



Aki Pakarinen

Teräksen passiivinen palosuojaus teollisuudessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

30.3.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Aki Pakarinen
Otsikko:	Teräksen passiivinen palosuojaus teollisuudessa
Sivumäärä:	82 sivua + 0 liitettä
Aika:	30.3.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaajat:	Section Manager Juho Salolatva, DI Project Engineer Jolanta Bączkiewicz, TkT Lehtori Joni Pirhonen, DI

Insinööritöön tarkoituksena oli selvittää, mitkä passiiviset palosuojamenetelmät soveltuvat teolliseen ympäristöön. Tavoitteena oli luoda kooste, joka sisältää tietoa lämmönsiirtymisestä, paloteknisestä suunnittelusta, teräksen palomitoituksesta, teollisuuden onnettomuusriskeistä ja passiivisista palosuojamenetelmistä. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Tämän lisäksi työssä laadittiin passiivisesti palosuojatun teräsprofiilin lämmönousemista hiilivetypalossa.

Insinööritöössä havaittiin, että suurimman paloriskin teollisuudessa aiheuttavat hiilivetyperusteiset aineet. Teolliseen ympäristöön soveltuvia palosuojamenetelmiä on useita ja riskit vaihtelevat paljon, joten oikean menetelmän valinta vaatii kohdekohtaista perehtymistä. Tutkimuksen tärkeimpänä tuloksena todettiin, että parhaita palosuojamenetelmiä teollisuuteen ovat paksukalvoiset paisuvat pinnoitteet, teräsbetoni liittorakenteet, valmisosat, sekä keraamiset ja endotermiset peitot. Valmistuotteet tulisi olla testattu tarvittaessa UL 1709 ja ISO 22899-1 mukaisesti hiilivety- ja suihkupaloja vastaan. Teollisiin ympäristöolosuhteisiin tarkoitettua palosuojamateriaalia tulisi kuulua UL 2431 mukaiseen luokkaan I-A, jos luokitus on saatavilla.

Tämä työ auttaa ymmärtämään passiivisen palosuojauksen periaatteita. Työn sisältää tietoa, joka helpottaa tunnistamaan, mitkä passiiviset palosuojamenetelmät kannattaa valita teolliseen ympäristöön. Työn tilaajana toimi AFRY Finland Oy.

Avainsanat: Passiivinen palosuojaus, teräs, teollisuus, palomitoitus.

Abstract

Author:	Aki Pakarinen
Title:	Passive Fire Protection of Steel in Industry
Number of Pages:	82 pages + 0 appendices
Date:	30 March 2023
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Civil Engineering
Professional Major:	Structural Engineering
Supervisors:	Section Manager Juho Salolatva, M.Sc. Project Engineer Jolanta Bączkiewicz, D.Tech. Senior Lecturer Joni Pirhonen, M.Sc.

The purpose of the final year project was to chart which passive fire protection methods are suitable for industry. The aim was to write about heat transfer, fire design of steel, accident risks in industry and passive fire protection methods. The study method was a literature review. In addition, the study calculated the heat rise of the passively fire-protected steel profile in a hydrocarbon fire.

In the graduate study, it was found that the most significant fire risk in industry is caused by hydrocarbons. Industrial environments are different, and the risks vary, which impacts the choice of the right method. The main result of study is that the best fire protection methods for the industry are thick film intumescent coatings, reinforced concrete composite structures, finished products, as well as ceramic and endothermic blankets. Finished products should be tested against hydrocarbon and jet fires in UL 1709 and ISO 22899-1. Fire protection materials used in industry environment should belong to the class I-A according to UL 2431.

This study helps to understand the principles of passive fire protection and contains information that enables identifying which passive fire protection methods are functional for the industrial environment. The study was commissioned by AFRY Finland Oy.

Keywords: Passive fire protection, steel, industry, fire design.

Sisällys

Lyhenteet

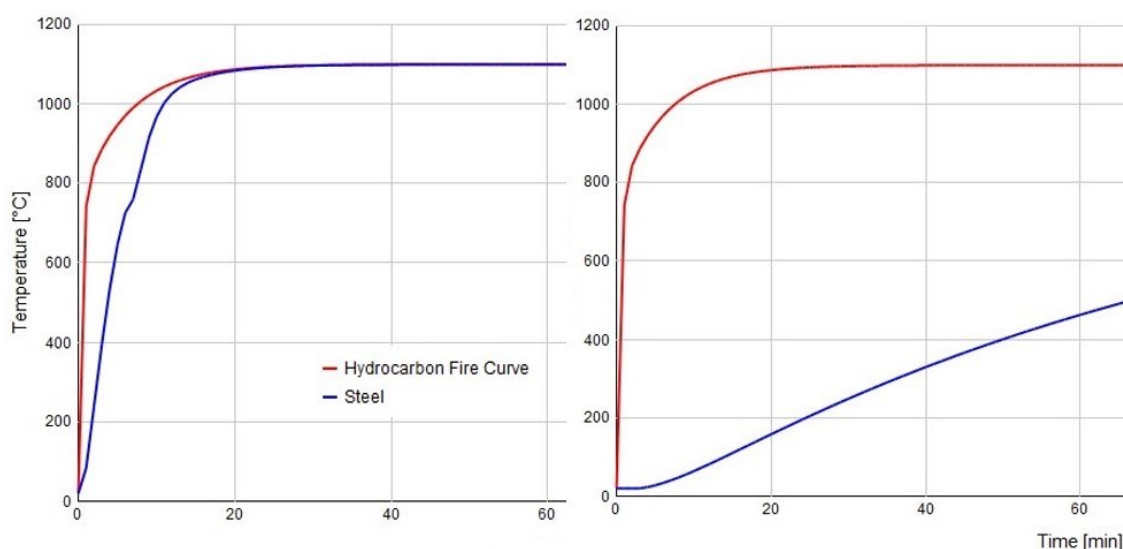
1	Johdanto	1
2	Lämmönsiirtyminen	4
3	Teräsrakenteiden palomitoitus	8
3.1	Teräksen palomitoituksen kulku	10
3.2	Kriittinen lämpötila	13
3.3	Lämmön vaikutus teräksen ominaisuuksiin	14
3.4	Teräsprofiilin kuumeneminen tulipalossa	18
3.5	Palotilan lämpötila	22
4	Teollisuuden erityispiirteet palonsuojauksen kannalta	26
4.1	Tulipalot teollisuudessa	29
4.2	Onnettomuuksia aiheuttavat aineet	35
4.3	Palosuojattavat kohteet teollisuudessa	39
5	Passiiviset palosuojausmenetelmät	44
5.1	Paisuvat pinnoitteet	48
5.2	Ruiskutteet	53
5.3	Rappaus	54
5.4	Levyt	55
5.5	Vesi	57
5.6	Betoni ja tiili	59
5.7	Puu	61
5.8	Keraamiset ja endotermiset peitot	63
5.9	Valmiselementit ja -osat	65
6	Palosuojatun teräsprofiilin lämpötilan laskenta	67
7	Teollisuuteen sopivat palosuojausmenetelmät	71
8	Yhteenveto	74
9	Lähdeluettelo	77

Lyhenteet

CE	CE-merkintä tarkoittaa sitä, että tuote täyttää EU:n säädökset ja se on tarkastettu vaadituilla menetelmillä.
DoP	Suoritustasoilmoitus. Asiakirja, jossa kerrotaan tuotteen perusominaisuuksista, jotka pohjautuvat yhdenmukaistetun standardin piiriin Euroopassa.
EN	Eurooppalaiseksi vahvistettu standardi.
ETA	Eurooppalainen tekninen arviointi. Tulee tehdä tuotteelle, ennen kuin CE- merkintää voi hakea.
ISO	Maailmanlaajuisesti vahvistettu standardi.
SFS	Suomessa vahvistettu standardi.
UL	UL Solutions -yhtiö, jonka standardeja voidaan käyttää mm. palosuojamateriaalien ominaisuuksien arviointiin.

1 Johdanto

Onnettomuustilanteiden seurauksia pyritään rajoittamaan henkilöturvallisuuden ja vahinkojen minimoimisen takia. Teräsrakenteita palosuojataan, koska lämpö vaikuttaa nopeasti teräksen ominaisuuksiin, mikä saattaa aiheuttaa esimerkiksi rakenteen kantokyvyn menetyksen. Palosuojauksen tarkoitus on estää teräsrakenteen lämmön nousu siten, että se kestää riittävän ajan tulipalossa. Kuva 1 esittää teräsprofiilin lämpenemistä hiilivetypalossa ilman palosuojausta ja passiivisen palosuojauksen kanssa, kun profiili on altistettu palolle neljältä sivulta.



Kuva 1. IPE 300 teräsprofiilin lämpeneminen hiilivetypalossa. Vasemmalla ilman palosuojausta ja oikealla koteloituna 30 mm kipsilevyllä. [1]

Palosuojausmenetelmät jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin. Aktiivinen palosuojaus tarkoittaa, mitä tahansa suojausmenetelmää, jossa automatiikka tai ihminen tekee jotain. Passiivisia menetelmiä ei tarvitse erikseen aloittaa, vaan ne ovat kohteessa olemassa olevia rakenteita tai pysyviä teknisiä ratkaisuja. Teollisuudessa käytetään paljon teräsrakenteita, jotka on suojattava tulipalolta. Standardissa *"SFS 3353:2019 Palavien kemikaalien tuotantolaitos"* nimetään passiivinen palosuojaus ensisijaiseksi menetelmäksi rakenteita suojatessa. Passiivinen palosuojaus noudattaa myös luontaisen turvallisuuden periaatteita, joita ovat

mm. yksinkertaistaminen, sekä seurausten rajoittaminen ja vaimentaminen. Passiivinen ja aktiivinen palosuojaus eivät kuitenkaan korvaa toisiaan. [2]

Tässä Insinööriyössä on tarkoitus selvittää, mitkä passiiviset palonsuojamenetelmät soveltuvat teollisuuskohteisiin, joissa riskinä on pääasiassa hiilivetypalo. Passiivisia palonsuojamenetelmiä on useita, mutta suurin osa niistä on suunniteltu kestämaan standardisoitu selluloosapalo. Standardisoitu selluloosapalo-käyrä mallintaa tyypillistä huonepaloa, ja ei sellaisenaan ole usein soveltuva teollisuuden rakenteiden suunnitteluun.

Työssä selvitetään myös teollisuuskohteiden erityispiirteitä palosuojauksen kannalta. Lisäksi selvitetään, miten palosuojausmenetelmät vaikuttavat rakenteen lämmönnousuun ja miten palosuojaukseen liittyviä asioita voidaan mitoittaa. Tavoitteena on luoda kooste, joka sisältää perustiedot teräksen passiivisesta palosuojauksesta teollisuudessa, mikä auttaa valitsemaan oikeat menetelmät rakenteita suunniteltaessa. Työhön sisältyy katsaus lämmönsiirtymiseen, palotekniiseen suunnitteluun, teräksen palomitoitukseen, teollisuuden riskeihin ja passiivisiin palosuojausmenetelmiin.

Työn tilaajana toimii AFRY Finland Oy:n yksikkö Process Industries Global Project Services. Tämän selvitystyön tarkoitus on toimia suunnittelun tukena, kun valitaan eri palonsuojamenetelmiä. Työ auttaa myös perehtymään erikoisosamista vaativiin aiheisiin, kuten teollisuuden paloturvallisuuteen ja riskeihin. Selvitystöitä passiivisesta palosuojauksesta teollisuudessa on vähän, jonka takia aiheen kirjallisuustutkimukselle on tarvetta.

Insinööriyö toteutetaan niin, että teräksen passiiviset palonsuojausmenetelmät käydään läpi ja tunnistetaan niistä soveltuvimmat keinot teollisuuteen. Tämä edellyttää teollisuuden riskien ja passiivisen palosuojauksen kokonaisuuden tuntemusta. Tarkastelun kohteena on pääasiassa kiinteällä maalla sijaitsevat teollisuuslaitokset. Työn lähtökohta on hiilivetypaloilta suojautuminen, vaikka teollisuudessa voi olla muitakin paloskenaarioita. Muiden kuin teräsrakenteiden palosuojaus rajataan työn ulkopuolelle. Myös taulukkomitoitus, taloudellinen näkökulma ja aktiivinen palonsuojaus rajataan pois. Tässä työssä ei keskitytä

palosuojausten asennustyöhön ja sen vaatimuksiin. Työssä ei mennä syvälle passiivisen palosuojausten toimintaperiaatteisiin, vaan keskitytään eri menetelmien soveltuvuuteen teolliseen ympäristöön.

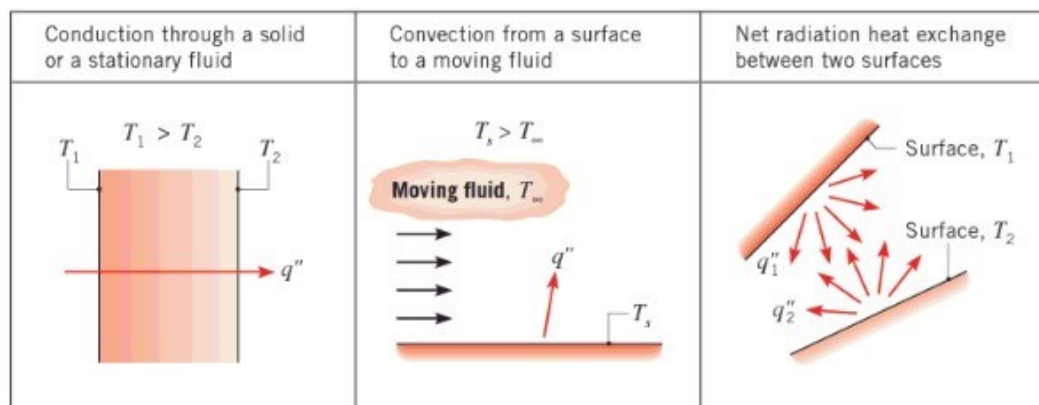
Tässä insinöörityössä käsitellään onnettomuustilanteiden palosuojausta, joten kuumien prosessien käsittely rajataan pois. Kuumissa prosesseissa lämpötila on usein jatkuvaa, eikä niitä käsitellä onnettomuustilanteina. Palomitoituksen vaatimukset eivät siis välttämättä koske näitä tilanteita. Erittäin kuumat prosessit sisältävät joka tapauksessa riskejä, jotka tulee huomioida palosuojausten suunnittelussa, koska tällaisten prosessien alas ajaminen tai torjuminen voi olla erittäin vaikeaa onnettomuustilanteissa. [3]

Insinöörityön tutkimusmenetelmä on laadullinen, eli työssä pyritään ymmärtämään aihetta. Tämä toteutetaan kirjallisuuden, tutkimuksien, Eurokoodin, standardien ja valmistajien tietoa hyödyntäen. Työn menetelmä on siis tiedon koostaminen selkeäksi kokonaisuudeksi aihealueesta. Määrällistä tutkimusmenetelmää käytetään, kun lasketaan yleisimpien palosuojamateriaalien vaikutusta teräksen lämmön nousuun hiilivetypalossa. Asiat pyritään esittämään niin, että teollisen kohteen teräsrakenteiden passiiviseen palosuojaukseen perehtyminen, menetelmien valinta ja suunnittelu helpottuu. Työssä ei kehitetä uusia palosuojausmenetelmiä. Näkökulma työhön on palotekninen rakennesuunnittelu, Suomalaisen suunnittelutavan mukaan.

2 Lämmönsiirtyminen

Passiivisen palosuojauksen pääasiallinen tarkoitus on estää lämmön siirtyminen rakenteeseen. Lämpö aiheutuu atomien ja molekyylien värähtelystä. Lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan termodynamiikan lakien mukaisesti, jolloin lämpöä siirtyy. Lämpöä voi siirtyä kolmella eri tavalla. [4, p. 40.] Kuvassa 2 on havainnollistettu eri lämmönsiirtymismuotoja.

Lämpövirta kertoo sen, kuinka nopeasti lämpöenergia siirtyy jonkun pinnan läpi ja sen yksikkö on W. Lämpövirran tiheys kertoo, kuinka paljon lämpövirtaa siirtyy pinta-alaa kohden ja sen yksikkö on W/m^2 . Ainekerroksen lämmönsiirtymiskerroin eli lämmönjohtavuus on $W/(m^2K)$. U-arvo eli lämmönläpäisykerroin on sama kuin lämmönsiirtymiskerroin, sen avulla voidaan vertailla eri materiaalien lämmöneristävyyttä. [4, p. 50.] Lämmönsiirtymiskertoimen käänteinen yksikkö $(m^2K)/W$ tarkoittaa lämmönvastusta, joka kertoo lämpötilaeron ja läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen [5].



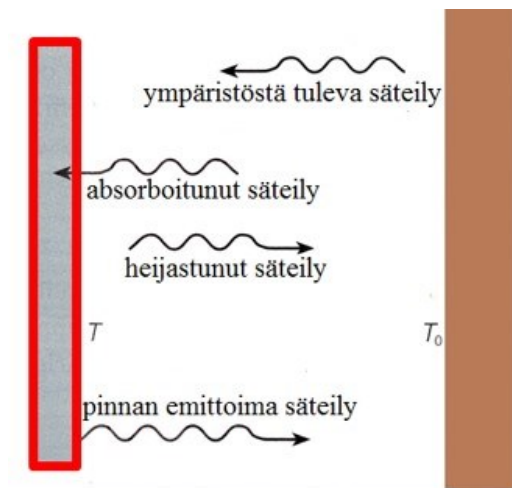
Kuva 2. Kolme lämmönsiirtymismuotoa [6, p. 2].

Konduktio eli johtuminen tarkoittaa sitä, että lämpö pyrkii tasoittumaan molekyylien välillä väliaineen avulla. Väliaine voi olla kiinteää ainetta tai nestettä. Virtaussuunta on lämpimästä kylmään päin. [4, p. 40.] Ainekerroksen läpäisemä lämpövirta lasketaan kaavalla 1 [5].

$$\Phi = \lambda A \frac{\Theta_{12}}{d} \quad (1)$$

, missä Φ on lämpövirta,
 λ on aineen lämmönjohtavuus (W/mK),
 A on kerroksen pinta-ala,
 Θ_{12} on pintojen lämpötilaero,
 d on kerroksen paksuus.

Emissio eli säteily tarkoittaa sitä, että lämpö siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen avulla, eli väliaineelle ei ole tarvetta. Jokainen kappale lähettää ja vastaanottaa säteilyä absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Säteilyn aallonpituus vaikuttaa sen läpäisytehoon ja säteily voi myös heijastua pintaan törmätessä pois päin. Tätä ilmiötä käytetään hyväksi esimerkiksi kasvihuoneilmiössä, jossa lasi läpäisee auringon lyhytaaltoisen säteilyn, mutta ei päästä läpi lämpimien sisäpintojen lähettämää pitkäaaltoista säteilyä [5]. Kuva 3 esittää, miten pinta vastaanottaa ja lähettää säteilyä.



Kuva 3. Säteily pintojen välillä [5].

Pinnoille voidaan laskea emissiviteetti, joka kertoo pinnan säteilytehon suhteen mustaan pintaan, eli sellaiseen, joka absorboi kaiken säteilyn [4, pp. 40, 41]. Emissiivisyyskerroin 1 annetaan mustalle pinnalle ja 0 sellaiselle pinnalle, joka heijastaa pois kaiken tulevan säteilyn. Eri pintojen emissiivisyyskertoimia on esitetty kirjallisuudessa. Säteilyn lämpövirta pintojen välillä lasketaan kaavalla 2. [5]

$$\Phi = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

, missä Φ on lämpövirta,
 ε on säteilevän pinnan emissiivisyys,
 σ on Stefanin ja Boltzmannin vakio $5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$,
 T on lähettävän pinnan absoluuttinen pintalämpötila,
 T_0 on vastaanottavan pinnan absoluuttinen pintalämpötila.

Konvektio eli virtaus tarkoittaa sitä, että lämpö siirtyy virtauksien mukana kaasussa tai nesteessä. Lämpötilaerojen tiheysero voi jo itsessään saada aikaan liikkeen. Latentti eli piilevä lämpö tarkoittaa sitä, että kun aine muuttaa olomuotoaan lämpöä siirtyy, mutta lämpötila ei muutu. [4, p. 41.] Lämpövirta virtaavasta aineesta pois lasketaan kaavalla 3 [5].

$$\Phi = c q_m \Theta_{12} \quad (3)$$

, missä Φ on lämpövirta,
 c on aineen ominaislämpökapasiteetti,
 q_m on aineen massavirta,
 Θ_{12} on tulevan ja poistuvan aineen lämpötilaero.

Lämpö siirtyy rakenteissa yleensä johtumalla ja säteilemällä. Lämmönsiirtymisen lasketaan kertomalla pinnan lämmönsiirtymiskerroin ja ympäristöjen välinen lämpötilaero keskenään. Pinnan lämmönvastus on pinnan lämmönsiirtymiskertoimen käänteisluku. Rakennustekniikassa käytetään määräyksissä annettuja pintojen lämmönsiirtymiskertoimia, joista on esimerkki kuvassa 4. Lämmönsiirtymiskertoimeen vaikuttaa se mihin suuntaan lämpö siirtyy ja minkälaiset olosuhteet tilassa vallitsevat. [5]

$R / \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{W}}$	Lämpö siirtyy vaakasuoraan	Lämpö siirtyy ylöspäin	Lämpö siirtyy alaspäin
sisäpinta	0,13	0,10	0,17
ulkopinta	0,04	0,04	0,04

Kuva 4. Pintojen lämmönsiirtymiskertoimia [5].

Lämpökapasiteetti tarkoittaa kappaleen kykyä sitoa ja varastoida lämpöä. Aineen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti vaikuttaa kappaleen tilavuuteen suhteutettuun lämpökapasiteettiin. Tilavuuslämpökapasiteetti lasketaan kaavalla 4. [4, p. 58.]

$$\frac{c}{v} = \rho c \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \right) \quad (4)$$

, missä c on ominaislämpökapasiteetti kJ/(kg*K),
 v on aineen tilavuus kg/m³,
 ρ on aineen tiheys.

Aineeseen varastoituva energia lasketaan kaavalla 5 [4, p. 58].

$$Q = mc\Delta T \quad (5)$$

, missä Q on aineeseen varastoituva energia,
 m on aineen massa,
 ΔT on lämpötilan muutos.

Lämpötilan vaihtelu aiheuttaa materiaalissa laajenemista ja kutistumista. Lämpötila vaikuttaa myös materiaalin kosteuspitoisuuteen. Jos lämpötilaa nostetaan alkaa esim. puun kosteuspitoisuus laskea, joka lisää kutistumista lämmön aiheuttaman muutoksen lisäksi. Rakenneteräksen lämpölaajenemiskerroin on 0,008–0,010 mm/mK. [4, p. 59.]

3 Teräsrakenteiden palomitoitus

Paloteknisessä suunnittelussa noudatetaan säädettyjä lakeja ja asetuksia. Tämän lisäksi suunnittelussa tulee huomioida voimassa olevat standardit ja alueen viranomaisien ohjeistukset, jotka voivat ohjata suunnittelua yksityiskohtaisesti. Näiden lisäksi huomioidaan alan organisaatioiden ja tuotevalmistajien ohjeet. [7, p. 17.]

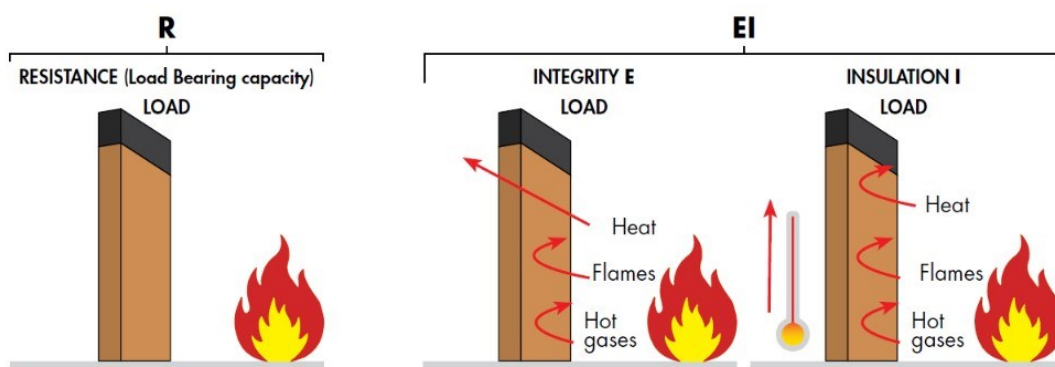
Rakennukset pyritään suunnittelemaan paloturvallisiksi, jotta onnettomuuden sattuessa ihmiset pääsisivät turvaan ja vahingot rajoittuisivat mahdollisimman pieneksi. Näillä toimilla varmistetaan myös pelastushenkilöstön turvallisuus. Olennaisia asioita rakenteellisessa paloturvallisuudessa on rakenteiden kantavuuden säilyminen onnettomuustilanteissa, palon leviämisen rajoittaminen, palon kehittymisen rajoittaminen, poistumisturvallisuus ja toimintojen järjestely onnettomuustilanteessa. Yleisesti ottaen rakennukset mitoitetaan oletettuihin riskeihin perustuen. [8]. Paloturvallisuuteen vaikuttaa mm. ihmisten määrä, palokuorma, käytötapa, rakennuksen korkeus, kerrosala, eri tilojen pinta-alat ja kerrosluku [9, p. 3].

Suomessa rakennukset jaetaan paloluokkiin P0, P1, P2 ja P3. Kun taulukkomitoituksesta poiketaan, käytetään paloluokkaa P0. Tällöin standardisoitu sellulosaapalokäyrä ei yleensä ole käytössä, ja palotilannetta täytyy simuloida tarkemmin. Rakenteen tulee yleensä kestää koko simuloitu palo- ja jäähtymisvaihe. Tämä eroaa taulukkomitoituksesta, jossa riittää yleensä se, että rakenne kestää sille määrätyn ajan. P0 paloluokan etuna on kuitenkin se, että rakenteet voidaan joissain tapauksissa mitoittaa hitaammalle lämmön nousulle ja aktiivinen palo suojaus pystytään ottamaan huomioon tehokkaammin. P0 luokan käytölle on esitetty taulukoituja perusteita, joita tulee noudattaa. Vähäiset poikkeamat vaatimuksista muissa luokissa ei aina vaadi P0 luokkaan siirtymistä, mikäli se voidaan perustella toiminnan luonteella. [4]

Suomessa tuotanto- ja varastorakennukset jaetaan palovaarallisuusluokkiin, jotka huomioivat mahdollisen korkean paloriskin tilat tai räjähdysvaaran. [10, pp. 9, 10.] Palovaarallisuusluokassa 1 ei ole suurta palovaaraa, mikä merkitsee mm.

sitä, että käsiteltävien tai varastoitavien nesteiden leimahduspiste on yli 55 °C, tai aineiden tiedetään olevan matalan paloriskin omaavia. Palovaarallisuusluokassa 2 toiminnot sisältävät huomattavan palo- tai räjähdysvaaran. Jos laitoksessa käsiteltävillä aineilla on mahdollisuus räjähdykseen veden, kitkan, ilman tai tärähdyksen seurauksena, luokitellaan tila palovaarallisuusluokkaan 2. Luokitukseen vaikuttaa myös herkästi syttyvien materiaalien tai aineiden käsittely, mukaan lukien nopeasti lämpöä luovuttavat raaka-aineet. [10, p. 10.]

