

Kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu pALOHAnke

Osatehtävä 2

RAPORTTI

22.10.2019



Kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu pALOHAnke

Osatehtävä 2

RAPORTTI

22.10.2019



Teräsrakenneyhdistys
Finnish Constructional Steelwork Association

RAMBOLL

ESIPUHE

Tämä Teräsrakenneyhdistys ry:n julkaisema tekninen julkaisu sisältää vuosina 2018-2019 toteutetun Kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkestävyyteen perustuvan suunnittelun, lyhyesti ALOHA-hankkeen, osatehtävän A.2 loppuraportin. Osatehtävästä A.2 vastasi Ramboll Finland Oy. Julkaisun tarkoituksena on toimia tietopakettina ja ohjeena suunnittelijoille, hankkeisiin osallistuville osapuolille sekä suunnitelmia tarkastaville rakennusvalvonta- ja pelastusviranomaisille. Tavoitteena on päivittää ja täydentää aiempia ohjeistuksia sekä edistää toiminnallisen palomitoituksen hyödyntämistä teräsrakenteiden mitoituksessa. ALOHA-hankkeesta julkaistaan erillisenä julkaisuna myös osatehtävän A.1 tulokset.

ALOHA-hankkeessa olivat mukana seuraavat yritykset ja organisaatiot:

Teräsrakenneyhdistys ry, Ramboll Finland Oy, A-Insinöörit Suunnittelu Oy, SSAB Europe Oy, Ruukki Construction Oy, Sweco Rakennetekniikka Oy, Sitowise Oy, Peikko Finland Oy, SS-Teracon Oy, Citec Oy Ab, Stalatable Oy ja Tampereen Yliopisto.

Teknisen julkaisun sisältö on tarkastettu huolellisesti, mutta kuten aina inhimillisessä toiminnassa, julkaisuun on saattanut jäädä virheitä. Ristiriitatapauksissa on luonnollisesti käytettävä standardin tai lain ja asetuksen mukaista menettelyä. Teräsrakenneyhdistys ry tai kirjoittajat eivät vastaa teknisissä julkaisuissa esitettyjen ohjeiden sovelta-misesta aiheutuvista välittömistä tai välillisistä vahingoista. Sarjassa ”tekniset julkaisut” julkaistut artikkelit ovat luonteeltaan ohjeellisia.

Teräsrakenneyhdistys ry kiittää kaikkia ALOHA-hankkeeseen ja julkaisun kirjoittamiseen osallistuneita henkilöitä.

Janne Tähtikunnas
Teräsrakenneyhdistys

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	2
2. PALOTURVALLISUUDEN SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT	3
2 TOIMINNALLISESSA PALOMITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT 4	
2.1 Yleistä.....	4
2.2 Nimelliset lämpötila-aikakäyrät	5
2.2.1 Standardipalon lämpötila-aikakäyrä.....	5
2.2.2 Ulkopuolisen palon käyrä.....	5
2.2.3 Hiilivetykäyrä.....	5
2.3 Palotehon määrittäminen	6
2.3.1 Palotehon kehittyminen	6
2.3.2 Maksimipaloteho: Polttoaineen rajoittama palo	7
2.3.3 Jäätymisvaihe	7
2.4 Paikallisen palon mallit	8
2.5 Vyöhykemallit.....	8
2.5.1 Yleistä.....	8
2.5.2 OZone	9
2.5.3 ELEFIR-EN	10
2.6 Palosimulointi	10
2.6.1 PyroSim / FDS	10
2.6.2 SAFIR.....	11
2.7 Lämmönsiirtyminen rakenteisiin	11
2.7.1 Laskelmat.....	11
2.7.2 Liitokset	13
2.9 Sprinklauksen huomioon ottaminen.....	14
2.10 Hyväksymiskriteerit	16
3. Toiminnallisen palomitoituksen kulku tyypillisessä projektissa	17
3.1 Paloturvallisuussuunnittelun prosessi.....	17
3.2 Viranomaisyhteistyö ja kolmannen osapuolen tarkastelu.....	17
3.2.1 Viranomaisyhteistyö.....	17
3.2.2 Kolmannen osapuolen tarkastelu	18
3.3 Ohjeet raportointiin	19
3.3.1 Suunnitelma viranomaiselle.....	19
3.3.1.1 OSA 1 Esitietopaperi.....	19
3.3.1.2 OSA 2 Raportti.....	20

3.3.2 Pelastussuunnitelmat	20
3.3.3 Huolto- ja käyttöohje	21
4. ESIMERKKIKOHDE	22
4.1 Kohteen esittely	22
4.2 Paloskenaariot ja mitoituspalot	22
4.3 Laskelmat	23
4.4 Tulosten tarkastelu	27
4.4.1 Tapaus 1: Esiintymislavan palo	29
4.4.2 Tapaus 2: Myyntikojujen palo	31
4.4.3 Tapaus 3a Katsomopalo.....	34
4.4.4 Tapaus 3b Katsomopalon herkkyystarkastelu	36
6. Yhteenveto	38
Lähteet	39

1. Johdanto

Raportissa käsitellään kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuvaa suunnittelua ja luodaan yksi esimerkkitapaus aiheeseen liittyen.

Rakennuksen olennaisten teknisten vaatimusten täytyminen paloturvallisuuden kohdalla voidaan toteuttaa asetuksen mukaisesti kahdella tavalla. Perinteisesti käytetty tapa on suunnitella Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta esitettyjen luokkien ja lukuarvojen mukaisesti ja näin täyttää rakennukselle asetetut vaatimukset. Näille P1, P2 ja P3-paloluokan rakennuksille annetaan palonkestävyysvaatimus, joka osoitetaan R -kirjaimella ja sen perässä olevalla luvulla, joka kertoo palonkestävyysvaatimuksen minuutteina. Arvot vaihtelevat paloluokasta ja -kuormasta riippuen eri rakennuksissa R30 ja R240 välillä. Taulukkomitoitus perustuu standardipalon lämpötila-aikakäyrään, mikä kuvaa tavanomaisien palojen äärimmäisiä arvoja, eikä siihen voi yhdistää kohteen tai palon ominaisuuksia. Myöskään palon syttymis- tai kytemisvaihetta ja palon jäähtymistä ne eivät sisällä.

Oletetun palokehityksen mitoitustapauksissa ei käytetä R kirjainta osoittamaan rakennusosien kantavuusvaatimusta. Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta oletettuun palonkehityksen riittävälle paloturvallisuudelle annetaan vaatimukset erikseen; rakennus ei riittävällä luotettavuudella saa sortua palon eikä jäähtymisvaiheen aikana. Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa kantavien rakenteiden palokäyrä määritetään tapauskohtaisesti ja palamiseen kuluva aika riippuu palokuorman laadusta ja määrästä. Kohteessa voi olla useampia mitoittavia palotehokäyriä riippuen paikallisen palon sijainnista. Palon koko (mitoituspalon pinta-ala), sijainti ja kehitymisnopeus sekä palavien aineiden ominaisuudet otetaan mitoituksessa huomioon. Oletetussa palonkehityksessä voidaan ottaa huomioon lämpötilan hitaampi nousu ja automaattisen sammuuslaitteiston kantavien rakennusosien jäähtytys. Paloluokka P0 on käytössä oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa, kun rakennus oleellisilta osin tai kokonaan perustuu kyseiseen menetelmään. Raportissa esitetään oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnitelmassa käytettäviä menetelmiä ja ohjelmia. Niitä no käytetty raportin esimerkkikohteessa.

Menetelmään perustuva suunnittelu on aina kohdekohtaista, jolloin suunnitteluryhmän ja viranomaisten yhteistoiminta projektissa on tehtävä mahdollisimman joustavaksi. Yhteisten käytäntöjen luominen edes auttaa suunnitteluprosessin etenemistä. Paloturvallisuussuunnittelijan ja 3. osapuolen tarkastelun kiinnittäminen hankkeen alkuvaiheessa on suotavaa, sillä hankkeen edetessä muutosten tekeminen voi osoittautua hankalaksi. Viranomaisten käytäntöjen yhtenäistämiseksi oletettuun palonkehitykseen perustuvassa

suunnittelussa esitetään käytettäväksi esitietopaperia ja raporttia mitoituksista. Oletetun palonkehityksen suunnittelun myötä on mahdollista saavuttaa rakenteiden kevyempi suojaus tai rakenteet ilman palosuojausta (esim. pienen palokuorman tilat tai korkealla sijaitsevat rakenteet). Tavoitteena on paloturvallisempi ja kustannustehokkaampi ratkaisu.

2. PALOTURVALLISUUDEN SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT

Rakentamisen kannalta tärkein dokumentti on maankäyttö- ja rakennuslaki, jossa on säädetty alueiden ja rakennusten suunnittelua, rakentamista ja käyttöä (MRL, §2 (21.12.2012/958)). Yksi olennaisten teknisten vaatimuksien ehdoista on paloturvallisuus. Palomitoituksen kannalta merkittävää on tutustua erityisesti paloturvallisuuden vaatimuksiin, mutta myös rakenteita koskeviin määräyksiin. (MRL, §117a (21.12.2012/958)) Rakennushankkeeseen ryhtyvä huolehtii, että rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa huomioidaan paloturvallisuuden vaatimukset rakennuksen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla. Paloturvallisuudelle asetetut vaatimukset täyttävän rakennuksen kantavat rakenteet kestävät palotilanteessa niille asetetun vähimmäisajan. Palotilanteessa tulee ottaa huomioon rakennuksen rakenteiden sortuminen, poistumisen turvaaminen, pelastustoiminta ja palon hallintaan saaminen. Rakennustuotteiden sekä teknisten laitteistojen on oltava paloturvallisuuden kannalta soveltuvia ja palon sattuessa rakennuksessa olevien on voitava pelastautua tai kohteessa olevat henkilöt on mahdollista pelastaa tavalla, jossa pelastushenkilöstön turvallisuus on huomioitu. (MRL, §117a (21.12.2012/958)) Tarkemmat säännökset esitetään Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta (MRL, §117b (5.2.1999/132)). Ympäristöministeriön asetukset kertovat, miten olennaiset tekniset vaatimukset täytetään ja suunnittelemalla rakennukset niiden mukaisesti päästään vaatimusten mukaiseen lopputulokseen (RIL 195-1-2018: s. 15). Rakennustyöhön ryhtyvän on maankäyttö- ja rakennuslain nojalla osoitettava rakennuksen turvallisuus.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta pohjautuu Maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) ja sen pykälään 117b. Se antaa tarkempia säännöksiä uudisrakentamiseen ja rakennuksen laajentamiseen tai kerrosalaan laskettavan tilan lisäämiseen. Asetusta voidaan soveltaa myös korjaus- ja muutostyöhön siinä tapauksessa, kun rakennus tai sen osa muuttuu vaarallisemmaksi paloturvallisuuden osalta. Vuoden 2018 alussa voimaan astunut uusittu Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta on korvannut vanhan E1 asetuksen. (SRMK, YM Asetus, 2017, §1) Ympäristöministeriö voi julkaista ohjaavia ja opastavia normeja, jotka ovat säädökset täyttäviä ratkaisuja, mutta ei juridisesti velvoittavia. Noudattamalla ohjeita viranomaisten tulisi kuitenkin hyväksyä ratkaisu. Myös standardeista osa voi olla velvoittavia, mutta ne on erikseen säädetty ylemmän tason normissa. Muita kuin ohjeita, standardeja tai muita opastavia ja ohjaavia normeja käyttämällä täytyy osoittaa ratkaisuiden rakentamiselle asetettujen olennaisten teknisten vaatimusten täyttyminen. (RIL 195-1-2018: s. 11-12)

Maankäyttö- ja rakennuslaissa asetettujen olennaisten teknisten vaatimusten osoittaminen voidaan toteuttaa asetuksen mukaan kahdella tavalla. Asetuksessa esitettyjä luokkia ja lukuarvoja noudattamalla voidaan täyttää rakennukselle asetetut vaatimukset tai vaihtoehtoisesti rakennus voidaan suunnitella ja rakentaa oletettuun palonkehitykseen perustuen, jolloin kohteessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet otetaan huomioon tapauskohtaisesti. Suunnittelussa käytettävien menetelmien kelpoisuus on osoitettava, minkä lisäksi suunnittelun perusteet, käytetyt mallit sekä saadut tulokset tulee esittää rakennuslupamenettelyn yhteydessä. (SRMK, YM Asetus, 2017 §3)

Asetus jakaa rakennukset paloluokkiin P0, P1, P2 ja P3. Luokkiin ja lukuarvoihin perustuvassa perinteisessä taulukkomitoituksessa käytetään paloluokkia P1, P2 ja P3. Taulukkomitoitus perustuu standardipalokäyrään, joka esitellään tämän työn toisessa kappaleessa. (SRMK, YM Asetus, 2017 §4) Palonkestävyysvaatimusluokituksen perustuvassa mitoituksessa kantavuuden suhteen osoitetaan R-kirjaimella sekä sen perässä olevalla luvulla, joka ilmoittaa palonkestävyysvaatimuksen minuuteissa. Luokkavaatimusten täyttymisen voi osoittaa kokeellisesti, laskennallisesti, yhdistämällä koe- ja laskennalliset tulokset tai hyväksyttävää taulukkomitoitusta käyttäen. Asetuksen pykälän 12 taulukko 3 esittää kantavien ja jäykistävien rakenteiden palonkestävyysvaatimuksen P1- ja P2-paloluokan rakennuksissa. Arvot vaihtelevat paloluokasta ja -kuormasta riippuen

eri rakennuksissa R30 ja R240 välillä. Oletetun palokehityksen mitoitus tapauksissa ei käytetä R-kirjainta osoittamaan rakennusosien kantavuusvaatimusta. (SRMK, YM Asetus, 2017 §12)

Paloluokka P0 on käytössä oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa, kun rakennus oleellisesti osin tai kokonaan perustuu kyseiseen menetelmään (SRMK, YM Asetus, 2017 §4). Asetuksen pykälässä 13 oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa kantavien rakenteiden riittävälle paloturvallisuudelle annettavia vaatimuksia on kaksi kappaletta. Rakennus ei riittävällä luotettavuudella saa sortua palon eikä jäähtymisvaiheen aikana. Tällaisia ovat yli 2 -kerroksiset rakennukset, sekä henkilöturvallisuuden näkökulmasta vaativa rakennus, joka voi olla esimerkiksi hoitolaitos, mutta tulkinta on tehtävä tapauskohtaisesti. Toinen vaatimustaso edellyttää, ettei rakennus sorru poistumisen turvaamiseen, pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana. 1-2 -kerroksiset rakennukset kuuluvat tähän jälkimmäiseen tasoon. Oletetussa palonkehityksessä voidaan ottaa huomioon lämpötilan hitaampi nousu ja automaattisen sammuuslaitteiston kantavien rakennusosien jäähtytys. (SRMK, YM Asetus, 2017 §13)

Asetuksen pykälässä 13 olevan taulukon 4 avulla voidaan määrittää olennaisten kantavien rakenteiden palonkestävyysvaatimus. Taulukossa kuvataan rakennus korkeuden, henkilömäärän ja käyttötarkoituksen perusteella. Kerroskorkeudesta ja käyttötarkoituksesta riippuen vaadittava aika on 30 tai 60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta. Taulukon tarkastelu tehdään täysin kehittyneelle palolle, mutta mikäli on mahdollista osoittaa, ettei lieskahtamista tapahdu, mitoitus voidaan tehdä paikalliselle palolle. Tällöin palorasitus on oltava sellainen, että se huomioi rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet ja suunnitellaan oletetun palonkehityksen mukaisin olosuhtein. (SRMK, YM Asetus, 2017 §13) Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa kantavien rakenteiden palokäyrä määritetään tapauskohtaisesti. Paikallisen palon palotehon arvot vaihtelevat yleensä 2-200MW välillä. Palamiseen kuluva aika riippuu palokuorman laadusta ja määrästä. Kohteessa voi olla useampia mitoittavia palotehokäyriä riippuen paikallisen palon sijainnista. Palon koko (mitoituspalon pinta-ala), sijainti ja kehityksenopeus sekä palavien aineiden ominaisuudet otetaan mitoituksessa huomioon. (RakMK, perustelumuiotio, 2017. s.17)

2 TOIMINNALLISESSA PALOMITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT

2.1 Yleistä

Rakennesuunnittelua varten standardiosassa SFS-EN 1991-1-2 esitetään palolle altistettujen rakenteiden lämpörasitukset ja mekaaniset kuormat turvallisuusvaatimusten, mitoitusmenettelyiden ja suunnitteluvälineiden näkökulmasta (SFS-EN 1991-1-2 s.10). Rakenteiden lämpörasitusten ja mekaanisten kuormien laskentaan standardi SFS-EN 1991-1-2 esittää tarvittavat pääperiaatteet ja -säännöt. Sitä käytetään yhdessä standardien EN 1992 – EN 1996 ja EN 1999 palomitoitusosien kanssa (SFS-EN 1991-1-2 s.12,14). Nimellispaloon liittyvät sekä fysikaalisiin parametreihin perustuvat lämpörasitukset esitellään tässä standardissa. Liitteet sisältävät fysikaalisiin parametreihin perustuvaa tietoa ja malleja rakenteisiin kohdistuvista lämpörasituksista. Tämä standardi ei käsittele palon jälkeisten vaurioiden arviointia. Jotta tätä standardia voidaan käyttää, oletuksena on, että mitoituspaloskenaario valitaan pätevän ja kokeneen henkilön toimesta tai se esitetään asianomaisissa kansallisissa säännöksissä. (SFS-EN 1991-1-2, s.14,16) Ympäristöministeriön asetus 5/16 -palolle altistettujen rakenteiden rasituksista koskevista kansallisista valinnoista täydentää tätä standardia. Asetuksen nojalla standardin 1991-1-2 liitettä F ei sallita sovellettavaksi ja liite E käy sovellettavaksi palokuormien tiheyden osalta ainoastaan kohdan E.4 Lämmönluovutusnopeus Q mukaisesti. (RakMK, 2016. §2, §5, §6)

2.2 Nimelliset lämpötila-aikakäyrät

Standardin SFS-EN 1991-1-2 kansallinen liite sallii oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun ja rakentamisen käyttämällä luonnollisten palon malleja tai muita nimellisiä lämpötila-aikakäyriä. Tämä edellyttää kuitenkin kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvien tilanteiden arviointia. Perinteiseen taulukkomitoitukseen on puolestaan käytettävä standardipalon lämpötila-aikakäyriä. (YM Asetus 5/16, 2016. s.1) Nimellisiä lämpötila-aikakäyriä, joiden ei ole tarkoitus kuvata todellista paloa on esitetty standardissa kolme kappaletta. Standardipalon lämpötila-aikakäyrä, ulkopuolisen palon käyrä ja hiilivetykäyrä. Ne kuvaavat tavanomaisien palojen äärimmäisiä arvoja, eikä niihin voi yhdistää kohteen tai palon ominaisuuksia. Palon syttymis- tai kytemisvaihetta ja palon jäähtymistä ne eivät sisällä. (ECCS, 2010. s.18)

2.2.1 Standardipalon lämpötila-aikakäyrä

EN 1363-1 (ISO 834) standardin lämpötila-aikakäyriä käytetään hyvin yleisesti standardisoiduissa palotesteissä arvioitaessa rakenteiden ja erillisten elementtien altistumista palotilanteessa. Käyrä ilmoittaa kaasun lämpötilan palotilassa sijoittamalla kaavaan halutun ajanhetken minuuteissa. (ECCS, 2010. s.18) Standardipalossa laskennallinen lämpötila nousee hyvin jyrkästi koko palotilassa ja nousu jatkuu hidastuen tarkastelun loppuun saakka. Se ei ota huomioon palotilan geometriaa, palokuormaa, hapen määrää palossa eikä palon hiipumisvaihetta. (Ruukki 2008 s. 4)

Standardipalon lämpötila-aikakäyrä (EN 1363-1, s.14, 5.1.1):

$$\theta_{g1} = 20 + 345 * \log_{10} * (8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

2.2.2 Ulkopuolisen palon käyrä

Ulkopuolisen palon käyriä käytetään, kun oletettu palo kohdistuu ulkoseinän ulkopinnalle eri osasta julkisivua. Paloaltistus voi tulla joko suoraan palotilasta tai palotila voi sijaita alla tai ulkoseinän vieressä. Koska rakennuksen ulkoseinät ovat harvoin tehty teräksestä, käyriä ei tyypillisesti voida käyttää teräsrakenteille, eikä sitä yleensä käytetä ulkopuolisiin teräksisiin rakenneseisiin vaikuttavien lämpöeräsitusten laskentaan. Sille on annettu ohjeet erikseen Eurokoodin 1 liitteessä B. (ECCS, 2010. s. 19)

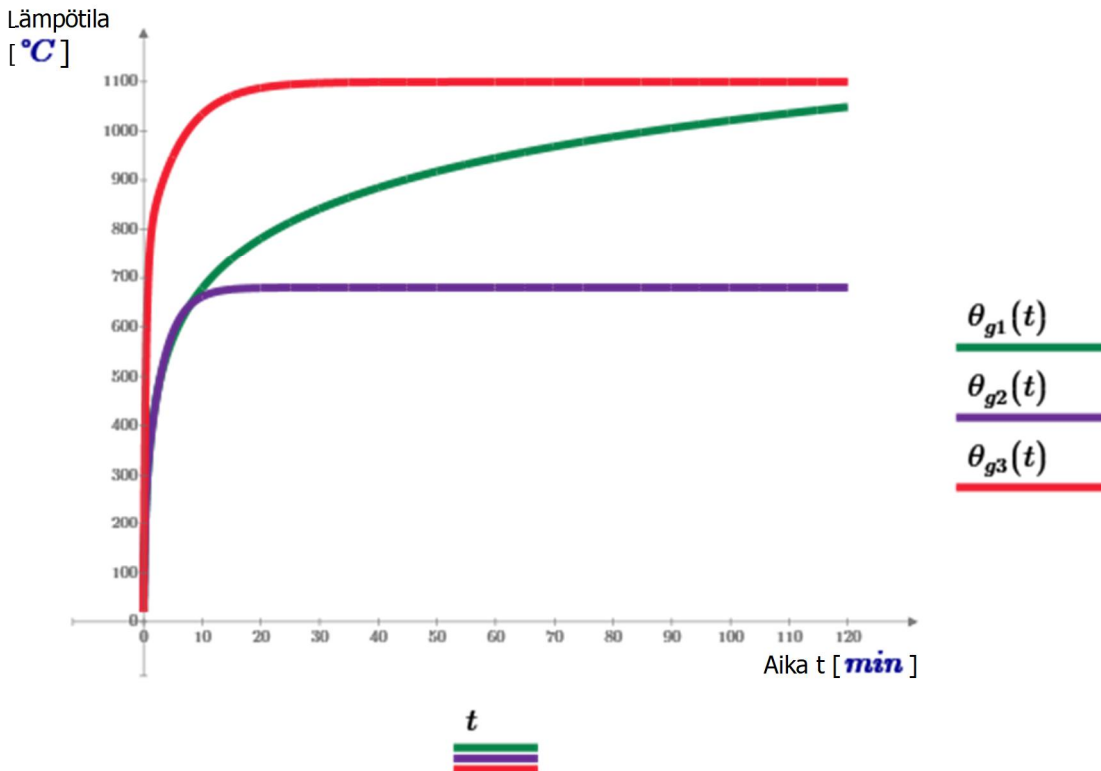
Ulkopuolisen palon käyrä (SFS-EN 1991-1-2 s.42 3.2.2 (3.5)):

$$\theta_{g2} = 660 * (1 - 0,687 * e^{-0,32*t} - 0,313 * e^{-3,8*t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

2.2.3 Hiilivetykäyrä

Hiilivetykäyrä kasvaa voimakkaasti ja saavuttaa vakioarvon 1100°C jo puolen tunnin kuluttua palon alkamisesta. Hiilivetykäyrä pysyy vakiona niin kauan kunnes palokuorma loppuu, toisin kuin standardipalokäyrä, joka jatkaa kasvuaan määrättömästi ajan kuluessa. (ECCS, 2010. s.19) Hiilivedyissä on nimensä mukaisesti hiiltä ja vetyä, joiden yhdisteitä käytetään mm. polttoaineissa. Hiilivetykäyrä (SFS-EN 1991-1-2 s.42 3.2.2 (3.6)):

$$\theta_{g3} = 1080 * (1 - 0,325 * e^{-0,167*t} - 0,675 * e^{-2,5*t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$



Kuva 1 Nimelliset lämpötila-aikakäyrät. Tarkasteltava aikaväli minuuteissa 0-120 min.

