



# Toiminnallinen palomitoitus

Jalkautus organisaatiotasolle

Jani Leppinen

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2021

Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma

LEPPINEN, JANI:  
Toiminnallinen palomitoitus  
Jalkautus organisaatiotasolle

Opinnäytetyö 101 sivua, joista liitteitä 19 sivua  
Toukokuu 2021

---

Opinnäytetyössä tutkittiin toiminnallisen palomitoituksen teoriaa ja mahdollista hyödyntämistä suunnitteluorganisaatiossa osana suunnittelijan työkalupakkia teräsrakenteisissa kohteissa. Työn tarkoitus oli selvittää mitä asioita suunnittelija joutuu ottamaan huomioon toiminnallisessa palomitoituksessa sekä mitkä ovat toiminnallisen palomitoituksen viranomaisvaatimukset. Työtä varten osallistuttiin Teräsrakenneyhdistyksen Aloha -hankkeeseen sekä suoritettiin Aalto -yliopiston Fire Dynamic and Simulation -kurssi. Työssä tutkittiin simuloinnin toteuttamista FDS -ohjelmistolla ja työ sisälsi palotarkastusinsinööri Tapio Stenin haastattelun.

Työn perusteella suunnittelijan, jonka tarkoitus on hyödyntää toiminnallista palomitoitusta työssään, täytyy hankkia riittävät edellytykset kokonaisuuden hallitsemiseksi. Toiminnallisen palomitoituksen osalta voidaan tarkastella rakenteesta yksittäisiä kokonaisuuksia ja tällöin koko rakennusta ei tarvitse tarkastella toiminnallisesti. Riittävään osaamiseen tarjotaan Suomessa kahdessa yliopistossa kursseja. Toiminnallisen palomitoituksen hyödyntäminen vaatii aina yhteistyötä pelastusviranomaisen kanssa projektin alussa sekä lopussa.

Toiminnallisen palomitoituksen hyödyntäminen palvelee kohteissa, missä palokuormat ovat pieniä tai tila on suuri ja avoin. Tällöin rakenteen lämpötila ei välttämättä ylitä 400-asteen raja-arvoa, mitä voidaan pitää teräsrakenteen lujuuden kannalta kriittisenä arvona. Lieskahduksen välttäminen on otettava huomioon aina tarkasteltavan rakenteen koosta riippumatta. Työn perusteella toiminnallista palomitoitusta voidaan hyödyntää työkaluna kohteissa missä tarkastellaan joko yksittäistä rakenneosaa tai osakokonaisuutta missä palokuorma on pieni ja tila suuri.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Master's Degree Programme in Construction Engineering

LEPPINEN, JANI:  
Performance-based Fire Engineering  
Usage at organisation level

Master's thesis 101 pages, appendices 19 pages  
May 2021

---

This Masters's thesis studied the theory of performance -based fire engineering and its possible usage at design organization part of the structural designers toolbox regarding steel structured frames. The purpose of the study was to make clear what are the things that structural engineer must know before using performance -based fire engineering and what are authoritative demands. As part of the study, was to be participated in Aloha -project by Finnish Constructional Steelwork Association and take course according Fire Dynamic and Simulation at Aalto University. As part of the work fire safety engineer Tapio Sten was interviewed.

This study showed that before performance -based fire engineering can be used, structural engineer must meet certain preconditions to master the subject. As part on performance -based fire engineering one can study only part of the structure. For to meet certain preconditions, one can study subject at two different universities in Finland. Part of the performance -based fire engineering is to be in contact with fire safe authorities at the beginning and end of the project.

Performance -based fire engineering can be used alongside structural engineering regarding projects that have small with fire loads or that are large and open. In these cases the temperature of the steel frame may not exceed 400 -degrees temperature which can be assumed critical point for the strength of the steel. Flashover must be taken notice with all structures regarding size. According this study one can use performance -based fire engineering as a part of toolbox when part of the structure is examined or where part of the building has small fire load or large space.

---

Key words: fire engineering, performance -based fire engineering, fire simulation, fire, flashover, FDS

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Taustaa .....	7
1.2	Tutkimuksen tavoite ja rajaus .....	8
2	PALOMITOITUKSEN TAUSTAA .....	9
2.1	Nimellinen paloaltistus .....	9
2.1.1	Standardipalo .....	9
2.1.2	Ulkopuolisen palon käyrä .....	10
2.1.3	Hiilivetykäyrä .....	11
2.2	Luonnollisen palon mallit .....	12
2.2.1	Yksinkertaiset palomallit .....	12
2.2.1.1	Huonepalot .....	12
2.2.1.2	Paikallinen palo .....	13
2.2.2	Kehittyneet palomallit .....	18
2.2.2.1	Yksivyöhykemalli .....	18
2.2.2.2	Kaksivyöhykemallit .....	22
2.3	Virtausdynamiikkaa soveltavat mallit .....	24
3	VIRANOMAISVAATIMUKSET .....	25
3.1	Paloluokat ja niiden mukaiset rajaukset ja vaatimukset .....	25
3.1.1	Paloluokat 2 ja 3 .....	26
3.1.2	P1 paloluokka ja korkeat rakennukset .....	27
3.1.3	P0 paloluokka .....	28
3.2	Vaatimukset suunnittelijalle .....	29
3.2.1	Pätevyysvaatimukset .....	30
3.3	Koulutustarjonta .....	32
3.4	Viranomaisen näkemyksiä toiminnallisesta palomitoituksesta .....	33
4	PALOSIMULOIDUNNEISSA KÄYTETTÄVÄT OHJELMISTOT .....	35
4.1	FDS .....	36
4.2	Pyrosim .....	38
4.3	OZone V2 .....	39
4.4	Safire .....	42
5	TOIMINNALLISEN MITOITUKSEN KÄYTTÖÖNOTTO .....	44
5.1	Tarkastettava rakenne .....	44
5.2	Pintojen määrittely .....	47
5.2.2	Lämmön johtuminen .....	47

5.2.3	Pintojen ja niiden ominaisuuksien määrittäminen simulaatioon.....	49
5.2.4	Aukotuksien määrittäminen pintoihin .....	52
5.2.5	Venttiilit ja ilmanvaihdolliset järjestelmät.....	53
5.2.6	Ilmanvaihdollisten järjestelmien mallintaminen .....	55
5.3	Palon mallintaminen.....	57
5.3.2	Yksinkertainen palo .....	57
5.3.3	Nestepalo .....	60
5.3.4	Kiinteiden polttoaineiden palaminen .....	63
5.3.5	Kiinteiden polttoaineiden palon mallintaminen.....	64
5.4	Mittarit palosimuloinnin tulosten tarkasteluun.....	68
6	PALOSIMULOINNIN SUORITTAMINEN TODELLISISSA KOHTEISSA	72
6.1	Pienet kohteet .....	72
6.2	Suuret kohteet ja avoimet tilat .....	75
6.3	Rakenteen palosuojamaalauksen optimointi.....	77
7	YHTEENVETO.....	80
	LÄHTEET.....	81
	LIITTEET.....	83
	Liite 1. Standardi- ja parametrinen lämpötila -aikakäyrä .....	83
	Liite 2. Pakotetun ja luonnollisen konvektion laskenta .....	85
	Liite 3. Reaktioyhtälöiden laskeminen palotapahtumassa.....	89
	Liite 4. Nestepalon säteilyn lämpövuoto.....	95
	Liite 5. Palopatsaan mallit sekä massavirtaus .....	98
	Liite 6. Lieskahdukseen tarvittava vähimmäis palokuorma .....	101

**ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)**

T	Lämpötila
$T_0$	Alku lämpötila (yleensä 20c)
$\Theta_g$	Palokäyrän lämpötila ajan hetkellä t
t	Aika
$h_{net}$	Pintojen nettolämpövuoto
$h_{net,c}$	Nettolämpövuoto kuljettumalla
$h_{net,r}$	Nettolämpövuoto säteilemällä
O	Aukkotekijä
b	$= \sqrt{\rho c \lambda}$
c	Ominaislämpökapasiteetti
$\lambda$	Lämmönjohtavuus
Q	Lämmönluovutusnopeus
z	Tarkasteltava korkeus
g	Normaaliputoamiskiihtyvyys
$m_p$	Massavirtaus
r	Tarkasteltava etäisyys palon keskeltä
$t_g$	Palon kasvuaikatekijä
$h_{ef}$	Lämmönsiirtymiskerroin
$A_T$	Seinien pinta-ala
$A_D$	Aukkojen pinta-ala
$H_D$	Aukkojen keskimääräinen korkeus
$D^*$	Palon halkaisija
$\delta x$	Elementtiverkon solun koko
k	Lämmönjohtumisvakio

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Taustaa

Palomitoittaminen on työtä, missä suunnittelukohteen rakenteet tarkastellaan erikseen määrätulle palotapahtumalle ja kestolle. Kohteen laajuus sekä mahdolliset taloudelliset ja henkilövahingot määrittelevät mihin paloluokkaan rakenne kuuluu. Rakenteellisesti yleisimpiä paloluokkia ovat R30 ja R60. Tämä tarkoittaa, että rakenteen pitää kestää paloa kohteessa määrätyn ajanjakson sortumatta. Perinteisesti tämä on tehty mitoittamalla rakenteet kestämään standardipalon vaatima lämpötilan nousu (EN 1991-1-2).

On myös mahdollista hyödyntää rakenteiden mitoittamiseen palon toiminnallista mitoittamista, mikä ottaa huomioon palon luonnollisen mallin. Tämä menetelmä vaatii perehtyneisyyttä palon dynamiikkaan sekä hieman kehittyneempiin laskentamenetelmiin. Työssä keskitytään palon toiminnalliseen mitoittamiseen, siitä saatavaan hyötyyn ja pohditaan sen mahdollista jalkauttamista yleiseksi suunnittelutyökaluksi rakennesuunnittelutoimiston käyttöön. Toiminnallista palomitoittamista ohjaa entinen E1, jota nykyään on täydennetty ympäristöministeriön asetuksilla (848/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta).

Vuonna 2018 Teräsrakenneyhdistys käynnisti Aloha -hankkeen, minkä tarkoituksena oli tuottaa tutkittua tietoa toiminnallisen palomitoittamisen käyttämisestä. Hankkeesta valmistui kaksi tutkintotyötä joista toisessa keskityttiin rakenteiden mitoittamiseen ja pohdittiin mahdollisia lämmön nousun aiheuttamia muutoksia teräsrakenteen toiminnassa lujusteknisesti. Toinen työ oli enemmän case -luonteinen ja siinä kuvattiin toiminnallisen palomitoitusprosessin läpikäynti simulaatio -mallin luomisesta itse rakenteen mitoittamiseen.

Osittain näiden pohjalta on tarkoitus tässä työssä käsitellä mitä käytännön työkaluja ja osaamista toiminnallinen palomitoittaminen tarvitsee, että se voitaisiin jalostaa rakennesuunnitteluorganisaation käyttöön teräsrakenteisissa kohteissa. Työssä käsitellään muutaman laskentaohjelman toimintaa, mutta pääosin työ

keskittyy itse palotapahtumaan, sen simulointiin ja simuloinnin tulosten hyödyntämiseen.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite ja rajaus

Tutkimuksen tavoitteena on pohtia mahdollisia käytännön työkaluja suunnitteluorganisaation käyttöön, joiden avulla toiminnallista palomitoittamista pystyisi hyödyntämään normaalissa suunnittelutyössä. Työn tarkoituksena on antaa ja esittää rajauksia siitä, milloin toiminnallisesta palomitoittamisesta voisi olla hyötyä rakenteelliselle kestolle ja rakennusurakan kokonaistaloudelle. Tutkimus lähtee oletuksesta, että toiminnallisen palomitoituksen käyttäminen vaatii tekijältä riittävää ammattitaitoa palon mahdollisten vaikutusten arviointiin ja palon leviämiseen. Tutkimus suuntautuu suunnitteluorganisaatiolle, jossa on kokemusta suurempien rakennushankkeiden läpiviemisestä.

Palon dynamiikka ja sen simulointi on laaja alue. Tässä tutkimuksessa keskitytään pääosin palotilanteisiin, jotka jakautuvat yksi- ja kaksivivöhykemalleihin sekä kehittyneempiin menetelmiin. Työssä käydään läpi lieskahduksen jälkeinen lämpötilan laskenta sekä lieskahdukseen vaikuttavat tekijät. Tutkimus rajataan koskemaan teräsrakenteita. Teräsrakenteissa palolla on suuri vaikutus teräksen lujuuden kehitykseen lämpötilan funktiona johtuen teräksen hyvästä lämmönjohtavuudesta. Tutkimuksen sisältöä pystytään hyödyntämään myös puu- ja betonirakenteisiin palon simuloinnin osalta. Teräsrakenteissa kustannusvaikutus on myös suurin, mikäli toiminnallisella palomitoituksella on mahdollista päästä tilanteeseen, missä pystytään välttämään erillisen palosuojauksen käyttäminen. Tällä on myös suoria ekologisia vaikutuksia säästetyissä teräskiloissa sekä mahdollisissa suojamateriaaleissa.



## 2 PALOMITOITUKSEN TAUSTAA

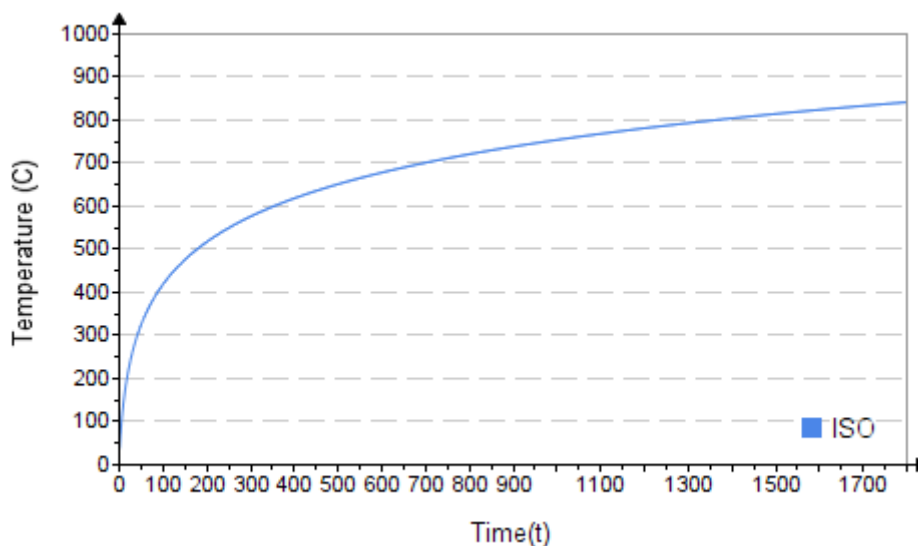
### 2.1 Nimellinen paloaltistus

Nimellinen paloaltistus tarkoittaa tilannetta, missä kaasun lämpötila palossa päätellään ajan funktiona. Kaavat perustuvat polttouuneissa tehtyihin polttokokeisiin, missä kaasun lämpötila on mitattu termopareilla. Nimellinen paloaltistus ei ole riippuvainen palavan materiaalin määrästä, tilan koosta tai mahdollisesta ilmamäärästä mikä palolla on saatavilla.

#### 2.1.1 Standardipalo

Standardipalo on tilanne, missä lämpötila nousee tasaisesti palon seurauksena käytettävän ajan funktiona. Standardipalo perustuu ISO 834 kokeisiin missä polttouuniin on syötetty polttoainetta tasaisena virtana ja tilan lämpötilaa on tarkasteltu uunin perään hitsatulla levymäisellä termoparilla (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale). Standardipalokäyrä on käytössä Euroopan Unionin sisällä, mutta sitä ei ole vielä sisällytetty esimerkiksi amerikkalaiseen standardiin ASTM E119.

$$\Theta_g = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1), \text{ missä } t \text{ on aika minuutteina} \quad (1)$$



KUVA 1. Standardipalon lämpötila -aikakäyrä.

Standardipalo ei ota huomioon palokuorman suuruutta, tilan kokoa eikä mahdollista ilmvirran määrää paloon. Standardipalon lämpötila jakautuu homogeenisesti koko tilaan. Teräsrakenteeseen siirtyvä lämpötila lasketaan rakenteeseen säteilemällä ja kuljettumalla siirtyvä lämpötilan funktiona (EN 1991-1-2, 3.1).

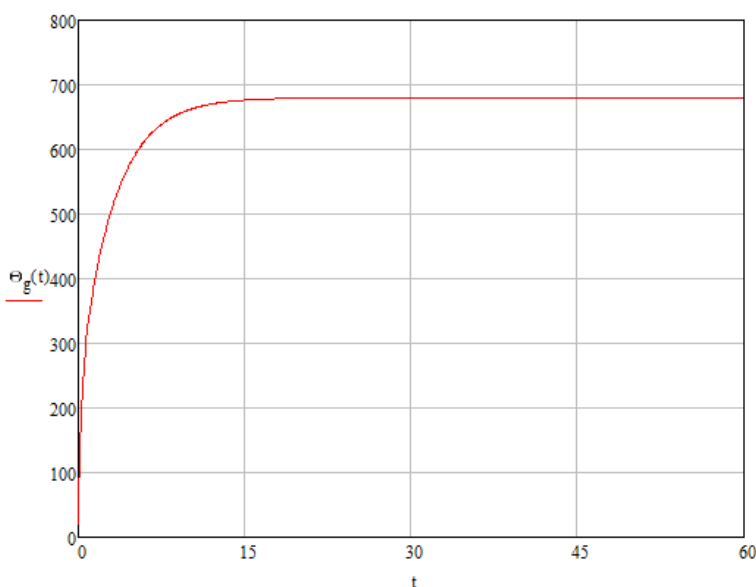
$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r}$$

Standardipalossa ei tarvitse ottaa huomioon lämpötilan noususta rakenteelle aiheutuvia välillisiä vaikutuksia. Standardipalon lämpötila jatkaa kasvuaan ajan suhteen loputtomasti.

### 2.1.2 Ulkopuolisen palon käyrä

Ulkopuolisen palon käyrää käytetään tilanteessa, missä palo sijaitsee tilan ulkopuolella ja lämmittää esimerkiksi tutkittavan rakenteen seinää. Palon käyrällä havainnoidaan sisätilan lämpötilaa mihin ulkopuolinen lämpövuoto vaikuttaa. Kaasun lämpötila ulkoisessa palossa määritellään kaavalla (2). Kaasun lämpötila nousee suhteellisen nopeasti 680 -asteeseen ja pysyy siellä loppuun asti.

$$\Theta_{gu} = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20 \quad (2)$$

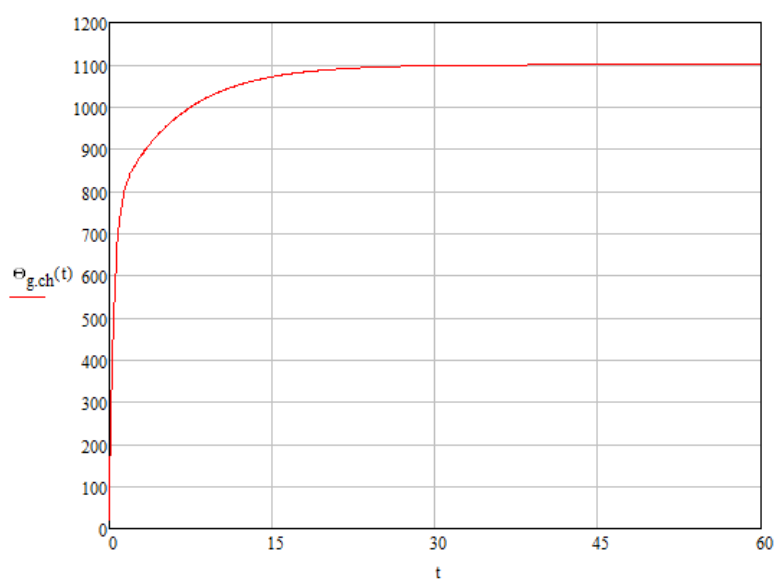


KUVA 2. Ulkopuolisen palon lämpötila -aikakäyrä

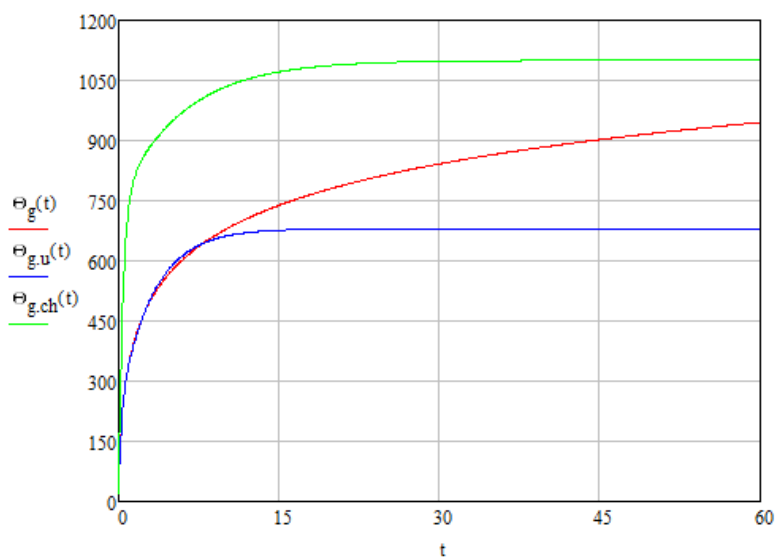
### 2.1.3 Hiilivetykäyrä

Hiilivetykäyrää käytetään normaalisti kuvaamaan nestemäisten polttoaineiden paloa. Näissä normaalisti lämpötila kasvaa nopeasti 1100 -asteeseen ja pitää palotehonsa polttoaineen loppumiseen saakka. Palotilassa kaasun lämpötilaa kuvaa kaava (3).

$$\Theta_{g,ch} = 1\,080 (1 - 0,325 e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \quad (3)$$



KUVA 2. Ulkopuolisen palon lämpötila -aikakäyrä



KUVA 3. Yhdistetty lämpötila -aikakäyrä

## 2.2 Luonnollisen palon mallit

Luonnollisen palon mallit jakautuvat yksinkertaisiin sekä kehittyneisiin palomalleihin. Yksinkertaisissa palomalleissa palotilan lämpötila määritellään tasaisesti jakautuneeksi yhteen ainekerrokseen tilassa. Mallin edistyessä kehittyneempään suuntaan lämpötilajakauma tilassa kasvaa.

### 2.2.1 Yksinkertaiset palomallit

Yksinkertaiset palomallit kuvaavat tilanteita, missä palotilan lämpötila pystytään laskemaan käsin tai yksinkertaisella tietokoneohjelmalla. Yksinkertaisissa palomalleissa rakennetta tarkastellaan kaksiulotteisesti ja määräävää on rakenteen etäisyys palosta sekä palotilan lämpötila rakenteen vieressä.

#### 2.2.1.1 Huonepalot

Huonepalomallissa palomalli oletetaan huoneistopaloksi ja palokuorma määritellään tilan toiminnan mukaan. Huonepalomalli ota huomioon tilan koon, aukko-tekijät sekä mahdolliset palon leviämiseen ja leviämisenopeuteen vaikuttavat tekijät. Eurokoodi esittää yhdeksi huonepalon malliksi parametrissa lämpötila-aikakäyrää. Kaava pysyy yksinkertaisena, jos vaipan pinnassa olevat materiaali-kerrokset ovat saman vahvuisia.  $\Gamma$  arvon lähennellessä numeroa 1, yhtälö (4) alkaa muistuttamaan standardipalon lämpötila – aikakäyrää (EN 1991-1-2, 3.1).

$$\Theta_g = 20 + 1\,325 \cdot (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (4)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma$$

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2$$

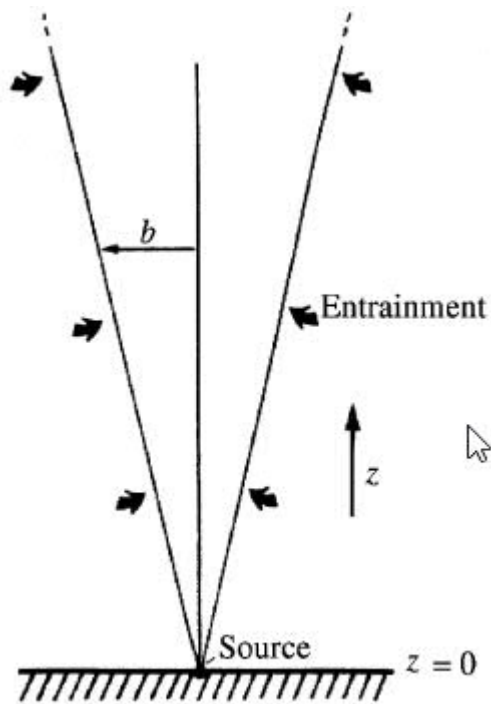
Päällimmäisen ainekerroksen arvon  $b$  ollessa isompi kuin jälkimmäisen laskeaan rajapaksuus  $s_{lim}$  jolloin täytyy määrittellä palotilanteen kuumenemisvaiheen korkein lämpötila (liite 1). Tämän määrittämiseen käytetään EN1991-1-2 liite E mukaista laskentaa. Tässä otetaan huomioon mahdolliset palon leviämistä edesauttavat ja rajoittavat tekijät sekä huoneiston tilan käyttötapa. Liite1 esittelee parametrin lämpötila-aikakäyrän laskenta makuuhuoneen palolle (liite 1).