Suomessa rakennuksen eri osat luokitellaan rakennuksen lisäksi. Merkintä R tarkoittaa kantavuutta, E tiiveyttä, I eristävyttä ja M iskunkestävyyttä. Kirjaimen perään lisätään palonkesto-aika, joita voi olla 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 ja 240. Rakennusosalle merkitään kirjain ja aika, joka kertoo siitä, miten kauan tulipalossa kyseinen ominaisuus kestää. Kuvassa 5 on havainnollistettu näitä ominaisuuksia. Myös rakennusmateriaaleja luokitellaan sen mukaan, kuinka ne käyttäytyvät palotilanteessa. [11]



Kuva 5. REI-luokitus [12].

Kun rakennuksen paloturvallisuuden taso on selvillä, tehdään rakenteille palomitoitus rakennesuunnittelun yhteydessä. Tavoitteena on, että rakenteet kestävät tarvittavan määrän onnettomuustilanteessa. Maankäyttö- ja rakennuslaki toteaa, että rakenteen sortuminen ei saa aiheuttaa vaaraa tulipalossa, määrättyä aikana. Jos turvallisuus sitä edellyttää, tai sortumisesta aiheutuvat vahingot ovat riittävän suuret, voidaan vaatia, että rakenne kestää koko tulipalon ja sen jäähdytysvaiheen. [13] Rakenteita voidaan mitoittaa taulukoita käyttäen, rakennuksen paloluokituksen mukaan, tai oletettuun palonkehitykseen perustuen [8].

3.1 Teräksen palomitoituksen kulku

Teräsrakenteiden mitoitus voidaan suorittaa taulukkomitoituksena, yksinkertaisena laskentana tai käyttämällä kehittyneitä menetelmiä. Teräsrakenteen palomitoitus voidaan jakaa kolmeen eri tehtävätyyppiin. Ensimmäinen tyyppi on kestävyuden laskeminen, kun rakenteen kuumenemislämpötila tiedetään. Toinen tyyppi on kriittisen lämpötilan laskenta, kun rakenteen kestävyys on selvillä, jolloin selvitetään, miten paljon rakenne saa kuumentua. Kolmantena tyyppinä on sortumisajankohdan määrittäminen standardipalossa. [14]

Ensimmäisen tyypin tehtävässä määritellään aluksi kuormitukset. Palotilanne käsitellään eurokoodissa onnettomuutena, mikä tarkoittaa erilaisia kuormaker toimia verrattuna tavanomaiseen rakenteiden suunnitteluun. Seuraavaksi tehdään rakenneanalyysi, joka sisältää statiikan ratkaisun ja lasketaan yhdelle rakenneosalle koituvat rasitukset palotilanteen kuormilla. Käytettävän teräsprofiilin, paloskenaarion ja palosuojauksen valinnan jälkeen selvitetään sauvan kuumeneminen, josta saadaan teräksen suunnittelulämpötila. Tämän jälkeen lasketaan materiaalin kestävyys tuossa lämpötilassa. Kuormituksen tulee olla pienempi kuin kestävyys. [14]

Toisen tyypin tehtävä on yleisin ja siinä lähdetään siitä, että sauvan tulee kestää tietty kuormitus palotilanteessa. Tämän jälkeen etsitään kuumen lämpötila minkä rakenne kestä. Tuo lämpötila on yhtä kuin kriittinen lämpötila. Jos rakenne kuumenee valitussa paloskenariossa enemmän kuin kriittinen lämpötila, täytyy valita tehokkaampi palosuojaus tai muuttaa rakennetta. Tässä tyypissä, voidaan merkitä piirustuksiin vain kriittinen lämpötila, jolloin palosuojauksen valinta on joustavampaa. Kriittisen lämpötilan laskennassa on eroa, lasketaanko kestävyyttä vain lujuuden mukaan, vai lujuuden ja jäykkyyden mukaan. [14]

Kolmannessa mitoitus tyypissä vertaillaan kestävyysaikoja. Siinä selvitetään samalla tavalla, kuten toisessa tyypissä kriittinen lämpötila, mutta sen jälkeen katsotaan, että rakenne alittaa sille asetetun palonkestoajan standardipalossa. Sillä ei kuitenkaan juuri saavuteta lisäarvoa edellisiin menetelmiin, ja sitä voi käyttää vain standardipalotilanteessa. [14]

Kun taulukkoarvoista poiketaan, on kyseessä paloluokka P0, jolloin turvaudutaan toiminnalliseen palomitoitukseen. Toiminnallinen mitoitus kulkee niin, että ensin selvitetään, missä kohdin taulukkoarvoista poiketaan. Seuraavaksi perehdytään minkälaisia riskejä ja uhkia kohteeseen sisältyy, jonka jälkeen valitaan mitoituspalo. Riskit suhteutetaan todennäköisyyteen ja seurausten vakavuuteen, jonka apuna voidaan käyttää pelastustoimen tilastoja tai vakuutusyhtiöiden suosituksia. Mitoituspalot voi olla pistemäisiä tai pinta-alan mukaan asettuja. Mitoituspalossa merkitsee lämpöenergia ja lämmönluovutusnopeus. Mitoituspaloa voi rajoittaa palavan aineen määrä tai happi. Palotilanteen simulointeja voidaan tehdä useilla eri parametreilla, jonka jälkeen valitaan lopulliset tulokset. Tämän jälkeen voidaan määrittää tarvittavat rakenteet. Jos toiminnallisesta mitoituksesta halutaan paras mahdollinen hyöty, tulisi se aloittaa jo ennen rakennusluvan hakemista. [14]

Kantokykylaskelmat teräkselle palotilanteessa tehdään Eurokoodin EN1993-1-2 mukaan [15, p. 125]. Oleellisin muutos teräksen palomitoituksessa verrattuna normaaliin mitoittamiseen, on teräksen lujuusominaisuuksien pienentäminen lämpötilan mukaan. Palotilanteessa nurjahduksen mitoittamiseen käytetään vain yhtä nurjahduskaavaa kullekin teräslajille, eli epätarkkuudesta johtuvia eri nurjahdustapauksia ei käytetä. [14]

Palomitoitustarkastelu voidaan suorittaa yksittäiselle rakenneosalle, rakenteen osalle tai koko rakenteelle. Yksittäinen rakenneosa voidaan laskea käsin, kun se on staattisesti määrätty, eikä lämpölaajenemista huomioida. Yksittäisen rakenneosan tarkastelu riittää yleensä standardipalotilanteessa. Rakenteen osan tarkastelussa huomioidaan voimien uudelleenjakautuminen, varsinkin jos ne ovat jakautuneet jäykkyyksien suhteessa. Koko rakenteen tarkasteluun käytetään kehittyneitä laskentamenetelmiä, eli siihen tarkoitukseen suunniteltuja laskentaohjelmia. [14]

Rakenteelle tulevat kuormat palossa mitoitetaan onnettomuustilanteena, jolloin tavanomaisia kuormitusyhdistelmiä ei käytetä. Palotilanteen kestävyystarkastelussa kuormat ovat yleensä noin 60 % murtorajatilan staattisista mitoituskuormista. Mikäli rakenne on erityisen kriittinen, voidaan käyttää jopa 80 % suhdetta

[15, p. 119.]. Palotilanteen kuormien laskenta on esitetty Eurokoodeissa SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1991-1-1. Rakenteen kuormien laskentaan palotilanteessa on olemassa myös yksinkertaistettu menetelmä, jossa pienennetään normaali-lämpötilan voimasuureita, joita käytetään esim. murtorajatilan laskennassa. [16, p. 352.] Yksinkertainen menetelmä ei kuitenkaan tuo merkittävää lisäetua ja voi aiheuttaa virheitä [14].

Palokuorma tarkoittaa palotilassa palavaa materiaalia ja sen luovuttamaa lämpöenergiaa, kun se palaa kokonaan [17, p. 22]. Palokuorman laskennassa huomioidaan riskit, palontorjuntatoimenpiteet ja palokuorman tiheys. Palokuormien laskenta on esitetty Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-2. [17, p. 78.] Standardi EN ISO 1302:2015 on tehty kiinteille offshore-rakennuksille sekä kelluville rakenteille, joissa on tuotantoa, varastointia tai purkaustoimintaa. Siinä mainitaan, että räjähdyskuormat tulee huomioida suunnittelussa muiden palokuormien lisäksi, jos riski siihen on olemassa. [18, p. 14.]

Muuttuvien palokuormien osalta voidaan sallia ylitys, joka kestää korkeintaan 20 % käyttöiästä. Palosuojattuja palokuormia ei tarvitse huomioida. Esimerkiksi teollisuuden palosuojattujen säiliöiden sisältämää nestettä, ei ole pakko lisätä palokuormaan. Jos palosuojamattoman säiliön ei oleteta vahingoittuvan tulipalossa, voidaan sen palokuormalle käyttää erilaisia pienentäviä yhdistelykertoimia. Myös palokuorman kosteuspitoisuus on mahdollista ottaa huomioon. Materiaalien nettolämpöarvot voidaan laskea EN ISO 1716 mukaisesti, mutta arvoja on myös taulukoitu. Bensiinin ja dieselöljyn nettolämpöarvo on esimerkiksi 45 MJ/kg. [17, pp. 80-84.]

3.2 Kriittinen lämpötila

Kriittiselle lämpötilalle ei ole annettu eurokoodissa kunnollista selitystä ja etenkin teollisuudessa termiä saatetaan käyttää eri yhteyksissä. Kriittinen lämpötila tarkoittaa rakennesuunnittelussa sitä pistettä, missä rakenne ei kestä enää siihen kohdistettuja kuormia. Kriittisen lämpötilan pistettä tarkasteltaessa rakennetta kuormittaa korkein mahdollinen kuormitusyhdistelmä, kestävyys kanalta pahimmassa mitoitustarkastelussa. Kun teräsrakenne saavuttaa kriittisen lämpötilan, koko poikkileikkaus plastisoituu lämmön vaikutuksesta, eli siihen syntyy plastinen nivel, jonka kiertymät voivat kasvaa äärettömyyteen. Kriittisessä lämpötilassa poikkileikkaus ei siis kykene vastaanottamaan lisää voimaa. [14]

Kun siirtymätilaehtoja ja stabiiliutta ei huomioida, lasketaan EN 1993-1-2 kohdan 1.1.2 mukaisen hiiliteräksen kriittinen lämpötila tiettyinä ajanhetkenä kaavalla 6. Kaavan käyttö edellyttää sitä, että sauvan lämpötilan jakauma on tasainen, jolloin voidaan käyttää kaikkia hyväksikäyttöasteen arvoja, mikä vastaa ajan hetkeä 0. Hyväksikäyttöasteen laskenta on esitetty eurokoodissa ja sille on annettu myös raja-arvoja. [19, p. 34.]

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (6)$$

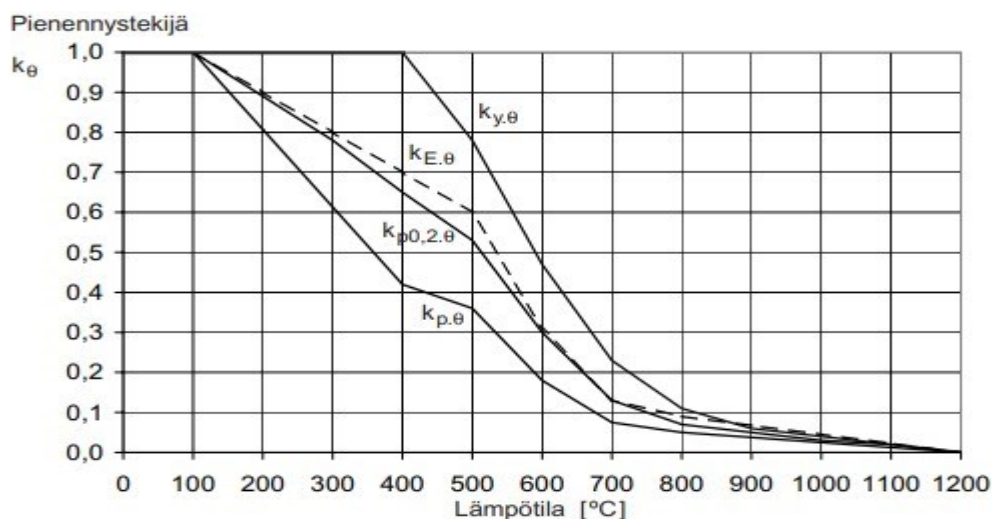
, missä $\theta_{a,cr}$ on kriittinen lämpötila,
 μ_0 on hyväksikäyttöaste.

Lähes kaikki pilarit ja palkit pystyvät yleensä nurjahtamaan tai kiepahtamaan, jolloin stabiiliteetti tulee huomioida ja kaava 6 ei voi käyttää. Kaava soveltuu rakenteisiin, joissa vain pelkällä lujuudella on merkitystä. Kaavaa 6 voidaan siis käyttää käytännössä vain vedetyille sauvalle. Jos stabiilius ja siirtymäehdot huomioidaan, lasketaan teräksen kriittinen lämpötila iteroiden, eli arvataan suunnittelulämpötila. Tämän jälkeen valitaan materiaali, josta päästään sauvan kestävyys, jota taas verrataan rakenteen kuormitukseen. [14]

Kriittinen lämpötila esim. nurjahduksessa löydetään niin, että ensin lasketaan normaalilämpötilassa nurjahduskuorma ja muunnettu hoikkuus, jonka jälkeen arvataan suunnittelulämpötila. Tämän jälkeen lasketaan nurjahduksen arvot ja nurjahduskestävyys suunnittelulämpötilassa. Kun löydetään lämpötila, jossa sauva on lähellä nurjahdusta, niin on löydetty kriittinen lämpötila. Käytännön suunnittelutyössä kriittinen lämpötila on yleensä 400–600 °C. Kun kriittinen lämpötila on alle 400 °C, saattavat rakenteet olla ylimitoitettuja. Liitoksien ja hitsien kestävyys kannalta yli 600 °C kriittinen lämpötila ei usein ole järkevä, vaikka teräsosa sen muuten kestäisi. [14]

3.3 Lämmön vaikutus teräksen ominaisuuksiin

Teräs johtaa erittäin hyvin lämpöä, joten sen sisäosat lämpenevät erittäin nopeasti. Lämpötila vaikuttaa lähes kaikkiin teräksen ominaisuuksiin. Lämpötilan vaikutus teräkseen täytyy huomioida, koska kimmokerroin, suhteellisuusraja ja lujuus muuttuvat lämpötilan seurauksena. Kun teräs kuumenee yli 100°C sen jäykkyys ja suhteellisuusraja alkaa alentua. Kun lämpötila nousee yli 400°C, alkaa myös teräksen lujuus pienentyä. Kuvassa 6 esitetty näiden ominaisuuksien pienennyskertoimet lämpötilan funktiona. [16, p. 343.]



Kuva 6. Hiiliteräksen ominaisuuksien pienennystekijät lämpötilan funktiona [16, p. 343].

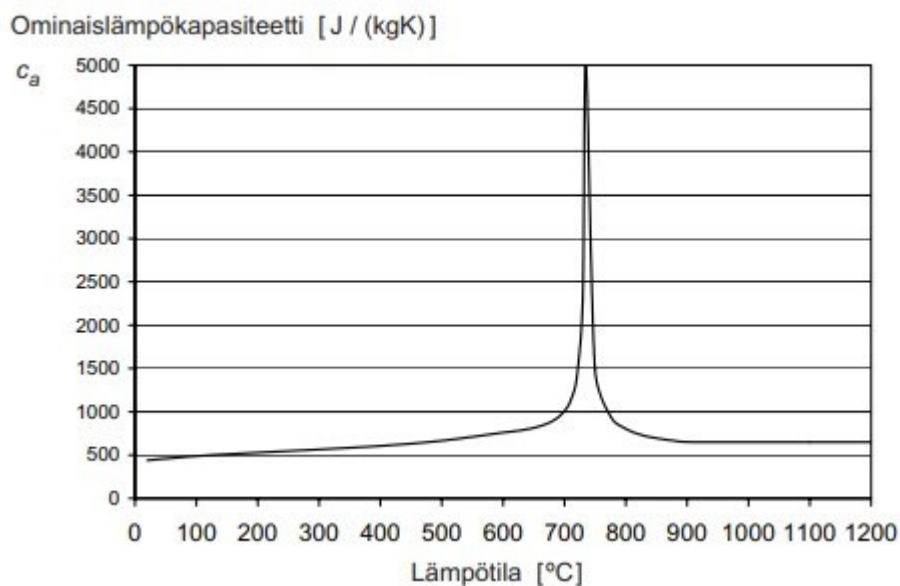
Kimmokertoimen pienennystekijä on kuvassa $k_{E,\theta}$ ja myötörajan $k_{y,\theta}$. Suhteellisuusrajan pienennyskerroin poikkileikkausluokassa 1–3 on $k_{p,\theta}$ ja $k_{p0,2,\theta}$ poikkileikkausluokassa 4. Pienennystekijän arvoja löytyy valmiiksi taulukoituna, kuten kuva 7 esittää. [14] Palotilanteen suurimpana myötörajana käytetään 2 % myötövenymää [20, p. 127].

Teräksen lämpötila θ_a	Pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin			
	Tehollisen myötölujuuden pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y)		Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon E_a) $k_{E,\theta} = E_{y,\theta} / E_a$
		PL-luokat 1-3 $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	PL-luokka 4 $k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta} / f_y$	
20 °C	1,000	1,000	1,00	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,00	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,89	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,78	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,65	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,53	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,30	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,13	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,07	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,05	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,03	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,02	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,00	0,0000

Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarista interpolointia käyttäen.

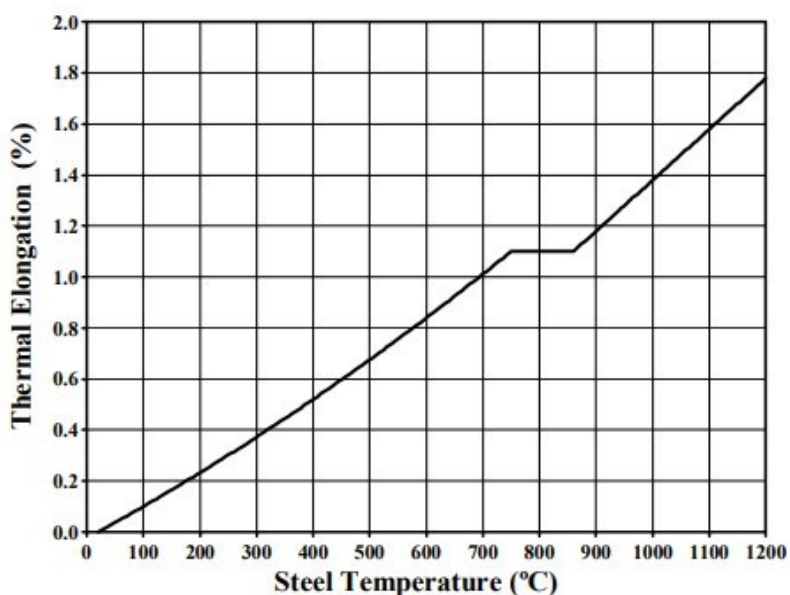
Kuva 7. Hiiliteräksen ominaisuuksien pienennyskerroimia lämpötilan mukaan [16, p. 343].

Teräksen lämpökapasiteetti kuvaa materiaalin kykyä vastaanottaa lämpöenergiaa ja se vaihtelee lämpötilan mukaan. Noin 735 °C lämpötilassa teräksessä tapahtuu metallurgisia faasimuutoksia atomitasolla, jotka kuluttavat hetkellisesti teräksen vastaanottaman lämpöenergian. Tämä vaikuttaa niin, että tulipalotilanteessa teräksen lämpeneminen hidastuu hetkellisesti. Kuvassa 8 on esitetty teräksen ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona. [14]



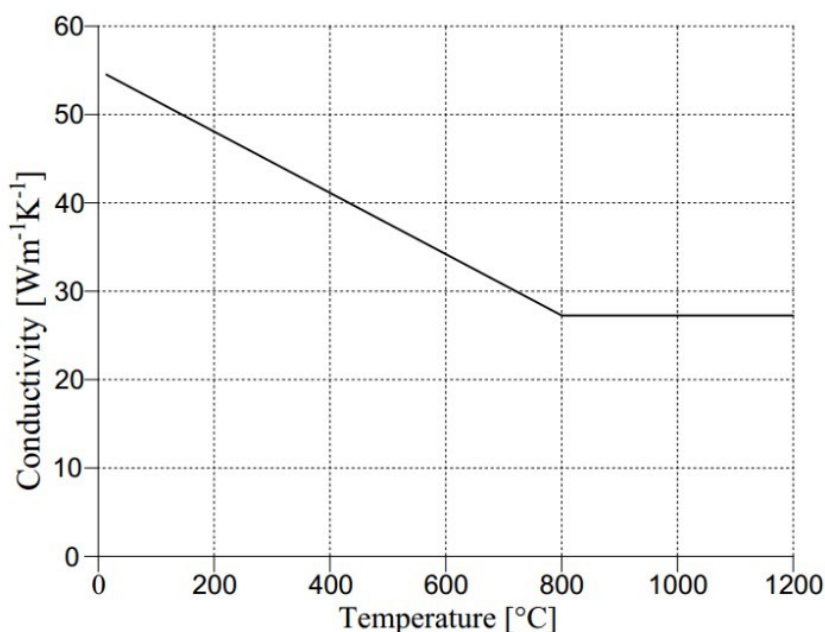
Kuva 8. Hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona [16, p. 346].

Lämpötilan vaihtelu aiheuttaa teräkselle myös lämpölaajenemista ja kutistumista. Kuva 9 esittää lämpöpitenemisen lämpötilan funktiona. Hiiliteräksen lämpöpitenemiselle on kolme eri kaavaa välillä 20°C - 750°C, 750°C - 860°C ja 860°C - 1200°C. Lämpölaajeneminen aiheuttaa poikkileikkaukselle ja koko rakenteelle lisäjännityksiä. [19, p. 23].



Kuva 9. Hiiliteräksen lämpölaajeneminen lämpötilan funktiona [21, p. 141].

Lämpötilalla on myös vaikutusta teräksen lämmönjohtavuuteen. Kuva 10 esittää hiiliteräksen lämmönjohtavuuden lämpötilan funktiona. Hiiliteräksen lämmönjohtavuudelle on esitetty kaksi eri kaavaa välillä $20^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ ja $800^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$. [19, p. 25].



Kuva 10. Hiiliteräksen lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona [22, p. 25].

Teräs on lähes aina palosuojattava, koska lämpötila vaikuttaa merkittävästi teräksen ominaisuuksiin. Ominaisuuksiin vaikuttavat myös teräksen laatu, poikkeileikkausluokka ja olosuhteet. Teräksen tiheyden ajatellaan palomitoituksessa olevan muuttumaton. [19, p. 21]. Viruma tarkoittaa pitkän ajan kuluessa tapahtuvaa muodonmuutosta materiaalin väsymisen takia. Teräksen viruma kasvaa merkittävästi lämpötilan vaikutuksesta. Mikäli käytetään standardissa EN 1993-1-2 esitettyjä jännitys-venymäyhteyksiä, ei virumaa tarvitse eksplisiittisesti ottaa huomioon kehittyneissäkään laskentamenetelmissä [19, p. 40].

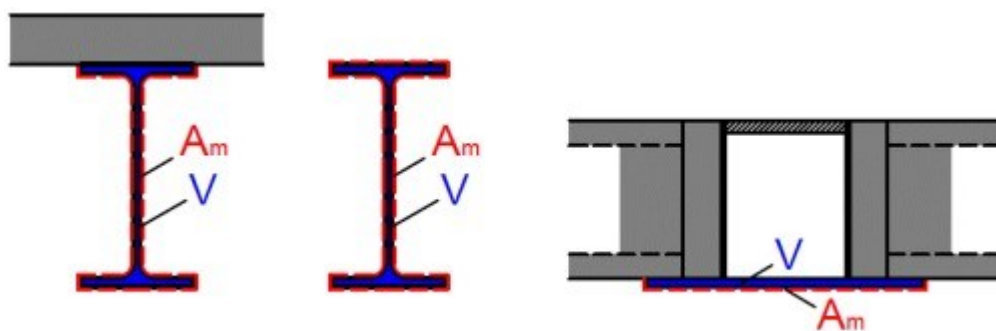
3.4 Teräsprofiilin kuumeneminen tulipalossa

Suojaamattoman teräsprofiilin lämpötila ajan funktiona voidaan laskea palotilan lämpötilasta jakamalla aikaväli askeleisiin, jossa suurin on enintään 5 sekuntia. Lämpötilan nousu kullakin askeleella lasketaan kaavalla 7. [19, p. 35.] Netto-
lämpövuon kaavassa tarkoittaa rakenteen kussakin tilanteessa absorboimaa energiaa, aikaa ja pinta-alaa kohden. Nettolämpövuon avulla tarkastellaan lämpö-
pörsitusten vaikutusta rakenteessa. Sen laskennassa huomioidaan eri lämpö-
siirtymismuodot, ympäristön vaikutus ja materiaalin ominaisuudet. Netto-
lämpövuon laskenta on esitetty standardissa EN 1991-1-2. [17]

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net} \Delta t \quad (7)$$

, missä k_{sh} on varjovaikutuksen korjaustekijä,
 A_m on sauvan palolle altis pinta-ala pituutta kohti,
 V on sauvan tilavuus pituutta kohti,
 c_a on teräksen ominaislämpökapasiteetti,
 ρ_a on teräksen tiheys.
 h_{net} on nettolämpövuon pinta-alaa kohti,
 Δt on aikaväli.

