

LAB-ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus
Talonstrakennustekniikka

Joona Satovuori

Teräksen palomitoitus

Opinnäytetyö 2020

Tiivistelmä

Joona Satovuori

Teräksen palomitoitus, 32 sivua

LAB-ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus

Talonrakennustekniikka

Opinnäytetyö 2020

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, LAB-ammattikorkeakoulu, suunnittelujohtaja Timo Ahti, Sitowise Oy

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Sitowise Oy:lle teräksen palomitoitusta koskeva perusluontoinen ohjeistus suunnittelijoiden käyttöön. Vastavalmistuneella ammattikorkeakoulutason rakennusinsinöörillä ei usein ole kovin syvällistä tunte-
musta palomitoituksesta, koska sillä ei ole kovinkaan suurta painotusta tutkinto-
rakenteessa. Toimivalla ohjeistuksella saataisiin nuorelle rakennusinsinöörille
perustiedot palomitoituksen kulusta.

Opinnäytetyö toteutettiin perehtymällä alan kirjallisuuteen ja julkaisuihin. Myös
muutamia haastatteluja tehtiin muun muassa eri palosuojatuotteiden valmistajien
kanssa. Työssä käsiteltiin lainsäädäntöä, paloluokkia, palosuojamenetelmiä, pa-
lomitoituksen keskeistä termistöä, palotilan lämpötilaa ja toiminnallista palomitoi-
tusta.

Opinnäytetyössä saatiin selville teräksen palomitoituksen kannalta keskeiset ylei-
set periaatteet. Työn tilaajalle tehdyssä ohjeistuksessa käsiteltiin muun muassa
yleisimpien palosuojamenetelmien käytössä huomioitavia asioita sekä varsi-
naista palomitoitusta teräspilarin ja -palkin osalta.

Asiasanat: teräs, palomitoitus, palosuojaus

Abstract

Joona Satovuori

Fire engineering design of steel, 32 pages

LAB University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Construction and Civil Engineering

Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2020

Instructors: Mr Petri Himmi, Lecturer, LAB University of Applied Sciences; Mr

Timo Ahti, Planning Manager, Sitowise Oy

The purpose of this study was to create a general guidance for designers regarding the fire engineering design of steel structures. This study was done for Sitowise Oy. A newly graduated civil engineer often does not have very profound knowledge of fire design, as it has little emphasis on the degree structure. A comprehensive guidance could provide the civil engineer with a basic understanding of the fire design process.

This study was carried out by studying literature and publications. Some interviews were also conducted with manufacturers of different fire protection products. The study covers basic theoretical information on the subject.

As a result of this study the general principles of fire engineering design of steel structures were discovered. The general guidance that was made for Sitowise included things to consider with the common fire protecting methods. Also, a step-by-step guide on fire engineering of steel column and steel beam was made.

Keywords: steel, fire design, fire protection

Sisällys

1	Johdanto.....	5
2	Lainsäädäntö.....	6
2.1	Maankäyttö- ja rakennuslaki.....	6
2.2	Suomen rakentamismääräyskokoelma.....	6
2.3	Paloturvallisuus.....	6
2.4	Pelastuslaki.....	7
3	Rakennusten paloluokat.....	7
3.1	P0.....	8
3.2	P1.....	8
3.3	P2.....	8
3.4	P3.....	9
4	Paloluokan määrittäminen.....	9
4.1	Rakennuksen paloluokka.....	9
4.2	Rakennusosan paloluokka.....	10
5	Eurokoodi ja CE-merkintä.....	11
5.1	Eurokoodi.....	11
5.2	CE-merkintä.....	11
5.3	ETA-merkintä.....	12
6	Palosuojausmenetelmät.....	13
6.1	Mineraalivillalevyt.....	14
6.2	Vermikuliittilevyt.....	15
6.3	Kalsiumsilikaattilevyt.....	15
6.4	Puukipsilevyt.....	15
6.5	Kipsilevyt ja -elementit.....	15
6.6	Palosuojauskasetit.....	16
6.7	Puu.....	16
6.8	Ruiskutteet.....	16
6.8.1	Mineraaliruiskutus.....	16
6.8.2	Vermikuliittiruiskutus.....	17
6.9	Palosuojamaalaus.....	17
6.10	Rappaus.....	17
6.11	Betoni ja tilli.....	18
6.12	Vesi.....	18
7	Teräsrakenteen palomitoitus.....	19
7.1	Suunnitteluperusteet.....	19
7.2	Materiaaliominaisuudet.....	20
7.3	Mitoitusmenetelmät.....	21
7.4	Poikkileikkaustekijä.....	22
7.5	Rakenteen kriittinen lämpötila.....	22
7.6	Palotilanteen kuormitusyhdistelmä.....	23
8	Palotilan lämpötila.....	24
8.1	Todellinen palo.....	25
8.2	Standardipalo.....	26
8.3	Parametrinen palo.....	27
8.4	Hiilivetyvalo.....	28
9	Toiminnallinen palomitoitus.....	29
10	Yhteenvedo ja pohdinta.....	31
	Lähteet.....	33

1 Johdanto

Teräs on vakiinnuttanut asemansa kantavana rakenteena monikerroksisissa toimistorakennuksissa. Myös kerrostaloissa teräksen käyttö on yleistynyt 1990-luvulta eteenpäin. Terästä arvostetaan muun muassa asennusnopeuden, muuntojoustavuuden, hukkatilaa vähentävien ratkaisujen ja kestävyys takia. Teräksen käyttöä tullaan todennäköisesti suosimaan tulevaisuudessa senkin takia, että se on myös sataprosenttisesti kierrätettävä materiaali.

Kantavien teräsrakenteiden kestävyys palotilanteessa ei kuitenkaan ole teräksen vahvuus. Teräksen materiaaliominaisuuksista lujuus- ja jäykkyysominaisuudet muuttuvat nopeasti palotilanteessa. Teräkselle on ominaista myös voimakas lämpölaajeneminen, joka palotilanteessa aiheuttaa muodonmuutoksia ja pakkovoimia.

Opinnäytetyössä käsitellään yleisellä tasolla palomitoitukseen ja -suojaukseen liittyvät asiat, kuten esimerkiksi lainsäädäntö, paloluokat, Eurokoodi, CE-merkintä, palosuojausmenetelmät, palokäyrät, eri mitoituspalot ja toiminnallinen palomitoitus.

Opinnäytetyön tilaajana toimii Sitowise Oy, ja työn tarkoituksena on tuottaa Sitowiselle suunnittelijoiden käyttöön suunnitteluohje palomitoitusta varten.

Sitowise Oy suomalaisomisteinen yli 1700 työntekijän rakennusalan suunnittelu- ja konsulttitoimisto, joka toimii 21 paikkakunnalla Suomessa. Sitowisella on tytäryhtiöt Ruotsissa, Virossa ja Latviassa. Sitowise on perustettu vuonna 2018, kun Sito Oy ja Wise Group Finland Oy fuusioituivat yhdeksi yritykseksi. (Sitowise Oy.)

2 Lainsäädäntö

2.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki

Maankäyttö- ja rakennuslain tavoitteena on järjestää alueiden käyttö ja rakentaminen niin, että luodaan edellytykset hyvälle elinympäristölle sekä edistetään ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurisesti kestävästä kehitystä (Ympäristöministeriö 2019a).

Maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellään rakentamista koskevat yleiset edellytykset, olennaiset tekniset vaatimukset sekä rakentamisen lupamenettely ja viranomaisvalvonta. Olennaiset tekniset vaatimukset koskevat rakenteiden lujuutta ja vakautta, paloturvallisuutta, terveellisuutta, käyttöturvallisuutta, esteettömyyttä, meluntorjuntaa ja ääniolosuhteita sekä energiatehokkuutta. (Ympäristöministeriö 2017.)

Maankäyttö- ja rakennuslaissa kuvataan yleiset edellytykset ja vaatimukset, mutta siinä ei kuvata konkreettisia toimia niiden saavuttamiseksi. Suomen rakentamismääräyskokoelmaan puolestaan on koottu tarkemmat säännökset ja ohjeet, kuinka maankäyttö- ja rakennuslain vaatimuksiin ja edellytyksiin päästään.

2.2 Suomen rakentamismääräyskokoelma

Suomen rakentamismääräyskokoelma sisältää maankäyttö- ja rakennuslakia täydentäviä määräyksiä ja ohjeita. Määräykset ja ohjeet ovat perinteisesti koskeneet uuden rakennuksen rakentamista. Rakennuksen korjaus- ja muutostyössä määräyksiä on sovellettu vain siltä osin kuin toimenpiteen laatu ja laajuus sekä rakennuksen tai sen osan mahdollisesti muutettava käyttötapa ovat edellyttäneet. (Ympäristöministeriö 2019a.)

2.3 Paloturvallisuus

Rakentamismääräyskokoelma ottaa kantaa paloturvallisuuteen muun muassa seuraavasti: *Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla paloturvalliseksi. Palon syttymisen vaaraa on rajoitettava. Rakennuksen kantavien rakenteiden on oltava sellaiset, että ne palon sattuessa kestävät vähimmäisajan*

ottaen huomioon rakennuksen sortuminen, poistumisen turvaaminen, pelastustoiminta ja palon hallintaan saaminen. (Ympäristöministeriö 2019.)

Vuoden 2018 alusta voimaan astui uusi asetus paloturvallisuudesta, joka korvasi aiemman määräyksen RakMK E1, joka oli voimassa vuodesta 2011 eteenpäin. Uuden asetuksen lähtökohtana on nykyisen rakenteellisen paloturvallisuustason säilyttäminen, mutta se sisältää lukuisia muutoksia ja tarkistuksia nykyisiin määräyksiin verrattuna. Tulkintojen väheneminen parantaa yritysten toimintaedellytyksiä, sujuvoittaa rakentamishankkeiden läpivientiä ja alentaneekin rakentamisen kustannuksia. (Ympäristöministeriö 2017.)

