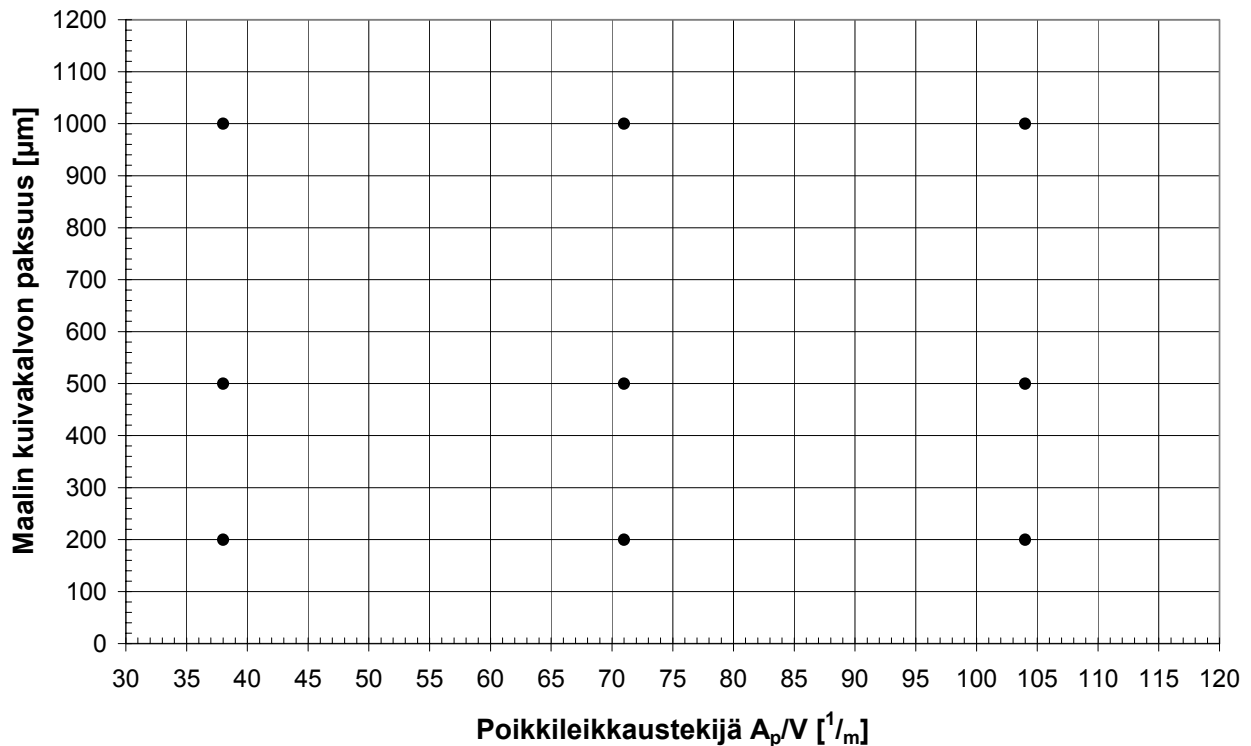
Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden arvojen on havaittu olevan alhaisempia ohuilla kalvopak-suuksilla ja hoikkien teräsosien pinnoilla kuin paksuilla kalvopak-suuksilla ja paksumpien teräsosien pinnoilla. Palosuojamaalien lämmönjohtavuuteen vaikuttaa siten lämpötilan lisäksi myös maalin kuivakalvon paksuus d_p ja alalaipan poikkileikkaustekijä A_p/V . Kohdassa 6.2 esitetään menetelmä muunnetun lämmönjohtavuuden määrittämiseksi.

