

Ville Koivuniemi

KANTAVIEN TERÄSRAKENTEIDEN PA- LOSUOJAMAALAUKSEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Malaska
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Ville Koivuniemi: Kantavien teräsrakenteiden palosuojamaalauksen suunnittelu ja mitoitus
(Design and dimensioning of fire protection painting of bearing steel structures)
Kandidaatintyö, 43 sivua
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Teräksen materiaaliominaisuudet alkavat heikentyä tulipalossa lämpötilan noustessa yli 300 °C:n. Lämpötilan noustessa edelleen 550 °C:n asti, on teräs menettänyt puolet normaalin lämpötilan materiaaliominaisuuksistaan. Tätä teräksen materiaaliominaisuuksien heikkenemistä pyritään estämään ja hidastamaan erilaisin palosuojausmenetelmin. Yksi käytännöllisistä palosuojausmenetelmistä on palosuojamaali, joka on helppo asentaa teräsrakenteen pintaa esimerkiksi konepajalla.

Palosuojamaalin palosuojaus perustuu maalin paisumiseen, kun savukaasujen lämpötila ylittää 200 °C:n. Maalin paisuminen aiheuttaa teräsrakenteen pintaan maalin kuivakalvoa huomattavasti paksumman ja eristävemmän kerroksen. Palosuojamaalin kuivakalvon paksuus määrittää sen, kuinka kauan palosuojamaali pystyy eristämään teräsrakenteen lämpötilan nousua. Tyypillisiä palosuojausaikoja palosuojamaaleilla ovat R15, R30, R60 ja jopa R90.

Riittävään suojaukseen vaaditun kuivakalvon paksuuden määrittämiseen vaikuttaa monia eri tekijöitä. Merkittävämpiä tekijöitä ovat teräsrakenteen profiilin muoto, teräsrakenteen kriittinen lämpötila ja palonkestovaatimus. Palosuojamaalien mitoituspalona käytetään standardipaloa ISO 834.

Palosuojamaalin asennus edellyttää tarkkuutta ja huolellisuutta, jotta teräsrakenteen pinnalle syntyvä kuivakalvon paksuus vastaa suunnittelijan suunnitelmia. Kuivakalvon paksuutta mitataan sähkömagneettisen mittarin avulla. Jokaiselle teräsprofiilille on omat mittauspisteensä, josta kuivakalvon paksuutta mitataan. Lisäksi palosuojamaali vaatii huoltoa, jotta suunniteltu käyttöikä saavutetaan sekä turvataan palosuojamaalin oikea toiminta palotilanteessa.

Avainsanat: palosuojamaali, palosuojakäsittely, teräsrakenne, kantavuus, kriittinen lämpötila, itsestään paisuva maali

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KANTAVIEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOSUOJAUSMENETELMÄT.....	3
2.1 Teräksen materiaaliominaisuudet.....	3
2.2 Suojaamattomat teräsrakenteet	7
2.3 Kuivan menetelmän palosuojatuotteet	8
2.3.1 Mineraalivillalevyt.....	8
2.3.2 Vermikuliittilevyt	9
2.3.3 Kipsilevyt	10
2.3.4 Sementti-selluloosalevyt	10
2.3.5 Palosuojauskasetointi	11
2.3.6 Puuverhous.....	11
2.4 Märän menetelmän palosuojatuotteet	12
2.4.1 Palosuojaruiskutteet.....	12
2.4.2 Rappaus ja betonointi	13
2.4.3 Vesitäyttö.....	14
2.4.4 Palosuojamaali	15
3. PALOSUOJAMAALIT JA PALOSUOJAMAALAUUS	17
3.1 Tuotehyväksyntä.....	17
3.2 Kemiallinen toiminta	17
3.3 Palosuojamaalin hyvät ja huonot puolet	18
3.4 Maalausjärjestelmät	19
3.5 Palosuojamaalauksen asennus ja kalvopaksuuden määrittäminen	20
3.6 Palosuojamaalauksen huolto	22
4. I-PROFIILIN PALOSUOJAMAALAUKSEN SUUNNITTELU JA MITOITUS	24
4.1 Suunnitteluperusteet	24
4.2 Palokuorma.....	26
4.3 Rakenteen lämpötilan kehittyminen ja kriittinen lämpötila.....	27
4.4 I-profiilin poikkileikkaustekijä	30
4.5 Esimerkkilaskelma	32
5. YHTEENVETO.....	38
LÄHTEET	39

1. JOHDANTO

Terästä käytetään paljon kantavien rakenteiden rakennusmateriaalina, ja se on vakiinnuttanut asemansa rakennusmateriaalina erityisesti monikerroksisissa toimistorakennuksissa (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 5). Teräsrakentamisen yleistymisen myötä myös teräsrakenteiden palosuojaukseen on kiinnitetty yhä enemmän huomiota. Teräsrakenteiden palosuojaus keskittyy lähinnä kantavien teräsrakenteiden palosuojaukseen, mutta myös sekundäärirakenteita palosuojataan. Teräs on palamaton materiaali, mutta menettää lujuutensa ja jäykkyytensä melko nopeasti lämpötilan kohotessa palotilanteessa. Teräsrakenteen lämpölaajeneminen voi aiheuttaa rakenteeseen suuria lämpölaajenemisia ja pakkovoimia (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 5).

Palosuojauksen avulla estetään teräsrakenteen vaurioituminen tulipalossa, jossa liekit ja kuumat savukaasut vaurioittavat rakenteita. Teräsrakenteiden palosuojauksessa käytetään erilaisia levytuotteita, kuten kipsilevyjä ja vermikuliittilevyjä (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 51). Puu on myös hyvä palosuojamateriaali, vaikka onkin palava materiaali. Puun palosuojajominaisuudet perustuvat puun hitaaseen hiiltymiseen. Puu hiiltyy tulipalotilanteessa noin yhden millimetrin minuutissa. Palosuojaverhouksen toiminta tulipalotilanteessa perustuu lämmön eristävyYTEEN tai lämmönsitomiskykyyn, jonka avulla paloverhous estää teräsrakenteen lämpötilan nousun. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 5)

Palosuojamaalaus on vakiinnuttanut asemaansa teräksen palosuojauksena sen esteettisyyden ja helpon asennuksen ansiosta esivalmistusvaiheessa konepajalla (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 65). Palosuojamaalin mitoitus tapahtuu maalin ETA-todistuksen taulukoiden ja ohjeiden mukaan. Laskennallisempaa tapaa palosuojamaalin mitoitukseen ei ole.

Teräsrakenteiden palomitoitus tehdään usein taulukkomitoituksen avulla, mutta satunnaisissa rakennushankkeissa saatetaan käyttää toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua. Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu vaatii suunniteltavalle kohteelle erilaisien paloskenaarioiden tekemisen, jonka avulla simuloidaan tulipaloa ja sen vaikutuksia rakenteisiin. Toiminnallisessa paloturvallisuussuunnittelussa käytetään apuna todennäköisyyksiä, joiden avulla hahmotellaan erilaisia paloskenaarioita ja niiden toteutumistodennäköisyyksiä.

Kandidaatintyössä selvitetään eri palosuojamaalien ominaisuuksia, niiden kemiallista toimintaa ja asennusmahdollisuuksia. Tutkimuksessa esitetään myös I-profiileille sovellettavat palosuojamaalin suunnitteluun ja mitoitukseen liittyvät perusteet. Laskennan apuna käytetään valmiita esimerkkilaskelmia. Viimeisessä luvussa esitetään yhteenveto saaduista tuloksista.

2. KANTAVIEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOSUOJAUSMENETELMÄT

Tämän luvun alussa käsitellään teräksen materiaaliominaisuuksia, teräksen käyttäytymistä palorasituksen alaisena sekä palotilanteen aiheuttamia materiaaliominaisuuksien heikentymistä. Selvityksellä haetaan vastauksia myös siihen, milloin teräsrakenne voidaan toteuttaa ilman palosuojausta ja, mitkä tekijät vaikuttavat siihen, että teräsrakenne voidaan jättää palosuojaamatta. Tyypillisesti teräsrakenteet kuitenkin palosuojataan ja kappaleen lopussa käsitellään teräsrakenteen erilaisia palosuojausmenetelmiä, joilla voidaan parantaa teräsrakenteen kestävyyttä ja estää materiaaliominaisuuksien heikentymistä palotilanteessa.

2.1 Teräksen materiaaliominaisuudet

Teräksellä on muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna hyvät lujuus- ja sitkeysominaisuudet. Teräs on myös verrattain kevyt rakennusmateriaali lujuuteensa verrattuna, jolloin sitä ei tarvita suuria määriä riittävän kantavuuden saavuttamiseksi (Mela 2019). Kun teräsrakenteen lämpötila ei ylitä 100 °C, voidaan Eurokoodin mukaisessa teräsrakenteiden suunnittelussa käyttää materiaaliominaisuuksina kimmokertoimelle arvoa $E = 210\,000$ MPa, liukukertoimelle arvoa $G = 81\,000$ MPa, Poissonin luvulle arvoa $\nu = 0,3$ ja lineaariselle lämpölaajenemiselle arvoa $\alpha = 12 * 10^{-6}$ 1/°C (SFS-EN 1993-1-1 2015, s. 28). Rakenneteräksen tiheytenä voidaan käyttää yleisesti arvoa $\rho = 7\,850 \frac{kg}{m^3}$ (SFS-EN 1993-1-2 2015, s. 21).

Yleisimpänä rakenneteräksenä käytetään teräslaatua S355, jonka myötölujuuden arvo on 355 MPa. Myös rakenneteräksen teräslaatuja S235 ja S275 käytetään, mutta ne eivät ole yhtä käytettyjä kuin teräslaatu S355. Taulukosta 1 on esitetty standardissa SFS-EN 1993-1-1 (2015) eri teräslaaduille annettuja myötö- ja murtolujuuden arvoja normaalilämpötilassa. Teräslaadun lujuuteen vaikuttaa merkittävästi teräksen nimellispaksuus.

Taulukko 1. Kuumavalssattujen rakenneterästen myötölujuuksien ja murtolujuuksien nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-1 2015, s. 26).

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

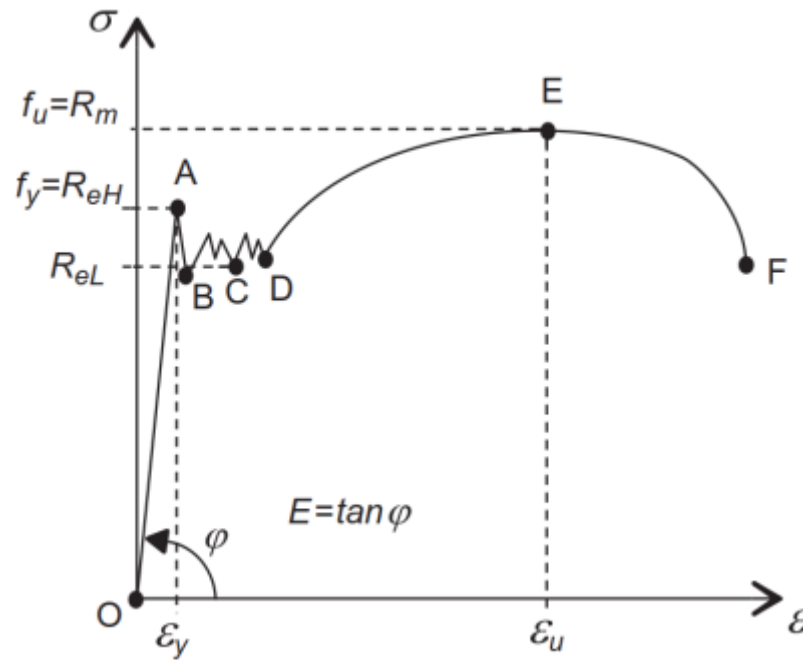
Teräksellä on erinomainen vetorasituksen kestävyys muihin päärakennusmateriaaleihin verrattuna. Kuvasta 1 nähdään, miten teräs käyttäytyy vetorasituksessa. Väliä OA kutsutaan teräksen kimmoisaksi alueeksi. Tämän alueen vetorasituksista teräs vielä palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Pisteessä A teräs saavuttaa ylemmän myötölujuuden rajan, joka on kullekin teräslaadulla ominainen materiaaliominaisuus. Tässä pisteessä teräksen myötövenymien suuruus lasketaan kaavalla (1)

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}, \quad (1)$$

jossa f_y on teräksen myötölujuuden arvo ja E on teräksen kimmokerroin. Myötövenymän suuruus on luokkaa 0,169 % teräslaadulla S355. Aluetta BD kutsutaan myötöalueeksi, jossa teräksen venymät kasvavat jännitysten pysyessä lähes vakiona. Myötöalueen jälkeen teräksen jännitys kasvaa vielä johtuen materiaalin myötölujittumisesta (alue DE). Pisteessä E teräs saavuttaa murtojännityksen f_u , jonka jälkeen alkaa teräksen kuroutuminen välillä EF. Murtojännitystä vastaava venymä on kokonaistasavenymä, joka lasketaan kaavalla (2)

$$\varepsilon_u = \frac{f_u}{E}, \quad (2)$$

jossa f_u on teräksen murtolujuuden arvo. Kuroutumisen aikana venymät kasvavat suuresti, vaikka jännityksen arvo alenee. Tämä edellä esitelty ilmiö johtuu teräksen sitkeydestä. Lopuksi teräs saavuttaa murtovenymän pisteessä F ja teräs katkeaa. (Mela 2019)



Kuva 1. Teräksen materiaaliominaisuudet (Mela 2019).

Teräs on palamaton materiaali, mutta sen materiaaliominaisuudet alkavat heikentyä, kun teräsrakenteen lämpötila nousee yli 450 °C:n. Tällöin teräksen materiaaliominaisuudet muuttuvat, muun muassa teräksen myötöraja, murtolujuus ja kimmomoduuli alenevat. Kuormitetun teräsrakenteen viruma alkaa myös kasvaa voimakkaasti lämpötilan ylitettyä 450 °C:n. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 18) Teräsrakenne on menettänyt kantokyvystään noin 50 %, kun sen lämpötila on noussut yli 550 °C:n. Edellä mainitut teräksen lämpötilan noususta johtuvat materiaaliominaisuuksien muutokset otetaan huomioon suunnittelussa alentamalla laskennassa lujuuksia ja jäykkyyksiä. Teräksen lämpötilan kasvaessa teräkseen alkaa muodostua pakkovoimia, jotka voivat johtua teräksen lämpölaajenemisesta. (Inha & Mattila 1991, s. 18)

Lämpötilan vaikutus teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin otetaan huomioon pienennyskertoimilla, joiden arvot lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Hiiliteräksen pienennystekijät jännitys-venymä yhteydessä korkeissa lämpötiloissa (SFS-EN 1993-1-2 2015, s.22).