2.4 Pelastuslaki

Pelastuslain mukaan rakennus, rakennelma ja sen ympäristö on suunniteltava, rakennettava ja pidettävä kunnossa siten, että tulipalon syttymisen tai leviämisen vaara on vähäinen ja että pelastustoiminta on onnettomuuden sattuessa mahdollista. Helposti syttyvää materiaalia tai muuta tavaraa ei saa säilyttää ullakoilla, kellareissa, rakennusten alla tai rakennuksen välittömässä läheisyydessä niin, että siitä aiheutuu tulipalon syttymisen tai leviämisen vaaraa tai että tulipalon sammuttaminen vaikeutuu. Laissa on säännöksiä myös rakennusten ja laitteiden käyttöturvallisuudesta ja palotarkastuksista. (Pelastuslaki 2011/379.)

3 Rakennusten paloluokat

Rakennuksen paloluokka on yksi tärkeimmistä paloturvallisuuteen liittyvistä määriteltävistä asioista, koska paloluokka toimii lähes aina suunnittelun lähtökohtana. Rakennuksen paloluokka määräytyy rakennuksen ominaisuuksien perusteella. Nämä ominaisuudet ovat kerrosluku, rakennuksen korkeus, palovaarallisuusluokka, suojaustaso sekä henkilömäärä. Paloluokan valinta on tehtävä jo suunnittelun alkuvaiheessa. Paloluokkia on neljä: P0, P1, P2 ja P3. Näistä luokista P1 asettaa rakennukselle kaikkein korkeimmat vaatimukset, kun taas P3 asettaa rakennukselle keveimmät vaatimukset. P0 on uusin paloluokka, jota käytetään, kun rakennus suunnitellaan kokonaan tai osittain käyttäen oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menettelyä. P0-paloluokan suunnittelu vaatii suunnittelijalta kokemusta oletetun palonkehityksen menetelmistä. Paloluokka on aina ilmoitettava

suunnitteluasiakirjoissa. Tieto rakennuksen paloluokasta on tärkeä myös pelastusviranomaiselle tulipalon tai muun onnettomuuden sattuessa. (RIL 195-1-2018 2018, 25.)

3.1 P0

Paloluokka P0 on vaativien erityiskohteiden paloluokka, jossa paloturvallisuuden varmistaminen vaatii osittain tai kokonaan oletettuun palonkehitykseen perustuvia menetelmiä. Tämän paloluokan suunnitelmat vaativat aina asiantuntevan paloteknisen suunnittelijan. Suunnitelmissa esitetään muun muassa rakennuksen koko sen elinkaaren ajan käytöstä tehdyt oletukset, perusteet tarkastelun kohteiksi valituille palotilanteille, käytettyjen menetelmien kuvaus, herkkyyssanalyysi ja hyväksymiskriteerit. (RIL 195-1-2018 2018, 26.)

Eri paloluokkien rakennukset on erottava toisistaan aina palomuurilla. Poikkeuksena on kuitenkin P0-luokan rakennus, joka voidaan liittää toisen paloluokan, mutta vastaavan turvallisuustason, rakennukseen ilman palomuuria. Palomuurin puuttuminen, ja siitä aiheutuvat riskit, on kuitenkin otettava huomioon oletettuun palonkehitykseen perustuvassa tarkastelussa. (RIL 195-1-2018 2018, 27.)

3.2 P1

P1-paloluokan rakennukset ovat suuria rakennuksia, joiden henkilömäärää, korkeutta ja kerrosalaa ei ole rajoitettu. P1-paloluokan rakennuksien rakenteiden mitoitukseen vaikuttaa oleellisesti palokuorma, sillä tämän luokan rakennusten ja kantavien rakenteiden oletetaan kestävän koko palokuorman palamisen ja jäähtymisen. Vaikka P1-luokan rakennuksilla ei ole rajoituksia, sen paloteknisten vaatimusten määrä kasvaa henkilömäärää, korkeuden ja kerrosalan kasvamisen myötä. Pääsääntöisesti tämän luokan rakennusten kerrosmäärä on kolme tai enemmän. Yksi, tai kaksikerroksinen rakennus voidaan kuitenkin sijoittaa tähän luokkaan, jos rakennuksen koko- tai henkilömäärärajoitukset eivät salli sijoittamista alempaan luokkaan. (RT 103131 2019, 2.)

3.3 P2

P2-paloluokan rakennukset ovat yleensä enintään kaksikerroksisia, mutta automaattisella sammutusjärjestelmällä, eli sprinklauksella, varustettuna asuin-,

hoito-, majoitus- tai työpaikkarakennuksen kerrosluku voi olla enintään 8 ja korkeus enintään 28 metriä. Kokoontumis- ja liikerakennuksen kerrosmäärä sprinklausella saa olla 4, ja korkeus enintään 14 metriä. Huomioitavaa on, että sisäpuolisten pintojen luokkavaatimuksille ja paloturvallisuutta parantavien laitteistoille annetaan osittain P2-luokassa P1-luokkaa tiukemmat vaatimukset. Näin saavutetaan riittävä paloturvallisuustaso, vaikka muuten muut vaatimukset ovatkin P2-luokassa kevyemmät. (RT 103131 2019, 2.)

3.4 P3

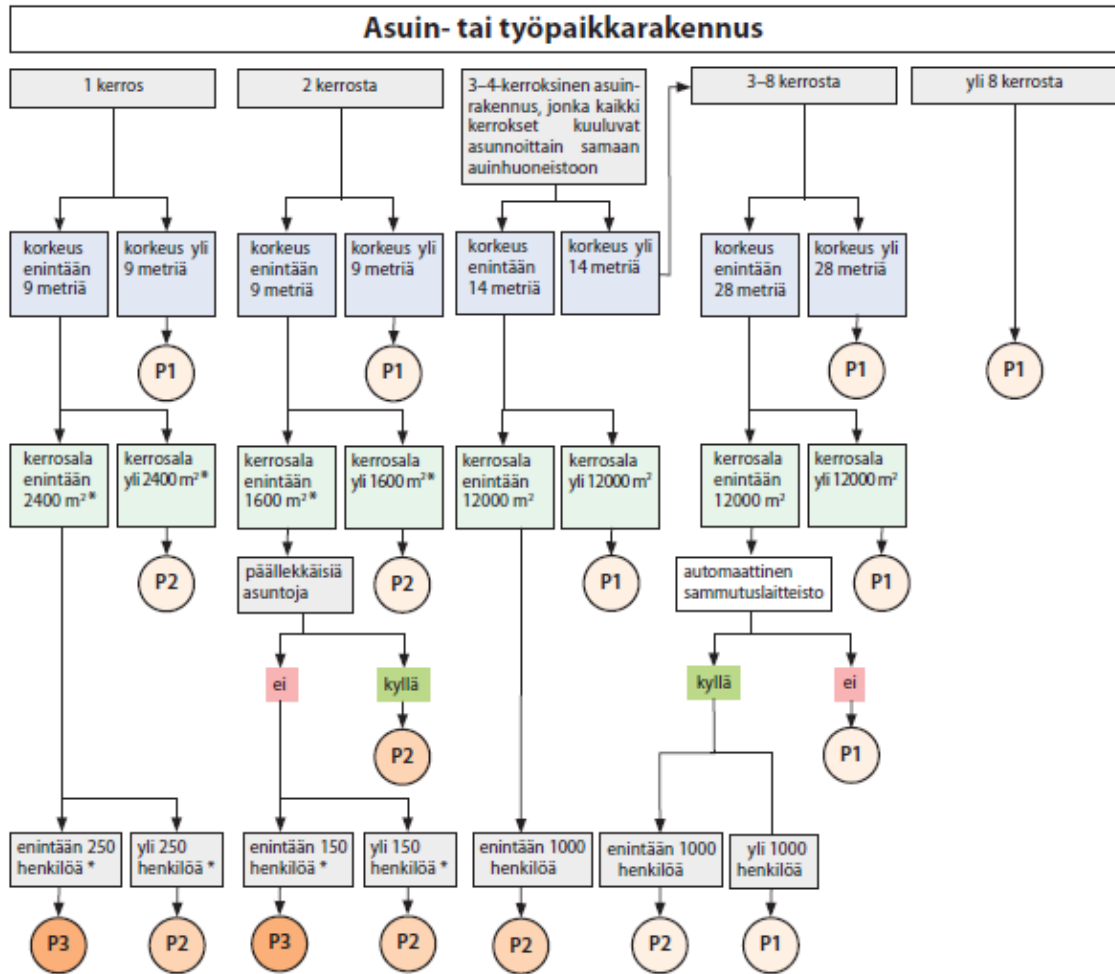
P3-paloluokka on paloluokista kevyin. Tyypillisesti tähän paloluokkaan kuuluvat yksi- ja kaksikerrokset pienet rakennukset, joiden koko ja henkilömäärä on rajoitettu käyttötarkoituksen mukaan, poikkeuksena ovat suuret tuotanto- ja varastotilat. Kantaville rakenteille ei aseteta P3-paloluokassa erityisvaatimuksia, ellei rakenne toimi palomuurina, tai palo-osastoivana rakenteena. P3-paloluokan rakennuksissa ei sallita päällekkäisiä asuntoja. (RT 103131 2019, 2.)

4 Paloluokan määrittäminen

4.1 Rakennuksen paloluokka

Rakennuksen paloluokka määritetään jo suunnittelun alkuvaiheessa, sillä sen pohjalta lähdetään tarkastelemaan, minkälaisia paloturvallisuusratkaisuja rakennukseen vaaditaan. Paloluokka voidaan määrittää yksinkertaisesti valmiilla kaavioilla. Kaavio ottaa huomioon rakennuksen korkeuden, kerrosalan sekä henkilömäärän. Kaavio ei kuitenkaan ota huomioon automaattisella sammutuslaitteistolla sallittuja lievennyksiä eikä palo-osastojen vaikutusta rakennuksen paloluokkaan. (RT 103131 2019, 3.)