2.3 Palotehon määrittäminen

2.3.1 Palotehon kehittyminen

Kasvuvaiheessa yleisin tapa on määritellä palon kehittymistä ajan suhteen kasvavana toisen asteen potenssifunktiona. Tästä t^2 -mallista on olemassa kaksi muotoa; vanhempi ja uudempi. Uudemmassa muodossa käytettävän vakion Q_0 arvoksi on sovittu 1000 kW. Palotehon kasvamisen alkamisesta siihen hetkeen, jolloin paloteho saavuttaa 1 W:n palotehon käytetään aikaa t_g . Vanhemmassa muodossa määritetään kasvukerroin $\alpha = 1000\text{kW}/t_g^2$, missä siis Q_0 -arvo sisältyy kasvukertoimeen. Palot voidaan jaotella palon kehittymisen kannalta neljään luokkaan; hidas, normaali, nopea ja erittäin nopea. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s.19-20)

Palo alkaa ajanhetkellä t_0 ja kasvuvaihe päättyy hetkellä t_1 . Palon kasvuvaihe loppuu, kun polttoaine tai hapensyöttö on saavuttanut suurimman arvonsa (Q_{\max}) olosuhteisiin nähden. Rajoittavana tekijänä voi olla myös ulkopuolinen sammutus, kuten palokunnan sammutustoimet tai sprinkleri. Yhtälöt (4) ja (5) yksinkertainen potenssilakimalli t^2 -malli (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s. 19-20):

$$Q(t) = \alpha(t - t_0)^2 = Q_0 \left(\frac{t-t_0}{t_g} \right)^2, \text{ kun } t_0 \leq t \leq t_1 \quad (4)$$

$$Q(t) = 0, \text{ kun } t \leq t_0 \quad (5)$$

Palon kehittymistä voidaan kuvata potenssilakimallilla. Tässä työssä käytetään yhtälöiden (6) ja (7) mukaista t^p -mallia. Potenssi p on määritelty VTT:n mitoituspalokokoelmassa siten, että laskettu palotehon kuvaaja kuvaa parhaiten mitatun palotehon kehittymistä. Kaavassa voidaan huomioida palotehon kehityksen alkuvaihe sijoittamalla t_0 -hetki, jolloin paloteho alkaa kasvaa voimakkaasti. Tällöin voidaan poistaa usein palon

alkuvaiheessa oleva pienen tehon palo. Yleensä t_0 voidaan kuitenkin jättää laskuista pois, sillä sen arvo on useammissa tilanteissa nolla. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s.20)

$$Q(t) = \alpha_p(t - t_0)^p = Q_0 \left(\frac{t - t_0}{t_{g,p}} \right)^2, \text{ kun } t_0 \leq t \leq t_1 \quad (6)$$

$$Q(t) = 0, \text{ kun } t \leq t_0 \quad (7)$$

2.3.2 Maksimipaloteho: Polttoaineen rajoittama palo

Tässä työssä käsitellään polttoaineen rajoittamaa paloa ja sen maksimipalotehoa, vaikka paloa voisi rajoittaa myös hapensaanti. Täysin kehittyneen palon palotehoa pystytään arvioimaan yhtälöllä (8), jossa maksimipaloteho Q_{max} määritetään palavan kohteen tuottaman palotehon pinta-alayksikköä kohti esittävän arvon Q'' ja palavan kohteen pinta-alan A_f tulona. Kirjallisuudesta löytyy Q'' -arvoja [kW/m^2] eri materiaaleille. Tyypillinen arvo esimerkiksi huonekalujen pehmusteissa käytettävästä palosuojaamattomasta PU-muovista on 200 – 500 kW/m^2 . Puun tasaiselle palamiselle arvo on 100 – 150 kW/m^2 ja öljyaltaan palamiselle n. 2000 kW/m^2 . Kaavassa esiintyvä aika t_2 kuvaa palon hiipumisvaiheen alkamisajankohdetta ja ajanhetkeä t_1 , jolloin kasvuvaihe loppuu. Arvot on määritetty kartiokalorimetrikokeiden tuloksista. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s.20-21)

$$Q(t) = Q_{max} = Q'' * A_f, \text{ kun } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (8)$$

Tässä työssä käytetään yleisempää potenssimuotoa t^p , kuten palotehoa määritettäessä. Palon kasvuvaiheen loppumisen ajanhetkeä kuvataan tällöin yhtälöllä (9):

$$t_1 = t_0 + t_g * \left(\frac{Q_{max}}{Q_0} \right)^{\frac{1}{p}}, \text{ uudempi mallinnustapa} \quad (9)$$

2.3.3 Jäähtymisvaihe

Polttoaineen käydessä vähiin paloteho laskee sen suurimmasta arvosta. Tällöin oletuksena on yleisesti, että palokuormasta on palanut 60 – 80 % hiipumisvaiheen alkaessa. Standardissa SFS-EN 1991-1-2 esitetään, että 70 % palokuormasta on kulunut hiipumisvaiheen alkaessa. (SFS-EN 1991-1-2 s.88) Hiipuvan palotehon aika-riippuvuus kuvataan lineaarisesti tai eksponentiaalisesti vaimenevana funktiona. Linearisessa funktiossa t_3 on palon päättymishetki. Eksponentiaalisessa hiipumisessa τ on hiipumisaikavakio. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s.22) Standardissa SFS-EN 1991-1-2 esitetään, että 70 % palokuormasta on kulunut hiipumisvaiheen alkaessa, jolloin se alkaa vähenemään lineaarisesti, kunnes palokuorma on kokonaan palanut (SFS-EN 1991-1-2 s.88).

Lineaarinen hiipuminen

$$Q(t) = Q_{max} * \left(1 - \frac{t - t_2}{t_3 - t_2} \right), \text{ kun } t_2 \leq t \leq t_3 \quad (10)$$

Eksponentiaalinen hiipuminen

$$Q(t) = Q_{max} * \exp\left(-\frac{(t - t_2)}{\tau}\right), \text{ kun } t_2 \leq t \quad (11)$$

Palokuorman määrän perusteella voidaan arvioida palon kestoajaa, jos tunnetaan palon kasvunopeus ja maksimipaloteho. Paloon osallistuvan materiaalin sisältämä palossa vapautuva lämpöenergia Q määrittää palotehon ajallisen riippuvuuden kuvaajan integraalina yli koko palonkestoajan. Lämpöenergian määrän voi arvioida kahdella eri tavalla. Yhtälöön (12) etsitään tilastoista tai muista luotettavista tiedonlähteistä kohteeseen sopiva palokuorman tiheys lattiapinta-alaa kohti q [MJ/m^2] ja kerrotaan se kohteen lattiapinta-alalla. Toinen vaihtoehto on määrittää kohteessa käytettävät materiaalit ja massat. Eri materiaalien muodostama

kokonaispalokuorma saadaan laskemalla materiaalien massojen ja niiden tehollisten lämpöarvojen tulo. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007.s.22)

$$Q = q * A_f \quad (12)$$

Palotehon ajallisen kehittymisen kuvaajaan vaikuttavat tekijät ovat palon kasvunopeus, maksimipaloteho, palossa vapautuva kokonaislämpöenergia ja hiipumisen aikana vapautuva lämpöenergia. Esimerkiksi lähteessä (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007) on esitetty tuotteiden ja muiden palavien kohteiden palotehotietoja tyypillisten esiintymiskohteiden mukaan.

2.4 Paikallisen palon mallit

Olosuhteista huolimatta jokainen rakennuspalo alkaa paikallisena palona ja pysyy sellaisenaan lieskahdukseen saakka. Paikallinen palo voi aiheuttaa huomattavaa vahinkoa rakenteeseen, riippuen rakenteesta ja palon sijainnista. (ECCS, 2010. s.32) Standardin SFS-EN 1991-1-2 kohta 3.3.1.3 tarjoaa mahdollisuuden ottaa huomioon paikallisen palon aiheuttamat rasitukset, jos lieskahtaminen ja sitä seuraava täyden palon vaihe on epätodennäköistä. Standardin opastava liite C antaa keinoja paikallisten palojen aiheuttamien lämpörasitusten laskentaan. Lausekkeiden väliset erot syntyvät liekin korkeuden suhteesta huonekorkeuteen. (SFS-EN 1991-1-2) Heskestadin mallissa palo voidaan laskea tilanteelle, jossa liekki ei törmää kattoon tai se on avoimessa tilassa (SFS-EN 1991-1-2 s. 70). Hasemin mallin mukaisesti liekki törmää kattoon ja se leviää katon pinnan mukaisesti (SFS-EN 1991-1-2 s. 70-72). Muita paikallisen palon keinoin tarkasteltavia palotilanteita on pilari liekin sisällä tai pilari/palkki kuumakerroksessa ja pilari liekin ulkopuolella.

Paikallinen palo pitää valita siten, että se muodostaa tarkasteltavan kohteen kannalta epäedullisimman kuormituksen tarkasteltavaan rakenteeseen. Vaakarakenteiden lämpökuormitus palon yläpuolella riippuu rakenteiden etäisyydestä liekkeihin. Menetelmät ovat yksinkertainen laskentatyökalu paikallisen palon vaikutusten arviointiin. (TRY, 2004, s.49) Paloturvallisuussuunnittelija huomioi rakennuksen tilan geometrian, palokuorman, uhkakuvat ja alkupalojen arvioinnin, tilan materiaalit, aktiivisten järjestelmien vaikutuksen sekä reunaehdot ja rajapinnat. Jos nämä rakennuksen ominaisuudet huomioon ottaen pystytään osoittamaan siten, ettei lieskahdusta tapahdu, käytetään paikallisen palon mallia. Tällöin suunnitelmiin sisältyy paikallisen palon uhkakuvien määrittäminen, yleissytytymisoletuksen tarkastus ja riittävän luotettavuuden osoittaminen. (RIL 195-1-2018 s.56)

2.5 Vyöhykemallit

2.5.1 Yleistä

Kehittyneet palomallit ottavat huomioon kaasun ominaisuudet sekä massan ja energian vaihtumisen. Näiden palomallien laskennassa käytetään yhtä kolmesta eri mallista. Yksivyöhykemallissa koko palotilassa olevan lämpötilan oletetaan olevan ajasta riippuva. Kaksivyöhykemalli koostuu puolestaan kahdesta kerroksesta, joista alemmassa puhtaasti ilman kerroksessa lämpötila on matalampi kuin ylemmässä kuumien palokaasujen kerroksessa, jonka paksuus ja paikasta riippumatta vakio lämpötila muuttuu ajan mukana. Alempi kerros on paikan suhteen vakio ja sen lämpötila on ajasta riippuva. Kaksivyöhykemallin ja paikallisen palon mallin tulokset yhdistämällä saadaan laskettua paikallisessa palossa rakenneseosan eri kohdissa esiintyvät lämpötilajakaumat. (SFS-EN 1991-1-2, s.44)

Vyöhykemallit tarvitsevat lähtötiedoiksi rakennuksen geometriasta tilan dimensiot, aukot ja väliseinät, rajoittavien pintojen termiset ominaisuudet ja mitoituspalon tiedot (lämmönvapautumisnopeus, paloteho ja palamislämpö) (TRY, 2004. s. 49-50). Aukot ovat suuressa roolissa, koska ilma antaa palolle lisää happea ja aukot voivat tyhjentää osastoa. Aukot voidaan mitoittaa ja sijoittaa paikoilleen malliin. Aukkoja voi olla seinissä ja

katossa yhtäläillä. Aukoille voidaan määrittää aika, jolloin ne muuttuvat aukoiksi esim. savunpoistoluukku tai jossain tietyssä lämpötilassa ikkuna voi hajota. Lisäksi pakotettu ilmanvaihto on mahdollista huomioida. Seinien absorboima energia on myös tärkeä ja seinien kerrospaksuuden ja ominaisuudet voidaan määrittää malliin. (ECCS, 2010. s.29-31) Lämpötilakehityksen lisäksi mallit laskevat seinien lämpötilat ja kaasun virtaukset aukoista (TRY,2004 s. 49-50).

Kaksivyöhykemalli ei yksinään riitä, kun arvioidaan kokonaistilannetta. Savun määrä osastossa, lieskahdukseen todennäköisyys tai suurempi kokonaisuus, kuten alakaton romahtaminen on hyvin arvioitavissa, mutta paikallisen rakenteen käyttäytyminen palon yläpuolella voi kaksivyöhykemallilla johtaa epävarmalla puolella olevaan tulokseen. Kaksivyöhykemalli on molemmilta vyöhykkeiltään tasainen lämpötilaltaan, joten se jättää lämpötilahuiput keskiarvoistuksen varjoon ja johtaa liian mataliin lämpötiloihin. Näissä tilanteissa malleja voidaan tutkia yhdessä paikallisen palon mallin yhtälöiden kanssa, jolloin päästään todenmukaisempaan tulokseen. (TRY, 2004, s.49,51-52) OZone-ohjelmistossa on mahdollista tarkastella kaksivyöhykemallin ja yksivyöhykemallin yhdistelmää ja erikseen vielä paikallisen palon vaikutuksia.

Paikallisen palon malleja ja 2-vyöhykkeen malleja voidaan soveltaa paloon ennen lieskahdusta (TRY, 2004. s. 48-50, 52). Tietokoneohjelmistoja on saatavilla ilmaiseksi esimerkiksi Yhdysvalloissa National Institute of Standards and Technology (NIST) toimesta kehitetty CFAST ja Liegen yliopistossa Belgiassa kehitetty OZone. (ECCS, 2010. s.29-31)

2.5.2 OZone

OZone on Belgianlaisen Liegen yliopiston kehittämä palosuunnittelun laskentaohjelma rakennusosille. Se on ilmaisohjelmisto ja se on ladattavissa ArcelorMittalin internet-sivuilta. OZone on käyttäjäystävällinen ohjelmisto, joka on kehitetty laskemaan lämmönkäyttäytymistä palavassa tilassa. Sillä voidaan luoda palotilanne ja tarkastella lämpötilankehitys teräsrakenteessa käyttämällä luonnollisen palon käyriä tai luonnollisen palon malleja, jotka pohjautuvat fysikaalisiin ja kemiallisiin parametreihin. Ohjelmistossa voi valita paikallisen palon ja palo-osastoidun palon. (OZone V3, user manual. s.2)

Palo-osastoidussa tilanteessa OZone käyttää yksi- tai kaksivyöhykemallia, jotka on esitetty standardissa SFS-EN 1991-1-2. Voidaan myös asettaa ehto, jonka täyttyminen vaihtaa esimerkiksi kaksivyöhykemallista lieskahdaneessa tilanteessa yksivyöhykemalliin. Palotapaukset voidaan sijoittaa palo-osastoon tai paikalliseksi paloksi. Palo-osastoon voidaan määrittää sen geometria, seinärakenne, katto ja lattia, aukkojen ja ikkunoiden dimensiot ja positiot. Paikallinen palo voidaan määrittää suoraan esittämällä paikallinen palo avoimessa tilassa tai osaston sisällä. Laajoissa osastoissa, joissa lieskahdusta ei tapahdu rakenteen analysointi pitää tehdä paikallisen palon olosuhteissa. (OZone V3, user manual. s.2)

Vyöhykemallit ovat numeerisia työkaluja, joilla voidaan arvioida kaasun lämpötilankehitystä osastoidussa tilassa palon aikana. Rajoitettu määrä oletuksia tekee ohjelmasta helpon käyttää ja tarjoaa hyvän arvion lämpötilankehityksestä. Ensimmäinen numeerinen yksivyöhykemalli on kehitetty vuonna 1995. Sen myötä useamman vyöhykkeen mallit ja monen osaston palot sekä laskennallista virtausdynamiikkaa käyttävät ohjelmistot ovat kehittyneet. Vyöhykemallit eivät ole monimutkaisia, mutta paloturvallisuussuunnitteluun ne ovat tärkeitä alan sovelluksia. (OZone V3, user manual. s.2)

OZoneen voi syöttää tarkasteltavan teräsrakenteen profiilin tiedot. Suojaamaton/suojattu rakenne, profiili, rakenteen ympäröivä paloaltistus sekä tarvittaessa yksityiskohtaisempia tietoja. Ohjelma laskee teräsrakenteen poikkileikkauksen tasaisen lämpötilajakautuman myötä teräsrakenteen lämpötilan nousun sille määritetyillä arvoilla standardin EN 1993-1-2 mukaisesti. (OZone V3, user manual. s.27) OZone on tehty helpoksi ja nopeaksi insinöörin työkaluksi. OZonen manuaalin mukaan ohjelmisto on vahvistettu useiden testien ja virtausdynamiikkaa hyödyntävien ohjelmistojen toimesta (OZone V3, user manual. s.2).

2.5.3 ELEFIR-EN

ELEFIR-EN pohjautuu OZoneen ja se on Belgialaisen Liegen yliopiston kehittämä palosuunnittelun laskenta-ohjelma teräsrakennusosien palonkestävyyden laskentaan. Ohjelma on valmistunut alun perin 1990 -luvun lopulla, mutta on myöhemmin päivitetty Eurokoodien 1 ja 3 pohjalle yksinkertaisten palosuunnittelun sääntöjen mukaiseksi. Päivityksestä vastasi Portugalilainen Aveiron yliopisto, joka lisäsi ohjelmaan standardien EN 1991-1-2 ja EN 1993-1-2 uudet versiot. ELEFIR-EN:llä pystyy laskemaan Eurokoodin mukaisia palon vaikutuksen alaisia yksinkertaisia rakennelaskelmia. Se on rakennesuunnittelijalle hyödyllinen työkalu nopeaan ja tarkkaan laskentaan, minkä vuoksi se on suunnitteluaikaa säästävä ja virheiden määrä pienenee. Se sopii myös akateemiseen käyttöön ja opiskelijoille. Ohjelmaan ei ole olemassa käyttöohjetta, mutta ostamalla Jean-Marc Franssenin ja Paulo Vila Realin kirjoittaman kirjan ECCS (Eurocode Design Manuals) Fire Design of Steel Structures saa lisenssin ELEFIR-EN-ohjelmaan. Kirjassa on esitelty ohjelmaa lyhyesti esimerkin avulla. (ECCS, 2010. s. 267-268)

Paloturvallisuussuunnittelija tai rakennesuunnittelija voi myös itse määrittää palon ja lisätä sen ohjelmaan samaan tapaan kuin OZoneella, minkä jälkeen voidaan tutkia rakennusosan palonkestävyyttä ajan, lujuuden ja lämpötilan suhteen. Teräksestä tai ruostumattomasta teräksestä valmistetun profiilin valinta on useimmille tyypillisille poikkileikkauksille, mutta myös käyttäjäkohtainen valinta voidaan suorittaa. Paloaltistuksen voi valita ja passiivisen palosuojauksen voi lisätä rakenneosalle. Palo voi olla standardipalokäyrä, hiilivetykäyrä, parametrinen palokäyrä, paikallinen palo tai käyttäjän määrittämä. Palon parametrit, aukot ja pinnat lisätään malliin samanlaisella käyttöliittymällä kuin OZoneessa, joka on kehitetty myös Liegen yliopistossa. Rakenteiden laskennassa voi valita jännitetyt, puristetut, leikkaus, taivutetut tai näiden yhdistelmänä olevat rakenteet. Myös momentin voi lisätä malliin. Ohjelma laskee profiilin tietojen, kuormitusten ja palon perusteella palotilan ja teräsrakenteen lämpötilan kehittymisen. (ECCS, 2010. s. 267-292)

2.6 Palosimulointi

2.6.1 PyroSim / FDS

Palotapahtuma on monimutkainen yhdistelmä fysikaalisia ilmiöitä, joten yksinkertaisia lähestymistapoja ei voida aina käyttää. Tällöin pitkälle kehitetyt ohjelmistot, jotka perustuvat laskennalliseen virtausdynamiikkaan ovat parhaita käytössä olevia ohjelmia mallintamaan palotilannetta suunnittelijalle. Yksi- ja kaksiväyhykemallien lisäksi kolmas käytettävissä oleva malli soveltaa laskennallista virtausdynamiikkaa, jota hyväksi käyttäen palotilan lämpötilakehitys voidaan selvittää ajasta ja paikasta riippuvalla tavalla. Laskennallista virtausdynamiikkaa soveltavat mallit ovat kaikkiin mahdollisiin palotapahtumiin, mukaan lukien täysin kehittyneet palot, paikalliset palot, monimutkaisten geometrioiden rakennukset ja palot rakennusten ulkopuolella. (LOCAFI eng 2018. s. 7)

Yhdysvaltain kauppaministeriön alainen virasto National Institute of Standards and Technology (NIST) kehittää ja edistää mittaustekniikoita, standardeja ja tekniikkaa. FDS on kehitetty tämän viraston alaisuudessa. Se simuloi palotilanteita käyttämällä laskennallista virtausdynamiikkaa ja on optimoitu hitaalle nopeudelle ja lämpövetoiselle virtaukselle. Lähestymistapa on erittäin joustava ja voidaan määrittää esimerkiksi liesiä tai öljysäiliöitä. (FDS, manual. s.1) Mallinnettavassa osastossa ratkaistaan Navier-Stokesin yhtälöt. Ne jaetaan osastossa suureen määrään soluja, joissa Navier-Stokes -yhtälöt kirjoitetaan ja ratkaistaan. Ne tuottavat tietoa esimerkiksi paineen, lämpötilan, nopeuden sekä kemikaalien komponenteista. Tulipalojen tarkka jäljentäminen on erittäin hankalaa ja mallien valikoima voi olla suuri. Asiantuntijan tehtävänä on valita huolellisesti kohteelle sopiva malli. (LOCAFI eng, 2018. s. 7) Niiden käyttö edellyttää erityisesti siihen tarkoitettua ohjelmistoa, tehokkaita tietokoneita ja koulutettua sekä kokeneita käyttäjiä (ECCS, 2010. s.31). Fire Dynamic Simulator (FDS) on yleisin CFD-mallinnusta hyödyntävä ohjelmisto.