Teräksen lämpötila	Pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin f_y tai E_a		
	Tehollisen myötörajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y)	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y)	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon E_a)
θ_a	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

HUOM. Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarista interpolointia käyttäen.

Taulukossa 2 esiintyvät pienennyskertoimet $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ ja $k_{E,\theta}$ lasketaan seuraavilla kaavoilla (3), (4) ja (5).

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}, \quad (3)$$

jossa $f_{y,\theta}$ on teräksen tehollinen myötölujuuden arvo lämpötilassa θ ja f_y on teräksen myötölujuus normaalilämpötilassa.

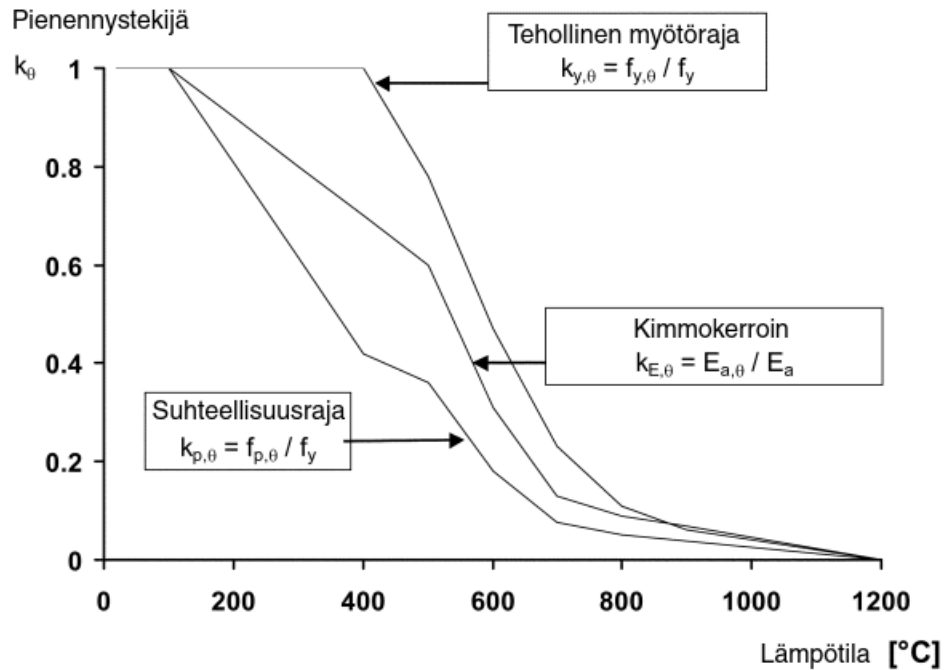
$$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}, \quad (4)$$

jossa $f_{p,\theta}$ kuvaa teräksen suhteellisuusrajaa lämpötilassa θ .

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}, \quad (5)$$

jossa $E_{a,\theta}$ on kimmokertoimen arvo lämpötilassa θ ja E_a on teräksen kimmomoduuli normaalilämpötilassa. (Iso- Mustajärvi & Inha 1999, s. 30)

Kuvasta 2 nähdään, miten hiiliteräksen ominaisuudet muuttuvat lämpötilan noustessa. Teräksen ominaisuudet ovat vakiot normaalilämpötilassa 20 °C ja alkavat tästä laskea lämpötilan noustessa. Kun lämpötila on saavuttanut 1 200 °C lämpötilan, teräsrakenne on menettänyt kaikki materiaaliominaisuutensa eikä kykene enää ottamaan vastaan rasituksia.



Kuva 2. "Pienennystekijät hiiliteräksen jännitys-venymäyhteydelle korkeissa lämpötiloissa" (SFS-EN 1991-1-2 2015, s. 22).

Kuvasta 2 huomataan, että teräs on menettänyt puolet myötölujuudestaan, kun teräksen lämpötila on noin 590 °C.

2.2 Suojaamattomat teräsrakenteet

Suojaamattoman teräsrakenteen palonkesto on hyvin alhainen, ja siksi palosuojaamattomia kantavia teräsrakenteita ei voida käyttää rakenteissa, joissa rakennuksen paloluokka edellyttää rakenteelta yli 15 minuutin palonkestoja (Ympäristöministeriö 2018, s. 7). Ruostumattomasta teräksestä valmistetut rakenteet voivat saavuttaa 30 minuutin palonkestoajan suojaamattomana (Teräsrakenneyhdistys ry, 4. painos 2017, s. 199). Kantavia teräsrakenteita voidaan kuitenkin käyttää suojaamattomina, jos joku seuraavista ehdoista täyttyy (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 47):

1. Kantavilla rakenteilla ei ole paloluokkavaatimusta.
2. On laskelmilla osoitettu, että rakenteen palonaikainen lämpötila ei nouse rakenteen kriittiseen lämpötilaan asti.
3. Rakenteesta vain tietty osa on palolle alttiina, ja alttiina olevan rakenteen osan lämpötila nousee huomattavasti hitaammin kuin palolle alttiin osan lämpötila.
4. Rakenne on ulkopuolella siten, että ulkoseinä ja yläpohja suojaavat rakennetta sisäpuoliselta palolta.

5. 1-kerroksisen rakennuksen yläpohjan rakenteet eivät kuulu kantavaan runkoon eivätkä vaikuta suurelta osaltaan kantavan rungon jäykistykseen.
6. Tuotanto- tai varastorakennuksen teräsrungolle on asetettu palonkestovaatimukseksi R15.
7. Liittorakenteissa palonkestovaatimus on osoitettu muulla teräsrakenteella tai betoniteräksillä tai betonilla.

Suuremmissa teräsrakennekohteissa rakenteissa edellä mainitut ehdot harvemmin täyttyvät, joten näin ollen kantavia teräsrakenteita pyritään suojamaan erilaisin palosuojatuottein. Palosuojatuotteilla pyritään estämään ja hidastamaan palossa syntyvien kuumien palokaasujen aiheuttamia muutoksia teräsrakenteelle. Teräsrakenteiden palosuojaukseen käytettävät palosuojatuotteet jaetaan kahteen menetelmään niiden asennustavan perusteella. Nämä kaksi menetelmää ovat kuivan menetelmän palosuojatuotteet sekä märän menetelmän palosuojatuotteet. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 51)

2.3 Kuivan menetelmän palosuojatuotteet

Kuivan menetelmän tuotteisiin kuuluvat erilaiset levytuotteet sekä perinteinen puuverhous. Näiden tuotteiden palosuojaominaisuudet perustuvat palon hidastamiseen teräsrakenteen pinnassa, joko lämmöneristämällä tai tuotteen ominaislämpökapasiteetin avulla. Levytuotteiden asennus on melko hidasta ja vaativaa työtä, jotta teräsrakenne saadaan suojattua kaikilta sivuiltaan yhtä tehokkaasti. Palosuojaus voidaan toteuttaa muun muassa mineraalivilla-, vermikuliitti-, kipsi-, puukipsi- ja sementti-selluloosalevyillä (Inha & Mattila 1991, s. 67–68). Levyasennuksessa pitää huomioida tarvittava tila levyasennukselle, koska kiinnitys toteutetaan yleensä mekaanisilla kiinnikkeillä. Myös kovien palosuojalevyjen kutistuminen pitää ottaa huomioon suunnittelussa. Vastaavasti kotelo-rakenteiden pitää säilyttää tiiviys palotilanteessa. Tämä voidaan huomioida suunnittelussa ottamalla huomioon levyjen kutistuma. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 51) Märän menetelmän tuotteisiin verrattuna kuivan menetelmän tuotteet tarvitsevat enemmän tilaa teräsrakenteen ympärille. Myös arkkitehtoninen kanta pitää ottaa huomioon kuivan menetelmän palosuojatuotteita suunniteltaessa.

2.3.1 Mineraalivillalevyt

Mineraalivillalevyjen palosuojominaisuudet perustuvat mineraalivillan hyvään lämmöneristävyyteen, jolloin teräsrakenne ei saavuta palotilanteessa teräksen kriittistä lämpötilaa. Lisäksi palosuojaukseen suunnitelluilla mineraalivilloilla on korkea kuitujen sint-raantumislämpötila, jolloin kuidut sulavat yhteen. Lämpötila riippuu palonkestoajasta,

mutta on suuruudeltaan 800–1 100 °C. Käytettävien palosuojausmineraalivillalevyjen tiheys on yleensä 100–400 $\frac{kg}{m^3}$. Suojauksen paksuus vaihtelee välillä 10–120 mm, ja suuria alueita suojatessa pitää ottaa huomioon mineraalivillalevyn jäykkyys sitä käsiteltäessä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 52)

Mineraalivillalevyt kiinnitetään teräsrakenteeseen mekaanisilla kiinnikkeillä tai liimamalla. Kiinnitykseen käytettäviä mekaanisia kiinnikkeitä ovat teräspiikit ja lukituslevyt sekä paineilmanaulat ja tyssähitsinaulat. Levyt kiinnitetään toisiinsa harvakierreruuvilla, nauloilla tai hakasilla. Levyjen paikoillaan pysyminen voidaan varmistaa kiertämällä levyjen ympärille teräsverkko. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 52)

Liimaus toteutetaan palamattomalla ja kuumuutta kestäväällä epäorgaanisella liimalla. Liimauksessa on kiinnitettävä huomiota levyjen välisten saumojen tiiveyteen. Liimauksen onnistumisen kannalta teräspintojen tulee olla kuivia ja puhtaita pölystä sekä öljystä. Liimana voidaan käyttää esimerkiksi silikaattiliimaa, joka on vesiliukoinen liima. Kuivuttuaan liima on pakkasenkestävää. (Inha & Mattila 1991, s. 69–70)

Mekaaniset kiinnikkeet asennetaan joko hitsaamalla tai ampumalla metallikiinnikkeet teräsprofiliin. Teräspiikin profiiliin tulee olla vähintään 2 mm paksu. Kiinnikkeiden suurin sallittu keskiöväli on 450 mm, ja kiinnikkeen etäisyys levyn reunasta saa olla korkeintaan 150 mm. Mineraalivillalevyt asennetaan painamalla levy kiinnikkeiden läpi, minkä jälkeen levyt lukitaan lukituslevyjen avulla kiinnikkeisiin. (Inha & Mattila 1991, s. 69)

2.3.2 Vermikuliittilevyt

Vermikuliittilevyt valmistetaan vermikuliitistä eli paisutetusta kiilteestä, ja sideaineena toimii silikaattipitoinen aine kuten sementti. Palosuojaus perustuu sideaineen suureen ki-devesimäärään, jolloin palossa lämmöllä kuluu suuri määrä energiaa veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen. Vermikuliitillä itsestään on hyvä lämmöneristyskyky korkeissa-kin lämpötiloissa, mikä parantaa entisestään vermikuliitin palosuojausominaisuuksia. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 53)

Vermikuliittilevyn tiheys on hieman suurempi kuin mineraalivillalevyn tiheys. Tämän se-littää sementti, joka toimii sideaineena ja, jonka tiheys on mineraalivillaa ja vermikuliittia huomattavasti suurempi. Vermikuliittilevyn tiheys on suunnilleen 350–500 $\frac{kg}{m^3}$. Levyt ovat 16–80 mm paksuja, mikä on samaa kokoluokkaa kuin mineraalivillalevyillä. Pintamateri-aaliksi voidaan valita joko maalaus tai pinnoitus, koska vermikuliittilevyn pinta on tasai-nen. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 53)

Levyt asennetaan teräsprofiilin ympärille kotelomaisesti lämpöä kestäväällä laastilla ja naulojen tai ruuvien avulla. Liimausta tehtäessä pitää varmistaa, että teräsprofiilin pinnassa ei ole irtonaista ruostetta eikä valssihilsettä. Jotta laasti kuivuisi ja liimaus onnistuisi, lämpötilan on oltava yli 0 °C. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 53) Levyjen ja teräsprofiilin väliin jätetään noin 3 mm ilmarako, jolla parannetaan lämmöneristävyyttä (Inha & Mattila 1991, s. 70).

2.3.3 Kipsilevyt

Kipsilevyjen käyttö paloeristyksessä perustuu kipsin suureen kideveden määrään, jolloin palotilanteessa kideveden höyrystymiseen kipsistä kuluu suuri määrä lämpöenergiaa. Palotilanteessa kipsilevyn suojan puoleisen pinnan lämpötila pysyy 100 °C:ssa niin kauan kuin kaikki kidevesi on höyrystynyt kipsistä pois. Kideveden höyrystymisen loputtua, vahvistamaton kipsilevy rikkoutuu ja menettää paloneristävyyssominaisuutensa. Kipsilevyn rakennetta voidaan vahvistaa esimerkiksi lisäämällä hieman lasikuituja sideaineeksi, jolloin kipsilevy säilyttää rakenteensa kideveden höyrystymisen jälkeenkin. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 55)

Kipsilevyn tiheys vaihtelee 770–980 $\frac{kg}{m^3}$ välillä, riippuen kipsistä ja käytetyistä sideaineista. Teräsrakenteita palosuojatessa käytetyimmät kipsilevyjen paksuudet ovat 13 mm ja 15 mm. Rakentamisessa yleisesti käytetty kipsilevy on 13 mm paksu. Kipsilevyjä voidaan käyttää yhtenä tai useampana kerroksena teräsrakenteen palosuojauksessa. Kipsilevyt kiinnitetään teräsrakenteen ympärille koteloksi yleensä teräsohutlevyprofiilien avulla. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 55) Kiinnitys voidaan toteuttaa myös itseporautuvien ruuvien avulla. Teräsohutprofiilien käyttö kuitenkin mahdollistaa ilmaraon jättämisen teräsprofiilin ja kipsilevyn väliin. (Inha & Mattila 1991, s. 75)

Eri sideaineilla saadaan erilaisia kipsiseoksia, joista voidaan muovata erimuotoisia ja eripaksuisia kipsielementtejä. Tällöin kipsielementin tiheys on yleensä 670–800 $\frac{kg}{m^3}$. Valmiista seoksesta voidaan valaa erimuotoisi elementtejä, esimerkiksi puolipyörän muotoisia elementtejä, joita voidaan käyttää ympyrän muotoisten pilarien palosuojauksessa. Elementit kiinnitetään työmaalla toisiinsa lämmönkestävällä liimalla. Yleensä tämän tyyppisen palosuojauksen seinämäpaksuus on 20–40 mm. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 55)

2.3.4 Sementti-selluloosalevyt

Sementti-selluloosalevyn valmistusmateriaalina käytetään nimensä mukaisesti sementtiä, selluloosaa ja erilaisia mineraalisia ainesosia. Sementin ja erilaisten mineraalisten

ainesosien myötä sementti-selluloosalevyn tiheys on noin $1\ 100 \frac{kg}{m^3}$. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 56) Levyjen paksuudet ovat yleensä 8 mm ja 10 mm. (Inha & Mattila 1991, s. 76)

Sementti-selluloosalevyjä käytetään pääasiassa kantamattomissa ja osastoivissa A-luokan rakenteissa, kuten väliseinissä. Näiltä rakenteilta ei vaadita yhtä pitkää palonkestoaikaa kuin kantavilta rakenteilta. (Inha & Mattila 1991, s. 76) Levyt kiinnitetään teräsrakenteeseen joko suoraan ruuvaamalla itsestään porautuvilla, teräväkärkisillä ja tiheäkierteisillä ruuveilla tai kiinnityslistojen avulla (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 56).