Kaavioita löytyy asuin- ja työpaikkarakennukselle, majoitus- ja hoitolaitokselle, kokoontumis- ja liikerakennukselle, tuotanto- ja varastorakennukselle ja maanpäälliselle autosuojalle. Ohessa esimerkki kaaviosta, jolla voidaan määrittää asuin- ja työpaikkarakennuksen paloluokka (kuva 1).



KUVA 1. Paloluokan määräytyminen asuin- ja työpaikkarakennuksessa (RT 103131 2019, 4)

4.2 Rakennusosan paloluokka

Rakennusosien paloluokituksella ilmaistaan se aika, jonka rakennusosan tulee säilyttää kantavuutensa ja osastoivuutensa. Palonkestävyysajat ovat 15, 30, 45, 60, 120, 180 ja 240 minuuttia. Rakennusosien ominaisuuksia ovat kantavuus (R), tiiveys (E) ja eristävyys (I). Lisäksi merkintää voidaan täydentää tunnuksella (M), joka tarkoittaa iskunkestävyyttä. Joissakin rakenneosissa on otettava huomioon kaikki yllä mainitut kriteerit, mutta esimerkiksi teräsrungoissa vain kantavuudella on merkitystä, esimerkiksi R60.

5 Eurokoodi ja CE-merkintä

5.1 Eurokoodi

Eurokoodit ovat eurooppalaisia kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja. Eurokoodien päätehtävänä on yhtenäistää Euroopan sisäistä kauppaa ja parantaa eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukykyä. Ennen eurokoodeja rakennustuotteita ei voitu viedä toisiin maihin, koska jokaisella maalla oli tuotteille oma tuotehyväksyntä. Myös suunnittelutyön vieminen toiseen maahan oli hankalaa, sillä suunnittelijan täytyi omaksua ja käyttää sen maan suunnitteluohjeita, joissa suunnittelukohde sijaitsi. (Suomen Standardisoimisliitto 2019.)

Suomessa ensimmäiset eurokoodit otettiin käyttöön 1.11.2007, jolloin rakennesuunnittelua voitiin tehdä joko eurokoodeilla tai Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti. Eurokoodit tulivat rakentamismääräyskokoelman tilalle 1.9.2014. Tämän jälkeen suunnittelussa on käytetty eurokoodeja yhdessä ympäristöministeriön vahvistamien kansallisten liitteiden kanssa. (Suomen Standardisoimisliitto 2019.)

Eurokoodien laadinnassa ei ole aina pystytty pääsemään yhteisymmärrykseen kaikkien mitoituskaavojen osalta, jolloin kompromissin löytämiseksi joihinkin kaavoihin on jätetty kansallisia valintoja. Kansalliset liitteet ovat täydennyksiä eurokoodeihin, ja ne ovat Suomessa viranomaisten laatimia. Talonrakentamisen osalta kansalliset liitteet on laatinut ympäristöministeriö. (Suomen Standardisoimisliitto 2019.)

Suunnittelussa eurokoodeja käytetään aina yhdessä kansallisen liitteen kanssa. Kansallisessa liitteessä otetaan kantaa kohtiin, joissa käsitellään kansallista varmuustasoa (varmuusluvut), paikallisia olosuhteita (luonnonkuormien suuruus) ja rakentamisen kustannustasoa. (Suomen Standardisoimisliitto 2019.)

5.2 CE-merkintä

CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa, että rakennustuotteen ominaisuudet ovat eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaiset. Rakennustuotteen valmistaja ei saa asettaa saataville

markkinoille rakennustuotteita, jotka kuuluvat harmonisoidun tuotestandardin soveltamisalaan ja joilla ei ole CE-merkintää. Rakennustuotteeseen kiinnitetty CE-merkintä osoittaa, että tuote on testattu harmonisoidun tuotestandardin mukaisella testimenetelmällä ja että tuote on ilmoitetun suoritustason mukainen. (Ympäristöministeriö 2019b.)

CE-merkinnän tavoitteena on parantaa rakennustuotteiden vertailukelpoisuutta. Suunnittelijat ja kuluttajat voivat verrata rakennustuotteiden suoritustasoilmoituksia helposti toisiinsa, kun tuotteen ominaisuudet ilmoitetaan aina samalla tavalla. Tämä helpottaa myös suomalaisten tuotteiden myymistä muualle Eurooppaan. (Ympäristöministeriö 2019b.)

Teräs- ja alumiinikokoonpanojen CE-merkintä on ollut pakollista 1.7.2014 alkaen. Konepajassa valmistettavien teräs- ja osakokoonpanojen vaatimustenmukaisuus osoitetaan CE-merkinnällä standardin SFS-EN 1090-1 + A1 mukaisesti. CE-merkinnän avulla rakennustuotteen voi saada markkinoille ilman jokaisessa kohde- maassa tehtyjä erillisiä kokeita ja selvityksiä. (Suomen Standardisoimisliitto 2019.)

Kaikkiin kantaviin teräsrakenteisiin ja konepajalla tuotettuihin osiin tulee kiinnittää CE-merkintä. CE-merkintä edellyttää konepajalta valvonnan alaista laadunhallintajärjestelmää. Suomessa CE-merkinnän myöntää siihen oikeutettu laitos, joka on valtuutettu suorittamaan CE-merkinnän edellyttämiä testauksia ja laadunvalvontaa, kuten esimerkiksi VTT. (Suomen Standardisoimisliitto 2019.)

5.3 ETA-merkintä

ETA-merkintä tarkoittaa eurooppalaista teknistä arviointia. Kyseinen vapaaehtoinen merkintä voidaan myöntää rakennustuotteille, joille ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia tai joita ei voida testata nykyisillä testimenetelmillä. ETA-merkintä on voimassa koko EU:ssa, joten se on kansallisia sertifikaatteja kattavampi. Rakennustuotteelle voidaan myöntää CE-merkintä ETA-merkinnän perusteella. (Eurofins 2019.)

6 Palosuojausmenetelmät

Palosuojausten tehtävänä on hidastaa teräsrakenteen lämpötilan kohoamista tulipalotilanteessa. Teräsrakenteiden palosuojaus voidaan toteuttaa käytännössä joko eristämällä teräsrakenne ja/tai parantamalla teräsrakenteen kykyä vastaanottaa lämpöä lämpötilan nousematta liian suureksi. Palosuojaukseen on saatavilla useita menetelmiä ja tuotteita. Suojausten valintaan vaikuttavat muun muassa asennus- ja käyttöolosuhteet sekä suojausten kustannukset. Kustannuksia laskettaessa on otettava huomioon myös käytönaikaiset kustannukset, kuten palosuojausten paikkaaminen. Usein palosuojausten lopullisen valinnan tekevät arkkitehtuuriset seikat. (Inha & Mustajärvi 1997, 58.)

Teräsrakenteen ulkopuolinen palosuojaus voidaan toteuttaa levytyksellä, kaseteilla, ruiskutteilla, rappauksella, betonilla tai muurauksella. Teräsrakenteen kykyä vastaanottaa lämpöä voidaan parantaa täyttämällä teräsprofiili betonilla tai vedellä, jolloin teräsrakenteeseen siirtyvä lämpö siirtyy teräsprofiilin sisällä olevaan materiaaliin. Ulkopuolisen palosuojausten tarkoituksena on estää lämmön siirtyminen liekeistä ja palokaasuista itse teräkseen. Palosuojaustapoja ja -aineita ei voida kuitenkaan asettaa mihinkään paremmuusjärjestykseen, vaan jokaisessa kohteessa palosuoja-asiat on suunniteltava erikseen. (Inha & Mattila, 1991 39.)

Palosuojausmenetelmät voidaan jakaa niiden toteutustavan mukaan kuiviin ja märkiin menetelmiin. Kuivissa palosuojausmenetelmissä suojaus kiinnitetään teräsprofiiliin mekaanisilla kiinnikkeillä suojaamaan rakennetta. Märät palosuojausmenetelmät kiinnitetään sellaisenaan teräkseen. (Inha & Mustajärvi 1997, 58.)

Kuivia palosuojausmenetelmiä ovat

- mineraalivillalevyt
- vermikuliittilevyt
- perliittilevyt
- kalsiumsilikaattilevyt
- puukipsilevyt
- kipsilevyt ja -elementit
- palosuojauskasetit

- tiili
- kevytbetoniharkko
- puu.

Märkiä menetelmiä ovat

- mineraalikuituruiskutus
- vermikuliittiruiskutus
- palosuojamaalaus
- rappaus
- betoni
- vesi.

6.1 Mineraalivillalevyt

Mineraalivillalevyjen käyttö pohjautuu niiden hyvään lämmöneristyskykyyn. Palosuojaukseen soveltuvan mineraalivillan levyn sintraantumislämpötilan on oltava palonkestoajasta riippuen 800 - 1100 °C. Sintraantumisella tarkoitetaan kuitujen sulamista kiinni toisiinsa korkeassa lämpötilassa, jolloin levyn huokoisuus väheenee ja lämmönjohtavuus paranee. Palosuojauksessa käytettävien mineraalivillalevyjen tiheys on yleensä 100 - 400 kg/m³ ja paksuus 10 - 120 mm. (Inha & Mustajärvi 1997, 68.)

Mineraalivillalevyt kiinnitetään mekaanisilla kiinnikkeillä tai liimaamalla. Kiinnitys rakenteeseen voidaan tehdä teräspiikeillä, lukituslevyjen avulla tai erilaisilla nauloilla. Levyt kiinnitetään toisiinsa hakasilla, ruuveilla, nauloilla tai teräsverkolla. Mineraalivillalevytys on yksikerroksinen levytys, joten asennusvaiheessa on varmistettava levyjen saumojen tiiveys. (Inha & Mustajärvi 1997, 68.) Suojattavan rakenteen dimensioiden ollessa suuria vaikuttaa levypaksuuden valintaan myös levyltä vaadittava jäykkyys, jottei levy katkea. (Inha & Mattila 1991, 40.)