Kaavasta huomataan, että pinta-alan lisääminen nopeuttaa teräksen kuumenemista, kun taas massan lisäys hidastaa sitä. Pinta-ala lasketaan sen mukaan mikä osa profiilista altistuu tulipalolle. Kun altistunut pinta-ala jaetaan pituusyksikköä kohden, tulee suureesta palolle alttiin poikkileikkauksen piiri. Tilavuus määritellään sauvan poikki-pinta-alasta. Kuvassa 11 on näytetty A_m/V arvon määrittäminen. Käytännössä palolle altistuminen jakautuu yleensä kolmeen tapaukseen, joita ovat neljästä suunnasta altistus, kolmesta suunnasta altistus ja yhdestä suunnasta altistus. [14]



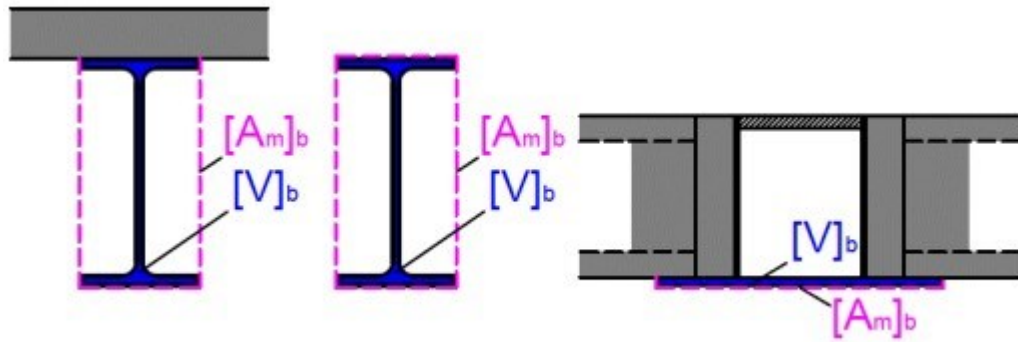
Kuva 11. Teräksen palolle alttiin pinta-alan ja tilavuuden määrittäminen [14].

Säteilylämpö on yleensä suurin tekijä profiilin lämpenemisessä. Koverissa profiileissa poikkileikkauksen muoto suojaa joitain kohtia, jolloin säteilylämpö ei vaikuta samalla tavalla jokaisessa kohdassa. Tätä ilmiötä kutsutaan varjovaikutukseksi ja se otetaan laskennassa huomioon. Varjovaikutuksen laskenta on esitetty standardissa EN 1993-1-2. [14] Kuvassa 12 on esitetty varjovaikutuksen periaate.



Kuva 12. Teräspoikkileikkauksen varjovaikutus [23, p. 4].

Varjostusvaikutusta laskettaessa, profiilin ympärille kuvitellaan kotelo, jonka piirin suhdetta verrataan oikean profiilin piiriin suhteeseen. Kuva 13 havainnollistaa, mitä kuvitteellinen kotelo tarkoittaa. Suhdeluvuksi tulee automaattisesti yksi, mikäli varjovaikutusta ei poikkileikkauksella ole. [14]



Kuva 13. Teräksen varjovaikutuksen huomioon ottaminen kuvitteellisella kotelolla [14].

Sisätiloissa olevan, normaalisti palosuojatun teräksen lämpötilan nousu lasketaan samoilla periaatteilla kuin palosuojaamattoman, mutta huomioon otetaan lisäksi palosuojamateriaalin ominaisuudet, jotka tulee tarkastaa materiaalikohdistaisesti. Aikavälin jako saa olla palosuojatussa rakenteessa enintään 30 sekuntia. Palosuojatun teräosan kuumeneminen lasketaan kaavalla 8. Kaavan apusuure ϕ ottaa huomioon palosuojamateriaalin ominaisuudet suhteessa suojattavan teräksen massa. Jos teräksen massa on paljon suurempi, lähestyy ϕ arvoa 0. [14]

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\frac{\phi}{10}} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (8)$$

, mutta $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$, jos $\Delta\theta_{g,t} > 0$

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

, missä λ_p on palosuojauksen lämmönjohtavuus,
 A_p on palosuojatun pinnan pinta-ala pituutta kohti,
 V on sauvan tilavuus pituutta kohti,
 c_a on teräksen ominaislämpökapasiteetti,
 c_p on palosuojauksen ominaislämpökapasiteetti,
 d_p on palosuojamateriaalin paksuus,
 $\theta_{a,t}$ on teräksen lämpötila ajan hetkenä,
 $\theta_{g,t}$ on palotilan lämpötila ajan hetkenä,

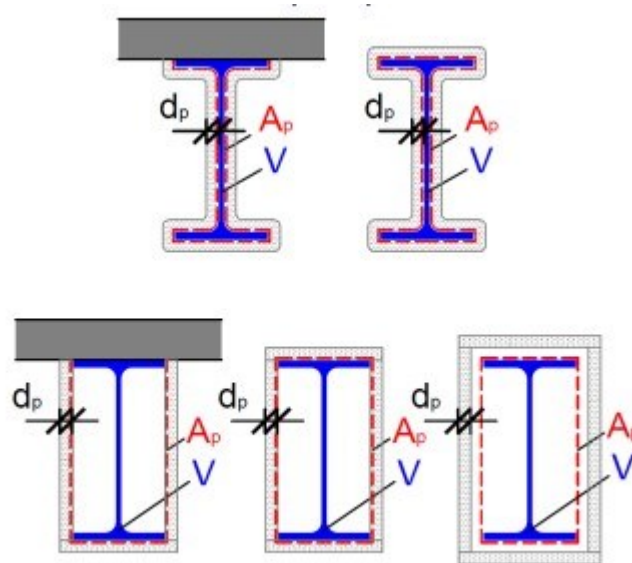
Δt on aikaväli

$\Delta\theta_{g,t}$ on tilan lämmön nousu Δt aikana,

ρ_a on teräksen tiheys,

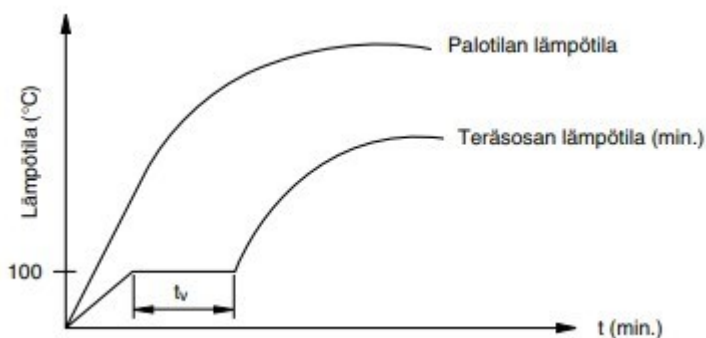
ρ_p on palosuojamateriaalin tiheys.

A_p/V arvon laskenta palosuojatulla rakenteella eroaa hieman suojaamattoman teräksen vastaavan arvon laskennasta. Kuvassa 14 on esitetty palosuojatun poikkileikkauksen A_p/V arvon laskenta. Poikkileikkauksen piiri lasketaan aina teräksen nurkkapistettä myötäillen, eikä poikkileikkauksesta irrallaan oleva palosuojausmateriaali vaikuta tähän. [14]



Kuva 14. Palosuojatun teräksen palolle alttiin pinta-alan ja tilavuuden määrittäminen [14].

Joidenkin palosuojausmateriaalien toiminta perustuu niiden sisältämään kosteuteen. Esimerkiksi kipsilevyn toiminta palosuojauksessa perustuu lähes kokonaan sen sisältämään kideveteen. Kun materiaali on lämmennyt 100°C alkaa kidevesi höyrystyä, jonka vaikutuksesta lämpötila ei pääse nousemaan isommaksi, ennen kuin koko kosteus on poistunut materiaalista. [14] Kosteuden ja sen kulkeutuminen voidaan kuitenkin jättää huomiotta, jolloin mitoitus on varmallalla puolella [19, p. 40]. Kuva 15 näyttää kuinka palosuojausmateriaalin kosteus vaikuttaa teräksen lämpenemiseen [16, p. 347].



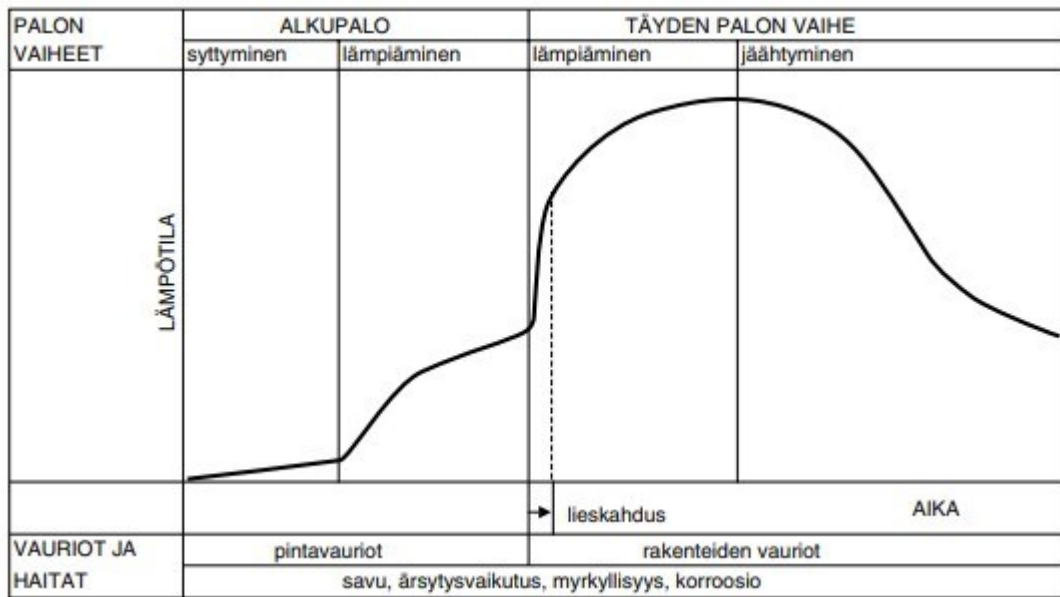
Kuva 15. Palosuojamateriaalin kosteuden vaikutus lämmönkehitykseen [16, p. 347].

Palosuojamaalien ominaisuudet, kuten paksuus ja suojauskyky muuttuvat kuumetessa hyvin paljon, joten niitä ei voida laskea kaavalla 8. Palosuojamaalatun profiilin kuumeneminen lasketaan valmistajien ilmoittamilla arvoilla, mitkä perustuvat polttokokeisiin. Palosuojamaalien kuumenemisarvot löytyvät ETA-dokumentista. Palosuojamaalien palomitoitus on järkevintä tehdä niin, että kriittinen lämpötila on määritetty etukäteen. [14]

Liitoksien lämpötiloja arvioidessa käytetään A/V arvona osan muodostamaa poikkileikkaustekijää. Lämpötila voidaan laskennassa arvioida tasan jakautuneeksi. Viereisten rakenteiden arvoja voidaan hyödyntää liitoksien lämpötilaa laskettaessa. [16, p. 347.]

3.5 Palotilan lämpötila

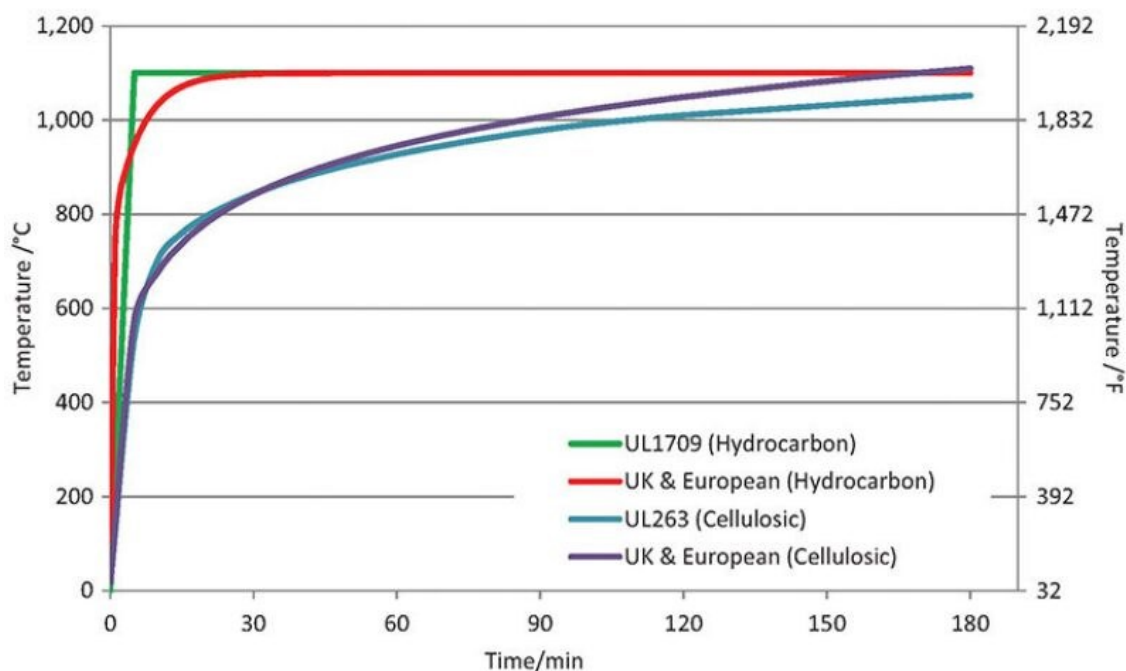
Tulipalon kehitykseen vaikuttaa monet eri tekijät ja sen vaiheet voi vaihdella paljon. Etenkin teollisuudessa, jossa palossa voi olla mukana eri aineita, voi palon kehitys näyttää aivan erilaiselta. Kuva 16 esittää, miten tavallinen tulipalo kehittyy vapaana. Palotilan ja rakenteiden lämpötilan laskennassa voidaan käyttää apuna erilaisia palomitoitusohjelmia riippuen siitä, kuinka tarkasti palotilannetta halutaan mallintaa. [16, p. 340.]



Kuva 16. Vapaana kehittyvän palon vaiheet ja lämpötila [16, p. 340].

Yksinkertaista palomitoitusta varten on kehitetty standardoituja palokäyriä, jotka kuvaavat palotilan lämpötilaa ajan funktiona. Standardipalokäyräksi kutsuttu selluloosapalokäyrä on tunnetuin, ja se kuvaa tulipaloa lieskahduksen jälkeen huoneistopaloon verrattavissa olosuhteissa. On hyvä huomata, että myös muut standardoidut palokäyrät ovat standardipalokäyriä. Lieskahdus tarkoittaa pistettä, jossa palava materiaali syttyy palamaan itsestään lämpötilan takia palotilassa. Selluloosapalokäyrä on muodostettu tekemällä polttokoe asuinhuoneiston muotoa ja kokoa mallintavan tilan sisällä. Selluloosapalokäyrä on esitetty kuvassa 17.

Hiilivetypalokäyrä kuvaa hiilivetyjen palamista. Hiilivetypalon lämmönkehitys eroaa selluloosapalosta huomattavasti nopeammalla lämmönnousulla. Hiilivetypalossa palotilan lämpötila on 5 minuutin jälkeen 1100°C , mutta asettuu vakioiksi viimeistään 20 minuutin kohdalla. Selluloosapalokäyrä taas jatkaa kasvua loivasti äärettömyyteen. Kuvassa 17 on esitetty myös Euroopan ulkopuolisten standardien vastaavat palokäyrät. [2, pp. 9, 10.]



Kuva 17. Hiilivety- ja selluloosapalon palokäyrät [24].

Tämän lisäksi SFS-EN 1363-2 esittää muitakin käyriä, kuten ulkoisen palon käyrän ja hitaan lämpenemisen käyrän. Kummassakin käyrässä lämpötila jää pienemmäksi, tai kehittyy standardisoitua selluloosapalokäyrää hitaammin. [25, p. 14.] Suurin osa teollisuuden kohteista suunnitellaan käyttäen hiilivety-palokäyrää, joka saadaan kaavalla 9 [2, p. 42].

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (9)$$

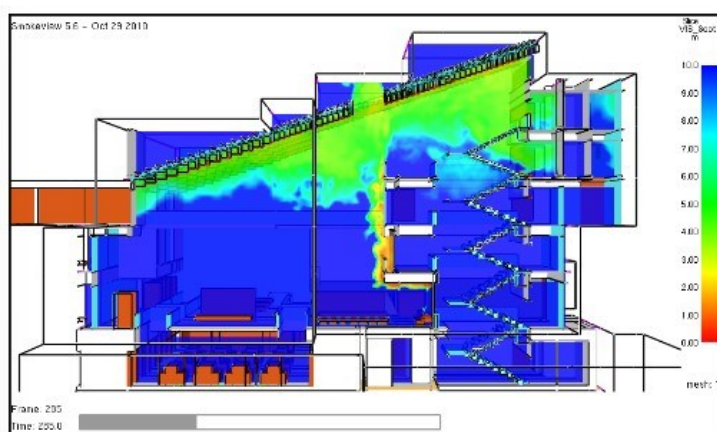
, missä θ_g on palotilan kaasun lämpötila,
 t on aika.

Todellisessa palossa tietyn ajan jälkeen palotila alkaa jäähtymään. Palotilan jäähtyminen voidaan huomioida parametrisella palokäyrällä, tai kohdekohtaisella tulipalon simuloinnilla. Parametrinen palokäyrä huomio palokuorman, rakenteen aukot ja ominaisuudet. Parametrinen palomallin käyttöön on asetettu tiettyjä ehtoja tilan ominaisuuksille ja koolle. [16, p. 341.]

Toiminnallisessa palomitoituksessa voidaan laskea paikallisten palojen vaikutusta. EN 1991-1-2 liite C esittää palopatsasmallin, joka toimii pistemäisenä

lämmittimenä palotilassa. Palopatsasmallissa oletetaan savukaasujen poistuvan tilasta, jolloin lieskahdusta ei tapahdu. Suljetuissa tiloissa, joissa palokaasut eivät poistu, joudutaan käyttämään monimutkaisempaa laskentaa, jossa huomioidaan suljetun tilan vaikutus, kuumien savukaasujen aiheuttama kuuma vyöhyke ja alaosan viileä vyöhyke. [14]

Virtauslaskentaan perustuva palomitoitus on raskain mitoitustapa, mutta se kuvaa parhaiten palon todellista kehitystä. Palotilanteen virtauslaskennassa käytetään kehittyneitä laskentaohjelmia [14]. Ohjelmat laskevat virtausdynamiikan mallein palotilannetta numeerisesti. Niillä voidaan laskea useita tapahtumia, kuten ulkopuolisia paloja, vaarallisia aineita ja monimutkaisia geometrioita. Kuvassa 18 on Fire Dynamics Simulator (FDS) ohjelman Smokeview lisäosa, jolla voi tarkastella savukaasujen leviämistä rakennuksessa.



Kuva 18. Virtauslaskentaohjelman FDS lisäosa Smokeview [26].

Käyttämällä kehittyneitä laskentamalleja, voidaan joitain rakenteita jättää kokonaan palosuojaamatta. Tämä on mahdollista esimerkiksi, jos lieskahdusta ei pääse tapahtumaan, tai todelliset lämpötilat jäävät matalaksi. Jokaisen laskentatavan tarkoituksena on loppujen lopuksi saada rakennetta kuumentavan kaasun lämpötila ajan funktiona, jolloin päästään laskemaan rakenteen kestävyyttä. [14]

4 Teollisuuden erityispiirteet palonsuojauksen kannalta

Teollisuus ja tuotantolaitokset ovat erikoistoimintaympäristöjä, joissa riskit saatavat vaihdella merkittävästi käytön mukaan. Monet teräksen palonsuojaukseen liittyvät asiat ovat kuitenkin yleispäteviä ympäristöstä huolimatta. Tärkeimpiä asioita paloteknisessä suunnittelussa on se, että kantavien rakenteiden tulee kestää asetettu vähimmäisaika. Tulipalon ja savukaasujen leviämistä tulee rajoittaa rakennuksen sisällä sekä toisiin rakennuksiin. Ihmisten täytyy pystyä onnettomuuden sattuessa poistumaan tai heidät täytyy pystyä pelastamaan. [2, p. 51.]

Standardeissa on pyritty huomioimaan moniulotteiset toimintaympäristöt. Standardi SFS 3353:2019 käsittelee esimerkiksi sellaisten tuotantolaitoksien suunnittelua, joissa tuotetaan palavia kemikaaleja. Kyseinen standardi pyrkii ehkäisemään sekä minimoimaan onnettomuuksia teknisillä ratkaisuilla. Standardeissa on selkeästi kerrottu, mihin sitä sovelletaan ja niissä on viitattu muihin velvoittaviin standardeihin, säädöksiin, tai julkaisuihin, jotka tulee huomioida kussakin kohteessa. [2, pp. 6-8.]

Yleensä tuotantolaitokset suunnitellaan oletettuun palonkehitykseen perustuen, eli taulukkomitoitus ei ole käytössä. Tällöin kohteen paloluokka on P0. Mitoitus ei kuitenkaan saa olla heikompia kuin taulukoita käyttäen. Tämän lisäksi määritellään kohteelle palovaarallisuusluokka. Palovaarallisuusluokka vaikuttaa siihen, miten kohde tulee suojata. Palovaarallisuusluokka voi vaihdella rakennuksen eri osissa. Mitoituksessa käytetään yleensä hiilivetypalokäyrää, ellei perusteita muuhun ole. Palokuormat ja paloskenaario lasketaan tarvittaessa tapauskohtaisesti. Kun edellä olevat asiat ovat selvillä, tehdään arvio palotyyppistä ja sen kestosta. Palotyyppejä ovat esim. lammikko- ja suihkupalo. Tuotantolaitoksen palo-osastoinnissa tulee huomioida prosessien dominovaikutus onnettomuustilanteissa. [2, pp. 51, 52.]

Rakenteiden ja laitteistojen sijoittelussa huomioidaan onnettomuuksien vaikutukset. Vaaraetäisyydet riippuvat lämpösäteilystä, jonka palo voi aiheuttaa. Myös räjähdysten painevaikutukset ja heitteet huomioidaan. Lämpösäteilyä

voidaan rajoittaa teknisillä ratkaisuilla, kuten passiivisella palonsuojauksella. Taulukossa 1 on esitetty pitkäaikaisen lämpösäteilyn intensiteetin vaikutuksia. [2, pp. 17, 18, 23.]

Taulukko 1. Pitkäaikaisen lämpösäteilyn intensiteetin seurauksia [2, p. 23].

kW/m²	Seuraus
1,5	Pitkäaikainen oleskelu mahdollista
3	Pelastustoiminta mahdollista
5	Pelastusreittien mitoitussarvo
8	Palavan nesteen varastosäiliö voi syttyä suojaamattomana
12	Kasvillisuus voi syttyä
14	Normaali rakennus voivat syttyä
25	Ikkunaton erityisrakennus voi syttyä
38	Prosessilaitte voi vaurioitua

Passiivisen palonsuojauksen kannalta on oleellista, että kantavan rakenteen tulee kestää sortumatta määrätty aika, tai vahinkojen suuruuden ja henkilöiden turvallisuuden vaatiessa, koko mitoitettu tulipalo. Käytettävät rakennusmateriaalit eivät saa lisätä palon kehittymistä vaarallisesti. Kemiaallinen kestävyys on myös huomioitava. Tarvittaessa muodostetaan reaktiomatriisi kemikaalien ja rakennusmateriaalien toiminnasta, jolla havaitaan ei toivottuja yhdistelmiä. [2, pp. 52, 53.] Mikäli erityisiä vaatimuksia jonkin asian osalta ei teollisen kohteen suunnittelussa ole, käytetään yleisiä periaatteita.

Palosuojausta tarvittaessa suojataan kohde passiivisesti tai soveltuvalla vesivälilujärjestelmällä. Passiivista palonsuojausta käytetään ensisijaisesti. Passiivisella palonsuojauksella annetaan aikaa aloittaa aktiiviset toimenpiteet, eikä kummatkaan menetelmät korvaa täysin toisiaan. [2, pp. 37, 39.]

Palosuojaukseen vaikuttaa myös se, miten palovaarallinen alue määritellään. Palovaarallinen alue on yleensä palovaarallisen laitteen, tai paloriskialueen lähellä, jossa tulipalon seuraukset vaikuttavat. Palosuojaus perustuu alueen oletettuun paloon, sen leviämiseen, kestoon ja lämpösäteilyyn. Suojattavalle rakenteelle määritellään kriittinen lämpötila rakennesuunnittelijan toimesta. Palon kestoon vaikuttaa se kuinka nopeasti aktiiviset sammutustoimet päästään aloittamaan. Palosuojauksen täytyy olla yhtenäinen samalla palovaara-alueella, myös korkeissa rakenteissa. [2, pp. 37-39.]

Palonsuojamateriaaleiksi teollisuudessa ei aina sovellu kaikki passiiviset valmistusmenetelmät, jos materiaali tulee olla hyväksytty hiilivetypaloon. Sopivia materiaaleja hiilivetypaloa vastaan ovat esimerkiksi tiili, kevytbetoni, ruiskutettavat pinnoitteet ja endotermiset mineraalipohjaiset kääreet. Palonsuojamateriaalin mitoittaa kunkin materiaalin käyttöön sertifioitu toimija. Mitoituksen tulee pohjautua paloskenaarioon ja rakenteen kriittiseen lämpötilaan. Palonsuojamateriaalille on täytynyt hakea hyväksyntä luokituslaitosten määrittelemillä polttokokeilla. [2, p. 39.]

Mitoittavat palokäyrät on esitetty standardissa SFS-EN 1363-2. Pelkkien teräsrakenteiden palosuojauksen mitoituksessa ja suunnittelussa käytetään Eurokoodeja: SFS-EN 1991-1-2 ja SFS-EN 1993-1-2. [27, p. 50.] Ympäristöministeriön julkaisussa, joka koskee teräsrakenteiden lujuutta ja vakautta ohjeistetaan kantavien rakenteiden suunnittelua Suomessa täydentävästi. Siinä mainitaan, että toteutusasiakirjojen tulee sisältää teräsrakenteen palosuojatyöt, ellei standardit kata niitä. Rakennussuunnitelmissa, tulee esittää myös palosuojauksen mitoittamiseen tarvittavat tiedot, ja mahdollisesti etukäteen valittu palosuojausmenetelmä. [28, pp. 5, 6.]