2.3.5 Palosuojauskasetointi

Palosuojakasetit valmistetaan tehtaalla L- ja U-muotoisista teräsohutlevyistä, joiden sisäpintaan asennetaan paloeristysmateriaali jo tehtaassa (Inha & Mattila 1991, s. 76). Paloeristysmateriaalina käytetään yleensä mineraalivillaa, kalsiumsilikaattia tai vermikuliittia (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 56). Palotilanteessa teräsohutlevy suojaa lämmöneristysmateriaalia kulutukselta ja tukee eristettä. Teräsohutlevyn sisäpinnan paloeristys estää lämmön johtumisen teräsrakenteeseen. Sisäpinnan paloeristysmateriaali on liimattu teräsohutlevyn sisäpintaan. Teräsohutlevyn paksuuden ollessa 0,5 mm ja paloeristysmateriaalin (mineraalivilla) ollessa 20 mm, saavutetaan rakenteelle noin 60 minuutin palonkesto. (Inha & Mattila 1991, s. 77) Kasettielementit asennetaan teräsrakenteen ympärille painamalla elementtien saumat reunoistaan kiinni tai tavanomaisesti ruuvi kiinnityksen avulla (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 56).

2.3.6 Puuverhous

Puuverhouksen käyttö palosuojauksena perustuu puun hyvään lämmöneristävyyteen. Puu on kuitenkin palava materiaali, joten puuta voidaan käyttää palosuojauksena ainoastaan B-luokan rakenteissa. (Inha & Mattila 1991, s. 78)

Kun teräsrakennetta suojataan puuverhouksella, pitää suunnittelussa ottaa huomioon puun hiiltymisnopeus, joka määrää puuverhouksen palosuojausajan. Normaalisti otaksutaan, että puu hiiltyy täyden palon vaiheessa 0,8 mm minuutissa. 30 minuutin palonkestoaika saavutetaan siis noin 25 mm paksulla täyspönttilaudoituksella. Hiiltymisnopeuden laskennassa käytettävä mitoituspalo on standardipalo tai huonepalo, mutta huoneen palokuormassa on otettava huomioon myös teräksen palosuojauksessa käytetty puuverhous. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 60)

2.4 Märän menetelmän palosuojaustuotteet

Märän menetelmän palosuojaustuotteet asennetaan/levitetään teräsrakenteen päälle märkänä. Märän menetelmän palosuojaustuotteiden palosuojaus perustuu palossa syntyvien kaasujen ja kuumuuden absorboimiseen ja eristämiseen. Nämä tuotteet vaativat osaltaan vähemmän tilaa asennettuna kuin kuivan menetelmän palosuojaustuotteet. Siksi nämä palosuojaustuotteet ovat ulkonäöllisesti parempi ratkaisu sellaisiin kohteisiin, jossa halutaan teräsrakenteen jäävän näkyviin.

2.4.1 Palosuojaruiskutteet

Palosuojaruiskutteiden palosuojaominaisuus perustuu ruiskutteen runkoaineen alhaiseen lämmönjohtavuuteen ja hyvään palonkestävyyteen. Tällaisia runkoaineita, joita ruiskutteessa käytetään ovat mineraalikulut, perliitti ja vermikuliitti. Runkoaineen sitomiseen käytetään sideaineena sementtiä, kalkkia tai kipsiä sekä vettä. (Inha & Mattila 1991, s. 59) Palosuojaruiskutteet sopivat niin suorien ja tasaisten pintojen palosuojaukseen kuin sokkeloisten, mutkikkaiden ja epätasaisten pintojen palosuojaukseen. Kuivan menetelmän palosuojaustuotteisiin verrattuna, palosuojaruiskutteilla saadaan aikaan saumatonta palosuojausta. Ruiskutus voidaan toteuttaa profiilia myötäillen, koteloimalla tai ruiskuttamalla profiili umpeen. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 56)

Ruiskutteen onnistumiseksi palosuojattava teräsrakenne tulee olla puhdas pölystä, öljystä, irtoavasta maalista, valssihilseestä ja muista vastaavasti ruiskutuksen tartuntaa heikentävistä epäpuhtauksista. Puhdistus voidaan tarpeen mukaan suorittaa teräsharjalla tai hiekkapuhaltamalla. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 57) Palosuojaruiskutuksessa runkoaines ja epäorgaaninen sideaine ruiskutetaan vesisuihkun avulla suojattavalla pinnalle (Inha & Mattila 1991, s. 60). Ruiskutuksen tartuntaa voidaan parantaa asentamalla suojattavaan rakenteeseen sinkitty teräsverkko, joko ammutuilla tai hitsatuilla nauloilla, niiteillä tai teräslangalla. Tukiverkon käyttö tulee suunnitella hyvin, jos eristepaksuus on alle 45 mm. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 57) Ruiskutteen ollessa hygroskooppinen aine, se tasaa rakenteeseen joutuneen kosteuden koko materiaalin alueelle ja haihduttaa sen ulkopuoliseen ilmaan suhteellisen ilmankosteuden laskettua. Näin ollen teräsrakenteen ja palosuojaruiskutteen väliin ei pääse muodostumaan korroosiota aiheuttavia kondenssivesitasuja. Palosuojaruiskutteen sementtiseideaineen myötä teräsrakenne ei tarvitse erillistä korroosionsuojausta, koska sementti on korkea alkalinen ja suojaa näin terästä korroosiolta. (Inha & Mattila 1991, s. 60)

Palosuojaruiskutteiden asennuksen jälkeen on huolehdittava ruiskutteiden huolellisesta jälkihoidosta, koska ruiskutteet eivät kestä ennen kuivumistaan pakkasta eivätkä kovin

hyvin juoksevaa vettä. Jälkihoidossa on huolehdittava, että ilman lämpötila on vähintään + 5 °C. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 57)

Palosuoja-ruiskutteen voidaan toteuttaa kahdella tavalla, joko vermikuliittiruiskutuksella tai mineraalikuitturuiskutuksella. Mineraalikuitturuiskutus toteutetaan ruiskuttamalla mineraalivilakuituja ja sementtiä veden kanssa palosuojattavalle teräspinnalle. Eristystarpeen mukaan valmiin kerroksen paksuus vaihtelee 10 mm ja 60 mm välillä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 57) Näillä eristepaksuuksilla voidaan saavuttaa aina 120 minuutin palonkesto-aika (Inha & Mattila 1991, s. 61). Kuivuneen ruiskutteen pinta on huokoinen, mutta arkkitehtonisista syistä pinta voidaan ruiskumaalata tai verhoilla. Mineraalikuitturuiskutteen tiheys on hieman suurempi kuin mineraalivilallevyn, koska joukossa on sideaineena sementtiä. Kuituruiskutteen tiheys on 220–500 $\frac{kg}{m^3}$. Mineraalikuitturuiskutteen pehmeän pinnan vuoksi, ruiskute on suojattava jo pientäkin mekaanista kulutusta vastaan. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 57) Jos pinnoite pitää asentaa mineraalikuitturuiskutteen päälle, pinnoitteena voidaan käyttää levyverhousta, rappausta, laastitasoitusta tai liimatua lasikuitukangasta. Ulkokäyttöön suunniteltaessa eristeen pintaan on asennettava kosteudensulku ja huolehdittava suojauksesta, niin ettei eristeen pinta joudu kosketuksiin öljyjen kanssa. (Inha & Mattila 1991, s. 61)

Toinen mahdollinen käytettävä palosuoja-ruiskute on vermikuliittiruiskutus, jossa runkoaineena käytetään vermikuliittia. Sideaineena toimii sementti, kalkki tai kipsi sekä vesi. Asennus tapahtuu samalla tavalla kuin mineraalikuitturuiskutteen siten, että ruiskute ruiskutetaan suoraan teräsrakenteen pintaan. Toiset massat voidaan taas asentaa rappamalla käsin teräsprofiilin pintaan. Kerrospaksuudet vaihtelevat 10 mm ja 60 mm välillä, ja asennus voidaan toteuttaa joko kerta-asennuksena tai niin, että suojaus asennetaan 10–15 mm kerroksina. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58) Jos vermikuliittiruiskutteen asennuspaksuus on yli 35 mm, tällöin pitää käyttää sinkittyä rauditusverkkoa tuke-massa ruiskutetta (Inha & Mattila 1991, s. 62). Vermikuliittiruiskutteen tiheys on 300–800 $\frac{kg}{m^3}$, joka on hieman suurempi kuin mineraalikuitturuiskutteen. Kevyempien vermikuliittiruiskutteen asennuksen jälkeen on huomioitava pinnan pehmeys, joka pitää huomioida, jos pintaan kohdistuu mekaanista kulutusta. Painavammat vermikuliittiruiskutteen ovat pinnaltaankin jo kovempia kuin kevyemmät ruiskutteen. Kestävyyttä voidaan parantaa samoilla tuotteilla kuin mineraalikuitturuiskutteen pehmeää pintaa parannettiin. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58)

2.4.2 Rappaus ja betonointi

Rappaus toimii teräsrakenteen ulkopuolisena palosuojauksena, joka asennetaan käsin rapaten teräsrakenteen ympärille koteloksi muotoiltuun teräslankaverkkoon. Palosuojarappaus voidaan toteuttaa esimerkiksi kevyt kipsilaastilla tai sementti-kalkki-hiekkalaastilla, jossa sekoitussuhde määräytyy tilavuuden mukaan 1:2:6 (sementti:kalkki:hiekka). (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 59) Kutistuvalla palosuojarappauksella saavutetaan noin 10–15 mm kerrospaksuus, mutta jos käytetään kutistumatonta kipsirappausta, tällöin rappauksen kokonaiskerrospaksuudeksi voidaan saavuttaa 30–50 mm kerrospaksuus (Inha & Mattila 1991, s. 65).

Betonin ja tiilen palosuojausominaisuus perustuu niiden suureen lämpökapasiteettiin. Palotilanteessa betonin sisällä oleva huokosvesi ottaa osan lämpöenergiasta vastaan veden höyrystymiseen. Betonia voidaan käyttää teräsrakenteen ulkopuolella tai sisäpuolella, jolloin betoni toimii teräksen kanssa kantavana liittorakenteena. Tällöin teräksen lämpeneminen palotilanteessa ei tuota vielä suurta vauriota, koska teräksen menettäessä kantavuutensa, betoni ottaa kuormat vastaan ja kannattelee yläpuolisia rakenteita. Betoni myös siirtää teräkseen kulkeutuneen lämmön teräksen viileämpiin osiin. Sisäpuolisessa betonoinnissa on huomioitava palotilanteessa syntyvän vesihöyryn ylipaineen ulospääsy poraamalla teräsrakenteeseen pieniä reikiä, joista vesihöyryn ylipaine pääsee purkautumaan ulos eikä synny rakenteen sisälle vesihöyryn ylipainetta, joka lisäisi rakenteen rasituksia. (Inha & Mattila 1991, s. 65)

Tiiliä voidaan käyttää teräsrakenteen palosuojauksena pilareissa, joissa halutaan arkkitehtonisesti kaunis ulkokuori pilarille. Tiili on hyvä palosuojamateriaali, koska tiilen polttovaiheessa tiilen lämpötila käy korkealla. Tiilestä muuraamalla puolen kiven kokoisella muurauksella, voidaan saavuttaa 240 minuutin palonkesto aika. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 59)

2.4.3 Vesitäyttö

Palosuojauksena vesitäyttöä käytetään yleensä ontoissa teräspuotkipilareissa, joissa teräspuotkipilarin ontto tila täytetään vedellä. Vesi toimii hyvin palotilanteessa palosuojauksena, koska johtaa teräkseen johtuneen lämmön pääosin veteen. Tällöin teräksen lämpötila nousee korkeintaan 200–250 °C:n. Veden tehokas lämmön johtuminen varmistetaan yhdistämällä rakenteen sisäiset vesitilat sisäisellä putkiverkostolla, jotta vesi voi liikkua painovoimaisesti. Samalla myös vesihöyryn ylipaine pääsee tasaantumaan rakenteen sisällä, eikä ylipaine näin aiheuta ylimääräisiä rasituksia rakenteelle. Sisäinen putkiverkosto takaa myös korvaavan veden virtaamisen kuumuuden lämmittäneen veden

tilalle. Veden jäätyminen ja korroosiovaikutusten estämiseksi, veteen on lisättävä erilaisia kemikaaleja, jotka estävät edellä mainitut rasitukset. (Inha & Mattila 1991, s. 65–66)

Vesitäyttöistä palosuojauksista on käytetty etenkin toimistorakennuksissa USA:ssa, Englannissa, Saksassa ja Ranskassa (Inha & Mattila 1991, s. 66). Koska vesi on hyvä johdamaan lämpöä, pienissä tulipaloissa teräsrakenne ei välttämättä ole vaurioitunut pahoin. Tällöin teräsrakenteen pieni korjaus saattaa riittää rakenteen korjaamiseksi, mikä halventaa tuntuvasti korjauskustannuksia. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 60)

2.4.4 Palosuojamaali

Paisuvat palosuojamaalit ovat yleisesti käytettyjä, koska normaalissa käyttölämpötilassa ne ovat kuin tavallinen maalipinta, mutta paisuessaan palotilanteessa eristävät teräsrakennetta kuumuudelta. Palosuojamaalit, jotka ainoastaan häiritsevät palamisreaktiota muodostamalla kloori- tai bromivetyä, eivät suojaa teräsrakennetta kuumuudelta. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58)

Palosuojamaalin paisumisreaktio alkaa, kun palosuojamaalin lämpötila ylittää 200 °C:n. Paisumisreaktion alkamislämpötila vaihtelee eri palosuojamaalien välillä. Rakenteen palosuojamaali on täysin paisunut noin 300 °C:n lämpötilassa. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58) Vaahtoutunut maali suojaa terästä kuumuudelta ja liekeiltä, mutta hiiltyy kuitenkin palon aikana. Siksi vaahtoutuneen maalin hiiltyminen ja irtoaminen rakenteen pinnalta heikentävät maalin suojaavaa vaikutusta pitkäaikaisessa palorasituksessa. (Inha & Mattila 1991, s. 63)

Nykyisin käytettävät palosuojamaalityypit kestävät standardipalorasituksessa 15–120 minuuttia (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 6). Suomessa palonkesto-aika on rajoitettu palosuojamaaleilla standardipaloa käytettäessä (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58).