Jos palosuojamaalin kalvopak-suuden ja teräsosan poikkileikkaustekijän vaikutusta lämmönjohta-vuuden ominaisarvoihin ei oteta huomioon teräsosan lämpötilaa määritettäessä, saattaa seurauksena olla ohuilla kalvoilla ja suurilla poikkileikkaustekijän arvoilla palosuojamaalin selvä ylimitoitami-nen ja paksuilla kalvoilla ja pienillä poikkileikkaustekijän arvoilla maalikalvon alimitoitaminen. Teräsrakenteen lämpötila standardipalossa saadaan tarkemmin lasketuksi eri maalikalvon paksuuk-silla käyttämällä lämmönjohtavuuksien määrittämisessä NT technical report 122:ssa esitettyä maa-likalvon paksuuden ja poikkileikkaustekijän muunnosmenettelyä.

Palosuojamaalin muunnetun kuivakalvopak-suuden ja poikkileikkaustekijän käyttäminen edellyttää peruskoesarjaa suurempaa koekappalemäärää. Menetelmää varten tarvitaan vähintään yhdeksän koekappaletta peruskoesarjan kuuden sijasta. Koekappaleiden poikkileikkaustekijät ja maalikalvot valitaan oletettujen käyttökohteiden mukaan siten, että kustakin profiiliryhmästä testataan ainakin pienin, keskimäinen ja suurin A_p/V -suhde käyttäen vähintään kolmea eri kuivakalvopak-suutta (pieni, suuri ja keskimääräinen käyttöalueen kalvopak-suus). Koesarjaa koskevat muut vaatimukset ovat samat kuin peruskoesarjalla. Taulukossa 3.2 ja kuvassa 3.3 esitetään esimerkkikoesarja muun-netun lämmönjohtavuuden määrittämenetelmän koekappaleista.

Taulukko 3.2 Esimerkki muunnetun lämmönjohtavuuden määrittämenetelmän koekappaleista.

Nro	Alalaipan leveys [mm]	Alalaipan paksuus [mm]	Poikkileikkaustekijä A_p/V [$1/m$]	Kuivakalvo- paksuus d_p [μm]
1	450	10	104	200
2	450	10	104	500
3	450	10	104	1000
4	450	15	71	200
5	450	15	71	500
6	450	15	71	1000
7	450	30	38	200
8	450	30	38	500
9	450	30	38	1000



Kuva 3.3 Esimerkki muunnetun lämmönjohtavuuden menetelmän koesarjasta.

4. KOEKAPPALEIDEN MAALAUUS JA MAALIKALVON PAKSUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Koekappaleiden palosuojattavan pinnan maalaus suoritetaan maalin valmistajan ohjeen mukaisesti ruiskulla, telalla tai siveltimellä tasaisesti levittäen koko palolle alttiina olevalle pinnalle. Palosuojamaalia ei saa keskittää lämpötilamittapisteiden ympärille. Ruiskuttamalla maalattujen koekappaleiden palosuojamaalin kalvopaksuuksina käytetään kalvonpaksuusmittarilla mitattujen yksittäisten tulosten keskiarvoa, josta vähennetään pohja- ja pintamaalin osuudet.

Maalikerrosten paksuuden mittaamiseen käytetään kalibroitua sähkömagneettista kuivakalvomittaria. Maalikalvon paksuuden määrittämiseksi mittauksia suoritetaan vähintään 30 alalaipan yhtä palolle altista alkavaa neliometriä kohden. Mittaukset suoritetaan pohja-, palosuoja- ja pintamaalin levittämisen jälkeen. Yksi mittaustulos tarkoittaa n. 1 cm^2 alueelta suoritettujen kolmen mittauksen (kosketuksen) keskiarvoa.

Telaa tai sivellintä käytettäessä maalin määrä voidaan määrittää kalvopaksuusmittarilla edellä esitetyllä tavalla tai punnitsemalla maaliastia maaleineen ja levitysvälineineen ennen ja jälkeen maalausta. Punnitsemalla määritetyn maalikalvon paksuus saadaan kyseiselle maalille ominaisen märkäkalvoa [g/m^2] vastaavan kuivakalvopaksuuden perusteella.

Palosuojamaalin tulee olla täysin kuivunut ennen polttokokeiden suorittamista. Koekappaleiden maalaus tulee suorittaa vähintään kaksi viikkoa ennen polttokoetta. Maalin vähimmäiskuivumisaika tulee varmistaa palosuojamaalin valmistajalta ennen polttokokeen suorittamista.