6.2 Vermikuliittilevyt

Levyn perusaineena on vermikuliitti ja sideaineena silikaattipitoinen aine, esimerkiksi sementti. Vermikuliittilevyjen palosuojausominaisuudet perustuvat vermikuliitin hyvään lämmöneristyskykyyn ja sideaineen suureen vesimäärään. Sideaineeseen sitoutuneen veden lämmittämiseen ja höyrystymiseen kuluu runsaasti lämpöenergiaa. Vermikuliittilevyn tiheys on 350 - 500 kg/m³ ja levyn paksuus 16 - 80 mm. Levyt kiinnittämiseen profiilin ympärille käytetään ruuveja tai nauvoja ja liimana palamatonta kiinnityslaastia tai liimaa. (Inha & Mattila 1991, 41.)

6.3 Kalsiumsilikaattilevyt

Kalsiumsilikaattilevy vastaa ominaisuuksiltaan vermikuliittilevyä. Kalsiumsilikaattilevyn tiheys on 430 - 950 kg/m³. Kalsiumsilikaattilevyihin on lisätty kuituja vahvistamaan levyä. Levyjen paksuus vaihtelee 6 - 65 mm, ja ne kiinnitetään ruuveilla tai hakasilla teräsprofiiliin koteloksi. (Inha & Mustajärvi 1997, 72.)

6.4 Puukipsilevyt

Puukipsilevy valmistetaan puristamalla kostean puukuidun ja kipsin seosmassta. Puukipsilevyn tiheys on 1200 kg/m³. Levyt kiinnitetään ruuveilla, hakasnauloilla tai paineilmanauiloilla. (Inha & Mustajärvi 1997, 75.)

6.5 Kipsilevyt ja -elementit

Kipsin toiminta palotilanteessa vastaa vermikuliittilevyjen periaatetta. Kipsin sisältämän suuren kidevesimäärän höyrystymiseen kuluu runsaasti lämpöenergiaa. Niin kauan, kun vettä kipsilevyssä riittää pysyy profiilin puoleisen kipsilevyn lämpötila 100 °C:ssa. Kun vesi on haihtunut, kipsilevy hajoaa eikä teräksellä ole enää suojaa. Kipsilevyjen tiheys on 770 - 980 kg/m³. Kipsilevyjen paksuus on 13 mm tai 15 mm, ja niitä voidaan käyttää yhtenä tai useampana kerroksena. (Inha & Mustajärvi 1997, 76.)

Kipsielementit valmistetaan kipsin, lasikuidun ja perliitin seoksesta. Seoksesta voidaan valmistaa esimerkiksi ympyrän muotoisia elementtejä, joilla voidaan suojata pyöreitä pilareita. Vastaavanlaisen elementit paksuus on 20 - 40 mm ja tiheys 670 - 800 kg/m³. (Inha & Mustajärvi 1997, 76.)

6.6 Palosuojauskasetit

Palosuojauskasetit ovat teräsohutlevystä valmistettuja koteloita, joiden sisäpintaan on asennettu palosuojausmateriaali. Palosuojamateriaalina käytetään mineraalivillalevyjä, kalsiumsilikaattia tai vermikuliittilevyä. (Inha & Mattila 1991, 43.)

6.7 Puu

Puun käyttö palosuojauksena perustuu puun hyvään lämmöneristyskykyyn. Puu luokitellaan kuitenkin palavaksi materiaaliksi, joten sen käyttö palosuojauksena on rajoitettua. Suojauksen paksuus lasketaan suoraan puun hiiltymissyvyyden perusteella. Yleensä puu syttyy 250 - 300 °C:ssa. Syttymisen jälkeen puu alkaa hiiltä noin 0,8 mm minuutissa. Palo etenee hitaasti massiivisessa puutavarassa, sillä syntynyt hiilikerros suojaa puuta palotilanteessa ja hidastaa puun sisäosien lämpötilan nousua ja palon etenemistä. (Puuinfo.)

6.8 Ruiskutteet

Ruiskutteet soveltuvat parhaiten suorien ja tasaisten pintojen lisäksi myös geometrisesti haastavien ja epätasaisten pintojen suojaamiseen. Ruiskutteilla saadaan saumaton palosuoja rakenteelle. Teräsprofiili voidaan ruiskuttaa myötäillen profiilia, koteloimalla tai ruiskuttamalla profiili umpinaiseksi. Jos ruiskutuksen paksuus on yli 45 mm, tarvitaan ruiskutteen sisälle raudoitukseksi verkko pitämään ruiskutus koossa. Ruiskutus antaa teräsprofiilille myös samalla korroosiosuojan. Ruiskutteen onnistuminen vaatii puhtaan teräsprofiilin pinnan, jotta ruiskutus pysyy kiinni. Ruiskutus vaatii kuivuakseen yli +5 °C lämpötilan, joten pakkasessa ruiskutusta ei voida tehdä. (Inha & Mustajärvi 1997, 60.)

6.8.1 Mineraaliruiskutus

Mineraaliruiskutuksessa mineraalivillakuidut ja sementti ruiskutetaan veden kanssa teräksen pinnalle. Jos ruiskutettavan kerroksen paksuus on suuri, voidaan käyttää verkkoa pitämään ruiskutus koossa. Valmiin ruiskutetun kerroksen paksuus on 10 - 60 mm. Mineraaliruiskutuksen tiheys on 220 - 500 kg/m³. Koska valmis ruiskutettu pinta on pehmeää, pinta on suojattava rappauksella, lasikuitukankaalle tai levytyksellä. (Inha & Mustajärvi 1997, 61.)

6.8.2 Vermikuliittiruiskutus

Vermikuliittiruiskutuksen periaate on sama kuin mineraaliruiskutuksessa. Massan runkoaineena on vermikuliitti ja sideaineena sementti, kalkki tai kipsi. Kerrospaksuus voidaan ruiskuttaa yhdellä kerralla tai useampana 10 - 15 mm kerroksena. Vermikuliittiruiskutuksen tiheys on 300 - 800 kg/m³. (Inha & Mustajärvi 1997, 62.)

6.9 Palosuojamaalaus

Palosuojamaalien suojausvaikutus perustuu maalikalvon kemialliseen reaktioon lämmön kanssa. Lämpötilan kohotessa maaleista joko irtoaa tulipaloa hidastavia kemikaaleja tai maalikerros paisuu usean senttimetrin paksuiseksi eristäväksi kerrokseksi pinnan päälle. Kaasuja erittävät maalit eivät kuitenkaan juurikaan sovellu teräsrakenteisiin, sillä ne eivät estä lämpötilan nousua teräksessä. Maalien käyttöä, joissa maalikerros paisuu, rajoittaa suojapinnan irtoaminen ja halkeilu pitkään jatkuvissa tulipaloissa (Inha & Mattila 1991, 44.)

Huonelämpötilassa palosuojamaali käyttäytyy kuten tavallinen maali. Paisumisreaktio alkaa 250 - 300 °C lämpötilassa, ja 300 °C lämpötilassa maali on jo täysin paisunut. Muodostuva vaahtokerros hiiltyy tulipalossa ja toimii näin palosuojana sen alla olevalle teräkselle. (Inha & Mattila 1991, 44.)

Palosuojamaali levitetään tavallisen maalin tavoin siveltimellä, telalla tai ruiskulla. Kuivakalvon paksuus vaihtelee tuotteittain, tyypillisesti paksuus on luokkaa 0,2 mm - 4 mm. Palosuojamaaleilla voidaan päästä nykyään 120 minuutin palonkestovaatimukseen, tosin se ei useinkaan ole taloudellista. Maalauksen etuna on sen ohut kalvonpaksuus, valmis pinta ja ulkonäkö. Palosuojamaalattu teräsrakenne myös näyttää tavalliselta maalatulta teräkseltä. (Tremco Illbruck 2020.)

6.10 Rappaus

Rappaus levitetään teräsrakenteen pinnalle joko käsin tai koneellisesti ruiskuttamalla kiinni teräsrakenteen ympärille asetettuun verkkoon koteloksi. Palosuojauksena käytetään normaalia kalkkisementtirappausta tai kevyttä kipsirappausta. Rappauksen paksuus on tyypillisesti 30 - 50 mm. (Inha & Mattila 1991, 65.)

6.11 Betoni ja tili

Betonin ja tiilen käyttö palosuojauksessa perustuu niiden suureen ominaislämpökapasiteettiin. Betonia voidaan käyttää joko teräsrakenteen ulko- tai sisäpuolisena palosuojauksena. Betoni voi toimia palosuojauksen ohella teräksen kanssa liittorakenteena. Rakenteen ulkopuolinen betonointi suojaa terästä sitomalla itseensä lämpöä ja hidastamalla teräksen lämpötilan nousua. Sisäpuolinen betonointi suojaa terästä sitomalla itseensä lämpöä, jolloin teräsprofiilin lämpötila ei nouse niin nopeasti. Kun umpinaisia teräsprofiileja suojataan sisäpuolisella betonoinnilla, on teräsprofiiliin porattava reikiä, jotta betonin kuumentuessa sen vapauttama vesihöyrynpaine pääsee vapautumaan. (Inha & Mattila 1991, 65.)

6.12 Vesi

Vedellä voidaan suojata onttoja teräsrakenteita. Tulipalotilanteessa teräsprofiilin sisällä oleva vesi johtaa lämmön siirtymisen teräksen kautta veteen, jolloin teräksen lämpötila nousee enintään 200 - 250 °C:een. Tällaisessa rakenteessa on kuitenkin huolehdittava painovoimaisesta veden vaihtumisesta tulipalon aikana teräsprofiilin sisällä, jotta korvaavaa vettä pääsee virtaamaan höyrystyvän veden tilalle. (Inha & Mustajärvi 1997, 66.)

Sprinklaaminen on automaattinen rakenteen ulkopuolinen palosuojauskeino, jossa rakenne suojataan sammutusjärjestelmällä, joka suihkuttaa vettä rakenteen pinnalle. Rakenteen pinnalle suihkuava vesi pitää teräksen lämpötilan 100 °C:n lämpötilassa, kunhan vesipinta on yhtenäinen. (Inha & Mustajärvi 1997, 67.)

