

TERÄSNORMIKORTISTO

Teräsnormikortti N:o 4/2007

Muutettu 18.9.2007

Korvaa Teräsnormikortin N:o 4/1996

RakMK B7:n kohta: 8

RakMK B7 1996

Palosuojamaalien lämmönjohtavuusarvojen määrittäminen

Yhteyshenkilö

Olli Kaitila
Teräsrakenneyhdistys r.y.
Unioninkatu 14
00130 Helsinki

Puh. (09) 12991
Fax. (09) 1299 214

Menetelmän kuvaus

Tämä teräsnormikortti on lisäohje Nordtest -menetelmän mukaiseen palosuojamaalien polttokoemenetelmään ja lämmönjohtavuuden ominaisarvojen määrittämiseen.

Menetelmän rajoitukset

Tämä ohje on tarkoitettu ensisijaisesti palosuojamaaleille varmennetuissa käyttöselosteissa esitettävien mitoitusarvojen laskentaan.

Teräsrakenneyhdistyksen normitoimikunta on käsitellyt normikortin ja todennut sen täyttävän RakMK:n teräsrakenteita koskevien ohjeiden vaatimukset. Kortiston käyttäjällä on vastuu kortiston ohjeiden käytöstä.

Tämä normikortti korvaa TRY:n Teräsnormikortin 4/1996 ja on voimassa toistaiseksi.

Helsingissä syyskuun 18. päivänä 2007

TERÄSRAKENNEYHDISTYS ry



Marko Moisio
Hallituksen puheenjohtaja



Markku Leino
Toimitusjohtaja

1. YLEISTÄ

Avoimien ja suljettujen teräsprofiilien käyttö P1 ja P2 luokan rakennuksissa edellyttää tavallisesti niiden palosuojausta. Palosuojamaalaus soveltuu teräsrakenteiden palosuojaukseen ja palosuojamaalattu pinta ei ulkoisesti poikkea tavanomaisilla maaleilla maalatusta pinnasta. Kantavien teräsrakenteiden paloluokkavaatimus vaihtelee tavallisesti R30 ja R60 välillä, mikä soveltuu hyvin palosuojamaalille. Palosuojamaaleilla on mahdollista suojata teräsrakenteita myös paloluokkiin R90 ja R120.

Tässä normikortissa esitetään tarkennuksia Nordtest NT FIRE 021 /1/ menetelmän ja palosuojamaaleja varten tehdyn lisäohjeen Nordtest technical report 122 /2/ mukaiseen polttokoemenetelmään ja lämmönjohtavuuden laskentamenetelmään. Koemenetelmän mukaan laskettujen lämmönjohtavuuden ominaisarvojen avulla on mahdollista määrittää Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden B7 /3/ mukaiset mitoituskäyrästöt tai -taulukot teräsrakenteiden palosuojauksen eristepakisuuden määrittämistä varten.

Ohjeiden perusteella määritetyt palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvot perustuvat yksinkertaistettuihin yhtälöihin ja maalin kuivakalvon paksuuteen, joten sitä ei saa olettaa palosuojamaalin todelliseksi aineominaisuudeksi eikä käyttää elementtimenetelmään perustuvassa laskennassa.

Normikortissa tarkoitetaan termillä ”palkki” vaakarakenteita ja termillä ”pilari” pysty- ja vinorakenteita riippumatta kuormituksen suunnasta.

2. LÄMMÖNJOHTAVUUSARVOJEN JA TERÄSLÄMPÖTILOJEN LASKENNAN PERUSTEET

Laskentamenetelmän lähtökohtana on määrittää palosuojamaalin lämmönjohtavuus matemaattisen mallin avulla käyttäen hyväksi polttouunissa poltettujen koekappaleiden lämpötilamittaustuloksia. Laskennassa määritetään kunkin yksittäisen koekappaleen palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvot 350 – 900 °C lämpötilavälille 25 °C välein. Palosuojamaalin lämpötila määritetään laskemalla palotilan ja teräslämpötilojen keskiarvo. Koesarjan avulla lasketaan palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvojen keskiarvot lämpötilavälille 350 – 900 °C. Lisäämällä keskiarvoihin koesarjan keskihajonta kerrottuna hajontakertoimella k saadaan lopputuloksena lämmönjohtavuuden ominaisarvot. Hajontakertoimelle k määritetään tässä normikortissa esitettyjen hyväksymisehtojen avulla tuotekohtainen arvo, joka voi vaihdella arvojen 0 ja 1 välillä.

Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden ominaisarvojen avulla voidaan määrittää teräslämpötilat eri palonkestoajoille takaisinlaskennan avulla. Matemaattisen mallin käyttö mahdollistaa teräslämpötilojen laskennassa interpoloinnin koetulosten rajoittaman alueen sisäpuolella ja tämän ohjeen mukaisissa rajoissa tapahtuvan ekstrapoloinnin suojattavan profiilin poikkileikkaustekijän ja palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden suhteen.

Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden ominaisarvojen laskenta suoritetaan erikseen avoimille ja suljetuille teräsprofiileille, koska pelkän rakenteen poikkileikkaustekijän ei ole havaittu soveltuvan mitoituksen perustaksi. Palosuojamaalin suojauskyvyllä on eroa suojattaessa suljettuja ja avoimia profiileja. I-profiilin uumassa paisunut palosuojamaali jää puristuksiin ylä- ja alalaipan väliin, mikä lisää maalin kiinnipysyvyyttä ja kasvattaa muodostuneen vahtokerroksen paksuutta. Lisäksi I-profiilien ylälaipan alaosaan, alalaipan yläosaan ja uumaan palon aikana tuleva lämpörasitus on erilainen verrattuna esimerkiksi putkiprofiilien seinämiin. Suljetuissa profiileissa palosuojamaaleilla on yleensä heikompi suojauskyky kuin avoimissa profiileissa.

3. KOEKAPPALEET

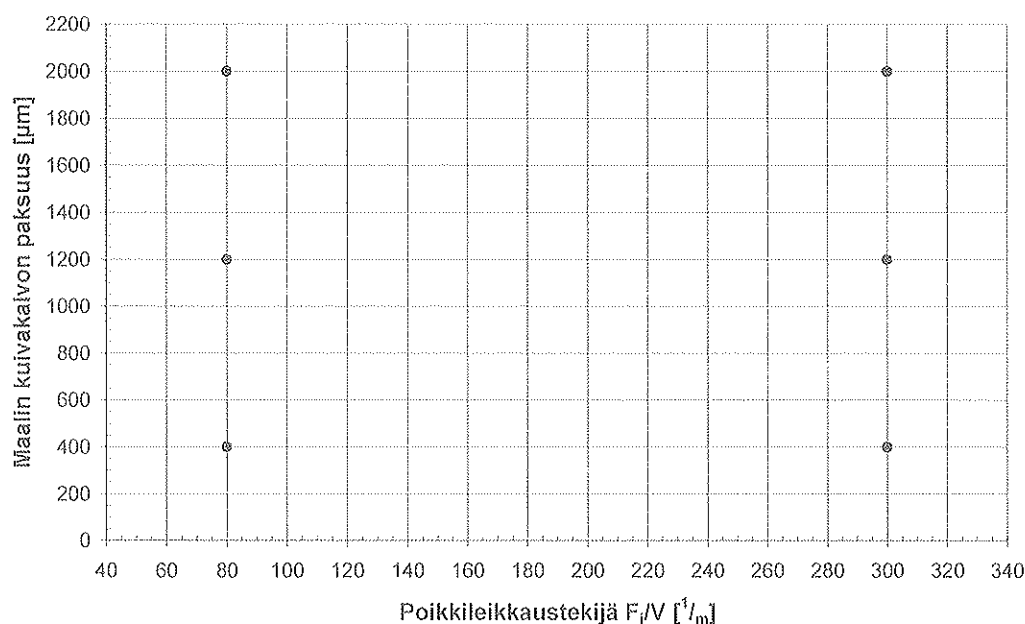
Koekappaleet valitaan siten, että niiden poikkileikkaustekijän ja maalin paksuuden arvot kattavat käytännössä esiintyvän alueen. Koekappaleiden F_i/V –suhde valitaan tavallisesti 65 ja 300 m^{-1} sekä kuivakalvon paksuus d_i 200 ja 2000 μm väliltä. Koekappaleet valmistetaan standardin SFS EN 10025 mukaisista S235, S275, S355 tai S420 rakenneteräslajeista.