Palosuojamaali levitetään teräsrakenteen pintaan siveltimellä, telalla tai ruiskuttamalla kuten mikä tahansa muukin maali. Kuivuneen palosuojamaalin paksuus on tavallisesti 0,2–3 mm. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58) Palosuojatuotteet edellyttävät kuitenkin maalattavalta pinnalta puhtautta. Puhdistus tehdään yleensä suihkupuhdistuksella. Jotkut tuotteet vaativat lisäksi myös korroosionestomaalauksen ennen palosuojamaalausta (Inha & Mattila 1991, s. 63).

Palosuojamaalin suunnittelussa, työnsuorituksessa ja kuljetuksessa on otettava huomioon se, että palosuojamaali ei kestä mekaanista rasitusta eikä kosteutta (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58). Tästä syystä palosuojamaalattu rakenne tulee suojata kulutukselta.

(Inha & Mattila 1991, s. 63). Teräsrakenteeseen valittavalla oikealla pintamaalilla voidaan parantaa rakenteen palosuojamaalin kestävyttä säärasituksissa (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58). Palosuojamaalauksen toteutusta ja laadunvarmistusta koskevia ohjeita löytyy esimerkiksi Teräsrakenneyhdistys ry:n Teräsrakenteiden palosuojamaalaus-julkaisusta (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 6–7).

Palosuojamaalin paras suojaava vaikutus saadaan käyttämällä palosuojamaaliyhdistelmiä, jolloin teräsrakenne maalataan pohja- palosuoja- ja pintamaalilla. Tällä maalausyhdistelmällä saavutetaan sisätiloissa riittävä korroosionesto ja samanlainen ulkonäkö teräsrakenteen pinnalle kuin tavanomaisella maalauskesittelyllä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 59) Pintamaalauksella parannetaan teräsrakenteen korroosionkestävyyttä ja ulkonäköä, mutta pintamaali vaaditaan erityisesti suojaamaan palosuojamaalia kulutukselta. Muihin palosuojamateriaaleihin verrattuna, palosuojamaalin etuna on ohut kerrospaksuus ja kuivumisen jälkeen valmis pinta. Palosuojamaalauksella ei jouduta koteloimaan rakenteita, jolloin rakenteen ulkonäkö ja arkkitehtuuri eivät muutu. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58) Toisaalta palosuojamaalilla saavutettava palonkesto aika rajoittuu 15–120 minuuttiin. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 6) Seuraavissa luvuissa esitetään yksityiskohtaisempaa tietoa palosuojamaalauksesta sekä teräsrakenteen palosuojamaalin mitoituksesta vaaditun palonkestoajan saavuttamiseksi.

3. PALOSUOJAMAALIT JA PALOSUOJAMAALAU- LAUS

Luvussa 3 käsitellään tarkemmin edellä esitelty palosuojamaali. Tuotehyväksynnällä todetaan palosuojamaalin kelpoisuus. Tutkitaan palosuojamaalin kemiallista toimintaa ja pohditaan, mitä hyviä ja huonoja ominaisuuksia palosuojamaalilla on. Luvun lopussa esitellään palosuojamaalauksen asennustapoja sekä, miten kuivunutta palosuojamaalia tulisi huoltaa suunnitellun käyttöiän saavuttamiseksi.

3.1 Tuotehyväksyntä

Palosuojamaalin käyttö edellyttää kyseiseltä tuotteelta tuotetestausta ja tuotehyväksynnän. Tuotetestaus toteutetaan valvotuissa ja asianmukaisissa olosuhteissa, jotta testaus tulos olisi mahdollisimman todenmukainen. Palosuojamaalin testauksen saa toteuttaa vain siihen pätevyyden saanut tutkimuslaitos/-ryhmä. Testauksen aikana mitataan teräsrakenteen lämpötilan kasvua sekä kuinka paljon palosuojamaali paisuu ja miten se reagoi palon kanssa. Mittauksesta saatuja tuloksia verrataan tuotevalmistajan lupaamiin tuloksiin. Jos tuotevalmistajan antamat tulokset täyttävät myös mitatut tulokset, on palosuojamaali täten asianmukainen ja tuote voidaan lisätä markkinoille. (Lindblad 2012, s. 30–31)

Palosuojamaalin käytön hyväksyntä todetaan CE-merkin tai ETA-hyväksynnän avulla. CE-merkki vaaditaan kaikilta rakennusmateriaaleilta. CE-merkintä ilmoittaa tuotteen tiedot, jolloin tuotteen soveltuvuuden tarkistaminen kyseiseen rakennuskohteeseen on helppo tarkistaa. Eurooppalainen tuote arviointi ETA, voidaan hakea tuotteelle, jolla ei ole harminisoitua tuotestandardia. Teräsrakenteiden palosuojaukseen hyväksytyt ETA-hyväksytyt palosuojamaalit ovat ETAG-tunnuksen omaavia tuotteita. (Lindblad 2012, s. 30–31)

3.2 Kemiallinen toiminta

Palosuojamaalin toiminta jaetaan kahteen eri toimintatapaan palotilanteessa. Palosuojamaalin toiminta voi olla palon aikana palamisreaktiota häiritsevää tai paisuvaa, jolloin maali paisuessaan eristää teräsrakenteeseen johtuvaa lämpöä. Palamisreaktiota häiritsevät palosuojamaalit nimensä mukaisesti häiritsevät palamisreaktiota vapauttamalla ilmaan erilaisia kaasuja kuten kloori- tai bromivetyä. Nämä kaasut häiritsevät palamisreaktiota ja syrjäyttävät happea. Ne eivät kuitenkaan estä teräsrakenteen lämpenemistä.

Tämän syyn takia palamisreaktiota häiritseviä palosuojamaaleja ei käytetä palosuojauksessa, koska ne eivät kykene estämään teräsrakenteen lämpenemistä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58)

Palosuojamaalin toiminta palotilanteessa perustuu lämpötilan nousun aiheuttamasta reaktiosta palosuojamaalissa, jolloin palosuojamaali paisuu muodostaen eristävän kerroksen teräsrakenteen pintaan (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 64). Palosuojamaalin paisuminen alkaa noin 200 °C kohdalla ja jatkuu aina niin kauan, kunnes koko maali on paisunut. Palosuojamaali voidaan luokitella kahteen ryhmään, ohutkalvoiset - ja paksukalvoiset palosuojamaalit. Ohutkalvoinen palosuojamaali voi paisua jopa 50 kertaiseksi paisumattomaan maaliin verrattuna. Vastaavasti paksukalvoinen palosuojamaali paisuu ainoastaan vain 5–8 kertaiseksi kuivakalvon paksuuteen verrattuna. (Lindblad 2012, s. 17) Paisuneen palosuojamaalin palosuojaominaisuus perustuu lämmön eristämiseen paisuneen hiiltyneen kerroksen avulla. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58)

3.3 Palosuojamaalin hyvät ja huonot puolet

Palosuojamaali on arkkitehtonisesti paras ratkaisu muihin palosuojausmenetelmiin verrattuna, koska palosuojamaalauksella teräsrakenne voidaan jättää näkyviin. Palosuojamaalauksella saadaan säilytettyä teräsrakenteen ulkonäkö ja muoto, jos tilaaja ja arkkitehti sitä vaativat. Hyvin maalattu palosuojamaali ei eroa kuivuttuaan juurikaan normaalista korroosionestomaalista. Onnistuneen palosuojamaalauksen maalipinta on kuivuttuaan ohut ja tasainen. Kuitenkin, jos teräsrakenteelle vaaditaan kovin paksu palosuojamaalikerros, tällöin teräsrakenteen ulkonäkö saatetaan menettää liian suuren maalikalvon takia. (Lindblad 2012, s. 26–27)

Palosuojatun teräsrakenteen haluttu pintaväri voidaan toteuttaa pintamaalilla palosuojamaalin kuivuttua. Palosuojamaaleja ei itsessään sävytetä, joten pintamaalaus pitää suorittaa tähän tarkoitukseen soveltuvilla maaleilla. Palosuojamaalin suurimpiin etuihin muihin palosuojamenetelmiin nähden ovat sen pieni suojapaksuus, keveys ja valmis pinta, jota ei erikseen tarvitse korroosionsuojata. Tavanomaisiin korroosionsuojamaaleihin verrattuna palosuojamaali on kustannuksiltaan huomattavasti kalliimpi. Kustannukset ovatkin lähes ainoa syy palosuojamaalin vallinnassa teräsrakenteiden palosuojauksessa. (Lindblad 2012, s. 27)

Tietyissä teräsrakenteissa palosuojamaali on kuitenkin ainoa vaihtoehto palosuojaukselle kuten reikäpalkkeissa. Reikäpalkkien uumassa on reikiä, joiden läpi välipohjan alla kulkeva rakennuksen vaakasuuntainen talotekniikka voidaan asentaa. Tällöin palosuo-

jauksen toteuttaminen mineraalivillalevyillä tai vastaavilla tuotteilla on hankalaa ja työlästä. (Lindblad 2012, s. 27) Toinen kilpailukykyinen tuote reikäpalkkien palosuojaukseen on palosuojaruiskutteet, mutta palosuojaruiskutteiden arkkitehtoninen ulkonäkö ei useinkaan miellytä tilaajaa.

Muihin palosuojausmenetelmiin verrattuna palosuojamaalaus on huomattavasti vaativampi toimenpide kuin esimerkiksi palosuojalevyjen asennus, vaikka niidenkin asennuksessa pitää levyjen saumat toteuttaa huolellisesti. Yleensä onnistuneen palosuojamaalauksen aikaansaamiseksi käytetään ammattitaitoista palosuojamaalaria. Palosuojausmaalin oikeaoppisen toiminnan kannalta on tärkeää, että teräsrakenteen pinnassa on juuri se kalvopaksuus, joka kyseiselle teräsrakenteelle on suunniteltu. Jos kalvopaksuus on liian paksu tai liian ohut, palosuojamaali ei toimi palotilanteessa oikein ja näin ollen rakenne ei saavuta suunniteltua palonkestoa. Suunnitelmien mukaisen kalvopaksuuden aikaansaamiseksi palosuojamaalaukseen kuuluu olennaisena työvaiheena myös kalvopaksuuksien tiheä mittaus. Palosuojamaalauksen toteuttamisessa pitää huomioida myös se, että maalaustyö on märkä menetelmä, joten olosuhteet pitää olla maalaustyölle oikeat. Myös ympäröivät tilat pitää suojata mahdollisia roiskeita vastaan. (Lindblad 2012, s. 27)

Palosuojamaalauksen lähes ainoa huono puoli muihin palosuojamenetelmiin nähden on palosuojausmaalin kustannukset. Nykyaikaisen teknologian ja kilpailun myötä ohutkalvoisen palosuojausmaalin kustannukset ovat kuitenkin laskeneet viimeisen kymmenen vuoden aikana. Teknologia on mahdollistanut myös aikaisempaa ohuempien kalvopaksuuksien käytön, mikä on lisännyt palosuojausmaalin kilpailukykyä. (Lindblad 2012, s. 28)

3.4 Maalausjärjestelmät

Palosuojausmaalin maalausjärjestelmiä ovat perinteinen siveltimellä maalaus, telalla levitys tai ruiskumaalaus (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 7). Jokainen maalausjärjestelmä sisältää kullekin ominaisia työvaiheita, mutta pääsääntöisesti maalaustyö tapahtuu lähes samalla tavalla. Maalaustyöntekijän pitää olla ammattitaitoinen henkilö sekä maalaustyö pitää toteuttaa valmistajan ohjeiden mukaan. Maalausjärjestelmän valintaan vaikuttaa suuresti se, missä palosuojausmaalaus toteutetaan. Tapahtuuko maalaus suoraan työmaalla vai jo teräsrakenteen valmistusvaiheessa konepajalla vai erillisellä maalamolalla.

Maalausjärjestelmän valintaan vaikuttaa se, onko palosuojausmaali vesi- vai liuotinliukoinen (Lindblad 2012, s. 17). Tämä pitää huomioida maalausjärjestelmää valittaessa. Sivellin

maalaukseen sopii parhaiten pienten ja monimutkaisten teräsrakenteiden palosuojamaalausjärjestelmäksi. Suurempien kohteiden palosuojamaalaukseen sopii paremmin telamaalaus. Tällöinkin teräsrakenteen olisi hyvä olla vähän kulmia sisältävä ja mahdollisimman laakea, jotta maalaustyö olisi mahdollisimman tehokasta. Ruiskumaalaus on edellä mainituista maalausjärjestelmistä nopein ja sopiikin parhaiten konepaja ja maalaamo maalaukseen. Asennetun teräsrakenteen ruiskumaalauksessa pitää huomioida maalaustyön aikana roiskuva maali.

3.5 Palosuojamaalauksen asennus ja kalvopaksuuden määrittäminen

Palosuojamaalaus pitää toteuttaa Teräsrakenteiden palosuojamaalaus 2017 -ohjeen mukaan (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 5). Palosuojamaalauksen asennus voidaan tehdä joko suoraan konepajalla, erillisessä maalaamossa tai vasta asennuksen jälkeen työmaalla. Moni tekijä vaikuttaa siihen, missä vaiheessa maalaustyö kannattaa tehdä. Konepajalla tehtävässä maalaustyössä pitää huomioida valmiiden maalattujen teräsrakenteiden kuljetus ja asennus työmaalle. Palosuojamaali kestää heikosti mekaanisista rasituksesta, joten niiden kuljetuksessa ja asennuksessa pitää olla hyvin varovainen. Asennuksen jälkeen on tehtävä paikkamaalaukset, jos palosuojamaali on saanut mekaanista osumaa ja maalipinta on lohkeillut. (Lindblad 2012, s. 23)

Palosuojamaalaustyön olennainen asia on maalaustyön onnistuminen. Onnistuneella maalaustyöllä saavutetaan suunniteltu palonkesto-aika sekä kustannukset pysyvät suunnitelluissa rajoissa. Onnistuneeseen palosuojamaalaustyöhön vaikuttavat monet asiat. Onnistumisen kannalta kuitenkin keskeisiä asioita ovat palosuojamaalaussuunnitelma, teräspinnan esikäsitteleminen, pohjamaali ja -maalaukset, urakoitsijan valinta ja urakoitsijan pätevyys, pintamaali ja -maalaukset, palosuojamaalattujen rakenteiden merkintä palo-osastoittain, kalvopaksuuden mittaaminen ja dokumentointi ja lopuksi paikkamaalaus ja virheiden korjaus (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 8–9).