PyroSim on graafinen käyttöliittymä Fire Dynamic Simulator (FDS)-ohjelmistolle. FDS on integroitu tiiviisti PyroSim-järjestelmään. Savua, lämpötilaa, häkää ja muita palossa vapautuvia aineita on mahdollista tutkia ohjelmiston avulla. Simulaation tuloksia voidaan käyttää rakennusten turvallisuuden tutkimiseen suunnitteluvaiheessa, määrittämään turvallisuusratkaisuja olemassa olevissa rakennuksissa, onnettomuuksien jälkeiseen tutkimukseen uudelleenrakentamisvaiheessa ja apuna palomiesten koulutuksessa. (FDS, manual. s. 1)

2.6.2 SAFIR

Elementtimenetelmää hyödyntävällä maksullisella SAFIR-tietokoneohjelmalla voidaan mallintaa rakenteiden käyttäytymistä tulipalotilanteissa. Liegen yliopistossa Belgiassa kehitetyllä ohjelmalla voidaan luoda 2D tai 3D-malleja käyttämällä lineaarisia elementtejä, tasoelementtejä ja tilavuuselementtejä. Näillä voidaan luoda ja ratkaista palkkeja, pilareja, laattoja ja seiniä sekä niiden liitoksia koskevia tapauksia. Materiaaleina voidaan käyttää terästä, betonia, puuta, alumiinia ja kipsiä, mutta käyttäjä voi syöttää myös omia materiaalimalleja esimerkiksi palossa käytettävälle eristeelle. SAFIR-analyysin prosessi alkaa syöttämällä palon tiedot. Ohjelma laskee lämpötilan rakenteen poikkileikkauksessa. Kohonneen lämpötilan seurauksena se laskee syntyvän mekaanisen vasteen huomioiden myös lämpölaajenemisen sekä lujuuden ja jäykkyyden pieneneminen materiaalissa. (University of Liege, SAFIR, 2015. s.3)

Palotilanne voidaan luoda käyttämällä standardipaloa tai mitä tahansa aika-lämpötilakäyrää. Paikallisella palolla on mahdollista tutkia palkki tai kattorakenteita standardin EN 1991-1-2 liitteen C mukaisesti. Myös pilareiden paikallisen palon tarkastelut ovat mahdollisia. Palosimulointi voidaan tehdä myös Fire Dynamic Simulator-ohjelmalla ja tuoda sieltä tietoa SAFIR-ohjelmaan. (University of Liege. SAFIR, 2015 s.4)

SAFIR on käytössä ympäri maailmaa. Kaupallisessa käytössä ohjelmisto on vuoden 2015 materiaalin mukaan 70 eri kohteessa mukaan lukien mm. ArcelorMittal, joka on maailman johtava teräs- ja kaivosyhtiö (LÄHDE: Yhtiön internet -sivusto: <https://corporate.arcelormittal.com/who-we-are/at-a-glance>). Ohjelmaa hyödynnetään maailmanlaajuisesti myös akateemisessa ympäristössä, sillä vuonna 2015 sillä on arvioitu olevan n. 120 käyttäjää akateemisessa ympäristössä. (University of Liege. SAFIR, 2015. s.9)

2.7 Lämmönsiirtyminen rakenteisiin

2.7.1 Laskelmat

Standardi EN 1993-1-2 käsittelee tulipalosta syntyneitä onnettomuustilannetta niiden kantavien teräsrakenteiden suunnittelun osalta, joille on annettu kantavuusvaatimus palotilanteessa odottamattoman sortuman välttämiseksi. Aktiivisia palonsuojausmenetelmiä ei oteta huomioon, vaan käsiteltävänä on ainoastaan passiiviset menetelmät, joissa oletuksena on, että niitä huolletaan riittävästi. Standardi esittää ainoastaan erot ja lisäykset kantavien teräsrakenteiden normaalilämpötilamitoitukseen verrattuna ja sitä käytetäänkin yhdessä standardien EN 1993-1-1 ja EN 1991-1-2 standardien kanssa. (SFS-EN 1993-1-2 s. 8,10) Standardin SFS-EN 1993-1-2 menetelmät käyvät teräslajeille S235, S275, S355, S420 ja S460, jotka on esitetty standardissa EN 10025. Ne soveltuvat myös niille teräslajeille, joiden materiaaliominaisuudet korkeissa lämpötiloissa on käytettävissä eurooppalaiseen yhdenmukaistettuun standardiin perustuen. Standardi SFS-EN 1993-1-12 on laajennus S700 teräslajeihin asti. Standardissa SFS-EN 1993-1-4 esitetään lisäsääntöjä rakennusten ja rakennusteknisten töiden suunnittelemiseksi käyttäen ruostumattomia teräksiä. Se on laajennettu ja muutettu standardien EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 ja EN 1993-1-8 pohjalta koskemaan austeniittisiä, austeniittisferriittisiä ja ferriittisiä ruostumattomia teräksiä. Palonkestävyydestä standardi ohjeistaa katsomaan standardin SFS-EN 1993-1-2 liitettä C, jossa esitetty rakenteellisessa palomitoituksessa käytettäviä materiaaliominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa. (1993-1-4, s.6,24) Betoni-teräs-liittorakenteiden palonkestävyys suoritetaan standardin SFS-EN 1994-1-2 mukaan (1993-1-2 s.8,9).

Teräksen lämpötilan kehittymistä tarkastellaan tässä työssä suojaamattoman sisällä olevan teräsrakenteen kannalta, mutta vastaavanlainen menetelmä on olemassa myös suojatuille rakenteille. Suojaamattoman terässauvan lämpötila lasketaan yhtälöstä (13). Poikkileikkauksessa vallitsee ekvivalentti tasainen lämpötilajakauma. (SFS-EN 1993-1-2 s.35)

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m}{c_a * \rho_a} * h_{net} * \Delta t \quad (13)$$

k_{sh} on varjostusvaikutuksen korjauskerroin

A_m/V on poikkileikkaustekijä [1/m]

A_m on sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti [m²/m]

V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m³/m]

c_a on teräksen ominaislämpö 600 J/kg*K yksinkertaistettu arvo (TRY, 2000. N:o 13/2000 s. 6). Eurokoodissa lämpötilariippuva arvo, jolla voidaan myös laskea.

ρ_a on teräksen tiheys (7850 [kg/m³]) (SFS-EN 1993-1-1 s.21)

Δt on aikaväli [s]

h_{net} on pinta-alan yksikköä kohden laskettu nettolämpövuoto [W/m²]

Rakenneseosan lähtölämpötila $\theta_{m,0} = 20$ °C

Pinta-alayksikköä kohti määritetty nettolämpövuonon säteilemällä siirtyvä mitoitusarvo säteilyn ja konvektion summana. (SFS-EN 1991-1-2 s.38)

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (14)$$

Nettolämpövuonon kuljettumalla siirtyvä osa (SFS-EN 1991-1-2 s. 38)

$$h_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (15)$$

α_c kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin [W/m²K]

θ_g kaasun lämpötila palolle altistetun rakenneseosan lähellä [°C]

θ_m rakenneseosan pintalämpötila [°C]

Nettolämpövuonon säteilemällä siirtyvä osa pinta-alayksikköä kohti (SFS-EN 1991-1-2 s. 40):

$$h_{net,r} = \phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (16)$$

ϕ näkyvyyskerroin

ε_m rakenneseosan pinnan säteilykerroin

ε_f palon säteilykerroin

σ Stefan-Bolzmann -vakio (5,67*10⁻⁸ [W/m²K⁴])

θ_r paloympäristön tehollinen säteilylämpötila [°C]

θ_m rakenneseosan pintalämpötila [°C]

Teräsrakenteiden pinta-alan yksikkökohtainen nettolämpövuonon mitoitusarvo lasketaan SFS-EN 1991-1-2 mukaisen säteilyn ja konvektion summana.

$$h_{net,d} = \phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] + \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad (17)$$

α_c on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin (oletus 35 [W/m²K]): (SFS-EN 1991-1-2 s.44)

ϕ on näkyvyyskerroin yleensä 1,0. Sijainti- ja varjostusvaikutusten huomiointiin pienempi arvo. (SFS-EN 1991-1-2 s.40)

ϵ_m on rakenneosan pinnan säteilykerroin hiiliteräsrakenteille 0,7 ja ruostumattomille teräksille 0,4. (SFS-EN 1993-1-2 s. 17) jos standardissa ei toisin mainita $\epsilon_m = 0,8$. (SFS-EN 1991-1-2 s.40)

ϵ_f on palon säteilykerroin (yleensä $\epsilon_f = 1,0$) (SFS-EN 1991-1-2 s. 40)

σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) (SFS-EN 1991-1-2 s. 40)

$\Theta_r = \Theta_g$ on paloympäristön tehollinen lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] (SFS-EN 1991-1-2 s. 38, 40)

$\Theta_r = \Theta_m$ on rakenneosan pintalämpötila [$^{\circ}\text{C}$] (SFS-EN 1991-1-2 s. 38, 40)

2.7.2 Liitokset

Normaalilämpötilassa tehtävä liitosten mitoitus suoritetaan standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisesti. Palonkestävyyttä voidaan arvioida hitsaus- ja ruuvi-liitoksissa riittäväksi termisen kestävyuden ja liitoksen käyttöasteen perusteella. Normaalilämpötilassa kestävyys ristikon liitoksille lasketaan kestävyuden laskentakaavojen ja geometrinen rajoitusten voimassaolosta. Ristikkoa palomitoitettaessa tarkistetaan liitosten kestävyys käyttämällä palolämpötilan mukaista myötörajaa ja kimmokerrointa. Geometriarajoitusten voimassaolon tarkastamiseen riittää vain tarkastelu normaalilämpötilassa. Kestävyuden kannalta ei ole merkitystä, vaikka hoikimpien sauvojen ($t=4\text{mm}$) kaikki raja-arvot eivät täyty, kun myötöraja ja kimmokerroin muuttuu eri lämpötiloissa. Lisävarmuutta tuo liitosalueen massakeskittymä sekä normaalia suurempi varjostusvaikutus, mitkä osaltaan laskevat liitoksen lämpötilaa noin $20\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. (TRY, 2000. N:o 13/2000 s. 8)

Testit ja havainnot ovat osoittaneet, että liitokset käyttäytyvät hyvin palotilanteessa ja useissa tapauksissa ne voidaan jättää palosuojaamatta. Tiedetään, että liitosten lämpötila ei kasva yhtä suureksi kuin muissa rakenneosissa palkkien ja pilareiden varjostuksen vaikutuksesta. Terästä on enemmän paikallisesti liitoksessa ja se kasvattaa näin ollen poikkileikkaustekijää. ECCS:n kirja Model Code on Fire Engineering vuodelta 2001 ehdottaa vähäisempää palonsuojausta käytettäväksi liitoksissa. Myös Eurokoodi 3:n kohdista (SFS-EN 1993-1-2 liite D) liitosten palosuunnittelusta voi tulkita, että jos kiinnitettävät rakenneosat ovat suojaamattomia, niin tällöin myös liitokset voidaan jättää suojaamatta. Tilanteessa, joissa rakenneosaa on ylimitoitettu kestävä palonkestävyyssäikä huolimatta lisätystä lämpösuojauksesta, myös liitos täytyy olla ylimitoitettu. (ECCS, 2010. s.251-252)

Liitosten tarkastelussa on huomioitava lämpötilamuutosten aiheuttamat rasitukset korkeissa lämpötiloissa. Välillisiä kuormia aiheuttavat rakenneosien lämpölaajenemisen estyminen, erilaiset lämpölaajenemiset staattisesti määräämättömissä rakenneosissa, poikkileikkauksen sisäiset lämpötilaerot ja palotilan ulkopuolella olevien rakenneosien rasitukset palotilassa olevien rakenneosien lämpölaajenemisesta johtuen. (SFS-EN 1991-1-2 s. 36, 46)

Liitosten tarkastelu edellyttää rakenneanalyysia, joka voidaan tehdä rakenneosan, rakenteen osien tai rakenteen kokonaistarkasteluna. (SFS-EN 1990 s.68) Rakenneanalyysissä materiaaliominaisuuksien riippuvuus lämpötilasta sekä epäsuorat vaikutukset materiaalin lämpötilalaajenemisen aiheuttamista muodonmuutoksista otetaan huomioon. Rakenteen osan tarkastelussa sekä rakenteen kokonaistarkastelussa otetaan huomioon rakenteen vauriomuoto sekä rakenneosien jäykkyyksien riippuvuus lämpötilasta. Rakenneosan tarkastelussa ainoastaan lämpötilagradientin aiheuttamat muodonmuutokset huomioidaan ja lämpötilan aiheuttama pituuden muuttuminen voidaan jättää huomioon ottamatta. (SFS-EN 1993-1-2 s. 16-20)

Kehittyneissä laskentamenetelmissä rakennesuunnittelijan on mahdollista tehdä laskelmia, joissa kiinnitetään huomiota lämpörasitusten, mekaanisten kuormien ja geometrinen epätarkkuuksien yhteisvaikutukseen, lämpötilasta riippuviin materiaaliominaisuuksiin, lämpötilan noususta ja lämpötilaeroista aiheutuviin venymiin ja jännityksiin. Myös geometrinen epätarkkuudet sekä epälineaaristen materiaaliominaisuuksien vaikutukset sisältäen kuormittamisen ja kuorman poistamisen vaikutukset rakenteen jäykkyyteen. Murtumuodot, joita käytettävä laskentamenetelmä ei huomioi on syytä varmentaa muilla menetelmillä. (SFS-EN 1993-1-2 s.39-41)

2.9 Sprinklauksen huomioon ottaminen

Palon voidaan olettaa kasvavan, kunnes se muuttuu happirajoitteiseksi, palokuormarajoitteiseksi, sprinkler laukeaa tai palokunta alkaa sammuttamaan paloa. Happi- tai palokuormarajoitteisuus, sprinklerin laukeaminen tai palokunnan palon sammuttaminen voidaan olettaa yleensä keskeyttävän palon kasvun. (RIL 221-2003: B.2.8.1.6) Rakenteiden paloturvallisuuden turvaamiseksi tavanomaisissa rakennuksissa käytetään passiivisia ja aktiivisia suojausmenetelmiä. Käytännössä passiiviset tarkoittavat ylimitoitusta, palosuojalevyjä tai -eristeitä. Lämpötilan kasvaessa reagoivat palosuojamateriaalit ja rakenteen pintaan asennettavat materiaalit kuuluvat myös passiivisiin palosuojausmahdollisuuksiin. Aktiivisia palonsuojausmenetelmiä ovat puolestaan sprinklerit, savunpoistoluukut, palokunnan toiminta, sekä automaattisesti palokunnalle hälytyksen välittävä järjestelmä, joka voi sisältää myös paikkatiedot palosta kohteessa. Seuraavassa käsitellään rakenteellista paloturvallisuutta ja palosuojauksen mahdollisuuksia. Erityisesti tarkastellaan sprinklauksen huomioon ottamista.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta ei anna tarkkoja ohjeita sprinklauksen huomioimiseen muutoin kuin perustelumuistiossa seuraavasti: "Automaattisen sammutuslaitteiston luotettavuus tulee ottaa suunnittelussa huomioon tulipalon mahdollisten seurausten mukaisesti: kantavien rakenteiden kestäminen sortumatta riittävän luotettavasti, suurten henkilömäärien altistuminen tulipalolle, uloskäytävien lukumäärän vähentämisen tai mitoituksen vaikutukset, jne." (RakMK, perustelumuistio, 2017. s.43) Sprinklaus voidaan kuitenkin ottaa huomioon ja se voidaan tehdä eri tavoilla. VTT:n mitoituspalkokokeelman mukaan mitoituspalon palotehon kasvu keskeytetään hetkellä, jolloin kuumen kerroksen lämpötila palon yläpuolella nousee sprinklerin laukeamisen tasolle. Tässä vaihtoehdossa menetelmät jakaantuvat vielä kahteen osaan. Yhden menetelmän mukaisesti paloteho kaksinkertaistetaan hetkellä, kun sprinklerit laukeavat, minkä jälkeen oletetaan palotehon pysyvän vakiona laskennan loppuun saakka. Toinen vaihtoehto on käyttää mallia, jossa sprinklereiden laukeamishetken jälkeen paloteho alenee eksponentiaalisesti koetuloksiin perustuvien mallien mukaisesti.

Mallien (Madrzykowski & Vettori 1992, Evans 1992, Yu ym. 1994 ja Hamins & McGrattan 1999) määrittämiseen tarvitaan vesivuon mitoitustiheys. Evansin koetulokset perustuvat puuritiläpaloista saatuihin tuloksiin. Yu ja Hamins & McGrattan ovat tutkineet sprinklausta käyttämällä polttoaineena polystyreenikuppeja pahlavillaatikossa. Madrzykowski & Vettori arvio on konservatiivinen ja sen mittaukset ovat muiden yläpuolella oleva käyrä. Edellä esitettyihin koetuloksiin perustuvassa mallissa paloteho alenee sprinklereiden laukeamishetken t_p jälkeen yhtälön (18) mukaisesti (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s. 135-136):

$$Q(t) = Q(t_p) * \exp(-k * (t - t_p)) \quad (18)$$

Sprinklereiden palotehon alentava vaikutus kuvataan tekijän k -arvolla, joka vaihtelee eri tutkimusten mukaan. Kyseinen k -arvo riippuu mm. polttoaineesta, vesivuosta ja palotehosta. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s. 135-136) Arvon k määrittämiseen tarvitaan tieto sprinkleriluokasta ja sen vesivuon mitoitustiheydestä. OH-luokan sprinklerille vesivuon mitoitustiheydeksi annetaan 5 mm/min (SFS-EN 12845, s. 24, 99). Sprinkleriluokka valitaan mm. palotilan palokuorman ja palamisherkkyyden perusteella. Esimerkissä käytetään OH-luokan sprinkleriä, joka on normaali sprinkleriluokan tuote ja se kattaa palokuormaltaan ja palamisherkkyydeltään normaalit tuotteet ja materiaalit. (SFS-EN 12845, s. 24) OH-sprinklerit sijoitetaan tasaisesti 4 metrin etäisyydelle toisistaan (SFS-EN 12845, s. 68). Sprinklerin nimellisenä laukeamislämpötilana käytetään 68°C, joka on valittu olettaen, että se on yli 30 astetta suurempi kuin ympäristön lämpötila (SFS-EN 12845, s. 100).

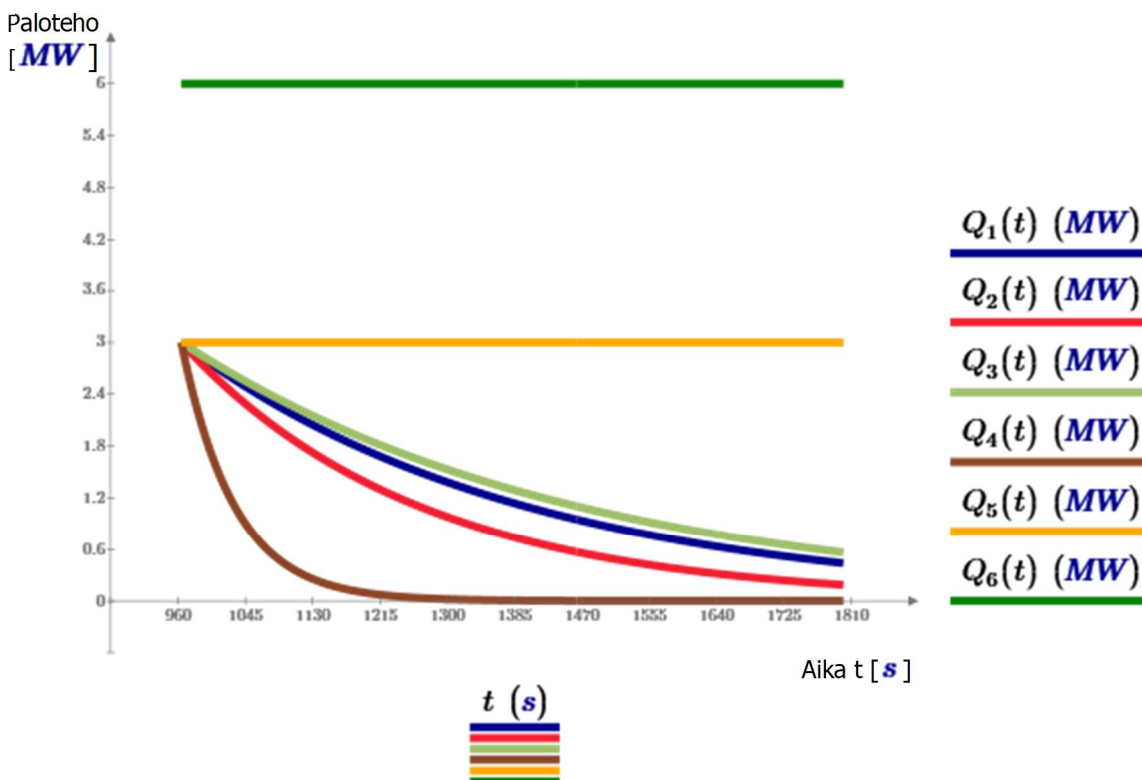
Ruotsin asetuksessa esitetään, että sprinklerin laukeamishetkellä palotehon ollessa alle 5 MW paloteho pysyy vakiona yhden minuutin ajan, jonka jälkeen paloteho laskee lineaarisesti kolmasosaan palotehon arvosta, josta sprinkleri aktivoitui. Systeemi ei aina lopullisesti sammuta paloa, minkä vuoksi paloteho sen jälkeen pidetään vakiona. Jos maksimipaloteho on yli 5 MW sprinklerin aktivoituessa, palotehon kasvu jatkuu vakiona sprinklerin aktivoitumishetkestä alkaen. (BFS2013:12 BBRAD3, 2013 s. 9)

Menetelmä	Lähde

Keskeytyy, kaksinkertaistuu ja vakio	VTT:n mitoituspaloelma
Keskeytyy ja alenee eksponentiaalisesti kaavan mukaisesti	Madrzykowski ja Vettori 1992 Evans 1992 Yu 1992 Hamins & McGrattan 1999
Alle 5 MW: Keskeytyy 1 minuutin kuluttua sprinklerin laukeamishetkestä Yli 5 MW: Keskeytyy ja vakio	BFS2013:12 BBRAD3, 2013
FDS	VTT:n mitoituspaloelma

Taulukko 1: Menetelmät sprinklauksen huomioimiseen

Sprinklerin maksimikoon määrittämiseen vaikuttaa sammutettavan alan koko. Aktivoituminen riippuu palonkehitymisestä, sprinklerin herkkyydestä ja paikasta. Kun savupilvi kasvaa tulipalossa se sekoittuu ympäröivään ilmaan ja jäähtyy. Mitä pidempi matka palosta sprinkleriin, sitä matalampi lämpötila on saavutetaan sprinklerin. Viileämmät savukaasut johtavat pidempään aktivoitumisaikaan. Sprinklereiden herkkyys on riippuvainen RTI (Response Time Index) -arvosta ja aktivoitilämpötilasta. RTI-arvo riippuu tuotevalmistajasta ja se on normaalisti vähemmän kuin $50 \text{ m/s}^{0,5}$ ja aktivoitilämpötila on alle $68 \text{ }^\circ\text{C}$. (Nystedt 2010, s. 126) Sprinklereille on asetettu kolme herkkyysluokkaa, jotka ovat standardi 'A', erikois ja nopeatoiminen (SFS-EN 12845 s. 101).