Kohteelle tulee tehdä palosuojasuunnitelma, osana toteutuksen suunnittelua. Palosuojasuunnitelma sisältää mm. suojan tuotenimen, tuotehyväksynnän tunnisteen ja muut tarvittavat tiedot. Suunnitelmassa esitetään myös palosuojauksen paksuus kussakin rakennusosassa ja ohjeet suojauksen kunto- ja määräraikaistarkastuksiin. Tarkastusohje lisätään rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeeseen. Standardissa SFS-EN 1090-2 ja SFS-EN 1090-4 on myös esitetty

laatuasiakirjat, jotka liitetään palosuojasuunnitelmaan, tarvittavassa laajuudessa. [28, p. 7.]

SFS-EN 1090-2 ja SFS-EN 1090-4 käsittelee teräskokoonpanojen toteutusta, ja niissä on esitetty joitain huomautuksia palosuojaukseen. Kyseiset standardit eivät kuitenkaan ole tarkoitettu kattamaan palosuojauksen vaatimia analyyssejä, yksityiskohtia ja sääntöjä. SFS-EN 1090-2 standardissa kerrotaan, että jos kokoonpanolta vaaditaan korroosiosuojausta palosuojauksen lisäksi, tulee niiden yhteensopivuus erikseen osoittaa. [29, p. 74.] Joissain tapauksissa palosuojauksena toimiva maali ei toimi oikein erillisen korroosiosuojauksen kanssa. Palosuojaukseen ei myöskään saa huomioida pelkästään korroosiosuojaukseen sisältyvänä asiana.

Palosuojatuotteet ovat tärkeässä roolissa rakenteen luotettavuuden osalta, joten ne tulee olla aina CE-merkittyjä, tai niille on täytynyt hakea ETA asiakirjaa. Myös kansallinen hyväksyntä on Suomessa mahdollista lain 954/2012 mukaisesti, tai standardien esittämien laatudokumenttien avulla. [28, p. 8.]

Palosuojauksen valvonta työmaalla kuuluu vastaavalle työnjohtajalle, tai erikseen osoitetulle erityisalan työnjohtajalle. Kaikki poikkeamat kirjataan ylös ja jos niitä syntyy, täytyy aina tarkastella erikseen, voidaanko niitä hyväksyä. Palosuojaus tulisi tarkastaa vähintään kolmen vuoden välein, ellei valmistaja muuta vaadi. Tarkastamisessa ja korjauksessa noudatetaan valmistajien ohjeita. [28, p. 10.]

4.1 Tulipalot teollisuudessa

Teollisuudessa on normaalien rakennuspaloriskien lisäksi paljon eri aineita, jotka saattavat aiheuttaa hyvin erilaisia paloriskejä. Myös prosessien ja erikoislaitteiden vikaantuminen voi aiheuttaa tulipaloja. Kaasuja sekä nesteitä käsittelevissä laitoksissa suuren onnettomuusriskin aiheuttaa erilaiset rikkoutumiset, vuodot, ulkoiset tulipalot ja käyttövirheet [30, p. 8]. Teollisuuden tulipalojen syttymissyinä on yleensä kemiallinen reaktio, sähkökipinät ja -kaaret, mekaaninen ärsyke, valaistus, staattinen sähkö, erilaiset liekit, sekä kuumat pinnat ja

prosessit [18, pp. 26-28]. Hiilivedyt muodostavat suurimman paloriskin teollisuudessa käsiteltävistä aineista [31, p. 3]. Tämä ilmenee myös Suomen onnettomuustilastoja tarkastellessa, josta kerrotaan luvussa 4.2.

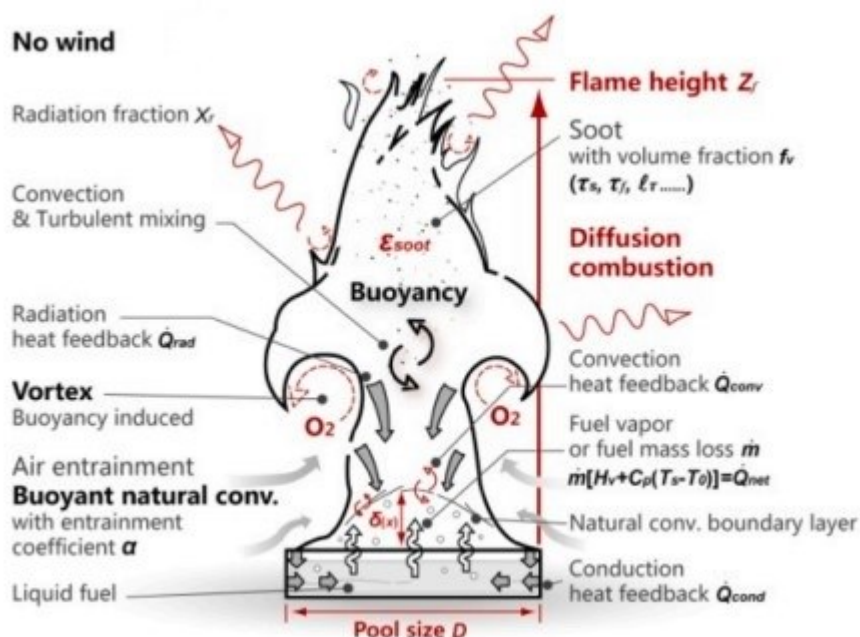
Hiilivetytalo (engl. hydrocarbon fire) tarkoittaa nesteen tai kaasun muodossa olevan hiilivedyn palamista. Hiilivedystä tehtyjä tuotteita on esim. bensiini ja dieselöljy. Hiilivetytaloissa lämpötila nousee nopeasti, joten sitä varten on oma standardoitu palokäyrä. Hiilivetytalo kehittyy n. 5 minuutissa 1100°C lämpötilaan. [2, pp. 9, 10.] Hiilivedyt syttyvät palamaan teollisuudessa usein lammikkopalona tai suihkupalona. Hiilivetytaloista voi muodostua myös räjähdysriski. Hiilivetyjen palaminen vaatii erityistä tarkastelua, kun sitä vastaan suojaudutaan. Hiilivetytaloon tarkoitettu palosuojaus täytyy olla hyväksytty siihen tarkoitukseen. Mineraalivilla ei esimerkiksi normaalisti kestä sellaisenaan hiilivetytaloa. [2, p. 38.] Kuva 19 osoittaa, kuinka voimallinen hiilivetyjen palaminen voi olla. Hiilivetyjen palaminen aiheuttaa runsaasti savua ja lämpösäteilyä [31].



Kuva 19. Yhdysvaltain rannikkovartioston ottama kuva öljynporauslautan tulipalosta Meksikonlahdella vuonna 2010 [32].

Allas- tai lammikkopalo (engl. pool fire) tarkoittaa diffuusiopalamista tasossa olevan polttoaineen yläpuolella, joka on yleensä rajoittunut tietylle pinta-alalle, esim. avosäiliöön. Allaspalo ei vaadi paikallaan olevaa nestettä, vaan sillä voidaan viitata myös virtaavan aineen palamiseen. Esimerkiksi vuototilanteessa allaspalo pääsee kehittymään koko ajan suuremmaksi. Allaspalon mallia

tarkasteltaessa voi havaita, että sen fysiikka sopii hyvin myös muihin, kuin hiilivetypaloihin. Kuva 20 esittää allaspaloon liittyvää fysiikkaa. [31] Teollisuuden lammikkopaloskenaarioihin hiilivetypalokäyrä sopii hyvin. Lammikkopalon lämpötila jää usein matalammaksi, kuin hiilivetykäyrän suurin lämpötila. Lammikkopalossa lämpösäteilyn intensiteetti putoaa nopeasti jo 10 metrin etäisyydellä palon reunasta, ja saattaa alittaa 32 kW/m^2 arvon, jolloin rakenteita ei yleensä enää rikkoudu. Lämpösäteilyn määrä allaspalossa nousee yleensä maksimissaan 200 kW/m^2 . [2, p. 39.]

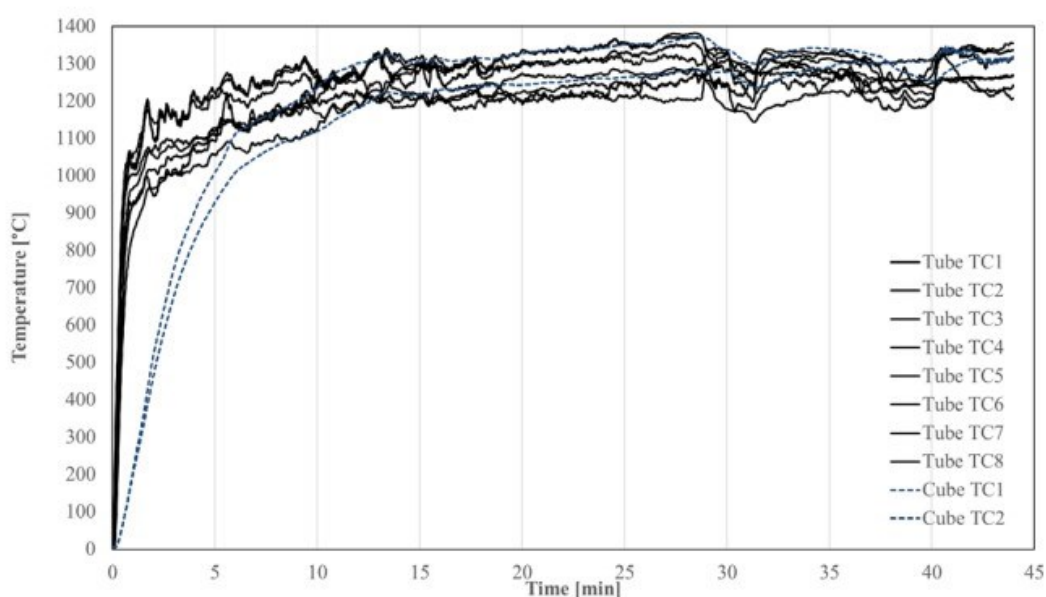


Kuva 20. Allaspalon fysiikka, ilman tuulen vaikutusta [31, p. 16].

Lammikkopalon palonkestoajaa laskettaessa, oletetaan koko vapautuvan nesteen palavan pois, eikä viemäröinnin poistamaa nestettä huomioida, mikä on varmallalla puolella. Nesteen oletetaan leviävän vallitilan tai maastolaatan alueelle. Vallitilan- ja säiliöpalon paloajaksi käytetään vähintään 120 minuutin lammikkopaloskenaariota, passiivisen palosuojauksen mitoituksessa. Muilla alueilla, kuten prosessi ja varastoalueilla riittää lyhyempi aika, joka on suhteutettu aktiivisen torjunnan alkamisaikaan. Jos erillistä paloskenaariota ei selvitetä, käytetään muilla alueilla vähintään 90 minuutin allaspaloaikaa. [2, p. 38.] Jos

aineen palamisnopeutta ei löydy taulukoista voidaan se myös arvioida. Neste-mäinen hiilivety palaa nopeudella 0,08 kg/m²s [27, p. 49].

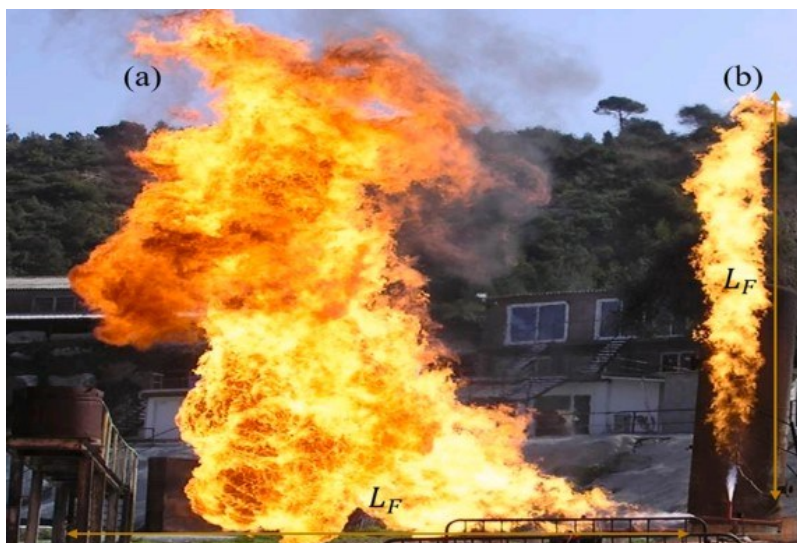
Suihkupalo (engl. jet fire) tai pistoliekki tarkoittaa paineella purkautuvan kaasun palamista. Jos kohteessa todetaan suihkupalon mahdollisuus, käytetään standardin UL 1709 palokäyrää, joka on esitetty kappaleen 3.5 kuvassa 17. [27, p. 49.] Todellisuudessa suihkupalon lämpötila voi olla huomattavasti UL 1709 käyrää korkeampi, ja nousta jopa lähelle 1400°C lämpötilaan, kuten kuva 21 esittää [33, p. 3].



Kuva 21. Suihkupalossa mitattuja lämpötiloja [33, p. 3].

Suihkupalon lämpösäteilyn intensiteetti on huomattavasti allaspaloa kovempi, ja se voi olla jopa 400 kW/m². Järjestelmän paineella on suora yhteys pistoliekin suuruuteen. 5 bar paine järjestelmässä on yleensä rajana, että suihkupalon riski tulee huomioida. Pistoliekin ulottuvuus on aina laskettava erikseen, koska siihen vaikuttaa käytettävä aine ja järjestelmä [27, p. 49]. Kun paineen oletetaan laskevan tulipalon aikana riittävästi ja luotettavasti, voidaan mitoitus jatkaa lammikkopaloskenaariona. Jos erillistä paloskenaariota ei selvitetä, mutta kyseiset riskit ovat mahdollisia, vaaditaan vähintään 90 minuutin suihkupalon kesto aika tarvittaville rakenteille. Rakenteiden ja ikkunoiden paikkoja suunniteltaessa täytyy

huomioida pistoliekin mahdollisuus. [2, pp. 37-39.] Kuvassa 22 on esitetty vaaka- ja pystysuora suihkupalo.



Kuva 22. Vaaka- (a) ja pystysuora suihkupalo (b) [34].

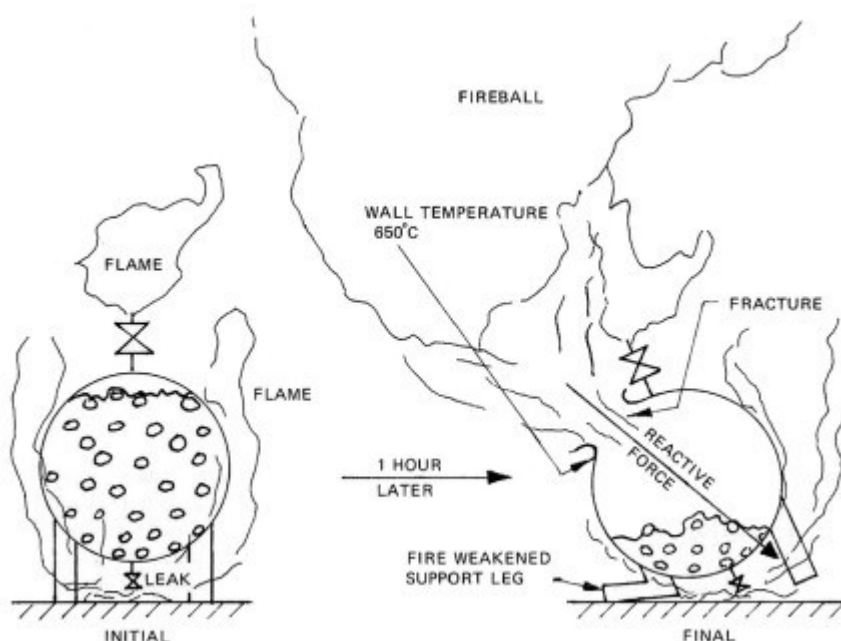
Räjähdyksessä aineen sisältämä energia purkautuu suurella nopeudella. Ilmiö on kemiallinen, ja se voi tapahtua aineen eri olomuodoissa. Räjähdyksen välitön seuraus on lämpö ja paineaalto. Räjähdyksen nopeus ja energia riippuu räjähtävästä aineesta. Paineaalto johtuu nopeasta laajenemisesta. Sirpaleita voi syntyä räjähtävästä aineesta itsestään, mutta varsinkin teollisuudessa prosessilaitteen hajoaminen aiheuttaa niitä. Sirpaleiden alkunopeus voi olla jopa 1000 m/s. Heitteet tarkoittavat räjähteen ulkopuolisten asioiden siirtymistä paineaallon takia. Räjähdyksen lämpö muodostaa kuumia kaasuja, joista syntyy tulipallo. Tulipallon vaikutus voi olla jopa 3 kertaa sädettä suurempi. [35, pp. 2-4.]

Räjähdyksen lämpövaikutuksen kesto ja vaikutusalue on suhteessa pieni, verrattuna muihin seurauksiin. Passiivisten palosuojausten tulee kestää myös räjähdys, kun sen riskin on olemassa, joten mekaaninen kesto on myös oleellinen tekijä lämpösuojauksen lisäksi. Räjähdys voi aiheuttaa myös tärinää, mikä voi rasittaa palosuojausta, sirpaleiden, heitteiden ja painevaikutuksen lisäksi. [35, pp. 2-4.] Taulukossa 2 on esitetty paineaallon aiheuttamia vaikutuksia, ja minkälaisia rakennuksia vaara-alueelle saa sijoittaa.

Taulukko 2. Paineaallon vaikutuksia [36, p. 18].

kPa	Vaikutus	Rakennustyyppi vaara-alueella
5	Vammautuminen mahdollista. Rakenteille pieniä vaurioita.	Normaalit oleskelurakennukset.
15	Pysyvä vammautuminen mahdollista. Rakenteet voivat romahtaa osittain.	Perusteltu syy, miksi rakennuksen riskiksi voidaan mitoitaa tämä paine. Pääasiassa teollisuusrakennukset.
30	Kantavat rakenteet voivat romahtaa. Onnettomuus voi laajentua.	Teollisuuden laitteet ja välittömät rakenteet.

BLEVE tulee sanoista boiling, liquid, expanding, vapor ja explosion. Se on räjähdysmuoto, missä neste, jota säilytetään paineistettuna korkeammassa lämpötilassa, kuin sen kiehumispiste on, pääsee purkautumaan. Purkautuminen tapahtuu, kun paineastia repeytyy tai hajoaa. Kun paine purkautuu, neste laajenee nopeammin kuin pelkän ylipaineen vaikutuksesta, koska se pääsee kiehu-
maan. Jos kiehuva neste syttyy palamaan, syntyy erittäin kova räjähdys ja tulipallo. BLEVE käsitellään aina suuronnettomuutena. Kuvassa 23 esimerkki BLEVE:n syntymekanismista ja sen seurauksista. [37]



Kuva 23. BLEVE:n syntymekanismi ja seuraukset [37].

Leimahdus- tai humahduspalo (engl. flash fire) tarkoittaa ilmaan sekoittuneen syttymiskelpoisen aineen yhtäkkistä syttymistä, jolloin liekki kulkee ainepilven läpi. Se ei siis ole sama asia kuin räjähdys, mutta pieneen tilaan rajoittuneena se saattaa aiheuttaa räjähdysten. Syttymiskelpoinen seos peittää monesti suuren alueen ja sen leimahdus aiheuttaa uusia syttymisiä. [38] Sekä leimahduksen, että BLEVE:n vaikutuksia on mahdollista laskea tarkemmin [39].

4.2 Onnettomuuksia aiheuttavat aineet

Teollisuudessa käsitellään paljon eri aineita, jotka voivat aiheuttaa merkittävän riskin paloturvallisuudelle. Jokaisessa tuotantolaitoksessa arvioidaan suunnitteluvaiheessa tapauskohtaisesti, miten eri aineet vaikuttavat palonsuojauksen tarpeeseen. Käytännössä tulipalot mitoitetaan palotyyppin ja niiden mahdollisen yhtäaikaisuuden mukaan. Palokäyränä käytetään usein hiilivetykäyrää, mutta siitä huolimatta eri aineet aiheuttavat erilaisia riskejä, jotka vaikuttavat palomitoitukseen. Esimerkki tästä on aineen palamisnopeus lammikkopalossa. Jonkin aineen onnettomuuden torjuminen voi olla haastavampaa, kuten happivuodon ruokkima tulipalo, joka on erittäin voimakas ja vaikea sammuttaa [40]. Vaarallisia aineita jaotellaan pääsääntöisesti kuljetusluokkien mukaan. Kuvassa 24 on

PRONTO-tilasto eri kuljetusluokkien aiheuttamista tehtävistä pelastustoimelle, ajalla 2011–2018 [41, p. 7]. PRONTO-tilasto on Suomen pelastustoimen oma onnettomuus- ja resurssitilasto [42].

Kuljetusluokka	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Yht
1 Räjähteet	2	3	2	1	1	0	2	0	11
2.1 Palavat kaasut	48	36	53	55	44	58	45	54	393
2.2 Palamattomat kaasut	11	14	32	19	28	21	16	25	166
2.3 Myrkylliset kaasut	18	21	21	19	21	15	19	13	147
3 Palavat nesteet	1256	1274	1386	1393	1315	1348	1242	1362	10576
4.1 Helposti syttyvät kiinteät aineet	9	5	3	7	2	6	0	1	33
4.2 Helposti itsestään syttyvät aineet	2	1	1	2	1	0	1	2	10
4.3 Veden kanssa vaarallisesti reagoivat aineet	2	0	1	0	2	0	2	1	8
5.1 Sytyttävästi vaikuttavat (hapettavat) aineet	12	9	6	6	10	8	12	8	71
5.2 Orgaaniset peroksidit	3	4	1	2	1	1	1	1	14
6.1. Myrkylliset aineet	13	13	5	5	2	5	5	3	51
6.2 Tartuntavaaralliset aineet	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 Radioaktiiviset aineet	1	0	0	0	0	1	1	1	4
8 Syövyttävät aineet	57	60	51	52	46	58	53	54	431
9 Muut vaaralliset aineet ja esineet	71	53	28	23	27	18	28	22	270
Ei kuljetusluokkaa	250	216	97	98	98	104	108	112	1083
Ei kirjattu	1428	1301	1336	1470	1482	1499	1727	1805	12048
Yhteensä	3183	3010	3023	3152	3080	3142	3262	3464	25316

Kuva 24. Kuljetusluokan mukaiset tehtävät ja öljyvahingot pelastustoimelle vuosina 2011–2018 [41, p. 8].

Öljyvahinkojen osuus palavien nesteiden kohdalla on merkittävä. Vuonna 2018 tapahtui Suomessa vain 198 palavan nesteen pelastustoimen tehtävää, kun taas öljyvahingot huomioiden 1362. Taulukossa esitetään kaikki tehtävät, eikä siitä voida arvioida tulipaloriskiä. Tilasto ei myöskään kerro täysin vuosittaisten onnettomuuksien määrää, koska siinä esitetään kuljetusluokat, joka ei ole pakollinen tieto PRONTO-tilastoa täytettäessä. Tilastosta saadaan kuitenkin yleiskäsitys, eri aineiden riskeistä. Tapahtumapaikan mukaan listattuja vaarallisen

aineen onnettomuuksia ja öljyvahinkoja tuotantolaitoksissa ja varastointitoiminnassa, esitetään kuvassa 25 ajanjaksolla 2011–2018 [41, pp. 8-11].

Vahingon tapahtumapaikka	Räjähdykset/räjähdyksvaurio	Vaarallisen aineen onnettomuudet	Öljyvahingot	Pohjavesialueella	Ei pohjavesialueella	Yht
Tuotantolaitos	68	413	396	85	764	869
Varasto tai varastointialue	6	330	947	167	1087	1276

Kuva 25. Tapahtumapaikan mukaiset pelastustoimen tehtävät ja öljyvahingot tuotantolaitoksissa ja varastointitoiminnassa vuosina 2011–2018 [41, p. 11].

Kuvassa 26 on vuosina 2011–2018 tapahtuneiden vaarallisten aineiden onnettomuuksien yleisimmät aineet, joita pelastustoimi on hoitanut. Tilasto antaa käsityksen teollisen ympäristön eri aineiden kirjoista ja niiden riskeistä. Eri aineita vertaillen, eniten onnettomuuksia on tapahtunut dieselillä, bensiinillä ja muilla öljytuotteilla. [41, p. 12.] Hiilivetypalokäyrä kattaa siis suurimman osan mahdollisista riskeistä eri aineita vertaillen, vaikka oleellisin seikka palosuojauksen kannalta onkin vain lämpötila ja palonkesto.

Aine	Yhteensä
Ammoniakki	64
Ammoniakki vesiliuos	40
Asetyleeni (liuotettu)	18
Bensiini	1 379
Butaani	25
Diesel, kevyt polttoöljy	4 936
Fosforihappo (liuos)	6
Happi (jäähdytetty neste)	31
Happi (puristettu)	24
Hiilidioksidi	18
Hiilidioksidi (jäähdytetty neste)	7
Hydrauliikkaöljy	1 095
Kaliumhydroksidi (liuos)	10
Kloori	16
Lentopetrooli (kerosiini)	30
Metaani (jäähdytetty neste)	3
Metaani (puristettu, myös maakaasu tai kaupunkikaasu)	31
Muu vapautunut aine	248
Muu öljy (esim. tuntematon jäteöljy, pilssiöljy)	257
Muurahaishappo	23
Natriumhydroksidi	39
Natriumhypokloriitti	17
Natriumkloratti	12
Nestekaasu	196
Propani	33
Raskas polttoöljy	104
Rikki	15
Rikkidioksidi	13
Rikkihappo	84
Styreeni	5
Suolahappo	36
Typpi	45
Typpihappo	38
Vetyperoksidi	28
Voiteluöljy	878

Kuva 26. Aineiden nimen mukaiset tehtävät ja öljyvahingot pelastustoimelle vuosina 2011–2018 [41, p. 12].

Kuvan 26 tilastossa ei ole mainintaa puhtaasta vedystä. Suomalaiseen VARO-rekisteriin on merkitty viisi kappaletta onnettomuuksia tai vaaratilanteita vedylle kyseiselle ajanjaksolle. VARO-rekisteri on Tukesin ylläpitämä ja sinne on kirjattu onnettomuuksia, jotka eivät välttämättä ole pelastustoimen PRONTO-

tietokannassa. VARO-rekisteriin kirjataan tietoja mm. kemikaaleihin ja painelaitteisiin liittyvistä onnettomuuksista. [41, p. 19.] Vety syttyy erittäin herkästi, ja pelkästään vuodon aiheuttama staattinen varaus saattaa riittää siihen. Vetyliekki palaa niin kuumana, että sen kosketus riittää sulattamaan suurimman osan metalleista. Vetyliekki suuntautuu kapeana suoraan ylöspäin, ellei kyseessä ole räjähdys. [43] Eri aineiden tuntemus on siis tärkeä osa, kun arvioidaan suojauksen määrää ja tarvetta.