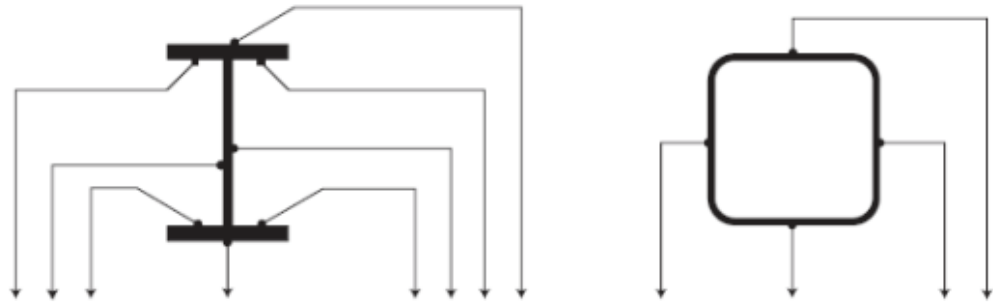
Palosuojamaalauksessa tulee käyttää palosuojamaalin valmistajan hyväksymiä sekä tuotteen CE-merkintään liittyvässä suoritustasoilmoituksessa viitatun ETA-todistuksen esittämiä pohja- ja pintamaaliyhdistelmiä (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 8). Palosuojamaalin oikean toiminnan varmistamiseksi on tärkeää, että valittu pohja- ja pintamaali ovat yhteensopivat palosuojamaalin kanssa, jotta palotilanteessa pohja- tai pintamaali eivät heikennä palosuojamaalin toimintaa. Laadunvarmistus palosuojamaalin asennuksen yhteydessä varmistetaan siten, että palosuojamaalauksen toteuttaa pätevä ja hyvin perehdytetty henkilö.

Palosuojamaalaus edellyttää, että teräsrakenteen ainevahvuus on avoprofiileilla vähintään 5 mm ja putkiprofiileilla 3,6 mm. Vaadittavan teräsprofiilin palosuojamaalin kuivakalvon paksuus voidaan määrittää joko mitoitustaulukoista tai mitoituskäyrästä. Kalvopaksuuden määrittämiseen vaikuttaa paloluokka, kriittinen lämpötila ja teräsprofiilin poikkileikkaustekijä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 65)

Palosuojamaalin kuivakalvon paksuuden mittaus tapahtuu sähkömagneettisella paksuusmittarilla. Mittauksesta pidetään mittauspöytäkirjaa, johon merkitään kunkin mittauskerran tulokset ja tulosten keskiarvot. Palosuojamaalattuja rakenteita pitää valita joista alkavaa 100 m² kohden viisi mittausaluetta, joiden koko on 0,25 m². Yhdeltä 0,25 m² kokoiselta mittausalueelta mitataan kaksikymmentä mittausta. Mittauspöytäkirjaan merkittävä mittaustulos on 1 cm² kokoiselta alueelta kolmen otetun mittaustuloksen keskiarvo. Jotta saadaan kattavin tulos kuivakalvon paksuuden määrittämisestä, pitää mitattavien alueiden edustaa mahdollisimman paljon erilaisia maalattuja pintoja. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 67)

Jos palosuojamaalauksessa on käytetty pohjamaalia, niin tämän paksuus määritetään mitattujen tulosten keskimääräisenä paksuutena. Jos palosuojamaalin pintaan on maalattu pintamaali, niin tämän pintamaalin paksuus on sama kuin maalausjärjestelmässä paksuudeksi on ilmoitettu. Nämä edelle mainitut pohja- ja pintamaalaus eivät vaikuta lähes ollenkaan palosuojaukseen, jolloin palosuojamaalauksen riittävä kuivakalvon paksuus on aina erikseen määritettävä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 67)

Palosuojamaalin kuivakalvon paksuus määritetään tietyistä pisteistä eri teräsprofiileilla. Avoprofiilissa on luonnollisesti enemmän mittauspisteitä kuin umpiprofiilissa. Avoprofiilin mittauspisteitä on yleensä laippojen ylä- sekä alapinta, jossa alapinnasta tehdään kaksi mittausta ja yläpinnasta ainoastaan yksimittaus keskeltä. Uumasta mitataan myös kaksi mittauspistettä keskeltä molemmin puolin uumaa. Umpiprofiilissa mitataan kunkin sivun keskeltä kuivakalvon paksuus yhdellä mittauspisteellä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 67) Kuva 3 havainnollistaa eri teräsprofiilien mittauspisteet.



Kuva 3. Palosuojamaalin kuivakalvon mittauspisteet eri profiileilla (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 10).

3.6 Palosuojamaalauksen huolto

Palosuojamaali vaatii yhtä lailla huoltoa kuin mikä muukin rakenne, jotta saavutettaisiin palosuojamaalin suunniteltu käyttöikä. Palosuojamaalauksen huoltoon kuuluvat tarkastus, huoltomaalien valinta sekä huoltomaalauksen suoritus (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 12). Näiden huoltotoimenpiteiden avulla voidaan parantaa palosuojamaalin käyttöikää sekä parantaa palosuojamaalin toimintakykyä tulipalon sattuessa.

Palosuojamaalatut pinnat tarkastetaan silmämääräisesti yleisen huoltotarvekartoituksen yhteydessä. Rakenteet tulee kuitenkin tarkistaa vähintään kerran kolmen vuoden aikana. Tarkastuksessa kiinnitetään huomioita maalikalvon vaurioihin sekä palosuojatun rakenteen merkintöihin palosuojauksesta. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 12)

Jos palosuojamaalin pinta on lohkeillut tai se on vaurioitunut siihen kohdistuneesta rasituksesta, tulee rakenne huoltomaalata. Huoltomaali valitaan siten, että se on vastaavanlainen palosuojamaali kuin alkuperäinen palosuojamaali on ollut. Huoltomaalauksella on saavutettava alkuperäinen kuivakalvonpaksuus. Huoltomaalaus toteutetaan paikkamaalauksella palosuojamaalin vauriot. Paikkamaalauksella voidaan korjata alle 5 cm^2 kokoiset pienet vauriot. Tätä suuremmat vauriot kaavitaan ja teräsharjataan vaadittuun esikäsitteilyasteeseen. Uudelleen maalaus toteutetaan maalausjärjestelmään kuuluvilla tuotteilla ja vaadittuun kuivakalvonpaksuuteen. Huoltomaalaukseen vaadittava menettelytapa tulee tarvittaessa varmistaa maalin valmistajalta. Huoltomaalauksen yhteydessä tulee välttää levittämästä palosuojamaalia pintamaalin päälle. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 12)

Pintamaalaukselta uusittaessa saa käyttää ainoastaan CE-merkittyjä ja palosuojamaalin valmistajan hyväksymää pintamaalia. Pintamaalaus voidaan kuitenkin uusia vain neljä kertaa, ja näiden maalauskertojen kuivakalvonpaksuus saa olla enintään $300 \mu\text{m}$. Aina

kun pintamaali on uusittu, maalausta koskevat tiedot lisätään rakenteita koskeviin asiakirjoihin ja valmiista kertovan palosuojatun rakenteen merkintään. (Teräsrakenneyhdistys ry 2007, s. 9)

4. I-PROFIILIN PALOSUOJAMAALAUKSEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Luvussa neljä käsitellään palosuojamaalauksen suunnittelua ja mitoitusta I-profiilille. Luvussa esitetään suunnitteluun vaikuttavat perusteet, jotka määrittävät suunnittelun ja mitoituksen kulun. Palosuojamaalin mitoituksen kulku esitetään laskentaesimerkin avulla. Esimerkissä mitoitetaan I-profiilille vaadittu palosuojamaalaus. Vertailulaskelmaksi lasketaan saman toimistorakennuksen pilarin vaatima palosuojamaalin kuivakalvon paksuus ja vastaava palosuojaus mineraalivillalla. Lopuksi vertaillaan näitä tuloksia ulko-näöllisestä näkökulmasta.

4.1 Suunnitteluperusteet

Paloturvallisuussuunnittelun perusteena on paloriskien arviointi ja tätä kautta riskien minimointi. Paloriskien arviointi perustuu riskianalyysin tekoon ja sen tulkintaan. Sanalla riski tarkoitetaan haitallisen ja vahinkoa aiheuttavan tapahtuman suuruutta. Riskin suuruuteen vaikuttaa oleellisesti vahingon suuruus ja aiheutuvan tapahtuman todennäköisyys. Tämä voidaan ilmaista matemaattisen yhtälön avulla, jota kutsutaankin riskituloksi kaavan (6) mukaan

$$R = P * C, \quad (6)$$

jossa R on riski, P on tapahtuman todennäköisyys ja C on tapahtuman seuraukset, kuten omaisuusvahingot tai menetetyt ihmishenget. Jos riskiin sisältyy monta useata tapahtumaa, otetaan eri tapahtumien vaikutus huomioon arvioimalla kokonaisriski, jossa lasketaan yhteen kukin mahdollinen tapahtuma riskisummana. Todennäköisyysjakautuman kautta voidaan myös arvioida kokonaisriskiä. Todennäköisyysjakautumassa tarkastellaan koordinaatistossa eri tapahtumaketjujen aiheuttamia riskejä. Koordinaatistossa x-akselilla on tapahtumien seurauksien suuruus ja y-akselilla on sitä vastaava todennäköisyys. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 221-2003, s. 15)

Paloriskien arvioinnissa riskianalyysi toteutetaan yleensä, joko tapahtumapuun tai vikaapuun tai molempien avulla. Tapahtumapuussa tarkastellaan tulevaa tapahtumaketjua siten, että jokainen toisiaan seuraava tapahtuma jaetaan kahteen haaraan, sillä perusteella, että tapahtuma toteutuu tai tapahtuma ei toteudu. Kunkin haaran tapahtumato-dennäköisyys lasketaan ja lopuksi saadaan kunkin haaran todennäköisyydet, miten tapahtumaketjussa tulee lopullisesti käymään. Vikapuutarkastelussa taas toimitaan syy-seuraussuhteiden avulla porttisymbolien välityksellä. Näitä porttisymboleita on kahta eri

tyyppiä, jotka ovat JA-portit sekä TAI-portit. JA-portit kuvaavat molempien syytapahtumien toteutumista ja vastaavasti TAI-portit kuvaavat jommankumman syytapahtuman toteutumista. Tässä ehdossa riittää, että ainoastaan toinen syytapahtuma toteutuu. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 221-2003, s. 16–18)

Palonkestävyyden arviointiperusteena teräsrakenteelle voidaan käyttää palonkestoaikaa, joka pystytään määrittämään joko kokeellisesti tai laskelmien avulla. Palonkestojalla tarkoitetaan kantavan teräsrakenteen palon alkamisesta laskettua aikaa, jolloin rakenteen kestävyys on laskenut tietyn rajan alapuolelle tai taipumat ylittävät sille määritetyn raja-arvon. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 6) Palosuojauksella pyritään estämään tämä teräsrakenteen lämpeneminen ja siitä seuraava lujuuden menetys.

Rakennusten palomitoitus voidaan toteuttaa taulukkomitoituksena tai toiminnallisena palomitoituksena. Taulukkomitoitus nimensä mukaisesti toteutetaan taulukoita hyödyntäen. Toiminnallisessa palomitoituksessa pyritään määrittämään vaadittava suojaustarve yksityiskohtaisten laskelmien ja toiminnallisten palosimulaatioiden avulla. Toiminnallista palomitoitusta käytetään palomitoituksessa, kun taulukkomitoitus ei anna riittävästi palonkestoaikaa tai pinta-alat ovat liian suuret taulukkomitoituksen puitteisiin. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 36)

Kantavien teräsrakenteiden palotekninen suunnittelu perustuu yleensä mitoitusehtoon, jossa palonaikainen kestävyys tulee olla vähintään vallitsevien rasiusten suuruinen. Mitoitusehdon pitää täytyä jokaisessa osassa teräsrakennetta. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 6) Lämpötilan nousu teräsrakenteessa on tasaista, mikä helpottaa mitoitusehdon tarkastelua. Palomitoitus tapahtuu tarkastelemalla teräsrakenteen palonaikaista maksimilämpötilaa ja palonaikaisia kuormituksia. Lämpötilan noustessa teräksen materiaaliominaisuudet alenevat, jolloin myös murtotila saavutetaan nopeammin. Tämä johtaa palotilanteessa teräksen murtumiseen. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 6)

Paloturvallisuussuunnittelussa paloturvallisuusvaatimukset määräytyvät rakennuksen omistajan, haltijan tai yrityksen asettamiin yleisiin turvallisuusvaatimuksiin. Kuitenkin vähimmäistaso turvallisuusvaatimuksille määräytyy yhteiskunnan, vakuutusyhtiöiden ja muiden sidosryhmien asettamien turvallisuusvaatimusten perusteella. Turvallisuustason valintaan vaikuttaa monet eri seikat, mutta tärkeimpänä valintana turvallisuustason valintaan vaikuttaa suurvahinkojen ehkäisy. Suuronnettomuuden sattuessa, siitä voi olla merkittävät vaikutukset rakennuksen käytölle sekä rakennuksessa toimiville yrityksille ja henkilöille. Kokonaiskustannuksilla on kuitenkin suuri merkitys turvallisuustason valintaan. Turvallisuustasoa pohdittaessa pyritään valitsemaan kustannustehokkain ratkaisu. Tur-

vallisuustason valinnassa tärkein ratkaisu on ehkäistä suurpalosta aiheutuvat onnettomuudet ja toisena tärkeänä asiana on minimoida onnettomuudesta aiheutuvat vahinkokustannukset. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 221-2003, s. 23–24)

Palotekniset suunnitelmat tulee arkistoida rakennuksen ja rakenteiden ylläpitoa, huoltoa, korjausta sekä muutostöitä varten. Arkistoitava tieto sisältää rakennuslupavaiheen asiakirjat, pelastussuunnitelman sekä huolto- ja kunnossapito-ohjeet. Pelastussuunnitelmassa esitetään paloturvallisuussuunnittelun perustana käytetyt paloturvallisuustekijät ja toimenpiteet, jotka edellytetään rakennuksen käytöltä, huolloilta, kunnossapidolta ja paloturvallisuustarkastuksilta. Huolto- ja kunnossapito-ohjeet pitävät sisällään rakennuksen oikean huollon ja elinkaaren jatkumisen. Asiakirjojen ja muutosten hallinnalla todetaan se, että rakennus täyttää myös muuttuneissa olosuhteissa sille määrätyt turvallisuusvaatimukset. Sama koskee myös rakennuksen käyttötarkoituksen muutoksessa, jolloin muutoksia tehtäessä tarkistetaan, että rakennus täyttää sille pelastussuunnitelmassa määrätyt turvallisuustavoitteet ja viranomaisvaatimukset. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 221-2003, s. 29–32)