Tämän ohjeen mukaisen peruskoesarjan koekappaleiden lukumäärä on vähintään kuusi sekä avoimille että suljetuille profiileille. Koekappaleet valitaan siten, että ne kattavat käytännössä esiintyvän alueen kuivakalvon paksuuden ja poikkileikkaustekijän osalta. Peruskoesarjan kappaleet tulee testata uunissa pilareina. Muut peruskoesarjan lisänä olevat koekappaleet voidaan testata vähintään 1000 mm pitkinä kuormittamattomina palkkeina kuitenkin siten, että koko koesarjasta vähintään $\frac{2}{3}$ testataan pilareina. Kuormittamattomien palkkien vähimmäispituudeksi suositellaan 1250 mm. Koekappaleiden päät tulee suojata passiivisella palosuojamateriaalilla kuten esimerkiksi mineraalivillalla ja vermikuliittilevyllä lämpöhäviöiden ja ylimääräisen lämpötilan nousun estämiseksi. Lyhyiden palkkien liittyminen uunin kattorakenteisiin tulee olla NT FIRE 021 –standardin kuormitetun palkin mukainen.

Koekappaleiden poikkileikkaustekijät valitaan oletettujen käyttökohteiden mukaan siten, että kustakin profiiliryhmästä testataan ainakin pienin ja suurin F_i/V –suhde käyttäen vähintään kolmea eri palosuojamaalin kuivakalvon paksuutta (pieni, suuri ja keskimääräinen käyttöalueen kuivakalvon paksuus). Kuvassa 1 on esitetty esimerkki peruskoesarjan koekappaleista. Pilarikokeiden koekappaleiden pituuden tulee olla vähintään 900 mm. Pilareiden pituutena suositellaan kuitenkin käytettäväksi vähintään 1250 mm.

Peruskoesarjaan kuuluvista koekappaleista vähintään yksi tulee olla standardin NT FIRE 021 mukainen pitkä pilari. Pilarin pituudeksi suositellaan 3000 mm ja sen palosuojamaalin kuivakalvon tulee olla käyttöpaksuuden ylärajalta. Koepilari saa olla kuormittamaton ja sen päät tulee eristää lämpöhäviöiden välttämiseksi NT FIRE 021 –standardin mukaisesti. Koekappaleen avulla testataan palosuojamaalin kiinnipysyvyyttä pidemmässä pilarissa. Pysyvyys voidaan selvittää parhaiten käyttämällä polttokokeessa teräsprofiilina pyöreätä tai suorakaiteen muotoista pitkää pilaria. I-profiileilla kiinnipysyvyys ei ole tavallisesti niin kriittinen

ominaisuus kuin putkiprofiileilla, koska paisunut palosuojamaali holvautuu ja pysyy hieman paremmin kiinni I-profiilin uumassa.



Kuva 1. Esimerkki peruskoesarjan koekappaleista, jotka testataan pilareina

Avoimien profiilien koesarjaan tulee peruskoesarjan lisäksi sisällyttää ainakin yksi vähintään 3500 mm pitkä Nordtest NT FIRE 021 –standardin mukainen kuormitettu palkki. NT FIRE 021 –menetelmän mukaisessa koesarjassa tulee testata tästä ohjeesta poiketen kaksi kuormitettua palkkia. Kuormitetun palkin avulla voidaan varmistaa paisuneen maalikerroksen pysyminen palon aikana voimakkaasti taipuneessa rakenteessa. Pitkään palkkiin tulee valita palosuojamaalin kuivakalvon paksuus käyttöpaksuuden ylärajalta ja poikkileikkaustekijän arvo $120 \text{ } 1/m$ ja $160 \text{ } 1/m$ väliltä. Nordtest –menetelmän /1/ mukaisessa palkkikokeessa suositellaan käytettäväksi HE 200 B –profiilia. Rakenteen kuormitus polttokokeissa ei ole paisuville palosuojamaaleille niin kriittinen kuin useille levymaisille palosuojamateriaaleille, joissa suojattavan rakenteen taipuma saattaa aiheuttaa palosuojauksen kiinnityksen peittämissä ja sen putoamisen palotilaan. Palosuojamaalin kriittisin ominaisuus on yleensä kiinnipysyvyys pitkissä pilareissa.

Kokeissa testataan edellä kuvatulla menetelmällä erikseen avoimet ja suljetut profiilit. Suljettujen profiilien koesarjan tulee sisältää profiilimuodoltaan pyöreiden koekappaleiden lisäksi myös suorakaiteen muotoisia koekappaleita. Palkkien tulee polttokokeessa olla palolle alttiina kolmelta ja pilarien neljältä sivulta.

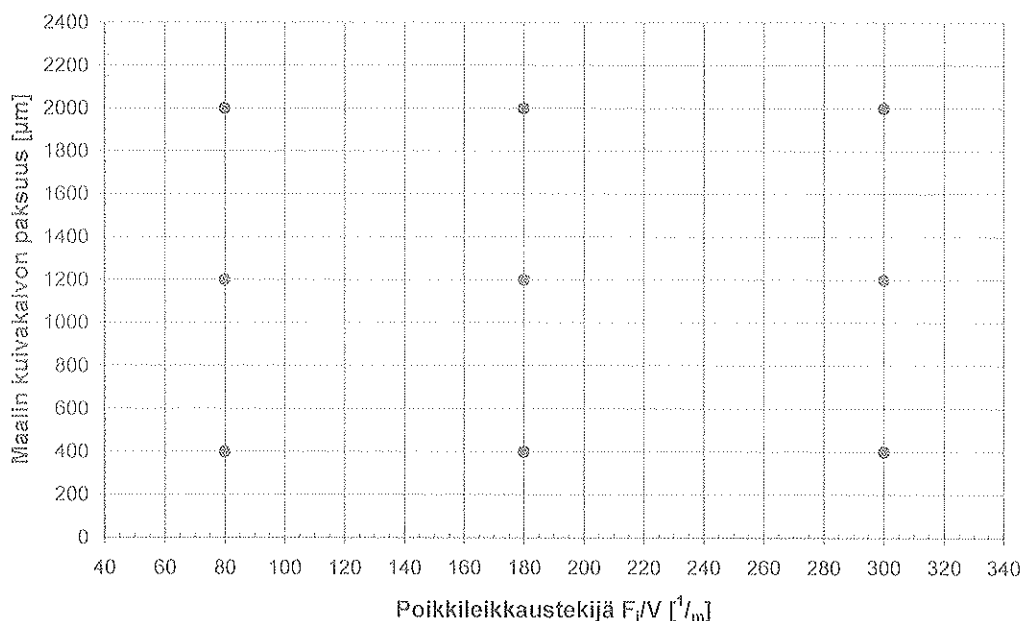
Avoimille profiileille voidaan tehdä myös erilliset mitoituskäyrät palkeille. Tämä edellyttää, että käytettävissä on vähintään tämän ohjeen peruskoesarjan verran palkeilla testattuja koetuloksia ja lisäksi vähintään yhden kuormitetun palkin koetulos. Laskenta suoritetaan vastaavalla tavalla kuin pilareiden tapauksessa, mutta mitoituskäyrästä käytö rajoittuu tällöin vain palkkirakenteisiin. Peruskoesarjaan kuuluvien palkkien pituuden tulee olla vähintään 1000 mm ja ne voi olla testattu kuormittamattomina.