Palosuojamaalille määritettyjä lämmönjohtavuuden ominaisarvoja voidaan käyttää teräslämpötilojen laskennassa vain polttokokeissa testatuille maaliyhdistelmille (pohjamaali, palosuojamaali ja pintamaali). Koesarjasta poikkeavan pintamaali- ja/tai pohjamaaliyhdistelmän käyttö palosuojamaalin kanssa vaatii varmentavan polttokokeen suorittamisen maaliyhdistelmän soveltuvuuden varmistamiseksi.

Varmentava polttokoe palosuojamaalin kanssa käytettäville eri pinta- ja pohjamaaliyhdistelmille voidaan tehdä esimerkiksi käyttäen yhdeltä puolelta palolle alttiina olevia 500 · 500 · 5 mm teräslävyjä tai peruskoesarjaa vastaavia koekappaleita. Kokeessa poltetaan sekä lämmönjohtavuuden ominaisarvojen määrittämisessä käytetty hyväksytty että uusi maaliyhdistelmä. Palosuojamaalin kalvopakauksien ja teräsosien (muoto ja poikkileikkaustekijä) tulee olla vertailtavissa koekappaleissa samanlaiset. Tähän kokeeseen käytettävä palosuojamaalin kalvopakaus valitaan käyttöpaksuuden ylärajoilta. Mikäli testattavan palosuojamaalauksen teräspinnan lämpötilan nousu on yhtä nopeaa tai hitaampaa kuin vertailumaalatuun teräsosan voidaan uutta maaliyhdistelmää käyttää vanhan rinnalla samoin mitoituserustein. Varmentavissa polttokokeissa tulee noudattaa standardin ISO 834 /4/ mukaista lämpötilanousua ja polttokoe voidaan tehdä myös kuutiouunissa.

5. POLTTOKOKEET JA LÄMPÖTILOJEN MITTAUS

5.1 Polttokokeiden suorittaminen

Polttokokeet suoritetaan polttouunissa, joka täyttää ISO 834 /4/ mukaiset vaatimukset. Polttokokeissa uunin lämpötila nostetaan ISO 834 -standardipalokäyrän mukaisesti. Uunin mitattu keskimääräinen lämpötila saa poiketa standardipalokäyrästä enintään standardissa ISO 834 esitettyjen toleranssien verran.

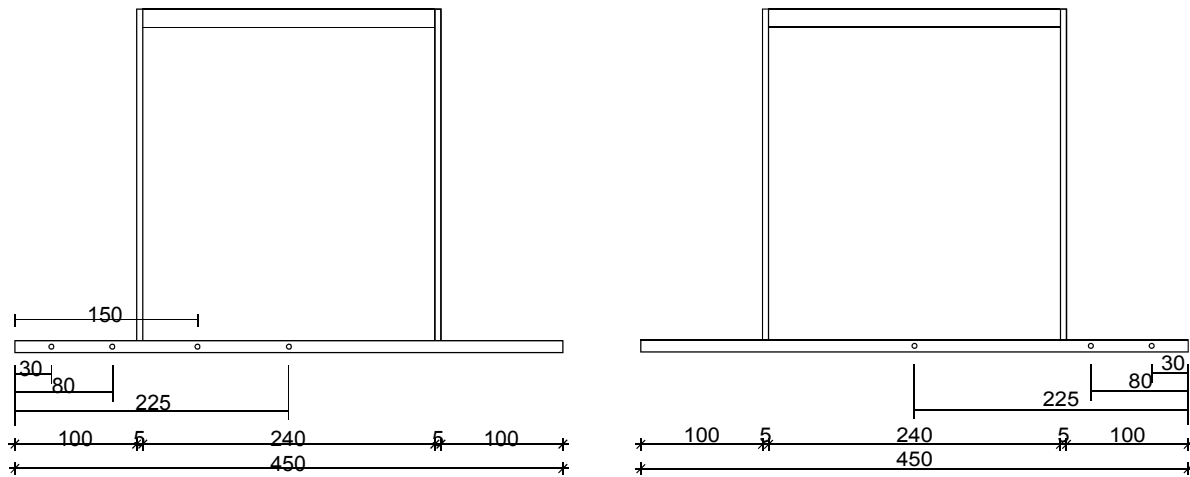
Polttokokeita jatketaan, kunnes WQ-palkkien alalaippojen keskilämpötila on vähintään 700-750 °C tai tavoitteena ollut palonkesto-aika on ylittynyt. Kokeen aikana seurataan paisumisreaktiota sekä palosuojamaalin kiinnipysyvyyttä. Tehdyt havainnot kirjataan tutkimusselostukseen.