4.2 Palokuorma

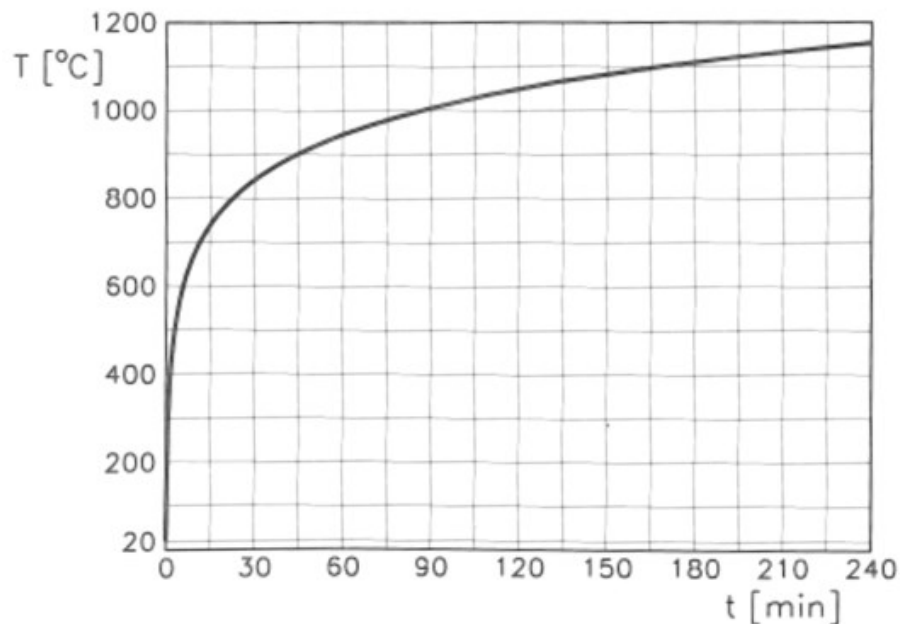
Paloteknisessä suunnittelussa käytetään yleensä palokuormalle käyttötaparyhmitykseen perustuvia palokuormaryhmiä (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 221-2003, s. 37). Palokuormaryhmiä on kolme ja ne erotellaan toisistaan energian vapautumisen mukaan. Näitä palokuormaryhmiä sovelletaan paloluokassa P1, ja nämä kolme palokuormaryhmää ovat alle $600 \text{ MJ}/\text{m}^2$, $600\text{--}1\,200 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ja yli $1\,200 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Tyypillisesti alle $600 \text{ MJ}/\text{m}^2$ palokuorma on asunnoissa, majoituspaikoissa, hoitolaitoksissa ja työpaikoissa. $600\text{--}1\,200 \text{ MJ}/\text{m}^2$ palokuorma esiintyy tyypillisesti asuinrakennusten irtaimistovarastoissa ja yli $1\,200 \text{ MJ}/\text{m}^2$ esiintyy erillisissä palo-osastoissa, jotka ovat yli 50 m^2 kokoisia varastoja. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 195-1-2018, s. 39) Toisinaan voidaan vaihtoehtoisesti käyttää 1,5-kertaista palokuorman keskiarvoa tai 80 % fraktiilia, jolloin pitää edellyttää, että käytössä on Suomen olosuhteisiin soveltuva luotettava tilastoaineisto, joka kuvaa kyseistä kohdetyyppeä (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 221-2003, s. 37).

Rakennusten paloluokat ovat P1, P2 ja P3. Paloluokan P1 rakennuksille on asetettu suurimmat palotekniset vaatimukset. Teräsrakenteita käytetään yleisesti toimistorakennuksissa sekä korkeissa tornitaloissa, jotka kuuluvat paloluokkiin P1 ja P2. P3 paloluokkaan kuuluu yksi- ja kaksi kerroksiset omakotitalot, jotka harvemmin rakennetaan teräksestä. Kantavien rakenteiden palonkestovaatimus voidaan määrittää rakennukselle määritetyn

palokuorman ja paloluokan perusteella. Palonkestovaatimus esittää ajan, jonka rakenteiden tulee kestää sortumatta. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 195-1-2018, s. 25–26)

4.3 Rakenteen lämpötilan kehittyminen ja kriittinen lämpötila

Palosuojamaalin mitoituksessa käytetään standardipalokäyrän mukaista lämpötilankehitystä. Standardipalossa palotilan lämpötila kehittyy standardin ISO-834 mukaisesti ajan funktiona. Se on kehitetty kuvaamaan tavanomaista rakennuspaloa, ja sitä käytetään rakennusmateriaalien ja rakenteiden paloluokittelussa ja testauksessa. Standardipalokäyrä ei huomioi laskennassa palokuorman loppumista ja siitä seuraavaa lämpötilan vähenemistä, vaan lämpötilan kehitys jatkuu koko ajan. Kuvassa 4 on esitetty standardipalokäyrä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 12)



Kuva 4. Standardipalokäyrä ISO-834 (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 12).

Rakenteiden ja niiden palosuojauksen suunnittelussa rakenteiden kriittinen lämpötila vaihtelee 496–711 °C välillä. Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötila ylittää kriittisen lämpötilan jo alle 30 minuutissa. Hiiliteräksen kriittinen lämpötila ajan hetkellä t , kun terässauvan lämpötilan jakauma on tasainen, voidaan laskea kaavalla (7).

$$\vartheta_{a,cr} = 39,19 * \ln\left(\frac{1}{0,9674 * \mu_0^{3,833}} - 1\right) + 482 \text{ °C}, \quad (7)$$

jossa termi μ_0 on hyväksikäyttöaste. Hyväksikäyttöaste voidaan laskea kahdella eri kaavalla (8) ja (9). (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 34)

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}, \quad (8)$$

jossa $E_{fi,d}$ on palotilanteen kuorma ja $R_{fi,d,0}$ on palotilanteen teräsrakenteen kestävyys.

$$\mu_0 = \eta_{fi} * \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right), \quad (9)$$

jossa η_{fi} on mitoituskuorman pienennystekijä tulipalotilanteessa, $\gamma_{M,fi}$ on palotilanteen materiaalin osavarmuusluku ja γ_{M0} on materiaalin normaalilämpötilan osavarmuusluku. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 15)

Palosuojauksen määrittämisessä oleellista on tietää tulipalossa syntyvien palokaasujen lämpötila ajan myötä. Palokaasujen lämpötila voidaan laskea standardipalokäyrän avulla kaavasta (10)

$$\phi_t = 345 * \log_{10}(8 * t + 1) + 20 \text{ } ^\circ\text{C} , \quad (10)$$

jossa t kuvaa aikaa palon syttymishetkestä minuutteina (SFS-EN 1991-1-2 2003, s. 40).

Teräsrakenteeseen nettolämpövuon kuljettumalla siirtyvä osa voidaan laskea kaavasta (11).

$$h_{net.c} = \alpha_c * (\Theta_g - \Theta_m) , \quad (11)$$

jossa $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2 * \text{K}$ on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin, Θ_g on palotilan kaasun lämpötila kyseisellä ajan hetkellä ja vastaavasti Θ_m on teräsosan lämpötila edellisellä ajanhetkellä. (SFS-EN 1991-1-2 2003, s. 38) Palotilan säteilylämpö lasketaan kaavalla (12), jossa $\Phi = 1$ on näkyvyyskerroin, $\varepsilon_m = 0,8$ on teräsrakenteen pinnan säteilykerroin, $\varepsilon_f = 1,0$ on palon säteilykerroin ja $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$ on Stefan-Boltzmann-vakio. Lisäksi kaavassa esiintyy Θ_g , joka on palotilan kaasun lämpötila kyseisellä ajan hetkellä ja vastaavasti Θ_m on teräsosan lämpötila edellisellä ajanhetkellä. (SFS-EN 1991-1-2 2003, s. 40)

$$h_{net.r} = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * ((\Theta_g + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4) \quad (12)$$

Seuraavaksi lasketaan teräksen ominaislämpökapasiteetti eri teräksen lämpötilan arvoilla. Kun teräksen lämpötila on $20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600 \text{ } ^\circ\text{C}$, teräksen ominaislämpökapasiteetti lasketaan kaavalla (13).

$$c_a = (425 + 7,73 * 10^{-1} * \theta_a - 1,69 * 10^{-3} * \theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6} * \theta_a^3) * \text{J/kg} * \text{K} \quad (13)$$

Vastaavasti, kun teräksen lämpötila on välillä $600 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735 \text{ } ^\circ\text{C}$, teräksen ominaislämpökapasiteetti voidaan laskea kaavalla (14).

$$c_a = \left(666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \right) * \text{J/kg} * \text{K} \quad (14)$$

Kun teräksen lämpötila on välillä $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$, teräksen ominaislämpökapasiteetti voidaan laskea kaavalla (15).

$$c_a = \left(545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}\right) * J/kg * K \quad (15)$$

Teräksen ominaislämpökapasiteetti on vakio, kun teräksen lämpötila on välillä $900\text{ °C} \leq \theta_a < 1200\text{ °C}$. Tällöin teräksen ominaislämpökapasiteetin arvo on $c_a = 650\text{ J/kg} * K$. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 24)

Kaavalla (16) lasketaan teräsrakenteen poikkileikkauksen lämpötilan nousu $\Delta\theta_{a,t}$, kun poikkileikkauksessa vallitsee ekvivalentti tasainen lämpötilan jakauma (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 35).

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{\frac{A_m}{V}}{c_a * \rho_a} * h_{net} * \Delta t, \quad (16)$$

jossa k_{sh} voidaan laskea kaavalla (17) ja on varjostusvaikutuksen korjaustekijä, c_a lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti, $\rho_a = 7850\text{ kg/m}^3$ on teräksen ominaistiheys, h_{net} on palolle altistuneiden pintojen nettolämpövuoto, jossa lasketaan yhteen kuljettumalla ja säteilemällä tapahtuva lämmön siirtyminen ja $\Delta t = 30\text{ s}$ on laskennan aikaväli. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 35)

$$k_{sh} = \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_b}{\frac{A_m}{V}}, \quad (17)$$

jossa $\left(\frac{A_m}{V}\right)_b$ on palosuojauksen poikkileikkaustekijä ja $\frac{A_m}{V}$ on teräsrakenteen poikkileikkaustekijä (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 35).

Palosuojatulla teräsrakenteella on kaavoissa tekijä ϕ , mikä kuvaa palosuojamateriaaliin varastoitunutta lämpö määrää verrattuna teräksen varastoimaan lämpö määrään. Tämä voidaan laskea kaavalla (18).

$$\phi = \frac{c_p * \rho_p}{c_a * \rho_a} * d_p * \frac{A_p}{V}, \quad (18)$$

jossa c_p on palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti. Palosuojamateriaalin tiheys on ρ_p , c_a on lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti, ρ_a on teräksen ominaistiheys, d_p on palosuojamateriaalin paksuus ja $\frac{A_p}{V}$ on palosuojamateriaalin eristetyn teräsosan poikkileikkaustekijä. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 37)

Kun lämpötilojen varastoitumisen suhde on laskettu, nyt voidaan laskea lämpötilan nousu $\Delta\theta_{a,t}$ kaavalla (19), kun lämpötila jakaantuu tasaisesti poikkileikkauksessa.

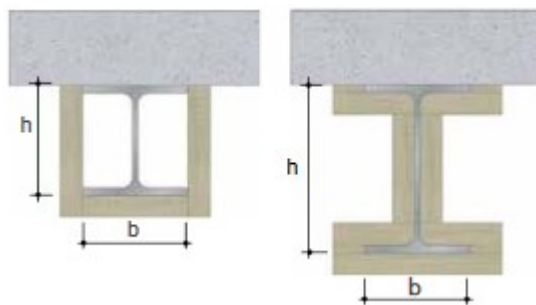
$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \frac{A_p}{V} (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p * c_a * \rho_a * (1 + \frac{\phi}{3})} * \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) * \Delta\theta_{g,t}, \quad (19)$$

jossa λ_p on palosuojamateriaalin lämmönjohtavuus, Δt on laskennan aikaväli, $\theta_{g,t}$ on palotilan lämpötila ajan hetkellä t , $\theta_{a,t}$ on teräsosan lämpötila ajan hetkellä t ja $\Delta\theta_{g,t}$ kuvaa palotilan lämpötilan nousua ajanjakson Δt aikana. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 37)

4.4 I-profiilin poikkileikkaustekijä

Teräsrakenteen lämpötilan nousuun palotilanteessa vaikuttaa suuresti teräsprofiilin poikkileikkaustekijä F/V tai F_i/V . Poikkileikkaustekijällä F/V tarkoitetaan teräsosan palolle alttiina olevan pinta-alan ja tilavuuden suhdetta ja sitä käytetään suojaamattomille teräsrakenteille. Vastaavasti poikkileikkaustekijää F_i/V käytetään palosuojuille teräsrakenteille, jossa termi F_i kuvaa palosuojatun teräsosan palolle kohtisuoraan alttiin palosuojauksen pinta-alaa. Jos kuitenkin poikkileikkaustekijä on vakio kussakin teräsosan poikkileikkauksessa, voidaan käyttää laskelmissa pinta-alan tilalla palosuojauksen piiriä ja vastaavasti tilavuuden tilalla palosuojauksen pinta-alaa. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 38)


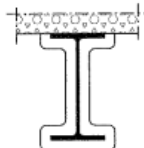

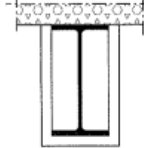
Poikkileikkaustekijän arvo riippuu suuresti käytetyn rakenneteräksen profiilista sekä siitä, onko teräsrakenne palosuojattu profiilia myötäillen vai koteloimalla. Tyypillisesti teräsprofiilin kotelointi heikentää hieman poikkileikkaustekijää valssatuissa teräsprofiileissa kuten HEA-, HEB-, HEM-, IPE- ja INP-profiileissa. Edellä mainittujen teräsprofiilien koteloinnissa uuman ja palosuojauksen väliin jää tyhjää ilmatilaa, joka palotilanteessa lämpenee ja täten heikentää teräsprofiilin koko palosuojausta. Vastaavasti putki- ja eri muotoisten tankojen palosuojauksen koteloinnissa merkitystä on sillä, onko koteloinnin kulmat pyöristetty vai ei. Jos kulmat on pyöristetty, tällöin poikkileikkaustekijä on hieman pienempi kuin kotelointi, jossa kulmat ovat suorakulmaisia. Myös teräsprofiilin altistuminen palolle jokaiselta sivulta tai vain kolmelta sivulta vaikuttaa poikkileikkaustekijän suuruuteen heikentävästi. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 39–45)



Kuva 5. Koteloitu ja profiilia myötäilevä palosuojaus (Paroc 2019, s. 5).