Kuva 2 Sprinklauksen vaikutus palotehoon ajan funktiona

Kuvassa 2 on esitetty sprinklauksen vaikutus palotehoon ajan funktiona. Paloteho on esimerkin tapauksessa kehittynyt 964 s aikana 3 MW:in, jolloin sprinkleri on lauennut. Tarkasteluaika rajoittuu 1800 sekuntiin (30min). Taulukon 1 menetelmät on esitetty kuvassa 2 seuraavasti: Madrzykowski & Vettori 1992 (Q₁), Evans 1992 (Q₂), Yu ym. 1994 (Q₃), Hamins & McGrattan 1999 (Q₄), yksinkertaistettu BFS2013:12 BBRAD3, 2013 (Q₅) ja VTT (Q₆). Vesivuon mitoitustiheys on määritetty OH-luokan sprinklerille.

Sprinklereiden toiminnan mallintaminen on mahdollista myös FDS -palosimulointiohjelmaa käyttäen. Tässä vaihtoehdossa paloa ei määritellä ennalta kuvatun palotehon keinoin. Muun kuin alkupalon palaminen mallinnetaan termoplastista aineen palamismallia käyttäen, jolloin hyödynnetään aineen lämpöteknisiä ominaisuuksia, höyrystymislämpöä, syttymislämpötilaa ja syttymisen kriittistä massavuota. Palamisen voimakkuutta rajataan tässä tapauksessa yleensä maksimimassavuon parametrilla. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s. 135) Lisäksi sprinklerin vaikutus voidaan huomioida FDS:ssa myös ottamalla huomioon pelkästään kaasua jäähdyttävä vaikutus tai terästä jäähdyttävä vaikutus, sekä näiden kombinaatio. Tällöin palotehoa ei muokata FDS-ohjelmistossa.

Sprinklerijärjestelmien palotarkastuksissa on käynyt ilmi laitteistojen todennäköisimmän vian olevan niiden toimimattomuus yhden tai kahden suuttimen osalta. Koko järjestelmä ei tällöin toimi ja vikaantumistarkastelu toteutetaan tutkimalla tilannetta kahden suuttimen suojausalan suuruisella alueella, missä sprinklerijärjestelmä ei suojaa kohdetta. On mahdollista, että koko sprinklerijärjestelmä on menettänyt toimintakykynsä, mutta se on varsin epätodennäköistä. On kuitenkin pidettävä mielessä, että täysin luotettavia sprinklerijärjestelmäkään eivät ole. (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. s.135-136)

PRONTO-tietokanta pelastuslaitoksen ylläpitämä resurssi- ja onnettomuustilasto, mihin on vuoden 1996 jälkeen tilastoitu kaikki pelastuslaitokselle ilmoitetut onnettomuudet. Sitä käytetään pelastustoimen seurantaan ja kehittämiseen sekä onnettomuuden selvittämistä varten. PRONTO-aineistoon perustuvan systeemi-pohjaisen tutkimuksen luotettavuusarvio oli 98,1 %. Komponenttipohjaisessa tutkimuksessa, jossa vikapuuhun on koottu sprinklerilaitteistoissa tyypillisesti esiintyviä komponentteja, saatiin luotettavuusarvioksi 99,4%. Teräsrakenteisen ostoskeskuksen sprinklerilaitteistojen luotettavuusarvio, jossa vikapuut perustuivat kohteiden laitteistojen kytkentäkaavioihin, oli tutkimuksessa 98,7 %. Sprinklerin luotettavuuden voi ottaa huomioon suunnittelussa pienempänä mitoituspalokuormana riskianalyysin avulla. Suuri luotettavuustaso mahdollistaa mitoituspalokuorman pienentämisen, minkä edulliset vaikutukset näkyvät teräsrakenteiden palosuojaustarpeissa ja rakentamisen kustannuksissa. Samaisessa ostoskeskuksen tapaustutkimuksessa osoitettiin, että sprinklereiden luotettavuutta voidaan arvioida ja perusteltu luotettavuusarvio toiminnallisen mitoituksen kanssa mahdollistaa innovatiiviset rakenneratkaisut ja merkittävät säästöt rakennuskustannuksiin. (Nieminen M, 2018. s.69-74) (Salminen, M. 2019.)

2.10 Hyväksymiskriteerit

Hyväksymiskriteerit määritetään tapauskohtaisesti. Kriteerit koskevat rakennuksen käyttäjien turvallisuutta, pelastushenkilöstön turvallisuutta ja toimintaedellytyksiä, palon ympäristövaikutusten rajoittamista sekä rakenteiden palonkestävyydelle ja muille paloteknisille ominaisuuksille asetettuja vaatimuksia. (SPEK, 1997 s. 16)

Ympäristöministeriön asetus oletettuun palonkehitykseen perustuvassa kantavien rakenteiden mitoituksessa antaa rakennuksen ominaisuuksista riippuen vaatimukset, ettei rakennus sorru palon eikä jäähtymisvaiheen aikana tai se ei sorru poistumisen turvaamiseen pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana. (SRMK, YM Asetus, 2017 §13)

Lämpötila vaikuttaa teräsrakenteeseen palotilanteessa, mutta alle 400 °C:een lämpötilassa lujuusominaisuudet eivät heikkene, mutta kimmokerroin alkaa laskea jo yli 100 asteessa vaikuttaen mahdollisesti stabiliteettiin. (SFS-EN 1993-1-2 s.22) Teräsrakenteiden lämpötilakehitystä voidaan verrata rakennesuunnittelijan laskemiin rakenteiden ja niiden osien kriittisen lämpötilan arvoihin, jos rakenteet ovat sellaisia, että välilliset kuormitukset ja epäsuorat vaikutukset voidaan osoittaa merkitykseltään vähäisiksi. Yleisessä tapauksessa

näin ei ole, vaan kriittisten lämpötilojen määrittämiseen tähtäävän tarkastelun tulee ottaa myös esimerkiksi (estetyistä) lämpölaajenemisesta aiheutuvat lisäkuormat tai palon aiheuttamasta paikallisesta lujudenalennemasta johtuva kuormien uudelleenjakautuminen huomioon. Tarkastelu on tarpeen tehdä myös tilanteissa, joissa palo on erityisen voimakas tai laaja, mutta paikallisen palon vaikutukset tulee ottaa huomioon. Rakennesuunnittelijan tulee tarkastaa jatkuvan sortuman mahdollisuus.

3. Toiminnallisen palomitoituksen kulku tyypillisessä projektissa

3.1 Paloturvallisuussuunnittelun prosessi

Paloturvallisuussuunnittelu tulisi aloittaa tarpeeksi aikaisessa vaiheessa jo ennen maankäyttö- ja rakennuslain edellyttämää hankkeen aloituskokousta, jossa määritellään hyväksymiskriteerit ja periaatteet, joilla paloturvallisuussuunnitelmat voidaan hyväksyä. Neuvottelut ennen aloituskokousta järjestetään omistajan, käyttäjän, viranomaisten ja muiden rakennuksen turvallisuudesta vastaavien tahojen kanssa. Tarkoituksena on esitellä hanke eri osapuolille ja valmistella olennaiset paloturvallisuusvaatimukset (MRL, §117a-g) rakennukselle. (RIL 221-2003, s.24-25)

Turvallisuusasiat otetaan huomioon rakennuksen koko elinkaarelle arvioitujen riskien mukaisesti. Rakennushankkeet ovat yksilöllisiä ja sen turvallisuussuunnitelmat perustuvat tehtyyn riskianalyysiin. Hankkeen tarveselvitys- ja tutkimusvaiheen tilojen käyttötarkoitusten ja tilavaatimusten selvityksen jälkeen määritellään turvallisuustavoitteet. Niiden toteuttamista sitovat päätökset hyväksytään muiden suunnitteluperusteiden päätösten yhteydessä. Rakennuksen käyttäjien, turvallisuudesta vastaavien viranomaisten ja muiden osapuolten tavoitteet on tärkeää tuoda ilmi tässä vaiheessa. Konkreettinen vaikuttaminen turvallisuusasioihin aloitetaan hankesuunnitteluvaiheessa, jolloin suunnittelu käynnistyy. Mahdollisuudet vaikuttaa eri vaihtoehtojen toteutukseen ovat nyt parhaimmillaan, sillä hankkeen edetessä se on huomattavasti vaikeampaa, kun koko rakennuksen suunnitteluprosessi etenee. (RIL 221-2003, s.26)

Ehdotussuunnittelussa tehdään alustava arvio paloriskeistä sekä selvitetään palokuorman määrä, laatu ja sijoittaminen. Syttymislähteet voidaan luetteloida ja syttymisen todennäköisyydet arvioida sekä analysoida mitoitettavat palotapahtumat. Tarveselvitysvaiheessa määritetyt tilojen käyttötarkoitukset asettavat turvallisuusvaatimuksia henkilömäärän ja henkilöiden poistumisen kannalta, jotka tulee kartoittaa. Lisäksi tehdään alustava suunnitelma savunpoisto- ja paloilmoinjärjestelmästä sekä sammutuslaitteistosta. (RIL 221-2003, s.26) Investointipäätöksen jälkeen rakennushankkeeseen liitetään normaali projektihenkilöstö ja turvallisuusasiantuntijat. Yhdessä he laativat ja ryhtyvät toimiin mm. paloturvallisuudelle projektin ajalle asetettujen tavoitteiden täyttämiseksi. Turvallisuusasiantuntijoiden rooli on varmistaa valmiin rakennuksen rakentaminen turvallisuuden osalta suunnitelmien mukaiseksi. Paloturvallisuussuunnittelussa tutkittavat asiat ja palotekniset ratkaisut valmistellaan johdonmukaisesti projektiryhmää ja viranomaiskäsittelyä varten. Asteittainen ja järjestelmällinen suunnitteluprosessi helpottavat päätöksentekoa ja suunnitelmien hyväksymistä, sekä helpottaa neuvotteluja viranomaisten ja muiden hankkeeseen osallistuvien turvallisuusosapuolten kanssa. (RIL 221-2003, s.26) Rakentamisen aikaiset paloturvallisuusasiat eivät kuulu tämän työn sisältöön.

3.2 Viranomaisyhteistyö ja kolmannen osapuolen tarkastelu

3.2.1 Viranomaisyhteistyö

Pelastuslaitoksen alueella tehtäviin kuuluvat ohjaaminen, neuvonta ja turvallisuusviestintä. Tavoitteena on ehkäistä ja varautua tulipaloihin ja muihin onnettomuuksiin, sekä asianmukainen toiminta onnettomuus- ja vaaratilanteissa ml. seurausten rajoittaminen. Pelastuslaitos huolehtii omalla alueellaan pelastustoimen valvontatehtävistä. Pelastustoimintaan kuuluvat tehtävät hoitaa alueellinen pelastuslaitos. (Pelastuslaki §26)

Rakennuslupaan liittyvissä paloteknisissä kysymyksissä rakennusvalvontaviranomainen voi pyytää pelastusviranomaista toimimaan asiantuntijana, vaikka pelastusviranomaisella ei ole päätösvaltaa rakennuslupa-asi-oissa. (RIL 195-1-2018: s. 14) Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää rakennuksen rakentamiseen ja korjaus- tai muutostyöhön rakennusluvan. Se vaaditaan, jos kerrosalaan laskettavaa tilaa lisätään tai työllä on vaikutusta käyttäjien turvallisuuteen tai terveydellisiin oloihin. Lupa tarvitaan myös rakennuksen tai sen osan käyttötarkoituksen olennaista muutosta tehtäessä. (MRL, §125 (5.2.1999/132)) Rakennusluvan myöntää rakennusvalvontaviranomainen ja hakemus tehdään kirjallisena (MRL, §130 (5.2.1999/132)). Rakennusluvassa, aloituskokouksessa tai erityisestä syystä rakennusvalvontaviranomainen voi määrätä hankkeen laadusta ja laajuudesta riippuen tarpeellisia erityissuunnitelmia, jotka laaditaan ja toimitetaan rakennustyön aikana. Rakennushankkeeseen ryhtyvä vastaa näiden suunnitelmien toimittamisesta, ennen kuin suunnitelmaa koskeva työvaiheeseen siirrytään. Tarkempia säännöksiä sisällöstä ja esitystavasta voidaan antaa Ympäristöministeriön asetuksessa. (MRL, §134a (17.1.2014/41/132)). Asetus on velvoittava sekä rakennustyöhön ryhtyvälle että viranomaiselle ja ainoastaan maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellyt tavat poiketa ovat hyväksyttävissä. Viranomaisten ei tule asettaa tiukempia vaatimuksia kuin mitä asetus edellyttää, sillä hyväksyttävään turvallisuustasoon pääsee suunnittelemalla ja rakentamalla asetuksen mukaisesti. Rakennustyöhön ryhtyvän on varmistettava asetuksessa osoitettujen vaatimusten täytyminen. (RIL 195-1-2018, s. 10)

3.2.2 Kolmannen osapuolen tarkastelu

Maankäyttö- ja rakennuslaki antaa mahdollisuuden rakennusvalvontaviranomaiselle vaatia kolmannen osapuolen tarkastelua. Lupahakemusta käsitellessä rakennusvalvontaviranomainen voi vaatia rakennushankkeeseen ryhtyvältä riippumattoman ja pätevän asiantuntijan lausunnon, jonka tarkoituksena on tarkastella suunnitteluratkaisujen ja rakentamisen täyttäneen sille säädetyt vaatimukset. Lausuntoa voidaan vaatia maankäyttö- ja rakennuslain mukaan mikäli "rakentamisessa käytetään sellaisia rakennuksen turvallisuuteen, terveellisyteen tai pitkäaikaiskestävyyteen merkittävästi vaikuttavia suunnittelu- ja toteutusmenetelmiä tai tuotteita, joiden toimivuudesta ei ole yleisesti varmuutta tai aikaisempaa kokemusta." (MRL §150c) Toiminnallista palomitoitusta käytetään kohdekohtaisesti, joten ratkaisut poikkeavat yleisistä ratkaisuista, sen vuoksi PO -luokan rakennus vaatii 3. osapuolen tarkastuksen. Ulkopuolinen tarkastus on tällöin rakennusvalvontaviranomaiselle keino varmistaa ja parantaa rakennettavan kohteen laatutasoa suunnitteluratkaisujen pohjalta.

Menettelyn tavoitteet täyttyvät varmistamalla rakennushankkeeseen ryhtyvän ja suunnittelijoiden tunnistaneen hankkeen olennaisimmat riskit ja ryhtyneen toimiin niiden ehkäisemiseksi. Tämä toteutetaan yleisimmin suunnitelmien ulkopuolisella tarkastelulla hakemalla lausunto riippumattomalta ja pätevältä asiantuntijalta. Lausunto antaa vastauksen, onko suunnittelussa käytettävät ratkaisut niille säädettyjen vaatimusten mukaiset. Ulkopuolisen tarkastajan olisi toivottavaa olla mukana jo hankkeen alussa, jolloin hän voisi tarkastaa mm. suunnittelun lähtötietoja. Tarkastusprosessia viedään eteenpäin vuorovaikutteisesti rinnakkain varsinaisen suunnittelun kanssa. (RT 10-11222 s.4) Menettelyn laajuuden ja kohdistuksen määrää rakennusvalvontaviranomainen, joka voi määrätä rakennusluvassa, aloituskokouksessa tai erityisen syyn vuoksi rakennustyön aikana erityismenettelyä. Erityismenettelyn kohteena olevat rakenteet tai rakennuksen ominaisuudet voidaan määrätä seurattavaksi myös rakennuksen käytön aikana maankäyttö- ja rakennuslain pykälän §117a-117g mukaisten olennaisten teknisten vaatimusten mukaisesti. Standardissa SFS-EN 1990 laajan valvonnan tasoon kuuluva luotettavuusluokka RC3 ja sitä vastaava valvontataso DSL3 edellyttää kolmannen osapuolen tarkastusta laskelmien, piirustusten ja eritelmien tarkastamista. Luokkaan kuuluvat CC3 -seuraamusluokan rakennukset, johon kuuluvat hengenmenetysten, hyvin suurien taloudellisten ja sosiaalisten tai ympäristövahinkojen tapaukset. (SFS-EN 1990, s. 138)

3.3 Ohjeet raportointiin

Rakennuslupa-asiakirjoihin liitetään oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun selvitykset. Asiakirjaliitteet sisältävät lähtötiedot rakennuksesta sekä tehdyt olettamukset perusteluineen. Lisäksi suunnittelussa käytettävät menetelmät ja niiden kuvaus, jossa esitetään laskenta- ja koemenetelmien soveltuvuus rajoituksiin, liitetään rakennuslupahakemukseen. Liitteisiin kuuluvat myös saadut tulokset herkkyyssanalyysiin, hyväksymiskriteerit ja tulosten vertailu niihin, sekä analyysien ja johtopäätösten esittäminen viranomaisille (TUT 2017, s. 15). Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää lisäksi paloturvallisuussuunnittelusta vastaavalta erityissuunnittelijalta, että erityissuunnitelmat täyttävät rakentamista koskevat säännökset ja määräykset ja hyvän rakennustavan vaatimukset. Erityissuunnittelija laatii myös erityissuunnitelmaan rakennustyön aikaisia muutoksia ja laatii rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeen oman erityisosaamisensa alalta. (MRL, §120 c)

3.3.1 Suunnitelma viranomaiselle

3.3.1.1 OSA 1 Esitietopaperi

Esitietopaperin tarkoitus on laatia lyhyehkö selostus, mitä kohteessa tullaan tarkastelemaan ja miksi. Pelastusviranomaisen hyväksytyt esitietolomakkeen suunnitelmat, voidaan aloittaa toiminnallinen tarkastelu. Tarkoituksena on parantaa suunnitteluprosessia ja välttyä turhalta työltä. Viranomaisten kanssa yhdessä käytyjen keskustelujen tuloksena voidaan varmistaa kohteessa selvitettävät olennaiset asiat paloturvallisuuden kannalta.

Esitietopaperissa esitellään tarkasteltava kohde. Lyhyessä johdannossa tulee käydä ilmi rakennuskohteen pääkäyttötarkoitus, kerroksisuus, paloluokka ja suojaustaso. Käyttötarkoitukseltaan poikkeavien tilojen esittely ja palonkestävyysvaatimus kuuluvat myös kohteen esittelyyn. Tarkasteltavat rakenteet ja tutkimuskohteet voidaan käydä läpi jo tässä vaiheessa esitietopaperia. Savunpoiston kannalta olennaiset asiat, kuten savunpoistotaso ja toimintavarmuusluokka, mutta myös savunpoistojärjestelyt ja korvausilman saanti käsitellään lyhyesti. Lisäksi paloilmajärjestelmä ja mahdollinen automaattinen sammutusjärjestelmä löytyvät esitietopaperista. Lyhyesti osoitetaan toiminnallisessa tarkastelussa käytettävät ohjelmistot ja niiden laskentatarkkuus. Esitietopaperiin liitetään mukaan myös pelastuslaitoksen toimintavalmiusaika.

Tarkasteltavat tapaukset esitellään suurimman palokuorman ja syttymistodennäköisyyden perusteella ja ne sijoitetaan tarkastelun kannalta kriittisiin paikkoihin. Tutkittavat tapaukset tuodaan esiin jokainen tarkasteltavan palotilanteen osalta kohta kohdalta. Palojen sijainnin selkeä esitys voidaan toteuttaa pohjapiirroksessa kuvatuilla alueilla, mutta myös lyhyt kirjallinen kuvaus tilanteista on suotavaa. Esitiedoissa perustellaan palomallin käyttö ja se mitä sen käytännössä oletetaan edustavan. Jos palomalli sisältää lähteen mukaan joitain oletuksia, ne on käytävä ilmi tässä dokumentissa. Herkkyystarkastelussa voidaan tarkastella esimerkiksi palotehon kasvattamisen seurauksia palonkesto aikaan. Lopuksi määritellään hyväksymiskriteerit, joilla toiminnallinen tarkastelu voidaan hyväksyä. Teräsrakenteiden lämpötilakehitystä voidaan verrata rakennesuunnittelijan laskelmiin rakenteiden kriittisestä lämpötilasta. Tarkastelu voidaan suorittaa lisäksi kehittyneillä laskentamenetelmillä, mikäli rakennesuunnittelija katsoo sen tarpeelliseksi. Tällöin rakenneanalyysi voidaan tehdä rakenneosan, rakenteen osien tai rakenteen kokonaistarkasteluna, millä tutkitaan sortumattomuutta ja rakenteiden riittävän pieniä siirtymiä. Liitteissä esitetään kohteen pohjapiirustukset ja leikkauskuvat. Lisäksi, jos tutkittaviin tapauksiin kuuluu poistumissimulointia tai palokaasujen leviämisen ja näkyvyyden tutkimusta, niistä laaditaan vastaavanlainen selostus. Esitietopaperissa maininta 3. osapuolen tarkastelusta on suotavaa.

3.3.1.2 OSA 2 Raportti

Toiminnallisen tarkastelun raportti pohjautuu esitietopaperiin ja se sisältää tulokset ja lausunnon tutkittavista tapauksista. Raportin aluksi johdanto kertoo esitietojen tapaan lyhyesti rakennuksesta, käytetyistä ohjelmistoista ja laskelmissa käytetyistä arvoista standardeihin viitaten. Raportissa esitellään yhdessä pelastusviranomaisen kanssa käydyn esitietopaperin hyväksytyt tutkittavat skenaariot ja hyväksymiskriteerit. Palosimuloinnin laskentatarkkuus ja huomioon otettavat asiat, kuten kohteen sprinklauksen huomioiminen simuloinnissa kuuluvat raportin sisältöön. Käytettävät palomallit, joita löytyy esimerkiksi VTT:n mitoituspalo-koelmasta (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007) esitellään samaan tapaan kuin esitiedoissa. Palosimulointien tuloksena voidaan tarkastella rakenteen ja tarkasteltavan tila lämpötilakehitystä. Tulosten tarkastelussa voidaan hyödyntää kuvia laskentamallista ja kuvaajia lämpötilan kehityksestä tarkasteltavien tilanteiden havainnollistamiseksi. Myös mahdolliset näkyvyytarkastelu ja poistumissimuloinnin tulokset esitellään raportissa. Lau- sunto antaa perusteellisen vastauksen tarkastelun alla olleiden tapauksien tulosten mukaan.