Palosuojamaalien lämmönjohtavuuteen vaikuttaa lämpötilan lisäksi myös maalin kuivakalvon paksuus d_i ja poikkileikkaustekijä F_i/V kaavan 1 mukaisesti.

$$\lambda_i = \lambda (T_i, d_i, F_i/V) \quad (1)$$

Jos palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden ja teräsprofiilin poikkileikkaustekijän vaikutusta lämmönjohtavuuden ominaisarvoihin ei oteta huomioon teräslämpötilojen laskennassa, saattaa seurauksena ohuilla kuivakalvon paksuuksilla ja suurilla F_i/V -arvoilla olla palosuojamaalin selvä ylimitoittaminen ja suurilla kuivakalvon paksuuksilla ja pienillä F_i/V -arvoilla maalikalvon alimitoittaminen. Tavallisesti tarkempaan maalikalvojen paksuuteen päästään käyttämällä lämmönjohtavuuksien määrittämisessä NT technical report 122 esitettyä muunnosmenettelyä palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden ja/tai poikkileikkaustekijän suhteen.

Palosuojamaalin muunnetun kuivakalvon paksuuden ja/tai poikkileikkaustekijän käyttö laskennassa edellyttää peruskoesarjaa suurempaa koekappalemäärää palosuojamaalin muunnettujen lämmönjohtavuuden ominaisarvojen määrittämisessä. Kyseisen menetelmän käyttö edellyttää vähintään yhdeksän koekappaleen käyttöä peruskoesarjan kuuden sijasta. Koekappaleiden poikkileikkaustekijät ja palosuojamaalin kuivakalvon paksuus valitaan oletettujen käyttökohteiden mukaan siten, että kustakin profiiliryhmästä testataan kuvassa 2 esitetyn periaatteen mukaan ainakin pienin, keskimäinen ja suurin F_i/V -suhde käyttäen vähintään kolmea eri palosuojamaalin kuivakalvon paksuutta (pieni, suuri ja keskimääräinen käyttöalueen kuivakalvon paksuus). Koesarjaa koskevat muut vaatimukset ovat samat kuin peruskoesarjalla.



Kuva 2. Esimerkki muunnetun lämmönjohtavuuden menetelmän koesarjasta, jotka testataan pilareina..

Polttokokeissa käytettävien koekappaleiden poikkileikkausmitat tarkistetaan. Lämmönjohtavuusarvojen laskennassa voidaan käyttää poikkileikkaustekijälle sen nimellisarvoja, mikäli mitatut poikkileikkausmitat poikkeavat nimellisistä mitoista enintään 5 %.

4. KOEKAPPALEIDEN MAALAUUS

Maali levitetään tasaisesti koko koekappaleen palolle alttiina olevalle pinnalle ruiskulla, telalla tai siveltimellä maalin valmistajan ohjeen mukaisesti. Palosuojamaalia ei saa keskittää lämpötilamittapisteiden ympärille. Ruiskuttamalla maalattujen koekappaleiden palosuojamaalin kuivakalvon paksuuksina käytetään kalvonpaksuusmittarilla mitattujen yksittäisten tulosten keskiarvoa, josta vähennetään pohja- ja pintamaalin osuudet.

Telaa tai sivellintä käytettäessä maalin määrä g ja g/m^2 voidaan määrittää punnitsemalla maaliastia maaleineen ja levitysvälineineen ennen ja jälkeen maalauksen. Palosuojamaalin kuivakalvon paksuus saadaan maalille ominaisen 1000 g/m^2 märkäkalvoa vastaavan kuivakalvon paksuuden perusteella, joka tulee tarvittaessa määrittää kullekin palosuojamaalille erikseen. Maalikalvon tasainen levitys poikkileikkauksessa tulee kuitenkin aina todeta kalvonpaksuusmittarilla kuivuneesta koekappaleesta.

Palosuojamaalin tulee olla kuivunut kunnolla ennen polttokokeiden suorittamista. Koekappaleiden maalaus tulee suorittaa vähintään kaksi viikkoa ennen polttokokeiden suorittamista. Maalin vähimmäiskuivumisaika on varmistettava palosuojamaalin valmistajalta ennen polttokokeen suorittamista.

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

Varmentavat polttokokeet palosuojamaalin kanssa käytettäville eri pinta- ja pohjamaaliyhdistelmille tehdään käyttäen yhdeltä puolelta palolle alttiina olevia $500 \text{ mm} \cdot 500 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm}$ teräslevyjä tai peruskoesarjaa vastaavia koekappaleita. Polttokokeessa poltetaan lämmönjohtavuuden ominaisarvojen määrittämisessä käytetty hyväksytty ja uusi maaliyhdistelmä. Palosuojamaalin nimelliset kuivakalvon paksuudet ja teräsprofiilit (muoto ja poikkileikkaustekijä) tulee olla vertailtavissa koekappaleissa samat. Kokeessa käytettävä palosuojamaalin kuivakalvon paksuus voidaan valita varmentaviin kokeisiin käyttöpaksuuden ylärajoilta. Mikäli testattavan ja vertailumaaliyhdistelmän lämpötilannousu eivät poikkea toisistaan merkittävästi, voidaan uutta maaliyhdistelmää käyttää vanhan rinnalla samoin mitoituserustein. Varmentavissa polttokokeissa tulee noudattaa standardin ISO 834 /4/ mukaista lämpötilannousua.

5. POLTTOKOKEET

Polttokokeet suoritetaan polttouunissa, joka täyttää ISO 834 mukaiset vaatimukset. Polttokokeissa uunin lämpötila nostetaan ISO 834 -standardipalokäyrän

mukaisesti. Tämä normikortti ei sovellu käytettäväksi muiden palomallien kanssa. Näissä tapauksissa maalin toimivuus on tarkistettava erikseen. Uunin mitattu keskimääräinen lämpötila saa poiketa standardipalokäyrästä enintään standardissa ISO 834 esitettyjen toleranssien verran. Polttokoesarjan vähintään 1000 mm pitkistä pilareista saa kuitenkin testata enintään puolet ns. kuutiouunissa. Polttokokeita jatketaan, kunnes yksittäisten koekappaleiden mitattu teräslämpötila saavuttaa noin 750 °C.

Kuormitetut palkit ovat yksiaukkoisia ja vapaasti tuettuja, mikä mahdollistaa palkin vapaan lämpöpitenehmissen ja taipumisen. Pitempien palkkien kuormitus suositellaan toteutettavaksi kahdella pistekuormalla, jotka sijaitsevat noin palkin jännevälän kolmannespisteissä. Kuormituksen aikana koekappaleen jännitystason tulee olla $0,6 - 0,7 \cdot f_y$, joka esimerkiksi teräslajilla S235 vastaa jännitystasoa 141 - 165 N/mm².

Pilarien tulee olla kokeissa palolle alttiina neljältä sivulta ja palkkien kolmelta sivulta. Palkkien ylälaipasta tapahtuva lämmönjohtuminen laattaan tulee estää asentamalla vähintään 20 mm mineraalivillakaista, jonka tiheys on vähintään 100 kg/m³, teräspalkin ja uunin katon väliin. Palkkien polttokokeet tulee tehdä NT FIRE 021 –standardin mukaisesti.

6. HYVÄKSYMISEHDOT

Lämmönjohtavuuden ominaisarvo lasketaan lisäämällä koesarjan keskiarvoon hajontakertoimella k kerrottu koesarjan keskihajonta. Hajontakertoimelle k määritetään hyväksymisehtojen /6/ perusteella pienin arvo, jolla kaikki kolme hyväksymisehtoa täyttyvät. Kertoimen arvo voi vaihdella arvojen 0 ja 1 välillä. Ehtojen käytön edellytyksenä on, että lämmönjohtavuusarvojen määrittämisessä lähtöarvoina käytetään vähintään yhdeksän yksittäisen koekappaleen polttokoetuloksia. Mikäli koekappaleiden lukumäärä on pienempi kuin yhdeksän hajontakertoimen k arvo on aina yksi.

Hyväksymisehdot:

- Laskentamenetelmällä tarkistetaan kunkin polttokokeessa testatun koekappaleen lämpötilan nousu taulukon 1 hyväksymisehtojen tarkasteluajankohdissa. Teräslämpötilan nousu saa kestää laskentamenetelmällä laskettuna enintään 15% kauemmin kuin polttokokeessa.
- Kaikkien koetulosten laskentamenetelmällä saatu prosentuaalinen summapoikkeama mitattuihin aikoihin nähden tulee olla pienempi kuin 0 kaikissa taulukon 1 hyväksymisehtojen tarkasteluajankohdissa.
- Tarkasteluajankohdilla enintään 30 % laskennan perustana olevista yksittäisistä polttokoetuloksista saa olla epävarmalla puolella verrattuna laskentamenetelmällä saatuihin aikoihin.