Parametristen lämpötila-aikakäyrien käyttöön on rajoitukset, jotka määrittävät huoneiston maksimi lattiapinta-alaksi 500m<sup>2</sup> sekä tilan suurimmaksi korkeudeksi enintään 4m. Eurokoodin kansallinen liite esittää, että Liite E mukaista palokuormien tiheyden laskentaa ei oteta käyttöön Suomessa. Tämän osalta täytyy käyttää E1 määriteltyjä palokuormia (EN 1991-1-2 NA). E1 mukainen palokuorma on pääosin 600MJ/m<sup>2</sup> (YMPÄRISTÖMINISTERIÖN ASETUS RAKENNUSTEN PALOTURVALLISUUDESTA, Jorma Jantunen)

### **2.2.1.2 Paikallinen palo**

Paikallisen palon mallissa palon ajatellaan tapahtuvan tietyn alueen sisällä. Palolle on olemassa joku tiedetty halkaisija D tai halkaisija määritellään palokuorman mukaan. Paikallisen palon mallin ratkaisuun on olemassa useita ratkaisumalleja. Paikallisen palon malleissa, missä katon korkeus ei sijaitse liekin korkeuden alueella, käytetään ideaalimallia tai Heskestadin mallia (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale). Virtaukselle, missä katto vaikuttaa liekin korkeuden sisällä, käytetään Ron Alpertin luomaa mallia, millä pysytään päättämään palosta muodostuvan virtauksen lämpötila katon korkeuden tasalla, sen nopeus sekä lämpötila.

Ideaalimallissa palon keskipiste lasketaan palavan pinnan tasalle. Virtauksen muoto oletetaan kolmion muotoiseksi missä liekin leveys on suoraan verrannollinen tarkasteltavaan korkeuteen. Palon leveys syttymispisteessä oletetaan olevan palavan materiaalin pinta-ala.

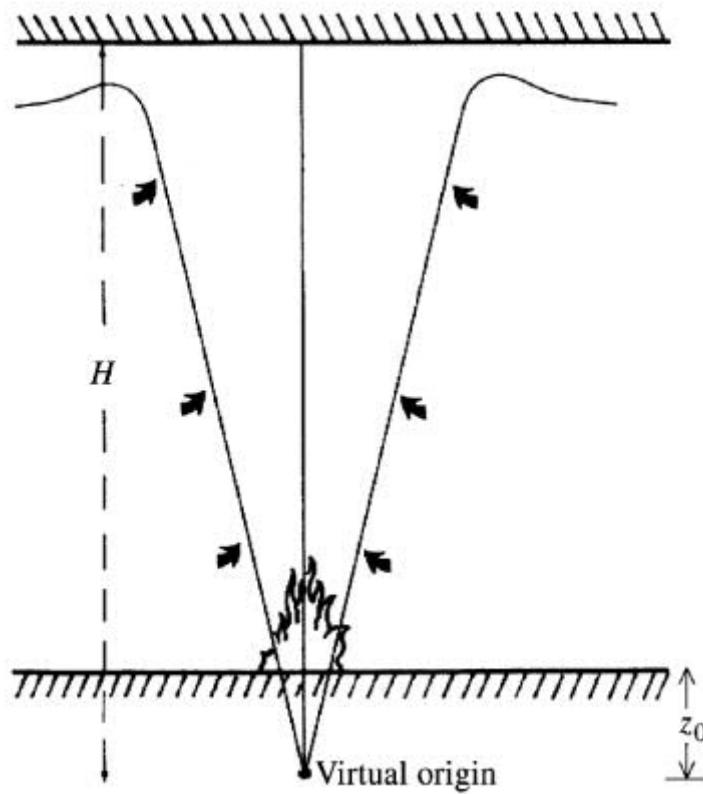


KUVA 4. Ideaalipalomalli (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale)

$$\Delta T(z) = 5,0 \left( \frac{T_\infty}{g c_p \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}^{2/3} z^{-5/3} \quad (5)$$

$$\dot{m}_p(z) = 0,20 \left( \frac{\rho_\infty^2 g}{c_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (6)$$

Heskestadin empiiriseen tutkimukseen perustuvassa mallissa tarkennetaan palon muotoa vastaamaan luonnollista muotoa. Tässä mallissa otetaan huomioon palon nollapisteksi virtuaalinen nollapiste, mikä sijaitsee palon alapuolella. Palon profiili ottaa huomioon liekin todellisen korkeuden ja virtausprofiilissa otetaan huomioon mahdollinen katto leventämällä virtausprofiilia katon läheisyydessä.

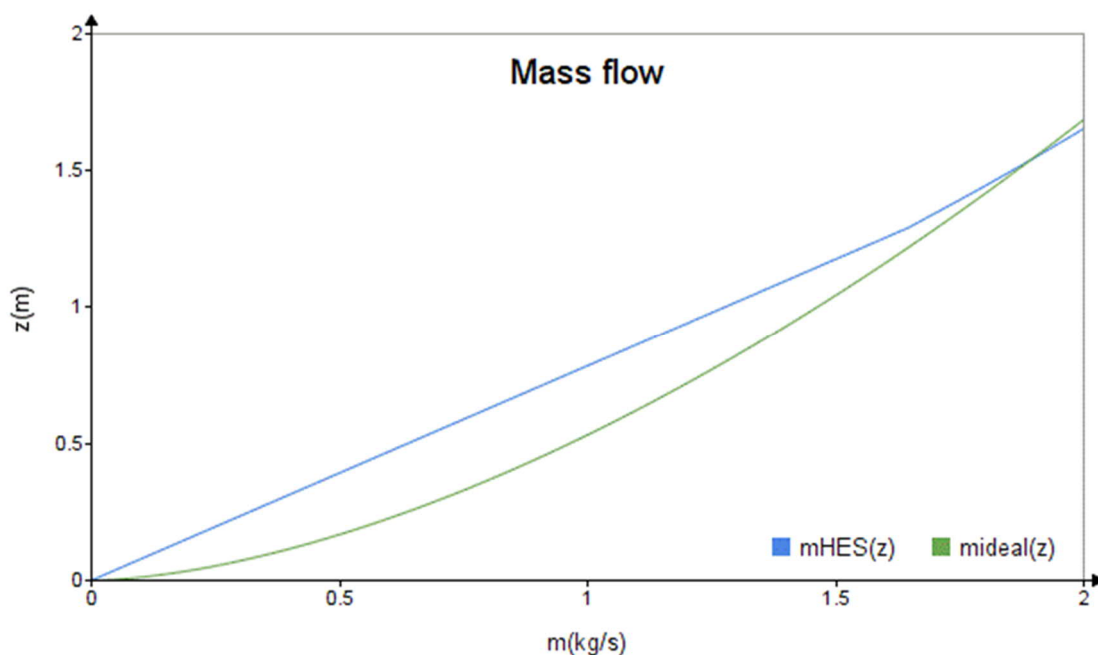


KUVA 5. Heskestaadin empiiriseen tutkimukseen perustuva malli (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale)

$$\dot{m}_p = 0.071 \dot{Q}_{\text{conv}}^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 1.92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_{\text{conv}}, \quad z > L \quad (7)$$

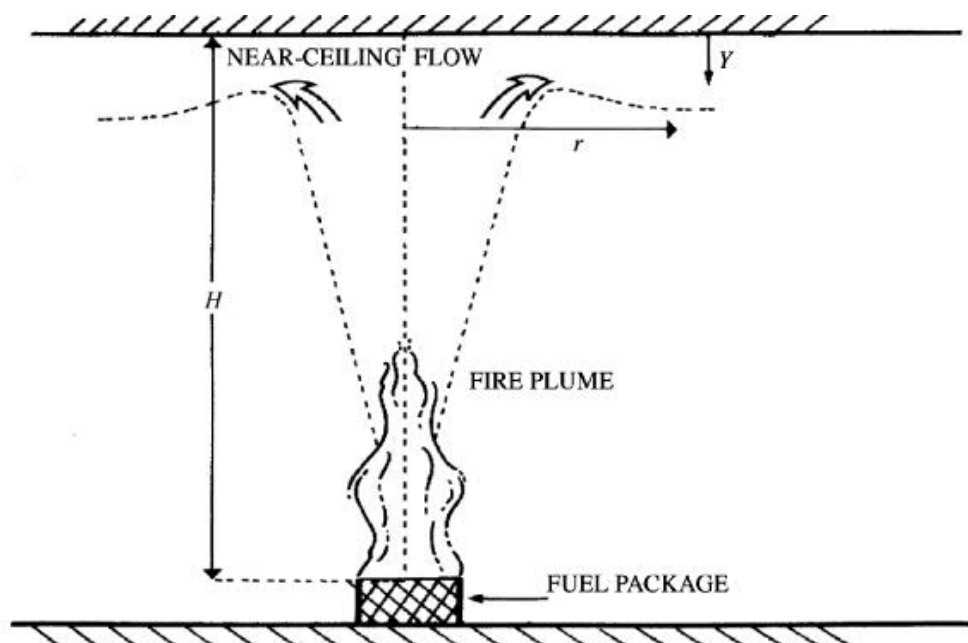
$$\dot{m}_p = 0.0056 \dot{Q}_{\text{conv}} \frac{z}{L}, \quad z < L$$

$$\Delta T_0(z) = 9.1 \left( \frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_{\text{conv}}^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad (8)$$



KUVA 6. Verranto ideaalimallin ja Heskestadin mallin väliltä

Tarkasteltaessa kappaleita katon läheisyydessä, pitää ottaa huomioon katon vaikutus virtaukseen ja tällöin voidaan käyttää Ron Alpertin luomaa palomallia. Ron Alpertin luoma palomalli perustuu empiirisiin palokokeisiin ja antaa laskukaavat katonrajassa tapahtuvalle virtaukselle ja lämpötilalle.



KUVA 7. Palomallin virtauksen osuminen kattoon Ron Alpertin(1971) mukaan (Alpert, R. L., "Fire Induced Turbulent Ceiling-Jet,")



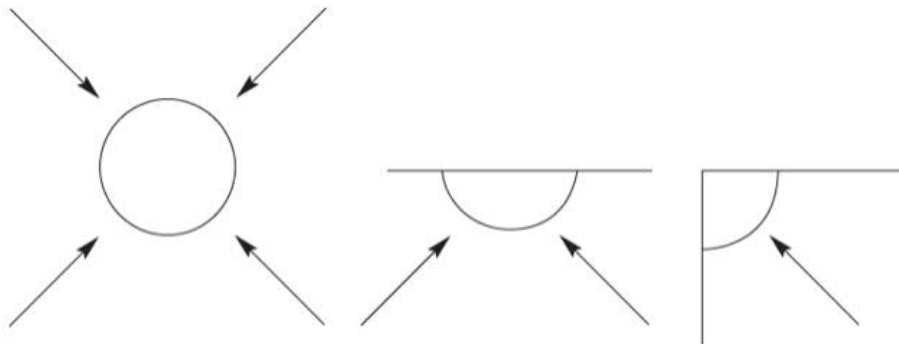
(9)

$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{16.9\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad \frac{r}{H} \leq 0.18 \quad (9)$$

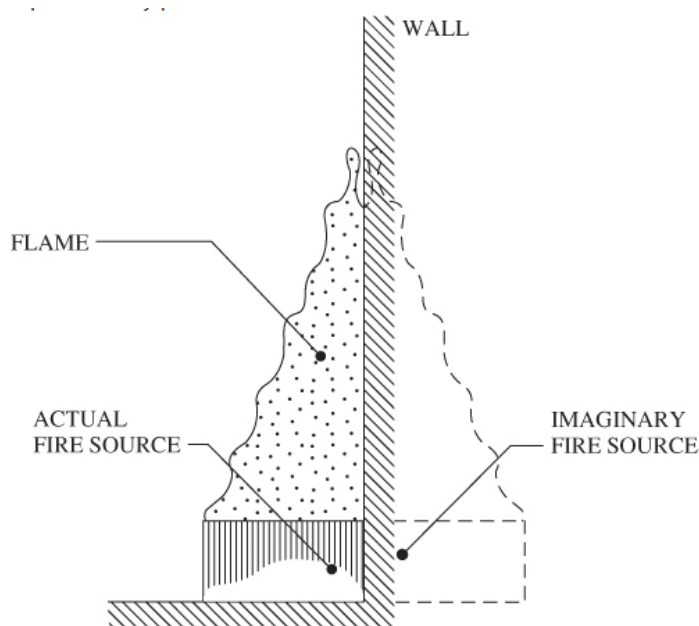
$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{5.38(\dot{Q}/r)^{2/3}}{H}, \quad \frac{r}{H} > 0.18$$

EN -standardi SFS-EN 1991-1-2 opastaa ja hyödyntää näitä palomalleja liit-  
tessä C. (EN 1991-1-2:2002 "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: Ge-  
neral actions. Actions on structures exposed to fire")

Paikallisen palon sijaitessa seinän vieressä tai nurkassa, kerrotaan lämmön-  
luovutusnopeus palon vaikutuksen suhteellisella tilavuudella. Seinän vieressä  
lämmönluovutus kaksinkertaistuu ja nurkassa nelinkertaistuu.



KUVA 8. Palon sijainti suhteessa paloa rajoittaviin pintoihin (An Introduction to  
Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale)



KUVA 9. Kuvitteellinen palolähde (Y. Hasemi and T. Tokunaga 1984)

## 2.2.2 Kehittyneet palomallit

Kehittyneillä palomalleilla pyritään yleensä kuvaamaan kokonaistilannetta palotilassa. Kehittyneet palomallit sopivat hyvin esimerkiksi huoneistopalojen mallintamiseen. Ne jakautuvat yksi- ja kaksivyöhykemalleihin riippuen pääseekö lieskahdus syntymään. Yksivyöhykemalleja voisi tällöin kuvata täyden palon malliksi. Kehittyneillä palomalleilla lasketaan aina palotilan sisäpuolista lämpötilaa.

### 2.2.2.1 Yksivyöhykemalli

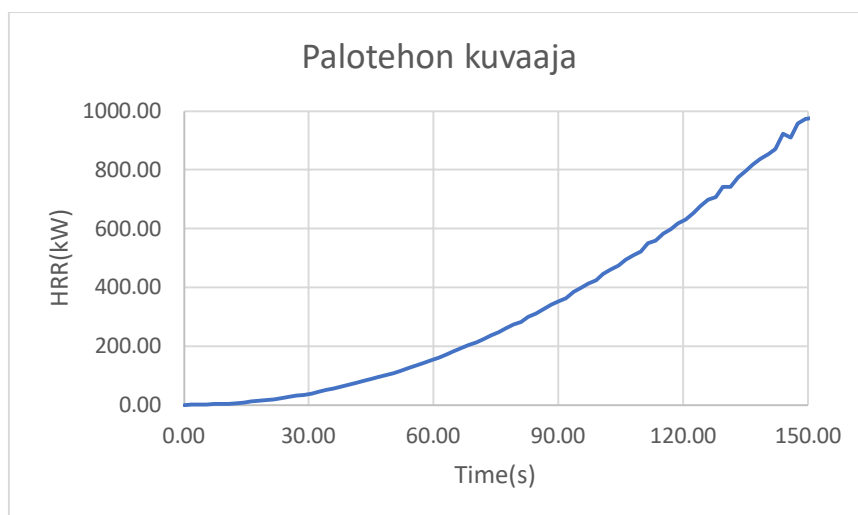
Yksivyöhykemallia voidaan hyödyntää lieskahduksen jälkeiseen lämpötilan tarkasteluun. Yksivyöhykemalleissa on tärkeä päätellä, onko palotapahtuma nopea vai hidas ja paljonko palokuormaa tilassa mahdollisesti voi olla palon kehittymiseksi. Kehittyneistä paloista löytyy tutkittua tietoa Suomessa VTT:n toimesta. Esimerkiksi: ”VTT Palon voimakkuuden kuvaaminen toiminnallisessa paloteknisessä suunnittelussa” sisältää paljon esimerkitapauksia yleisimmistä palotapahtumista ja Lund Staffansson tarjoaa muutaman esimerkin palon leviämisestä teoksessaan: ”Selecting Design Fires”.

Occupancy	Growth rate
<b>Dwellings</b>	Fast [13]
	Medium [17]
	Medium [22]
<b>Schools, offices</b>	Medium [13]
	Medium [17]
	Fast [22]
<b>Hotels, nursing homes etcetera</b>	Fast [13]
	Fast [22]
<b>Shopping centres, entertainment centres</b>	Fast [13]
	Fast [17]
	Ultra-fast [22]

KUVA 10. Palon leviämisenopeuksia (Selecting Design Fires, Lund Staffansson)

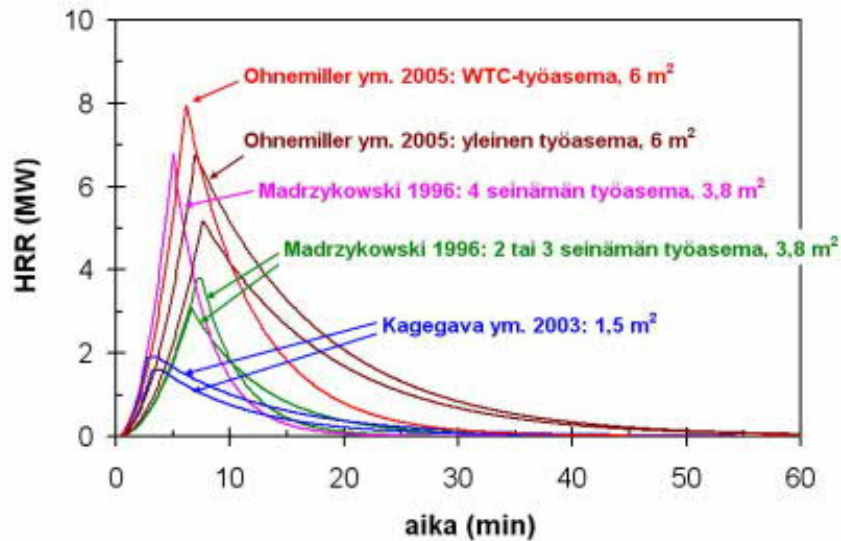
Palon lämmönluovutusnopeuden suhdetta aikaan kuvataan usein  $t^2$  -mallin avulla. Tämän avulla saadaan kuvaaja, mikä kertoo ajan suhteen lämmönluovutusnopeuden.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \left( \frac{t - t_0}{t_g} \right)^2, \quad t \geq t_0 \quad (10)$$



KUVA 11. Palotehon kasvu  $t^2$  -mallilla laskettuna leviämisenopeudella fast (150s)

Paloteholle voidaan hyödyntää myös valmiita palotehon kuvaajia.

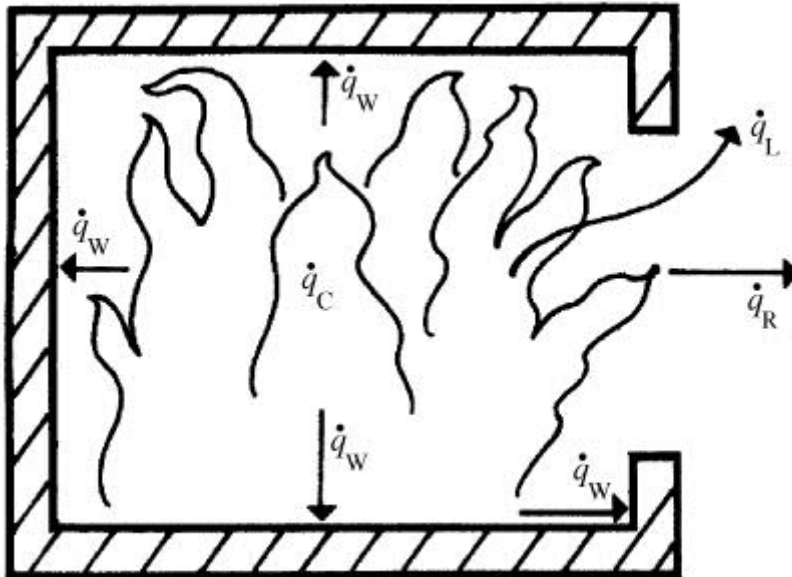


KUVA 12. Toimiston työpisteen paloteho (VTT palon voimakkuuden kuvaaminen paloteknisessä suunnittelussa, Jukka Hietaniemi).

Lieskahduksen syntymiseen tarvitaan riittävä paloteho ja riittävään palotehoon tarvitaan tarpeeksi palaavaa materiaalia sekä happea. Lieskahdukseen tarvittava paloteho voidaan laskea, kun tiedetään ympäröivien seinien lämmönsiirtymiskerroin. Lämmön siirtymiskertoimen kasvaessa tarvitaan isompi paloteho synnyttämään lieskahdus. Lämmönsiirtymiseen vaikuttaa ympäröivien seinien pinta-ala. Palo tarvitsee tarpeeksi happea ja tällöin seinillä täytyy olla tarpeeksi aukkoja ja aukkojen keskimääräinen korkeus täytyy olla riittävä palon vaatiman ilmavirran neutraaliakselin siirtymiselle. Neutraaliakseli siirtyy palotehon kasvaessa aukoksessa alaspäin ulospäin suuntautuvan ilmavirran ollessa tilavuudeltaan suurempaa johtuen lämmöstä.

$$\dot{Q} = 610 \left( h_{ef} A_T A_D \sqrt{H_D} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Lieskahdukseen tarvittavan palotehon ollessa riittävä, lieskahduksen jälkeinen tilan lämpötila voidaan laskea tasapainoehdolla, kun tiedetään paljonko lämpöä karkaa rakenteesta.



KUVA 13. Tasapaino palotehon ja tehohäviöiden suhteen ((An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale)

$$\dot{q}_C = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B \quad (12)$$

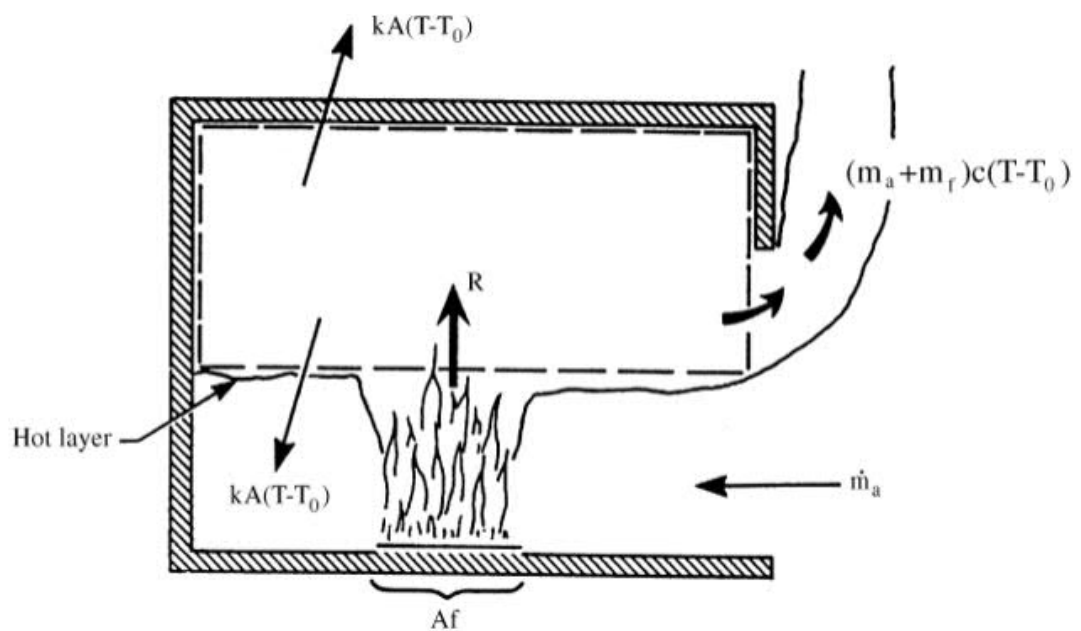
Kun palotehon yhtälön muuttujat on saatu määriteltyä, pystytään johtamaan lieskahduksen jälkeisen palotilanteen mukainen lämpötila (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

$$T_g = \frac{\dot{q}_C + 0.09c_p A_w H^{1/2} T_0 + (A_t - A_w) \left[ \frac{1}{\gamma_i} + \frac{\Delta x}{2k} \right]^{-1} (T_g - T_1) - \dot{q}_R}{0.09c_p A_w H^{1/2} + (A_t - A_w) \left[ \frac{1}{\gamma_i} + \frac{\Delta x}{2k} \right]^{-1}} \quad (12)$$

Kaavan käyttö vaatii kaiken palavan materiaalin syttymistä tilassa, tasaista lämpötilan jakaumaa, yhtäläistä lämmönsiirtymiskerrointia sekä yksiulotteista lämmön johtumismallia rakenteen seinän läpi (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

### 2.2.2.2 Kaksivyöhykemallit

Kaksivyöhykemallissa palotila muodostuu katon alapuolisesta kaasukerroksesta sekä sen alapuolisesta kerroksesta. Vyöhykkeet voidaan jakaa tarkemmin myös ylemmäksi ja alemmaksi kerrokseksi, palopatsaaksi ja sen yläpuoliseksi savupatsaaksi sekä ulkopuoliseksi kaasuksi ja seinämiksi. Näiden vyöhykkeiden välillä tapahtuu massan ja energian vaihtumista. Ylemmän kaasukerroksen ominaisuudet voidaan olettaa tasaiseksi (EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1).