Jotkin aineet voivat aiheuttaa, paloriskin lisäksi, ongelmia niiden kylmyyden vuoksi. Esimerkiksi metaani säilyy nestemäisenä normaalipaineessa -163°C lämpötilassa. [30, p. 3.] Nesteytetyn maakaasun (LNG) vuoto voi haurastuttaa terästä kylmyyden takia, mikä heikentää teräksen lujuusominaisuuksia, kuten iskunkestävyyttä [44].

Räjähteisiin liittyviä onnettomuuksia ja vaaratilanteita tapahtui Suomessa joka vuosi n. 30, ajanjaksolla 2011–2018, öljyvahinkoja 2800 ja muita vaarallisen aineen vahinkoja 400. Tapahtumapaikat sijoittuvat usein teollisuuskaupunkeihin ja valtaväylille. Pelastustoimelle vaarallisten aineiden onnettomuudet ovat aina haastavia. [41, p. 21.] Tämä korostaa tulipalotilanteissa passiivisen palosuojauksen merkitystä, jonka tarkoitus on myös ostaa aikaa aktiivisille toimille.

4.3 Palosuojattavat kohteet teollisuudessa

Kantavien rakenteiden lisäksi teollisuudessa on useita muita palosuojaukselta vaativia kohteita. Erityisen palovaarallisia alueita teollisuudessa ovat prosessialueet, vallitilat, pumppaamot, vuotoriskialueet, sekä näiden läheisyys. [2, pp. 28, 29].

Painejärjestelmien suojalaitteiden tulee kestää ulkopuolinen tulipalo ja laitteiston sisällä tapahtuva räjähdys [2, pp. 28, 29]. Turvasulkuventtiileillä erotetaan laitteet prosessista, tai niillä voidaan tyhjentää laitteisto. Turvasulkuventtiilit ovat tärkeässä osassa, kun varaudutaan poikkeusoloihin. Niillä voidaan myös operoida prosessia vaaratilanteessa. Ne tulee aina palosuojata kohteen riskien mukaisesti, jotta ne toimivat onnettomuustilanteessa. [2, pp. 52, 53.]

Hätäpaineenalennuksella tai hätätyhjennyksellä poistetaan neste tai kaasu laitteistosta ja alennetaan järjestelmän painetta hätätilanteessa. Jos nesteellä täytetyn laitteen tulipaloa ruokkii laitteen vuoto, niin yleensä ainut keino stabiloida tilanne, on tyhjentää neste pois. Tulipalolle altistuneen nestesäiliön tyhjentäminen ilman vuotoa, ei aina ole järkevää, koska nesteen kiehuminen absorboi lämpöä. Jos liekki kuumentaa kaasutilaa ja astian vaippa repeää tulipalossa, voi syntyä räjähdys. Paineenalennus ja hätätyhjennys venttiilit tulee tarvittaessa palonsuojata. [2, pp. 27, 28.]

Kaikki kaapeloinnit suojataan, jotka vaikuttavat turvallisuuslaitteisiin ja palontorjuntaan, jos ne eivät ole palovaara-alueen ulkopuolella tai maan alla. Hiilivety-palon kestäviä kaapeleita on markkinoilla, jolloin niitä ei tarvitse erikseen suojata. Kaapelit eivät vaadi yleensä yhtä pitkää kestoaikaa, kuin rakenteet. Kaapelien toiminta-ajaksi riittää usein se, että laitteilla ehditään operoida ja ne voidaan saattaa haluttuun tilaan. [2, p. 39.]

Prosessilaitteiden kantavat rakenteet, palavia kemikaaleja sisältävät laitteet, muut kantavat rakenteet, sekä kannattimet ja putkistot suojataan niin, ettei onnettomuuden takia johtuva sortuminen pahenna tilannetta, aiheuta erityistä vaaraa tai estä laitoksen alasajoa. Viereisten laitteiden suojausta suunnitellessa täytyy muistaa, että varoventtiili ei aina suojaa kaasutäytteisen laitteen repeämää, jos niissä ei ole kiehuvaa nestettä, joka siirtää lämpöä höyrystymällä pois. Muissa tapauksissa laitteille ja putkille riittää yleensä aktiivinen palonsuojaus. [2, pp. 37, 39.] Kuva 27 esittää säiliön palosuojauksen joustavalla peitolla.



Kuva 27. Säiliön passiivinen palosuojaus joustavalla peitolla [45].

Putkisillat ja putkien kannattimet suojataan vähintään 90 minuuttia paloa vastaan tai paloskenaarion mukaan vaara-alueella. Palavat nesteet sijoitetaan yleensä putkisiltojen yläosaan. Putkien suunnittelulämpöön vaikuttaa putken käyttötarkoitus ja puhdistusmenetelmät. Alimpana suunnittelulämpönä saa käyttää -40°C , mutta tällä ei ole juurikaan merkitystä palosuojauksen kannalta. [2, p. 29.] Putkisiltoja ei muutoin pidetä palovaarallisina, kuin vain niiltä osin, missä palavan aineen vuodon mahdollisuus on olemassa [27, p. 49].

Palovesiputkistot sijoitetaan ensisijaisesti maan alle, tai palovaarallisen alueen ulkopuolelle, muutoin ne tulee palosuojata. Myös kaikki muut palontorjuntaan liittyvät laitteet, kuten vesitykit, tulee suojata niin, että ne toimivat koko oletetun onnettomuustilanteen. [2, p. 40.]

Offshore-toiminnoissa on erityisiä vaatimuksia, mitkä seuraavat esimerkiksi paljon haastavammasta evakuoinnista onnettomuuksien yhteydessä. Turvallisuuskommunikointi välineiden tulisi toimia vähintään 24 h, ja navigoinnin apuvälineiden, kuten helikopterikannen valojen 96 h. Näiden kaapeloinnin ovat siis erityisen kriittisiä, mutta koska ne eivät vaadi paljoa virtaa, on ne mahdollista turvata myös varavirtalähteillä ja akuilla [18, pp. 54, 55]. Standardissa ISO 13702:2015 on määritelty, mitä ja kuinka kauan offshore-toiminnon osia tulee suojata aktiivisin ja passiivisin keinoin, josta on esimerkki kuvassa 28. [18, pp. 56-59.]

Areas	AB	UA	CS	WH	PA
Control station (CS)	CF	CF	CF	X	X
Accommodation blocks (AB)	CF	CF	CF	X	X
Non-hazardous utility (UA)	CF	CF	CF	CF	CF
Wellhead and drilling (WH)	JF	JF	JF	JF	JF
Process and gas compression (PA)	JF	JF	JF	JF	JF

CF = Cellulosic fire, JF = Jet fire, X = Not applicable

Resistance time of every fire type = 1 hours

Critical temperature of every fire type = 400 °C

Hydrocarbon pool fire can be appropriate if the evaluation of the fires likely in the area indicates that "JF" is not credible basis for the design of the passive fire protection.

Kuva 28. Kantavien rakenteiden palonkestoaika, kriittinen lämpötila ja palotyyppi, jolta suojaudutaan offshore-toiminnoissa [18, p. 58].

Kuva 28 osoittaa offshore-rakenteilta vaadittavan kriittisen lämpötilan maksimin, suojausajan ja miltä paloskenaarioilta suojaudutaan. Kriittisen lämpötilan maksimiksi on esitetty teräsrakenteille 400 °C. Kuvan 28 kaltainen taulukko on esitetty standardissa myös paloesteille, tärkeimpien alueiden välillä. Passiivisen suojauksen vaatimuksia kriittisille laitteille on esitetty kuvassa 29. [18, pp. 56-60.]

Equipment	Time (min)	°C (max)
SSIV/SSSV/BOP Control panel	15	40 ¹
UPS System	30	40 ¹
Fire pumps and emergency generators	60	200
Riser ESD valve	60 ²	200
Riser section	60 ²	200 ³
Riser supports	60 ²	400

1 = Passive fire protection can be provided to prevent temperature in the enclosure containing this equipment rising to these levels when subjected to an external fire.

2 = Or the minimum time period considered sufficient for a complete evacuation of the installation.

3 = In the absence of any knowledge with regards to the relative location of the fire on the risers, the ESD valves, and the contents of the riser, it has been assumed that the fire is near the ESD valves and the riser is filled with liquid hydrocarbon. As a result, 200 °C has been used as the default surface temperature for the riser sections to ensure the integrity of the ESD valves.

Kuva 29. Offshore- laitteiden palonkestoaikoja ja lämpötiloja [18, p. 60].

Offshore-installaatioiden suojausajattelua voidaan jalostaa myös perinteisiin teollisuuden kohteisiin. Jokaisessa kohteessa täytyy kuitenkin miettiä tapauskohtaisesti toteutukset, riskit ja suojauksen tarve standardien vaatimuksien lisäksi. Esimerkiksi radioaktiiviset aineet ja litium aiheuttavat omat erityislaatuksensa riskit, myös palosuojauksen kannalta [46]. Teollisuuden kohteisiin ei ole olemassa tämän takia valmiita universaaleja toimintamalleja passiiviseen palosuojauksen valintaan. Teollisuuden kohteet vaativat usein toiminnallista suunnittelua ja perehtymistä suunniteltavaan kohteeseen.

5 Passiiviset palosuojausmenetelmät

Koska lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan ja lämpö vaikuttaa huomattavasti teräksen ominaisuuksiin, tulee lämmönsiirtymistä rakenteeseen estää palotilanteessa. Teräksen lämmön nousun estämisessä voidaan käyttää seuraavia mekanismeja [21, p. 141]:

- Lämmönjohtavuuden pienentäminen.
- Rakenteen lämpökapasiteetin parantaminen.
- Lämmön siirtäminen fysikaaliseen tai kemialliseen reaktioon.
- Lämpösäteilyn vaikutuksen estäminen.

Teräksen paljas pinta voidaan verhoilla aineella, joka hidastaa lämmönsiirtymistä. Suojamateriaali voi toimia eristeenä, jolloin rakenteen lämmönjohtavuus pienenee. Jos suojamateriaali toimii lämmönvastaanottajana, paranee rakenteen lämpökapasiteetti. Lämpökapasiteetti paranee myös suojattavan osan massaa kasvattamalla. Lämpökapasiteettia voidaan kasvattaa, valamalla teräksen ympärille tai sisälle betonia. Betoni vahvistaa myös rakenteen muita ominaisuuksia. Lämpökapasiteettia voidaan kasvattaa myös täyttämällä teräspilari vedellä. [47, p. 5.]

Faasimuutokset eli aineen olomuodon muutokset sitovat lämpöenergiaa. Fysikaalisia reaktioita joihin lämpö voi siirtyä, on mm. höyrystyminen, sublimoituminen, sulaminen ja näiden vastareaktiot. Esimerkiksi vettä sisältävä palosuoja-materiaali absorboi lämpöenergiaa, kun vettä alkaa höyrystyä pois lämpötilan noustessa. [21, p. 141.] Endotermisessä reaktiossa tai pyrolyysissä, lämpöä sitoutuu kemiallisten reaktioiden kautta. Suunnittelussa kannattaa selvittää myös teräsosien sijoitusta muualle kuin palotilaan, esim. osastoivien seinien sisään, tai palavan tilan ulkopuolelle. [47, p. 5.] Kuva 30 jaottelee palosuojamenetelmiä, niiden periaatteiden mukaan.

Periaate	Menetelmät
Lämmöneristäminen	<ul style="list-style-type: none"> - eristelevyt - palosuojamaalit - ruiskutettavat eristeet
Lämmönsitomiskyvyn parantaminen	<ul style="list-style-type: none"> - betonitäyttö - vesitäyttö - sprinklaus
Rakenteellinen palosuojaus	<ul style="list-style-type: none"> - alaslasketut katot - pilareiden sijoittaminen palotilan ulkopuolelle - pilareiden sijoittaminen seinän sisään

Kuva 30. Periaatteen mukaiset palosuojausmenetelmät [16, p. 372].

Rakenteellisilla valinnoilla voidaan vähentää suojauksen tarvetta ja säästää näin kustannuksissa. Rakenne itsessään voidaan mitoittaa kestävämmäksi ilman suojausta, tai se voidaan sijoittaa vähemmän palolle altistuvaan paikkaan. Teollisuudessa helppo keino on sijoittaa esim. putkistoja maan alle. Alaslasketavaa kattoa voidaan käyttää yläpuolisten rakennneosien palosuojaukseen, tällöin alaslaskettavan katon ripustus tulee usein mitoittavaksi tekijäksi. [16, pp. 376, 377.]

Pilarit on mahdollista sijoittaa ulkoseinien ulkopuolelle, jolloin palotilan lämpötilaa ei tarvitse huomioida. Ikkunoiden vaikutus on huomioitava ja tarvittaessa voidaan käyttää liekkisuoja, jotka voivat olla esim. teräsohutlevyjä. Jos pilari sijoitetaan osittain seinän sisään, pienenee sen palolle altis pinta-ala. Tehokkain ratkaisu on kuitenkin sijoittaa pilari kokonaan osastoivan seinän sisään. Seinän sisälle sijoitettujen rakenteiden jäykistyksen toteuttamiselle tulee kuitenkin usein haasteita. [16, p. 377.]

Palosuojauksessa valittaessa huomioidaan asennuksen vaatimukset, käyttöolosuhteet ja kustannukset. Kustannusarvioon on hyvä sisällyttää mahdolliset huolto- ja toimenpiteet suojamateriaalin elinkaaren aikana. Teollisuudessa on tärkeintä, että rakenteet mahdollistavat tehokkaan ja turvallisen operoinnin tuotantolaitoksessa, eikä suojauksen ulkonäöllä ole merkitystä samalla tavalla, kuten muissa kohteissa. Palosuojausmenetelmiä voi jaotella märkiin ja kuiviin. Kuivia menetelmiä on erilaiset levytykset, elementit ja kuivat suojamateriaalit. Märkiä taas on erilaiset ruiskutukset, maalit ja massat. Teräsprofiilin muodolla on merkitystä palosuojaukseen, erityisesti ruiskutetta ja maaleja käyttäessä. Vaikka Ap/V arvo ja

suojausmateriaali olisivat samat, lämpenee I-profiili ja pyöreä profiili, putkiprofiili hitaammin. [47, pp. 51, 52.] Palosuojausmateriaalien ominaisuuksista erityisesti tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus on tärkeitä suunnittelussa. Jokaiselle materiaalille tulee tarkastaa valmistajan ilmoittamat arvot. Kuvassa 31 on joitain palosuoja-aineiden ominaisuuksia, joita voi käyttää esisuunnittelun apuna. [14]

Material	unit mass ρ_p [kg / m ³]	moisture content p [%]	thermal conductivity λ_p [W / (m·K)]	specific heat c_p [J/(kg·K)]
Sprays				
- mineral fibre	300	1	0.12	1200
- vermiculite cement	350	15	0.12	1200
- perlite	350	15	0.12	1200
High-density sprays				
- vermiculite (or perlite) and cement	550	15	0.12	1100
- vermiculite (or perlite) and gypsum	650	15	0.12	1100
Boards				
- vermiculite (or perlite) and cement	800	15	0.20	1200
- fibre-silicate or fibre-calcium-silicate	600	3	0.15	1200
- fibre-cement	800	5	0.15	1200
- gypsum board	800	20	0.20	1700
Compressed fibre boards				
- fibre silicate, mineral- wool, stone-wool	150	2	0.20	1200
Concrete	2300	4	1.60	1000
Light weight concrete	1600	5	0.80	840
Concrete bricks	2200	8	1.00	1200
Bricks with holes	1000	-	0.40	1200
Solid bricks	2000	-	1.20	1200

Kuva 31. Palosuojaustuotteiden ominaisuuksia [21, p. 142.].

Palosuojausmateriaalien toimivuus tulee olla varmistettu polttokokein, jossa tarkasteltavia asioita on lämmönjohtavuus, muodossa pysyminen ja palosuojauksen kiinnipysyminen [20, p. 125]. Standardoidussa palotestauksessa hiilivety- ja allaspaloon tarkoitetuilla palosuojauksilla, pitäisi käyttää UL 1709 mukaista koejärjestelyä. Hiilivetysuihkupalojen palosuojausten kokeissa käytetään standardia ISO 22899-1 [18, p. 45]. Palosuojausmateriaalin dokumenteista tulee osoittaa mm. laadullisia tekijöitä, mekaanisia ominaisuuksia, korroosiolta suojaaminen ja materiaalille suoritettut testit. Dokumenteissa tulee ottaa kantaa tarvittaessa

esim. palosuojauksen kestävyys säänoloja ja räjähdystä vastaan, sekä muihin kohdekohtaisiin vaatimuksiin. [18, pp. 45, 46.] Asennus toteutetaan erityistä huolellisuutta noudattaen ja se tulee suorittaa tuotehyväksynnän esittämällä tavalla. Asennustyössä noudatetaan myös palosuojatuotteita koskevia yleisiä ohjeita ja valmistajan suosituksia [28, p. 8][3, s.8]. Suojaukset tarkastetaan säännöllisesti ja havaitut viat korjataan ohjeiden mukaisesti [18, pp. 52, 53].

Mikäli suojattava rakenne on alttiina kovalle ympäristöolosuhteille, voi palosuojauksen pitkäaikaiskestävyys heikentyä paljon, mikä vaikuttaa myös kustannuksiin. Standardin UL 2431 mukaisesti testatut tuotteet on altistettu testeissä eri ympäristöolosuhteille. Standardin luokittelu antaa luotettavaa tietoa palosuojamateriaalien kestoista eri olosuhteissa. Standardi luokittelee taulukon 3 mukaisesti palosuojatuotteita. Luokituksessa on huomioitu materiaalin lämpötilan vakaus, UV, korkea ilmankosteus, nopea ilmaeroosio, suolarasitus, jäätyminen, sulaminen, teollinen ympäristö, mahdollinen kemikaali altistus, iskunkestävyys ja värinä. Sisätilojen osalta arvioidaan lämpötilan vakaus, UV, ilmankosteus, ilman eroosio, iskunkestävyys ja värinä. [48, pp. 10, 11.]

Taulukko 3. Standardin UL 2431 mukainen luokittelu palosuojamateriaalien kestävyydelle eri ympäristöissä [48, p. 11].

Category	Application
I-A	Outdoor, Heavy Industrial
I-B	Outdoor, General Use
II-A-1	Indoor, Concealed, Controlled Temperature and Humidity Environment
II-A-2	Indoor, Concealed, Elevator Shafts
II-A-3	Indoor, Exposed Non-Controlled Temperature and Humidity Environment

Vaadittava palosuojajaika ja kriittinen lämpötila vaihtelee paljon kohteen ja rakenteen mukaan ja se tulee selvittää aina tapauskohtaisesti erikseen.

Paloskenaarioita saatetaan joutua yhdistelemään ja ne voivat olla erilaisia saman kohteen eri osissa. Yksiselitteisiä oikeita valintoja ei voi siis määritellä, tuntematta kaikkia tarvittavia lähtötietoja. Asiaa voi lähestyä myös niin, että mitkä menetelmät eivät sovellu teolliseen ympäristöön. Tämän työn tarkoituksena on tunnistaa soveltuvat passiiviset palosuojausmenetelmät hiilivetypaloja vastaan. Palosuojamateriaalille tulee olla luotettavasti määritellyt, lämpötilan mukaan muuttuvat aineominaisuudet, tai muutoin niitä ei voi käyttää hiilivetypaloja vastaan [54, p. 52].

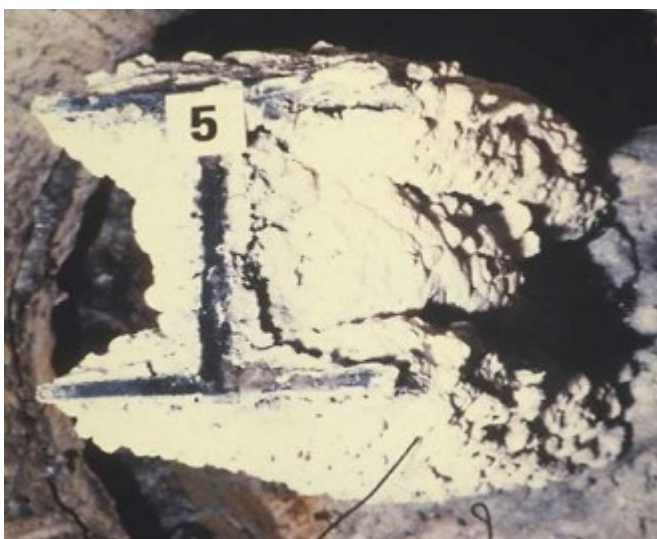
5.1 Paisuvat pinnoitteet

Teräsrakenteiden suojaukseen voidaan käyttää lämmön vaikutuksesta paisuvia ohut- tai paksukalvoisia pinnoitteita. Termillä ”palosuojamaali” viitataan yleisesti ottaen ohutkalvoisiin paisuviin pinnoitteisiin. Koska ohutkalvoisen ja paksukalvoisen pinnoitteen ominaisuudet eroavat huomattavasti, täytyy ”palosuojamaali” termin kanssa olla tarkkana. Pinnoitteet voivat olla vesi-, liuotin- tai epoksipohjaisia [49]. Vesiohenteiset pinnoitteet kestävät liuotinpohjaisia pinnoitteita huommonin kosteutta ja alhaisia lämpötiloja. Epoksipohjaiset pinnoitteet ovat kaikkein kestävimpiä. [50] Pinnoitteiden levittämiseen voidaan käyttää pumppausjärjestelmää, lastaa, telaa tai sivellintä [51]. Kuvassa 32 levitetään ohutkalvoista pinnoitetta ruiskuttaen, esivalmistuksen yhteydessä.



Kuva 32. Ohutkalvoisen pinnoitteen levitys teräsprofiliin ruiskuttaen [50].

Paisuneen pinnoitteen lämmönjohtavuus pienenee ja pinta hiiltyy, mikä suojaa palon vaikutuksilta. Pitkäaikaisessa palotilanteessa hiiltynyt kerros voi alkaa lohkeilla ja kuoriutua, jonka jälkeen pinnoite ei toimi halutulla tavalla. Pinnoitteiden etuna on ohut kerros normaalioloissa ja siisti tasainen pinta. Pinnoitteita on myös sellaisia, jotka häiritsevät palamisreaktiota, mutta ne eivät estä kuumenemista. Palosuojamaali toimii normaalitilanteessa tavallisen maalin tavoin. Paisuminen alkaa yleensä n. 250–300°C lämpötilassa. Pinnoite saavuttaa täydellisen paksuuden n. 300°C lämpötilassa. Ohutkalvoisia pinnoitteita ei yleensä käytetä 60 minuutin standardisoitua selluloosapaloa kovemmissa palotilanteissa. [47, pp. 58, 59.] Ohutkalvoinen pinnoite voi paisua jopa 50:1. Kuvassa 33 on palolle altistettu, ohutkalvoisella pinnoitteella palosuojamaalattu I-profiili. [52, p. 22.]



Kuva 33. Ohutkalvoisella pinnoitteella palosuojamaalattu I-profiili paloaltistuksen jälkeen [52, p. 22].

Palosuojamaalit suojaavat korroosiolta, ja niillä voidaan tehdä jopa säänkestäviä rakenteita, mutta yleisesti ottaen palosuojamaalien korroosiosuoja ja kosteuden kesto on normaaleja korroosio- ja sääsuojamaaleja huonompi. Palosuojamaali levitetään yleensä yhteensopivan pohjamaalauksen päälle. Normaalit pintamaalit eivät yleensä ole yhteensopivia palosuojamaalien kanssa. Palosuojamaaleille on annettu usein myös teräsprofiilin minimipaksuus, jolle niitä saa levittää. [47, pp. 64, 65, 67.] Maalien ominaisuudet muuttuvat huomattavasti lämpötilan mukaan, jolloin Eurokoodin palosuojatun teräsosan kuumenemiseen

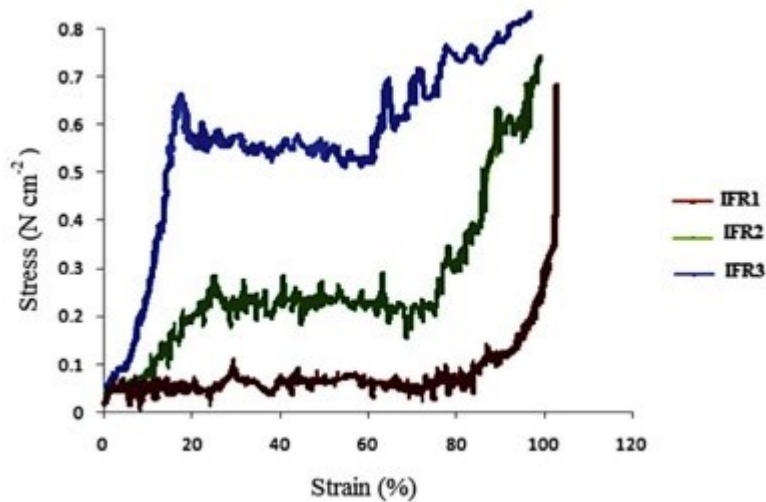
käytettäviä kaavoja ei voi käyttää. Tämän takia valmistajat ovat taulukoineet suoraan palosuojamaalin tarvittavan paksuuden, kriittisen lämpötilan mukaan [14]. Palosuojamaaleilla voi olla rajoitteita myös normaaliolosuhteille, joita voi olla esim. korkeat tai matalat lämpötilat. Eräällä epoksipohjaisella palosuojapinnoitteella, käyttölämpötilan maksimi on 120°C [53].

Paksukalvoiset pinnoitteet ovat yleensä epoksipohjaisia. Paremman palonkeston lisäksi, epoksipohjaiset maalit sietävät hyvin mekaanista rasitusta, sekä sääoloja. Paksukalvoiset pinnoitteet onkin kehitetty kestäämään sellaisia olosuhteita, missä ohutkalvoiset palosuojamaalit eivät riitä. Epoksipohjaiset pinnoitteet kestävät hyvin mm. meriolosuhteita ja hiilivetypaloja. Epoksipohjaisia paksukalvoisia pinnoitteita käytetäänkin paljon mm. offshore-installaatioissa [53]. Kuvassa 34 on kantavan teräsrakenteen paksukalvoisen epoksipohjaisen pinnoitteen levitys käynnissä öljynporaustalutalla. Kuvassa näkyvä vahvistusverkko voidaan lisätä pinnoitekerrosten väliin, jos pinnoitteesta halutaan kestävämpi.