Hyväksymisehtojen mukaisia vaatimuksia ei tarvitse täyttää teräslämpötilan ollessa enintään 300 °C. Tarkastelua ei esimerkiksi tehdä 120 minuutin palonkestoajoille

suunnitellulla maalilla 30 minuutin kohdalla koekappaleille, joille teräslämpötilaksi saadaan 30 minuutin palonkestoajalla enintään 300 °C.

Hyväksymisehtojen mukainen testaus tulee kohdentaa ainakin pisintä palonkestoajaa: 30, 60, 90 tai 120 minuuttia, vastaaviin mitoituskäyriin. Eri palonkestoajoilla k voi saada erilaisia arvoja ja k :n arvona käytetään suurinta saatua arvoa. Taulukossa 1 on esitetty suositeltavat tarkastelukohdat.

Taulukko 1 Hyväksymisehtojen mukainen laskenta on tehtävä ainakin seuraavina ajankohtina.

Pisin suunniteltu palonkestoajaksi	Hyväksymisehtojen tarkasteluajankohdat [min]			
	30	60	90	120
30	x			
60	x	x		
90		x	x	
120		x	x	x

7. LASKENTAMENETELMÄ

Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden laskennassa käytetään Nordtest -standardissa NT FIRE 021 ja standardiin palosuojamaaleja varten tehdyssä tarkennuksessa Nordtest technical report 122 esitettyä laskentamenettelyä. Laskennassa käytetään ominaislämmölle NT FIRE 021 -standardista poiketen vakioarvoa 600 J/kg°C.

Lämmönjohtavuuden laskennassa käytettävä yleinen kaava palosuojamateriaaleille on muotoa

$$\lambda_i = \frac{\left[\frac{dT_s}{dT} + (e^{\mu/16} - 1) \cdot \frac{dT}{dt} \right] \cdot d_i \cdot \frac{V}{F_i} \cdot \rho \cdot c \cdot \left(1 + \frac{\mu}{3} \right)}{T - T_s} \quad (2)$$

missä λ_i on palosuojamaalin lämmönjohtavuus [W/m°C]
 d_i on palosuojamaalin kuivakalvon paksuus [m]
 ρ on teräksen tiheys, 7850 kg/m³
 c on teräksen ominaislämpö, vakioarvo 600 J/kg°C
 F_i/V on teräsprofiilin poikkileikkaustekijä [m⁻¹]
 T on palotilan lämpötila [°C]
 T_s on teräsprofiilin lämpötila [°C]
 dT_s on teräsrakenteen lämpötilan muutos [°C]
 dt on laskenta-aikaväli [s]
 μ on palosuojamateriaalin ja suojattavan teräsrakenteen lämpökapasiteettien välinen suhde, eristesysteemin suhteellinen termien massiivisuus. Määritetään kaavasta 3.

$$\mu = \frac{\rho_i \cdot c_i}{\rho \cdot c} d_i \frac{F_i}{V} \quad (3)$$

missä ρ_i on palosuojamaalin tiheys [kg/m³]
 c_i on palosuojamaalin ominaislämpö [J/kg^oC]
 F_i/V on teräsprofiilin poikkileikkaustekijä [m⁻¹]

Kaava 2 voidaan palosuojamaalin tapauksessa sieventää kaavan 4 muotoon, kun merkitään palosuojauksen ja teräsrakenteen lämpökapasiteettien välinen suhde μ nolllaksi.

$$\lambda_i = \frac{\frac{dT_s}{dT} \cdot d_i \cdot \frac{V}{F_i} \cdot \rho \cdot c}{T - T_s} \quad (4)$$

Kaavan 4 avulla määritetään polttokokeiden perusteella jokaiselle yksittäiselle koetulokselle palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvot 350-900 °C lämpötiloissa 25 °C:n välein.

Yksittäisten koekappaleiden lämmönjohtavuusarvojen määrittämisen jälkeen lasketaan koko koesarjan lämmönjohtavuusarvojen aritmeettinen keskiarvo ja keskihajonta 25 °C:n välein lämpötiloissa 350-900 °C. Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden ominaisarvot λ_d lasketaan koesarjan keskiarvon ja keskihajonnan perusteella käyttäen kaavaa 5.

$$\lambda_d = \lambda_k + k \cdot s_\lambda \quad (5)$$

missä λ_d on lämmönjohtavuuden ominaisarvo [W/m^{2o}C]
 λ_k on koesarjan lämmönjohtavuusarvojen keskiarvo [W/m^{2o}C]
 s_λ on koesarjan lämmönjohtavuusarvojen keskihajonta [W/m^{2o}C]
 k on hajontakerroin, joka määritetään luvussa 6 esitettyjen hyväksymisehtojen mukaisesti

Mikäli koekappaleiden ympäriltä mitattu uunin lämpötila poikkeaa ISO 834 -standardipalokäyrästä, tulee käyttää lämmönjohtavuusarvojen laskennassa palotilan lämpötilana mittaustuloksiin sovitettua standardipalokäyrän muotoista logaritmi-funktiota. Logaritmi-funktion määrittäminen suoritetaan tarvittaessa jokaiselle koekappaleelle erikseen sen ympärillä olleiden uunin lämpötilamittauspisteiden tulosten avulla.

Palosuojamaalien lämmönjohtavuusarvoihin on todettu vaikuttavan lämpötilan lisäksi myös teräsprofiilin poikkileikkaustekijä ja palosuojamaalin kuivakalvon paksuus. Laskenta voidaan suorittaa myös käyttäen NT technical report 122 esitettyä muunnetun lämmönjohtavuuden ominaisarvojen laskentamenetelmää.

Muunnettuihin lämmönjohtavuuden ominaisarvoihin ei vaikuta palosuojamaalin kuivakalvon paksuus eikä teräsrakenteen poikkileikkaustekijä. Muunnettujen lämmönjohtavuuksien ominaisarvot λ_d' määritetään kaavasta 5 käyttäen λ_k :n ja s_k :n tilalla muunnettujen lämmönjohtavuuksien koesarjan keskiarvoa λ_k' ja keskihajontaa s_k' .

Teräsrakenteen lämpötilannousun laskennassa tulee käyttää kaavaa 6, jossa palosuojamaalin lämmönjohtavuuden arvoina käytetään määritettyjä ominaisarvoja tai muunnettuja ominaisarvoja.

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_d}{d_i} \cdot \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \frac{F_i}{V} \cdot (T - T_s) \quad (6)$$

Käytettäessä muunnettuja lämmönjohtavuuksien ominaisarvoja teräslämpötilojen laskennassa, korvataan kaavan 6 palosuojamaalin kuivakalvon paksuus d_i ja poikkileikkaustekijä F_i/V muunnetulla kuivakalvon paksuudella d' ja poikkileikkaustekijällä F_i/V' , kaavat 7 ja 8.

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

missä d' on muunnettu palosuojamaalin kuivakalvon paksuus [m]
 d_1 on alkuperäinen palosuojamaalin kuivakalvon paksuus [m]
 d_2 on alkuperäinen palosuojamaalin kuivakalvon paksuus, kun mittayksikkönä on [1/100 mm]. Mittayksikköä 1/100 mm käytetään lähteen /2/ laskentaesimerkin mukaisesti
 a_i , b_i ja c_i ovat palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden suhteen suoritettuna muunnoksen aikana määritettyjä vakioarvoja

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

missä $[F_i/V]'$ on muunnettu poikkileikkaustekijä [m^{-1}]
 F_i/V on alkuperäinen poikkileikkaustekijä [m^{-1}]
 a_i , b_i ja c_i ovat poikkileikkaustekijän suhteen suoritettuna muunnoksen aikana määritettyjä vakioarvoja

Kaavojen 7 ja 8 vakiokertoimet a_i , b_i ja c_i määritetään NT technical report 122 ohjeen mukaan.