3.3.2 Pelastussuunnitelmat

Rakennuksen omistaja ja haltija sekä toiminnanharjoittaja ovat velvollisia ennalta ehkäisemään tulipalojen ja muiden vaaratilanteiden syntymistä rakennuksissa. Jos vaaratilanteita syntyy, on kuitenkin varauduttava henkilöiden, omaisuuden ja ympäristön suojaamiseen. Lisäksi tulipalojen omatoiminen sammuttaminen tai muut pelastustoimenpiteet on oltava mahdollista. Tehtäviin kuuluvat lisäksi poistumisen turvaaminen tulipaloissa tai muissa vaaratilanteissa sekä toimenpiteet pelastustoiminnan auttamiseksi. Pelastussuunnitelma laaditaan edellä esitettyjen toimenpiteiden pohjalta. Pelastussuunnitelma vaaditaan, jos kohde on poistumisturvallisuuden tai pelastustoiminnan kannalta tavanomaista vaativampi rakennus tai muu kohde. Se vaaditaan myös kohteissa, joissa henkilö- tai paloturvallisuudelle, ympäristölle tai kulttuuriomaisuudelle aiheutuvan vaaran tai mahdollisen onnettomuuden aiheuttamien vahinkojen arvioidaan olevan vakava. Pelastussuunnitelma sisältää vaarojen ja riskien arvioinnin, rakennuksen ja toiminnassa käytettävien tilojen turvallisuusjärjestelyt, asukkaille ja muille henkilöille annettavat ohjeet onnettomuuksien ehkäisemiseksi sekä onnettomuus- ja vaaratilanteissa toimimiseksi ja näiden lisäksi mahdolliset muut kohteen omatoimiseen varautumiseen liittyvät toimenpiteet. Rakennuksen tai kohteen haltija vastaa yhdessä toiminnanharjoittajien kanssa pelastussuunnitelman laatimisesta. Erityisesti hoitolaitoksen ja palvelu- ja tukiasumisen toiminnanharjoittajan kanssa pelastussuunnitelma tehdään aina yhteistyössä. (Pelastuslaki §14,15)

Rakennuksen käyttöä, huoltoa, kunnossapitoa ja paloturvallisuustarkastuksia koskevat paloturvallisuustekijät ja toimenpiteet esitellään pelastussuunnitelmassa. Siinä huomioidaan paloturvallisuusjärjestelyt, paloautomaatiikkalaitteet, käytettävissä olevat pelastusvoimat ja niiden saatavuus. Turvallisuustason säilyttämiseksi turvallisuusjärjestelyjen toimintaa täytyy seurata. Olosuhteiden ja toiminnan muuttuessa pelastussuunnitelmaa täytyy päivittää ja tarkastaa pelastussuunnitelmassa asetettujen vaatimusten täyttyminen. Rakennuksen omistaja ja haltija, teollisuus- tai liiketoiminnan harjoittaja, virasto, laitos tai muu vastaava yhteisö laatii pelastussuunnitelman. Suunnitelmasta käy ilmi vaaratilanteet ja niiden vaikutukset, toimenpiteet vaaratilanteiden ehkäisemiseksi ja suojautumismahdollisuudet, suojeluhenkilöstön, käytettävissä olevan suojelumateriaalin ja toimintasuunnitelman erilaisissa vaaratilanteissa. Suunnitelmaa käytetään yhteisön kaikkien turvallisuusasioiden hoitamiseen. Se on yrityksen, laitoksen tai kiinteistön turvallisuusohjeisto, jossa kuvataan turvallisuusasioiden hoitoon liittyvät pääperiaatteet ja tavoitteet sekä eri henkilöiden vastuut. Paloturvallisuuden suunnitteluperusteet ja tehtävät rakennuksen käytölle, kunnossapidolle ja huollolle ovat dokumentoituna pelastussuunnitelmaan kuuluvassa asiakirjassa. (RIL 221-2003 s.29-30)

3.3.3 Huolto- ja käyttöohje

Pysyvään asumiseen tai työskentelyyn käytettäviin rakennuksiin täytyy laatia käyttö- ja huolto-ohje. Ohje on laadittava myös, mikäli rakennuksen korjaus- ja muutostyön tai käyttötarkoituksen muutokseen tarvitaan rakennuslupaa. Ohjeen laadinnasta vastaa rakennushankkeeseen ryhtyvä. Maankäyttö- ja rakennuslain pykälässä 117i määritellään ohjeen sisältö seuraavasti: "Käyttö- ja huolto-ohjeen tulee sisältää rakennuksen käyttötarkoitus ja rakennuksen ominaisuudet sekä rakennuksen ja sen rakennusosien ja laitteiden suunniteltu käyttöikä huomioon ottaen tarvittavat tiedot rakennuksen asianmukaista käyttöä ja kunnossapitovollisuudesta huolehtimista varten" (MRL, §117 i)

Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje luovutetaan kiinteistön omistajalle. Se koostuu hankkeen aikana eri tahojen ja osapuolten laatimista asiakirjoista. Toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvassa suunnittelussa käyttö- ja huolto-ohjeeseen lisätään pelastussuunnitelmassa edellytetyt toimenpiteet. Mikäli kohteessa tehdään muutoksia, vaikutus paloturvallisuuteen täytyy aina tarkastaa. Käyttö- ja huolto-ohjeesta löytyvät paloturvallisuuteen vaikuttavat olennaiset tekijät, joita voivat olla paloturvallisuuteen vaikuttavat rakenteet, laitteiden hoito, huolto ja kunnossapidontehtävät, keskeisen huoltokohteiden ja tilojen paikantamistiedot ja kunnossapitojaksot sekä -tehtävät. Lisäksi korjauspäiväkirjan ylläpito ja toimintaohjeet poikkeus- ja häiriötilanteissa esitetään kyseisessä ohjeessa. (RIL 221-2003) Jos rakennus on rakennettu paloluokkaan P0, henkilö määrä ja palokuormaa koskevat tiedot on ilmoitettava rakennuslupapäätöksessä. Kiinteä merkintä on sijoitettava rakennukseen helposti havaittavaan paikkaan. (SRMK, YM Asetus, 2017 §9)

4. ESIMERKKIKOHDE

4.1 Kohteen esittely

Ouluun osoitteeseen Ouluhallintie 20 rakennetaan olemassa olevaan Ouluhalli-nimiseen kokoontumistilaan 2-kerroksinen laajennus. Laajennus liittyy kiinteästi olemassa olevaan P3-paloluokan Ouluhalliin, jonka suojaustaso on 2 (häätäkeskukseen liitetty paloilmoin). Uudessa laajennuksessa suojaustaso on 2+3 (häätäkeskukseen liitetty paloilmoin ja automaattinen sammuuslaitteisto). Laajennukseen tulevan liikuntasalin pinta-ala on 1744 m². Tarkasteltavana on salin teräsristikoiden kestävyys palotilanteessa ilman palosuojausta.

Materiaali	Yläpaarre	Alapaarre	Diagonaalit
S355J2H	RHS 250 x 150 x 12,5 Kriittinen lämpötila: 570 °C	RHS 250 x 150 x 8 Kriittinen lämpötila: 655 °C	150 x 100 x 8 Kriittinen lämpötila: 560 °C

Taulukko 2: Tarkasteltavat rakenteet

4.2 Paloskenaariot ja mitoituspalo

Rakennuksissa paloskenaarioiden määrä on ääretön ja kohdekohtainen, mutta todenmukaiset palotapaukset tutkitaan tarkastelemalla kohteen suurimpia palokuormia ja sijoittamalla ne syttymistodennäköisyyksien perusteella paikkoihin, joissa niiden seurauksena aiheutuvat teräsrakenteelle suurimmat lämpörasitukset. Palotehon arviointiin käytetään luotettavaa tietolähdettä esimerkiksi VTT:n mitoituspalo-koelmaa (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007.). Paloskenaarioissa voidaan huomioida sprinklauksen jäähdyttävä vaikutus. Kohteen paloskenaarioista keskustellaan alueen pelastusviranomaisen kanssa, mitä varten suunnittelija tekee esitietopaperin. Tulokset esitetään erillisessä raportissa ja lausunnossa.

Simulointien tavoite on arvioida kantavien teräsrakenteiden kestävyttä palotilanteessa oletetuissa palotilanteissa. Hyväksyttävyyssuhteena käytetään teräsrakenteiden lämpötilan kehitystä, jota verrataan rakennesuunnittelijan määrittämiin rakenteiden kriittisiin lämpötiloihin. Tämän yksinkertaistetun menetelmän lisäksi rakennesuunnittelija voi ottaa kantaa välillisten kuormien vaikutuksiin rakenteessa lämpölaajenemisen, rakenteen kokonaiskäyttämisen ja liitosten osalta. Toiminnallinen tarkastelu perustuu kohteen uhkakuviin ja analyysissä tutkitaan laskennallisesti teräsrakenteiden lämpötilojen kehitystä palotilanteessa oletettujen paloskenaarioiden muodossa. Herkkyystarkastelussa tutkitaan kasvatetun ja laajennetun palon vaikutusta tilan lämpötiloihin ja verrataan palon lämpörasituksia teräsrakenteiden kriittisiin lämpötiloihin. Tarkastelussa voi esimerkiksi kasvattaa alueen kokoa tai/ja palotehoa.

Liikuntasalissa palokuormaa ja syttymislähteitä on hyvin vähän, mutta siellä voidaan monitoimihallille tyypilliseen tapaan järjestää konsertteja, joissa tarvitaan esiintymislavaa. Palomallit on luotu VTT:n mitoituskokoelman mukaisesti. Toinen tarkasteltava tapaus on myyntikojujen leviämispalo. Myyntikojujen oletetaan leviävän yhdestä, tilassa järjestettävässä esittely- tai kirpputoritapahtuman kojusta lähellä oleviin kojuihin. Kolmas tarkasteltava tapaus on katsomopalo. Liikuntasalissa ajatellaan käytettävän kevyesti pehmustettua muovituolikatsomoa, jonka rakenteet ovat tehty teräksestä. Istuinmateriaalin paloteho pinta-alaa kohden on 600 kW/m² ja herkkyystarkastelussa 750 kW/m². Tutkittavassa katsomopalossa katsomon ylin penkkirivi on 3 metrin korkeudella liikuntasalin kentän pinnasta. Tällöin etäisyys teräsristikon alaparteeseen on 7 metriä. Istuimen mitat ovat kooltaan 0,42 x 0,55 m². Palon oletetaan leviävän alkusammuutukseen saakka, jolloin se rajoittaa paloa ja palo jäähtyy. Oletuksena käytetään palon leviämistä 36 istuimen alueelle (15,2 m²), jolloin maksimipaloteho on 3,1 MW. Herkkyystarkastelussa on pienennetty palon leviämisen aluetta ja kasvatettu maksimipalotehoa pinta-alaa kohden arvoon 750 kW/m². Palon oletetaan leviävän 18 istuimen pinta-alaltaan 7,4 m² alueelle.

Tapaus	Paloskenaario	Lähde
1	Esiintymislavan palo	Näyttämöpalo. (VTT:n mitoituspälokoelma s. 53-58)
2	Myyntikojujen palo	Myyntikoju. (VTT:n mitoituspälokoelma s. 53)
3a	Katsomopalo 600 kW/m ²	Muovituolikatsomon palo (VTT:n mitoituspälokoelma s. 41)
3b	Katsomopalo 750 kW/m ²	Muovituolikatsomon palo (VTT:n mitoituspälokoelma s. 42)

Taulukko 3: Paloskenaariot ja niiden lähteet

4.3 Laskelmat

Pelastuslaitoksen toimintavalmiusajalla voidaan arvioida palokunnan sammutustoimien alkamista tiedon siirryttyä hätäkeskukseen. Luottamusvälitarkastelulla määritetään riski väärän johtopäätöksen tekemiselle. 95 %:n luottamusväli lasketaan tilastollisen merkitsevyyden laskennalla. Tarkasteltaessa rakennuspalojen määriä, luottamusväli kertoo havaintoaineistosta lasketun vaihteluvälin. Varmuus oikean rakennuspalojen määrälle on 95 %. Luottamusvälien poiketessa toisistaan on rakennuspalojen määrien ero tilastollisesti merkittävä. Toimintavalmiusajan kertymäkuvaajat eri pelastustoimien alueilla on esitetty lähteessä (VTT, Tillander et al, 2009.). Toimintavalmiusajat on määritetty ensimmäisen ajoneuvon hälyttämisestä sen saapumiseen kohteeseen vahvuudella 1+3 (VTT, Tillander et al. s. 12-13, 69-72). Pelastuksen toimintavalmiusaika ei vaikuta simulointeihin, mutta käytännön tasolla yhdessä sprinklauksen kanssa sillä on merkitystä tulipalon vahinkoihin.

Palotapausten simuloinnissa huomioitiin sprinklauksen vaikutus katkaisemalla palonkehitys sprinklerin laukeamislämpötilassa (68°C). Laskentaa jatkettiin vakiopaloteholla laskenta-ajan loppuun saakka. Simuloinnissa seurattiin tilan palokaasun lämpötilaa sekä teräsrakenteiden lämpötilakehitystä. Palot paikoitettiin rakenteiden kannalta epäedullisimpaan kohtaan.

Tässä työssä FDS palosimulointitulosten lisäksi esitetään vertailutulokset ELEFIR-EN ohjelmalla määritettyjen paikallisen palojen myötä. ELEFIR-EN pohjautuu OZoneen, jolla tarkastelu on mahdollista suorittaa, mutta OZonen teräsprofiilikirjasto ei sisällä suorakaideprofiileja. Tarkasteltavaksi ajanjaksoksi määritetään 60 min. ja paloaltistus on kaikilta sivuilta, eikä rakenteellisia passiivisuojausjauksia ole. ELEFIR-EN ohjelmaan luodaan Hestekadin mukainen paikallinen palo, jossa liekki ei osu kattoon. Paloteho [MW] on ajasta riippuva palotapaus. Käytetään palotehoon määritettyjä arvoja, mutta maksimi arvo pyöristetään ylöspäin kokonaiseen lukuihin, koska ELEFIR-EN pyöristää sen alaspäin, eikä se ole näin varmallalla puolella. Ohjelmaan syötetään korkeusmitta palolähteestä kattoon ja maksimipinta-ala palolle. Lisätään lisäksi myös korkeus, jossa lämpötila lasketaan. ELEFIR-EN-ohjelma tekee automaattisesti raportin laskennasta, jossa tulokset esitetään graafisesti ja numeerisesti. Tässä työssä suoritettavat laskennat eivät sisällä kuormituksia, jotka voisi huomioida ja lisätä ohjelmaan. Tiedot kriittisistä lämpötiloista on saatu teräsrakennesuunnittelijalta, joka on suorittanut rakennelaskelmat kyseiseen kohteeseen.

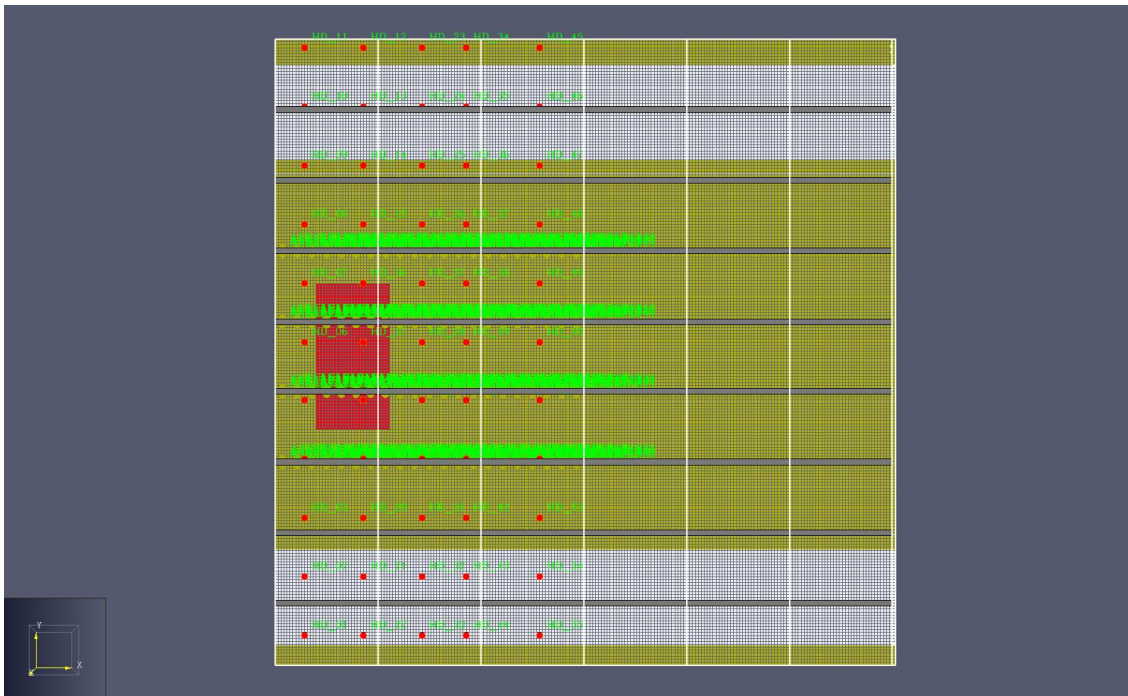
Palosimuloinnin malli luodaan PyroSim -ohjelmalla. Mallinnettavan tilan arkkitehtipohjat voidaan tuoda PyroSim -ohjelmaan, mikä helpottaa mallin geometrian tekemistä. Pintojen materiaalit voidaan lisätä geometrian mallinnuksen jälkeen. Kohteessa lattia on valettu betonista ja seinämateriaalia on kahdenlaista; peltivilla-pelti -elementti ja betoniseinä. Katsomonrunko sekä ristikon paarteet ovat terästä. Korvausilmalle luodaan pieni aukko avoimella reunaehdolla tilan alareunaan, jolloin happea on saatavilla palonkehittymisen kannalta riittävästi.

	Tiheys [kg/m ³]	Emissiivisyys	Ominaislämpö [kJ/(kg*K)]	Lämmönjohtavuus [W/(m*K)]
Teräs	7850	0,7	1,04	1,8
Betoni	2280	0,7	0,46	45,8
Pelti-Villa-Pelti	208	0,7	-	-

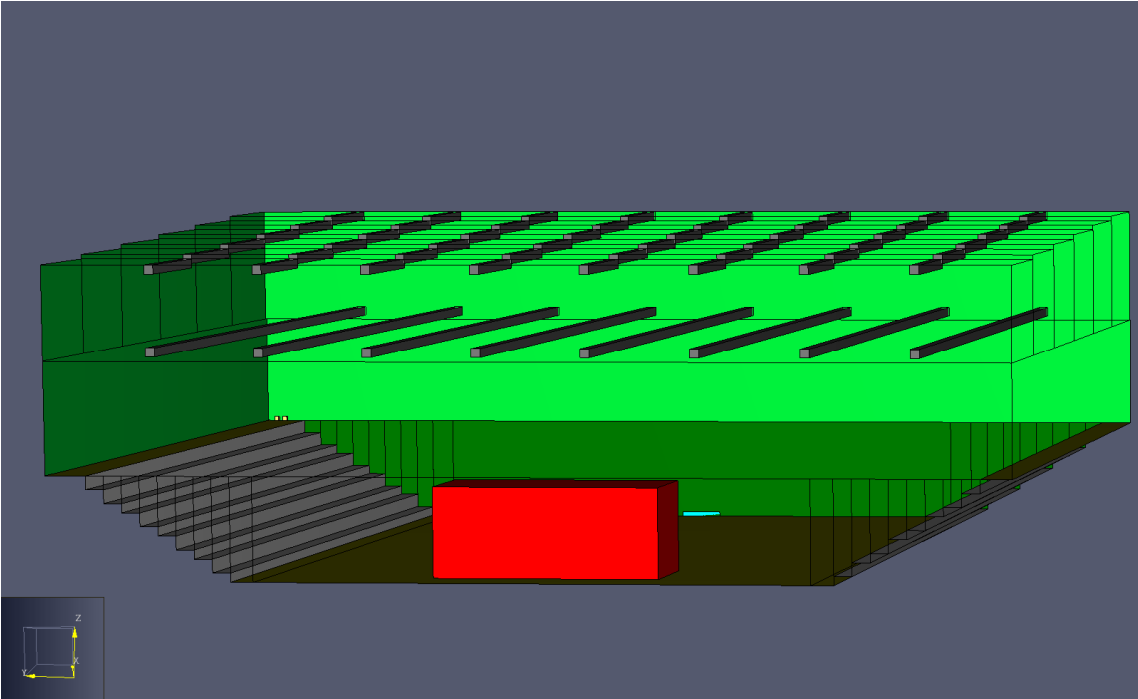
Taulukko 4: Pintojen ominaisuudet.

Määritetty paloteho kokonaisuudessaan syötetään PyroSim-ohjelmistoon, josta Fire Dynamic Simulator laskee palotapahtuman. Sprinklereiden sijaintien paikalle malliin sijoitetaan lämpötila-anturit, joista saadaan "nollalaskennassa" määritettyä ajanhetki, jolloin sprinkleri laukeaa esimerkiksi 68 °C asteen lämpötilassa. Sprinklereiden sijainnit on määritetty standardin SFS-EN 12845 kappaleessa 12 -sprinklerien sijoitus ja sijoitustiheys -mukaisesti. Anturit on liitetty control-toimintoon, jolloin minkä tahansa lämpötila-anturin saavuttaessa sprinklereiden laukeamislämpötilan, reagoi se dataan vaihtaen merkin 0:sta 1:een. Näin voidaan löytää ajanhetki, jolloin sprinklaus voidaan ottaa huomioon palotehon kehityksessä. Tässä työssä se tehdään vakiomalla paloteho tälle tasolle. Korjattu data syötetään uudelleen PyroSim-ohjelmaan ja laskenta suoritetaan FDS-ohjelmalla tässä tapauksessa 30 minuutin ajalla.