Automaattiset sprinklerilaitteistot ovat yksi tehokkaimmista aktiivisen palosuojauksen keinoista teräsrakenteissa, ja sprinklerilaitteisto on tärkeä osa koko paloturvallisuuskokonaisuutta. Sprinklerijärjestelmän avulla pyritään siihen, että teräsosien palosuojaus voidaan jättää kokonaan pois, tai ainakin sitä pyritään vähentämään merkittävästi. Usein tavoitteena on päästä rakennusosan osalta luokkaan R15. Toimintavarmat suunnitelmat edellyttävät sprinklerien luotettavuustestien huomioimista ja toiminnallisen palomitoituksen avulla tehtyjä kattavia perusteluja. (Salminen, 2019, 1.) Alla olevassa kuvassa 2 teräsrunkoisen hallin sprinklerilaitteisto.



Kuva 2. Teräsrakenteiden suojaus sprinklerilaitteistolla (Outinen 2013, 22)

7 Teräsrakenteen palomitoitus

7.1 Suunnitteluperusteet

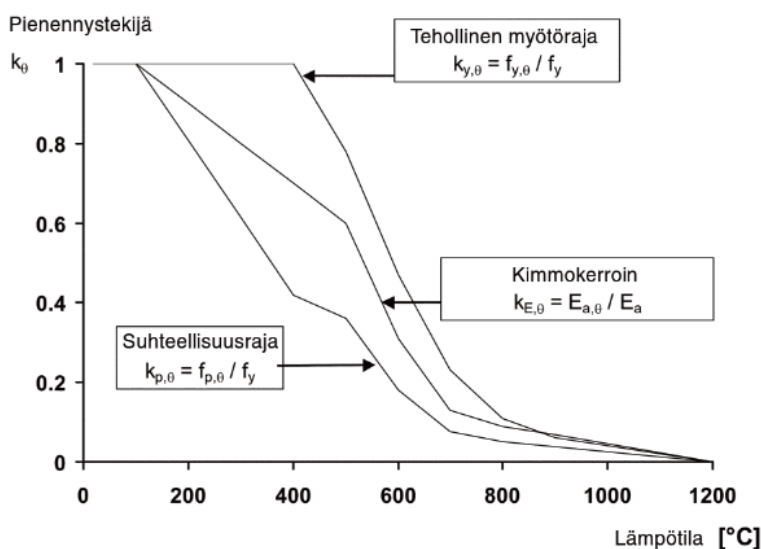
Teräsrakenteita koskeva yleinen vaatimus on, että rakenteiden on kestävä palotilanteessa sortumatta niille asetettu palonkestoaja. Palonkestoajalla tarkoitetaan aikaa, jonka kuluttua teräsrakenteen kestävyys on laskenut vallitsevien ra-
situsten tasolle tai muodonmuutokset ylittävät niille asetetut sallitut arvot. Rakenteen kestävyysvaatimukset voivat perustua joko rakentamismääräyskokoelman paloluokituksiin tai oletettuun palonkehitykseen. Paloluokituksiin perustuvassa tavassa tarkoitetaan niin sanottua standardipalomitoitusta, ja oletettuun palonkehitykseen perustuvassa tavassa tarkoitetaan toiminnallista tarkastelua. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 125.)

7.2 Materiaaliominaisuudet

Teräs on itsessään palamaton aine, eikä se lisää rakennuksen palokuormaa eikä osallistu palamiseen. Lämpötilan noustessa teräksen kantokyky heikkenee nopeasti, kun lujuus ja kimmokerroin pienevät. Teräkselle ominaista on myös voimakas lämpölaajeneminen tulipalossa, mikä johtaa teräksen lujuuden ja kimmokerroimen pienentymisen kanssa palautumattomiin muodonmuutoksiin. Lämpölaajeneminen myös aiheuttaa rakenteeseen lisäjännityksiä. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 125; Teräsrakenneyhdistys 1978, 38.)

Virumisella tarkoitetaan ajan kuluessa tapahtuvaa lisääntyvää muodonmuutosta. Viruminen liitetään yleensä vahvasti betonirakenteisiin, mutta viruma liittyy myös teräsrakenteisiin. Normaalisissa lämpötiloissa viruman vaikutus teräkseen on olematon, mutta tulipalotilanteessa lämpötilan noustessa yli 400 °C, vaikutus teräksen jännitys–muodonmuutoskäyrään on huomattava. Viruma muodostaa ylärajan teräsrakenteiden kriittisille lämpötiloille 600 °C:een. (Teräsrakenneyhdistys 1978, 39.)

Kuten kuvan 3 kuvaajasta huomataan, teräksen myötöraja alkaa heikentymään voimakkaasti, kun teräksen lämpötila ylittää 400 °C. Kimmokerroin puolestaan alkaa pienentymään jo 100 °C:n jälkeen. Alla olevasta kuvasta 3 nähdään lämpötilan vaikutusta teräksen myötörajaan ja kimmokertoimeen.



KUVA 3. Lämpötilan vaikutus teräksen myötörajaan ja kimmokertoimeen (SFS-EN 1993-1-2 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu, 22)

7.3 Mitoitusmenetelmät

Palomitoituksessa käytettäviä mitoitusmenetelmiä on kolme: taulukkomitoitus, yksinkertaiset laskentamallit ja kehittyneet laskentamallit.

Taulukkomitoitus on standardipalomitoituksessa käytettävä yksinkertainen mitoitusmenetelmä, jossa palosuojaus lasketaan tuotevalmistajien mitoitustaulukoiden avulla rakenteen palonkestoajan, poikkileikkaustekijän ja kriittisen lämpötilan perusteella. Taulukkomitoitus soveltuu vain yksinkertaisten teräsrakennneosien, kuten palkkien laskentaan. Puristettujen rakenteiden laskentaan taulukkomitoitus ei sovellu, sillä ei ole saatavilla esimerkiksi hoikkuuden huomioon ottavia taulukoita. Puristettujen rakenteiden kohdalla laskenta tehdään iteroimalla, eli ottamalla huomioon lämpötilasta riippuen pienennettyjen myötölujuuden ja kimmoduulin arvot. Yksittäisen teräsosan laskennan tukena voidaan käyttää yksinkertaisia laskentamenetelmiä, joilla lähinnä pyritään pienentämään taulukkomitoituksella saatuja palosuojapaksuuksia. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 135-137.)

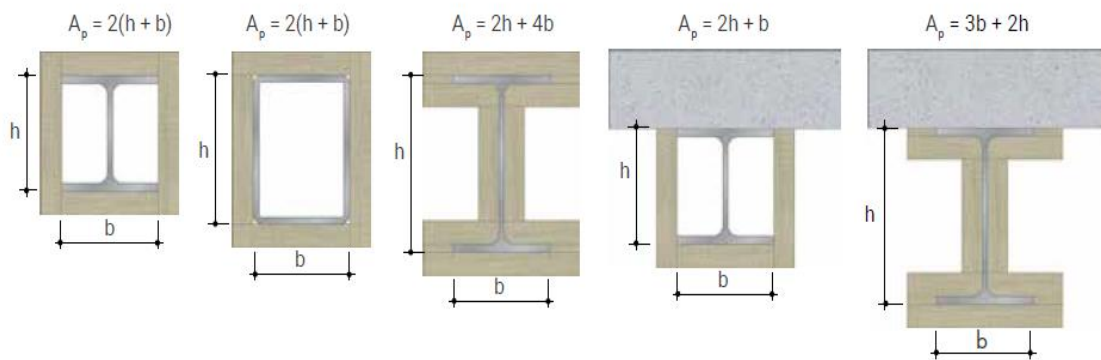
Yksinkertaisessa laskentamallissa laskenta perustuu määrättyyn kriittiseen lämpötilaan. Jos rakenteen lämpötila pysyy kriittistä lämpötilaa alempana, rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Tämä ehto täyttyy, jos kriittisen lämpötilan saavuttamiseen tarvittava aika on pidempi kuin asetettu vaadittu palonkesto aika. Yksinkertaisissa laskentamalleissa oletetaan profiilin poikkileikkauksen lämpöjakauma tasaiseksi koko profiilille, joten yksinkertaisilla laskentamalleilla voidaan tarkastella vain yhtä rakenneosaa kerrallaan. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 135-137.)

Myös kehittyneempiä laskentamalleja on mahdollista käyttää. Laskennan tuloksena saadaan yleensä rakenteen muodonmuutokset koko palon aikana. Rakenteen käyttäytymisen tunteminen palossa mahdollistaa tapauskohtaisesti paloturvallisuuskriteerien asettamisen rajoitettujen muodonmuutosten ja rakenteen vaurioitumisen perusteella. Kehittyneillä laskentaohjelmilla on mahdollista tutkia koko rakennetta, koska siinä voidaan ottaa huomioon lämpötilan epätasainen jakautuminen profiilissa. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 135-137.)

7.4 Poikkileikkaustekijä

Teräsrakenteen lämpötilan kohoamiseen palotilanteessa vaikuttaa oleellisesti teräsosan poikkileikkaus. Eurokoodeissa poikkileikkaustekijää kuvataan merkinnällä A/V , mutta se tunnetaan yleisesti myös merkinnällä F/V . Sillä tarkoitetaan teräsosan palolle alttiin pinta-alan suhdetta teräsosan tilavuuteen. Suojaamattomille teräsosille käytetään poikkileikkaustekijää A_m / V , kun taas palosuojatuille teräsosille käytetään merkintää A_p / V . Tässä merkinnässä A_p on palosuojauksen palon vastaisen pinnan, eli sisemmän pinnan, pinta-ala. Poikkileikkaustekijä vaikuttaa lämpötilan kehitykseen niin, että pieni ja paksu profiili lämpenee hitaammin kuin suuri ja ohut. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 134.)

Alla olevassa kuvassa 4 on eräitä esimerkkejä palosuojattujen teräsosien termin A_p laskennasta.



Kuva 4. Termin A_p laskennan periaate (Paroc 2019, 5.)