5.2 Uunin ja teräslämpötilojen mittaus

Lämmönjohtavuuden ominaisarvojen laskentaa varten kunkin koekappaleen lämpötilan nousu ja uunin lämpötila mitataan ja tallennetaan tietokoneelle. Mittaustietojen tallennusväliksi suositellaan enintään 30 sekuntia.

Lämpötila vaihtelee uunin eri osissa jonkin verran, joten uunin lämpötiloja tulee mitata useasta kohdasta koekappaleiden ympäriltä. Mittapisteen tulee sijoittaa siten, että niiden avulla voidaan määrittää uunin lämpötila vähintään kahden mittapisteen keskiarvona kunkin koekappaleen ympäriltä. Uunin lämpötila mitataan 3 mm paksuilla vaippasuojatuilla termoelementeillä.

WQ-palkin lämpötilamittapisteen tulee sijoittaa alalaippaan siten, että mittaustietojen perustella voidaan määrittää alalaipan keskimääräinen lämpötila. Alalaipan lämpötilat tulee mitata yhteensä vähintään seitsemästä eri mittapistestä kahdesta eri leikkauksessa kuvan 5.1 mukaisesti. Teräslämpötilojen mittaustarkkuuden tulee olla vähintään ± 5 °C ja uunin lämpötilan ± 15 °C. Termoelementtien kiinnitystavat esitetään standardissa NT FIRE 021. Teräslämpötilojen mittauksessa käytetään termolankaa, jonka metallilangan paksuus on noin 1,5 mm.



Kuva 5.1 Esimerkki termoelementtien sijainnista WQ-palkin alalaipassa. Termoelementtien sijainti ja osien mitat riippuvat koestettavasta koekappaleesta.

6. LASKENTAMENETELMÄ

6.1 Peruskoesarjan mukainen laskentamenetelmä

Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden laskennassa käytetään NT FIRE 021 -standardissa esitettyä laskentamenettelyä ja standardiin palosuojamaaleja varten tehtyä lisäohjetta Nordtest technical report 122. Laskennassa käytetään ominaislämmölle NT FIRE 021 -standardista poiketen vakioarvoa $600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Lämmönjohtavuuden laskennassa käytettävä yleinen kaava palosuojajaineille on muotoa

$$\lambda_p = \frac{\left[\frac{\Delta\theta_{a,t}}{\Delta t} + (e^{\phi/10} - 1) \cdot \frac{\Delta\theta_{g,t}}{\Delta t} \right] \cdot d_p \cdot \frac{V}{A_p} \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot \left(1 + \frac{\phi}{3}\right)}{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}} \quad (2)$$

missä	λ_p	on	palosuojamaalin lämmönjohtavuus [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]
	d_p	on	palosuojamaalin kuivakalvopaksuus [m]
	ρ_a	on	teräksen tiheys, 7850 kg/m^3
	c_a	on	teräksen ominaislämpö, vakioarvo $600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
	A_p/V	on	WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijä [m^{-1}]
	$\theta_{g,t}$	on	palotilan lämpötila [$^\circ\text{C}$]
	$\theta_{a,t}$	on	teräsosan lämpötila [$^\circ\text{C}$]
	$\Delta\theta_{a,t}$	on	teräsosan lämpötilan muutos [$^\circ\text{C}$]
	$\Delta\theta_{g,t}$	on	palotilan lämpötilan muutos [$^\circ\text{C}$]
	Δt	on	laskenta-aikaväli [s]

$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$ on palosuojajaineen ja suojattavan teräsosan lämpökapasiteettien välinen suhde, eriste-systeemin suhteellinen terminen massiivisuus.