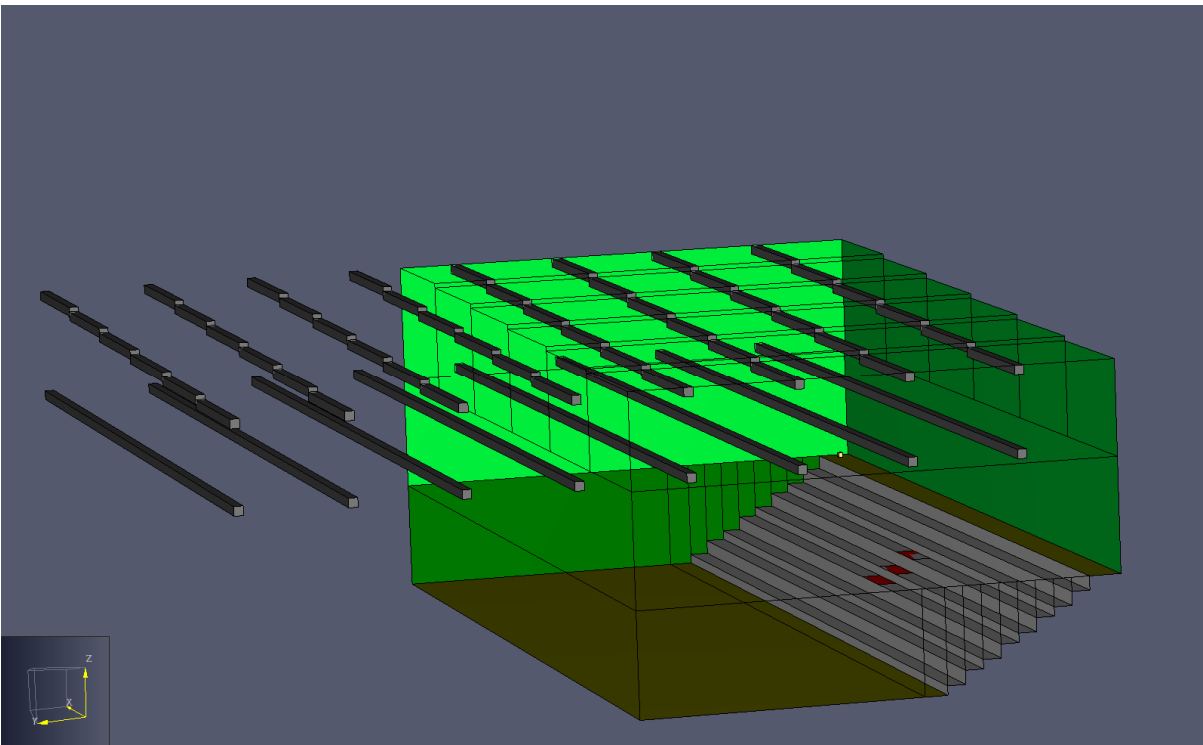
Paarteiden sivuille suoraan palavan kohteen yläpuolelle on sijoitettu lämpötila-anturit, joiden mittaamista lämpötiloista valitaan keskiarvoistetusti suurimman lämpötilan mukainen lämpötila-anturi, jonka datasta lasketaan ala- tai yläpaarteiden lämpötilat. Sekä ala- että yläpaarteesta otetaan yhden anturin data käsittelyyn. Laskennan tulokset on esitetty tässä esimerkissä. Laskentojen jälkeinen data on yhteensopiva liitettäväksi Excel-ohjelmistoon, jossa data käsitellään ja lasketaan Eurokoodin mukaisesti teräsrakenteisten paarteiden lämpötilat. Elementtiverkon koko on tässä mallissa 0,2 x 0,2 x 0,2 m.



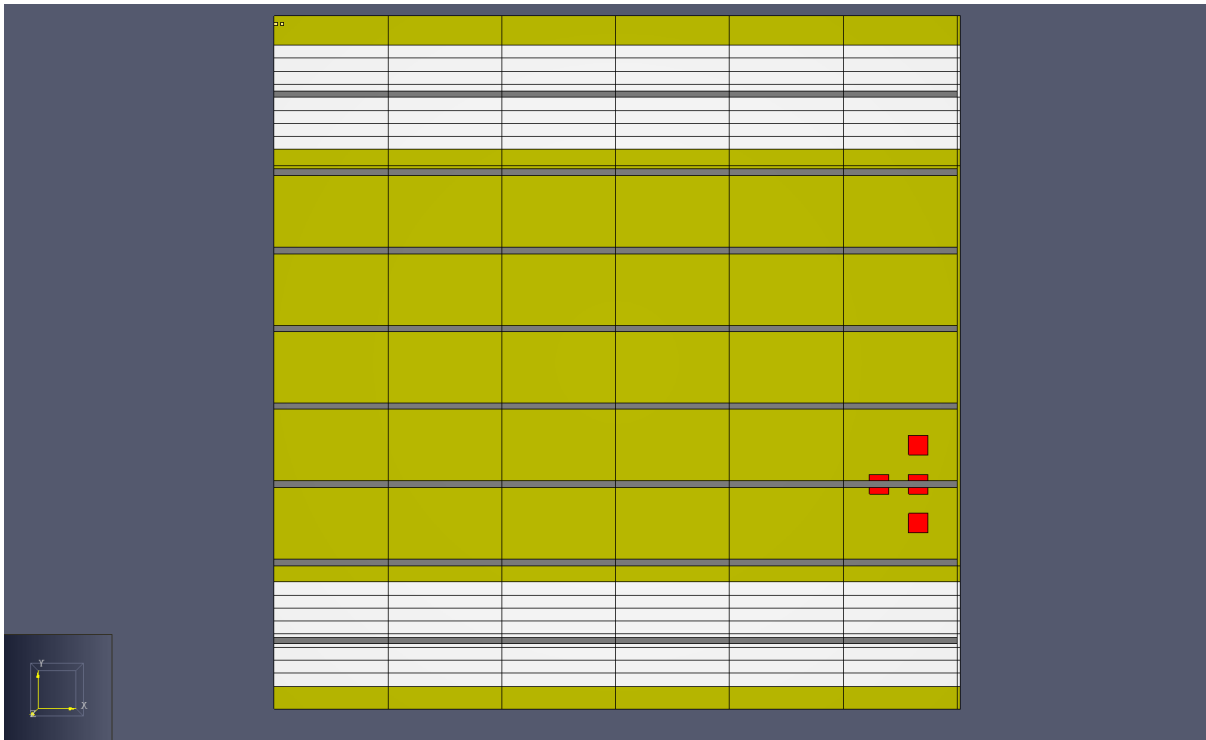
Kuva 3 Sprinklereiden ja esiintymislavan sijoitus ylhäältäpäin kuvattuna.



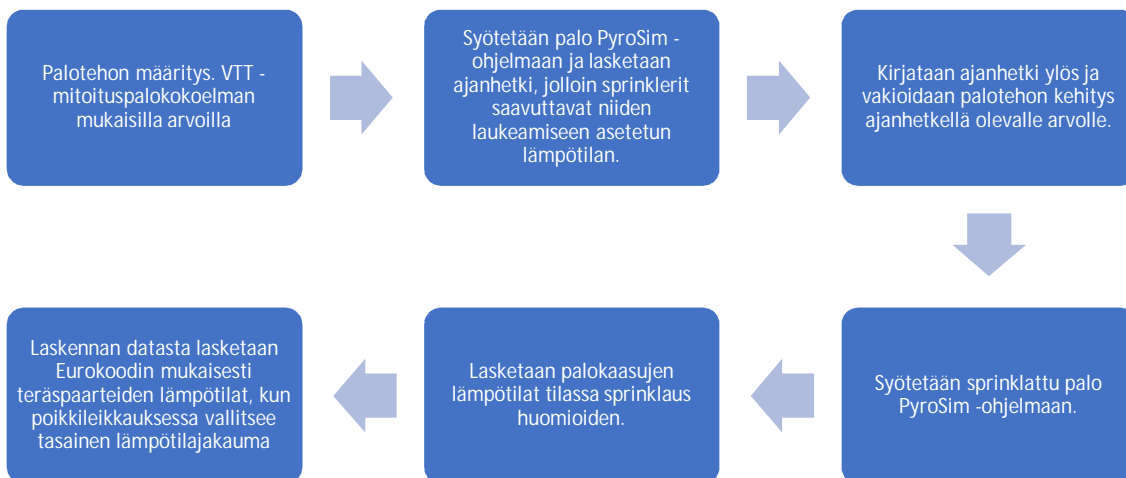
Kuva 4 Esiintymislavan palo. Takaseinässä näkyvä korvausilman aukko.



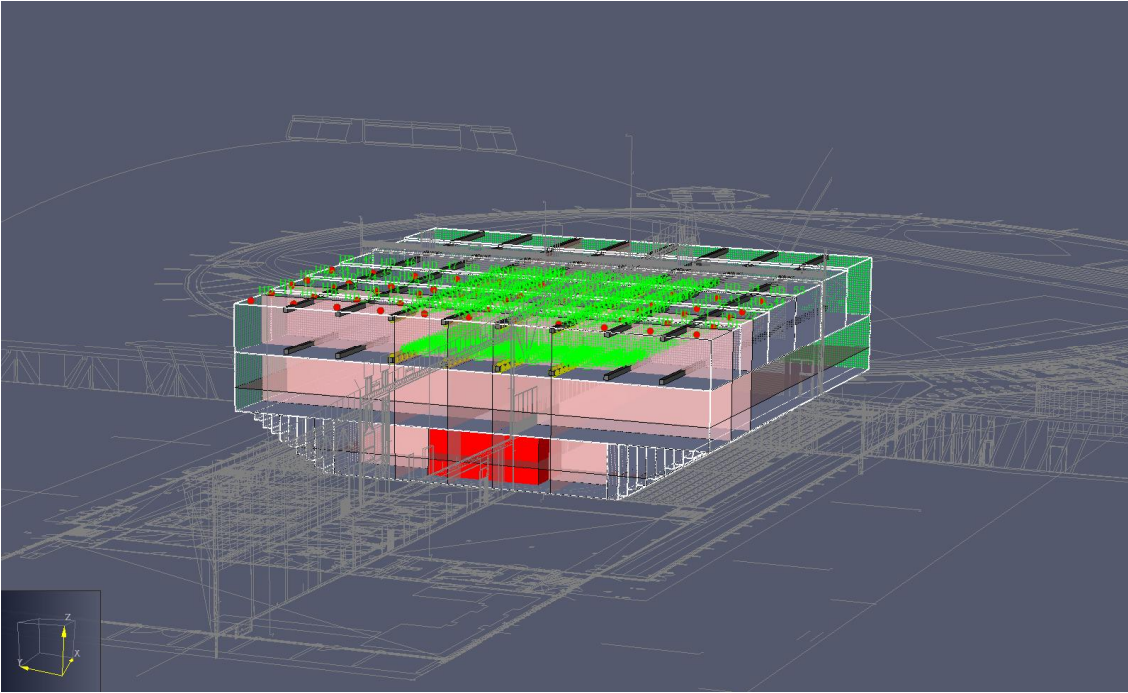
Kuva 5 Katsomopalo



Kuva 6 Myyntikojujen palo



Kuva 7 Palosimulointimallin luominen



Kuva 8 Valmis malli laskentaan

4.4 Tulosten tarkastelu

Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa paloteho määritettiin kohteeseen laskennallisesti ja sen kehitys syötettiin FDS-ohjelmistoon, joka laskee rakenteiden adiabaattisen pintalämpötilan (AST) tapauskohtaisesti. Adiabaattinen pintalämpötila (AST) on lämpötila, jossa pintaan kohdistuva nettolämpövuoto on nolla. Esiintymislavan palotehossa esiintyy piikki palotehossa ja sitä seuraava pudotus, minkä jälkeen laskenta jatkaa vaihetta edeltävän laskennan mukaisesti. Sillä ei ole kuitenkaan merkittävää vaikutusta tuloksiin. Rakenteiden adiabaattisten pintalämpötilojen (AST) maksimiarvot on mitattu palotehon saavuttaessa suurimman arvonsa. Teräsprofiilin lämpötilan kehitys on laskettu Eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 kaavan 4.2.5 mukaisesti. Laskenta lopetettiin 30 minuutin jälkeen, jolloin paloteho oli jatkanut vakioteholla ja palokaasujen lämpötilakehitys tasaantunut. Teräsrakenteiden lämpötilat ovat kaikissa tutkituissa rakenteissa selkeästi alempana kuin kriittisiksi lämpötiloiksi määritetyt lämpötilat.

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	163	80
Teräs (Yläpaarre)	108	77
Palokaasut (AP)	158	113
Teräs (Alapaarre)	131	107

Taulukko 5: FDS ja ELEFIR-EN-ohjelmilla lasketut esiintymislavan palon tulokset

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	75	76
Teräs (Yläpaarre)	44	63
Palokaasut (AP)	156	128
Teräs (Alapaarre)	114	117

Taulukko 6: FDS ja ELEFIR-EN-ohjelmilla lasketut myyntikojujen palon tulokset

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	52	60
Teräs (Yläpaarre)	34	45
Palokaasut (AP)	73	97
Teräs (Alapaarre)	50	78

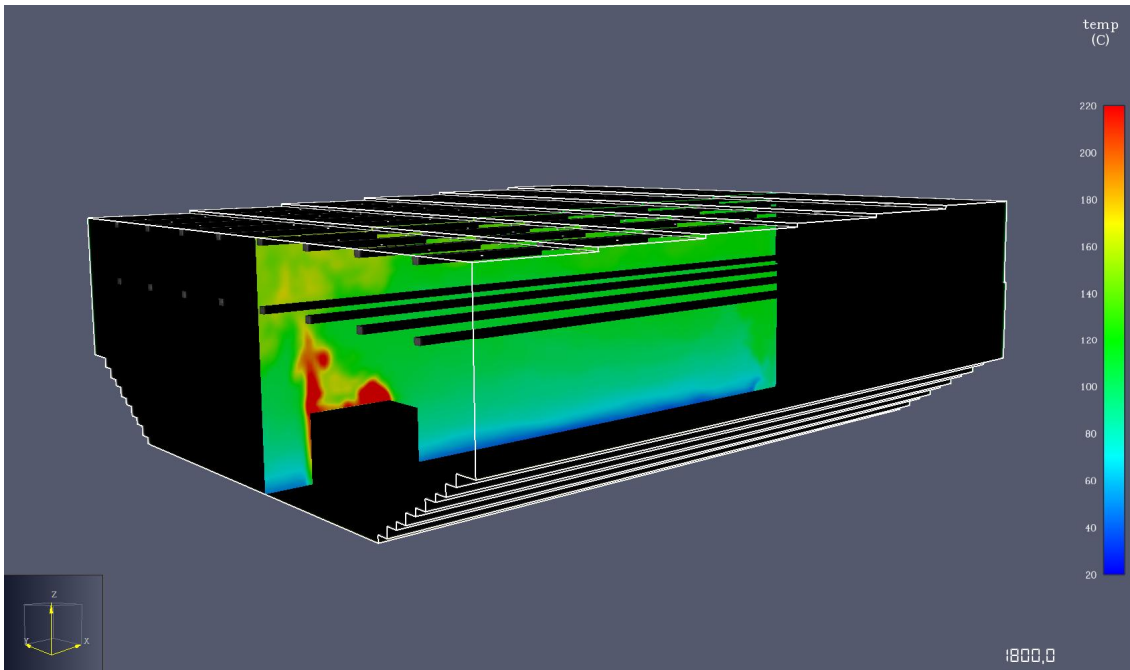
Taulukko 7: FDS ja ELEFIR-EN-ohjelmilla lasketut katsomopalon (600 kW/m²) tulokset

	FDS	ELEFIR-EN
Palokaasut(YP)	63	75
Teräs (Yläpaarre)	39	57
Palokaasut (AP)	70	126
Teräs (Alapaarre)	53	110

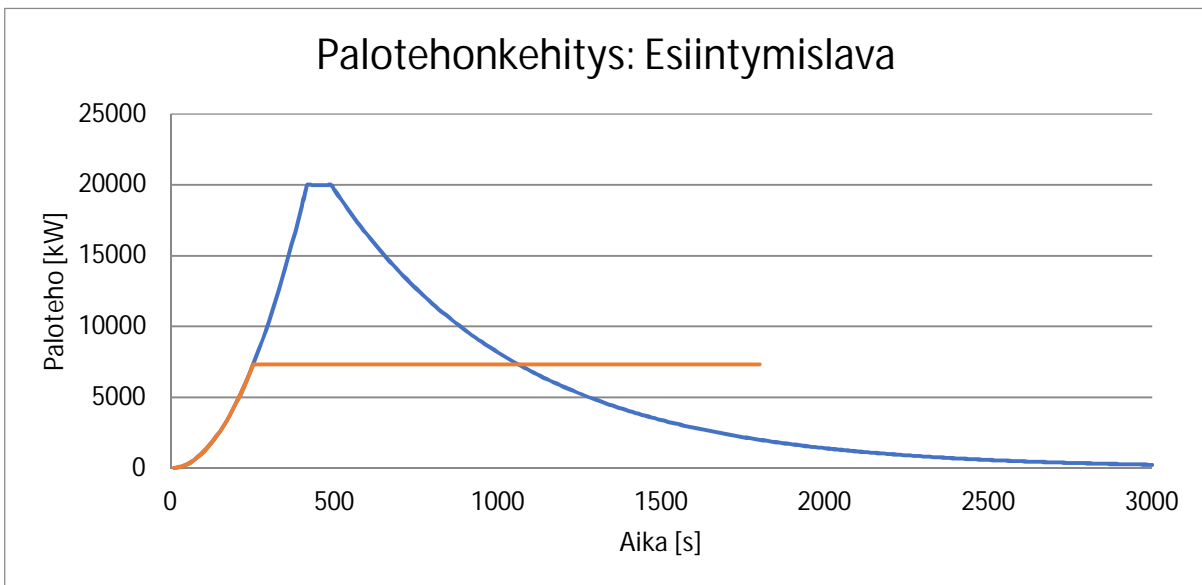
Taulukko 8: Taulukko: FDS ja ELEFIR-EN-ohjelmilla lasketut katsomopalon (750 kW/m²) tulokset

Suurimmilta osin ELEFIR-EN tulokset ovat ns. varmallalla puolella, jos ELEFIR-EN-ohjelmaa käytettäisiin nopeaan tarkasteluun projektin alkuvaiheessa. Tällöin voitaisiin arvioida, olisiko kohteeseen järkevää suorittaa palo-simulointia.

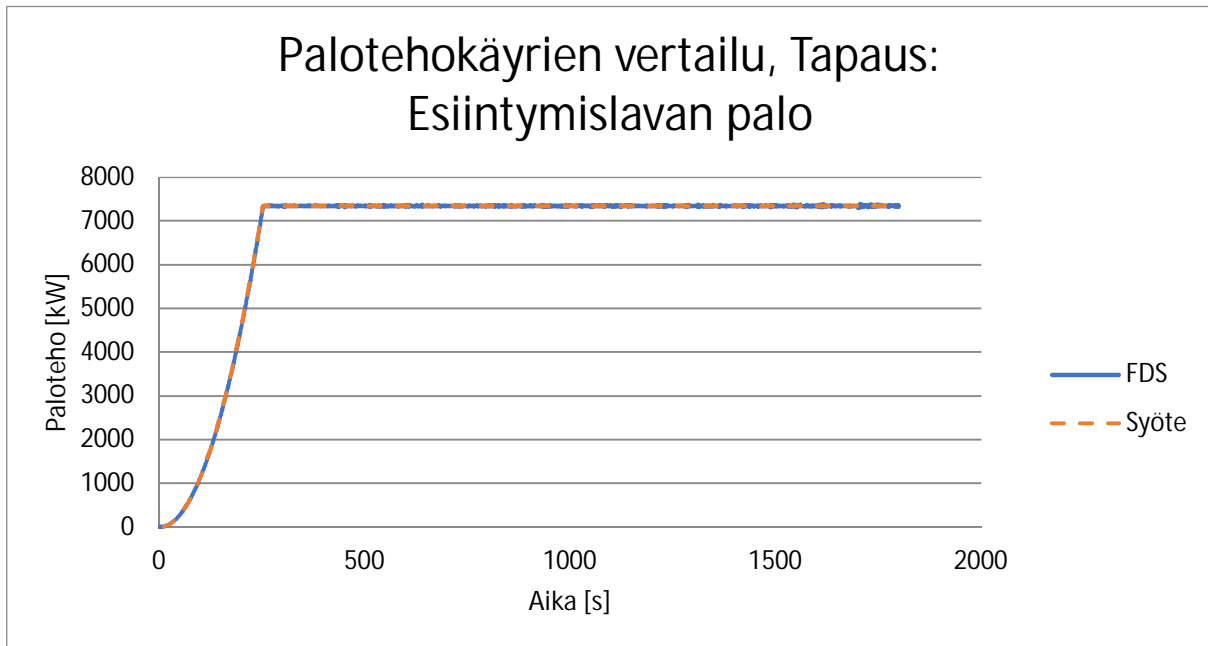
4.4.1 Tapaus 1: Esiintymislavan palo



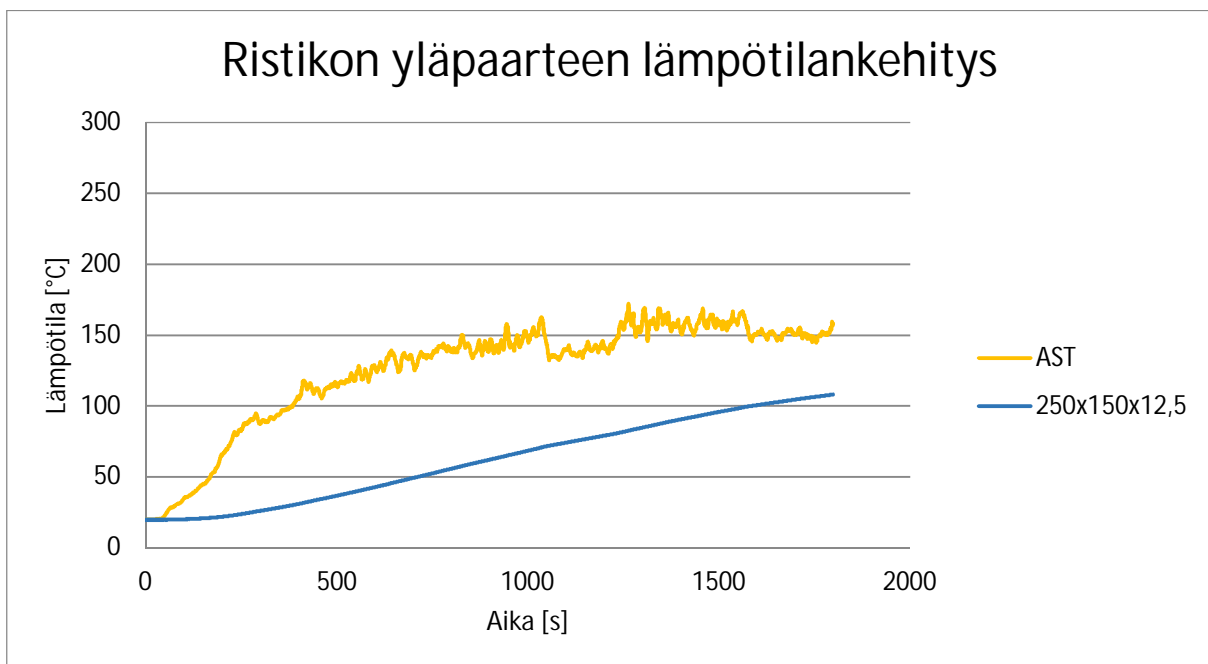
Kuva 9 Esiintymislavan palomalli 30 minuuttia palon alkamisesta.