8. UUNIN JA TERÄSLÄMPÖTILOJEN MITTAUS

Lämmönjohtavuuden ominaisarvojen laskentaa varten kunkin koekappaleen teräslämpötila ja uunin lämpötila mitataan ja tallennetaan standardin NT FIRE 021 -mukaisesti. Lämpötilojen tallennusväliksi suositellaan enintään 30 sekuntia.

Teräslämpötilojen mittapisteeet tulee sijoittaa teräspoikkileikkaukseen symmetrisesti kaikkiin palolle alttiina oleviin osiin ja ne tulee kiinnittää siten, että mitatut lämpötilat vastaavat teräsrakenteen todellisia lämpötiloja. Teräslämpötilojen mittaustarkkuuden on oltava vähintään $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ja uunin lämpötilan $\pm 15^{\circ}\text{C}$. Termoelementtien paikat ja kiinnitystavat on esitetty standardissa NT FIRE 021. Lyhyiden palkkien ja pilarien termoelementtien määrää voidaan vähentää standardissa mainittujen pitkien palkkien ja pitkien pilareiden termoelementtien määrästä.

9. LASKENTAMENETELMÄN EKSTRAPOLOINTISÄÄNNÖT

Palosuojamaalien suojauspaksuuden laskennallinen mitoitus mahdollistaa ekstrapoloinnin kuivakalvon paksuuden ja poikkileikkaustekijän suhteen. Ekstrapolointia saa suorittaa vain taulukon 1 määräämillä sallituilla alueilla, koska ekstrapolointi saattaa antaa näiden alueiden ulkopuolella epävarmalla puolella olevia teräslämpötiloja.

Palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden kasvaessa saattaa runsaasti paisuneen maalin leikkauskestävyys ylittyä, jonka seurauksena voi olla maalin kuoriutumisen palotilanteessa. Toisaalta poikkileikkaustekijän ollessa pieni saattaa palosuojamaalin paisumisreaktio epäonnistua, jolloin saatetaan polttokokeessa saada pienemmällä poikkileikkaustekijällä suurempia teräslämpötiloja kuin suuremmilla poikkileikkaustekijöillä.

Ekstrapoloinnin onkin havaittu olevan turvallisempaa poikkileikkaustekijän suhteen ylöspäin ja kuivakalvon paksuuden suhteen alaspäin. Taulukossa 2 esitetään suurimmat sallitut ekstrapolointialueet teräsprofiilin poikkileikkaustekijän ja palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden suhteen. Ekstrapolointialueet tulee kuitenkin harkita erikseen tapauskohtaisesti.

Taulukko 2. Teräslämpötilojen laskennassa käytettävät suurimmat sallitut ekstrapolointialueet teräsprofiilin poikkileikkaustekijän ja palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden suhteen.

Ekstrapoloitava tekijä	Sallitut ekstrapolointialueet
Teräsprofiilin poikkileikkaustekijä F_i/V [m^{-1}]	- 10 % ... + 25 %
Palosuojamaalin kuivakalvon paksuus d_i [Φm]	- 25 % ... + 10 %

10. LASKENTAESIMERKKI HYVÄKSYMISEHDOT TÄYTTÄVÄN HAJONTAKERTOIMEN JA MITOITUSKÄYRIEN MÄÄRITYKSESTÄ, KUN PALOSUOJAMAALIN SUURIN KÄYTETTÄVÄ PALONKESTOAIKA ON 30 MINUUTTIA

Esimerkissä käytetyt lähtötiedot eivät perustu todelliseen määrittystapaukseen. Esimerkin tarkoituksena on selventää kappaleessa 6 esitettyjen hyväksymisehtojen käyttöä ja hajontakertoimen määrittämisperusteita. Kullekin palosuojamaalille ja profiilitypeille määritetään oma hajontakerroin perustuen polttokokeista mitattuihin lämpötilamittaustuloksiin. Hajontakertoimen määrittäminen tapahtuu seuraalla tavalla:

1. Palosuojamaalin lämmönjohtavuusarvojen määrittäminen yksittäisten polttokoe tulosten perusteella.

Määritetään palosuojamaalille lämmönjohtavuuden arvot yksittäisten koekappaleiden lämpötilamittaustulosten perusteella 350 °C ja 900 °C lämpötilavälille 25 °C välein. Lämmönjohtavuusarvojen määrittäminen suoritetaan kaikille koekappaleille erikseen käyttäen normikortin kaavaa 4 tai käyttäen muunnetun lämmönjohtavuuden laskentamenetelmää. Lopputuloksena saadaan esimerkkitapauksessa taulukon 3 mukaiset lämmönjohtavuuden arvot (esimerkissä muunnetut lämmönjohtavuuden arvot).

Taulukko 3. Esimerkki polttokokeiden lämpötilamittausten perusteella määritellyistä palosuojamaalin lämmönjohtavuuden arvoista. Koesarja sisälsi kymmenen yksittäistä koekappaleita, jotka sisälsivät yhden kuormitetun palkin ja yhdeksän kuormittamatonta pilaria.

N:o	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
F/V [1/m]	280	284	284	187	189	65	65	186	166	166			
d [µm]	502	308	184	166	323	319	187	487	488	520	Ka	STD	Ka + 1·STD
350	0,0129	0,0126	0,0082	0,0057	0,0080	0,0095	0,0073	0,0103	0,0099	0,0126	0,00981	0,00240	0,01221
375	0,0127	0,0124	0,0083	0,0060	0,0094	0,0098	0,0074	0,0106	0,0103	0,0128	0,00998	0,00230	0,01228
400	0,0119	0,0119	0,0081	0,0061	0,0094	0,0100	0,0076	0,0104	0,0103	0,0123	0,00981	0,00203	0,01184
425	0,0102	0,0104	0,0074	0,0059	0,0087	0,0101	0,0078	0,0093	0,0095	0,0109	0,00903	0,00155	0,01058
450	0,0075	0,0076	0,0054	0,0053	0,0071	0,0093	0,0075	0,0072	0,0081	0,0081	0,00742	0,00106	0,00848
475	0,0045	0,0042	0,0047	0,0043	0,0048	0,0073	0,0064	0,0043	0,0055	0,0045	0,00504	0,00105	0,00609
500	0,0025	0,0026	0,0032	0,0028	0,0023	0,0044	0,0041	0,0023	0,0028	0,0022	0,00291	0,00076	0,00367
525	0,0023	0,0027	0,0028	0,0018	0,0020	0,0024	0,0021	0,0016	0,0023	0,0018	0,00219	0,00038	0,00257
550	0,0027	0,0029	0,0030	0,0020	0,0022	0,0022	0,0021	0,0018	0,0025	0,0022	0,00236	0,00039	0,00275
575	0,0030	0,0032	0,0032	0,0023	0,0024	0,0025	0,0025	0,0021	0,0027	0,0026	0,00265	0,00037	0,00303
600	0,0033	0,0035	0,0035	0,0026	0,0027	0,0029	0,0028	0,0024	0,0030	0,0028	0,00296	0,00039	0,00335
625	0,0037	0,0039	0,0039	0,0029	0,0031	0,0032	0,0033	0,0027	0,0031	0,0032	0,00330	0,00041	0,00372
650	0,0041	0,0044	0,0043	0,0033	0,0035	0,0037	0,0035	0,0031	0,0034	0,0034	0,00367	0,00046	0,00413
675	0,0044	0,0048	0,0048	0,0037	0,0038	0,0041	0,0039	0,0036	0,0036	0,0038	0,00406	0,00049	0,00454
700	0,0050	0,0052	0,0053	0,0039	0,0044	0,0044	0,0042	0,0039	0,0039	0,0042	0,00445	0,00055	0,00500
725	0,0058	0,0057	0,0056	0,0041	0,0049	0,0047	0,0044	0,0044	0,0041	0,0046	0,00482	0,00065	0,00547
750	0,0064	0,0062	0,0064	0,0044	0,0053	0,0049	0,0048	0,0047	0,0044	0,0050	0,00514	0,00067	0,00582
775	0,0066	0,0060	0,0065	0,0045	0,0053	0,0050	0,0050	0,0050	0,0047	0,0053	0,00531	0,00064	0,00595
800	0,0064	0,0063	0,0061	0,0044	0,0053	0,0050	0,0049	0,0045	0,0047	0,0058	0,00534	0,00077	0,00610
825	0,0071	0,0072	0,0065	0,0044	0,0050	0,0050	0,0043	0,0050	0,0048	0,0057	0,00560	0,00105	0,00666
850	0,0069	0,0075	0,0080	0,0049	0,0071	0,0046	0,0028	0,0052	0,0050	0,0055	0,00574	0,00159	0,00733
875	0,0065	0,0075	0,0080	0,0050	0,0072	0,0042	0,0026	0,0054	0,0048	0,0052	0,00564	0,00166	0,00730
900	0,0062	0,0077	0,0082	0,0048	0,0070	0,0038	0,0021	0,0052	0,0046	0,0048	0,00544	0,00185	0,00730