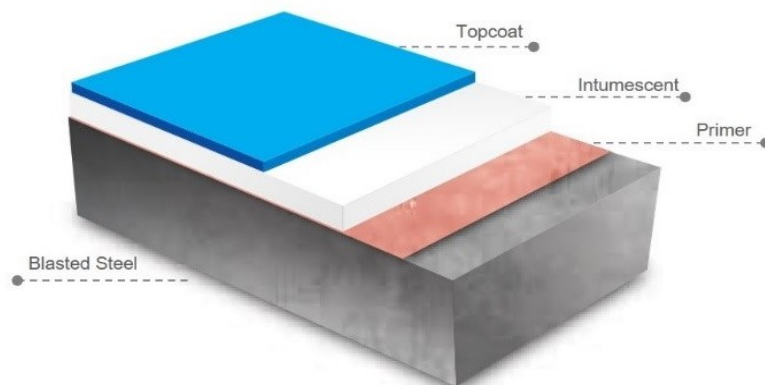
Kuva 34. Paksukalvoisen epoksipohjaisen palosuojapinnoitteen ja vahvistusverkon levitys [53].

Paksukalvoisten pinnoitteiden nimitys tulee paksummasta kuivakalvosta, mitä ohutkalvoisilla pinnoitteilla on. Epoksipohjainen pinnoite toimii hyvin myös korroosiosuojana. [50] Kuten muidenkin palosuojamateriaalien, myös pinnoitteen toiminta vaatii ehjän pinnan, joten mekaanisen rasituksen kesto on tärkeää. Eri pinnoitteilla voi olla merkittäviä eroja mekaanisessa kestävyudessa, kuten kuva 35 osoittaa. [54, p. 144.]



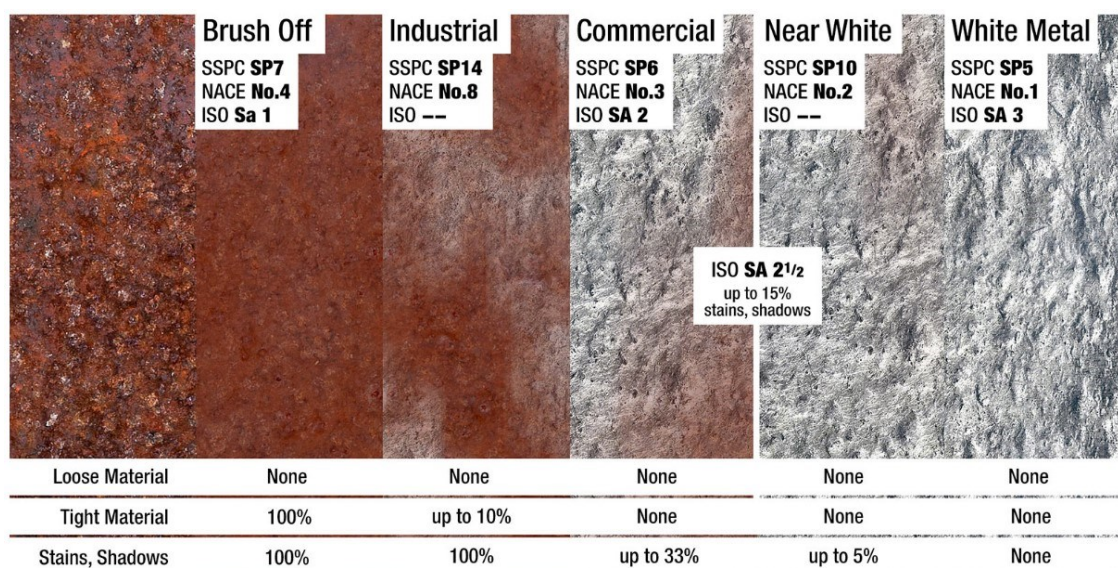
Kuva 35. Eri paisuvien pinnoitteiden mekaanisia kestävyyskäyriä [54, p. 144].

Paksukalvoiset palosuojamaalit paisuvat 5–8 kertaa kuivakalvoon nähden. Paksukalvoisia pinnoitteita voidaan asentaa samoin kuin ohutkalvoisia, esivalmistuksen yhteydessä tai paikan päällä. [50] Paksukalvoisille epoksinpinnoitteille tarvitaan yleensä tartuntamaalaus teräspinnan päälle ja erillinen pintamaalaus käyttöolosuhteiden mukaan. Kuvassa 36 on tyypillinen paksukalvoinen epoksinpinnoite järjestelmä, jossa teräksen päällä ensimmäisenä on primeri, sitten paisuva pinnoite ja päällimmäisenä topcoat. [55] Lisävarmuutta ei kannata hakea paksummalla kerroksella, mitä valmistaja ohjeistaa, koska se voi vain heikentää pinnoitteen tehoa. Pinnoitteen paisuva osa ei pysty välttämättä kannattelemaan ylipaksun kerroksen ylimääräistä painoa ja se voi tippua pois palotilanteessa. [48, pp. 13, 14.]



Kuva 36. Epoksinpohjainen paksukalvoinen paisuva pinnoitejärjestelmä [55].

Palosuojamaalauksen toteuttamiseen on laadittu yleisiä ohjeita, joita tulee noudattaa, ellei tuotehyväksynnässä ole muuta erikseen sanottu. Yleisissä ohjeissa on määritelty, että maalauksen vaiheista pidetään pöytäkirjaa. Pöytäkirjasta tulee ilmetä mm. kuinka kauan maalikerrokset ovat kuivuneen, ja millaiset maalolosuhteet olivat. Pöytäkirjan tulee sisältää myös kalvopaksuuden mittaukset. Teräksen pinta tulee puhdistaa vähintään standardin SFS-EN ISO 8501-1 mukaisesti Sa 2½ esikäsitteilyasteelle. [28, p. 8.] Sa 2½ esikäsitteilyaste tarkoittaa, että pinta on suihkupuhdistettu hyvin huolellisesti. Paljaalla silmällä ei saa erottua öljyä, rasvaa, likaa, valssihilsettä, ruostetta, maalia, tai vieraita aineita. Epäpuhtauksien jäämä saa näkyä vain pistemäisenä tai raitamaisena lievänä jälkenä. [56, p. 12.] Kuvassa 37 on esitetty teräksen esikäsitteilyasteet.



Kuva 37. Teräksen esikäsitteilyasteet [57].

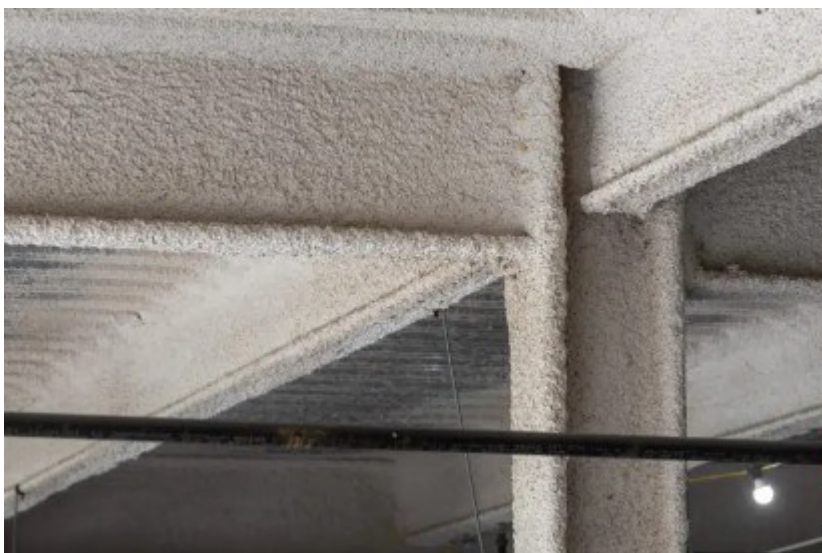
Kalvopaksuuksia täytyy valvoa, ja tarkastuksien tulee kattaa ainakin 10 % palosuojamaalatuista osista. Standardissa SFS-EN ISO 2808 on ohjeet mittausten suorittamiseen. Tarkasteltavat pisteet tulee olla eri kohdista rakennetta, esim. poikkileikkauksen eri puolilta. Kalvopaksuudet mitataan siellä, missä osat maalataan. Pohjamaalauksen kalvopaksuudelle on annettu minimiarvo 40 µm. Pohjamaalille riittää kuivan pinnan mittaaminen, jonka jälkeen arvioidaan keskimääräinen arvo kalvopaksuudelle. Palosuojamaalille tulee suorittaa maalikampamittaus märkänä, mutta tarvittaessa myös kuivakalvo mitataan eri kerrosten välissä.

Palosuojamaalin lopullinen kuivakalvo mitataan, ja siinä huomioidaan pohjamaalauksen paksuus. Kalvopaksuudella on suuri merkitys maalin toimintaan, ja sille onkin määritelty tapauskohtaisesti minimi- ja maksimiarvot. Maalatut osat tulee suojata erityisen hyvin kosteudelta, säältä ja mekaanisesti syntyviltä vaurioilta, koska maalauksen tulee olla yhtenäinen toimiakseen. Varsinkin ohutkalvoiset palosuojamaalit vaurioituvat helposti esim. iskuista. [56, pp. 8, 9.]

Maalattujen rakenteiden tiedot lisätään rakennesuunnitelmiin, sekä rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeeseen. Tiedoista tulee ilmetä käytetyn suojauksen tuotetiedot, hyväksynnit ja voimassaolo. Asennuksen tekijä ja suojauksen tarkastaja ilmoitetaan. Rakenteen aikaluokka palossa kerrotaan. Mikäli suojausta on jouduttu korjaamaan, tulee siitä merkitä tieto. Myös asennuksen ja tarkastuksen ajankohdat ilmoitetaan. [28, p. 10.] Ohutkalvoisten paisuvien pinnoitteiden kustannukseksi, 60 minuutin suojausta tavoiteltaessa standardisoidussa selluloosapalossa, arvioidaan 12–27 €/m² [58].

5.2 Ruiskutteet

Ruiskutteilla saadaan valmistettua nopeasti saumaton pinta. Ruiskutteet ovat hyviä monimutkaisissa geometrioissa, joita teräsrakenteet usein sisältävät. Ruiskutteilla voidaan tehdä paksujakin kerroksia suoraan teräsprofiilin päälle, esim. I-profiili voidaan ruiskuttaa umpeen neliönmuotoiseksi. Ruiskutteet vaativat kuitenkin yleensä tukiverkkoja, viimeistään silloin kun paksuus ylittää 45 mm. Monien ruiskutteiden yhteydessä ei tarvita erillistä korroosiosuojausta, mutta ne voidaan asentaa myös yhteensopivan maalauksen päälle. Ruiskutteita käytettäessä tulee pohjan esivalmisteluun kiinnittää erityistä huomiota, jotta saavutetaan riittävä tartunta. Ruiskutustyö vaatii myös oikeanlaiset sääolosuhteet ja erityiskalustoa. [47, pp. 56, 57, 64.] Ruiskutteet sekoitetaan yleensä veden tai ilmaan, jotta ruiskuttelelle saadaan oikea rakenne [51]. Ruiskutteiden kustannukseksi, 60 minuutin suojausta tavoiteltaessa standardisoidussa selluloosapalossa, arvioidaan 9–14 €/m² [58]. Kuvassa 38 on palosuojaruiskutteella suojattu teräsrakenteinen pilari- ja palkkirakenne.



Kuva 38. Palosuoja-ruiskutettu teräsrakenne [59].

Mineraalikuitturuiskutteen paksuus on yleensä valmiina 10–60 mm. Valmiin mineraalikuitturuiskutteen pinta on huokoinen ja pehmeä. Jos pinnalta vaaditaan kulutuksenkestävyyttä, voidaan ruiskutteen pinta maalata, rapata, suojata tai verhoilla. Kestokykyä voidaan parantaa myös lasikuitukankaan liimaamisella pintaan. Mineraalikuitturuiskutteen tiheys on n. 220–500 kg/m³. [47, p. 57.]

Vermikuliittiruiskutus on myös valmiina 10–60 mm paksu. Joitain vermikuliittimassoja voidaan rapata myös käsin. Vermikuliittiruiskutteen tiheys on n. 300–800 kg/m³. Mitä kevyempi ruiskute, sen pehmeämpi se on, mikä tarkoittaa huomattavasti kulutuksenkestävyyttä. Vermikuliittiruiskutettu rakenne voidaan suojata mekaaniselta rasitukselta, samoin kuten mineraalikuitturuiskutettu rakenne. [47, p. 58.]

5.3 Rappaus

Palosuojarappauksessa käytetään kipsilaastia, tai sementti-kalkki-hiekkalaastia. Rappaus voidaan myös ruiskuttaa, jolloin menetelmä ei eroa juurikaan tarkoitukseen tehdyistä palosuoja-ruiskutuksista. Palosuojaukseen tarkoitetun rappauksen paksuus on huomattavasti ruiskutetta suurempi, sen aineominaisuuksien takia. [47, p. 59.]

Rappaus voidaan tehdä useissa kerroksissa ja asentaa rakenteen ympärille muotoiltuun verkkoon. Rappauksen kestävyyttä voidaan parantaa lasikuituvahvikkeilla, sekä kulmasuojilla. [47, p. 59.] Rappauksen massa on ruiskutteita suurempi, millä voidaan saavuttaa suhteessa parempi lämmönsitomiskyky.

5.4 Levyt

Levyjen etuna on niiden helppo työstettävyys normaaleilla työkaluilla. Mineraalivillalevyt ovat myös kevyitä suhteessa eristyskykyyn. Levyjen asentaminen voi olla kuitenkin hidasta ja levytykset kestävät myös huonosti kolhuja, ellei niitä suojata jotenkin. Levyrakenteita voidaan kiinnittää useilla eri tavoilla. Mikäli levyjä liimataan, tulee asennusolosuhteille liimavalmistajan asettamia vaatimuksia. Liimatessa levyjä, pinnan olla myös riittävän puhdas, jotta tartunta olisi hyvä. Levyt on usein helpoin asentaa koteloksi, jossa apuna voi käyttää ohutterasprofiliileja. [47, p. 53.] Palosuojalevyjen saumoissa voidaan joutua käyttämään vahvikkeita, riittävän tiiveyden varmistamiseksi tulipalossa. Kiinnitystapaa valittaessa, huomioidaan myös kiinnitysjärjestelmän kesto onnettomuustilanteessa. [47, p. 61.] Palosuojaukseen tarkoitettujen levyjen kustannukseksi, 60 minuutin suojausta tavoiteltaessa standardisoidussa selluloosapalossa, arvioidaan 46–70 €/m² [58]. Kuvassa 39 on esimerkki I-profiilin palosuojalevytyksestä.



Kuva 39. Levyillä paloeristetty I-profiili [60].

Yleinen lämpöä eristävä palosuojamenetelmä on mineraalivillalevytys. Mineraalivillat voivat sintraantua korkeissa lämpötiloissa, joka tarkoittaa kuitujen toisiinsa sulamista. Kun mineraalivilla sintraantuu sen lämmöneristyskyky romahtaa. Sintraantuminen tapahtuu usein 800–1100°C. Mineraalivilla voidaan kiinnittää teräksen pintaan mekaanisesti teräspiikeillä ja lukituslevyillä, paineilmanauloilla tai teräspiikeillä, jotka hitsataan. Mineraalivillalevyt voidaan kiinnittää toisiinsa ruuvein, nauloin tai hakasin. Villojen paikallaan pysyminen voidaan varmistaa teräslankaverkolla. Mineraalivillaa käytettäessä suojauksen paksuus on yleensä 10–120 mm, ja tiheys 100–400 kg/m³. [47, p. 52.]

Vermikuliittilevyjen toiminta perustuu niiden suureen kidevesimäärään. Vermikuliittilevyjä on saatavilla 16–80 mm paksuisina, ja niiden tiheys on 350–500 kg/m³. Vermikuliitti on paisutettua kiillettä, jonka sideaineena käytetään esim. sementtiä. Vermikuliittilevy voidaan kiinnittää tulen kestäväällä laastilla, nauloilla tai ruuveilla. Mekaanisesti kiinnittämällä, jätetään 3 mm ilmarako suojauksen ja teräsprofiilin välille [16, p. 373]. Myös kipsilevyjen käyttö palosuojauksessa perustuu kideveden höyrystymisen aiheuttamaan lämpöenergian kulumiseen. Kidevettä sisältävillä levyillä on hiukan eristäviä ominaisuuksia, mutta jos niitä ei vahvisteta esim. lasikuituja sideaineeseen lisäämällä, ne rikkoutuvat kideveden loputtua. Palosuojauksessa käytetään yleensä 13 mm ja 15 mm paksuisia kipsilevyjä, joita voidaan asentaa useita päällekkäin. Kipsilevyjen tiheys on 770–980 kg/m³. Kipsilevyjä saa myös elementteinä eri muodoissa, jolloin esim. pyöreä pilari voidaan paloeristää liimaamalla kaksi puoliympyrän muotoista kipsilevyä yhteen. [47, pp. 53, 55.]

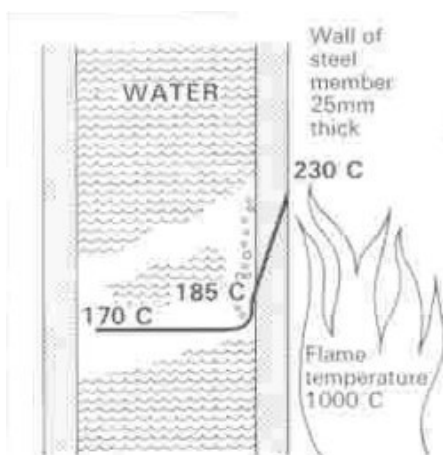
Kipsilevyjä saa myös puukuituun sekoitettuna, jonka etuna on sileä- ja kiinteäpintainen tuote. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi osastoiviin ei kantaviin seiniin. Puukuitukipsilevyä suojaverhouksena käytettynä, standardisoidussa selluloosapalossa, 10 mm paksulla levyllä saavutetaan n. 10–15 min palonkesto. Teräsrakenteen suojauksessa tulee käyttää levyjä, joissa kipsin osuus on isompi kuin normaalissa puukipsilevyssä, jolloin käytetään paksumpia 15 mm ja 22 mm puukuitukipsilevyjä. Standardisoidussa selluloosapalossa voidaan saavuttaa teräsrakenteelle 30–180 min palonkesto palosuojaukseen tarkoitetulla puukipsilevyllä. [61] Kalsiumsilikaattilevyt ovat kuituvahvistettuja ja niiden paksuus on 6–

65 mm. Kalsiumsilikaattilevyjen tiheys on 430–950 kg/m³ [47, p. 53]. Sementtiseluloosalevyjä käytetään pääasiassa ei kantavissa osastoivissa rakenteissa, ja niiden tiheys on n. 1100 kg/m³.

5.5 Vesi

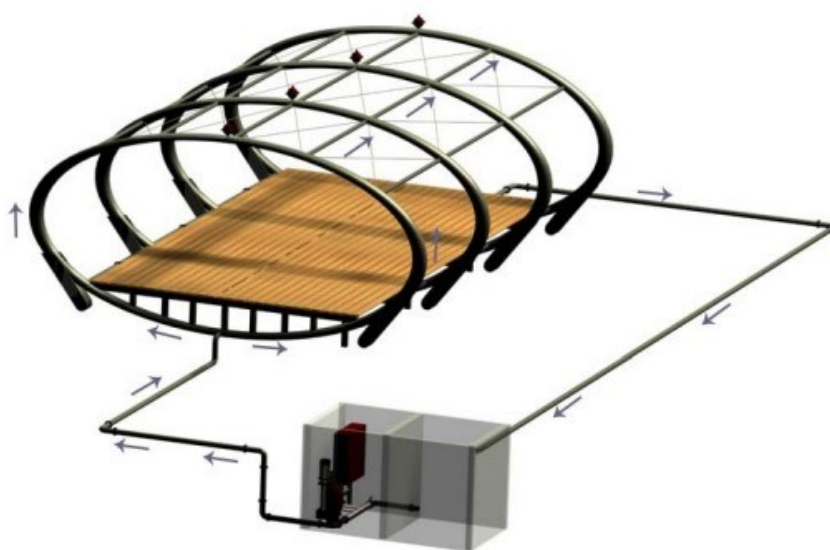
Vesi toimii palosuojamateriaalina lämpöä hidastavana, koska lämpöenergia kuluu veden lämpenemiseen ja höyrystymiseen. Putkiprofiilit on mahdollista täyttää vedellä, jolloin kuumentuva teräspoikkileikkaus siirtää lämmön veteen. Lämpönsiirtyminen on tehokkaampaa, mitä suurempi lämpötilaero veden ja poikkileikkauksen välillä on. Tämän takia parhain suojaus saadaan aikaiseksi, kun käytetään putkiverkostoa, joka siirtää painovoimaisesti kuumentunutta vettä pois. Vesitäyttö vaatii tehokkaasti toimiakseen yleensä säiliön, josta korvaavaa vettä saadaan tilalle. [16, p. 376].

Vesitäyten etuna on se, että rakenne ei tarvitse ulkopuolelle suojausta, joka kasvattaisi sen mittoja. Vesisuojaus ei myöskään vaurioidu tulipalossa, kuten muut palosuojamateriaalit, jolloin rakenne voi säilyä käyttökelpoisena heti tulipalon jälkeen. [47, p. 60.] Vesitäyttö on erittäin tehokas palosuojausmenetelmä, ja lämpötila ei normaaleissa palotilanteissa pääse nousemaan yli 250°C, kuten kuva 40 esittää. Vesikiertojärjestelmissä on aina mahdollisuus vesivuotoihin, mutta mahdollinen vuoto on helppo huomata. [16, p. 376.]



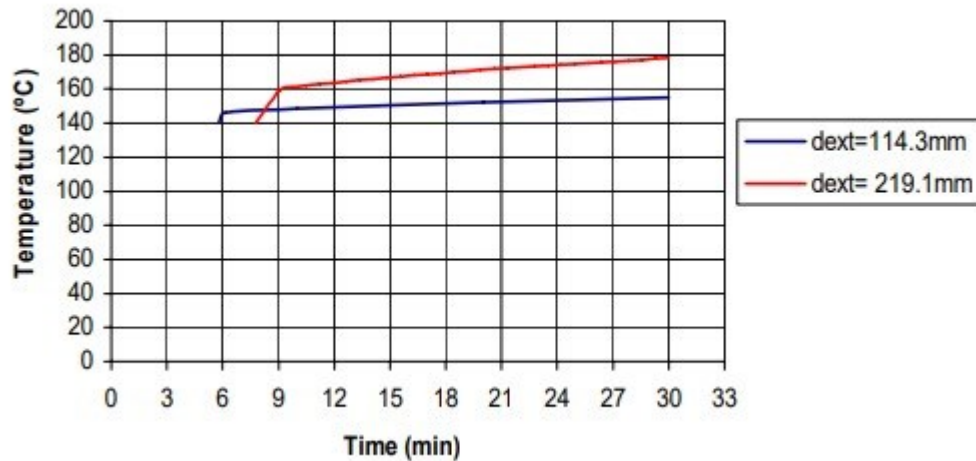
Kuva 40. Vesitäytetyn teräsputken kuumeneminen [62].

Vesikiertojärjestelmien ylläpidon ja rakentamisen kustannukset riippuvat paljon rakenteen korkeudesta. Vedellä täytetty teräs rakenne on joka tapauksessa varteenotettava vaihtoehto sen tehokkuuden vuoksi. Vesitäyttö on myös toiminnaltaan luotettava, eikä se vanhene tai hajoa, kuten perinteiset palosuojamenetelmät. Menetelmää on hyödynnetty mm. Saksassa NorConHouse:n ja Messe Frankfurt:in rakennuksissa. Kuvassa 41 on vedellä täytetty teräs rakenne, jollainen suunniteltiin Portimão:n kaupunkiin Portugalissa. Rakenteen vesikiertojärjestelmää on yhdistetty aktiivisen palosuojauksen tueksi, jolloin päästään pienemmillä kokonaiskustannuksilla ja työmäärällä. [63, pp. 1, 2.]



Kuva 41. Vedellä täytetty teräsrunko, jonka vesisäiliö toimii myös aktiivisen palosuojauksen tukena [63, p. 3].

Vesitäyttö on tehokkainta pilareilla, kun taas pitkillä palkeilla höyrystyvä vesi voi estää veden virtauksen yläosassa, jolloin rakenne pääsee kuumenemaan [47, p. 60]. Suljetussa putkessa tapahtuva höyrystyminen on monimutkainen prosessi, koska höyry ja vesi pakotetaan liikkumaan samassa tilassa. Järjestelmän paine vaikuttaa myös veden kiehumispisteeseen. Kuvassa 42 on esitetty 4 bar paineessa olevan vedellä täytetyn teräsputken lämmönnousu standardisoidussa selluloosapalossa. Kuvasta huomaa, että lämmönnousu on erittäin pientä sen jälkeen, kun vesi alkaa kiehua. [63, pp. 7, 10.]



Kuva 42. Vedellä 4 bar paineeseen täytetty teräsputki standardisoidussa selluloosapalossa [63, p. 10].

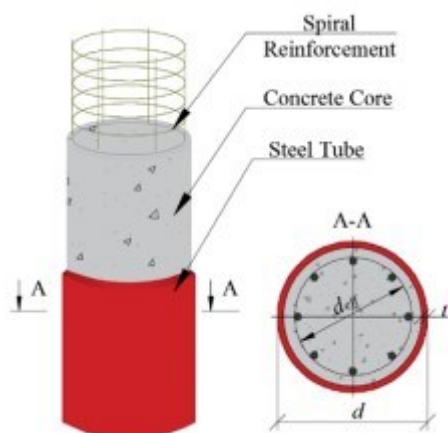
Rakenteiden sisällä olevaa vettä voidaan käsitellä samoin, kuin keskuslämmitys- ja sprinklerijärjestelmissä. Veteen kannattaa lisätä korroosion ja jäätymisenestoaineita. Käytettävästä vedestä pitäisi olla poistettu myös suola. Säiliön avoimella pinnalla voidaan käyttää öljykalvoa, mikä estää haihtumista. [63, p. 4.]