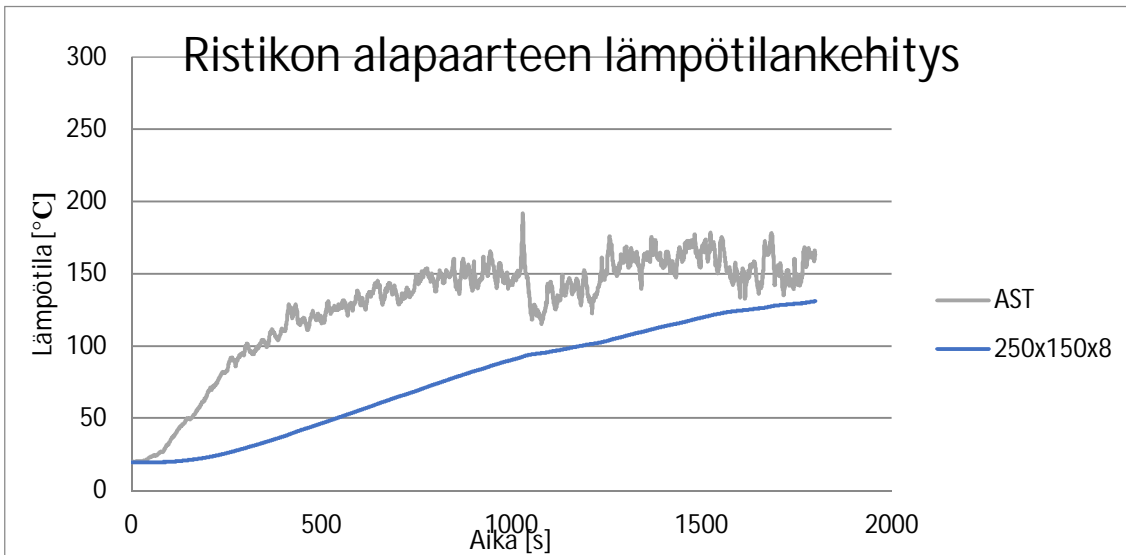
Kuva 10 Esiintymislavan palomallin mukainen palotehokäyrä (sin) ja sprinklauksen vaikutus palotehossa



Kuva 11 Palotehokäyrien vertailu esiintymislavan palon tapauksessa. FDS on laskenut syötetyn palotehon mukaisesti.

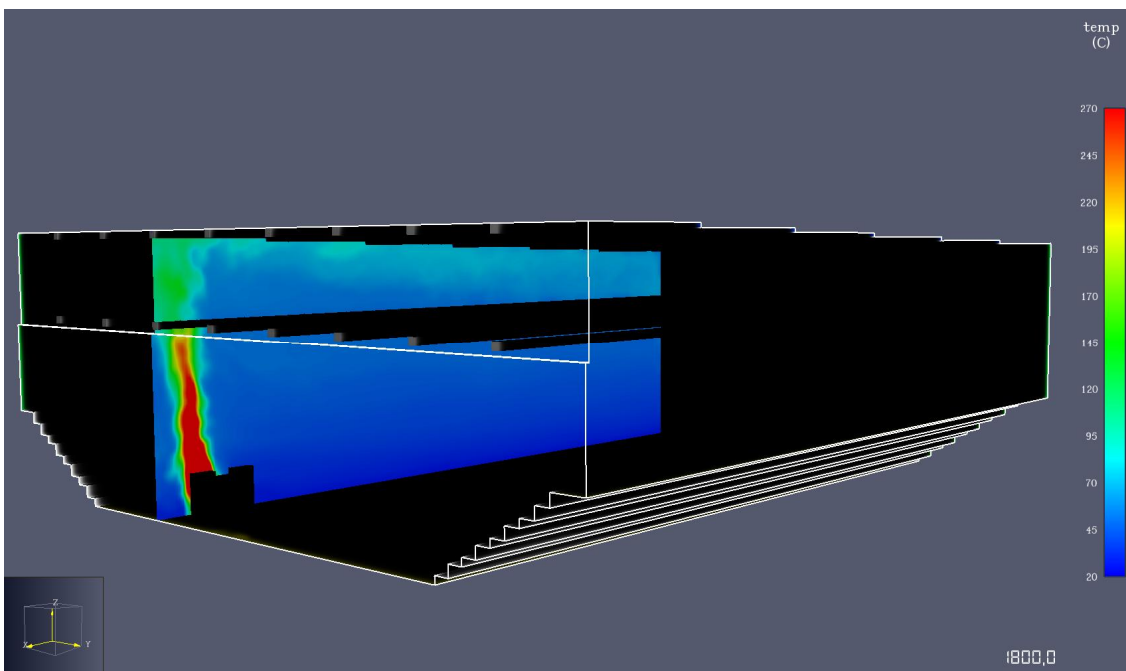


Kuva 12 Ristikon yläpaarteiden adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa esiintymislavan palossa.



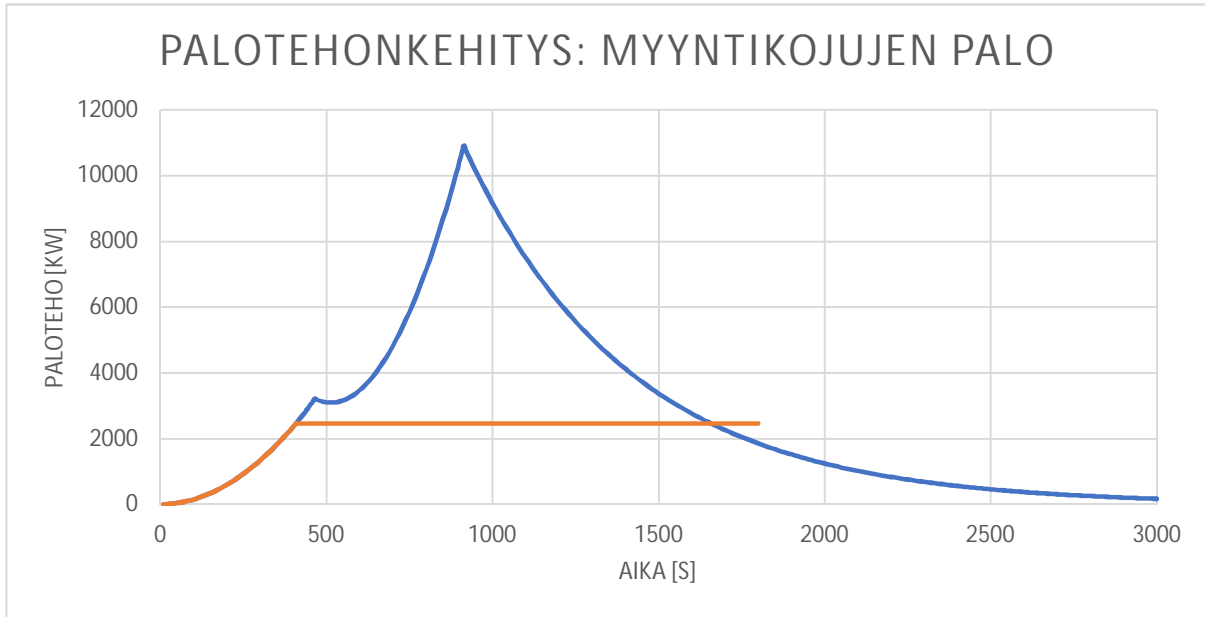
Kuva 13 Ristikon alapaarteen adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa esiintymislavan palossa.

4.4.2 Tapaus 2: Myyntikojujen palo

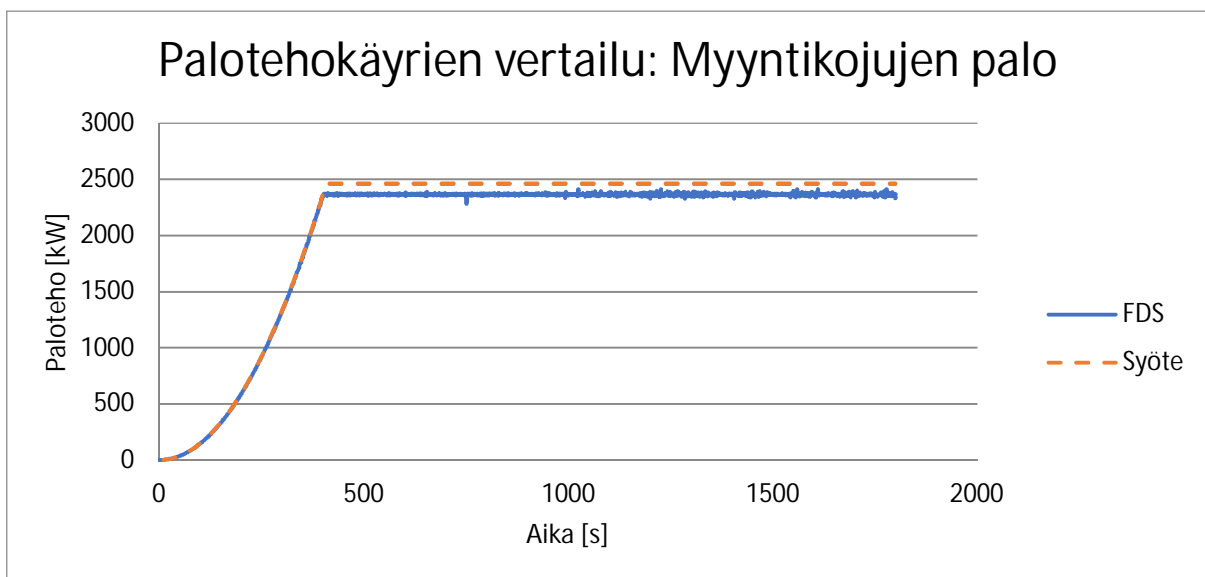


Kuva 14 Myyntikojujen palomalli 30 minuuttia palon alkamisesta.

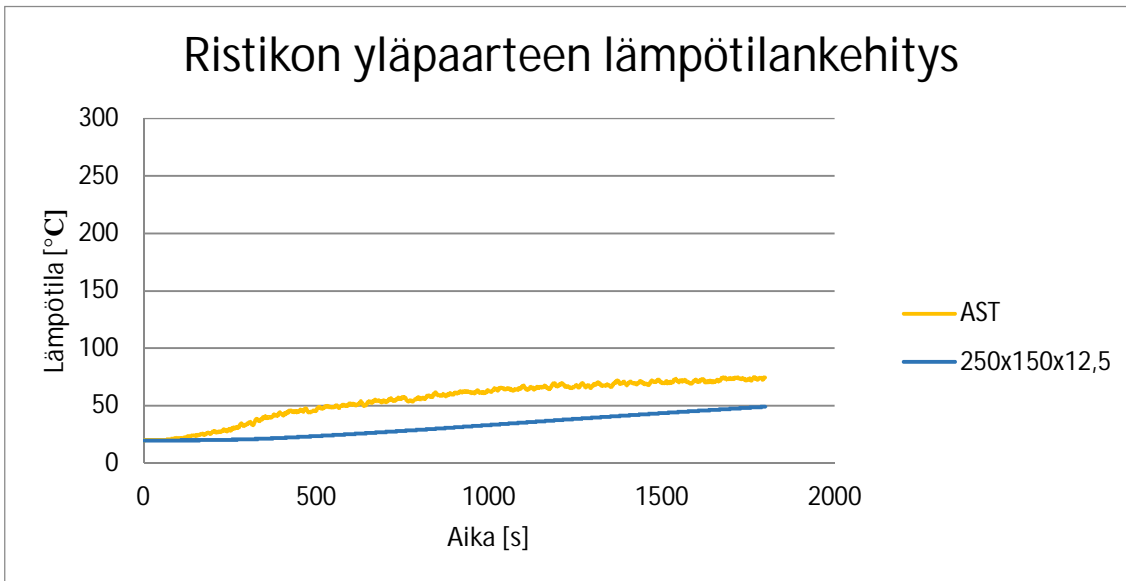
Kuva:



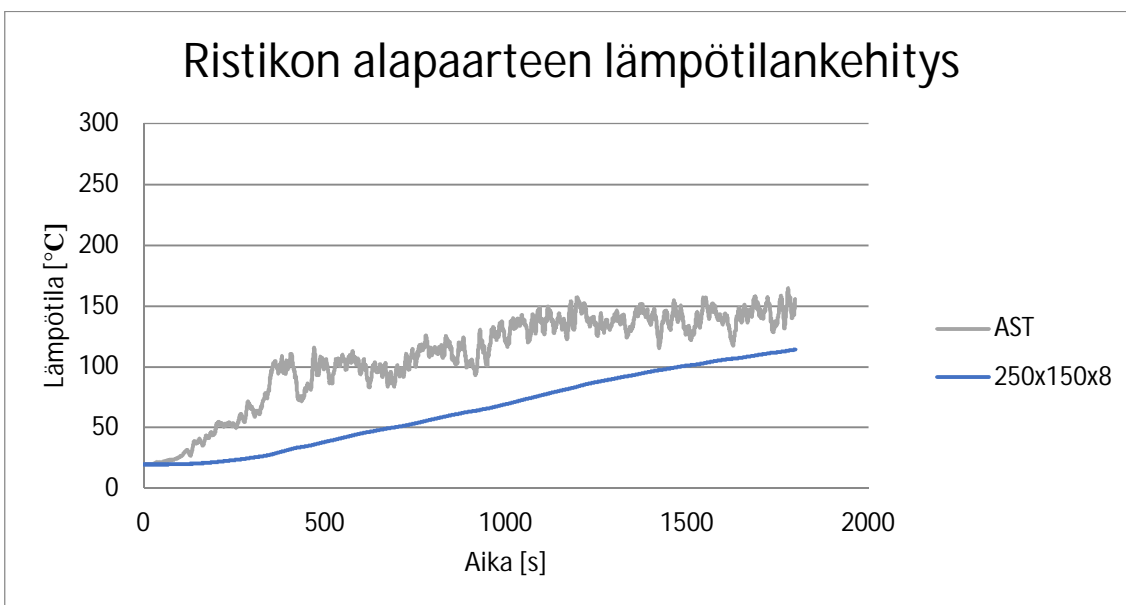
Kuva 15 Myyntikojujen palomallin mukainen palotehokäyrä (sin) ja sprinklauksen vaikutus palotehossa



Kuva 16 Palotehokäyrien vertailu myyntikojujen palon tapauksessa. FDS on laskenut syötetyn palotehon mukaisesti.

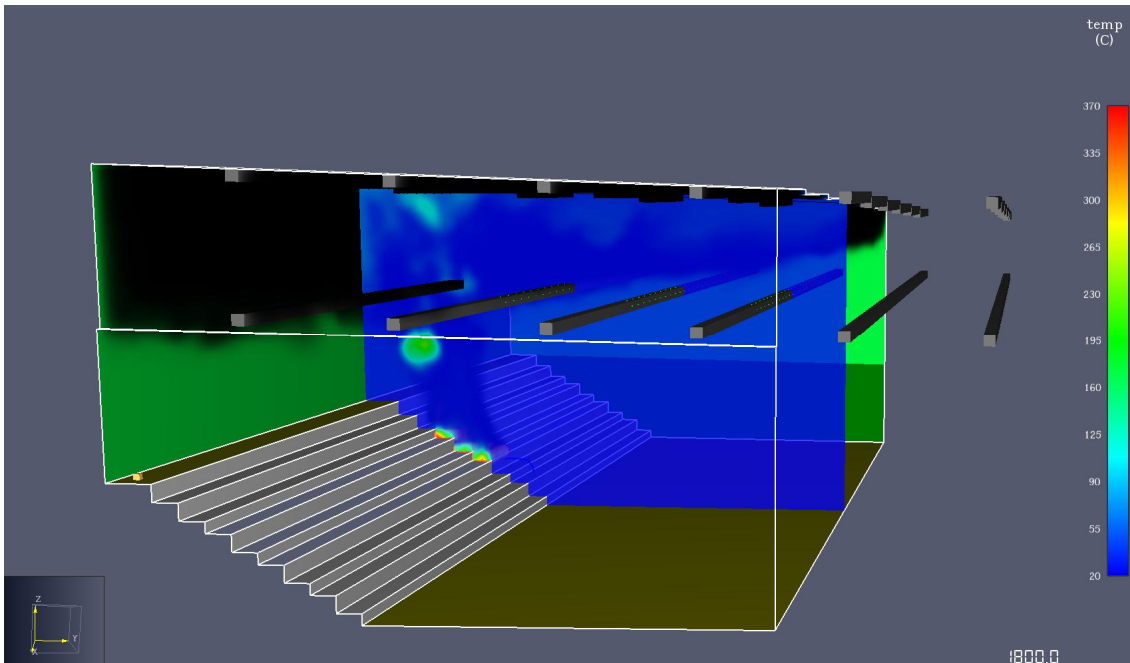


Kuva 17 Ristikon yläpaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa myyntikojujen palossa.

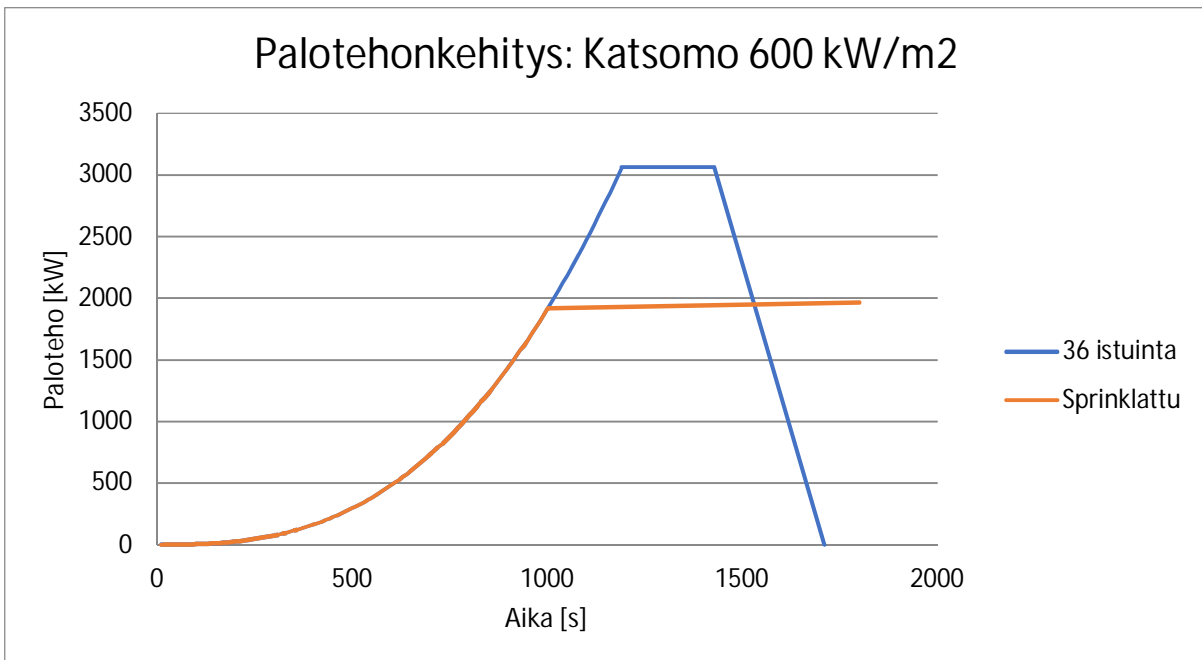


Kuva 18 Ristikon alapaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa myyntikojujen palossa.

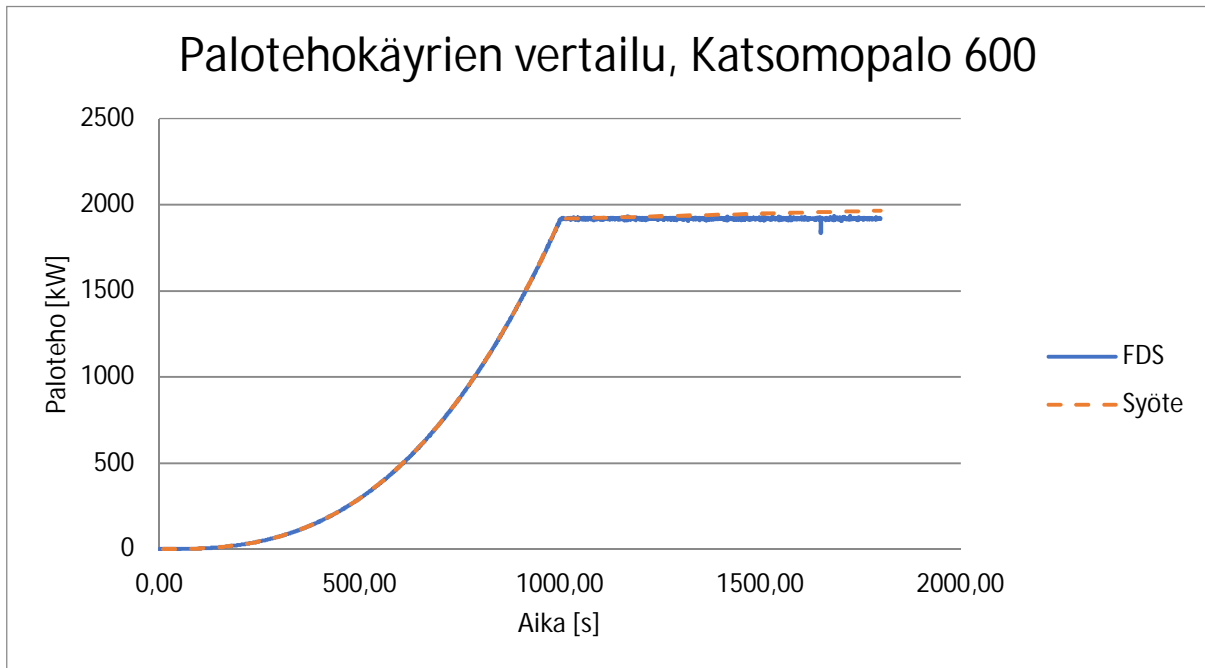
4.4.3 Tapaus 3a Katsomopalo



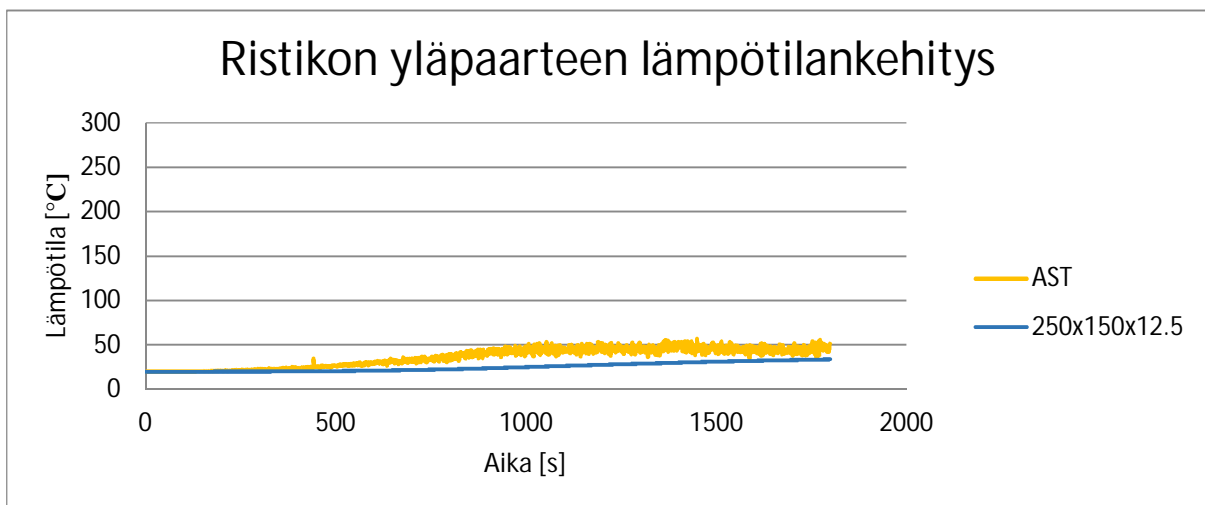
Kuva 19 Katsomopalojen palomalli 30 minuuttia palon alkamisesta.