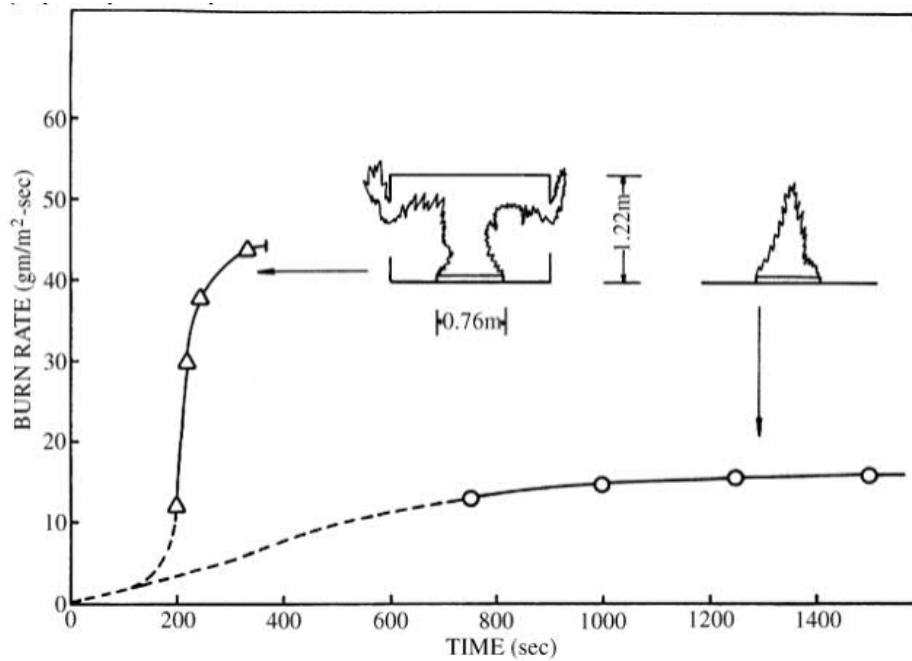
KUVA 14. Tasapaino palotehon ja tehohäviöiden suhteen kaksivyöhykemallissa (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

Kaksivyöhykemalli voi muuttua yksivyöhykemalliksi ylemmän kaasukerroksen lämpötilan noustessa yli 500 °C tai jos ylempi kaasukerros pääsee kasvamaan yli 80% tilan korkeudesta. Tällöin tapahtuva lieskahdus on nopea ja sytyttää usein loputkin palamattomat materiaalit tuleen. Lieskahduksessa koko tilan lämpötila nousee yli 500 °C ja palo kuluttaa suurimman osan tilassa olevasta hapesta.

Kaksivyöhykemallin lämpötila ennen lieskahdusta lasketaan kaavalla:

$$\Delta T_U = 6.85 \left( \frac{\dot{Q}^2}{h_{ef} A_T A_D \sqrt{H_D}} \right)^{1/3} \quad (13)$$

Lieskahdusta edeltää kuuman kaasukerroksen muodostuminen tilaan ja tapauksessa, missä kuuman kaasun muodostumista pystytään rajoittamaan esimerkiksi savunpoistolla, pystytään myös ehkäisemään lieskahduksen syntyminen. Lieskahdusta edesauttaa katon alapuolella sijaitseva palava materiaali, mikä sytty nopeasti palamaan kuuman kaasun vaikutuksesta ja säteilee takaisin päin paloon.



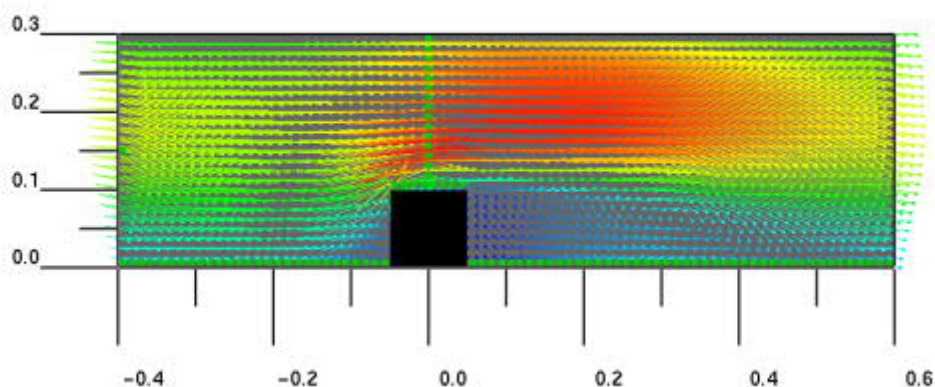
KUVA 15. Ympäröivän tilan merkitys palamistapahtumalle (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

### 2.3 Virtausdynamiikkaa soveltavat mallit

Virtausdynamiikkaa soveltavissa malleissa palotilan jokaisen pisteen aero- ja termodynaamiset ominaisuudet lasketaan ajan funktiona. Jokainen tilan piste vaikuttaa toiseen siirtämällä energiaa ja massaa. Tilan kokonaisyhtälössä sovelletaan fysiikan peruslakeja: massan säilymisen laki, Newtonin toinen laki liikemäärän säilyvyyden suhteen sekä termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö energian muuttumisnopeuden suhteen.

Laskenta on hyvin vaativaa ja mallia pitää iteroida saatujen suureiden mukaan ajan funktiona. Tämän vuoksi virtausdynamiikkaa soveltavat mallit ovat yleistyneet tietokoneohjelmien ja tietokoneiden kehittymisen myötä. Käytettäviä ohjelmia täytyy validoida ja verifioida määritellyillä kokeilla, joilla varmistetaan, että saatavat tulokset ovat realistisia. Tehdyistä kokeista on tehty ensin empiiriset mittauskokeet, joista saatua dataa käytetään CFD -simulaation verifioimiseen. Yleensä on hyvä ajaa useampia mittauksia ja laatia näistä kaavio, missä saatuja tuloksia verrataan olemassa oleviin mittaustuloksiin.

FDS eli Fire Dynamic Simulator on esimerkki yhdestä CFD -simulointiohjelmasta. Ohjelmalle on tehty kattavat verifiointi ja validointi prosessit ja näistä on laadittu erikseen omat oppaansa: "FDS\_verification\_Guide" sekä "FDS\_Validation\_Guide".



KUVA 16. Kohoumalla varustetun neliömäisen kanavan virtaus (FDS\_Verification\_Guide).



### 3 VIRANOMAISVAATIMUKSET

Aiemmin rakennusten paloturvallisuutta ohjeisti ja määräsi Suomen Rakentamismääräyskokoelman liite E1. 2017 Ympäristöministeriön asetus 848/2017 rakennusten paloturvallisuudesta kumosi aiemman asetuksen ja ohjeisti ajanmukaisemmin rakennusten paloturvallisuutta. 2020 Ympäristöministeriön asetus 927/2020 muutti annettuja asetuksia useampien momenttien kohdalta. Toiminnallisen palomitoituksen osalta uusin säädös mahdollisti rakennuksen osan suunnittelun toiminnallista palomitoitusta hyödyntäen, kun otetaan huomioon, että se täyttää liittyvän rakennuksen osan vaatimukset (927/2020 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta).

Asetuksilla on tarkoitus osoittaa ne tekniset vaatimukset, jotka rakennuksen pitää täyttää riittävän paloturvallisuuden takaamiseksi. Rakennus voidaan myös suunnitella käyttäen oletetun palonkehityksen malleja, mutta tällöin täytyy ottaa huomioon, että rakennus ei saa sortua palon aikana sekä yli 2 -kerroksisissa rakennuksissa sekä palon- että jäähtymisvaiheen aikana.

On tärkeää ottaa huomioon pelastusviranomaisen rooli suunniteltaessa oletetun palonkehityksen mallilla. Viranomaisen on hyvä ottaa hankkeeseen mukaan heti alussa ja suunnitelmien jakaminen sekä kommunikaatio täytyy olla avointa.

#### 3.1 Paloluokat ja niiden mukaiset rajaukset ja vaatimukset

Suomessa rakennukset jaetaan paloluokkiin ja paloluokat määrittelevät rakennuksen tarkasteltavat palokuormat, käytettävät pintamateriaalit, automaattiset sammuuslaitteistot sekä palo-osastojen maksimi koot. Paloluokkia on neljä ja niistä 1-3 ovat yleisiä luokkia. Paloluokkaa 0 on käytettävä, kun rakennus suunnitellaan oletetun palonkehityksen perusteella. Paloluokkaa 0 koskevat omat vaatimuksensa, joista esimerkiksi palokuorma voidaan määritellä erikseen simulaation mukaan.

### 3.1.1 Paloluokat 2 ja 3

Paloluokka 3 soveltuu vain enimmillään 2- kerroksisille rakennuksille ja sen henkilömäärä on rajoitettu kerroskohtaisesti. P3-paloluokan maksimikorkeus asuttavalle rakennukselle on 9 metriä. Paloluokka P2 mahdollistaa yli 2-kerroksiset rakennukset, mutta rajoittaa tällöin rakennuksessa samanaikaisesti olevien henkilöiden lukumäärä. Paloluokan P2 asuttavan rakennuksen maksimi korkeus on 28 metriä ja tällöin rakennuksessa ei saa sijaita tiloja, missä palokuorma ylittäisi 1 200MJ/m<sup>2</sup> raja-arvoa. Tällöin rakennuksen kerroslukumäärä on enintään 8.

Rakennuksen paloluokka	P2			P3	
	1	2	yli 2 kerrosta *	1	2
Kerroksia					
<b>Käyttötarkoitus</b>					
Asunnot, henkilöitä	ei rajoitusta	ei rajoitusta	1 000	250 (500 *)	150 (250 *)
Majoitustilat, majoituspaikkoja	150 (300 *)	50 (100 *)	500	50 (100 *)	10
Hoitolaitokset, hoitopaikkoja	100 (200 *)	25 (50 *)	150	10 (25 *)	ei sallittu
Kokoonntumis- ja liiketilat, henkilöitä	ei rajoitusta	250 (500 *)	1 000	500 (1 000 *)	50
Työpaikatilat, henkilöitä	ei rajoitusta	ei rajoitusta	1 000	250 (500 *)	150
Tuotanto- ja varastotilat, henkilöitä	ei rajoitusta	50 (100 *)	ei sallittu	ei rajoitusta	ei sallittu

KUVA 17. P3 ja P2 mukaisen paloluokan vaatimuksia (927/2020 Ympäristöministeriön asetus).

Kaikki P2-luokkaa isompi menee yleensä P1-luokkaan. P1-luokka on määreiltään vaativin luokka. Se asettaa yleensä rakenteille vähintään EI60 vaatimuksen. P1 jakautuu palokuormaltaan kolmeen vaativuusluokkaan. Nämä luokat kasvattavat automaattisesti EI -luokitusta ellei tilaa ole varustettu automaattisella sammutusjärjestelmällä.

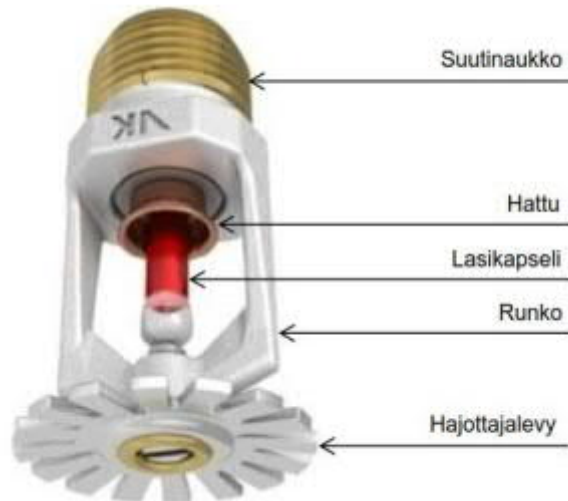
	P1		
	yli 1 200	600–1 200	alle 600
<b>Kerrokset, yleensä</b>	EI 120 <sup>1)</sup> (EI 60 *) <sup>1)</sup>	EI 90 <sup>1)</sup> (EI 60 *) <sup>1)</sup>	EI 60 <sup>1)</sup>
– yli 56 metriä korkea rakennus	EI 90, A2 *	EI 60, A2 *	EI 60, A2 *
– yläpohja, jos osastoitusvaatimus	EI 60	EI 60	EI 60
– tuotanto- ja varastotilat, palovaarallisuusluokka 1, pinta-alaosastointi	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 90, A1 (EI-M 60, A1 *)
– tuotanto- ja varastotilat, palovaarallisuusluokka 2, pinta-alaosastointi	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)	EI-M 120, A1 (EI-M 60, A1 *)
– autosuojat, pinta-alaosastointi	EI 60, A2	EI 60, A2	EI 60, A2
<b>Ullakon osastoivat seinät, pinta-alaosastointi</b>	EI 30	EI 30	EI 30
<b>Kellarikerrokset</b>	EI 120, A2 (EI 90, A2 *)	EI 90, A2 (EI 60, A2 *)	EI 60, A2

KUVA 17. P1 palokuormat (927/2020 Ympäristöministeriön asetus).

### 3.1.2 P1 paloluokka ja korkeat rakennukset

Korkeissa rakennuksissa paloluokka on yleensä aina P1. Rakennuksen kantavien rakenteiden pitää kestää palossa sortumatta vähintään palokuormaryhmän määräämän ajan. Rakennuksen kokoa ja henkilömäärää ei ole rajoitettu. Korkeissa rakennuksissa täytyy olla aina kaksi poistumistietä, joista toinen on palolta ja toinen palolta ja savulta suojattu. Kerroskohtaisesti täytyy löytyä kaksi hissiä, joista toinen on palomieshissi, jonka tekniikka on varmistettu niin että se kestää palokuormituksen. Palomieshissin ovi pitää olla avattavissa erikois- tai yleisavaimella mikä on palokunnan käytössä. Palo ei saa levitä korkeussuunnassa ja Ympäristöministeriön asetus ohjaakin hyväksyttävät ulkoverhousmateriaalit.

P1 -paloluokkaan kuuluva rakennus, joka on yli 56 metriä korkea, täytyy aina suojata automaattisella sammutuslaitteistolla. Yleisin käytettävä sammutusjärjestelmä on sprinklerijärjestelmä, joka toimii automaattisesti tulipalon syttyessä. Sprinklerijärjestelmässä putkisto paineistetaan vedellä ja palon sattuessa sprinklerin lasiampulli rikkoutuu ja sprinkleri laukeaa. Sprinklerit on aina suunniteltava kohdekohtaisesti ja käytettävän sprinkleriluokan mukaan (Asetus 848/2017).



KUVA 18. Sprinklerin perusosat (Rakennusten Automaattisten Sprinklerilaitteistojen Luotettavuus, Mikko Nieminen).

### 3.1.3 P0 paloluokka

P0 -paloluokka tarkoittaa paloluokkaa, missä palo on määritelty käyttäen oletetun palonkehityksen mallia. Tällöin palosta on tunnistettavissa palon kiihtymis-leviämis- ja jäähtymisvaiheet. Oletetun palonkehityksen palokuormana käytetään yleensä vähintään  $600\text{MJ/m}^2$  palokuormaa. Tällöin palo määritellään täysin kehittyneeksi. Jos pystytään kuitenkin osoittamaan, että lieskahdusta ei tapahdu, voidaan palokuormana käyttää tilastollisesti tai laskennallisesti osoitettua kokonaispalokuorman tiheyden ominaisarvoa. Kokonaispalokuorman tiheyden ominaisarvoja löytyy esimerkiksi VTT:n kattavista mitoituspaloaineistoista.

P0 -paloluokkaan käytettäessä on paloluokka merkittävä selkeästi suunnitelma-asiakirjoihin, jotta valvovalle viranomaiselle käy selväksi, että rakennus on joko kokonaan tai osin suunniteltu oletettua palonkehitysmallia käyttäen. Käytettävät menetelmät pitää olla todennettuja ja niiden kelpoisuus osoitettu. Toiminnallisen palomitoituksen taustalla käytettyjen perusteiden on käytävä ilmi rakennuslupamenettelyn yhteydessä. Saadut tulokset täytyy esittää kirjallisesti rakennuslupamenettelyn yhteydessä (Asetus 927/2020 YM).

Rakennus	Rajoitukset	Olellaisten kantavien rakenteiden kestävyys palossa	Mitoituspalokuorman tiheys MJ/m <sup>2</sup>
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{E,k}^{1)2)}$
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{E,k}^{1)2)}$
1-kerroksinen, - majoitustila - hoitolaitos - kokoontumis- ja liiketila	Yli 50 paikkaa Yli 25 paikkaa Yli 250 henkilöä	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{E,k}^{1)2)}$
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{E,k}$ , vähintään 600 MJ/m <sup>2 2)</sup>
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{E,k}$ , vähintään 600 MJ/m <sup>2 2)</sup>
2-kerroksinen, - majoitustila - hoitolaitos - kokoontumis- ja liiketila	Yli 50 paikkaa Yli 25 paikkaa Yli 250 henkilöä	Palo- ja jäähtymisvaihe	$Q_{E,k}$ , vähintään 600 MJ/m <sup>2 2)</sup>
Yli 2-kerroksinen	Korkeus enintään 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$Q_{E,k}$ , vähintään 600 MJ/m <sup>2 2)</sup>
Yli 2-kerroksinen	Korkeus yli 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$2,0 * Q_{E,k}$ , vähintään 900 MJ/m <sup>2</sup>

$Q_{E,k}$  on tilastollisesti tai laskennallisesti määritetty kokonaispalokuorman tiheyden ominaisarvo (80 % fraktiili).  
Tarkastelu tehdään täysin kehittyneelle palolle. Jos voidaan osoittaa, että lieskahtamista ei tapahdu, mitoitus voidaan tehdä paikalliselle palolle. Lieskahtamisen katsotaan tapahtuneen, kun kuumen savukerroksen keskilämpötila saavuttaa 500 celsiusastetta tai kun säteily savukerroksesta lattiaan on yli 20 kilowattia neliömetrille.  
Kellarikerrokset mitoitetaan palo- ja jäähtymisvaiheen rasituksille.  
1) Ylin kellarikerros, vähintään 600 MJ/m<sup>2</sup>.  
2) Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset,  $2,0 * Q_{E,k}$ , vähintään 900 MJ/m<sup>2</sup>.

KUVA 19. Paloluokan P0 palokuormien ominaisarvoja (Asetus 927/2020 YM, Taulukko 4).

P0- paloluokkaa ei kuitenkaan tarvitse käyttää, mikäli kyseessä on vain rakennuksen yksittäinen tarkasteltava osakokonaisuus. Tällöin poikkeama täytyy kuitenkin ilmoittaa suunnitteluasiakirjoissa. Automaattista sammutuslaitteistoa voidaan hyödyntää palovaiheen hitaamman kiihtymisen tai nopeamman jäähtymisen mallintamiseen. Jos olemassa olevaa rakennusta muutetaan tai laajennetaan, voidaan muutetulle osalle hyödyntää toiminnallista palomitoitusta, kun tarkastellaan palotilaa kokonaisuutena ja otetaan huomioon, että laajennettu tilassa tapahtuva palo ei pääse leviämään ja palokuorma täyttää levitessään olemassa olevan tilan paloluokan.

### 3.2 Vaatimukset suunnittelijalle

Paloturvallisuussuunnittelun suunnittelutehtävät jakautuvat nykyään kolmeen luokkaan. Näistä tavanomainen käsittelee alle 9m korkeita rakennuksia. Rakennuksen korkeuden kasvaessa yli 9 metrin, siirrytään vaativaan -luokkaan. Vaativan luokan suunnittelutehtävä kattaa alle 3000 henkilön kokoontumistilat sekä alle 16 kerroksen asuinrakennukset. Puurakenteiset kerrostalot voivat olla kuitenkin enintään 8kr korkeita.

Jos rakennus ei täytä tavanomaisen tai vaativan luokan ehtoja, sijoittuu se yleensä poikkeuksellisen vaativaan suunnittelutehtävään. Tällöin rakennuksen koolle ei aseteta enää rajaa. Poikkeuksellisen vaativa suunnittelutehtävä pitää sisällään yli 16 -kerroksiset asuinrakennukset, palo- ja räjähdysvaaralliset tilat sekä suurille henkilömäärille tarkoitettut kokoontumistilat. Oletetulla palonkehityksellä tarkastetut rakennukset tai rakennelmat sijoittuvat poikkeuksellisen vaativaan suunnitteluluokkaan (FISE-paloturvallisuuden-suunnittelutehtävien-vaativuusluokitus, 16.4.2019).

### 3.2.1 Pätevyysvaatimukset

Poikkeuksellisen vaativan työtehtävän vaatimukset sisältävät yleistä rakennus- ja paloturvallisuustekniikkaa. Lisänä on vaatimuksia kurseista tulipalon dynamiikan ja oletetun palonkehityksen parissa. Pätevyysvaatimukset esitetään aina erikseen kohteissa. Alla olevat määritelmät kuuluvat FISEn määritelmään pätevyyksistä. Ammattitaitoa voi olla myös ilman erikseen haettua pätevyyttä.

	Opinnot(op)		
	Tavanomai- nen	Vaa- tiva	Poikkeuksellisen vaativa
Rakennustek- niikka	4 op	9 op	9 op
Palo- ja turvallisuustekniikka	6 op	9 op	9 op
Tulipalon dynamiikka ja oletettu palonkehitys			9 op
Riskienhallinta ja talotekniset järjestelmät	x	x	x
<b>Yh- teensä</b>	<b>20 op</b>	<b>30 op</b>	<b>35 op</b>

KUVA 20. Vaatimusluokkien vaatimat opintopistemäärät (Fise.fi, haettu 20.3.2021).

Työkokemusta poikkeuksellisen vaativan työturvallisuustehtävään vaaditaan vähintään 10 vuoden ajalta mistä vähintään 6 vuotta pitäisi olla vaativan suunnitteluluokan mukaisia tehtäviä. Työkokemuksesta 6 vuotta pitää olla suoritettuna

tutkinnon suorittamisen jälkeen. Poikkeukselliseen luokkaan vaaditaan 2 työnäytettä, joista käy ilmi suunnittelijan osaamisen taso sekä suunnittelutehtävän vaativuus.

Vaatimusluokkien vaatimat työkokemusmäärät vuosina:

	<b>Tavanomai- nen</b>	<b>Vaa- tiva</b>	<b>Poikkeuksellisen vaa- tiva</b>
Tavanomainen suunnittelutehtävä	3 v	4 v	4 v
Vaativa suunnittelutehtävä		2 v	6 v
<b>Yh- teensä</b>	<b>3 v</b>	<b>6 v</b>	<b>10 v</b>

### 3.3 Koulutustarjonta

Riittävien opintopisteiden saamiseksi täytyy opiskelijalla olla mahdollisuus oppilaitoksensa kautta suorittaa riittävällä laajuudella palo- ja rakennustekniikkaan liittyviä kursseja. Rakennustekniikan kurssit on helppo saada kasaan ja näitä tarjotaan AMK -tasolta lähtien. Palopuolen kursseja on vähänlaisesti ja riittävien valmiuksien saaminen vaatii yleensä kurssien suorittamista vähintään kahdessa oppilaitoksessa. Työssä käydään esimerkinomaisesti läpi kaksi oppilaitosta, joiden kurssien sisältö on riittävällä tarkkuudella selvä ja kurssien sisällöstä pystyy kertomaan jotain.