Pelkästään aktiivisessa palosuojauksessa käytetty vesivalelu, esim. sprinklerijärjestelmällä perustuu pääasiassa palotilan lämpötilan hillintään, mutta yhtenäisen vesikalvo teräsrakenteen pinnalla estää myös teräksen kuumenemisen yli 100°C. Jos vesikalvo kuitenkin rikkoutuu yhtäkkiä, kuumenee teräsrakenne erittäin nopeasti, koska lämpötila ero on suuri teräksen ja palotilan välillä. Siksi pelkkä sprinklerijärjestelmä ei riitä yleensä suojaukseksi. [47, p. 60.]

5.6 Betoni ja tiili

Betonilla ja tiilellä on suuri ominaislämpökapasiteetti, joka hidastaa lämmön nousua. Teräsprofiili on mahdollista upottaa betonin sisään, tai putkiprofiili voidaan täyttää betonilla. Betoni parantaa myös rakenteen muita ominaisuuksia, kuten puristumiskykyä ja iskunkestävyyttä. Betonitäytön raudoituksella voidaan säätää teräsrakenteen ominaisuuksia, jolloin rakennetta on helppo optimoida tarpeen mukaan, ilman ulkonäön ja dimensioiden muutosta [16, p. 375]. Kuva 43 esittää

teräsbetoni liittorakenteen. Liittorakenteella tarkoitetaan vähintään kahdesta materiaalista yhdistettyä rakennetta, joista ainakin toinen on yleensä esivalmis- teinen. Normaalialuebetoniraudoitusta ei lasketa liittorakenteeksi [64].



Kuva 43. Betonilla täytetty ja raudoitettu teräsputki [65, p. 2].

Betonin käyttö palosuojauksessa voi olla perusteltua, mikäli teräsrakenteeseen kohdistuu törmäyskuormia, eikä erilisiä törmäyssuojia ole järkevä käyttää. Betoni toimii myös syövyttävässä ympäristössä hyvin. [47, p. 59.] Kokonaan betoniin upotettu teräsrakenne on myös hyvin suojassa korroosiolta, betonin korkean alkalisuuden vuoksi, mutta betonin karbonatisoitumisen jälkeen suojaa ei enää ole [66, p. 111]. Rungon asentaminen on helppoa, koska teräspilarit täytetään betonilla asennuksen jälkeen. Putkiliittorakenteissa on oltava reiät, joista höyry pääsee poistumaan palotilanteessa. Betonilla täytetyn liittopilarin mitoitus on esitetty Eurokoodeissa EN 1994-1-1 ja EN 1994-1-2. [16, p. 376.]

Tehokkaimmillaan betonitäyttö on putkiprofiilien sisällä, tai niin, että profiili on kokonaan betonivalun sisällä. Profiilien osittaisella täytöllä saatava palosuoja-aika voi olla jopa puolet huonompi, verrattuna kokonaan täyttöön. Osittainen täyttö voidaan tehdä latomalla betoniharkkoja laippojen ja uuman väliin tai valamalla teräspilari osittain betonin sisään, jolloin voidaan lisätä myös raudoista. Osittain täytettyjen pilareiden betonista saatu lisäkantokyky huomioidaan yleensä vain palotilanteessa. Kuva 44 esittää eri vaihtoehtoja I-profiilin osittaiseen täyttöön betonilla tai betoniharkkoilla. [50]

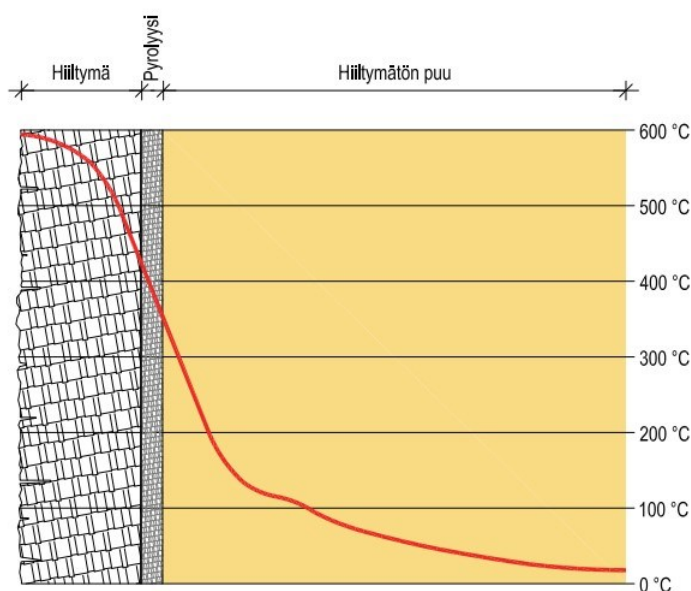


Kuva 44. I-profiilin osittainen täyttö betonilla [50].

Tiilet suojaavat rakennetta tehokkaasti, mutta ovat hitaita asentaa ja niillä ei saada rakenteelle juurikaan hyötyä, verrattuna betoniin. Tiilellä suojattu rakenne on kuitenkin betonia kevyempi vaihtoehto. Tiilen käyttö voi olla perusteltua esim. arkkitehtonisista syistä. Standardisoidussa selluloosapalossa puolen ki-
ven tiilimuurauksella voidaan saavuttaa jopa 240 minuutin palonkesto. [47, p. 59.] Kevytbetoniharkkojen toiminta palosuojauksessa on tiilen kaltainen, vaikka materiaaliominaisuudet eroavat.

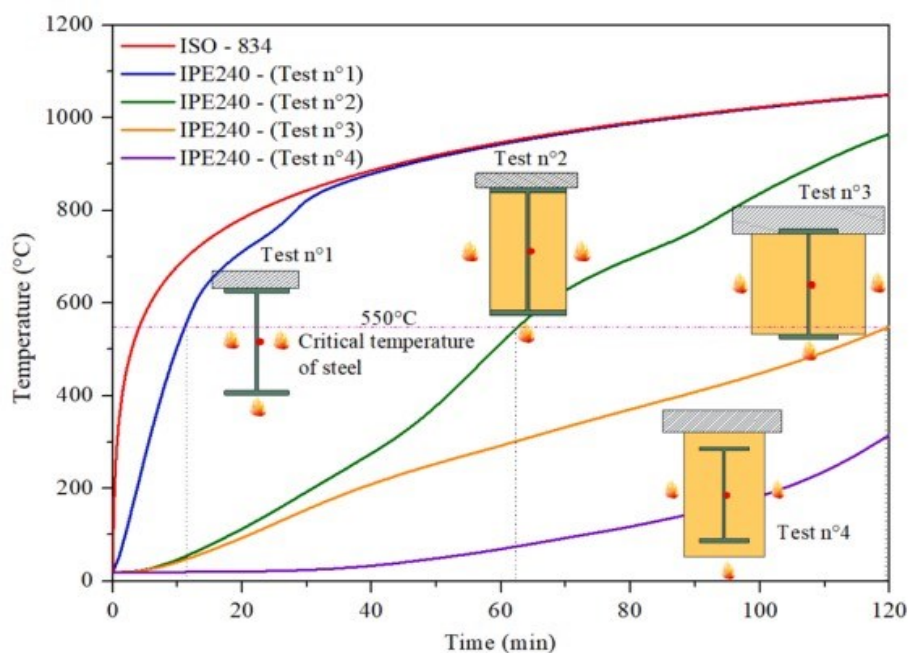
5.7 Puu

Puuta voidaan käyttää, jos palosuojamateriaali saa olla palavaa. Puu eristää lämpöä samalla tavalla, kuin palosuojamaalit, koska sen pinta hiiltyy. [47, p. 60.] Kuvasta 45 käy ilmi, että puun lämpötila putoaa merkittävästi hiiltyneen kerroksen jälkeen.



Kuva 45. Palolle altistetun puupoikkileikkauksen lämpötila [67, p. 84].

Tarvittava suojakerros on helppo määritellä hiiltymissyvyyden mukaan. Tavallinen rakentamisessa käytetty sahatavara hiiltyy n. 0,8 mm/min. Puu voi olla ratkaisu arkkitehtonisten syiden takia. Puusuojausta käytettäessä on huomioitava, että se lisää tilan palokuormaa. [47, p. 60.] Puulla suojatun IPE 240 profiilin lämmönnousu standardisoidussa selluloosapalossa, on esitetty kuvassa 46.



Kuva 46. Puulla suojatun I-profiilin lämmönnousu selluloosapalossa [68, p. 16].

Kuvassa 46 suojamateriaalina teräsprofiilille toimii massiivipuu. Testi osoittaa, että kokonaan puulla kapseloidun teräsprofiilin lämpötilan nousu pysyy pienenä. Kuvan 46 tutkimuksen yhdessä kokeessa, uunin lämpötila nousi häiriön takia ISO 834 standardipalokäyrää suuremmaksi. Noin 30 minuutin kohdalla lämpötila lähenteli 1100°C, jonka jälkeen teräksen lämpötila alkoi vasta nousta jyrkemmin. Koska aikaa oli kulunut, suojaavaa puukerrosta oli ehtinyt palaa pois jo paljon. [68] Mittaus osoittaa sen, että puu saattaisi toimia myös hiilivetypaloa vastaan.

5.8 Keraamiset ja endotermiset peitot

Joustava peitot (engl. flexible blanket system) on helposti asennettava ja kevyt palosuojausmenetelmä. Peitoissa käytetään hyödyksi eristäviä keraamisia kuituja, jonka lisäksi joihinkin peittoihin on sitoutettu vettä kemiallisesti, jolloin se suojaaa lämmöltä myös endotermisen reaktion avulla. [69] Peitot voidaan pinnoittaa säteilylämpöä heijastavalla pinnalla, joka vähentää myös konvektion vaikutusta. Kuvassa 47 on keraamisella peitolla suojattua putkistoa, josta osa on päällystetty heijastavalla alumiinikerroksella.



Kuva 47. Keraamisella peitolla eristettyä putkistoa [70].

Keraamiset kuidut on asennettu poikittain lämmönsiirtymisen suuntaan nähden, jolloin lämpö siirtyy heikommin poikkileikkauksen läpi. Kuiduissa voi olla myös suuri huokosilma pitoisuus, joka toimii tehokkaana eristeenä. [71] Peitot toimivat hyvin hiilivetypaloja vastaan. Rakentamiseen tarkoitetuilla peitoilla voidaan päästä jopa 240 minuutin palonkestoon hiilivetypalossa. Peittoja on helppo työstää, ja niitä voidaan käyttää esim. väliaikaisesti, jälkiasennuksissa, sekä

asentaa olemassa olevien palosuojauksien päälle. Peitot on myös helppo tarkastaa avaamalla ne, mikäli ne on sidottu kiristysnaruin [69]. Peitot eivät sisällä myrkyllisiä aineita, eikä kemiallisia sideaineita, joten ne soveltuvat myös herkkään ympäristöön. Peitot saattavat olla jopa puolet kevyempiä verrattuna mineraalivillaan. Peitoilla tarvittava eristepaksuus on pienempi, kuin mineraalivillalla, jonka lisäksi myös äänieristävyys on parempi. [72, p. 3.] Kuvassa 48 on esitetty teräslaipion eristys keraamisella peitolla.

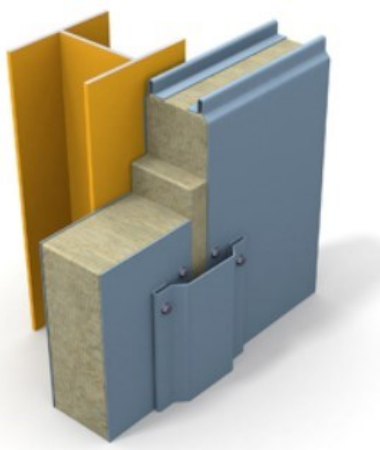


Kuva 48. Keraamisella peitolla eristetty teräslaipio [72, p. 11].

Peitoilla voidaan suojata monen muotoisia ja kokoisia rakenteita. Sovelluskohteita on paljon, kuten kantavat rakenteen, laipiot, venttiilit, laitteet, prosessiasiat, kaapelihyllyt, konehuoneet, varastot ja putkistot. Peitot kestävät hyvin mekaanista räsitusta, kosteutta, räjähdyksiä ja vaihtelevia sääolosuhteita. [71] Myös NASA on käyttänyt keraamisista kuiduista tehtyjä peittoja avaruusaluksien suojaamiseen. NASA:n käyttämä peitto eristää jopa 1650°C lämpötilalta, joka voi kohdistua avaruussukkulan kärkeen. [73]

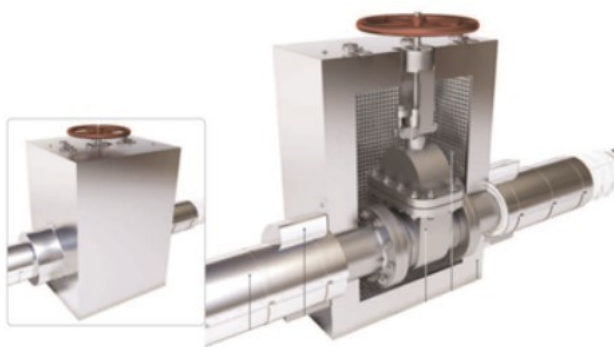
5.9 Valmiselementit ja -osat

Teräsohutlevyllä vuorattuja elementtieristeitä kutsutaan palosuojauskaseteiksi. Eristeenä terälevyjen välissä on yleensä mineraalivilla, kalsiumsilikaatti, keramminen kuitu tai vermikuliitti. [47, p. 56.] Jos suojattavaa pinta-alaa on paljon, voi kasetit olla nopea ja kustannustehokas ratkaisu, joka kestää mekaanisia rasituksia paremmin, kuin normaalit palosuojalevyt. Kuvassa 49 esimerkki mineraalivilla elementistä.



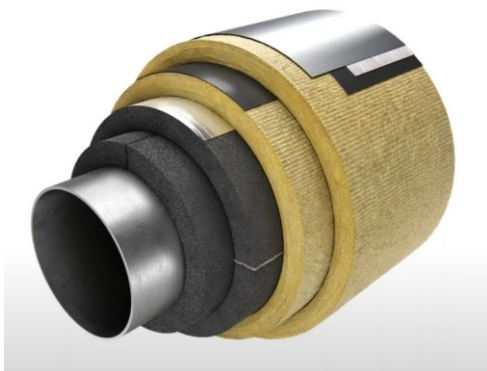
Kuva 49. Metallipintainen mineraalivilla elementti [74].

Eri valmistajilla on myös valmisosia rakenteiden suojaamiseen. Valmisosissa on yhdistelty eri suojaustapoja. Ne ovat nopeita asentaa monimutkaisille rakennosille. Valmisosat on myös yleensä testattu luotettavasti niitä riskejä vastaan, johon se on kehitetty. Ohutteräsvyillä verhoillut valmiskomponentit kestävät hyvin sääolosuhteita ja muita rasituksia. Teollisuudessa palosuojausta vaativat sulkuventtiilit ovat yksi kohde, joissa monimutkainen rakenneosaa olisi vaikea eristää muulla tavalla, niin että sillä voidaan myös operoida onnettomuustilanteessa. Kuvassa 50 on esimerkki sulkuventtiilin suojakotelosta suihkupaloa vastaan. [75]



Kuva 50. Sulkuventtiiliä suihkupalolta suojaava valmisosa [75].

Valmisosissa on usein valmiiksi mietitty suojattavan osan mahdollinen huolto ja normaali käyttö, esim. tarkastusluukuilla ja tuuletusaukoilla. Valmiita passiivisia ratkaisuja on myös kehitetty mm. putkien, kaapelihyllyjen, liikuntasaumojen ja säiliöiden suojaamiseen. [75] Yhdistelemällä materiaaleja, voi alhaisempaa lämpötilaa kestävä tuote, kuten mineraalivilla, kestää korkeampaakin räsitusta. Kuvassa 51 on teräsputki, joka on eristetty vaahtolasilla, mineraalivillalla, massa ladatulla vinyylillä ja ohutteräslevyllä [76].



Kuva 51. Suihkupaloa vastaan vaahtolasilla, mineraalivillalla, massa ladatulla vinyylillä ja ohutteräslevyllä eristetty teräsputki [76].

Kuvassa käytetty vaahtolasi on erittäin kevyttä ja kestävää, joka koostuu suu-
resta määrästä suljettuja lasikennoja. Vaahtolasi eristää hyvin -248°C :sta aina 482°C asti. Vaahtolasi on stabiili materiaali, joka kestää hyvin kosteutta, sekä mekaanista ja kemiallista räsitusta. [76]

6 Palosuojatun teräsprofiilin lämpötilan laskenta

Ozone on Liegen yliopiston kehittämä ilmainen ohjelma palosuunnitteluun, jonka voi ladata ArcelorMittal-yhtiön kotisivulta [1]. Sen omaksuminen on helppoa ja sillä voidaan tarkastella lämmönkehittymistä palotilassa 2-vyökemallina, 1-vyöhykemallina, tai näiden yhdistelmänä. Ohjelmalla voidaan tutkia myös paikallisen palon vaikutuksia, tai teräksen poikkileikkauksen lämmön nousua, palosuojattuna ja ilman palosuojasta. Ohjelma on varmistettu useilla testeillä ja virtausdynamiikan ohjelmien avulla toimivaksi. Ozonen käyttöön on ladattavissa myös selkeä opas. [77, p. 9.]

Kun palosuojamateriaalin massa, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus on tiedossa, on ohjelmalla nopea laskea teräsprofiilin kuumeneminen eri paloskenaarioissa. Palosuojamateriaalin ominaisuudet on mahdollista syöttää lämpötilasta riippuvaksi. Palosuojauksen asennustapoja ohjelmalla on vain kaksi, ääri-viivaa myötäilevä asennus ja neliönmuotoinen ontto kotelo profiilin ympärillä. Palolle altistettujen sivujen määrä on valittavissa neljäksi tai kolmeksi.

Tässä insinööritöössä laskettiin Ozone 3 -ohjelmalla, yleisimpien palosuojamateriaalien vaikutusta teräsprofiilin lämmön nousulle hiilivetypalossa. Teräspoikkileikkauksena käytettiin IPE 300 profiilia, jota altistettiin palolle neljästä suunnasta, 1-vyöhykemallilla. Teräsprofiilin lämpötilaa tarkasteltiin 60 minuuttia palon alkamisesta, eri materiaaleilla ja suojapaksuuksilla. Suojaustapojen vaikutus laskettiin ohjelman molemmilla vaihtoehdoilla. Laskentaparametrit olivat Ozone-ohjelman vakioarvoja, jotka näkyvät kuvassa 52.

Openings

Radiation Through Closed Openings: 0.8 (0 - 1)

Bernoulli Coefficient: 0.7

Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K

Initial Pressure: 100000 Pa

Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 35 W/m² K

Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m² K

Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec

Time Step for Printing Results: 60 sec

Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

☐ Extended Results

Fire Design Partial Safety Factor

$\gamma_{M, fi}$: 1

Air Entrained Model: Heskestad

Temperature Dependent Openings

Temperature Dependent: 400 °C

Stepwise Variation

Temperature °C	% of Total Openings
20	10
400	50
500	100

Linear Variation

Temperature °C	% of Total Openings
20	10
400	50
500	100

Time Dependent Openings

Time sec	% of Total Openings
0	5
1200	100

Default

Kuva 52. Ozone 3 -ohjelman vakioparametrit laskentaan.

Materiaaliominaisuuksina käytettiin lämpötilasta riippumatonta massaa, ominaislämpökapasiteettia ja lämmönjohtavuutta. Materiaalien arvot ovat keskimääräisesti ilmoitettuja lukuja, joita on taulukoitu eri lähteissä [4, pp. 42-46]. Todellisuudessa materiaalien arvot vaihtelevat huomattavasti lämpötilan funktiona, materiaalista ja valmistajasta riippuen. Ohjelma huomioi kuitenkin teräksen ominaislämpökapasiteetin muutoksen laskennassa, vaikka palosuojamateriaalille syötetäänkin lämmöstä riippumattomat arvot.

Laskennan tavoitteena oli tehdä karkeaa arviointia yleisten palosuojamateriaalien tarvittavasta suojapaksuudesta ja asennustavasta, sekä soveltuvuudesta hiilivetypaloon. Muutamille materiaaleille, kuten vedelle ja tiilelle asennustavat eivät ole realistisia, mutta helpottaa eri materiaalien vertailua keskenään. Materiaalin kosteuspitoisuutta ei myöskään huomioida laskelmissa, mikä vaikuttaa paljon mm. kipsilevyn suojaustehoon. Laskenta jättää siis paljon huomiotta todellisia tapahtumia, eikä sen myötä sovellu suoraan materiaalivalinnan lähteeksi. Kuvassa 53 on esitetty tehdyt laskelmat.

Profiili: IPE 300 **Palosuojamateriaalien arvot: lämpötilasta riippumaton**
Paloaltistus: 4-sivua **Analyysimalli: 1-vyöhyke**
Palokäyrä: Hiilivety **Mittaushetki: 60 minuuttia palon alusta**

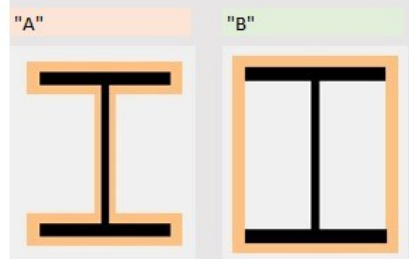
	A				A				B			
Ruiskutteet	kg/m ³	J/kgK	W/mK	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C
Mineraalikuitu	300	1200	0,12	10	741	30	482	30	419			
Vermikuliitti	350	1200	0,12	10	740	30	472	30	411			
Perliitti	350	1200	0,12	10	740	30	472	30	411			
Vermikuliitti-sementti	550	1100	0,12	10	738	30	444	30	389			
Vermikuliitti-kipsi	650	1100	0,12	10	737	30	429	30	377			

	B				B				A			
Levyt	kg/m ³	J/kgK	W/mK	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C
Kuitu-silikaatti	600	1200	0,15	10	791	30	441	30	499			
Kuitu-sementti	800	1200	0,15	10	783	30	415	30	465			
Kipsi	800	1700	0,2	10	886	30	463	30	510			
Mineraalivilla	150	1030	0,05	10	525	30	236	30	281			

	B				B				A			
Materiaalit	kg/m ³	J/kgK	W/mK	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C	mm °C
Betoni	2300	1000	1,6	30	1050	80	506	80	515			
Kevytbetoni	1600	840	0,8	30	915	80	413	80	433			
Reikätiili	1000	1200	0,4	30	709	80	246	80	259			
Puu	450	1600	0,12	30	168	80	114	80	123			
Vesi	1000	4186	0,6	30	625	80	121	80	114			
Rappaus	1800	1000	1	10	596	80	412	30	425			

Selitteet

"mm" Palosuojauksen paksuus
 "°C" Maksimi lämpötila mittaushetkellä
 "kg/m³" Massa
 "J/kgK" Ominaislämpökapasiteetti
 "W/mK" Lämmönjohtavuus



Kuva 53. Palosuojamateriaalien vaikutus IPE 300 teräsprofiilin lämmön nousuun hiilivetypalossa, kun palosuojamateriaalien ominaisuudet eivät riipu lämpötilasta.

Laskenta toteutettiin materiaaleilla, joilla suojapaksuus on mahdollista määrittellä yleisesti tunnettujen materiaaliominaisuuksien mukaan. Laskennan ulkopuolelle jätettiin sellaiset palosuojamateriaalit, jotka koostuvat useista eri elementeistä ja joiden toiminta on monimutkaisempaa. Tällaisia palosuojatuotteita on esim. maalit, peitot ja valmistuotteet. Näissä tapauksissa valmistajat ovat yleensä tehneet tuotteelle standardien mukaiset kokeet ja ilmoittavat niiden pohjalta tuotteen kestävyys palossa.

Laskelmista havaitsemme, että kaikki materiaalit pääsevät niille mahdollisella asennuspaksuudella, hiilivetypalossa reilusti alle 550°C, joka on usein teräksen kriittinen lämpötila kantavien rakenteiden mitoituksessa. Ruiskutteiden kohdalla tarvitaan sen verran suuri kerros, että niitä joudutaan todennäköisesti vahvistamaan lisäverkolla. Ruiskutteet asennetaan suoraan profiilin pintaan, mutta laskelmien perusteella ne eristäisivät lämmöltä hieman paremmin IPE 300 profiilin

tapauksessa, mikäli ne asennettaisiin kotelon muotoiseksi profiilin ympärille. Tämä voisi olla mahdollista, jos ruiskute asennettaisiin levyn päälle, mutta koska niin ei yleensä tarvitse lisäeristysten vuoksi tehdä, ei se ole järkevää. Lisälaskelmia voisi tehdä siitä, miten eri profiilien muoto vaikuttaisi ruiskutteen tehoon.

Levysuojaus hiilivetypalaa vastaan vaatii kaikissa laskelman tapauksissa vähintään kaksinkertaisen levytyksen, kun levyn paksuus on 15 mm ja teräksen kriittiseksi lämpötilaksi halutaan alle 550°C. Poikkeuksena on mineraalivillalevy, mutta laskenta ei huomioi lämmönvaikutuksesta seuraavaa mineraalivillan mahdollista sintraantumista, joka vaikuttaa sen eristyskykyyn. Mineraalivilla on kuitenkin laskelmien mukaan tehokas eriste, ja esimerkiksi teräsohutlevytys mineraalivillan päällä, saattaa suojella sitä sintraantumislämpötilalta hiilivetypalossa. Kaikilla levyillä kotelon muotoinen suojaus tuotti paremman suojaustehon, verrattuna profiilin myötäiseen asennukseen. Levyillä molemmat asennustavat ovat mahdollisia, mutta tämän laskennan perusteella kannattaa harkita mieluummin kotelon muotoista suojausta I-profiililla.

Muiden materiaalien osalta suojaustavat eivät ole aivan totuudenmukaisia, jolloin kunnollisia johtopäätöksiä teräksen lämmön noususta niillä ei voida tehdä. Laskelmasta havaitaan kuitenkin, että puu, vesi ja reikätiili on jopa kaksi kertaa tehokkaampi eristystapa hiilivetypalossa, verrattuna muihin eristystapoihin, kuten betoniin, kevytbetoniin ja rappaukseen. Betonin massa on kuitenkin yleensä laskelmaa suurempi, ja sillä saavutetaan myös muita rakenteellisia hyötyjä, verrattuna muihin suojausvaihtoehtoihin. Laskelma ei myöskään huomioi puun hiiltymistä ja palamista, mikä voi vaikuttaa tulokseen merkittävästi. Teräsprofiilin lämmön nousu, puulla suojattuna, on kuitenkin tehdyssä laskelmassa lähellä luvussa 5.7 esitettyä tutkimusta. Vedellä ei myöskään huomioida sen todellista toimintaa palotilanteessa, kun se alkaa höyrystymään. Rappauksella ei saavuteta suurta lisähyötyä lämmöneristyksessä, verrattuna ruiskutteisiin ja levyihin.