7.5 Rakenteen kriittinen lämpötila

Rakenteen kriittinen lämpötila on lämpötila, jossa teräksen myötölujuus on alentunut palotilanteessa vallitsevien kuormien aiheuttaman jännityksen suuruiseksi. Kriittinen lämpötila T_{cr} riippuu rakennemallista, materiaaliominaisuuksista sekä palonaikaisista kuormista. Mitään yleispätevää kriittistä lämpötilaa ei siis ole olemassa. Teräsrakenteen palotilanteen maksimilämpötilan on oltava koko palon ajan pienempi kuin kriittinen lämpötila. Palkkirakenteiden kriittisen lämpötilan

määrää yleensä taivutus- tai leikkauskestävyys. Pilareiden ja vetotankojen kriittinen lämpötila määräytyy tavallisesti normaalivoimakestävyyden perusteella. (Kouhia 2015, 51.)

Jos siirtymäehtoja eikä stabiiliutta tarvitse ottaa huomioon, voidaan kriittinen lämpötila laskea alla olevalla kaavalla 1.

$$\Theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674\mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad \text{Kaava 1.}$$

Θ_a = teräksen lämpötila ajan hetkellä t

μ_0 = hyväksikäyttöaste ajan hetkellä $t = 0$, μ_0 arvon oltava vähintään 0,013

Hyväksikäyttöaste μ_0 lasketaan kaavan 2 mukaisesti vertaamalla rakenneosan palotilanteessa vallitsevaa rasitusta vastaavaan kestävyiden arvoon ajan hetkellä $t = 0$.

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad \text{Kaava 2.}$$

$E_{fi,d}$ = voiman tai momentin mitoitusarvo palotilanteessa

$R_{fi,d,0}$ = teräsrakennososan vastaava kestävyiden mitoitusarvo palotilanteessa ajan hetkellä $t = 0$

7.6 Palotilanteen kuormitusyhdistelmä

Palotilanteessa käytetään kuormitusta laskettaessa kaavan 3 mukaista onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmää:

$$\sum_{j \leq 1} G_{k,j} + A_d + (\Psi_{1,1} \text{ tai } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,1} Q_{k,i} \quad \text{Kaava 3.}$$

missä

$G_{k,j}$ on pysyvän kuorman ominaisarvo

A_d on onnettomuuskuorman mitoitusarvo

$\Psi_{1,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin Ψ_1

$\Psi_{2,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin Ψ_2

$Q_{k,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo

Yhdistelykerrointa $\psi_{1,1}$ käytetään, kun määräävä muuttuva kuorma on lumi-, jää- tai lumikuorma. Muutoin käytetään yhdistelykerrointa $\psi_{2,1}$. Kertoimien $\psi_{1,1}$ ja $\psi_{2,1}$ arvot löytyvät standardin SFS EN-1990 kansallisesta liitteestä sekä alla olevasta kuvasta 5.

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3)**) kun $s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma **)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
*) Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. **) Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.			

Kuva 5. Kertoimien ψ arvot rakennuksille (RIL 201-1-2017 2017, 36)

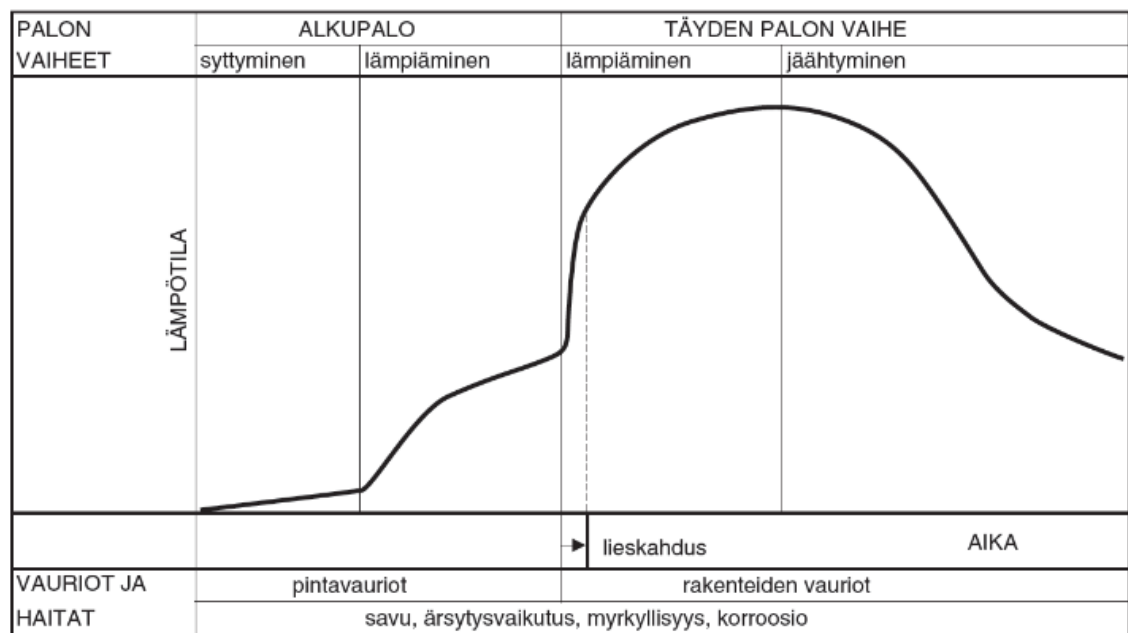
8 Palotilan lämpötila

Rakennuksen sisällä syttyvään tulipaloon vaikuttavat lukuisat tekijät, muun muassa syttymistapa, palokuorman määrä ja suuruus, palotilan geometria ja ilman riittävyys. Teräsrakenteen palonaikaista lämpötilaa selvitettyäessä palotilassa oleva kaasu on oleellinen tekijä. Tulipalon käyttäytymistä mallinnetaan erilaisten

lämpötilakäyrien avulla. Standardissa SFS-EN 1991-1-2 esitetään nimellisinä lämpötilakäyriä standardipalokäyrä, ulkopuolisen palon käyrä sekä hiilivetykäyrä. Muita tulipalotyyppisiä ovat todellinen palo ja parametrinen palo. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 126.)

8.1 Todellinen palo

Todellinen palo voidaan jakaa karkeasti alkupaloon ja täyden palon vaiheeseen. Alkupalo jaetaan vielä syttymis- ja lämpiämisvaiheisiin, joissa tulipalon sammuttaminen on vielä helppoa. Täyden palon vaihe alkaa lieskahduksesta, joka aloittaa lämpiämisvaiheen. Täyden palon vaihe kestää yleensä tunnista muutamaan tuntiin. Lieskahduksessa kaikki palava materiaali syttyy palamaan lämpötilan ollessa 350 – 550 °C. Tällöin tulipalon sammuttaminen on erittäin vaikeaa, ennen kuin saavutetaan jäähtymisvaihe palokuorman vähennyttyä riittävästi. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 126.)



KUVA 6. Todellisen palon vaiheet (Teräsrakenneyhdistys 2010, 126)

Yllä oleva kuva 6 kuvaa todellisen palon vaihteita, jos tulipalo kehittyy alusta loppuun. Vaiheiden pituudet eivät kuitenkaan ole suhteessa, sillä vaiheiden pituudet vaihtelevat suuresti. Syttymisvaihe voi kestää alle sekunnista useisiin vuorokausiin, lämpiämisvaihe puolestaan muutamasta minuutista puoleen tuntiin. (Inha & Kallioniemi 1999, 21.)

8.2 Standardipalo

Standardipalo on yksi mitoituspalo, joka on erityisesti rakennusaineiden ja rakenteiden paloluokittelua ja testausta varten kehitetty aika-lämpötilakäyrä. Standardipalossa lämpötila nousee koko käyrän ajan, eikä esimerkiksi palokuorman loppumista tai syttymisvaihetta oteta käyrässä huomioon. Standardipalooa käytetään yleispätevyytensä takia usein palomitoituksen perustana taulukkomitoituksessa ja yksinkertaisissa menetelmissä. Pääsääntöisesti myös polttokokeissa käytetään standardipalooa. (Mustajärvi & Inha 1999, 12.)

Standardipalokäyrän esittämisen yhteydessä viitataan edelleen usein standardiin ISO-834-1:1999, joskin eurokoodi-järjestelmää käytettäessä oikeampi viittaus olisi testistandardiin EN 1363-1:2000. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 126.)

Standardipalokäyrän lämpötila määräytyy edellä mainitun standardin mukaan seuraavasti:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

Kaava 2.

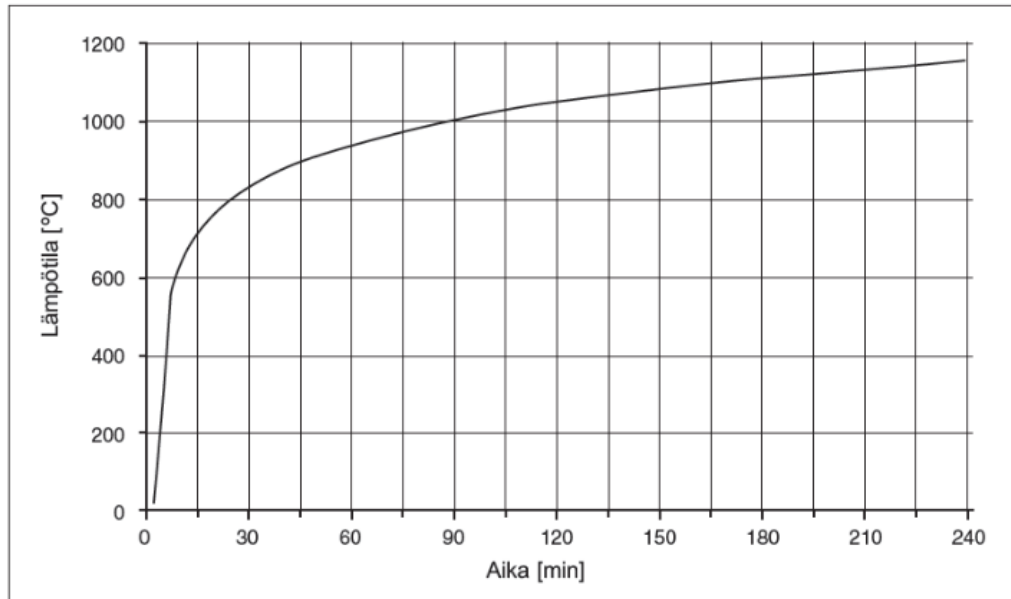
missä:

Θ_g on kaasun lämpötila palotilassa [°C]

20 on alkulämpötila [°C] (normaali huonelämpö)

t on aika [min].