Tampereen Teknillinen Yliopisto tarjoaa palomitoituksen, paloturvallisuuden perusteiden ja toiminnallisen palomitoituksen kurssit. Palomitoitus -kurssilla käydään läpi puun, teräksen ja betonin palomitoituksen perusteet ja sivutaan kurssin aluksi myös hieman oletettua palomitoitusta parametrinen lämpötila -aika-käyrän kautta. Paloturvallisuuden perusteet kurssi on jaettu puoliksi akustiikan kanssa ja kurssi tarjoaa sisältöä paloturvallisuuteen liittyvistä vaatimuksista, tulipalon riskeistä sekä lämmönsiirtymisen peruseräiteistä. Toiminnallisen palomitoituksen kurssilla käsitellään oletetun palonkehityksen simulointia ja laskentaa. Kurssi muodostuu pääasiassa asiantuntijoiden pitämistä luennoista ja on hyvin käytännönläheinen pyrkien vastaamaan työelämän vaatimukseen ([www.tuni.fi](http://www.tuni.fi), opiskelijan opas, 20.3.2021).

Aalto Yliopisto tarjoaa kurssit: Fire Risk and Evacuation Analysis sekä Fire Dynamics and Simulation. Fire Risk and Evacuation Analysis -kurssilla käsitellään paloturvallisuutta rakennuksessa ja mahdollisten evakuointireittien simulointia. Kurssi tarjoaa työkalut paloriskin arvioimiseen henkilö- ja taloudellisen riskin kautta sekä yhdistää palosuunnittelun ratkaisuja rakennuksen yleisiin suunnitteluratkaisuihin. Fire Dynamic and Simulation -kurssi käy läpi palamisen dynamiikka lähtien virtausdynamiikan perusopeista käsittäen lopulta huoneisto- ja rakennuspalot. Kurssi toteutetaan FDS -ohjelmistoa apuna käyttäen. Kurssi on ainoa näistä, joka käsittelee suoranaisesti palon dynamiikka ja on siksi vaatimuksena, jos aikoo saavuttaa poikkeuksellisen vaativuustason pätevyden. ([oodi.aalto.fi](http://oodi.aalto.fi), opintotarjonta, 20.3.2021).



### 3.4 Viranomaisen näkemyksiä toiminnallisesta palomitoituksesta

Seuraavat kappaleet perustuvat palotarkastusinsinööri Tapio Stenin haastatteluun. Paloviranomaisen tehtäviin kuuluu yleensä suunnittelun ohjaus rakennusten suunnittelussa ja niiden kohteet vaihtelevat viranomaisen osallisuuden mukaan. Viranomaisen tehtävä on selvittää kohteiden saavutettavuus sekä sammuustyön toiminta sen asettamien rajoitusten ja saavutettavuuden mukaan. Kohteissa toimitaan usein pääsuunnittelijan kanssa ja kaiken ollessa suunnitteluprosessin osalta kunnossa, kirjoitetaan lupalausunto viranomaisen puolelta. Myös palokonsultit ovat nykyään yhteydessä viranomaiseen ja onkin hyvän tavan mukaista, että viranomainen on heti kohteen alusta saakka mukana ohjaamassa.

Nykyään tulee muutamia tapauksia per vuosi, missä hyödynnetään toiminnallista palomitoittamista. Useimmin kyseessä ovat hallimaiset rakennukset tai rakenteet jotka ovat korkeita tiloja. Kansi ja Areena on Tampereen alueelta viime aikaisin kohde missä toiminnallista palomitoitusta on hyödynnetty. Tässä tutkittiin myös pelastautumisreittien toimintaa palon sattuessa. Vaikka Kansi ja Areena oli iso kohde, itse toiminnallinen palomitoittaminen ja sen ohjaaminen ei työllistänyt kovinkaan paljoa.

Yleisesti hyviä kohteita, missä toiminnallista palomitoitusta voitaisiin hyödyntää, ovat korkeat hallimaiset tilat sekä tilat missä palokuorman osuus on pieni. Toiminnallisella palomitoituksella on myös mahdollista kasvattaa palo-osastojen kokoa. Kohteita, missä toiminnallista palomitoitusta ei pitäisi soveltaa tai soveltaa harkiten, ovat puurakenteiset kerrostalot sekä rakennukset, joissa puupinta jää paljaaksi ja näin ollen lisää suoraa palokuormaa sekä kasvattaa lieskahduksen todennäköisyyttä.

Ympäristöministeriön uusiin asetukseen rakennusten paloturvallisuudesta ohjeistetaan, että muutoksen ja laajennuksen voi toteuttaa rakennuksessa mitoitettamalla se oletetun palonkehityksen mukaan. Tämä on uudistus mikä astuu voimaan Tammi-kuussa 2021. Tällöin muutoksen ja vanhan rakennuksen välissä ei tarvitse käyttää palomuuria vaan varmistetaan, että P0 -paloluokan rakenne ei pääse leviämään vanhan rakennuksen puolelle tai ei kasvata vanhan osuuden palokuormaa. Kokonaisuuden toiminta on tässä tärkeintä ja tämä koskettaakin pääosin

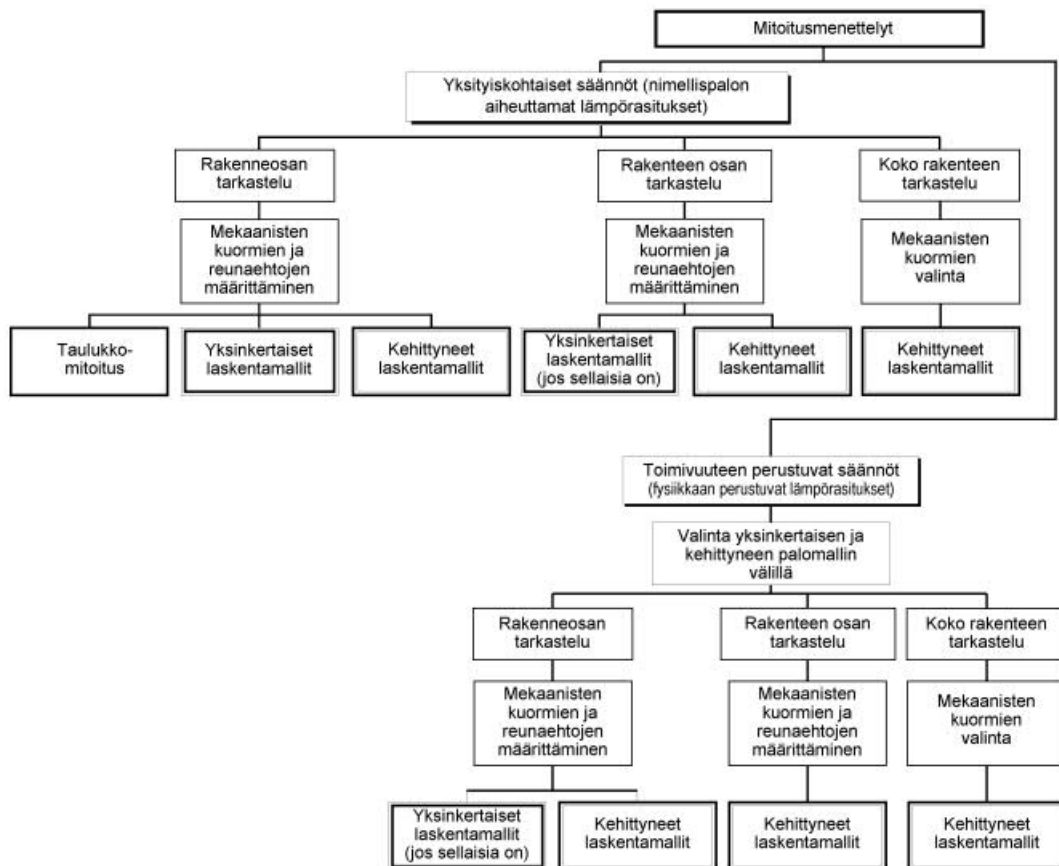
P1 ja P2 -luokan rakennuksia/rakenteita. Ympäristöministeriön uusin asetus rakennusten paloturvallisuudesta mahdollistaa palokuorman käyttämistä tutkien paikallista paloa. Tällöin pitää selvittää onko lieskahtaminen mahdollista. Jos lieskahdusta ei tapahdu, voidaan tutkia paikallista paloa. Tällöin voidaan hyödyntää myös EN1991\_1\_2 parametrissa palokäyrää, jonka palokuorma pitää määrittää tutkitun palotapauksen 80% fraktiilin mukaisesti. On mahdollista tutkia myös yksittäistä rakenneosaa paloalueella, jolloin pitää suorittaa mahdolliset herkkyystarkastelut koko palo-osaston alueella.

Toiminnallisesta palomitoituksesta pitää aina laatia raportti. Raportissa pitäisi ilmetä mahdolliset alkupalot sekä niiden vaikutukset. Alkupaloja voi yleensä olla kohteessa paljon ja tällöin olisi hyvä tutkia viranomaisen kanssa mitkä näistä kannattaisi ottaa huomioon. Alkupalojen osalta pitää tarkastella myös mahdollinen palon leviäminen. Palon leviämistä pitää pyrkiä mahdollisuuksien mukaan välttämään sillä se lisää palokuorman ja palotapausten määrää sekä vaikeuttaa mahdollisen simulaation tekemistä. Herkkyystarkastelun mukaan ottaminen tarkoittaa, että tutkitaan mahdollisia palon leviämistä edesauttavia tapahtumia sekä palon jäähtymisvaihetta jarruttavia tekijöitä. Herkkyystarkastelussa on hyvä ottaa huomioon, että paloasema ei välttämättä sijaitse kymmenien vuosien päästä samalla sijainnilla kohteesta ja että palosammutuslaitteistot voivat vikaantua. VTT onkin määritellyt, että paloalueella on tilastollisesti mahdollista kahden suuttimen vikaantuminen ja tämä on hyvä ottaa huomioon herkkyystarkastelussa.

P0 -luokka ei välttämättä aina tarvitse 3-osapuolen tarkastusta. Tämä määritellään aina tapauskohtaisesti. Projektissa voisi olla myös mahdollista hyödyntää projektissa olevaa palokonsulttia kolmannen osapuolen tarkastukseen. Tärkeää on ilmoittaa viranomaiselle mahdollisimman aikaisin, mikäli päädytään käyttämään oletettuun palonkehitykseen keskittyvää menetelmää. Alkuvaiheessa ilmoitetaan mahdolliset alkupalot, jotka hyväksytetään ja näiden pohjalta luodaan simulaatio ja saadut tulokset raportoidaan. Palokuormamalleja löytyy esimerkiksi VVT:ltä ja näitä voidaan hyödyntää. Mahdollisia herkkyystarkasteluita voisi olla sprinklauksen huomiotta jättäminen. (Viranomaishaastattelu, Palotarkastusinsinööri Tapio Sten, 26.10.2020).

## 4 PALOSIMULOINNEISSA KÄYTETTÄVÄT OHJELMISTOT

Palosimuloinnit voidaan toteuttaa käyttäen kaksivyöhyke- tai CFD -malleja. Kaksivyöhykemallien helppous on nopea laskentanopeus ja pieni tehotarve. Kaksivyöhykemallit sisältävät kuitenkin usein yksinkertaistuksia ja paloa tutkitaan vain yksittäisenä paikallisena palona. Usein on hyvä tarkastaa, että lieskahdusta ei pääse syntymään. Kaksivyöhykemallit ovatkin usein hyvä paikallisen palon laskennassa.



KUVA 21, Mitoitusmenettely Eurocode -standardin mukaan (Standardi EN 1991-1-2)

CFD -ohjelmat mahdollistavat palon kokonaisvaltaisen tutkimisen. Palotapahtumia voi olla useita ja palo voidaan mallintaa leviävänä. CFD -mallien heikkous on suuri laskentatehon tarve ja pitkät laskenta-ajat. Täytyy olla hyvin selvillä mitä tapauksia lasketaan, koska herkkyyksanalyysien tekeminen CFD -ohjelmalla vie paljon aikaa.

Palontapahtuman vaikutuksien simuloiminen rakenteisiin vaatii yleensä FEM - pohjaisen laskentaohjelman mikä pystyy ottamaan huomioon lämpölaajenemisen sekä lämmöstä johtuvan kimmokertoimen ja lujuuden alenemisen.

#### **4.1 FDS**

FDS eli Fire Dynamics Simulator on tekstipohjainen CFD -ohjelma mikä pystyy laskemaan kevyellä nopeudella liikkuvia nestevirtauksia. Kevyt nopeus tarkoittaa alle 0,3 kertaista äänennopeutta. Ohjelma laskee numeerisesti Navier-Stokes yhtälöryhmiä, joita hyödynnetään hitaasti liikkuvissa lämmön ohjaamissa nestevirtauksissa. Ohjelma kykenee laskemaan palotapahtuman luoman säteilyn etenemisen tilassa ja ottamaan huomioon ilmassa olevien epäpuhtauksien ja kosteuden vaikutuksen säteilyn tehoon. FDS pystyy määrittelemään myös yhden tai useamman reaktion palomalleja. Tästä on hyötyä etenkin, jos tutkitaan monimutkaisempia palomalleja, joissa palotapahtuman reaktiossa syntyy useampia aineita, jotka jatkavat reagointia palotapahtumassa. FDS:ssä on kuitenkin sisäänrakennettuna useimpien palavien aineiden reaktioyhtälöt, jolloin käyttäjä voi määritellä näitä pelkällä nimellä (FDS User Guide).

```

&HEAD CHID='Task6A_1',TITLE='Room fire with 1MW ignition' /

&MESH IJK=18,20,12 XB=-1.8,1.8,-2,2,0,2.4 /

&TIME T_END=1800. /

&MISC SUPPRESSION=.TRUE. /

&VENT XB=-1.75,-1.75,-0.5,0.5,0.0,2.0, SURF_ID='OPEN' /

&SPEC ID='WATER VAPOR' /

&REAC FUEL='CELLULOSE', C=6, H=10, O=5, SOOT_YIELD=0.10
      HEAT_OF_COMBUSTION = 16090 /

&MATL ID = 'POLYURETHANE'
      DENSITY = 25
      CONDUCTIVITY = 0.05
      SPECIFIC_HEAT = 1.0 /

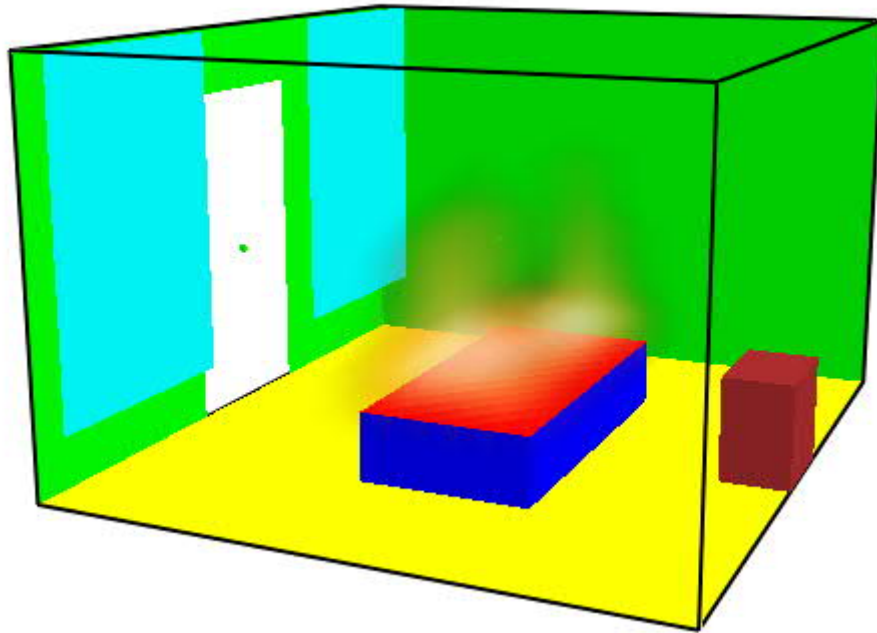
&MATL ID = 'BETONI'
      CONDUCTIVITY = 0.9
      SPECIFIC_HEAT = 0.88
      DENSITY = 2100. /

&MATL ID = 'wood'
      EMISSIVITY = 1.0
      DENSITY = 600.
      CONDUCTIVITY = 0.15
      SPECIFIC_HEAT = 1.5
      HEAT_OF_REACTION = 130
      N_REACTIONS = 1
      REFERENCE_TEMPERATURE = 369.014
      REFERENCE_RATE = 0.00207
      HEATING_RATE = 10.
      NU_SPEC = 0.839
      SPEC_ID = 'CELLULOSE'
      NU_MATL = 0.161
      MATL_ID = 'CHAR'
/

```

#### KUVA 21. Esimerkki FDS -ohjelman koodista

FDS:ssä tieto syötetään ohjelmaan tekstinkäsittelytyökalulla ja tämän jälkeen ohjelma lukee koodin ja aloittaa simulaation. Simulaation tarkasteluun on luotu oma Smokeview -ohjelmansa mikä esittää visuaalisesti FDS:n luoman simulaation tulokset. FDS kykenee myös luomaan laitteita, jotka mittaavat tarkastelupisteen dataa ja kirjoittavat siitä ajan funktiona taulukon. Tätä taulukkoa pystyy hyödyntämään tulosten todentamiseen sekä vertailuun. FDS ohjelmasta on vaikea havaita mahdollisia virheitä ja käyttäjän pitää olla tietoinen tekemistään virheinnoista. Koska koodi kirjoitetaan tekstinkäsittelyohjelmalla saattaa koodiin jäädä yksinkertaisia virheitä, joiden selvittäminen on vaikeaa. FDS kyllä kertoo millä rivillä virhe on, mutta ei välttämättä mikä se on.

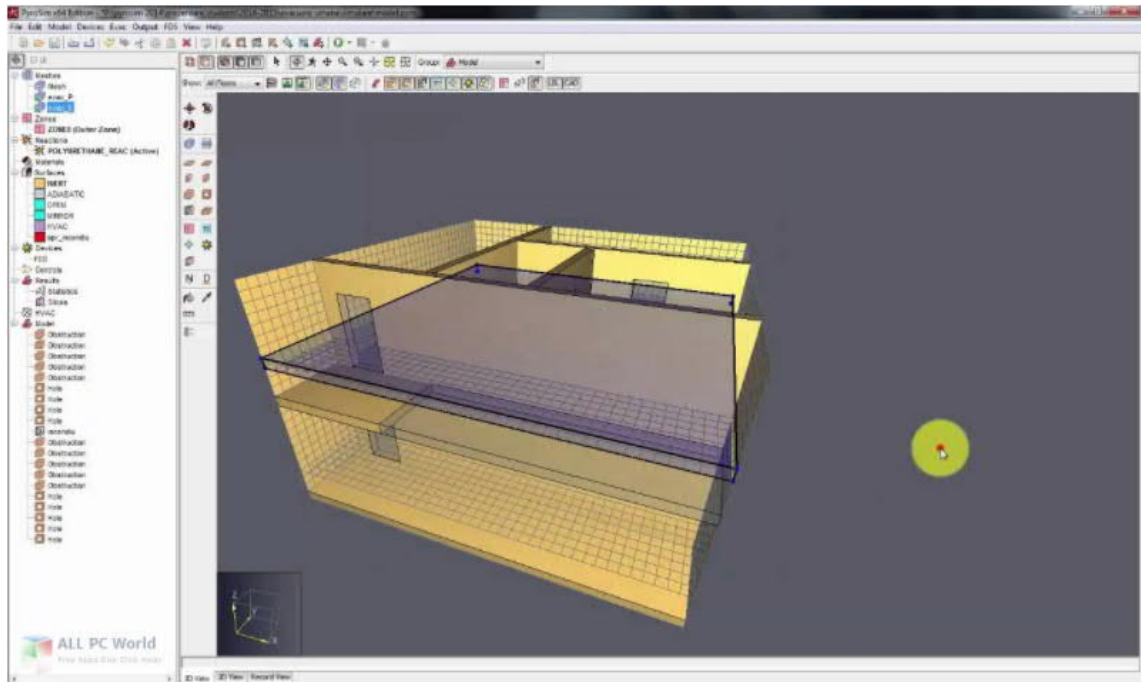


KUVA 22. Esimerkki FDS:llä luodusta simulaatiosta Smokeview -ohjelmassa

## 4.2 Pyrosim

Pyrosim on ohjelma mikä on tehty helpottamaan FDS -simulaatioiden tekemistä. Ohjelmassa on käyttäjäystävällinen ympäristö, mikä mahdollistaa geometrian ja palon mallintamisen suoraan kolmiulotteiseen malliin. Ohjelmaan pystyy lataamaan yleisimpien tietomallien geometriatietoja mikä nopeuttaa mallintamista. Ohjelma mahdollistaa useampien verkotuksien käyttämisen, mikä jakaa mallin laskennan useamman tietokoneen suorittamisen suoritettavaksi. Pyrosim sisältää kattava materiaalikirjaston, mistä löytyy yleisimpien rakennemateriaalien luokat ja ominaisuudet.

Pääosin Pyrosim on luotu helpottamaan mallin luomista ja tarkasteltavan datan visualisointia. Pyrosim vaatii käyttäjältä kuitenkin FDS -ohjelman osaamista, sillä kaikkea tietoa ei pysty välttämättä mallintamaan, jolloin käyttäjän pitää mennä koodipuolelle. Erityisesti geometrian mallintamisessa ja lataamisessa Pyrosim säästää käyttäjältä paljon aikaa, kun taas FDS puolella kaikki geometriatieto pitää ajaa käsin ja mallia pitää käydä tarkastelemassa Smokeviewin kautta.



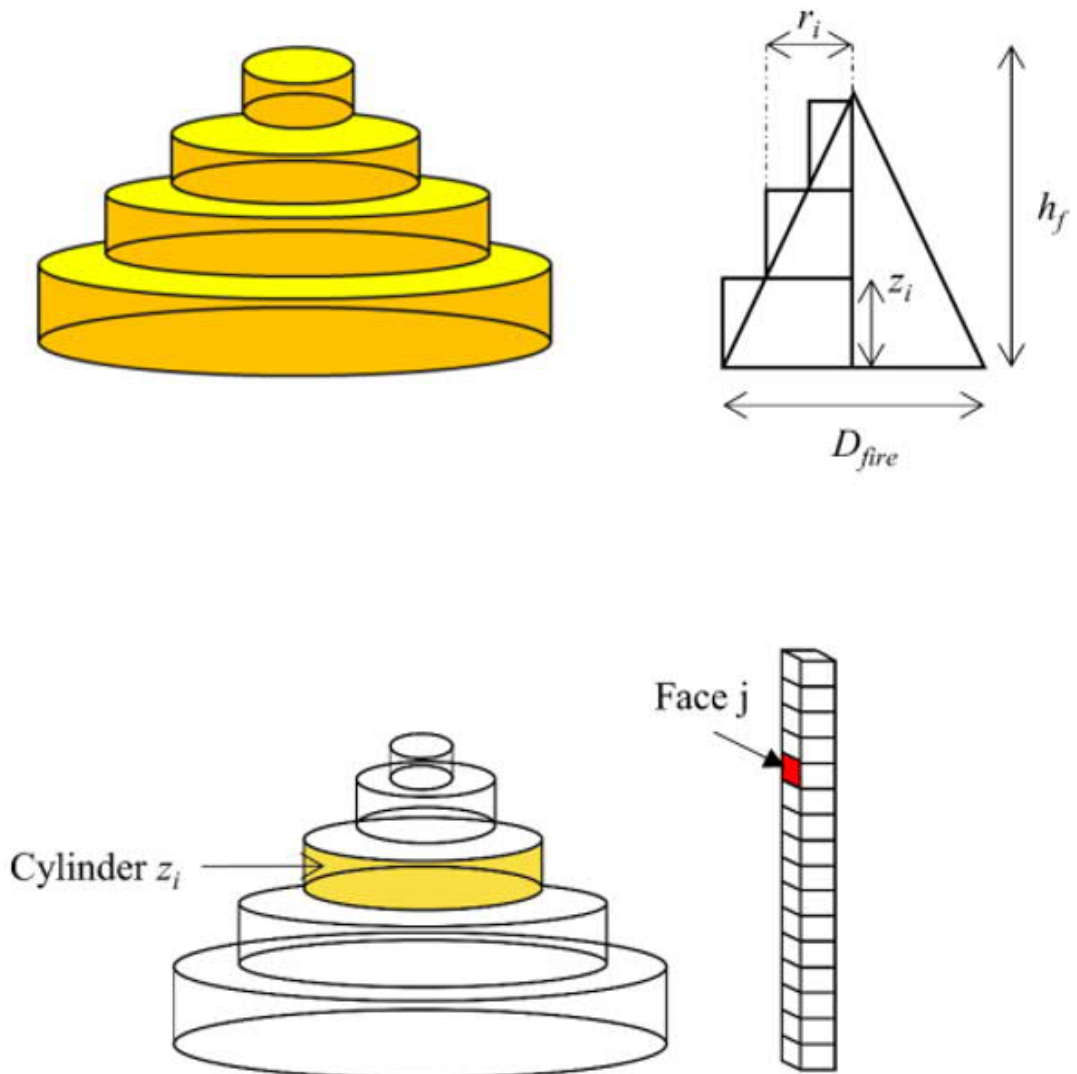
KUVA 23. Pyrosim ohjelman käyttöympäristö

### 4.3 OZone V2

Ozone on luotu helpottamaan suunnittelijoiden työtä, jotka joutuvat määrittelemään rakenteiden lämpötiloja huoneistopaloissa. Ohjelma mahdollistaa yksivyöhyke- sekä kaksivyöhykemallien laskemisen. Ohjelmasta löytyy myös parametrisen palomallin laskenta mikä ottaa huomioon huoneiston koon ja mahdolliset aukkotekijät. Ozone on luotu pääasiassa teräsrakenteiden lämpötilojen ja toiminnan tarkasteluun. Jos huoneistopalomallista pystytään päättämään, että lieskahdusta ei tapahdu voidaan rakenteet laskea paikallisen palon mukaan. Tämä on hyvin käytännöllinen tapa, jos rakenteet ovat avoimia tai tila on iso. Paikallisen palon mallia voidaan myös hyödyntää, jos palokuormat ovat hyvin pieniä, paikallisia tai on selvää, että leviämistä palokuormasta toiseen ei pääse tapahtumaan (Design Of Columns Subject To Localised Fire).