7 Teollisuuteen sopivat palosuojausmenetelmät

Hiilivetypalo ja sen yhdistelmät, ovat yleisin teollisuuden paloriski. Tämän työn tarkoituksena on tunnistaa näihin riskeihin soveltuvat palosuojamenetelmät. Oleellista valmistuotteilla on se, että ne on testattu hiilivetypaloa vastaan standardilla UL 1709, tai suihkupaloa vastaan standardilla ISO 22899-1. Teollisuudessa olisi myös hyvä, että rakenne olisi testattu UL 2431 standardilla kestämään teolliset ympäristöolosuhteet, mikä tarkoittaisi sitä, että materiaalin tulisi kuulua standardin luokkaan I-A. UL lajittelee hiilivetypaloihin soveltuvia materiaaleja taulukossa 4.

Taulukko 4. Hiilivetypaloon sopivat menetelmät [48, p. 22].

Category	UL 1709	UL 2431	Code
Epoxy Mastic and Intumescent Coatings	X	X	CDWZ
Spray-applied Fireresistive Materials	X	X	CHPX
Hydrocarbon Fire Protection	X	X	BYFH
Topcoats	X	X	XKXC2
Mineral & Fiber Boards	X		CERZ
Mat Materials	X		CEAV
Building Units	X		BZXX

Ympäristön mukaista luokittelua ei taulukon mukaan ole saatavilla mineraali- ja kuitulevyille, palosuojamatoille, sekä rakenneosille. Tuoteryhmän koodilla pääsee hakemaan UL hyväksytyjä tuotteita, UL Solutions yhtiön verkkosivuilta. Yhtiön verkkosivuilla on myös yleistä tietoa testausmenetelmistä, testattujen tuotteiden ominaisuuksia, sekä muita luokitteluun liittyviä tietoja. [51]

Samalle kohteelle ei välttämättä ole yhtä ainoa oikeaa ratkaisua. Eri suojausmenetelmien käytön yhdistelemistä kannattaa harkita, riskien ja kustannuksien mukaan. Tämän insinöörintyön pohjalta, hiilivetypaloihin ja teolliseen ympäristöön parhaiten soveltuvia menetelmiä ovat:

- Paksukalvoiset paisuvat pinnoitteet
- Teräbetoni liittorakenteet
- Keraamiset ja endotermiset peitot
- Valmisosat.

Teollisuuden rakenteen ovat usein mekaanisille rasituksille alttiita. Tavanomaisen rasiusten lisäksi, teollisuuden onnettomuustilanteissa on muitakin riskejä, kuin pelkkä tulipalo. Palosuojauksen tulee olla ehjä, jotta se toimisi oikein tulipalossa, joten se ei saisi vaurioitua iskuista. Kaikkia suojaustapoja valittaessa on hyvä huomioida edellä mainitut seikat ja selvittää mm. minkälainen räjähdyskesto tuotteella on, jos kohteessa todetaan sellainen riski. Kuumia prosesseja sisältävässä kohteessa tulee huomioida käyttölämpötilan vaatimukset palosuojatuotteille, ja esim. pinnoitteet eivät välttämättä sovellu kohteisiin, joissa voi toiminnan luonteen takia olla korkeita tai matalia lämpötiloja. Epoksipohjaiset paksukalvoiset pinnoitteet kestävät kuitenkin hyvin kemikaaleja ja sääoloja.

Teräsbetoni liittorakenteet toimivat yleensä hyvin hiilivety-paloissa, mutta vaatii erillistä rakenteen tarkastelua. Betonilla suojatun teräsrakenteen toiminta muuttuu myös normaalin rakennemitoituksen kannalta merkittävästi, eikä teollisten teräsrakenteiden betonointi aina ole mahdollista. Betonin etuna on sen lisäämä puristuslujuus teräsrakenteelle. Haittana on kuitenkin paino ja lisätyö asennuksen yhteydessä, varsinkin jos betonia ei voi valaa vain putken sisään. Putkiprofiilien täyttö betonilla on nopeaa. Jos rakenteeseen kohdistuu törmäysriski, voi betonin käyttö olla järkevää.

Keraamisille ja endotermisille peitoille, sekä valmisosille löytyy yleensä suoraan valmistajien suorittamat testit, sekä laskelmat hiilivety- ja suihkupaloja vastaan. Ne ovat nopeita asentaa ja ylimääräiseltä suunnittelulta välttyään, verrattuna esim. betonin käyttöön. Peitot ja osat ovat yleensä myös kevyitä, ja ne kestävät hyvin teollisen ympäristön rasituksia, sekä mahdollisia muita onnettomuustilanteita palon lisäksi.

Vaikka levyillä ja ruiskutteilla voitaisiin päästä riittävään suojaustasoon hiilivety-palossa, eivät ne ole välttämättä järkeviä valintoja teolliseen ympäristöön, jossa

rakenteet ovat alttiita kolhuille, tärinälle, mekaanisille rasituksille, mahdollisille räjähdyksille ja vaihteleville olosuhteille. Hiilivety ja suihkupaloissa haasteena on myös palosuojamateriaalin kiinnityksen kestävyys, sekä muodossa pysyminen. Mikäli rakenteen palosuojauksen kunto on haasteellista tarkastaa sen sijainnin vuoksi, pitäisi suojaukseen valita mahdollisimman luotettava ratkaisu. Levyt voisivat kuitenkin olla suhteessa edullinen ratkaisu, mikäli suojattavaa pinta-alaa on paljon.

Puu saattaisi mahdollisesti kestää hiilivetypaloja, mutta vaatisi lisätutkimusta. Puulla suojatun teräsprofiilin palonkestoaika voisi kuitenkin jäädä liian lyhyeksi teollisuuden tarpeille, josta viitteitä osoitti luvussa 5.7 esitetty tutkimus. Ongelmia voisi aiheuttaa myös kemikaalit, tai kosteusvaihtelu. Puun asentaminen voisi mahdollisesti olla liian hidasta teollisten rakenteiden monimutkaisille muodoille.

Vedellä täytetyt teräsputket voisivat toimia hyvin teollisuudessa hiilivetypaloja vastaan. Vesitäyttöä kannattaa harkita erityisesti, mikäli suojattavien putkien poikkipinta-alaa ei haluta kasvattaa. Jotta vesitäyttö toimisi tehokkaasti, vaatii se säiliön ja pumppausjärjestelmän, mistä voitaisiin tuoda korvausvettä kuumenneen veden tilalle. Tätä varten asennettua putkistoa ja säiliötä voitaisiin hyödyntää tietyiltä osin myös aktiivisessa palosuojauksessa.

8 Yhteenveto

Passiivinen palosuojaus on tärkeässä roolissa teräsrakenteen lämmön nousun estämisessä, koska teräksen lujuusominaisuudet heikkenevät nopeasti lämmön vaikutuksesta. Passiivinen palosuojaus auttaa rajoittamaan onnettomuuksien seurauksia ja lisää henkilöiden turvallisuutta. Passiivinen palosuojaus tarkoittaa suojaustapaa, jota ei tarvitse erikseen aloittaa onnettomuustilanteessa, vaan se on osa rakenteita, tai teknisiä ratkaisuja. Passiivinen palosuojaus voi tarkoittaa esimerkiksi lämmöneristämistä, kun taas sprinklerijärjestelmä on osa aktiivista palosuojausta.

Tässä insinöörityössä selvitettiin mitkä passiiviset palosuojausmenetelmät soveltuvat teolliseen ympäristöön. Teollisuudessa riskit ovat monimuotoiset ja vaativat usein tarkempaa tarkastelua. Teollisuudessa joudutaan ottamaan yleensä huomioon mm. hiilivetypalo, suihkupalo ja räjähdysten mahdollisuus. Työssä perehdyttiin teollisuuden eri riskeihin ja luotiin katsaus teräksen palomitoitukseen. Tarkoituksena oli eritellä passiiviset palosuojamenetelmät, jotta niiden soveltuvuutta voidaan arvioida. Yleisimpien palosuojamateriaalien vaikutusta teräksen lämmön nousuun laskettiin Ozone 3 -ohjelmalla. Tavoitteena oli luoda kooste, joka helpottaa teräksen passiivisen palosuojauksen valitsemista teollisuuteen, rakennesuunnittelijan näkökulmasta.

Suurimman paloriskin teollisuudessa aiheuttaa hiilivetypohjaiset aineet. Teollisuudessa palosuojataan kantavia rakenteita, prosessialueita, vallitiloja, pumpaamoita, vuotoriskialueita, laitteiden runkoja, putkia, putkisiltoja ja kannattimia. Myös erilaiset suojajärjestelmät ovat yleensä palosuojattavia, joita ovat mm. turvasulkuventtiilit, painejärjestelmän suojalaitteet, hätäpaineenalennus ja tyhjenysjärjestelmät, sekä turvallisuuteen vaikuttavat kaapeloinnit. Dominoefektit on huomioitava myös.

Teräksen lämmönestoon voidaan käyttää lämmönjohtavuuden pienentämistä, lämpökapasiteetin parantamista, lämmön siirtämistä fysikaaliseen tai kemialliseen reaktioon, rakenteellisia valintoja, tai säteilylämmön vaikutuksen pienentämistä. Suojausta valittaessa huomioidaan asennettavuus, käyttöolosuhteet ja

koko elinkaaren kustannukset. Materiaalien ominaisuudet tarkastetaan tuote-kohtaisesti, kun laskentaa suoritetaan. Materiaaleille tulee olla tehtynä asianmukaiset testaukset, joissa tarkastellaan lämmönjohtavuutta, muodossa pysymistä ja kiinnipysymistä. Materiaaleille tulee olla tiedossa tarpeen mukaiset mekaaniset ominaisuudet, sekä kestävyys sääoloja ja räjähdyksiä vastaan.

Passiivisia palosuojamenetelmiä ovat paisuvat pinnoitteet, ruiskutteet, rappaus, levyt, vesi, betoni, tiili, puu, peitot ja valmistuotteet. Paisuvat pinnoitteet jaetaan ohut- ja paksukalvoisiin pinnoitteisiin. Paisuvien pinnoitteiden etuna on pieni suojakerros ja siisti pinta. Paksukalvoiset pinnoitteet kestävät paremmin mekaanista rasitusta ja sääoloja kuin ohutkalvoiset. Ruiskutteilla saadaan nopeasti paksu suojakerros, myös monimutkaisille rakenneosille. Palosuojarappaus on suojaominaisuuksiltaan lähellä ruiskutteita.

Levyjä on helppo työstää ja niitä on hyvin saatavilla. Joidenkin levyjen toiminta perustuu suurelta osin niiden sisältämään kideveteen, joka rajoittaa lämmön nousua veden höyrystymisen ajan. Pelkkä vesi on myös tehokas palosuojamateriaali, joka parantaa rakenteen ominaislämpökapasiteettia. Veden etuna passiivisessa palosuojauksessa on se, että suojausjärjestelmä ei vaurioidu tulipalossa.

Betoni, tiili ja puu ovat kaikki hyviä tapoja estää lämmön nousua. Puu eristää hyvin, mutta lisää tilan palokuormaa. Betoni parantaa rakenteen muita ominaisuuksia, vaikka lisääkin painoa merkittävästi. Keraamiset ja endotermiset peitot kestävät ja eristävät hyvin kuumia lämpötiloja pitkään. Ne ovat myös erittäin kevyitä ja kestäviä mekaanisia rasituksia vastaan. Valmiselementeissä- ja osissa on yhdistelty useita materiaaleja. Ne voivat olla nopeita asentaa ja tehokkaita ratkaisuja. Valmisosat mahdollistavat myös joustavan operoinnin suojattavan kohteen kanssa. Valmisosat ovat yleensä polttokokein testattuja.

Työssä laskettiin yleisimpien palosuojamateriaalien vaikutusta teräksen lämmön nousuun Ozone 3 ohjelmalla. Tuloksena havaittiin, että ruiskutteet, levyt ja materiaalit toimivat hyvin hiilivetyjä vastaan. Laskennassa oli kuitenkin rajoitteita, jotka voivat vaikuttaa tuloksiin, eikä tuloksia voi suoraan hyödyntää.

Parhaiten lämmönnousua materiaali kategoriassa estivät tiili, puu ja vesi. Eri ruiskutteen ja levyt pärjäsivät tasaisesti. Levyistä paras lämmönnousun estokyky oli mineraalivillalla.

Hiilivetypaloihin soveltuvia menetelmiä on useita. Valmistuotteilla olisi tärkeää, että tuotteet olisi testattu standardin UL 1709 mukaisesti hiilivetypaloa vastaan ja standardin ISO 22899-1 mukaisesti suihkupaloa vastaan. UL 2431 luokittelee materiaalin soveltuvuutta ympäristöolosuhteisiin. Teollisuudessa materiaalin tulisi kuulua luokkaan I-A. Hiilivetypaloihin luokiteltuja menetelmiä, UL 1709 mukaisesti, ovat laajenevat pinnoitteet, levyt, matot, ruiskutteen, sekä valmistuotteet. Tässä työssä arvioitiin eri menetelmien soveltuvuutta teollisuuteen. Tuloksena todettiin, että parhaat menetelmät teollisuuteen ovat paksukalvoiset pinnoitteet, teräsbetoni liittorakenteet, keraamiset ja endotermiset peitot, sekä valmisosat.

Tulevaisuudessa hiilivetypalojen todennäköisyys tulee pienentymään, kun fossiilisten polttoaineiden määrää vähennetään. Teollisuudessa käsitellään kuitenkin paljon muitakin aineita, jotka vaativat passiivista palosuojausta. Insinöörietyön tuloksena syntyi tietokooste teollisuuden onnettomuusriskeistä ja palosuojattavista kohteista. Tämä työ helpottaa teollisuuden passiiviseen palosuojaukseen perehtymisestä, ja siihen liittyvien asioiden tuntemista. Tuloksia voidaan käyttää apuna, kun arvioidaan, millainen passiivinen palosuojaus soveltuu teolliseen ympäristöön. Eri menetelmien soveltuvuutta arvioitiin kirjallisuuskatsauksen avulla, ja laskemalla teräsprofiilin lämmönousemista hiilivetypalossa eri palosuojausmenetelmillä.

9 Lähdeluettelo

- [1] ArcelorMittal, "OZone 3," [Online]. Available:
<https://constructalia.arcelormittal.com/en/tools/software>.
- [2] SFS 3353:2019, "Palavien kemikaalien tuotantolaitos".
- [3] Metallinjalostajat ry, Teräskirja (9. painos), Bookwell Oy, 2014.
- [4] U. Siikanen, Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia, Helsinki:
Rakennustieto Oy, 2014.
- [5] K. Suvanto, *Rakennusfysiikan kurssi*, Metropolia, 2021.
- [6] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera ja D. P. DeWitt, Introduction
to Heat Transfer, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [7] RIL 270-2018, Palokatkojen suunnittelu, toteutus ja huolto, Helsinki:
Hansaprint Oy, 2018.
- [8] RIL 195-1-2018, Rakenteellinen paloturvallisuus. Yleiset perusteet ja
ohjeet, Grano Oy, 2018.
- [9] J. Jämsä, "Rakenteellinen paloturvallisuus rakennussuunnittelussa,"
Pelastusopisto, 2014.
- [10] J. Jantunen, "Perustelumistio: Ympäristöministeriön asetus rakennusten
paloturvallisuudesta," Ympäristöministeriö, 2017.
- [11] 28.11.2017/848, "Ympäristöministeriön asetus rakennusten
paloturvallisuudesta".
- [12] Knauf insulation, "technical solution," [Online]. Available:
<https://www.knaufinsulation-ts.com/reaction-to-fire-vs-fire-resistance>.
[Haettu 1. 1. 2023].
- [13] 5.2.1999/132, "Maankäyttö- ja rakennuslaki".
- [14] E. Lehtimäki, "TE300 - Teräsrakenteet 3 - Teräs tulipalossa," [Online].
Available: https://morkolearning.com/lesson_TE300.php. [Haettu 30. 1.
2023].
- [15] Hämeen ammattikorkeakoulu, Teräsrakentaminen, Saarijärvi: Saarijärven
Offset Oy, 2008.

- [16] SSAB, SSAB Domex Tube. Rakenneputket. EN 1993 - käsikirja, Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy, 2016.
- [17] SFS-EN 1991-1-2+AC, "Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset".
- [18] SFS-EN ISO 13702:2015, "Petroleum and natural gas industries. Control and mitigation of fires and explosions on offshore production installations. Requirements and guidelines".
- [19] SFS-EN 1993-1-2, "Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–2: Yleiset säännöt. Rakenteen palomitoitus".
- [20] Teräsrakenneyhdistys ry, Eurocode 3 -Oppikirja. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus (toinen painos), Helsinki: Forssa Print, 2014.
- [21] L. T. Phan, T. P. McAllister, J. L. Gross ja M. J. Hurley, "Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings," National Institute of Standards and Technology , 2010.
- [22] T. Domański ja K. Kmiecik, "Load-bearing capacity of the steel-to-timber connections in fire temperature," 2018.
- [23] Paroc, "Palosuojausopas 1/Teräs," 2019. [Online]. Available: <https://www.paroc.fi/kayttokohteet/palosuojaus>. [Haettu 30. 1. 2023].
- [24] R. Williams, "Rapid Rise Hydrocarbon Fires – An Engineering Perspective," Journal of petroleum technology, [Online]. Available: <https://jpt.spe.org/rapid-rise-hydrocarbon-fires-engineering-perspective>. [Haettu 24. 1. 2023].
- [25] SFS-EN 1363-2, "Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures".
- [26] FDS Tutorial, "What is FDS," [Online]. Available: <https://fdstutorial.com/what-is-fds/>. [Haettu 20. 1. 2023].
- [27] SFS 3350:2016, "Palavien nestemäisten kemikaalien varastopaikka ja siellä olevat kemikaalien käsittelypaikat".
- [28] Ympäristöministeriö, "Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus - Teräsrakenteet," 2019.

- [29] SFS-EN 1090-2:2018, "Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteiden tekniset vaatimukset".
- [30] Suomen Kaasuyhdistys ry, "LNG-asiakassäiliöt," [Online]. Available: <https://tukes.fi/teollisuus/maakaasu-ja-biokaasu/maakaasun-varastointi>. [Haettu 23. 1. 2023].
- [31] C. Yuhang, F. Jun, Z. Xiaolei, M. Yanli, L. Yujie, T. Ran ja H. Longhua, "Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances," 2021.
- [32] EarthLabs, "Living in a Carbon World. Part D: Fossil Fuels, Hydrocarbons and CO₂," [Online]. Available: <https://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/1d.html>. [Haettu 16. 1. 2023].
- [33] R. Stølen, R. F. Mikalsen, K. Glansberg ja E. D. Wormdahl, "Heat flux in jet fires: Unified method for measuring the heat flux levels of jet fires," 2018.
- [34] V. Praveen, K. T. Gireesh, K. V. Pushpendra ja P. Adriana, "Evaluation of flame geometry of horizontal turbulent jet fires in reduced pressures: A numerical approach," 2022.
- [35] TOKEVA, "Liite ohje T1. Räjähde tulipaloissa, lisätietoa," 2012.
- [36] Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes), "Tuotantolaitosten sijoittaminen," 2015.
- [37] R. K. Eckhoff, "Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review," 2013.
- [38] A. Chakrabarty, S. Mannan ja T. Cagin, "Multiscale Modeling for Process Safety Applications," 2015.
- [39] M. Martin, "Sustainable Design for Renewable Processes," 2021.
- [40] Työterveyslaitos, "OVA-ohjeet. Happi," 2022. [Online]. Available: <https://www.ttl.fi/ova/happi>. [Haettu 16. 1. 2023].
- [41] TOKEVA, "Onnettomuustilastot 2011–2018. 10 Kemikaalionnettomuudet Suomessa 2011–2018," 2020. [Online]. [Haettu 16. 1. 2023].
- [42] Pelastusopisto, "PRONTO," [Online]. Available: <https://www.pelastusopisto.fi/tutkimus-ja-tietopalvelut/tki-palvelut/tilastot-pronto/>. [Haettu 23. 3. 2023].

- [43] Työterveyslaitos, "OVA-ohjeet. Vety," 2022. [Online]. Available: <https://www.ttl.fi/ova/vety>. [Haettu 16. 1. 2023].
- [44] V. Jokinen, Kirjoittaja, *CHEM-C2440, Materiaalien Mikrorakenne, L6: Murtuminen*. [Performance]. 2020.
- [45] SUM Ltd, "Orders," [Online]. Available: <https://sumltd.com/order/>. [Haettu 24. 1. 2023].
- [46] G. D'Ovidio, F. Martín-Fuertes, J. C. Marugan, S. Bermejo ja F. S. Nitti, "Lithium fire protection design approach in IFMIF-DONES," 2022.
- [47] P. Iso-Mustajärvi ja T. Inha, Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus, Tampere: Tammer-Paino Oy, 1999.
- [48] UL LLC, "Best Practice Guide for Passive Fire Protection for Structural Steelwork. FIRE RESISTANCE AND EXTERNAL EXPOSURE CHARACTERISTICS," 2018.
- [49] G. Patrícia, "The different types of Intumescent Coatings & their benefits," Nullfire, 2022. [Online]. Available: <https://www.nullfire.com/en-gb/expert-insights/expert-advice/the-different-types-of-intumescent-coatings-their-benefits/>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [50] SteelConstruction.info, "Fire protecting structural steelwork," [Online]. Available: https://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork. [Haettu 17. 2. 2023].
- [51] UL LLC, "UL Product iQ," [Online]. Available: <https://iq.ulprospector.com/>. [Haettu 23. 2. 2023].
- [52] Tata Steel; The British Constructional Steelwork Association, "Steel construction, Fire protection," 2013.
- [53] AkzoNobel, "International Chartek 7," [Online]. Available: <https://www.international-pc.com/products/chartek-7>. [Haettu 22. 2. 2023].
- [54] S. Mohammadi, H. Shariatpanahi ja F. A. Taromi, "Influence of hybrid functionalized graphite nanoplateletstripolyphosphate on improvement in fire protection of intumescent fire resistive coating for steel structures," 2015.

- [55] Hempel, "Key considerations in intumescent coating system selection," [Online]. Available: <https://www.hempel.com/en-sea/markets/infrastructure/fire-protection/technical-articles/key-considerations-in-intumescent-coating-system-selection>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [56] SFS-EN ISO 8501-1, "Teräspintojen esikäsittely ennen pinnoitusta maalilla tai vastaavilla tuotteilla. Pinnan puhtauden arviointi silmämääräisesti. Osa 1".
- [57] Graco Inc, "Surface prep standards explained - SSPC/NACE & ISO 8501," [Online]. Available: <https://www.graco.com/us/en/contractor/solutions/articles/surface-prep-standards-explained-sspc-nace-iso-8501.html>. [Haettu 9. 1. 2023].
- [58] WSP; BSA, "The impact of automatic sprinklers on building design," 2017.
- [59] S. Wahl, "Fireproofing," Ocean fireproofing, [Online]. Available: <https://oceanfireproofing.com/what-is-fireproofing/>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [60] Fogo, "Fire protection of Steel Constructions," [Online]. Available: <https://fogo.lt/en/galleries/atsparumas-ugniai/>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [61] RT 32-10654, "Puukipsilevyt. Rakennuslevyt," Rakennustieto Oy, 1998.
- [62] British Steel Corporation: Tubes Division, "Water filled structures," Gordon Cooke – Fire Safety Consultant UK 2012, 1973. [Online]. Available: <http://www.cookeonfire.com/about-me/publications/>. [Haettu 18. 2. 2023].
- [63] A. M. Correia ja J. P. Correia Rodrigues, "Fire resistance of a water filled cooled structure," 2006.
- [64] Betonia Oy, "Elementti suunnittelu: Liittorakenteet," [Online]. Available: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/liittorakenteet>. [Haettu 18. 2. 2023].
- [65] A. L. Krishan, E. A. Troshkina ja M. A. Astafyeva, "Strength of Short Concrete Filled Steel Tube Columns with," 2017.
- [66] Suomen Betoniyhdistys ry, Betonitekniikan oppikirja by 201, Vaasa: Waasa Graphics Oy, 2018.

- [67] Puuinfo Oy, "Paloturvallinen puutalo: Asuin- ja toimitilarakentaminen," 2021.
- [68] M. H. Nguyen, S.-E. Ouldboukhitine, S. Durif, V. Saulnier ja A. Bouchair, "Passive fire protection of steel profiles using wood," 2022.
- [69] 3M, "Protective Wrap Systems," [Online]. Available: https://www.3m.com/3M/en_US/building-construction-us/applications/firestop/protective-wrap-systems/. [Haettu 17. 2. 2023].
- [70] CCEWOOL, "Ceramic Fiber Blanket with Aluminum Foil," [Online]. Available: <https://www.ceramicfibres.com/ccewool-ceramic-fiber-blanket-with-aluminum-foil-product/>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [71] ZiBo Double Egret Thermal Insulation Co., Ltd, "Insulation mechanism of insulation 50mm foil ceramic fiber blanket," [Online]. Available: https://www.ceceramicfiber.com/Article/Insulationmechanismo_1.html. [Haettu 17. 2. 2023].
- [72] Morgan Thermal Ceramics, "Marine & offshore fire divisions bulkhead, deck & floor systems".
- [73] A. Heiney, "Special Blankets Shield the Shuttle from Heat," NASA's John F. Kennedy Space Center, [Online]. Available: https://www.nasa.gov/missions/shuttle/f_blankets.html. [Haettu 20. 2. 2023].
- [74] Paroc, "Metallipintaiset sandwich-elementit," [Online]. Available: <https://www.paroc.fi/kayttokohteet/rakennusten-eristaminen/metallipintaiset-sandwich-elementit>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [75] Forfyre, "FIRE PROTECTION," [Online]. Available: <http://www.forfyre.com/brandwerende-isolatie-materialen-en-gecertificeerde-systemen/>. [Haettu 17. 2. 2023].
- [76] A. Cusick ja D. Fast, Kirjoittajat, *Passive fire protection systems in industrial applications*. [Performance]. 2022.
- [77] Teräsrakenneyhdistys ry, "Kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu. pALOHAnke. Osatehtävä 2," 2019.