2. Palosuojamaalin laskennallinen lämmönjohtavuus hajontakertoimilla 0,0 ja 1,0

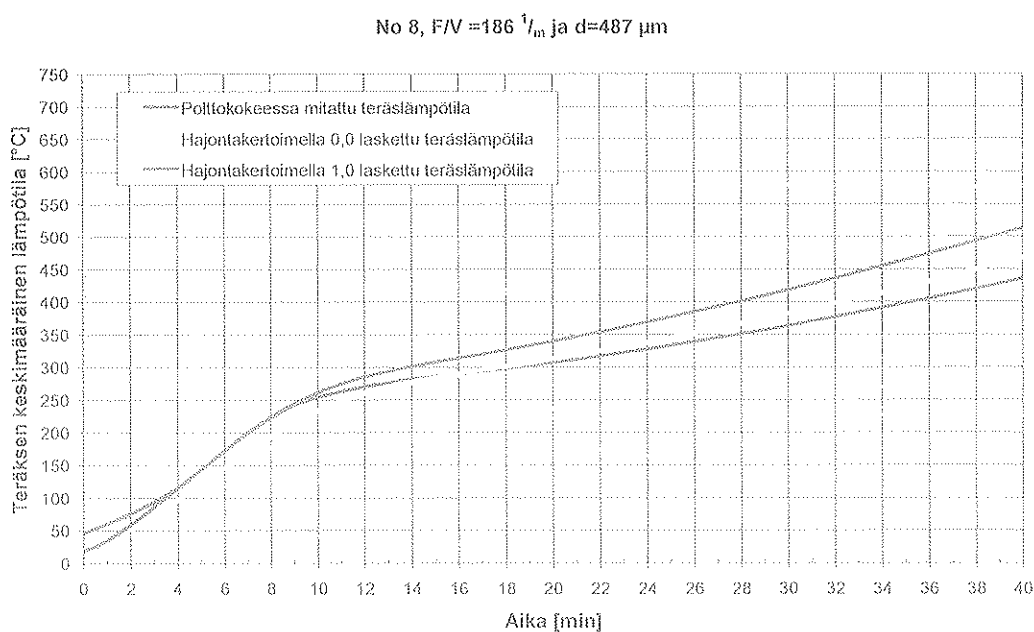
Määritetään palosuojamaalille kahdet lämmönjohtavuuden laskenta-arvot kaavan 5 avulla käyttäen hajontakertoimelle oletusarvoja 0,0 ja 1,0. Arvot on esitetty taulukon 3 kohdassa K_a ja $K_a + 1,0 \cdot \text{STD}$.

3. Teräslämpötilojen nousun määrittäminen laskentamenetelmällä

Määritetään saaduilla lämmönjohtavuuden arvoilla teräslämpötilan nousu (takaisinlaskenta) standarditulipalossa käyttäen aika-askeleella tapahtuvan laskennan lähtötietoina testattujen koekappaleiden poikkileikkaustekijän ja palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden arvoja. Laskenta tapahtuu käyttäen kaavaa 6. Esimerkkimaalin suurin suunniteltu palonkestoaika on 30 minuuttia, joten taulukon 1 mukaan tarkastelu suoritetaan vain palonkestoaikalla 30 minuuttia.

Laskenta suoritetaan kaikille koekappaleille. Mikäli yksittäisen kokeen lämmönjohtavuuden arvojen määrittämisessä on käytetty todellisiin palotilan mittaustuloksiin perustuvaa ISO 834 -standardipalokäyrän muotoista logaritmifunktiota, tulee tätä sovitettua funktiota käyttää myös palotilan lämpötilana teräslämpötilojen laskennassa.

Lämpötilan nousukäyrät piirretään samaan kuvaajaan polttokokeesta mitatun teräsosan keskiarvolämpötilan kanssa kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3. Polttokokeesta mitattu teräslämpötilan ja laskemalla määritetty teräslämpötilan nousu, kun hajontakertoimelle on käytetty arvoja 0,0 ja 1,0.

4. Laskettujen teräslämpötilojen vertailu polttokokeesta mitattuihin lämpötiloihin.

Määritetään suoritettujen polttokokeiden mittaustuloksista teräksen keskimääräinen lämpötila 30 minuutin kuluttua kokeen aloittamisesta. Teräslämpötilaksi saadaan koekappaleelle 8 kuvan 3 perusteella 364 °C. Lisäksi määritetään se aika laskentamenetelmällä, joka kuluu em. teräslämpötilan saavuttamiseen käytettäessä pa-

losuojamaalin lämmönjohtavuuden laskenta-arvoja, jotka on määritetty hajontakerroimilla 0,0 ja 1,0. Tuloksiksi saadaan 27,6 ja 23,3 minuuttia. Aika ilmoitetaan poikkeamana prosentteina tarkasteluajankohdasta. Tulos on esitetty taulukossa 4. Mikäli laskettu aika on suurempi kuin tarkasteluajankohta (esimerkissä 30 minuuttia) prosentteina ilmoitettu ero on positiivinen ja laskennan avulla saatu teräslämpötila on epävarmalla puolella kokeessa mitattuun teräslämpötilaan nähden. Mikäli tulos on negatiivinen on tulos varmalla puolella.

Taulukko 4. Koekappaleen numero 8 kokeessa mitattu teräslämpötila 30 minuutin kuluttua kokeen aloittamisesta, laskennallisesti määritetty aika, mikä kuluu mitatun teräslämpötilan 364 °C saavuttamiseen käytettäessä laskennallisten lämmönjohtavuuden laskenta-arvojen määrittämisessä hajontakerroimia 0,0 ja 1,0 sekä mitatun ja lasketun teräslämpötilan välinen ero ilmoitettuna prosentteina.

Koekappale 8, F/V=186, d=487 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Koetulos	364	30	
k=1,0	364	23,3	-22,3 %
k=0,0	364	27,6	-8,0 %

Määrittäykset tehdään kaikille testatuille koekappaleille. Mikäli tarkasteluajankohdassa mitattu teräslämpötila on alle 300 °C ei tätä koekappaleita tarvitse ottaa mukaan tarkasteluun. Tulokset on esitetty taulukossa 5. Vihreä väri tarkoittaa varmalla puolella olevaa laskentatulosta ja punainen väri epävarmalla puolella olevaa laskentatulosta polttokokeesta mitattuun teräslämpötilaan nähden.

Taulukko 5. Koesarjan kaikkien koekappaleiden mitatut teräslämpötilat 30 minuutin kuluttua kokeen aloittamisesta, laskennallisesti määritetty aika, mikä kuluu mitatun teräslämpötilan saavuttamiseen käytettäessä laskennallisten lämmönjohtavuuden laskenta-arvojen määrittämisessä hajontakerrointa 0,0 ja 1,0 sekä mitatun ja lasketun teräslämpötilan välinen ero ilmoitettuna prosentteina.