OZone perustuu Locafi -malliin mikä luotiin yhtenäistämään EU -alueen maiden palosuunnittelu käytäntöjä. Locafin tarkoituksena oli tarjota työkaluja laskentaan millä pystytään laskemaan teräsrakenteiden valmistuksen kustannuksia. Locafi -hankkeessa käytiin läpi paikallisen palon malleja ja niiden laskentaa Heskestadin luoman -metodin mukaisesti. Hankkeessa kehitettiin uudenlainen palomalli missä paloa kuvataan kartiona, mikä koostuu useista lieriöistä. Tällöin palosta

tuleva säteily lasketaan lieriön pinnasta suorassa kulmassa tarkasteltavaan kohteeseen. Menetelmä on tarkempi, kuin tarkasteltaisiin paloa pelkästään yhtenä lieriönä (On The Application Field of Ozone V2, J-F Cadorin).

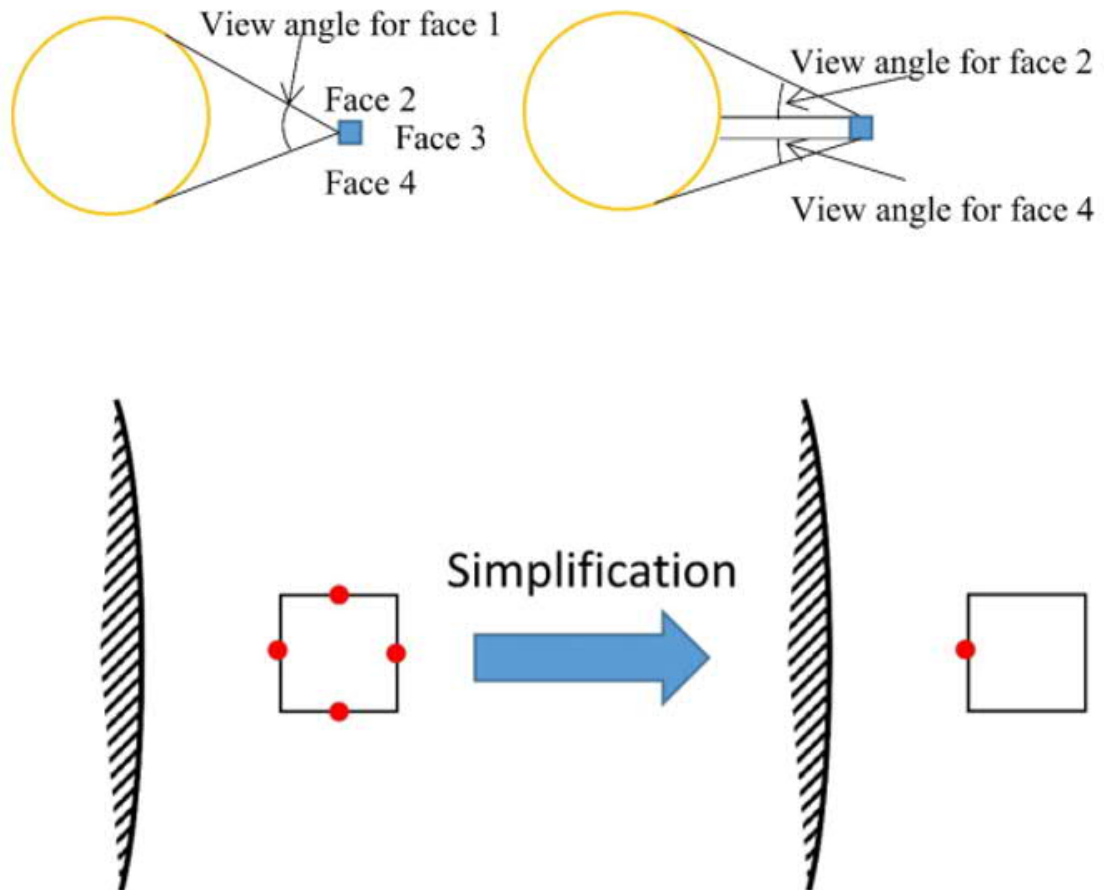


KUVA 24. Palon säteilyvuon määrittely yhdistämällä kartio- ja lieriömenetelmä (On The Application Field of Ozone V2, J-F Cadorin).

Paikallisen palon mallissa palo ajatellaan sylinteriksi ja sylinterin pinnalta laskeaan lähtevä lämpösäteily tarkasteltavaan kappaleeseen. Sylinteri yksinkertaistetaan lieriöksi, jolloin on helpompaa laskea pinnasta pintaan heijastuva lämpösäteily. Tämän jälkeen määritellään kappaleen kulma paloon nähden ja laskeaan jokaisen pinnan absorpoima lämpösäteily. Jos palo sijaitsee rakenne-



osan ulkopuolella, voidaan absorpoiva pinta yksinkertaistaa. Tällöin pitää kuitenkin ottaa huomioon liekin mahdollinen huojuminen mikä saattaa siirtää lämpösäteilyä rakenteen sivuille. Pinnoille, jotka ovat 90-asteen kulmassa palon nähden voidaan käyttää yksinkertaistusta, missä kulmassa olevan pinnan lämpövuoto on 50% suoran pinnan lämpövuosta.



KUVA 25. Yksinkertaistettu menetelmä kappaleen absorpoiman lämpösäteilyn määrittämiseen (On The Application Field of Ozone V2, J-F Cadonin).

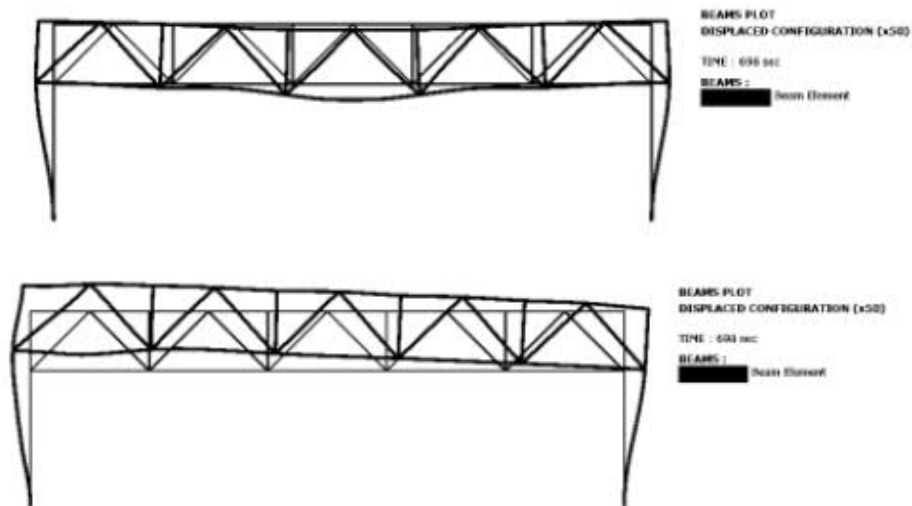
Kokeellisesti on osoitettu, että OZone antaa todella realistisia mitoitusarvoja huoneistoille, joiden aukkotekijä on alle  $9.3m^{5/2}$ . Tätä suuremmilla aukkotekijöillä OZone ei kykene luotettavasti ennustamaan palon kulkua. Pienillä huoneistopaloilla OZone kykenee antamaan luotettavia tuloksia, kun palavan materiaalin massahäviö tiedetään (On The Application Field of Ozone V2, J-F Cadonin).

#### 4.4 Safire

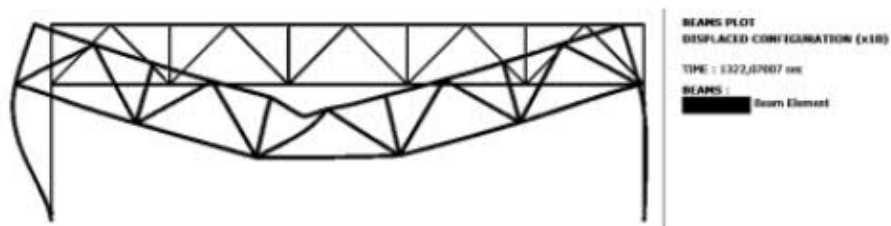
Kun määritellään rakenteen käyttäytymistä palossa, on hyvin vaikeaa määritellä rakenteen käyttäytymistä eri lämpötiloissa varsinkin, jos rakenne lämpenee epätasaisesti paikallisen palon vaikutuksesta. Aiemmin näitä mitoituksia jouduttiin pohtimaan lähinnä polttokokeiden perusteella sillä rakenteen toiminnan laskeminen olisi ollut hyvin työlästä ja sisältänyt paljon aikariippuvaisia muuttujia. Rakenteeseen voi syntyä myös lämpenemisen seurauksena pakkovoimia esimerkiksi suljetun järjestelmän seurauksena. Alkujaan rakenteiden mitoittaminen perustui pelkästään polttokokeissa saatuihin tuloksiin, mutta numeeristen menetelmien kehittyminen mahdollisti rakenteiden laskennan. Tämän seurauksena pystyttiin myös laskemaan rakenteita, mitkä olisivat liian suuria sijoitettavaksi polttouuniin.

Safire on Liegin yliopiston kehittämä ohjelma minkä avulla pystytään numeerisesti laskemaan kehäkokonaisuuksia, jotka on altistettu palolle tai suurille paikallisille lämpötilan muutoksille. Ohjelmaan pystyy syöttämään paikallisen terminen analyysin toisesta ohjelmasta millä määritellään ajan funktiona tietyn rakenteen pisteen lämpötilan kehittyminen. Safire määrittelee rakenteen toiminnan ajan suhteen ja usein rakenteen pettäminen nähdään ohjelmassa paikallisen tai kokonaistaipuman kasvuna (Safir: A Thermal Program for Modeling Structures under Fire, Engineering Journal 2005).

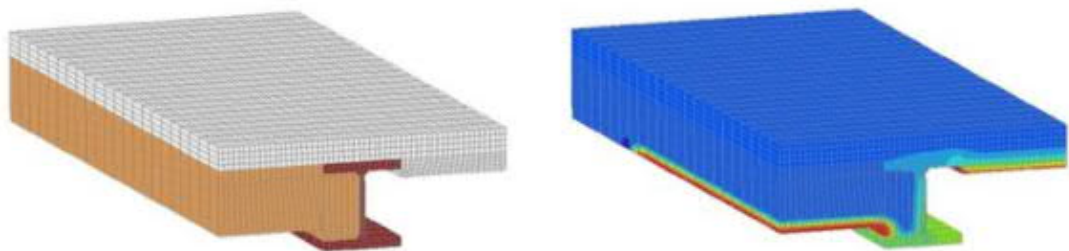
Lämpötila syötetään rakenteeseen node kohtaisesti ja käyttäjä määrittelee nodejen kokonaismäärän ja jakautumisen kappaleessa. Määritelty aika askel kertoo, kuinka tarkasti rakenteen muutokset otetaan huomioon. Aika -askeleella on suuri merkitys laskenta -ajan kestoon samoin kuin määritellyllä elementtiverkotuksella. Tässä työssä ei käsitellä rakenteiden numeerista kestävyystarkastelua kovin syvällisesti. Numeerista kestävyystarkastelua toiminnallisen palomitoituksen pohjalta käsitellään tarkemmin esimerkiksi Tuomas Kankaanpään diplomityössä: Laskentamenetelmät Teräsrakenteiden Toiminnallisessa palomitoituksessa, 2019.



KUVA 25. Kehän siirtymätilat palon ollessa keskellä sekä pilarin vieressä (Tuomas Kankaanpää diplomityö, 2019)



KUVA 26. Kehän siirtymätila 1322s kohdalla (Tuomas Kankaanpää diplomityö, 2019)



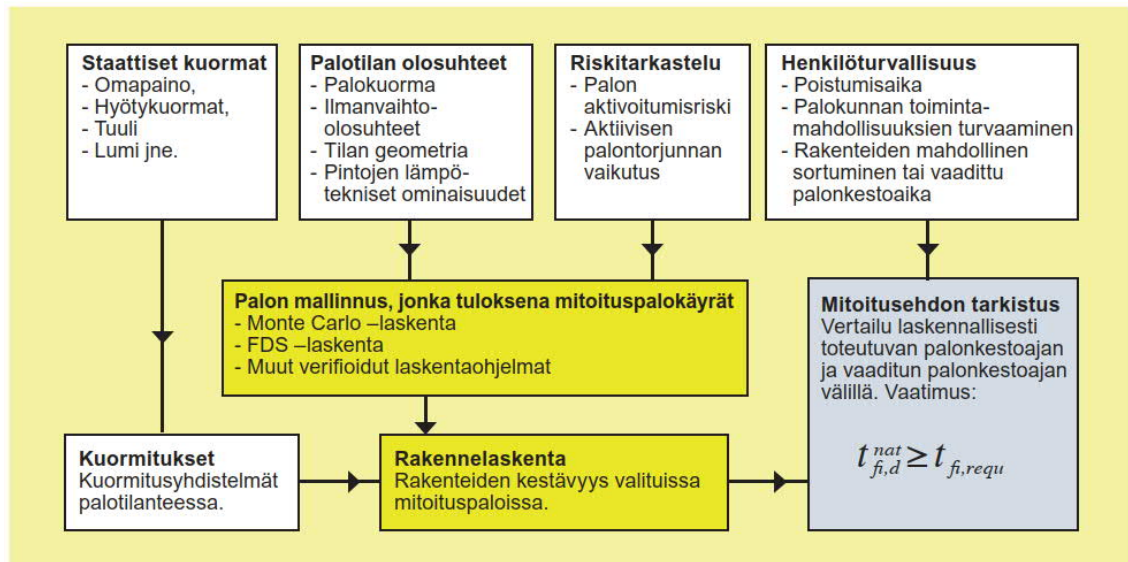
KUVA 27. Liittorakenteen määrittely ja laskenta Safir ohjelmalla.

## 5 TOIMINNALLISEN MITOITUKSEN KÄYTTÖÖNOTTO

Mietittäessä vaihtoehtoja toiminnallisen mitoituksen käyttöön suunnittelutoimistossa täytyy rajata vaihtoehdot käytettävien resurssien ja henkilökunnan osaamisen mukaan. Tapausten käsin laskeminen ja määrittäminen olisi halvin vaihtoehto, mutta ei monestikaan mieleisin. Ilmaisia ohjelmia palosimulaation tekemiseen ovat FDS sekä OZone. Näistä OZone on huomattavasti käyttäjäystävällisempi eikä vaadi ohjelman käyttöön aivan yhtä suurta perehtymistä kuin FDS. OZone on kuitenkin osaltaan hieman rajallinen ja soveltuukin parhaiten huoneistopaloihin missä on yksi- tai kaksi vyöhykettä ja paikallisen palon tapauksiin missä rakenteena on pilari. FDS mahdollistaa lähes kaikkien kuviteltujen tapausten mallintamisen, mutta vaatii käyttäjältä osaamista ja vahvaa käyttökokemusta sekä ymmärrystä palodynamiikasta. Jos yrityksellä on mahdollista varata riittävät resurssit palotekniseen suunnitteluun, hyvänä vaihtoehtona on käyttää Pyrosim ohjelmaa palon mallintamiseen ja Safirea rakenteen lämpötila -analyysiin. Näillä ohjelmilla on kuitenkin maksullinen lisenssi, joten mitoitettavia kohteita pitää olla useampi kauden aikana, että ohjelmat maksavat itsensä mahdollisesti takaisin. Työssä tarkastellaan pääasiassa FDS -ohjelman hyödyntämistä palomallin luomisessa, sillä se on ilmainen ja muut ohjelmat kuten Pyrosim käyttää sitä taustalla itse palosimuloinnin suorittamiseen.

### 5.1 Tarkasteltava rakenne

Palosimulointi alkaa kartoittamalla tila missä palo voi tapahtua ja mahdolliset palokuormat. Palokuormien määrittelyssä voidaan hyödyntää arkkitehdin piirustuksia sekä keskustella tilaajan kanssa mihin käyttötarkoitukseen tilaa tarvitaan ja onko sille mahdollisesti tulossa muutoksia. Käytetty palokuorma pitää mainita loppudokumentaatioissa, että mahdollisesti seuraavalle tilan käyttäjälle on selvää mikä mahdollinen palokuorma on määritelty ja täytyykö tehdä uusi simulointi, jos palokuorma kasvaa. Uusi ympäristöministeriön asetus rakenteiden paloturvallisuudesta mahdollistaa, että jos tilaa laajennetaan, voidaan laajennus ja muutos suorittaa oletetun palonkehityksen mukaan paloluokan kuitenkin muuttumatta. Palokuorman kasvaessa vaaditaan kuitenkin myös muilta paloluokilta uusi tarkastelu (848/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta).



KUVA 27. Oletettuun palonkehitykseen perustuvan rakenteellisen palomitoituksen kulku yksinkertaistettuna (Ruukki, rakenteiden toiminnallinen palomitoitus, 2008)

Tarkasteltavan rakenteen geometrian luominen aloitetaan FDS ohjelmassa määrittelemällä ensin tilan pääkoko &MESH:in eli elementtiverkotuksen mukaan. Koordinaatisto muotona käytetään yleensä XB= -muotoa missä tilalle määritellään minimi ja maksimi koordinaatisto xyz- koordinaatiston mukaisesti.

$$\&MESH\ IJK=18,20,12\ XB=-2,2,-2,2,0,2.4\ / \quad (14)$$

IJK määrittelee, kuinka monta elementtisolua tilassa sijaitsee x-akseliston alueella. Tässä tilanteessa tila on 4m leveä, 4m pitkä ja 2.4m korkea. Tarkkuuden vuoksi olisi fiksuja, että muodostuvat elementtiverkon solut olisivat symmetrisiä eli tila pyritään jakamaan neliön muotoisiin soluihin. Resoluutio eli solujen koko suhteessa tilaan täytyy määritellä aina analyysin mukaan. Jos tarkastellaan suuria tiloja ja suuria paloja voidaan käyttää isompaa resoluutiota, mutta jos tarkastellaan esimerkiksi pieniä turbulenttisia virtauksia missä tapahtuu useampi reaktio, on järkevää käyttää pienempää hilakokoa. Kun tarkastellaan massan ja lämmön siirtymistä liekipatsaasta tilaan voidaan olettaa hyväksi resoluutioksi:

$$D^*/\delta x \geq 10 \quad (15)$$

Tarkasteltaessa aineen virtausta pinnan läheisyydessä FDS:ssä on hyvä tarkistaa  $y^+$  -arvo mikä määrittelee tarkkuuden virtauksen mallinnukselle. Tämä määritellään ohjelmassa &DEVC kautta:

```
&DEVC XYZ = 0.5,0.0,1.0 QUANTITY = 'VISCOUS WALL UNITS' IOR=2  
ID='y+'/ (16)
```

Arvon olisi hyvä olla luvun 100 tuntumassa, jolloin varmistutaan, että simulaatio laskee ilman virtauksen oikein (FDS User Guide). Jos luku on pienempi, simulaatio on tarkempi ja jos isompi simulaatio on karkeampi.  $y^+$  arvon määrittely perustuu FDS:n tapaan tutkia virtauksia pinnan läheisyydessä "law of wall" -ilmiön kautta (FDS User Guide).

## 5.2 Pintojen määrittely

Tutkittaessa paloa, joka rajoittuu tilaan, tilan ominaisuuksilla on suuri merkitys palotapahtuman kestolle ja voimakkuudelle. Jos ympäröivän tilan lämmöneristävyyks on korkea, saavuttaa palo tilassa korkeamman lämpötilan ja lieskahduksen todennäköisyys on isompi. Tilan seinien ollessa kohtalaisesti lämpöä johtavia materiaaleja, imee seinä lämpöä rakenteesta ja johtaa sitä tilan toiselle puolelle. Kaavassa (12) otetaan huomioon tilan seinien ominaisuudet ja näillä on suora yhteys lieskahduksen jälkeiseen palon maksimi lämpötilaan. Pintojen määrittelyyn liittyy myös mahdollisten aukkojen määrittäminen. Aukot kannattaa määrittellä rakenteessa erillisillä seinärakenteilla, jolloin FDS tulkitsee virtaus "law of wall" ilmiön kautta (FDS User Guide).

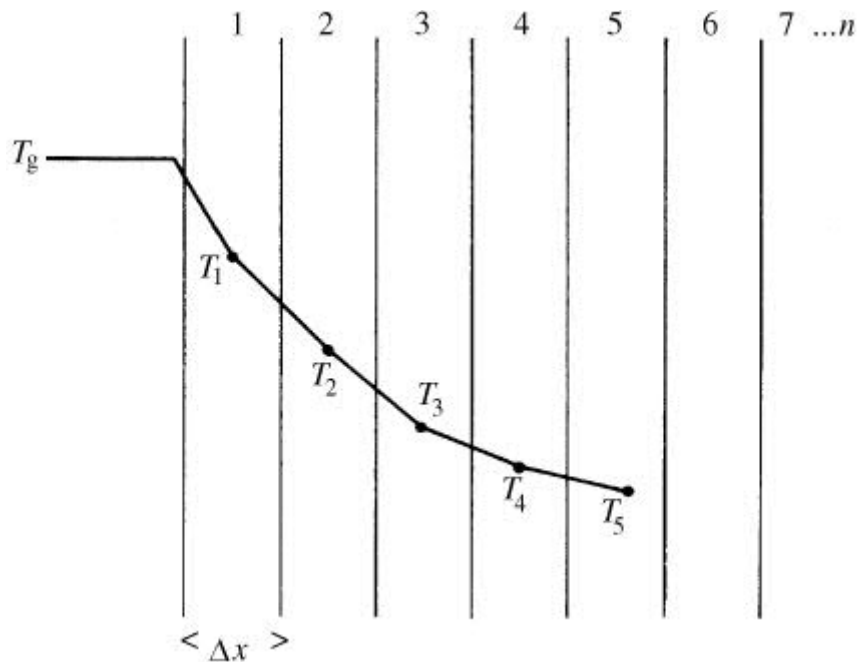
### 5.2.2 Lämmön johtuminen

Lämmön johtuminen rakenteessa on ilmiö mihin liittyy rakenteen lämmönjohtavuuden kerroin, rakenteen tiheys ja paksuus. Jos rakenteessa on eri ainekerroksien, täytyy tutkia ainekerrosten rajapinta myös johtumiselle. Johtumiselle on ominaista, että lämpö pyrkii siirtymään korkeamman lämpötilan alueesta matalamman lämpötilan alueelle. Johtumista voidaan tutkia yksinkertaisimmillaan Fourierin lain avulla. Fourierin laki kertoo lämpövuon ja lämpötilan välisen yhteyden.

$$\dot{q}'' = -\frac{k}{L}(T_2 - T_1) \quad (13)$$

Kaavasta nähdään, että lämmönjohtumisvakion ja rakenteen paksuuden välillä on riippuvuussuhde, jota kerrotaan lämpötilaerolla. Mitä suurempi lämpötilaero sitä suurempi lämpövuon arvo. Tämä kaava on voimassa termisesti paksuille rakenteille mikä koostuu vain yhdestä materiaalista. Lämpövuon arvo voidaan tällä mallilla laskea vain paikallisesti, kun tiedetään molempien puolien lämpötilat. Tarkasteltaessa tilannetta missä lämpötila kasvaa, ja rakenteelle tulee palosta myös säteilyä, tarvitaan tarkempaa laskentaa.