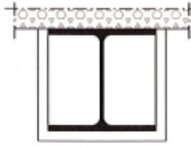
Palosuojamaalauksessa suojaus myötäilee teräsprofiilin pintaa. Tällöin saadaan mahdollisimman hyvä palosuojaus teräsrakenteelle sekä vaihtoehtoista paras poikkileikkaustekijä. Taulukosta 3 nähdään, miten palosuojauksen asennus vaikuttaa poikkileikkaustekijään. Profiilin koon kasvaessa teräksen määrä rakenteessa lisääntyy, jolloin poikkileikkaustekijä pienenee. Poikkileikkaustekijä onkin verrannollinen suuresti teräsprofiilin kokoon sekä palosuojausmenetelmään.

Taulukko 3. IPE-profiilin poikkileikkaustekijät eri palosuojausmenetelmillä (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s.42).

IPE				
	F/V ja F _r /V [m ⁻¹]	F/V ja F _r /V [m ⁻¹]	F _r /V [m ⁻¹]	F _r /V [m ⁻¹]
80	429,1	368,9	329,8	269,6
100	388,1	334,7	301,0	247,6
120	360,0	311,5	278,8	230,3
140	335,7	291,2	259,8	215,2
160	309,7	268,9	240,8	200,0
180	292,0	254,0	226,8	188,7
200	269,5	234,5	210,5	175,4
220	253,8	220,8	197,6	164,7
240	235,8	205,1	184,1	153,5
270	226,8	197,4	176,5	147,1
300	215,6	187,7	167,3	139,4
330	200,3	174,8	156,5	131,0
360	186,1	162,7	145,8	122,4
400	173,6	152,3	137,3	116,0
450	162,5	143,2	129,6	110,3
500	150,3	133,1	120,7	103,4
550	140,0	124,4	113,4	97,8
600	129,2	115,1	105,1	91,0

Taulukossa 4 on esitetty HEA-profiilien poikkileikkaustekijät eri palosuojausmenetelmillä. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty I-profiilin poikkileikkaustekijät eri profiilin kokoluokille, kun palo rasittaa profiilia, joko kolmelta – tai neljältä sivulta.

Taulukko 4. HEA-profiilin poikkileikkaustekijät eri palosuojausmenetelmillä (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s.39).

HEA				
	F/V ja F _r /V [m ⁻¹]	F/V ja F _r /V [m ⁻¹]	F _r /V [m ⁻¹]	F _r /V [m ⁻¹]
100	264,8	217,6	184,9	137,7
120	267,7	220,3	185,0	137,5
140	253,0	208,4	173,9	129,3
160	233,6	192,3	160,8	119,6
180	226,1	186,4	155,0	115,2
200	211,2	174,0	145,0	107,8
220	195,2	161,0	133,7	99,5
240	178,2	147,0	122,4	91,1
260	170,9	141,0	117,5	87,6
280	164,7	136,0	113,1	84,3
300	152,6	125,9	104,9	78,2
320	141,1	117,0	98,1	74,0
340	134,4	112,0	94,4	71,9
360	128,4	107,4	91,0	70,0
400	120,2	101,4	86,8	67,9
450	113,0	96,1	83,1	66,3
500	106,8	91,6	80,0	64,8
550	104,3	90,1	79,3	65,2
600	101,9	88,6	78,6	65,3
650	99,6	87,2	77,8	65,4
700	96,1	84,6	76,0	64,5
800	94,4	83,9	76,3	65,8
900	90,4	81,0	74,3	64,9
1000	89,3	80,6	74,4	65,7

4.5 Esimerkilaskelma

Tarkastellaan seuraavassa esimerkissä teräsprofiilia IPE 330, joka on osa toimistorakennusta, jonka paloluokka on P2. Toimistorakennus sijaitsee Tampereella. Jokaiselle teräsprofiilille on omat käyrästönsä ja tapansa mitoittaa palosuojamaalin paksuus. Tämä esimerkilaskelma ei päde kaikille teräsprofiileille, vaan ainoastaan I-profiileille.

Toimistorakennuksen katto-orren IPE 330 palosuojamaalin mitoituksen lisäksi tutkitaan saman toimistorakennuksen teräspilaria, jonka profiili on HEA 320. Mitoitetaan taulukoiden avulla teräspilarille vaadittu palosuojamaalin kuivakalvon paksuus ja mitoitetaan myös vertailuksi samalle pilarille palosuojaus mineraalivillalla. Tutkitaan, kuinka paksu mineraalivillalevytys vaaditaan, jotta saavutetaan sama palonkestovaatimus kuin palosuojamaalilla, kun mineraalivillasuojaus myötäilee I-profiilin muotoa. Vertaillaan lopuksi palosuojamaalin ja mineraalivillan tuloksia ulkonäöllisestä näkökulmasta.

Alkutietojen perusteella voidaan määrittää rakennuksen käyttötarkoitusta vastaava palokuorma ja rakennuksen paloluokan mukainen palonkesto-aika, jonka teräsrakenteen tulee kestää sortumatta palotilanteessa. Toimistorakennuksen lähtötiedot ovat seuraavat:

- Tila, jossa palo vaikuttaa on suuri, yhtenäinen ja suorakaiteen muotoinen. Tilan leveys ($b = 15$ metriä) ja pituus ($l = 20$ metriä) sekä korkeus ($h = 4$ metriä).
- Toimistotilassa on seinäpinta-alaan nähden paljon ikkunoita, jolloin aukkotekijä tilassa on suuri. Aukkotekijä vaikuttaa suuresti palokaasujen maksimilämpötilaan.
- Palokuormana toimii toimistotilan työpisteet, välisemit, kokolattiamatto, kaapitot sekä muut toimistovarusteet, kuten tulostimet.
- Palosuojattava palkki on kattorakenteiden pääkannatin, jonka pituus on 15 metriä ja palkkijako on kuusi metriä.
- Palkkia kuormittaa yläpohjan oma paino, joka sisältää vesikattorakenteet. Lisäksi palkkia kuormittaa palkin oma paino sekä lumikuorma.

Palosuojattava palkki on 3 kerroksisen toimistorakennuksen ylimmän kerroksen kattorakenteiden pääkannatin. Toimistorakennuksen kokonaiskorkeus on alle 28 metriä, jolloin palkin vaadittu palonkesto on 60 minuuttia. Jotta kyseinen palonkestovaatimus voidaan palkille asettaa, pitää toimistorakennuksessa olla asianmukainen automaattinen sammutusjärjestelmä eli sprinklerijärjestelmä. Lisäksi lämmöneristeiltä vaaditaan tietyt luokkavaatimukset, joiden voidaan olettaa täyttyvän tässä toimistorakennuksessa. (RIL 195-1-2018, s. 51) Toimistotila on itsessään yksi palo-osasto, joka palotilanteessa estää palon leviämistä muihin tiloihin.

Valitaan kohteen palosuojamaaliksi Fontefire ST 60 palosuojamaali, joka on vesiohenteinen maali. Fontefire ST 60 on kuumuuden takia paisuva palosuojamaali, joka luo teräsrakenteen pintaan eristävän vaahtokerroksen. Palosuojamaali on hyväksytty H- ja I-palkkien palosuojamaalina, ja se on saanut CE-merkinnän. Fontefire ST 60 on testattu ja hyväksytty eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) mukaan. (Tikkurila Oyj 2019, s. 1).

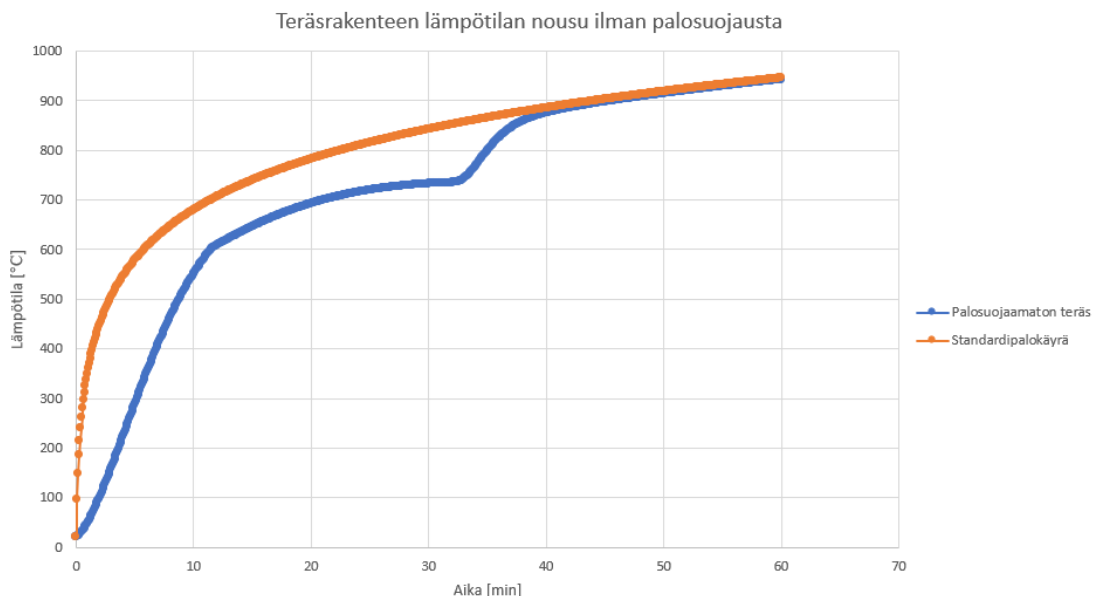
Fontefire ST 60 palosuojamaalilla saavutetaan kantavien teräsrakenteiden paloluokka R60 I-palkeille, kun vaikuttava palo on standardipalon mukainen. Suositeltava kuivakalvon paksuus on välillä 200–1 300 μm . (Tikkurila Oyj 2019, s. 1) Taulukossa 3 on esitelty I-profiilin poikkileikkaustekijöitä eri profiilin kokoluokilla F_i/V , kun I-profiili on altis palolle kolmesta sivusta. Taulukosta 3 nähdään poikkileikkaustekijän arvo $A_m/V = 174,8 \text{ 1/m}$.

Oletetaan, että kuumat savukaasut ympäröivät I-profiilin täysin kolmelta sivulta, jolloin poikkileikkauksen lämpötilan nousu on vakio. Toimistorakennuksen palokuorma voidaan olettaa olevan noin $600 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Tämän arvion avuksi katsoin mallia yleisen toimistotilan palokuormasta RIL 195-1-2018 -kirjasta (RIL 195-1-2018, s. 35). Toimistotilan palokuorma tiedettäessä, voidaan laskea palokaasujen lämpötila halutun ajan kuluessa palon syttymisestä. Tämän esimerkin kannalta kiinnostavat ajat ovat teräsrakenteen kriittisen lämpötilan saavuttaminen sekä vaadittu palonkesto-aika 60 minuuttia.

Lasketaan teräsrakenteen poikkileikkauksen lämpötilan nousu $\Delta\theta_{a,t}$ kaavalla (16), kun poikkileikkauksessa vallitsee ekvivalentti tasainen lämpötilan jakauma. Kaavassa (16) esiintyvä tekijä k_{sh} voidaan laskea kaavalla (17), jossa $(\frac{A_m}{V})_b = 174,8 \text{ 1}/\text{m}$ ja $\frac{A_m}{V} = 174,8 \text{ 1}/\text{m}$, jolloin varjostusvaikutuksen korjaustekijä on 1 (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 35). Tämä arvo on varmalla puolella laskennan kannalta.

Nyt voidaan laskea teräsrakenteen lämpötila standardipalossa, kun kaavalla (16) laskettu lämpötilan nousu lisätään aina edelliseen teräksen lämpötilan arvoon. Teräksen lämpötila voidaan ajatella olevan aluksi normaalilämpötilassa $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuvassa 6 on esitetty palosuojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan nousu standardipalossa 60 minuutin aikana. Laskenta on suoritettu Excel -taulukko -ohjelmalla. Teräsrakenteen lämpötilan nousun yhteyteen on kuvaajaan määritetty standardipalon lämpötilan nousu vertailuarvoksi.



Kuva 6. Palosuojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan nousu standardipalossa.

Palosuojaamattomana teräspalkin IPE 330 lämpötila nousee 60 minuutin standardipalossa 942 °C:n. Teräksen lujuudesta on menetetty puolet jo noin kymmenen minuutin kohdalla palon alkamisesta, jolloin teräksen lämpötila on noussut yli 550 °C:n.

Fontefire ST 60 palosuojamaalin kuivakalvon paksuus voidaan määrittää maalin ETA-todistuksesta 15/0442 liitteen A taulukon 6 mukaan, kun teräsrakenne on I-profiili ja vaadittu palonkestovaatimus on 60 minuuttia. Taulukon tulkinnassa tarvitaan teräsrakenteen poikkileikkaustekijä ja kriittinen lämpötila. (Warrington Certification Ltd 2015, s. 16) Kriittinen lämpötila voidaan laskea kaavalla (7), kun hyväksikäyttöaste lasketaan kaavalla (9). Kaavassa (9) esiintyvälle termille η_{fi} voidaan yksinkertaistuksena valita arvo $\eta_{fi} = 0,65$ (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 19). Kaavassa (9) olevat osavarmuusluvut ovat molemmat ykkösiä. Näin ollen hyväksikäyttöasteen arvoksi saadaan $\mu_0 = 0,65$. Lasketaan teräsrakenteelle kriittinen lämpötila kaavalla (7) ja tulokseksi saadaan 539,97 °C.

ETA-todistuksen liitteen A taulukossa 6 on esitetty palosuojamaalin Fontefire ST 60 kuivakalvon paksuuksia eri poikkileikkaustekijän ja kriittisen lämpötilan arvoilla. Esimerkin teräsprofiilin poikkileikkaustekijä on $\frac{A_p}{V} = 174,8 \text{ 1/m}$. Taulukossa poikkileikkaustekijöitä on 5 1/m välein, joten tämän esimerkin kuivakalvon paksuus pitää interpoloida. Mitoitus-tilanteen lämpötila on 500 °C. (Warrington Certification Ltd 2015, s. 16) Interpolointi tehdään kaavalla (20).

$$d_p = 0,777\text{mm} + \frac{0,797\text{mm} + 0,777\text{mm}}{175\frac{1}{m} - 170\frac{1}{m}} * \left(\frac{A_p}{V} - 170\frac{1}{m} \right), \quad (20)$$

jossa $\frac{A_p}{V}$ on teräsrakenteen poikkileikkaustekijä. Tuloksena saadaan kuivakalvon paksuudeksi $d_p = 797 \mu\text{m}$.

Teräsprofiili IPE 330 pitää palosuojata 60 minuutin standardipalorasituksessa Fontefire ST 60 palosuojamaalilla, jonka kuivakalvon paksuus on $d_p = 797 \mu\text{m}$. Fontefire ST 60 palosuojamaali on sävyltään himmeä ja valkoinen vesiohenteinen maali (Tikkurila Oyj 2019, s. 1–2).