Koekappale 1, F/V=280, d=502 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	410	30	
k=1,0	410	25,1	-16,3 %
k=0,0	410	28,9	-3,7 %

Koekappale 6, F/V=65, d=319 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	315	30	
k=1,0	315	30,3	1,0 %
k=0,0	315	36,3	21,0 %

Koekappale 2, F/V=264, d=308 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	496	30	
k=1,0	496	26,4	-12,0 %
k=0,0	496	29,75	-0,8 %

Koekappale 7, F/V=65, d=187 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	354	30	
k=1,0	354	25,7	-14,3 %
k=0,0	354	30,3	0,0 %

Koekappale 3, F/V=284, d=184 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	591	30	
k=1,0	591	26,1	-13,0 %
k=0,0	591	28,8	-4,0 %

Koekappale 8, F/V=186, d=487 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Koetulos	364	30	
k=1,0	364	23,3	-22,3 %
k=0,0	364	27,6	-8,0 %

Koekappale 4, F/V=187, d=166 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	520	30	
k=1,0	520	23,2	-22,7 %
k=0,0	520	25,9	-13,7 %

Koekappale 9, F/V=166, d=488 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	378	30	
k=1,0	378	29,9	-0,3 %
k=0,0	378	31,4	4,7 %

Koekappale 5, F/V=189, d=323 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	425	30	
k=1,0	425	24,4	-18,7 %
k=0,0	425	28,1	-6,3 %

Koekappale 10, F/V=166, d=520 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	372	30	
k=1,0	372	27,1	-9,7 %
k=0,0	372	31,7	6,7 %

5. Hyväksymisehtojen toteutuminen hajontakertoimilla 0,0 ja 1,0

Tarkistetaan hyväksymisehtojen toteutuminen hajontakertoimilla 0,0 ja 1,0. Yhteenveto tarkastelusta on esitetty taulukossa 6.

Hyväksymisehdot:

- Laskentamenetelmällä tarkistetaan kunkin polttokokeessa testatun koekappaleen lämpötilan nousu taulukon 1 hyväksymisehtojen tarkasteluajankohdissa. Teräslämpötilan nousu saa kestää laskentamenetelmällä laskettuna enintään 15% kauemmin kuin polttokokeessa.
- Kaikkien koetulosten laskentamenetelmällä saatu prosentuaalinen summapoikkeama mitattuihin aikoihin nähden tulee olla pienempi kuin 0 kaikissa taulukon 1 hyväksymisehtojen tarkasteluajankohdissa.
- Tarkasteluajankohdilla enintään 30 % laskennan perustana olevista yksittäisistä polttokoetuloksista saa olla epävarmalla puolella verrattuna laskentamenetelmällä saatuihin aikoihin.

Hajontakertoimella 1,0 lasketut tulokset täyttävät kaikki hyväksymisehdot, mutta hajontakertoimella 0,0 hyväksymisehdot A ja C eivät täyty.

Taulukko 6. Hyväksymisehtojen täyttyminen lämmönjohtavuusarvojen laskennassa käytetyillä hajontakertoimilla 0,0 ja 1,0.

Hajontakerroin 0,0			
Hyväksymisehdon tunnus	Hyväksymisehto	Tulos	Täyttääkö ehdon
A	$\leq 15\%$	21,0 %	Ei
B	$< 0\%$	-0,42 %	Kyllä
C	$\leq 30\%$	40,0 %	Ei

Hajontakerroin 1,0			
Hyväksymisehdon tunnus	Hyväksymisehto	Tulos	Täyttääkö ehdon
A	$\leq 15\%$	1,0 %	Kyllä
B	$< 0\%$	-12,83 %	Kyllä
C	$\leq 30\%$	10,0 %	Kyllä

6. Hajontakertoimen määrittäminen kokeilemalla

Määritetään kokeilemalla pienin hajontakerroin arvojen 0,0 ja 1,0 väliltä, millä kaikki hyväksymisehdot täyttyvät. Esimerkkitapauksessa koekappale 6 laskentatuloksena on 21% epävarmalla puolella 30 minuutin palonkestoajalla. Lisäksi neljä koetulosta kymmenestä eli 40% koetuloksista on epävarmalla puolella kokeesta mitattuihin teräslämpötiloihin nähden.

Määrittämällä koekappaleen 6 avulla hajontakertoimelle sopiva arvo (0,28), jolla teräslämpötila saavutetaan 34,5 minuutin kuluttua (15 % ylitys 30 minuutin tarkasteluajankohdalla) standardipalossa saadaan kaikki hyväksymisehdot täytettyä. Tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Koesarjan kaikkien koekappaleiden mitatut teräslämpötilat 30 minuutin kulluttua kokeen aloittamisesta, laskennallisesti määritetty aika, mikä kuuluu mitatun teräslämpötilan saavuttamiseen käytettäessä laskennallisten lämmönjohtavuuden arvojen määrittämisessä hajontakerrointa 0,28 sekä mitatun ja lasketun teräslämpötilan välinen ero ilmoitettuna prosentteina.

Koekappale 1, F/V=280, d=502 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	410	30	
k=0,28	410	27,8	-7,3 %
Koekappale 2, F/V=284, d=308 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	496	30	
k=0,28	496	28,8	-4,0 %
Koekappale 3, F/V=284, d=184 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	591	30	
k=0,28	591	28	-6,7 %
Koekappale 4, F/V=187, d=166 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	520	30	
k=0,28	520	25,1	-16,3 %
Koekappale 5, F/V=189, d=323 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	425	30	
k=0,28	425	27	-10,0 %
Koekappale 6, F/V=65, d=319 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	315	30	
k=0,28	315	34,5	15,0 %
Koekappale 7, F/V=65, d=187 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	354	30	
k=0,28	354	28,8	-4,0 %
Koekappale 8, F/V=186, d=487 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Koetulos	364	30	
k=0,28	364	26,3	-12,3 %
Koekappale 9, F/V=166, d=488 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	378	30	
k=0,28	378	30	0,0 %
Koekappale 10, F/V=166, d=520 µm	Teräslämpötila [°C]	Aika [min]	Ero [%]
Mitattu	372	30	
k=0,28	372	30,3	1,0 %

7. Hyväksymisehtojen toteutuminen hajontakerroimella 0,28

Tarkistetaan hyväksymisehtojen toteutuminen hajontakerroimella 0,28. Yhteenvedo tarkastelusta on esitetty taulukossa 8. Hajontakerroimella 0,28 kaikki hyväksymisehdot täyttyvät.

Taulukko 8. Hyväksymisehtojen täytyminen lämmönjohtavuusarvojen laskennassa käytetyllä hajontakerroimella 0,28.

Hajontakerroin 0,28			
Hyväksymisehdon tunnus	Hyväksymisehto	Tulos	Täyttääkö ehdon
A	≤ 15%	15,0 %	Kyllä
B	< 0 %	-4,47 %	Kyllä
C	≤ 30 %	20,0 %	Kyllä