Laskentamalli, missä otetaan huomioon myös ajan vaikutus sekä mahdolliset aineen vaihtelut rakenteessa, vaatii mallin missä tarkasteltava rakenne on jaettu useampaan osatekijään ja mallia lasketaan ajan funktiona. Tässä mallissa tutkitaan ajan hetki kerrallaan rakenteen lämpötilaan tarkastelupisteessä ja lämpötilan siirtymistä tarkastelupisteestä toiseen. Rakenteen jakaminen useampaan tarkastelupisteeseen parantaa laskennan tarkkuutta. Samoin aika-askel kannattaa pitää mahdollisimman lyhyenä, jolloin laskennan vaikutukset siirtyvät tarkemmin rakenteeseen. Laskentamalli pitää tehdä tietokoneavusteisesti, sillä tarkasteltavia pisteitä tulee useita ja jokainen pitää laskea ajan funktiona. Esimerkiksi, jos rakenne jaetaan 10 yhtä suureen osaan ja tarkastellaan aikajännettä 1800s, tarkasteltavien solujen määrä on 21 600 (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).



KUVA 28. Rakenne jaettuna tarkastelupisteisiin.

$$T_s(t + \Delta t) = T_s(t) + \frac{h\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T_h - 2T_s(t) + T_0) \quad (14)$$

Tarkasteltaessa kaavaa pisteessä T3 kaava muuttuu muotoon:

$$T_3(t + \Delta t) = T_3(t) + \frac{k}{\rho c_p (\Delta x)^2} (T_2 - 2T_3 + T_4) \quad (15)$$



Laskenta pystytään suorittamaan käyttäen apuna taulukko -ohjelmaa tai luomalla kaavasta koodi mihin tahansa matemaattisia funktiota käsittelevään ohjelmaan.

### 5.2.3 Pintojen ja niiden ominaisuuksien määrittäminen simulaatioon

Yksinkertaisimmillaan FDS mahdollistaa pintojen määrittämisen &VENT komennon kautta. Tällöin määritellään missä tietyn pintaominaisuuden sisältävä rakenne sijaitsee. Jos rakenne on symmetrinen, kuten huone, voidaan pintaominaisuudet määrittellä MB='XMIN/XMAX' -komennon kautta. Tällöin ohjelma määrittelee maksimi tai minimi koordinaatistoarvon mukaisen pinnan.

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='WALL1' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='WALL1' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='WALL1' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='WALL1' /
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='LATTIA' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='WALL1' /
```

(16)

Yllä on määritelty yksinkertainen huone, missä seinät ja katto määritellään pintatunniste 'WALL1' kautta ja lattia 'LATTIA' pintatunnisteen kautta. Kun rakenteessa on aukkoja, käytetään mieluiten objektia aukon puoleisen seinän tekemiseen, jolloin FDS määrittelee savun ulosvirtauksen konvektion seinän suhteen.

Luotaessa materiaaleja, jotka liittyvät palotilan lämmönjohtavuuteen ja eivät ole ns. palavia, materiaalille täytyy määrittellä lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti sekä tiheys. Nämä määritellään &MATL ID kautta.

```
&MATL ID = 'BETONI'
    CONDUCTIVITY = 0.9
    SPECIFIC_HEAT = 0.88
    DENSITY = 2100. /
```

(17)

Materiaalitunniste määrittelee materiaalin mitä pintatunniste käyttää. Materiaalitunnisteen voisi ajatella olevan materiaalin ydin ja pintatunnisteen ulkokuori.

Pintatunniste määritellään &SURF ID komennon kautta. Määriteltäessä pintoja on tärkeä määritellä pinnan paksuus sekä pinnan emissiviteetti. Jos ei olla varmoja materiaalin oikeasta emissiviteetti arvosta, voidaan käyttää varmalla puolella olevaa arvoa 1. Materiaalin emissiviteetti kuten ominaislämpökapasiteetti muuttuu lämpötilan seurauksena. Pintatunnisteeseen voidaan määritellä kerroksia määrittelemällä materiaalitunniste kaksi- tai useampiosaiseksi. Tällöin materiaalille luodaan pintatunnisteessa osatekijä, mikä määrittelee, sijaitseeko materiaali pinnassa kerroksittain vai koostuuko pinta materiaaliyhdisteestä. Materiaaliyhdisteen luominen käsitellään tarkemmin palavan materiaalin määrittelyn yhteydessä.

Tilaa rajoittaville pinnoille on ominaista, että niille luodaan takaosa mikä määrittelee, miten lämpövuoto kulkeutuu rakenteen läpi. Takaosa määritellään BACKING komennon kautta ja sen toteutumiseen on kolme vaihtoehtoa. VOID tarkoittaa, että pinta rajoittuu avoimeen tilaan mihin lämpö pääsee karkaamaan. EXPOSED tarkoittaa, että kappaleen takapinta on myös palolle altis, jolloin sen lämpötila voi nousta lämpötilan nousun seurauksena. INSULATED tarkoittaa, että pinnan takana on hyvin eristävä pinta mikä mahdollistaa lämmön nopeamman nousemisen, koska lämpö ei pääse karkaamaan rakenteesta. Rakenteissa mitkä rajaavat tilaa on selkeintä käyttää VOID takapintaa, jolloin lämpö tasaantuu takapinnan lämpötilan mukaisesti. Rakenteissa mitkä sijaitsevat palotilassa on hyvä käyttää EXPOSED pintaa sillä palo pääsee rakenteen toisellekin puolelle. Myös rakenteet mitkä toimivat tilaa rajaavina seininä EXPOSED takapinnan käyttäminen on suotavaa.

```
&SURF ID='WALL1', (18)
    COLOR='GREEN'
    EMISSIVITY = 1,
    MATL_ID = 'BETON1'
    THICKNESS = 0.2
    BACKING = 'VOID'
```

Seinä, jonka pintatunniste on 'WALL1', emissiviteetti 1 ja paksuus 20cm. Seinän takaosa rajoittuu "tyhjiöön".

Eri tieteenalat käsittelevät hieman eri tavalla johtumisesta ja säteilemisestä syntyvää lämpövuota. Vuoden 2001 WTC tornien sortuminen käynnisti palosimuloinnin yhdistämisen rakennemalliin ja rakenteiden toimintaan. Tämä ajoi tarpeeseen kyetä yhdistämään eri tieteenalojen käyttämien lämpövuon arvojen tulokset toisiinsa. Tällöin päätettiin alkaa käyttämään pinnan adiabaattista lämpötilaa. Adiabaattinen lämpötila tarkoittaa pinnan lämpötilaa systeemissä missä saapuvan ja lähtevän lämpövuon summa on nolla. Arvo ei kuvaa pinnassa oikeasti valitsevaa lämpötilaa, mutta antaa arvon millä pinnan nettolämpövuoto voidaan määrittellä ideaalisysteemissä.

$$\dot{q}_{\text{tot}}'' = \dot{q}_{\text{rad}}'' + \dot{q}_{\text{con}}'' \quad (19)$$

Pinnan nettolämpövuoto on säteilystä sekä konvektiosta aiheutuva lämpövuon summa. Kun saapuva ja poistuva lämpövuon summa lasketaan nolllaksi, saadaan kaava:

$$\epsilon(\dot{q}_{\text{inc}}'' - \sigma T_{\text{AST}}^4) + h(T_g - T_{\text{AST}}) = 0 \quad (20)$$

Tämän kaavan pohjalta pystytään määrittelemään pinnan adiabaattinen lämpötila eli lämpötila mikä syntyisi ideaalisysteemissä ja mikä on varmallalla puolella oleva oletama. Tämän lämpötilan pohjalta pystytään määrittelemään pinnan vastaanottama nettolämpövuon arvo (Adiabatic Surface Temperature, Ulf Wickström) :

$$\dot{q}_{\text{tot,SM}}'' = \epsilon\sigma(T_{\text{AST}}^4 - T_{s,SM}^4) + h(T_{\text{AST}} - T_{s,SM}) \quad (21)$$

Jos palosimuloinnissa halutaan tarkastella rakennetta missä rakenteen pinnat ovat adiabaattisia, pitää SURF pintatietueeseen määrittellä pinnan adiabaattisuus ADIABATIC=.TRUE komennolla. Koska mikään pinta ei ole koskaan oikeasti täysin adiabaattinen kannattaa tämän käyttö rajata kuitenkin vain tarkastelukäyttöön (FDS User Guide). Pintalämpötilan adiabaattisen arvon määrittelyminen käydään myöhemmin läpi.

### 5.2.4 Aukotuksien määrittelyminen pintoihin

Jotta palolla, olisi mahdollisuus saada riittävästi happea, tarvitaan simuloitavaan tilaan riittävä määrä aukotuksia. Aukotukset voivat olla seinissä tai katoissa. Aukotukset määritellään yleensä &VENT komennon kautta. Jos aukotus on täysin avoin, voidaan pintatietueeseen käyttää tyyppinä OPEN, jolloin tila avautuu ulkoilmaan. Tällöin kaikki virtaus tapahtuu virtausdynamiikan kautta, eikä aukotuksesta liiku ilmaa ilman että jokin liikuttaa sitä kuten palotapahtuma.

```
&VENT XB=-1.75,-1.75,-0.5,0.5,0.0,2.0, SURF_ID='OPEN' / (22)
```

Tässä esimerkissä seinään on luotu oven kokoinen aukko mikä on täysin auki. Palossa hyvin yleistä on, että oviaukko saattaa olla palotapahtuman aikana kiinni. Palo luo kuitenkin kehittyessään niin paljon painetta, että muihin tiloihin aukeavat rakenteet eivät kestä tätä paineen nousua. Tällöin aukotukselle voi luoda aika-funktion, milloin se syntyy. Tällöin on mahdollista tutkia tilannetta missä palon syttyy ja leviää alustavasti pienemmällä määrällä happea ja paineen kasvaessa tarpeeksi, alkaa saamaan riittävästi happea esimerkiksi lieskahduksen syntymiseen.

```
&HOLE XB = 2.9,3.2,1,2,0,2 COLOR='GRAY 40' DEVC_ID='PRES' / (23)
&DEVC XYZ = 2.5,1.5,1.0 ID = 'PRES' QUANTITY = 'PRESSURE' SET-
POINT=500. /
```

Esimerkissä on luotu aukotus, joka tulee toimintaan, kun paine ylittää 500Pa raja-arvon. Paineen tarkkailuun on käytetty &DEVC toimintoa millä luodaan yleensä devicejä malliin mitkä mittaavat ja raportoivat haluttuja arvoja mallista simulaation aikana. Tässä määritellään siis, että aukko syntyy, kun device saa paineen arvon 500Pa. Usein simulaatioita tehtäessä missä on aukotuksia tai venttiileitä mistä virtaa ilmaan, on hyvä antaa simulaation ensin rauhoittua ennen kuin palo käynnistyy. Tämä onnistuu helpoiten antamalla simulaatiolle negatiivinen lähtöaika:

```
&TIME T_END=20.0 T_BEGIN = -5./ (24)
```

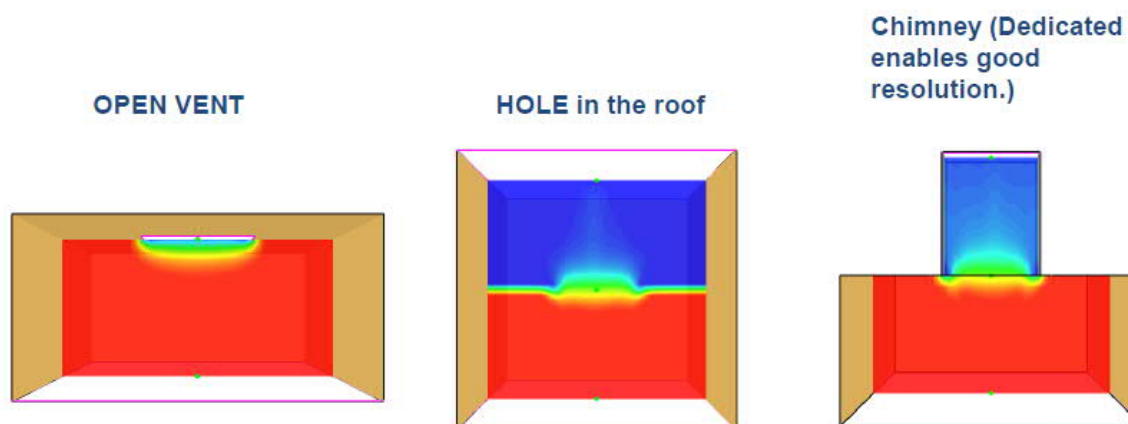
Tässä palosimulaatio alkaa vasta, kun 5s on kulunut.

## 5.2.5 Venttiilit ja ilmanvaihdolliset järjestelmät

Usein nykyajan rakennuksissa ilmanvaihto tapahtuu koneellisesti ja tällöin pitää ottaa huomioon palotapahtumassa mahdollinen pakotettu ilmavirta. On myös mahdollista, että tiloissa sijaitsee alueita missä on erilliset painealueet. Tästä esimerkkinä voisi toimia kerrostalon rappukäytävä, joka on yleensä paineistettu ylipaineelliseksi. Rappukäytävän ollessa ylipaineinen, asunnossa tapahtuva palo ei pääse niin hyvin leviämään rappukäytävään ja tätä kautta muihin asuntoihin.

Rappukäytävissä ja yleisissä tiloissa on usein tarve järjestää savunpoisto palotilanteessa turvallisen evakuoinnin mahdollistamiseksi sekä lieskahduksen estämiseksi. Savunpoisto kanavia löytyy sekä koneellisina, että painovoimaisina. Painovoimaisessa avautunut luukku luo ”chimney effectin” missä pienemmässä ilmatilassa liikkuva ilma joutuu liikkumaan nopeammin ja luo tällöin vedon mikä poistaa mahdollista savua tehokkaammin. Mitä pidempi piippu on, sitä suurempi veto pääsee syntymään.

Palosimulaatiossa luukku voidaan mallintaa ja sille voidaan määritellä lämpötilasta tai paineesta luukun avausmekanismiin laukaiseva device. Mitä tarkemmin luukku mallinnetaan, sitä realistisemmin se toimii palomallissa. Luukun resoluutioon pitää kiinnittää tarkkaa huomiota sillä avoimen luukun ympäristön ilmavirtaukset käyttäytyvät huomattavasti monimutkaisemmin kuin suljetun piipun. Tällöin suljetun piipun vaatima resoluutio on huomattavasti pienempi kuin avoimen aukon.



KUVA 28. Savunpoiston mallintamisen vaikutus ilmavirtaan (Palosimuloinnin soveltaminen savunpoistoon, Kling, T).

Käytettäessä palosimulaatiossa koneellista savunpoistojärjestelmää, on ilmavirtauksen suuruus helpommin määriteltävissä. Tällöin määritellään aukotus ja aukotukselle annetaan ilmavirta ja ilmavirralla suunta.

```
&SURF ID='INFLOW',                                     (25)
  FYI='Inflow boundary condition',
  RGB='BLUE'
  VEL=-1.0 /
```

Esimerkissä on luotu pinta missä ilma liikkuu 1 m/s vauhdilla negatiiviseen suuntaan. Tälle täytyy luoda vielä aukotus mikä käyttää tämän pinnan tietuetta.

Rakenne itsessään sisältää osia mitkä voivat aiheuttaa ilmavuotoja rakenteseen. Ilmavuotojen määrä on vähentynyt nykyisen rakentamisen aikakaudella, mutta tämä pitää ottaa huomioon myös rakenteita tutkittaessa. Usein vanhoissa rakennuksissa ilmanvaihto on toiminut painovoimaisesti, jolloin lämpimän ilmavirtauksen aiheuttama imu on ottanut korvausilman rakennuksissa sijaitsevista raoista. NFPA 92 määrittelee rakennuksen ilmavuotoluvun raja-arvot:

Hyvin väljä:	$A_{leak}/A_{env}$	$=12 \times 10^{-4}$
Väljä:	$A_{leak}/A_{env}$	$=3.5 \times 10^{-4}$
Keskiverto:	$A_{leak}/A_{env}$	$=1.7 \times 10^{-4}$
Tiukka:	$A_{leak}/A_{env}$	$=0.5 \times 10^{-4}$

#### TAULUKKO 1, NFPA 92 ilmavuotolukujen raja-arvot

$$A_{leak}/A_{env} = 1.7 \times 10^{-4}$$

$$q_{50} = 3 \text{ (m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{)}$$

$$V_{50} = q_{50} / 3600\text{s (m}^3\text{/s)}$$

$$n_{50} = V_{50}/V \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

#### TAULUKKO 2, Ilmavuotoluvun laskenta NFPA 92 määritelmän pohjalta

## 5.2.6 Ilmanvaihdollisten järjestelmien mallintaminen

Ilmanvaihdolliset alueet missä on eri paine-ero pitää määritellä omiksi alueiksi ja tämä tapahtuu FDS puolelle &ZONE komennolla. Tällä määritellään alue mikä kuuluu yhteen painealueeseen ja näiden painealueiden väliin luodaan tarvittaessa verkosto &HVAC komennon avulla.

```
&ZONE XB=0,3,0,4,0,2.5 / (26)
```

FDS ei kykene itse määrittelemään painealueita ja tämän vuoksi ne pitää aina määritellä ja osata yhdistää simuloinnin tekijän toimesta. Painealueeseen luodaan tarvittaessa ilmavuodot toiseen painealueeseen. Tämä tapahtuu määrittelemällä &ZONE komennon sisään LEAK\_AREA mikä määrittelee ilmanvuotoluvun painealueesta toiseen.

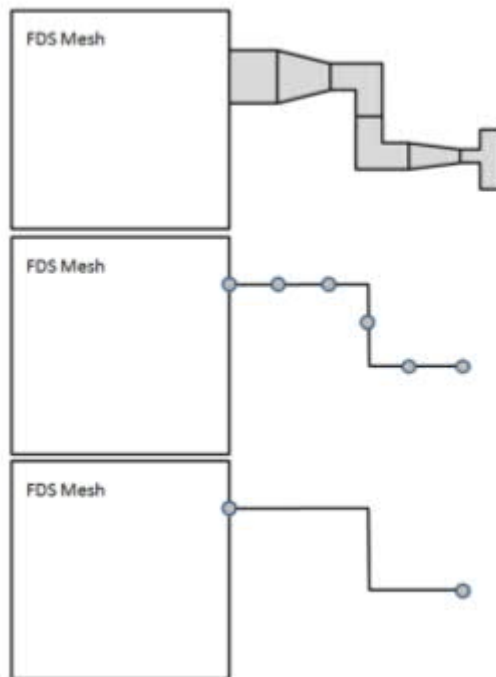
```
&ZONE XB=0,3,0,4,0,2.5, LEAK_AREA (0) =0.0003 / (27)
```

Jos määritellään pintaa mistä tapahtuu vuotoa toiseen painetilaan, tapahtuu tämä LEAK\_PATH komennon kautta. Tässä yhdistetään yksittäisen pintaelementin ilmanvuoto toiseen tilaan.

```
&SURF ID='vuotava seinä', LEAK_PATH=0,1 / (28)
```

FDS määrittelee tilat toisiinsa painealueiden ja HVAC -järjestelmien kautta. Tämä tarkoittaa, että tilojen ei tarvitse sijaita fyysisesti toistensa lähellä. Painealueiden linkittäminen toisiinsa mahdollistaa paineen jakautumisen kahden tilan välillä. HVAC mahdollistaa verkotuksien luomisen missä tietyt tilat ovat toistensa kanssa yhteyksissä ja toiset eivät. Tällöin on mahdollista ohjata tilojen painetta tiloista toisiin, mutta pitää vakiopaine toisissa tiloissa. Tällainen tapahtuma voisi olla esimerkiksi kerrostalo missä yhden huoneiston palo rikkoo huoneiston ikkunan ja tällöin rappukäytävä pysyy edelleen ylipaineisena. Jos palo pääsee kuitenkin rikkomaan huoneiston oven ja leviää rappukäytävään, rappukäytävän savunpoistaukea ja tällöin rappukäytävällä ja huoneistolla on oma yhteinen painealue, joka ei kuitenkaan vaikuta välttämättä muihin asuntoihin.

HVAC eli LVIA -järjestelmät määritellään yhdistämällä toisiinsa tilat nodeilla minkä väliin määritellään putkisto ja sen ominaisuudet. Tämä on yksinkertaistettu menetelmä monimutkaisen kanaviston rakenteesta. Jos kanaviston mallinnettai-siin kokonaisuutena, veisi tämä turhaa laskentatehoa, eikä välttämättä johtaisi tarkempiin tuloksiin.



KUVA 29. Ilmanvaihtokanaviston yhdistäminen yksinkertaisella node -järjestelmällä (FDS User Guide).

Kanavistoon määritellään yleisesti mitkä nodet se yhdistää, mikä sen pituus on, mikä on kanaviston karkeusaste, onko siinä jonkinlainen puhallin käytössä mikä määrittelee ilman liikkumisen määrän ja nopeuden. Kanavistoon voidaan myös määrittellä monimutkaisempia osia kuten vaimentimia ja kytkimiä mitkä voivat muuttaa esimerkiksi kanaviston virtaussuuntaa.

```
&HVAC TYPE_ID='DUCT', ID='ductname',
NODE_ID='node 1','node 2', AREA=3.14,
LOSS=1.,1., LENGTH=2., ROUGHNESS=0.001,
FAN_ID='fan 1', DEVC_ID='device 1' /
```

(29)



### 5.3 Palon mallintaminen

Paloa simuloitaessa palon mallintaminen on yksi tärkeimmistä osatekijöistä. Palo voi olla yksinkertaisimmillaan nestepalo mikä sijaitsee palavalla pinnalla ja monimutkaisimmillaan etenevä kiinteän aineen palo mihin liittyy monia reaktiomuotoja. Palo on yksinkertaisimmillaan aineen yhtymistä happeen ja näiden reaktiotuotteiden kautta pystytään tarkastelemaan palon lämmön- ja savuntuottoa. Nestepaloissa palotapahtuma on usein hyvin yksinkertainen ja palon lämmöntuotto pystytään määrittämään palavan nesteen mukaan laskemalla reaktiotuotteet ja niiden muodostumiseen kuluva energia. Kiinteissä aineissa pitää usein tietää tarkemmin mitä kiinteät aineet sisältävät ja miten niiden palotapahtuma muodostuu. Kiinteissä aineissa saattaa usein olla kosteutta mukana mikä vaikuttaa palotapahtumaan epätaloudellisesti sekä kasvattaa palotilan kosteuspitoisuutta mitä vaikuttaa säteilyllä siirtyvään lämpövuohon sillä ilmassa oleva kosteus ja epäpuhtaudet sitovat säteilyä myös itseensä.

#### 5.3.2 Yksinkertainen palo

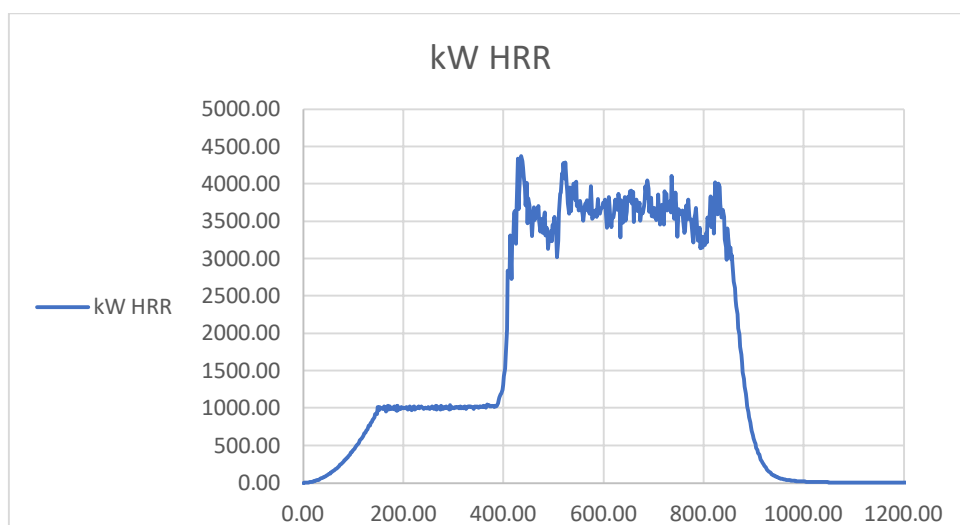
Yksinkertaisella palolla tarkoitetaan tässä tapauksessa palotapahtumaa mikä määritellään täysin palon lämmöntuoton kautta. Tämä on helppo tapa määritellä palotapahtuma, mutta vaatii usein vertailuaineiston mistä palotapahtuma voidaan määritellä. Näitä onneksi löytyy hyvin esimerkiksi VTT:n tekemänä. Yksinkertaisessa palotapahtumassa luodaan pinta mille annetaan lämmönluovutus teho. Lämmönluovutusteho alkaa ja loppuu simulaation mukaisesti ellei sille anneta tarkempia arvoja.