Tutkitaan vielä teräspilarin HEA 320 vaadittu palosuojamaalin kuivakalvon paksuus sekä toisena vaihtoehtona palosuojaukselle, vaaditun mineraalivillan paksuus. Palosuojauksena mineraalivillana toimii Paroc FPS 17 mineraalivilla. Palosuojamaalina käytetään Fontefire ST 60 palosuojamaalia. Suunnittelun lähtötiedoiksi on valittu pilarin profiiliksi HEA 320, palonkestovaatimukseksi R60 ja kriittiseksi lämpötilaksi 550 °C.

Taulukosta 4 voidaan katsoa HEA 320 profiilin poikkileikkaustekijä. Poikkileikkaustekijä on $\frac{A_p}{V} = 141,1 \text{ 1/m}$. Nyt kun tiedetään teräsprofiilin poikkileikkaustekijä ja kriittinen lämpötila, voidaan palosuojamaalin Fontefire ST 60 kuivakalvon paksuus määrittää ETA-todistuksen liitteen A taulukon 3 mukaan. Taulukossa poikkileikkaustekijöitä on 5 1/m välein, joten tämän esimerkin kuivakalvon paksuus pitää interpoloida. (Warrington Certification Limited 2015, s. 13) Interpolointi tehdään kaavalla (21).

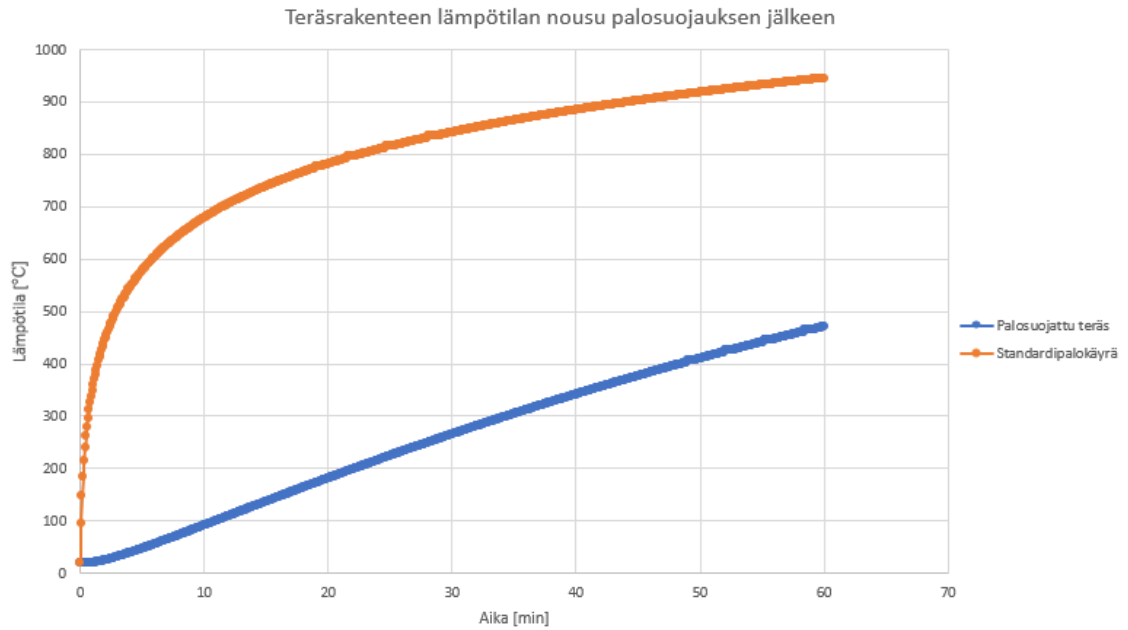
$$d_p = 0,778\text{mm} + \frac{0,848\text{mm} + 0,778\text{mm}}{145\frac{1}{m} - 140\frac{1}{m}} * \left(\frac{A_p}{V} - 140\frac{1}{m} \right), \quad (21)$$

jossa $\frac{A_p}{V}$ on teräsrakenteen poikkileikkaustekijä. Tuloksena saadaan kuivakalvon paksuudeksi $d_p = 794 \mu\text{m}$.

Lasketaan teräspilarin vaadittu palosuojaus Paroc FPS 17 mineraalivillalevyillä. Teräsrakenteen lämpötilan nousu lasketaan samoilla kaavoilla (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16) ja (17) kuin palosuojamattoman teräsrakenteen lämpötilan nousu. Palosuojatulla teräsrakenteella on kaavoissa tekijä ϕ , mikä kuvaa palosuojamateriaaliin varastoitunutta lämpömäärää verrattuna teräksen varastoimaa lämpömäärää. Tämä voidaan laskea kaavalla (18). Palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti on $c_p = 1\,000 \text{ J/kg} * K$ (Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto 2012, s. 17). Palosuojamateriaalin c_a on lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti, $\rho_a = 7\,850 \text{ kg/m}^3$ on teräksen ominaistiheys ja $\frac{A_p}{V}$ on palosuojamateriaalin eristetyin teräsosan poikkileikkaustekijä. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 37) Paroc FPS 17 mineraalivillan tiheys on $\rho_p = 170 \text{ kg/m}^3$ (VTT Expert Services LTD 2018, s. 6).

Kun lämpötilojen varastoitumisen suhde on laskettu, niin nyt voidaan laskea lämpötilan nousu $\Delta\theta_{a,t}$ kaavalla (19), kun lämpötila jakaantuu tasaisesti poikkileikkauksessa (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 37). Kaavassa (19) käytettävä palosuojamateriaalin lämmönjohtavuus on $\lambda_p = 0,038 \text{ W/m} * K$ (Paroc 2019, s. 11). Laskennan aikavälinä on käytetty $\Delta t = 5 \text{ s}$.

Sijoittamalla arvot kaavaan (19), saadaan laskettua teräsrakenteen lämpötilan nousu palosuojattuna. Tarkoituksena on saada teräsrakenteen lämpötila pysymään alle kriittisen lämpötilan $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuvassa 7 on esitetty, miten palosuojatun teräspilarin lämpötila nousee standardipalossa.



Kuva 7. Palosuojatun teräsrakenteen lämpötilan nousu palosuojattuna mineraalivillalla standardipalossa.

Teräspilari vaatii $d_p = 30 \text{ mm}$ paksun palosuojauksen Paroc FPS 17 mineraalivillalevyillä. Paroc FPS 17 mineraalivillalevyjen vakiopaksuudet ovat 20 mm, 30 mm, 50 mm ja 60 mm (VTT Expert Services LTD 2018, s. 6). Kuvasta 7 nähdään, että teräsrakenne saavuttaa 470,73 °C:n lämpötilan 60 minuutin standardipalossa. Tällöin teräsrakenteen lämpötila jää alle kriittisen lämpötilan 550 °C.

Laskennan tuloksena nähdään, että pilari HEA 320 vaatii 30 mm paksun mineraalivilla palosuojauksen, jotta kriittistä lämpötilaa 550 °C ei ylitetä. Ulkonäöllisesti mineraalivilla palosuojaus muuttaa teräspilarin ulkonäköä, vaikka palosuojaus tehdään teräsprofiilia myötäillen. Mineraalivillalla tehtävä palosuojaus myös tekee I-profiilista kulmikkaamman, koska mineraalivilla palosuojauksella on hankala tehdä pyöreitä kulmia siten, että palosuojaus toimisi edelleen suunnitellulla tavalla. Mineraalivilla palosuojaus on hyvä ratkaisu, kun teräs profiililta ei vaadita suuria ulkonäöllisiä vaatimuksia. Kun teräsprofiililta vaaditaan ulkonäkövaatimuksia, niin tällöin palosuojamaalaus on parempi ratkaisu teräsrakenteen palosuojaukseen.

5. YHTEENVETO

Vaikka teräs on palamaton materiaali, se menettää lujuusominaisuuksistaan puolet, kun teräksen lämpötila nousee yli 550 °C:n. Jotta teräs olisi kilpailukykyinen rakennusmateriaali, pitää sitä palosuojata, jotta sen ominaisuudet eivät muutu merkittävästi palotilanteessa. Yhtenä ratkaisuna teräksen palosuojaukseen on suunniteltu palosuojamaali, mikä toimintatapansa mukaan, joko eristää tai suojaa palon vaikutukselta teräsrakennetta. Palosuojamaalit voidaan luokitella esimerkiksi liukoisuuden perusteella, joko vesiliukoisiin tai liuotinliukoisiin maaleihin.

Palosuojamaalin kuivakalvon paksuus määrittelee hyvin paljon palosuojamaalin toimintaa palotilanteessa. Siksi onkin erittäin tärkeää, että palosuojamaalauksen tekijä on hyvin perehdytetty maalaukseen. Riittävillä kuivakalvon mittauksilla voidaan todentaa kuivakalvon paksuus riittäväksi. Rakenteen kriittisellä lämpötilalla on myös suuri merkitys palosuojamaalin kuivakalvon paksuuteen.

Palosuojamaalin valinnassa ja mitoituksessa pitää ottaa monia eri seikkoja huomioon, kuten minkälaisiin olosuhteisiin palosuojamaalattu rakenne tulee, mikä on teräsrakenteen palonkestovaatimus R ja poikkileikkaustekijä, mikä on teräsrakenteen kriittinen lämpötila standardipalorasituksessa ja toteutetaanko palosuojamaalaus jo konepajalla vai vasta työmaalla ja mitä asioita näissä pitää ottaa huomioon. Käytettävä palosuojamaali pitää olla CE-merkitty ja sillä pitää olla voimassa oleva ETA-todistus.

Esimerkin avulla nähdään, että palosuojamaalin mitoitus teräsrakenteelle on melko suoraviivaista, kun tiedetään rakenteen palonkestovaatimus ja kriittinen lämpötila. Näiden tietojen avulla palosuojamaalin mitoitus tapahtuu palosuojamaalin ETA-todistuksen taulukoiden ja ohjeiden mukaan. Palosuojamaalin kuivakalvon paksuuteen vaikuttavat rakenteen kriittinen lämpötila ja teräsprofiilin poikkileikkaustekijä.

Ulkonäöllisestä näkökulmasta palosuojamaali sopii hyvin sellaisiin palosuojauskohteisiin, joissa vaaditaan rakenteelta hyvää ulkonäköä. Tällaisia kohteita voivat olla esimerkiksi toimistojen ja kauppakeskusten pilarit. Palosuojaus mineraalivillalevyllä sopii taas sellaisiin palosuojauskohteisiin, joissa ei vaadita niin hyvää ulkonäöllistä vaikutusta kuin palosuojamaalatuilta rakenteilta. Molemmilla palosuojausvaihtoehdoilla on asennuksen ja suunnittelun kannalta omat vaatimuksensa, jotta palosuojaus onnistuu ja toimii suunnitelmien mukaan.

LÄHTEET

Inha, T. & Mattila, J. (1991). Teräsrakenteiden palosuojauksen suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laitos. TTKK Offsetpaino. Tampere.

Iso-Mustajärvi, P. & Inha, T. (1999). Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus. Teräsrakenneyhdistys ry. Rakennustieto Oy. Helsinki.

Lindblad, A. (2012). Ulkotiloihin rajoittuvat palosuojamaalatut teräsrakenteet. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Helsinki. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 8.4.2019) <http://web.lib.aalto.fi/fi/oa/db/INSSI/?cmd=listget&id=44590&q=%40inst-ructor%20Kallioniemi%2C%20Jussi&p=1&cnt=1>

Mela, K. (2019). Teräsrakenteiden perusteet, osa 1-luento. RAK-32120 Puu- ja teräsrakenteiden perusteet. Tampere 5.3.2019, Tampereen yliopisto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 6.3.2019) <https://moodle2.tut.fi/mod/folder/view.php?id=427060>

Paroc (2019). Palosuojausopas 1/teräs: Kantavat teräspalkit ja -pilarit, profiilipeltikatot ja väliseinät. Paroc. Saatavissa (viitattu 9.1.2020) <https://www.paroc.fi/files/finland/paroc-fire-protection-guide-1-steel-fi>

RIL 221-2003. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. (2013). Paloturvallisuus-suunnittelu. Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Yleisjäljennös – Painopörssi. Helsinki.

RIL 195-1-2018. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry (2018). Rakenteellinen paloturvallisuus. Yleiset perusteet ja ohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Grano Oy. Helsinki.

SFS-EN 1991-1-2 (2003). Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Suomen standardisointiliitto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 9.1.2020) <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/412039.html.stx>

SFS-EN 1993-1-1 (2005). Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisointiliitto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 12.2.2019) <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9344.html.stx>

SFS-EN 1993-1-2 (2005). Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Suomen standardisointiliitto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 20.4.2019) <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9350.html.stx>

Teräsrakenneyhdistys ry (2017). Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa. Teräsrakenneyhdistys ry, 4. painos. ISBN 952-9683-37-5. Saatavissa (viitattu 9.4.2020) <http://www.steel-stainless.org/media/1455/fi-kaesikirja-ruostumattomien-teraesten-kaeyttoa-rakenteissa-4painos.pdf>

Teräsrakenneyhdistys ry (2017). Teräsrakenteiden palosuojamaalaus 2017. Teräsrakenneyhdistys ry. Helsinki. Saatavissa (viitattu 5.5.2019)

https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahU-KEwjJmLijfrrnAhXOTcAKHQHhDloQFjAAegQIARAB&url=http%3A%2F%2Fwww.te-rasrakenneyhdistys.fi%2Fdocument%2F1%2F845%2Fa5c28b8%2Fpalosuojamaa-laus_2017_sahkoinen_versio.pdf&usq=AOvVaw3LpJ3a6Xi9ABRIZsoQikAw

Tikkurila Oyj (2019). Tuoteseloste. Fontefire ST 60. Tikkurila Oyj. Saatavissa (viitattu 2.5.2020) https://tikkurila.fi/sites/default/files/Fontefire_ST_60_FI_PDS_Tikkurila_3.pdf

VTT Expert Services LTD (2018). European Technical Assessment, ETA 08/0093 of 23/04/2018. Paroc FPS 17. VTT Expert Services LTD. Espoo. Saatavissa (viitattu 9.5.2020) https://www.paroc.dk/-/media/files/certificates/int_eta_2_en.ashx?la=da-dk

Warrington Certification Ltd (2015). European Technical Assessment, ETA 15/0442 of 10/19/15. Tikkurila Fontefire ST 60. Warrington Certification Ltd. United Kingdom. Saatavissa (viitattu 2.5.2020) <https://www.decofinn.it/new/wp-content/uploads/ETA-15-0442-Tikkurila-002.pdf>

Ympäristöministeriö (2018). Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017. Ympäristöministeriö. Saatavissa (viitattu 9.4.2020) <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>

Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto (2012). C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Lämmöneristys, Ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa (viitattu 10.2.2020) <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:4yLh7gAlohUJ:https://www.ym.fi/download/no-name/%257BE3549160-2ED6-4807-8556-230BDC60275B%257D/30749+&cd=2&hl=fi&ct=clnk&ql=fi>