8. Tarkastelu muilla taulukon 1 mukaisilla hyväksymisehto- ajankohdilla

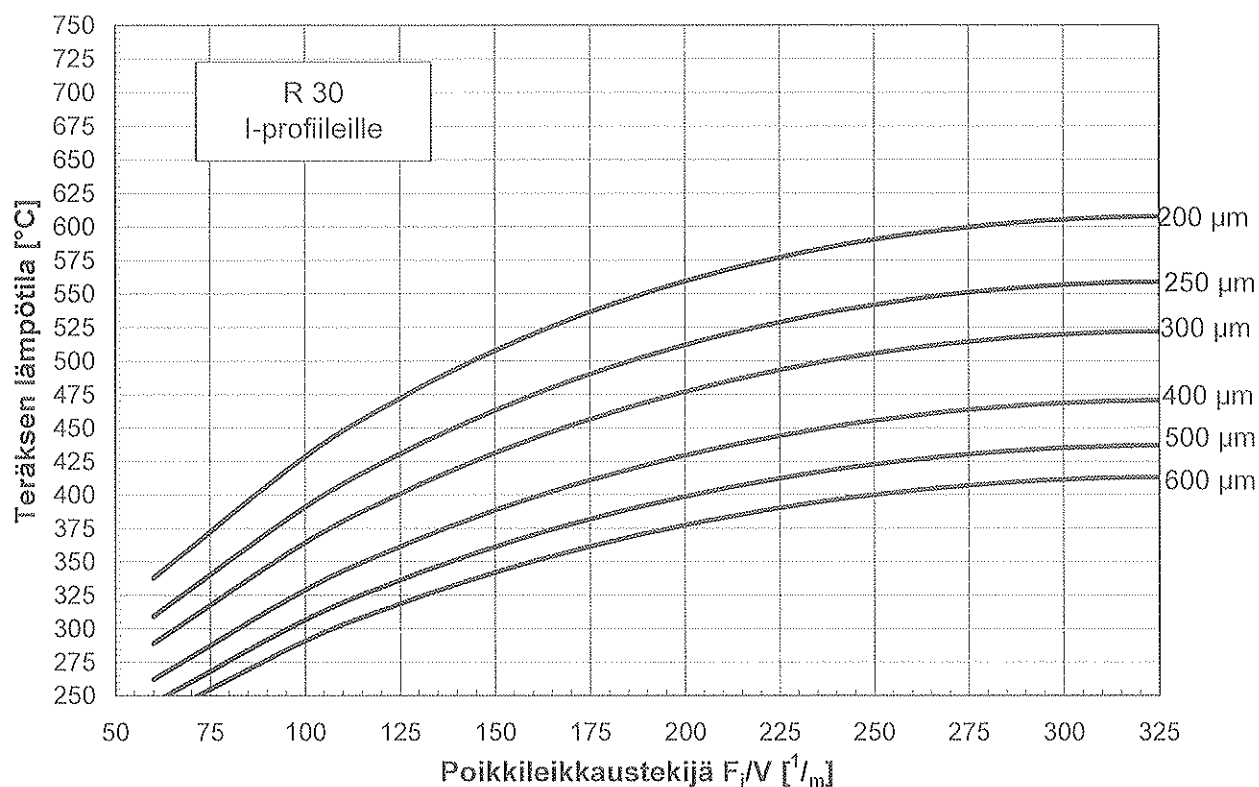
Vastaava tarkastelu tehdään kaikilla taulukossa 1 esitetyillä palonkestoajoilla. Esimerkissä pisin suunniteltu palonkesto-aika on 30 minuuttia, joten tarkastelu tulee suorittaa taulukon 1 mukaan vain 30 minuutin palonkestoajalla. Mitoituskäyrästäojen laadinta suoritetaan käyttäen suurinta hajontakertoimen arvoa, joka on määritetty taulukon 1 mukaisilla palonkestoajoilla.

9. Lämmönjohtavuuden ominaisarvot ja mitoituskäyrästä

Märitetään mitoituskäyrästä palosuojamaalille käyttäen lämmönjohtavuuden ominaisarvoina kaavalla 5 määritettyjä arvoja hajontakertoimen ollessa 0,28. Lämmönjohtavuuden arvot on esitetty taulukossa 9 ja mitoituskäyrästä kuvassa 4.

Taulukko 9. Yksittäisten koekappaleiden polttokokeiden avulla määritetyt lämmönjohtavuuden arvot lämpötiloissa 350 °C – 900 °C, koetulosten keskiarvot, keskihajonnat sekä hajontakertoimella 0,28 määritetyt lämmönjohtavuuden ominaisarvot.

N:o	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
F/V [1/m]	280	284	284	187	189	65	65	186	166	166			
d [µm]	502	308	184	166	323	319	187	487	488	520	Ka	STD	Ka + 0,28 · STD
350	0,0129	0,0126	0,0082	0,0057	0,0090	0,0095	0,0073	0,0103	0,0099	0,0126	0,00981	0,00240	0,01221
375	0,0127	0,0124	0,0083	0,0060	0,0094	0,0098	0,0074	0,0106	0,0103	0,0128	0,00998	0,00230	0,01228
400	0,0119	0,0119	0,0081	0,0061	0,0094	0,0100	0,0076	0,0104	0,0103	0,0123	0,00981	0,00203	0,01184
425	0,0102	0,0104	0,0074	0,0059	0,0087	0,0101	0,0078	0,0093	0,0095	0,0109	0,00903	0,00155	0,01058
450	0,0075	0,0076	0,0064	0,0053	0,0071	0,0093	0,0075	0,0072	0,0081	0,0081	0,00742	0,00106	0,00848
475	0,0045	0,0042	0,0047	0,0043	0,0048	0,0073	0,0064	0,0043	0,0055	0,0045	0,00504	0,00105	0,00609
500	0,0025	0,0026	0,0032	0,0028	0,0023	0,0044	0,0041	0,0023	0,0028	0,0022	0,00291	0,00076	0,00367
525	0,0023	0,0027	0,0028	0,0018	0,0020	0,0024	0,0021	0,0016	0,0023	0,0018	0,00219	0,00038	0,00257
550	0,0027	0,0029	0,0030	0,0020	0,0022	0,0022	0,0021	0,0018	0,0025	0,0022	0,00236	0,00039	0,00275
575	0,0030	0,0032	0,0032	0,0023	0,0024	0,0025	0,0025	0,0021	0,0027	0,0026	0,00265	0,00037	0,00303
600	0,0033	0,0035	0,0035	0,0026	0,0027	0,0029	0,0029	0,0024	0,0030	0,0028	0,00296	0,00039	0,00335
625	0,0037	0,0039	0,0039	0,0029	0,0031	0,0032	0,0033	0,0027	0,0031	0,0032	0,00330	0,00041	0,00372
650	0,0041	0,0044	0,0043	0,0033	0,0035	0,0037	0,0035	0,0031	0,0034	0,0034	0,00367	0,00046	0,00413
675	0,0044	0,0049	0,0048	0,0037	0,0038	0,0041	0,0039	0,0036	0,0036	0,0038	0,00406	0,00049	0,00454
700	0,0050	0,0052	0,0053	0,0039	0,0044	0,0044	0,0042	0,0039	0,0039	0,0042	0,00445	0,00055	0,00500
725	0,0058	0,0057	0,0056	0,0041	0,0049	0,0047	0,0044	0,0044	0,0041	0,0045	0,00482	0,00065	0,00547
750	0,0064	0,0062	0,0064	0,0044	0,0053	0,0049	0,0048	0,0047	0,0044	0,0050	0,00514	0,00067	0,00582
775	0,0066	0,0060	0,0065	0,0045	0,0053	0,0050	0,0050	0,0050	0,0047	0,0055	0,00531	0,00064	0,00595
800	0,0064	0,0063	0,0061	0,0044	0,0053	0,0050	0,0049	0,0045	0,0047	0,0058	0,00534	0,00077	0,00610
825	0,0071	0,0072	0,0065	0,0044	0,0060	0,0050	0,0043	0,0050	0,0048	0,0057	0,00560	0,00106	0,00666
850	0,0089	0,0075	0,0080	0,0049	0,0071	0,0046	0,0028	0,0052	0,0050	0,0055	0,00574	0,00159	0,00733
875	0,0085	0,0075	0,0080	0,0050	0,0072	0,0042	0,0026	0,0054	0,0048	0,0052	0,00564	0,00166	0,00730
900	0,0052	0,0077	0,0082	0,0048	0,0070	0,0038	0,0021	0,0052	0,0046	0,0048	0,00544	0,00166	0,00730



Kuva 4. Mitoituskäyrästäöt palosuojamaalille, kun palonkestoaika on 30 minuuttia ja suojattava teräsprofiili on I-profiili.

11. LÄHTEET

2. NT FIRE 021, Insulation of steel structures: Fire protection. Finland 1985, Nordtest. 14 s.
3. Niels E. Andersen, Guidelines to use of NT FIRE 021. NT techn report 122, Finland 1989, Nordtest project no. 611-86. 15 s.
4. Suomen rakentamismääräyskokoelma osa B7, Teräsrakentect, Ohjeet 1996. Helsinki 1996, Ympäristöministeriö.
5. ISO 834-1:1999, Fire resistance tests - Elements of building construction -- Part 1: General Requirements. Switzerland 1999, International organisation for standardisation. 16 s.
6. prEN 13381-8, Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members, Part 8: Applied reactive protection to steel member, Final Draft, March 2007.