```
&SURF ID = 'Fire' (30)
COLOR = 'RED'
HRRPUA = 2000. /
```

Esimerkissä on luotu pinta minkä nimi on 'Fire' ja tämä pinta tuottaa palotehoa 2000kW teholla koko simulaation ajan. FDS:ssä on tapana ilmaista paloteho pinta-alan mukaan eli HRRPUA Heat Release Rate Per Unit Area. Tällöin palotehon määrä suhteutetaan palavan alueen pinta-alaan.

Yksinkertainen palo itsessään ilmaistuna pelkällä paloteholla ei vastaa mitään yksittäistä oikeata palotapahtumaa ja tämän vuoksi onkin tärkeä luoda palolle aikatekijä mikä pitää sisällään palon syttymisen, kehittymisen ja jäähtymisen. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta pitää sisällään palotehon määritelmän, jos palokuormaa ei tiedetä. Tämä palokuorma on määritelty  $600\text{MJ/m}^2$  alle kaksikerroksisille rakennuksille ja  $900\text{MJ/m}^2$  yli kaksikerroksisille. Jos päädyttäisiin käyttämään tätä arvoa, pitäisi palon leviämisenopeus määritellä ja tämän pohjalta laskea palotapahtuman kehittymiskäyrä. Toinen vaihtoehto on määritellä palo kehittyväksi  $t^2$  käyrän mukaisesti ja antaa palon palaa loppuun palokuorman mukaisen ajan (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta).

Oletetaan palo-osaston pinta-alaksi  $40\text{m}^2$  tällöin palokuorman määrä on  $24\,000\text{MJ}$ . Kun tämä jaetaan palon keston vaatimalla ajalla, saadaan kehittyneen palon paloteho. Jos oletetaan palo nopeasti kehittyneeksi palo saavuttaa täyden tehonsa  $150\text{s}$  kohdalla. Tämän jälkeen palo jatkaa palamista täydellä teholla. Tarkastellaan R60 rakennetta, jolloin palotehoksi saadaan n.  $6.7\text{MW}$   $3600\text{s}$  ajan. Palon leviäminen täysin kehittyneeksi paloksi voidaan mallintaa käyttäen joko &RAMP muotoista kehittymiskäyrää tai TAU\_Q komennolla. TAU\_Q komenossa ohjelmaan määritellään aikajakso, minkä jälkeen paloteho pysyy vakiona. Tähän saakka simulointi noudattaa  $t^2$  muotoista palotehon kehittymiskäyrää.



KUVA 30 Palotehon kasvu  $150\text{s } t^2$  muotoisesti  $1000\text{kW}$  tehoon saakka, minkä jälkeen palo jatkuu vakiomuotoisena lieskahdukseen saakka.

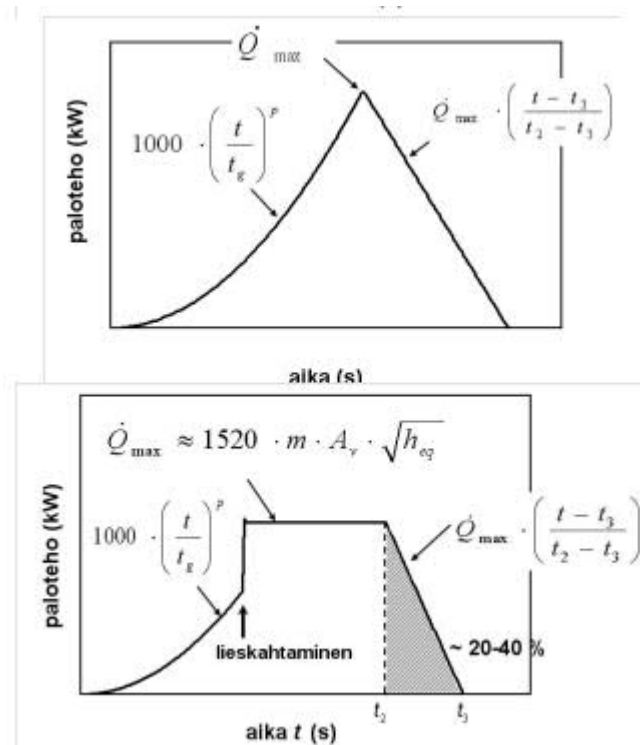
&RAMP muotoinen määrittely tehdään FDS -ohjelmassa määrittelemällä aika-  
askeleet minkä mukaan palotehon suhteellinen kehittyminen tapahtuu.

```
&RAMP ID = 'tsquared', T=0.0, F=0.000/
&RAMP ID = 'tsquared', T=10.0, F=0.004/
&RAMP ID = 'tsquared', T=20.0, F=0.018/
&RAMP ID = 'tsquared', T=30.0, F=0.040/
&RAMP ID = 'tsquared', T=40.0, F=0.074/
&RAMP ID = 'tsquared', T=50.0, F=0.111/
&RAMP ID = 'tsquared', T=60.0, F=0.160/
&RAMP ID = 'tsquared', T=70.0, F=0.218/
&RAMP ID = 'tsquared', T=80.0, F=0.284/
&RAMP ID = 'tsquared', T=90.0, F=0.360/
&RAMP ID = 'tsquared', T=100.0, F=0.444/
&RAMP ID = 'tsquared', T=110.0, F=0.538/
&RAMP ID = 'tsquared', T=120.0, F=0.640/
&RAMP ID = 'tsquared', T=130.0, F=0.751/
&RAMP ID = 'tsquared', T=140.0, F=0.871/
&RAMP ID = 'tsquared', T=150.0, F=1.000/
```

KUVA 31. Palotehon määritteleminen &RAMP toiminnolla.

Tutkittaessa mahdollista palotapahtumaa sekä palon kehittymistä ja leviämistä on tärkeää hyödyntää olemassa olevaa tutkittua tietoa palotapahtumista. VTT:n julkaisu käsittää yleisimpiä rakenteita mitkä voivat altistua palolle sekä niiden herkkyystarkastelua erilaisilla huonekoko-panoilla sekä palavilla materiaaleilla.

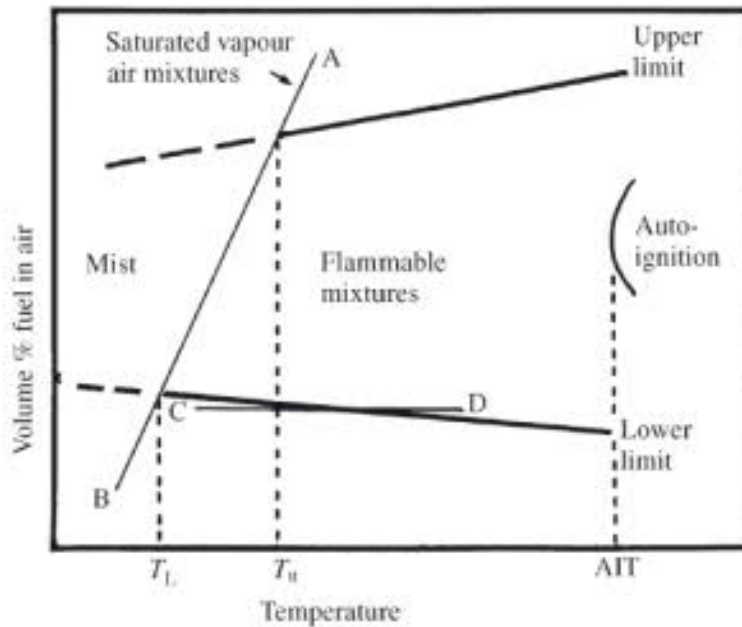
Erilaisille palotapahtumille määritellään esiintymistodennäköisyys sekä tietty kriittisyysaste tarkastelulle. Palotapahtuman määrä rakenteen käyttötarkoitus, rakennuksen geometria sekä mahdolliset palokuormat. Käytettävät palokuormat pitää pystyä perustelemaan ja mahdollisesti hyödyntää viranomaisen tietoa ja kokemusta kriittisistä palokuormista. Nykyään on hyvin suosittua käyttää ns. Monte Carlo analyysiä missä tietokonealgoritmeilla otetaan useiden tuhansien palotapahtumien joukosta keskimääräinen palotapahtuma ja näistä valitaan tietyn fraktiilin mukaan kriittisyysasteen täyttävä palotapahtuma. Suunnittelijan pitää esittää viranomaiselle tarkastelun perusteet sekä mahdolliset herkkyyshanalyysit tuloksineen. Koska palotapahtumia ja skenaarioita voi olla paljon, joudutaan suunnittelemaan usein yksinkertaistamaan ja yksinkertaistaminen onkin parempi tehdä varmalle puolelle suunnittelussa (Ruukki, rakenteiden toiminnallinen palomitoitus).



KUVA 32. Palotehon kuvaaja  $t^2$  muotoisella palon leviämistekijällä (VTT palon voimakkuuden kuvaaminen).

### 5.3.3 Nestepalo

Nestepaloissa palavana aineena on neste, joka kaasuntuu palon lämpötilan vaikutuksesta. Nestepalot ovat yleensä puhtaita ja niihin ei välttämättä liity useampia reaktioita. Nestepaloissa nesteen ja ilman välille on muodostunut valmiiksi kerros missä ilman ja palavan aineen seossuhde on oikea palon syttymiselle. Palon reaktionopeus on nopea sillä palavan seoksen muodostumisen määräävät ainoastaan nesteen liikkeet, eikä erillistä seostumista tai pyrolyysiä tarvita palavan seossuhteen muodostumiseen. Nesteet kaasuntuvat ilman ja lämmön vaikutuksesta ja nesteille on olemassa alempi, sekä ylempi syttymisraja mikä määrittelee seossuhteen, milloin kaasuseos on palavaa. Liian rikkaana tai liian laiha kaasuseos ei syty. Näistä on parempi aina käyttää alempaa syttymisrajaa sillä kaasuseoksen koostumus saattaa muuttua palon vaikutuksesta. Lämpötila vaikuttaa syttymispisteeseen kasvattamalla ylempään ja alemman syttymispisteen väliin jäävää aluetta aina lämpötilaan saakka, milloin kaasuseos saavuttaa rajan, jolloin se saattaa syttyä itsestään. Nestepaloille on ominaista energia mikä vaaditaan palon syttymiseen. Tämä arvo on riippuvainen kaasuseoksen ainepitoisuuksista.



KUVA 33. Kaasun ylemmän ja alemman syttymispisteen riippuvuus lämpötilasta (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

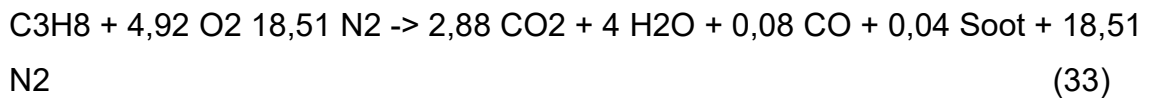
Kun kyseessä on puhdas palaminen millä ei ajatella olevan useampia reaktioyhtälöitä, voidaan liekin lämpötila laskea stoikiometrisen reaktioyhtälön kautta. Tällöin määritellään palava materiaali ja kirjoitetaan sen reaktioyhtälö esiin. Palossa palava aine yhtyy aina happeen ja palotuotteena syntyy hiilidioksidia ja vettä. Koska ilma sisältää pääsinn typpiä, pitää myös typpi laskea reaktioyhtälöön mukaan. Tällöin esimerkiksi propanin stoikiometrinen kaava ilman typpiä saadaan muotoon:



Kun tähän kaavaan lisätään typen määrä mitä on n. 79% ilmasta kaava muuttuu muotoon:



Tarkasteltaessa palamista kokonaisuutena palamisessa syntyy myös aina hieman hiilimonoksidia ja epäpuhtauksia. Nämä pitää arvioida palosimuloinnin alkupuolella ja laskea mukaan stoikiometriseen tasapainotukseen tällöin äskeinen reaktioyhtälö saa lopullisen muodon:



Tästä reaktioyhtälöstä haetaan taulukoista reaktioyhtälöiden muodostumisen tarvittava energia ja lasketaan ne yhteen. Hess laki määrittää, että reaktion kokonaisenergiämäärä on lopputuotteiden energiämäärän summan erotus reagoivien tuotteiden energiasta. Reaktion kokonaisenergiämäärä jaetaan tuotteiden lopputuotteiden lämpökapasiteetilla ja näin saadaan lämpötila mitä reaktioyhtälöstä muodostuu.

Fuel	$\Delta H_c$ (kJ/mol)
Carbon monoxide (CO)	283
Methane (CH <sub>4</sub> )	800
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	1423
Ethene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	1411
Ethyne (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	1253
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2044
<i>n</i> -Butane (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	2650
<i>n</i> -Pentane (n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	3259
<i>n</i> -Hexane	3861
<i>c</i> -Hexane (c-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> )	3680
<i>n</i> -Octane (n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	5104
Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	3120
Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	635
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	1232
Acetone (CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> )	1786
D-glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )	2772
Cellulose <sup>c</sup>	—

KUVA 34. Polttoaineiden lämpökapasiteetteja (SFPE Handbook).

Luotaessa palosimulaatiota FDS osaa itse määrittellä tarvittavat reaktioyhtälöt ja sisältää joukon polttoaineita, joiden ominaisuudet ovat sisäänkirjoitettuja ohjelmaan. Jos kuitenkin käytetään polttoainetta mitä ei löydy FDS:n sisäänkirjoitetuna voidaan polttoaineen kemiallinen kaava kirjoittaa FDS:n ja ohjelma osaa itse määrittellä reaktion. Reaktion lämmöntuottoa varten määrittellään aineen lämpöarvo sekä mahdollisesti epäpuhtauksien suhteellinen osuus.

```
&SPEC ID = 'POLYURETHANE', FORMULA = 'C25H42O6N2' /      (34)
&REAC FUEL = 'POLYURETHANE'
HEAT_OF_COMBUSTION = 40000 /
```

### 5.3.4 Kiinteiden polttoaineiden palaminen

Kiinteäksi polttoaineeksi määritellään yleensä termoplastiset muovit tai selluloosapohjaiset tuotteet. Selluloosapohjaisten tuotteiden pyrolyysi eroaa huomattavasti termoplastien palamisesti. Pyrolyysin aloittaa ulkoa tuleva lämpövuoto mikä lämmittää aineen pinnan ja saan aikaan negatiivisen paineen aineen pinnalle mikä kuljettaa palavia pyrolyysituotteita aineen sisältä aineen pintaan. Kuljettumisen suuruuteen vaikuttaa aineen huokoisuus, puuaineen syyn suunta ja tiiviyys. Jotta kiinteä aines voisi syttyä, pitää polttoainetta kuljettua vähintään  $2\text{g/m}^2\text{s}$  suuruudella.

Aluksi lämpövuoto pintaan on korkea ja pyrolyysituotteet sekoittuvat aineen pinnassa ilman kanssa. Jos sekoitus on syttymisrajan sisällä, saattaa pinta syttyä joko ulkoisen lähteen vaikutuksesta tai itsesyttymisen vaikutuksesta. Tässä pintalämpötila saavuttaa syttymislämpötilan. Lämpövuonon kasvaessa syttymiseen kuluva aika lyhenee. Pyrolyysia tapahtuu jo useissa lämpötiloissa, mutta lämpövuonon pienentyessä, syttymisaika lähenee ääretöntä. Korkeammassa lämpötiloissa pyrolyysissä vapautuva aine pienenee kaasuuntuvaan muotoon ja pyrolyysi kiihtyy.

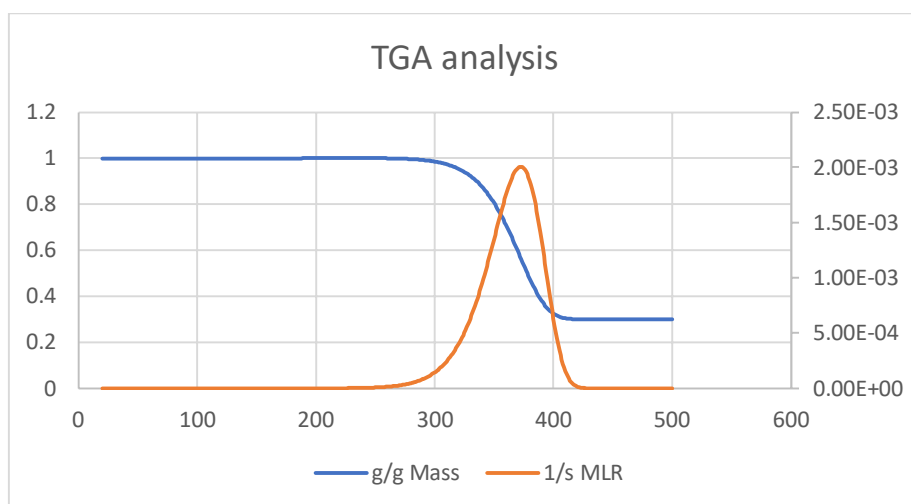
Varsinkin selluloosapohjaisissa materiaaleissa palaminen luo palavan materiaalin pintaan hiiltyvän kerroksen mikä suojaa alempana olevaa kerrosta ulkopuolelta tulevalta lämpövuolta ja pienentää hetkellisesti pyrolyysin suuruutta. Polttokokeissa nähdään tässä vaiheessa materiaalin virtauksessa pudotus. Palon edessä lämpötila kasvaa myös materiaalin sisällä ja pyrolyysi etenee. Jos lämpötila tippuu aineen sisällä liikaa, pyrolyysi pysähtyy ja aineen palaminen loppuu. Tämä voidaan nähdä selluloosapohjaisilla tuotteilla siinä, että materiaalin pinta on hiiltynyt, mutta palaminen on loppunut ja materiaalia on vaikea saada palamaan uudestaan. Jos palavan materiaalin toisella puolella on vapaata ilmatilaa, saattaa konvektio kylmästä lämpimään myös laskea palon lämpötilaa.

Termoplastisten aineiden palamisen kuvaaminen riippuu palavasta aineesta. Yksinkertaisimmillaan se vastaa nestepalaa, mutta tietyt termoplastiset materiaalit kuplivat, sulavat ja vaahtoavat mikä vaikeuttaa niiden palon mallintamista.

### 5.3.5 Kiinteiden polttoaineiden palon mallintaminen

Palavien kiinteiden aineiden pyrolyysiä voi mallintaa kahdella tavalla. Yksinkertaisessa mallissa on termisesti hoikka yksiulotteinen materiaali. Materiaali syttyy palamaan, kun lämpötila ylittää syttymislämpötilan ja materiaali tuottaa lämpöä materiaalin ominaisuuksien mukaisesti. Toinen vaihtoehto on monimutkaisempi pyrolyysimalli, mihin yleensä saadaan tietoa polttokokeista, missä poltetaan oikeita materiaaleja ja mitataan palon voimakkuus, reaktiotuotteet ja massahäviön suhde aikaan. Mittausvälineitä ovat TGA mistä saadaan palavan materiaalin massahäviö, DSC mikä määrittelee palavan materiaalin lämpöarvon sekä MCC mikä kertoo materiaalista syntyvän lämpötehon. Polttokokeista löytyy myös kattavia aineistoja mistä vastaavia arvoja löytyy suoraan materiaalikohtaisesti.

Kiinteiden aineiden palaminen tuottaa yleensä hajaantuneen liekin rakenteen. Hajaantuneesta liekistä on vaikeampi määrittellä osia kuin nestepaloista syntyvistä suorista liekkipatsaista. Hajaantuneen liekin lämpötila on myös yleensä keltainen mikä johtuu eri kaasukerrostien muodostumisesta liekissä. Nestepaloissa palo tapahtuu yleensä hyvin pinnassa, kun hajanaisessa liekissä tapahtuu ensin pyrolyysituotteiden sekoittuminen ilmaan minkä jälkeen ilma vasta syttyy reaktiivöhykkeellä. Kiinteiden aineiden palaessa aineen pintalämpötila on usein korkea mikä johtaa suuriin säteilyhäviöihin.



KUVA 34. TGA analyysi, missä nähdään massahäviö sekä sen suuruus lämpötilan funktiona.



FDS:ssä käytetään usein TGA mittauksista saatuja arvoja monimutkaisten pyrolyysimallien tekemiseen. Tällöin riittää, että FDS:ään syötetään TGA analyysistä saatu HEATING\_RATE sekä REFERENCE\_TEMPERATURE. Näiden avulla FDS osaa määritellä aineen mahdollisen palomallin.

```

&MATL ID                = 'wood'
  EMISSIVITY             = 1.0
  DENSITY                = 600.
  CONDUCTIVITY           = 0.15
  SPECIFIC_HEAT          = 1.5
  HEAT_OF_REACTION       = 130
  N_REACTIONS            = 1
  REFERENCE_TEMPERATURE = 369.014
  REFERENCE_RATE         = 0.00207
  HEATING_RATE           = 10.
  NU_SPEC                = 0.839
  SPEC_ID                = 'CELLULOSE'
  NU_MATL                = 0.161
  MATL_ID                = 'CHAR'
  /

&MATL ID                = 'CHAR'
  EMISSIVITY             = 1.0
  DENSITY                = 96.
  CONDUCTIVITY           = 0.35
  SPECIFIC_HEAT          = 2.0 /

```

KUVA 35. Puumateriaali määriteltynä TGA -analyysin pohjalta

Ylemmässä kuvassa on määritely palavaksi aineeksi puu. Puulle on haettu selluloosan ominaisuudet SFPE -tietokirjasta, pyrolyysimallin tiedot TGA kokeesta sekä annettu reaktio paljonko palaessa puusta muuttuu palavaksi selluloosaksi ja paljonko muuttuu tuhkaksi mikä ei pala. Reaktioaineena on selluloosa mikä pitää määritellä erikseen reaktio kenttään:

```

&REAC FUEL='CELLULOSE', C=6, H=10, O=5,
SOOT_YIELD=0.10
HEAT_OF_COMBUSTION = 16090 /

```

Tässä o määritely selluloosan kemiallinen kaava stoikiometrasta analyysiä varten, annettu epäpuhtauksien määrä paloreaktiossa sekä selluloosan lämpöarvo. Näillä tiedoilla FDS kykenee mallintamaan monimutkaisen pyrolyysireaktion mikä tapahtuu aineen palaessa.

Kun mallinnetaan puupohjaisia materiaaleja pitää muistaa, että kuivakin puu sisältää aina kosteutta. Veden lisääminen malliin kasvattaa kuitenkin mallin laskennan kestoa sekä laskee palon lämpötilaa. On siis tarkkaan harkittava, otetaanko puun sisältämä vesi huomioon vai ajatellaanko simulaatio varmalla puolella olevana ratkaisuna missä puu ajatellaan rutikuivaksi. Jos simuloidaan savun liikkumista tilassa sekä evakuoinnissa evakuoitavien henkilöiden näkyvyystekijää, kosteus pitää ottaa huomioon sillä se vaikuttaa suuresti savunmuodostukseen. Ensin pitää muodostaa &SPEC ID='WATER VAPOR'. Tämän jälkeen määritellään veden osatekijät missä määritellään missä lämpötilassa vesi höyrystyy. Lopuksi pintatietueeseen määritellään paljonko kyseinen pinta sisältää vettä suhteessa puuhun. Tämän jälkeen ohjelma osaa määritellä paljonko kappaleessa on vettä ja missä lämpötilassa se höyrystyy kappaleesta pois.

```
&MATL ID = 'water'
  DENSITY = 1000.
  CONDUCTIVITY = 0.1
  SPECIFIC_HEAT= 4.184
  N_REACTIONS = 1
  REFERENCE_TEMPERATURE = 100.
  REFERENCE_RATE = 0.005
  HEATING_RATE = 10.
  NU_SPEC = 1.0
  SPEC_ID = 'WATER VAPOR'
  HEAT_OF_REACTION= 2500. /

&SURF ID          = 'LATTIA'
  COLOR           = 'YELLOW'
  STRETCH_FACTOR = 1.
  THICKNESS       = 0.2
  BACKING         = INSULATED
  MATL_ID(1,1)   = 'wood'
  MATL_ID(1,2)   = 'water'
  MATL_MASS_FRACTION(1,:) = 0.94, 0.06
  /
```

KUVA 36. Vesi ja puumateriaali määritelyinä. Puu sisältää 6% vettä.

Poltettaessa kiinteitä aineita pitää miettiä ennen mallin luomista onko mallista tarve polttaa ainetta konkreettisesti pois. Tämä voisi tulla eteen esimerkiksi, jos rakenteessa on puinen katto, joka saattaa palaa pois ja mahdollistaa näin palon lisähapen saamisen. Jos mallista päätetään poistaa polttamalla jotain pitää tälle kappaleelle määritellä BURN\_AWAY -ominaisuus, mikä tarkoittaa, että FDS laskee kappaleen massahäviön ja poistaa siitä osia resoluution kokoisissa paloissa.

Pääasiassa FDS kykenee laskemaan mallista pintatietueen palavan osuuden pois pintatietueeseen syötetyn paksuustekijän mukaisesti.