Alla olevassa kuvassa 7 on kuva standardipalokäyrästä.

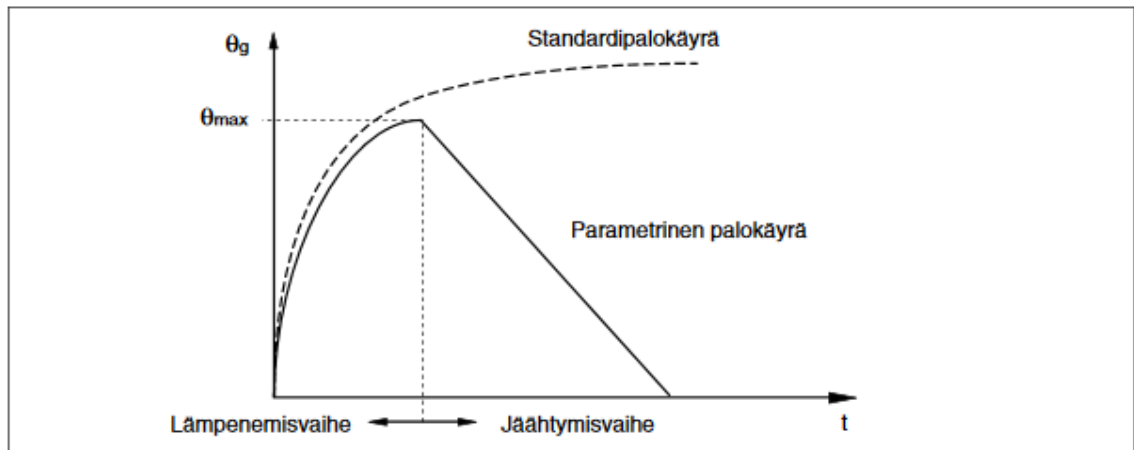


Kuva 7. Standardipalokäyrä (Teräsrakenneyhdistys 2010, 126)

8.3 Parametrinen palo

Palotilan mitoituspaloa voidaan käyttää myös paremmin todelliset palo-olosuhteet huomioon ottavaa parametrissa paloa, joka ottaa huomioon palokuorman, aukkotekijän ja ympäröivien rakenteiden lämmönläpäisyyn liittyvät ominaisuudet. Kun puhutaan yksinkertaisista malleista, tarkoitetaan usein nimenomaan parametrissa paloja. Parametrinen palo tunnetaan nimellä huonepalo. Parametrissa palomalleja voidaan käyttää, jos palotilan lattiapinta-ala on alle 500 m², palotilan katossa ei ole aukkoja, palotilan korkeus on enintään 4 metriä ja tilan palokuorman oletetaan palavan kokonaan.

Kuvassa 8 on testistandardiin EN 1363-1:2000 perustuva standardipalokäyrä, sekä erällä satunnaisilla parametreilla saatu parametrinen palokäyrä. Kuvan ideana on havainnollistaa, että parametriset palot ovat todennukaisempia kuin standardipalo.



Kuva 8. Standardipalokäyrä ja parametrinen palokäyrä (Ruukki 2012, 337)

8.4 Hiilivetyvalo

Hiilivetykäyrää voidaan käyttää esimerkiksi tunnelirakenteiden palomitoituksessa. Euroopassa voidaan myös käyttää korotettuja hiilivetykäyriä, jos tunneli kulkee esimerkiksi joen alitse ja rakenteiden pettäminen johtaisi tunnelin täyttymiseen vedellä. Hiilivetypalossa oletetaan, että palava vaarallinen aine palaa nopeasti ja täydellisesti. (Lautkasti ym. 2003, 18.)

Standardissa SFS-EN 1991-1-2 esitetään nimellisinä lämpötila-aikakäyriä standardipalon käyrä, ulkopuolisen palon käyrä ja hiilivetykäyrä.

Hiilivetykäyrän lämpötila määräytyy seuraavasti:

$$\theta_g = 20 + 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) \quad \text{Kaava 3.}$$

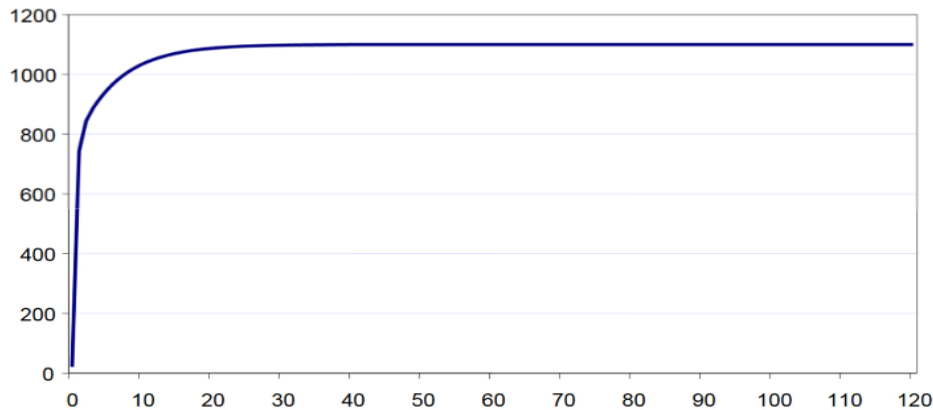
missä:

θ_g on kaasun lämpötila palotilassa [°C]

20 on alkulämpötila [°C] (normaali huonelämpö)

t on aika [min].

Kuvassa 9 on hiilivetykalokäyrä.



Kuva 9. Hiilivety-palokäyrä (Tapaninen 2016, 15.)

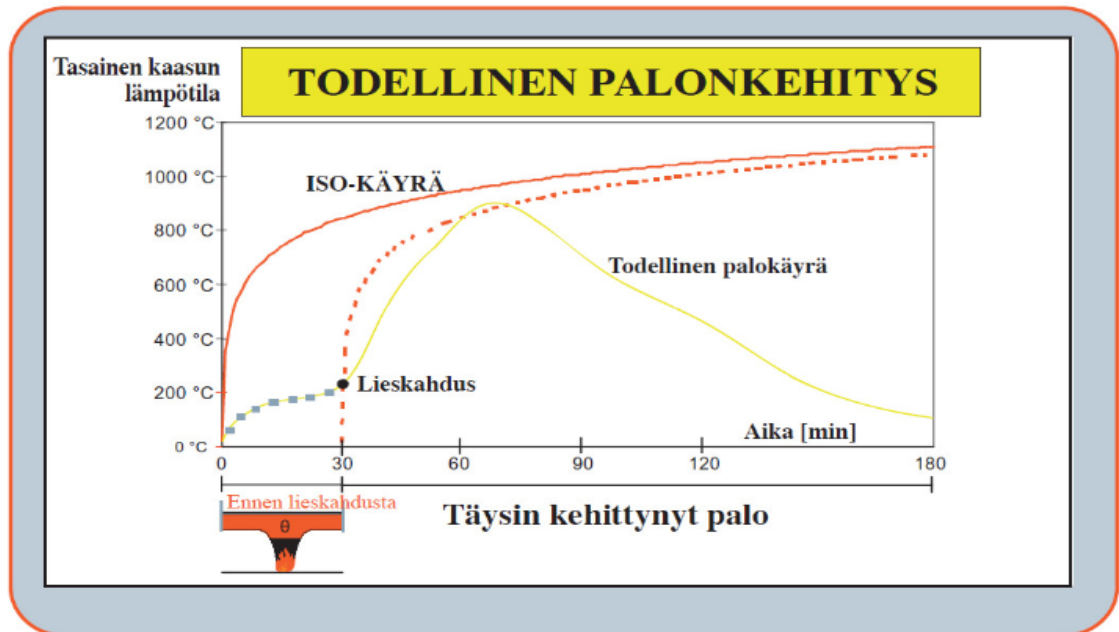
9 Toiminnallinen palomitoitus

Toiminnallinen palomitoitus on nykyaikainen erityisesti massiivisissa teräsrakenteissa käytössä oleva palomitoitusmenetelmä. Toiminnallinen palomitoitus perustuu luonnolliseen paloon, ei standardipaloon. Luonnollinen palokäyrä ottaa standardipalokäyrästä poiketen huomioon tulipalon eri vaiheet. Toiminnallinen palomitoitus ottaa huomioon palotilan geometrian, palokuorman määrän ja sijainnin, palon saaman hapen määrän, aktiiviset ja passiiviset palontorjuntamenetelmät sekä luonnollisen palon eri vaiheet. Muun muassa näiden tietojen pohjalta luodaan käytettävillä palosimulointiohjelmilla todellista palonkehitystä kuvaava malli. Luonnolliset palon eri vaiheet ovat kytemisvaihe, kasvuvaihe, lieskahdus, lieskahduksen jälkeinen vaihe ja hiipumisvaihe. (Teräsrakenneyhdistys 2008, 4-5.)

Toiminnallisen palomitoituksen tavoitteena on määrittää todenmukaisempia arvoja tekijöille, jotka vaikuttavat paloturvallisuuteen ja suunnitella rakennus ottamalla huomioon eri tekijöiden vaikutukset paloturvallisuuteen. Jotta toiminnallista palomitoitusta voidaan käyttää, täytyy suunnittelijan ymmärtää palon aikaiset tapahtumat ja osata ottaa ne huomioon. (Teräsrakenneyhdistys 2008, 5-6.)