Käytettäessä palosuojamaalia kaava (2) yksinkertaistuu kaavaksi (3), kun palosuojauksen ja teräsosan lämpökapasiteettien välinen suhde θ asetetaan nolllaksi.

$$\lambda_p = \frac{\frac{\Delta\theta_{a,t}}{\Delta t} \cdot d_p \cdot \frac{V}{A_p} \cdot \rho_a \cdot c_a}{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}} \quad (3)$$

Koekappaleiden jokaisen mittauspisteen tuloksista lasketaan kaavaa (3) käyttäen palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvot 350-900 °C lämpötiloissa 25 °C:n välein. Kun kunkin koekappaleen lämmönjohtavuudet on saatu, lasketaan koko koesarjan lämmönjohtavuuksien aritmeettinen keskiarvo ja keskihajonta. Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden ominaisarvot λ_d lasketaan koesarjan keskiarvon ja keskihajonnan perusteella edellä mainituissa lämpötiloissa kaavasta (4).

$$\lambda_d = \lambda_k + k \cdot s_\lambda \quad (4)$$

missä	λ_d	on	lämmönjohtavuuden ominaisarvo [W/m ² °C]
	λ_k	on	koesarjan lämmönjohtavuusarvojen keskiarvo [W/m ² °C]
	s_λ	on	koesarjan lämmönjohtavuusarvojen keskihajonta [W/m ² °C]
	k	on	koesarjan varmuutta kuvaava vakiokerroin (1,0)

Palotilan lämpötilana käytetään lämmönjohtavuusarvojen laskennassa mittaustuloksiin pienimmän neliösumman perusteella sovitettua standardipalokäyrän muotoista logaritmfunktiota $\theta_{g,t} = b + a \log(8t + 1)$. Logaritmfunktion määrittäminen suoritetaan erikseen koekappaleiden ympäriltä mitattujen uunin lämpötilamittauspisteiden avulla.

WQ-palkin alalaipan keskimääräisen teräslämpötilan laskennassa käytetään kaavaa (5), jossa palosuojamaalin lämmönjohtavuutena käytetään kaavan (4) avulla saatuja lämmönjohtavuuden ominaisarvoja λ_d .

$$\frac{\Delta\theta_{a,t}}{\Delta t} = \frac{\lambda_d}{d_p} \cdot \frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \quad (5)$$

6.2 Muunnetun lämmönjohtavuuden menetelmän mukainen laskentamenetelmä

Palosuojamaalien lämmönjohtavuusarvoihin on todettu vaikuttavan lämpötilan lisäksi myös teräsosan poikkileikkaustekijä ja palosuojamaalin kuivakalvopakisuus. Laskenta suoritetaan käyttäen NT technical report 122 esitettyä muunnetun lämmönjohtavuuden ominaisarvojen laskentamenetelmää, kun koekappaleiden lukumäärä ja valinta on suoritettu kohdan 3.4 mukaisesti. Muunnettuihin lämmönjohtavuuden ominaisarvoihin ei vaikuta eristepaksuus eikä teräsrakenteen poikkileikkaustekijä. Muunnettujen lämmönjohtavuuksien ominaisarvot määritetään kaavasta (4) käyttäen keskihajontakerrointa $k = 0$.