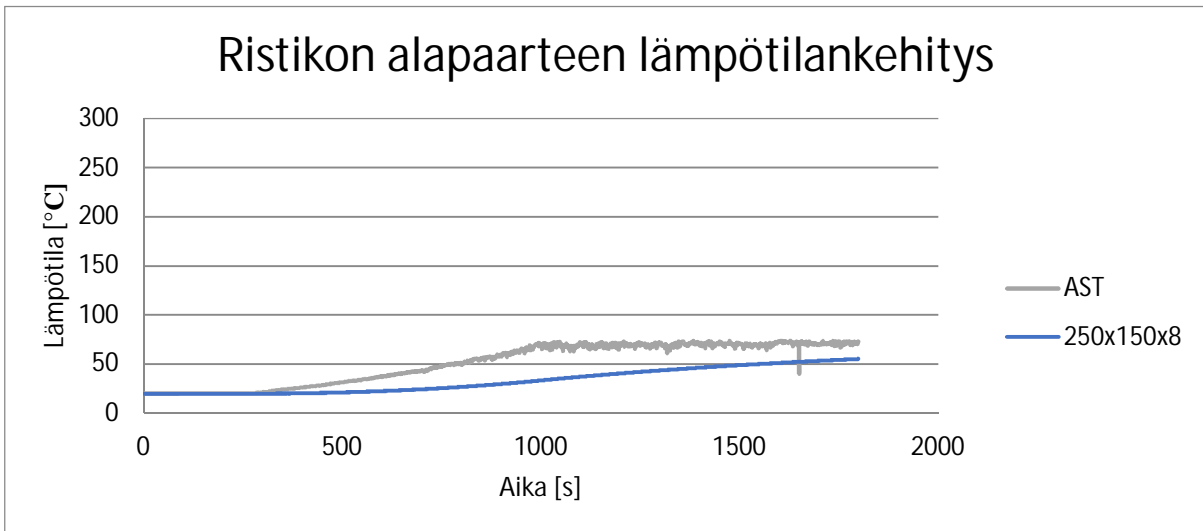
Kuva 20 Katsomopalon (600kW/m²) palomallin mukainen palotehokäyrä (sin) ja sprinklauksen vaikutus palotehossa



Kuva 21 Katsomopalon (600kW/m^2) palomallin mukainen palotehokäyrä (sin) ja sprinklauksen vaikutus palotehossa

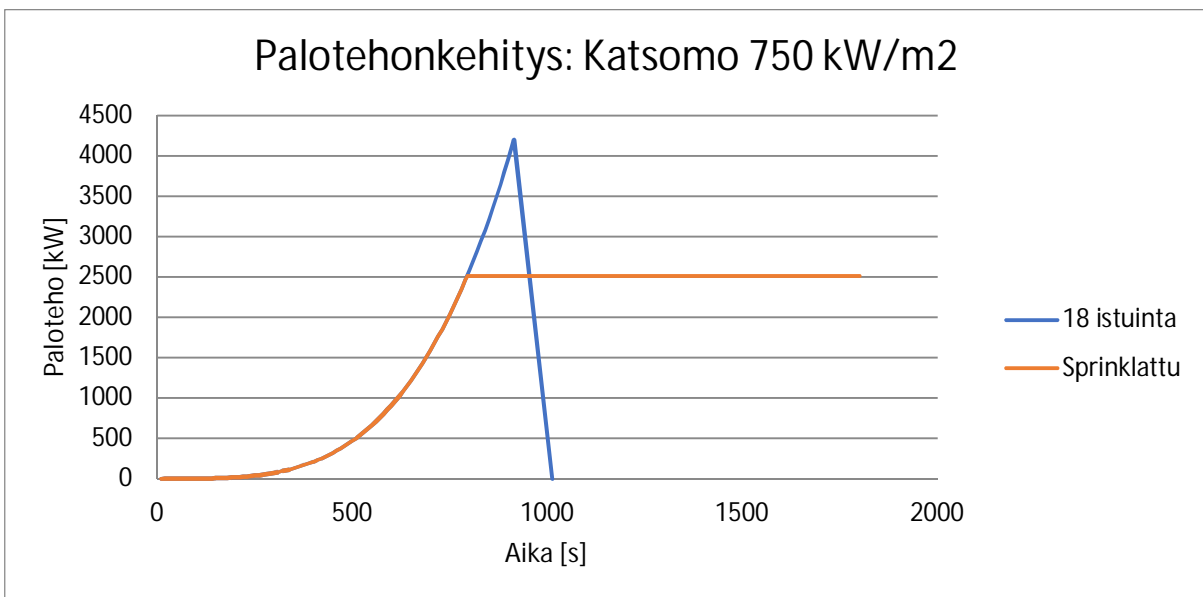


Kuva 22 Ristikon yläpaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon (600kW/m^2) palossa.

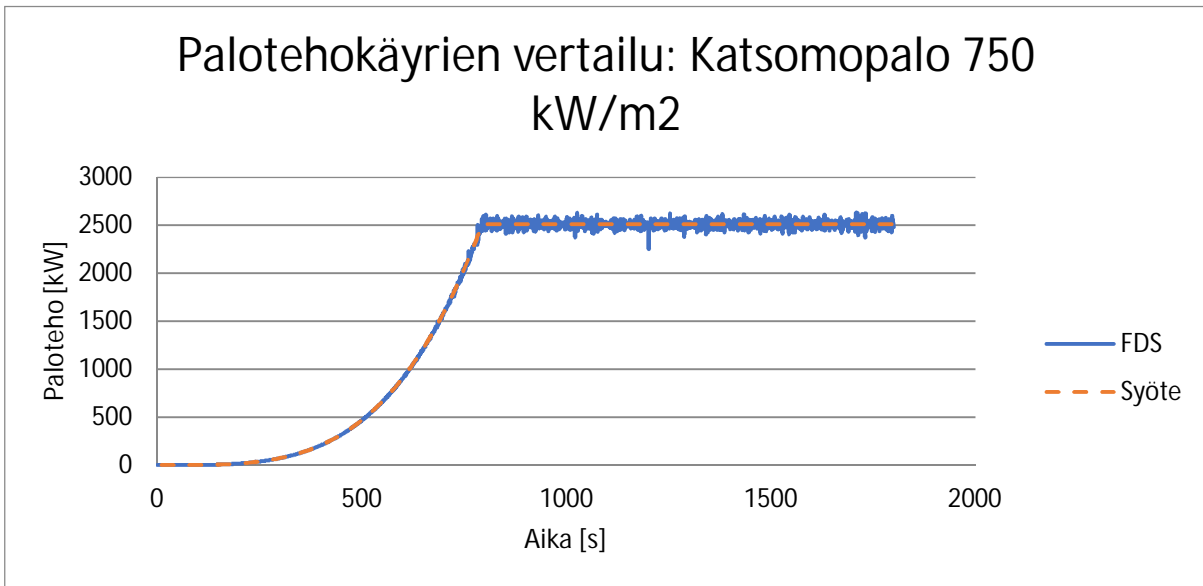


Kuva 23 Ristikon alapaarteiden adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon (600kW/m^2) palossa.

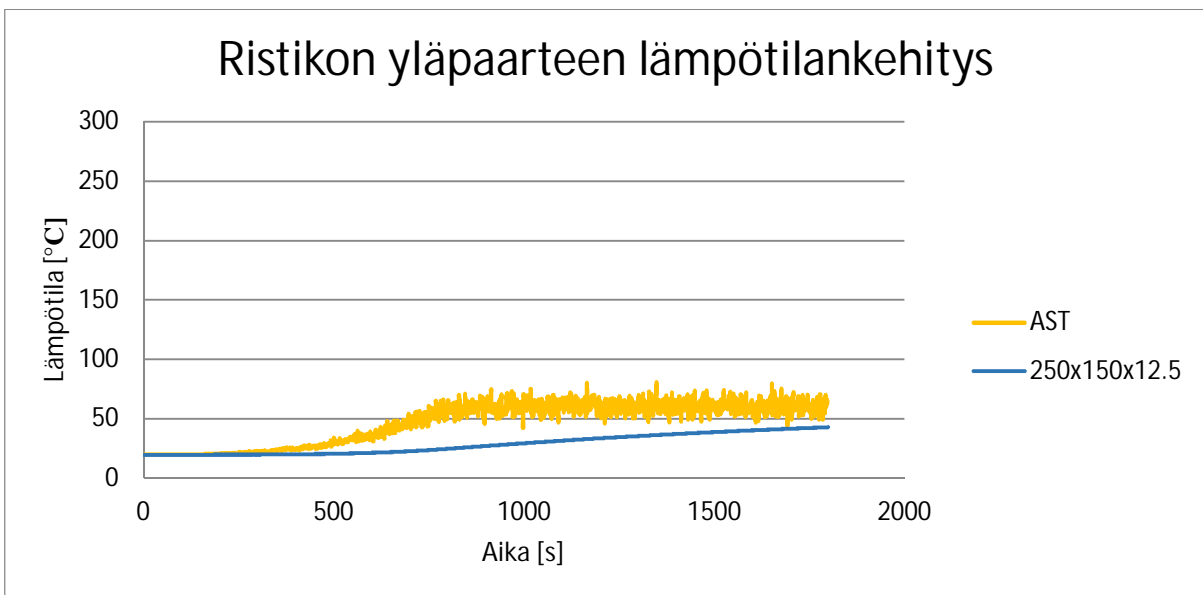
4.4.4 Tapaus 3b Katsomopalon herkkyystarkastelu



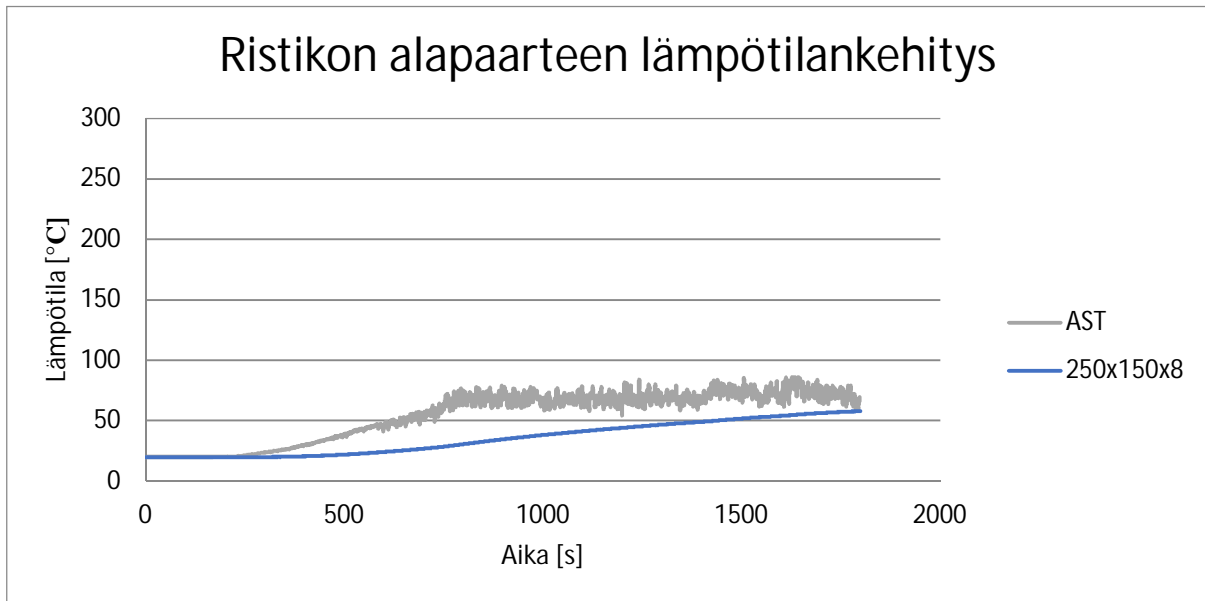
Kuva 24 Katsomopalon (750 kW/m^2) palomallin mukainen palotehokäyrä (sin) ja sprinklauksen vaikutus palotehossa



Kuva 25 Katsomopalon (750 kW/m²) palomallin mukainen palotehokäyrä (sin) ja sprinklauksen vaikutus palotehossa



Kuva 26 Ristikon yläpaarteiden adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon (750 kW/m²) palossa.



Kuva 27 Ristikon alapaarten adiabaattisten pintalämpötilojen kehitys (AST) ja lämpötila teräsprofiilissa katsomopalon (750 kW/m²) palossa.

6. Yhteenveto

Suunnittelemalla taulukkomitoituksella standardipalon lämpötila-aikakäyrää käyttämällä voidaan päätyä tulokseen, joka on hyvin karkea verrattuna oletetun palonkehityksen suunnittelun mukaisiin tuloksiin. Tunnistamalla tapaukset, joissa toiminnallista mitoitusta voidaan käyttää, saavutetaan huomattavia hyötyjä, kun teräsrakenteet voidaan suunnitella suojaamattomina ja normaalilämpötilamitoituksen mukaisesti.

Paikallisten palojen ja palosimuloinnissa käytettävien palojen mallintamiseen voidaan hyödyntää kohdekohtaisesti VTT:n mitoituspalokokeelmassa (VTT, Hietaniemi Jukka, 2007) esitettyjä palotapauksia. Esimerkki-kohteen tuloksia tarkastellessa huomataan, että tarkasteltavaan liikuntasaliin sijoitetut mahdollisten paloskenaarioiden mitoituspalojen lämpötilat eivät saavuta teräsristikoille laskettuja kriittisiä lämpötiloja. Myöskään 400 °C:een lämpötilaa ei saavuteta, jolloin teräsrakenteiden lujuusominaisuudet alkaisivat heiketä. Yhteistyössä rakennesuunnittelijan kanssa on tutkittu, etteivät epäsuorat vaikutukset ole merkittäviä tässä kohteessa. Tulosten perusteella rakenteet kestävät palotilanteille asetetut vaatimukset ilman palosuojausta ja riittävä paloturvallisuus saavutetaan, minkä myötä kustannussäästöt ovat mahdollisia.

Käytössä olevilla ohjelmistoilla voidaan huomioida palonkehitys kohdekohtaisesti osaavan henkilön toimesta. Myös sprinklauksen vaikutukset voidaan ottaa huomioon. Oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun selvitykset on liitettävä rakennuslupa-asiakirjoihin. Selvityksistä on käytävä ilmi lähtötiedot rakennuksesta ja tehdyt oletukset perusteluineen. Myös suunnittelussa käytettävät menetelmät ja niiden kuvaus, jossa esitetään laskenta- ja koemenetelmien soveltuvuus rajoituksineen. Liitteisiin kuuluvat myös saadut tulokset herkkyyksianalyysineen, hyväksymiskriteerit ja tulosten vertailu niihin, sekä analyysien ja johdopäätösten esittäminen viranomaisille. Esitietopaperi ja raportti laaditaan viranomaisyhteistyön sekä tarkastusprosessin parantamiseksi. Pelastussuunnitelmassa sekä huolto- ja käyttöohjeessa huomioidaan oletetun palonkehityksen suunnittelu.

Lähteet

BFS2013:12 BBRAD3, Boverkets författningssamling, 2013.

ECCS Eurocode design manuals, Ernst & Sohn 2010. Franssen Jean-Marc, Vila Real Paulo. Fire Design of Steel Structures: Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: Structural fire design. Bryssel, Belgia. ISBN978-92-9147-099-0 428.s 1st edition.

Evans, D. D. 1992. Sprinkler Suppression Algorithm for HAZARD. Proceeding 12th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel for Fire Research and Safety. Tsukuba, Japan: Building Research Institute. 7 s. Saatavissa: <https://ia800603.us.archive.org/11/items/sprinklerfiresup5254evan/sprinklerfiresup5254evan.pdf>

Hamins, A. & McGrattan, K.B. 1999. Reduced-Scale Experiments to Characterize the Suppression of Rack Storage Commodity Fires. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology. Technical Report NIST Internal Report (NISTIR 64391) Saatavissa: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6439.pdf>

LOCAFI, eng. SCI (The Steel Construction Institute). Design of columns subject to localised fires. Publication Number: SCI P423. 2018.

Maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL), (5.2.1999/132), Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L20P149d>

Madrzykovski, D. & Vettori, R. L. 1992. A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. NISTIR 4833. Saatavissa: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir4833.pdf>

Nieminen Mikko, 2018. Rakennusten automaattisten sprinklerilaitteistojen luotettavuus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/25673/nieminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Outinen J. Ruukki Construction Oy, 2013, Teräsrakenteiden paloturvallisuuden tutkimus ja tuotekehitys. Teräsrakentamisen T&K päivä 28-29.5.2013 Saatavissa: http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/99/73e62b9/jyri_outinen_tk_2013.pdf

OZone V3, user manual. Saatavissa: https://research.bauforumstahl.de/fileadmin/user_upload/LOCAFI__Deliverable_D1.4_Software_OZone_UK.pdf

Pelastuslaki, (29.4.2011/379), Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110379>

Ruukki, 2008. Suunnitteluohje, Rakenteiden toiminnallinen palomitoitus. Saatavissa: <https://docplayer.fi/25549943-Rakenteiden-toiminnallinen-palomitoitus.html>

Salminen, M., Nieminen, M., & Malaska, M. (2019). Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutus teräsrakenteiden palomitoitukseen. *Rakenteiden Mekaniikka*, 52(1), 23-37. Saatavissa: <https://doi.org/10.23998/rm.74512>

SFS-EN 1990+A1+AC, 2010. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Korvaa standardin SFS-EN 1990:2002 ja SFS-ENV 1991-1:1995. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+184 s.

SFS-EN 1991-1-2+AC, 2016. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden kuormitukset. 2. painos. Korvaa standardin SFS-EN 1991-1-2+AC:2004. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+102 s.

SFS-EN 1993-1-1, 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Korvaa standardin SFS-ENV 1993-1-1:1993. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+99 s.

SFS-EN 1993-1-2, 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Korvaa standardin SFS-ENV 1993-1-2:1996. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+75 s.

SFS-EN 1993-1-4, 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-4: Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt. Korvaa standardin SFS-ENV 1993-1-4:1999. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+37 s.

SFS-EN 1993-1-12, 2009. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: EN 1993 laajennus teräslajeihin S700 asti. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+11 s.

SFS-EN 12845, 2015. Kiinteät palonsammutusjärjestelmät. Automaattiset sprinklerilaitteistot. Suunnittelu, asennus ja huolto. Korvaa standardin SFS-EN 12845 +A2:2009 Suomen standardoimisliitto SFS: 1+194 s

SFS-EN 1363-1, 2012. Fire resistance tests. Part 1: General requirements. Korvaa standardin SFS-ENV 1363-1:2000. Suomen standardoimisliitto SFS: 1+52 s.

SSAB Europe, 2016. SSAB DOMEX TUBE Rakenneputket. EN 1993 Käsikirja. ISBN 978-952-93-7448-9 (PDF) Keuruu (688 s.)

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus (2017) [verkkodokumentti] Helsinki: Ympäristöministeriön asetus rakennuksen paloturvallisuudesta (848/2017). Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B66288BFB-A697-4FCB-B602-CE0316F2C37B%7D/134002>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus (2017) [verkkodokumentti] Helsinki: Ympäristöministeriön asetus rakennuksen paloturvallisuudesta (848/2017). Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B66288BFB-A697-4FCB-B602-CE0316F2C37B%7D/134002>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus, Teräsrakenteet (2017) [verkkodokumentti] Helsinki: Ohje sisältää yhteen koottuna kaikki teräsrakenteiden suunnittelua koskevat kansalliset

liitteet. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BD829E0A3-9D8E-4730-8E6C-EF076B4642F2%7D/126585>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus (2016) Helsinki: Ympäristöministeriön asetus 5/16, Palolle altistettujen rakenteiden rasiuksia koskevasta kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia SFS-EN 1991-1-2 [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.finlex.fi/data/normit/42810/asetus_5-16_2016.pdf

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 2003. RIL 221-2003, Paloturvallisuussuunnittelu, Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. Helsinki (138s.) ISBN 951-758-433-4

SPEK Suomen pelastusalan keskusjärjestön julkaisu, Simo Lehtimäki ja työryhmä, 1997. Palotekninen erityissuunnittelu vyöhykemalleja käyttäen. Padasjoki (80 s.). ISBN 951-797-043-9

Teräsrakenneyhdistys (TRY), 2000. TERÄSNORMIKORTTI N:o 13/2000, Teräksen materiaalimallit mitoittaessa palosuojaamattomia teräsrakenteita. Teräsrakenneyhdistys Helsinki (18s.) Saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/237/2abe3cb/Normikortti13net.pdf>

Teräsrakenneyhdistys ry, 2004. Oletettuun palonkehitykseen perustuva paloturvallisuussuunnittelu. Helsinki. (74 s.) ISBN 952-9683-27-8

(TUT)Tampere University of Technology, 2017. LOCAFI+. Legal Context. Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localized fire – Valorization 17 s.

Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings. Nystedt, Fredrik, 2011. Saatavissa: <https://portal.research.lu.se/portal/files/3912725/1832676.pdf>

University of Liege. SAFIR Capabilities and examples of applications, 2015. Liege, Belgia.

VTT, Tillander Kati, Oksanen Tuuli ja Kokki Esa, 2009. Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot. Helsinki. (106 s. + liitt. 5 s) ISBN 978-951-38-7287-8

VTT, Hietaniemi Jukka, 2007. Palon voimakkuuden kuvaaminen toiminnallisessa paloteknisessä suunnittelussa. Espoo (148 s. + liitteet) (VTT:n mitoituspalokokoelma)

Yu, H., Lee, J.L. & Kung, H.C. 1994. Suppression of Rack-Storage Fires by Water. Teoksessa: Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium, International Association For Fire Safety Science. s. 901-912. Saatavissa: http://iafss.org/publications/fss/4/901/view/fss_4-901.pdf

Kantavien teräsrakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu pALOHAnke

Osatehtävä 2

RAPORTTI
22.10.2019



Teräsrakenneyhdistys
Finnish Constructional Steelwork Association

RAMBOLL