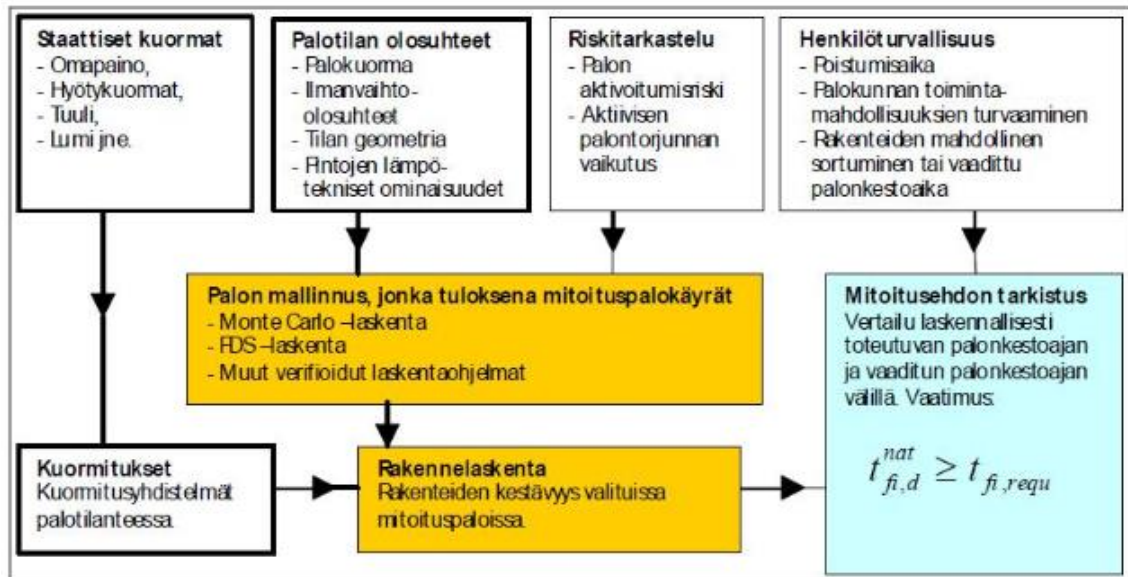
Toiminnallisella palomitoituksella voidaan saavuttaa huomattaviakin säästöjä verrattuna yksinkertaisempiin menetelmiin. Ensisijaisena tavoitteena on kuitenkin varmistua rakennuksessa olevien henkilöiden ja pelastushenkilökunnan turvallisuudesta, ja vasta toissijaisena tavoitteena on pienentää palosta aiheutuvia taloudellisia ja rakenteellisia vahinkoja. (Teräsrakenneyhdistys 2008, 6-8.)

Kuvasta 10 huomataan, että standardipalokäyrässä lämpötila kohoaa aina tarkastelun lopettamiseen saakka. Luonnollinen palokäyrä ottaa standardipalokäyrästä poiketen huomioon tulipalon eri vaiheet. Vertailukuvaajana kuvassa on todellisen tulipalon palokäyrä, jossa mukana on myös lämpötilan jäähtyminen.



KUVA 10. Luonnollisen palon vaiheet ja vertailu standardipalokäyrään (Teräsraakenneyhdistys 2008, 5)

Toiminnallisen palomitoituksen kulku on esitetty kuvassa 11. Mitoituksessa verrataan vaadittua palonkestoaikaa ja laskennallisesti toteutuvaa palonkestoaikaa toisiinsa. Toteutuva palonkesto-aika on oltava pienempi kuin vaadittu palonkesto-aika. Mitoituksessa on otettava huomioon kaikki kuvassa esitetyt tekijät.



Kuva 11. Toiminnallisen palomitoituksen vaiheet (Teräsrakenneyhdistys 2008, 4)

10 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda työn tilaajalle teräksen palomitoitusta koskeva perusluontoinen ohjeistus suunnittelijoiden käyttöön ja perehtyä opiskelijana teräksen palomitoitukseen. Työn lopputuloksena saatiin luotua toimiva perehdytyspaketin omainen suunnitteluohje. Suunnitteluohje on tilaajan omaisuutta, eikä sitä julkaista opinnäytetyön liitteenä. Suunnitteluohjetta on mahdollista tulevaisuudessa työelämän puolella kehittää ja syventää toimivammaksi ja kattavammaksi kokonaisuudeksi.

Suunnitteluohjeessa kerrotaan palosuojamenetelmistä suunnittelijan näkökulmasta. Palosuojamaalauksesta, -levytyksestä ja -ruiskutuksesta kerrotaan huomioitavia asioita muun muassa paloluokkien, käyttökohteiden ja rajoitusten osalta. Ohjeeseen kerättiin myös kattava valikoima esimerkkituotteita kyseisistä palosuojamenetelmistä.

Varsinaista palomitoitusta käsitellään vuokaavioiden avulla teräspalkin ja -pilarin osalta. Ohje kertoo suunnittelijalle mitoituksen etenemisen vaihe vaiheelta sekä mistä eurokoodista mikäkin laskentavaihe löytyy. Ohjeeseen on myös kerätty palomitoituksen kannalta keskeiset laskentakaavat ja taulukot, jolloin suunnittelijan ei tarvitse jokaista yksittäistä tietoa lähteä etsimään eurokoodeista. Laskennan

tueksi on kerätty myös yleisimpien teräsprofiilien profiilinmyötäiset ja levytyksellä toteutuvat F/V-luvut.

Suunnitteluohjeeseen luotiin myös suunnittelijan avuksi pikavalintataulukko, jonka avulla suunnittelijan on mahdollista valita palosuojatuote paloluokan, kriittisen lämpötilan ja teräsprofiilin F/V-luvun perusteella. Pikavalintataulukossa on huomioitu paloluokat R30, R60, R90 ja R120. Taulukossa kriittisiä lämpötiloja on välillä 250 °C - 750 °C, ja F/V-lukuja välillä 0 – 500. Suunnittelija saa taulukon avulla nopeasti käsityksen onko rakenne esimerkiksi mahdollista palosuojata palosuojamaalilla vai täytyykö rakenne palosuojata muilla keinoin. Taulukko perustuu tuotteiden mitoituskäyrästäihin.

Lähteet

Eurofins 2019. Rakennustuotteiden ETA-arviointi. <https://www.eurofins.fi/expert-services/palvelut/sertifiointi-ja-tuotehyvaeksyntae/rakennustuotteet/rakennustuotteiden-eta-arviointi/> Luettu 23.1.2020

Inha, T. & Iso-Mustajärvi, P. 1997. Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus, Tampereen teknillisen korkeakoulun julkaisu 72.

Inha, T. & Mattila, J. 1991. Teräsrakenteiden palosuojauksen suunnittelu, Tampereen teknillisen korkeakoulun raportti 55.

Inha, T. & Kallioniemi, P. 1999. Teräsrakenteiden palosuunnittelu. Helsinki. Teräsrakenneyhdistys

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

Kouhia, J. 2015. Eurocode 3 käsikirja EN 1993-1-2 ja EN 1993-1-9. Helsinki. Teräsrakenneyhdistys.

Lautkaski, R. & Ikonen, K. & Hostikka, S. 2003. Kapselin siirtoajoneuvon palon seuraukset loppusijoitustilassa tai vinoajotunnelissa. http://www.posiva.fi/files/2214/POSIVA-2003-35_Tyoraportti_web.pdf Luettu 22.1.2020

Outinen, J. 2013. Teräsrakenteiden paloturvallisuuden tutkimus ja tuotekehitys. http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/99/73e62b9/jyri_outinen_tk_2013.pdf

Paroc 2019. Palosuojausopas 1/Teräs.

Pelastuslaki 2011/379

Puuinfo. Paloteknisiä ominaisuuksia. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/paloteknisi%C3%A4-ominaisuuksia> Luettu 16.1.2020

RIL 195-1-2018 2018. Rakenteellinen paloturvallisuus. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL Ry.

RIL 201-1-2017 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL Ry.

RT 103131 2019 Rakennuksen paloluokan määrittäminen ja keskeiset palotekniset vaatimukset. Rakennustieto Oy.

Rakenneputket 2012. EN 1993 -käsikirja. Rautaruukki oyj. https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf Luettu 22.1.2020

Salminen, E. 2019. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutus teräsrakenteiden palomitoitukseen. Rakenteiden Mekaniikka. <https://rakenteidenmekaniikka.journal.fi/article/view/74512>

SFS-EN 1993-1-2 2005. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu: Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Sitowise Oy. <https://sitowise.com/fi/sitowise/yritys>. Luettu 16.1.2020

Suomen Standardisoimisliitto SFS 2019 https://www.sfs.fi/files/309/Eurokoodi_2019_web.pdf Luettu 16.1.2020

Suomen Standardisoimisliitto SFS https://www.sfs.fi/aihealueet/rakentaminen/teras-ja_alumiinikokoonpanojen_ce-merkinta Luettu 16.1.2020

Tapaninen, A. 2016. Teräsrakenteen lämpötilan kehitys standardi- ja hiilivety-palotilanteessa. Opinnäytetyö. Ammattikorkeakoulututkinto.

Teräsrakenteiden palotekninen mitoitus, 1978. Helsinki. Teräsrakeneyhdistys ry.

Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2010, Eurokoodi 3 -oppikirja. Helsinki. Teräsrakeneyhdistys ry.

Teräsrakenteiden toiminnallinen palomitoitus, 2008. Teräsrakeneyhdistys ry.

Tremco Illbruck 2020. Tuote-esittelyt. https://www.nullifire.com/fi_FI/menetelmaet/palosuojamaalit/teraeksen-palosuojaus/ Luettu 16.1.2020

Ympäristöministeriö 2019a. https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma. Luettu 16.1.2020

Ympäristöministeriö 2019b. https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Rakennustuotteiden_tuotehyvaksynta/CEmerkinta Luettu 16.1.2020

Ympäristöministeriö 2017. [https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uusi_asetus_rakennusten_paloturvallisuud\(45212\)_Luettu](https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uusi_asetus_rakennusten_paloturvallisuud(45212)_Luettu) 16.1.2020