WQ-palkin alalaipan lämpötilan nousun laskennassa tulee käyttää kaavaa (6), jossa palosuojamaalin lämmönjohtavuuden arvoina käytetään muunnettuja ominaisarvoja.

$$\frac{\Delta\theta_{a,t}}{\Delta t} = \frac{\lambda_{d'}'}{d_p} \cdot \frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \quad (6)$$

Käytettäessä muunnettuja lämmönjohtavuuksien ominaisarvoja teräslämpötilojen laskennassa korvataan kaavan (5) kalvopaksuus d_p ja poikkileikkaustekijä A_p/V muunnetulla kalvopaksuudella d' ja poikkileikkaustekijällä $[A_p/V]'$, kaavat (7) ja (8).

$$d' = \frac{d_1 \cdot c_1}{b_1 + a_1 \cdot d_2} \quad (7)$$

missä d' on muunnettu palosuojamaalin kalvopaksuus [m]
 d_1 on alkuperäinen palosuojamaalin kalvopaksuus [m]
 $d_2 = d_1 \cdot 10^5$ [m]
 a_1, b_1 ja c_1 ovat kalvopaksuuden suhteen suoritettuna muunnoksen aikana määritettyjä vakioarvoja

$$\left[\frac{A_p}{V} \right]' = \frac{\frac{A_p}{V} \cdot (b_2 + a_2 \cdot \frac{A_p}{V})}{c_2} \quad (8)$$

missä $[A_p/V]'$ on muunnettu WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijä [1/m]
 A_p/V on WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijä [1/m]
 a_2, b_2 ja c_2 ovat poikkileikkaustekijän suhteen suoritettuna muunnoksen aikana määritettyjä vakioarvoja

Kaavojen (7) ja (8) vakiokertoimet a_i, b_i ja c_i ($i=1$ tai 2) määritetään NT technical report 122 ohjeen mukaan. Kertoimet a_2, b_2 ja c_2 tulee määrittää siten, että kaikilla sallituilla poikkileikkaustekijän arvoilla alalaipan lämpötila nousee poikkileikkaustekijän suurentuessa.

7. LASKENTAMENETELMÄN EKSTRAPOLOINTISÄÄNNÖT

Palosuojamaalien suojauspaksuuden laskennallinen mitoitus mahdollistaa ekstrapoloinnin kalvopaksuuden ja poikkileikkaustekijän suhteen. Ekstrapolointia saa suorittaa vain taulukon 7.1 osoittamilla sallituilla alueilla, koska ekstrapolointi saattaa antaa näiden alueiden ulkopuolella epävarmalla puolella olevia teräslämpötiloja.

Paisunut maalikerros voi kuoriutua tai valua palossa, jos sen tartunta- tai leikkauskestävyys ei ole riittävä. Toisaalta paisumisreaktio voi jäädä puutteelliseksi, kun teräsrakenteen poikkileikkaustekijä on pieni.

Kokeiden perusteella ekstrapoloinnin on havaittu olevan turvallisempaa poikkileikkaustekijän suhteen ylöspäin ja kalvopaksuuden suhteen alaspäin. Taulukossa 7.1 esitetään suurimmat sallitut ekstrapolointialueet teräsprofiilin poikkileikkaustekijän ja palosuojamaalin kuivakalvopaksuuden suhteen.

Taulukko 7.1 *Teräslämpötilojen laskennassa käytettävät suurimmat sallitut ekstrapolointialueet teräsprofiilin poikkileikkaustekijän ja maalin kalvopaksuuden suhteen.*

Ekstrapoloitava tekijä	Sallitut ekstrapolointialueet
Teräsprofiilin poikkileikkaustekijä A_p/V [1/m]	- 10 % ... + 25 %
Palosuojamaalin kuivakalvopaksuus d_p [m]	- 25 % ... + 10 %

8. LÄHTEET

1. NT FIRE 021, Insulation of steel structures: Fire protection. Finland 1985, Nordtest. 14 s.
2. Niels E. Andersen, Guidelines to use of NT FIRE 021. NT techn report 122, Finland 1989, Nordtest project no. 611-86. 15 s.
3. Suomen rakentamismääräyskokoelma osa B7, Teräsrakenteet, Ohjeet 1996. Helsinki 1996, Ympäristöministeriö.
4. ISO 834-1:1999, Fire resistance tests - Elements of building construction – Part 1:general Requirements. Switzerland 1999, International organisation for standardisation. 25 s.