```
&SURF ID = 'FOAM'
  MATL_ID = 'POLYURETHANE'
  COLOR = 'BLUE'
  HRRPUA = 500
  IGNITION_TEMPERATURE = 300
  BURN_AWAY = .TRUE.
  HEAT_OF_VAPORIZATION = 300.
  THICKNESS = 0.2
  BACKING = EXPOSED
/
```

KUVA 37. Patjaan määritelty BURN\_AWAY todeksi.

Palossa tapahtuu jatkuvasti reaktioita ja saattaa tulla tilanne missä mallissa ei ole enää riittävät ominaisuudet palamiselle, ja palo tukahtuu joko liian suuren kosteuden, liian ison hiilidioksiidipitoisuuden tai vähäisen hapen kautta. Tällöin mallissa pitää ottaa huomioon tämä tukahtuminen hyväksymällä &MISC SUPPRESSION=.TRUE simulaation ominaisuuksiin.

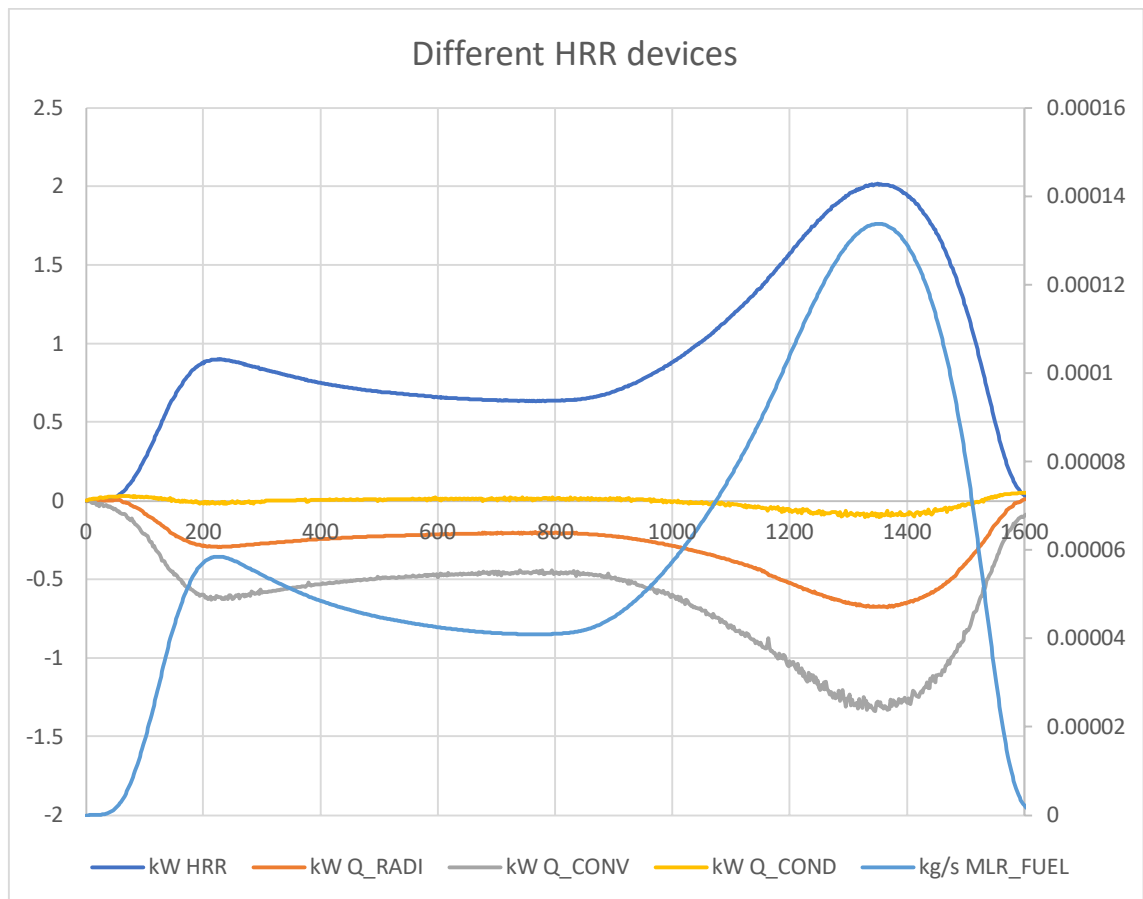
Kiinteitä aineita poltettaessa palo pitää sytyttää jostain. Tämä voidaan määritellä luomalla hyvin pieni syttymispiste, joka sytyttää kappaleen palamaan tai luomalla pinta mille annetaan palon leviämisenopeuden mukainen lämmöntuotto. Tällöin voidaan varmistua, että palosimulaatio vastaa todettuja tapauksia. Syttymispisteen voi luoda luomalla todella kuuman pistemäisen alueen kappaleeseen. Syttymisalue voidaan luoda tekemällä esimerkiksi palavaan kappaleeseen kerros mikä palaa ensimmäisenä pois annetun lämmön luovutusnopeuden kautta.

```
&SURF ID = 'FOAMFIRE'
  MATL_ID = 'POLYURETHANE'
  COLOR = 'RED'
  HRRPUA = 500
  BURN_AWAY = .TRUE.
  HEAT_OF_VAPORIZATION = 300.
  THICKNESS = 0.3
  BACKING = EXPOSED
  RAMP_Q = 'tsquared'
/
```

KUVA 38. Patja sytytetään  $t^2$  palon leviämiskäyrän mukaisesti.

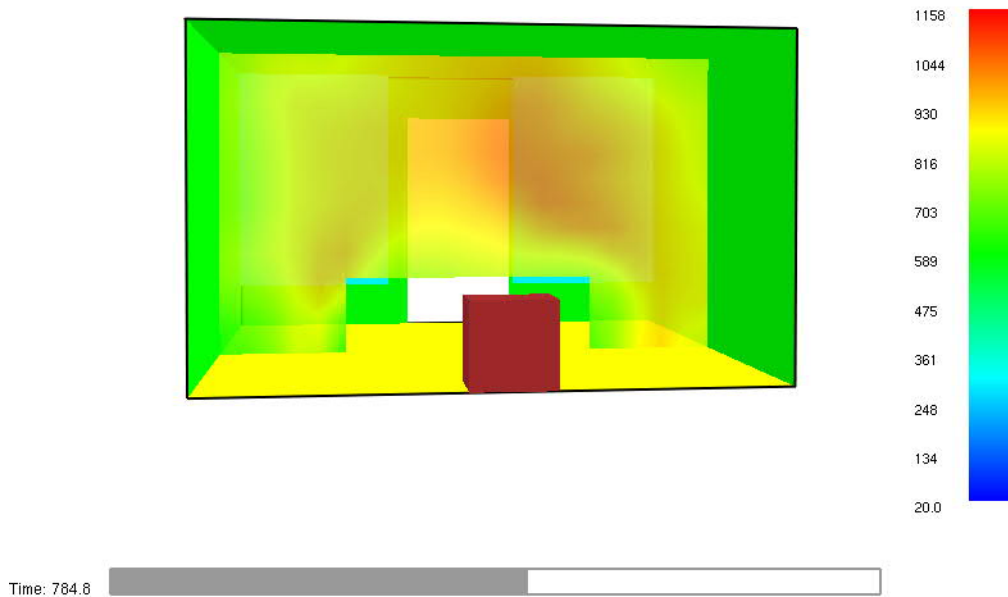
## 5.4 Mittarit palosimuloinnin tulosten tarkasteluun

FDS sisältää useita mittareita millä tarkastella simuloinnin tuloksia. Normaalisti ilman ylimääräisiä määritteitä FDS tekee HRR tulostiedoston millä pystyy tarkastelemaan palon tehoa. Tulostiedosto sisältää tiedot palon kokonaistehosta, siirtymämuotojen tehosta sekä massahäviöstä.



KUVA 39. FDS ohjelman lämpötehon tulostiedosto

Lämpötila on usein tärkeä tarkasteltava indikaattori palotehossa. Sitä tarkastellaan `QUANTITY='TEMPERATURE'` kautta. Tarkasteltava pinta määrittelee käytettävän `device`n tarpeen. Lämpötilasta on hyvä saada tarkka kokonaiskuva, miten se muuttuu tilassa palon seurauksena. Tällöin hyvä tarkastelu olisi käyttää `&SLCF` funktiota mikä luo leikkauksen tilaan käyttäjän määrittämään kohtaan ja näyttää leikkauksen alueella määriteltävän muuttujan arvon. `&SLCF` funktio näyttää arvot nollasyvydessä.



KUVA 40. &SLCF funktio tarkastelee palavan tilan lämpötilaa.

Haluttaessa arvojoukkoja simulaatiosta käytetään &DEVC -funktiota mikä luo käyttäjän määrittelemän tarkastelualueen mistä mitataan käyttäjän määrittämää dataa. &DEVC -funktiolla voidaan tarkastella esimerkiksi yksittäisen pisteen saama lämpövuon arvo säteilystä tai konvektiosta. Se mahdollistaa myös laajemman alueen tutkimisen, mutta tällöin arvoalue pitää rajata yksittäiseen arvoon per aika-askel. Yksittäinen arvo voi olla keskiarvo tila-alueen lämpötilasta tai maksimi- tai minimiarvo. Ohjelmassa on suuri määrä tarkasteltavia muuttujia, ja niistä tärkeimmät palosimulaation tarkastelua varten ovat: lämpötila, ilman happipitoisuus, massavirtaus sekä pisteen saama lämpövuon määrätellyn siirtymismuodon mukaisesti.

```
&DEVC XB=-1.75,1.75,-2.0,2.0,2.0,2.5,
        QUANTITY='TEMPERATURE',
        ID='VMeanT room',
        SPATIAL_STATISTIC='VOLUME MEAN' /
```

KUVA 41. lämpötilan keskiarvo määritellyllä alueella

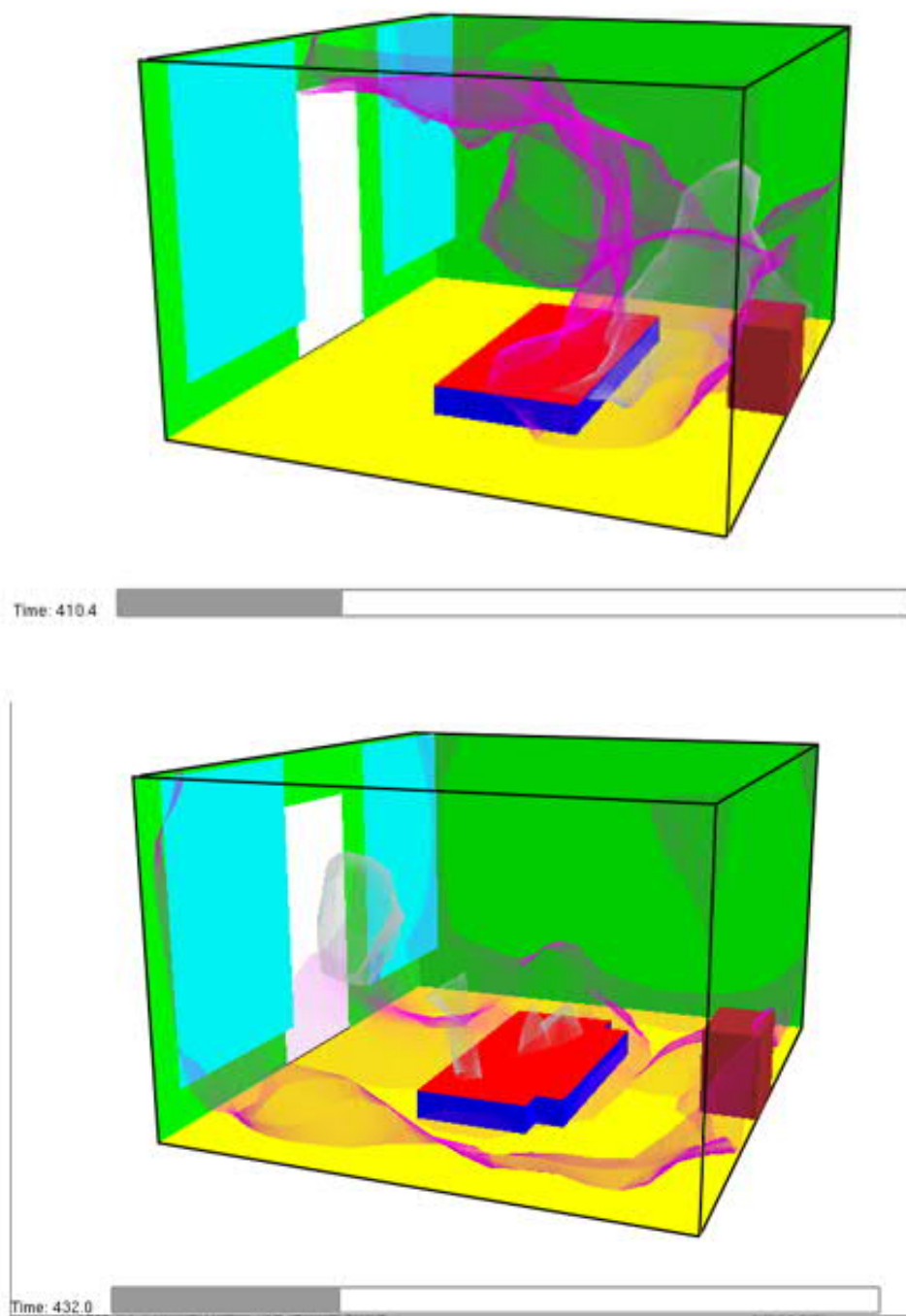
```
&DEVC XYZ=-1.25,0.0,2.5,
      ID='Convective heat flux',
      IOR=-3,
      QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX'/'
```

KUVA 42. Johtumisesta syntyvä lämpövuoto pisteessä

Kun luodaan simulaatiota mistä siirretään tulostietoa staattisen mallin tarkasteluun ja laskentaan, täytyy luoda useita tarkasteltavia pisteitä, että saatu staattinen malli käyttäytyy lämpötilan mukaan johdonmukaisesti. Tällöin on järkevää kopioida suuri määrä &DEVC -funktioita ja määrittellä funktion perään pisteiden koordinaatit. Yksittäisestä pinnasta mitattavasta lämpötilasta kannattaa käyttää adiapaattista -lämpötilaa, sillä tämä on yleisesti hyväksytty ja hyväksi todettu käytäntö. Tällöin saatu lämpötila-arvo on varmalla puolella, kun mahdollisia energiamuodon siirtymän häviöitä ei oteta huomioon (Adiabatic Surface Temperature, Ulf Wickström, Swedish Testing and Research Institute).

Yksi &DEVC -funktion hyödyllisistä piirteistä on tarkastella massavirtauksia simuloitavassa mallissa. Massavirtaukset paljastavat mihin suuntaan ilma liikkuu mallissa ja millä nopeudella. Tästä havainnoinnista on paljon hyötyä, kun tarkastellaan esimerkiksi lieskahdukseen tarvittavaa ilmamäärää. Tarkastelu hyödyttää myös tilanteessa missä haetaan ilmavirran neutraaliakselia mallissa. Tällöin on kuitenkin hyödyllisempää ajaa &SLCF tai &BNDF -funktio jolloin Smokeview mallissa nähdään neutraaliakselin sijainti.

FDS:stä löytyy myös isosurface määrittely missä pystytään antamaan kaksi raja-arvoa tarkasteltavalle muuttujalle. Tästä on hyötyä esimerkiksi tilanteessa missä tarkastellaan lieskahduksen syntyä arvioimalla lieskahdus syntyneeksi, kun simuloitavan tilan lämpötila nousee yli 500C. Isosurface piirtää tilaan kolmiulotteisen verkon missä näkyy kahden raja-arvon sisä- ja ulkopuolella oleva alue.



KUVA 43. Lieskahduksen synty ajan hetkillä  $t=410$  ja  $t=432$  simuloimalla  $500\text{C}$  lämpötila-alue isosurface funktiolla.

## 6 PALOSIMULOINNIN SUORITTAMINEN TODELLISISSA KOHTEISSA

Todellisissa kohteissa simulaation suorittaminen vaatii mahdollisesti useampien palotapausten määrittelyä sekä herkkyystarkastelua laitteiden vikaantumisen ja palokuorman suuruuden johdosta. Tapaukset pitää määritellä aina kohdekohtaisesti ja hyödyntää pelastusviranomaisen opastusta ja ohjeistusta jo simuloinnin lähtötietojen keruu vaiheessa. Simuloinnin dynamiikka muuttuu kohteen koon mukaan ja pitää pystyä arvioimaan mikä on kohteen laajuuden ja tilan mukaan pahin mahdollinen palotapaus ja mitä simuloinnilla pyritään selvittämään. Herkkyystarkastelun osana pitää tarkastella mahdollinen palokuormien muuttuminen. Tästä pitää tehdä selkeä kirjaus, jossa näkyy valvovalle viranomaiselle sekä pääkäyttäjälle, mikä on tilan laskettu suurin palokuorma. Palokuorman muuttaminen vaatii aina uuden simuloinnin sekä raportin tekemisen ja kirjaamisen.

### 6.1 Pienet kohteet

Pienillä kohteilla tarkoitetaan tässä yhteydessä tilaltaan huonemaisia kokonaisuuksia missä tilan korkeus on alle 4m ja tila ei ole rajaavilta pinnoiltaan avoin. Tällainen tila voisi olla esimerkiksi huoneisto tai rakennuksen osa mikä on osastoitu muista osista irralleen, kuten yhdyskäytävä. Pienten kohteiden suurimmaksi rajaavaksi tekijäksi muodostuu lieskahduksen mahdollisuus. Se on ensimmäinen tarkasteltava ominaisuus, sillä jos tilassa pääsee syntymään lieskahdus on parempi määritellä tilan lämpötila olemassa olevien palokäyrien mukaan. EN1991-1-2 esittää standardipalokäyrän tilan lämpötilan laskemiseen sekä parametrisen lämpötilakäyrän. Parametrinen lämpötilakäyrä ottaa huomioon tilan koon sekä aukkotekijät. Sen käyttäminen on rajoitettu alle 4m korkeisiin tiloihin. Standardipalokäyrän voi olettaa olevan aina varmallalla puolella ja siksi se onkin käytetyin palokäyrä normaalissa rakenteiden suunnittelussa. Parametrinen lämpötilakäyrän käyttäminen vaatii palokuorman suuruuden tarkastamista Ympäristöministeriön asetuksesta rakennusten paloturvallisuudesta.



Pienten kohteiden rajaavina tekijöinä lieskahduksen syntymiselle voidaan pitää aukkotekijää sekä palokuormaa. Aukkotekijässä on otettava huomioon, että palotilanteessa ikkunat ja ovet usein rikkoutuvat ja palotilaan pääsee tällöin helpommin happea saataville. Kappaleessa 2.3 käydään läpi yleisimpiä palomalleja. Näistä lieskahduksen jälkeinen tilanne kuuluu yksivyoöhykemalliin ja ennen lieskahdusta oleva tilanne kaksivyoöhykemalliin. Pienissä tiloissa on usein vaikea määrittellä mikä palokuorman arvo tulee lopputilanteessa olemaan. Tällöin on järkevää käyttää valmiita VTT:n laskemia kohteiden palotehon arvoja. Nämä laskelmat pitävät sisällään yleisimmät huonetilojen kalusteratkaisut sekä mahdollisen herkistelyn 80% fraktiilin avulla. Palokuorman arvona voidaan myös käyttää Ympäristöministeriön asetuksen mukaista minimiarvoa.

Määriteltäessä lieskahduksen syntyä voidaan tilannetta tarkastella helposti kahden eri kaavan avulla. Kaava (11) määrittelee tilakohtaisen minimipalokuorman millä lieskahduksen syntyminen on mahdollista. Jos palokuorman arvo ylittää tämän tarkasteluarvon, tarkastetaan tila kaavalla:

$$\dot{Q}_{\max} = 1500 A_w H^{1/2} \quad (35)$$

, missä  $Q_{\max}$  on minimipalokuorma.

Tällä kaavalla voidaan tarkastella mahdollisen aukkotekijän vaikutuksia lieskahdukselle. Jos aukkotekijää pystytään pienentämään käyttämällä tilassa esimerkiksi palo-ovia tai ikkunoita, pystytään lieskahduksen syntyminen näin välttämään. Jos lieskahduksen syntyminen pystytään välttämään, käytetään tilan lämpötilan laskemiseen kaksivyoöhykemenetelmän tilan maksimilämpötilaa kaava (13). Tämän lämpötilan pohjalta lasketaan lämpövuon avulla rakenteen lämpötila palotilanteen lopussa ja määritellään rakenteen suurin lämpötila-arvo rakenteen toiminnan kannalta kriittisimmässä paikassa. Käytettäessä kaksivyoöhykemallia lämpötilan jakautuminen voidaan olettaa tilassa hyvin lämpöä johtavalla rakennusmateriaalilla tasan jakautuneeksi. Tällöin rakenneosaa on helpompi tarkastella, kun tiedetään lujuuden ja kimmokertoimen menetys tietyssä lämpötilassa sekä mahdollinen estetty lämpölaajeneminen.

Jos pienikokoinen kohde on tarkoin määritelty ja tiedetään käyttötarkoitus sekä todellinen palokuorman määrä, voidaan hyödyntää paikallisen palon simulaatiota. Tällöin simulaation laskelmissa täytyy ottaa huomioon katto ja sen vaikutus lämpötilaan sekä virtaukseen. Tilaa rajoittavat seinät imevät lämpöä itseensä ja palo lämmittää koko palotilaa. Tällaisessa tapauksessa palo pitää simuloida ja on oltava erityisen tarkkana, että palo ei pääse leviämään, eli tilassa on vain yksi palava kohde, johon palo rajoittuu. Kylmähuone tai sprinklerein varustettu tila voisi olla tällainen esimerkki. Sprinklerein varustetussa pienessä tilassa on järkevää ottaa huomioon sprinklereiden palon lämpötilaa pienentävä vaikutus, sekä ilman kosteusmäärän nousu mikä vaikuttaa palon kykyyn säteillä lämpötilaa ympäröiville pinnoille.

Pienien kohteiden erityispiirteeksi muodostuu lieskahduksen välttäminen ja lämpötilan suhteellisen tasainen jakautuminen tilaan. Jos lieskahdus tapahtuu pienessä tilassa, palosimulointia ei kannata alkaa suorittamaan, ellei ole mahdollisuuksia joko pienentää palokuormaa tai vaikuttaa aukkotekijöihin. Simuloinnissa täytyy aina suorittaa herkyystarkastelut minkä vuoksi pienen tilan palomitoitusta ei voi suorittaa sillä ajatuksella, että pyrittäisiin vaikuttamaan omilla oletuksilla lieskahduksen syntymiseen. Hyvin harvinaisissa tapauksissa pienten tilojen palo voi muodostua paikalliseksi. Näissä tapauksissa täytyy olla varma, että palon leviäminen on estetty ja kantavien rakenteiden suunnittelussa on otettu huomioon lämpötilan epätasainen jakauma. Epätasainen lämpötilajakauma johtaa yleensä siihen, että kantavat päärakenteet pitää mitoittaa kehittyneillä laskentamenetelmillä. Vain tilanteessa missä tilan lämpötila jää alle 400-asteen voidaan olettaa teräsrakenteiden kestäväen ilman suurempaa lujuuden ja kimmokertoimen pienentymistä.

## 6.2 Suuret kohteet ja avoimet tilat

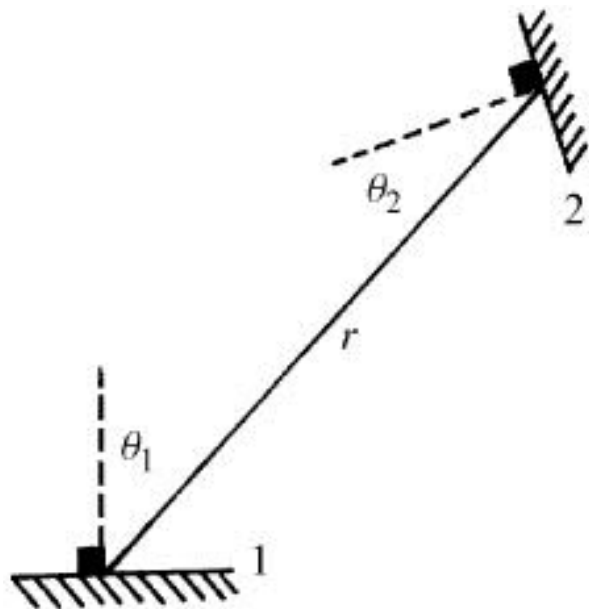
Suurissa ja avoimissa tiloissa lieskahduksen todennäköisyys pienenee, jos savukaasuilla on mahdollisuus poistua tilasta ja tilan lämpötila pysyy alle 500c. Tilanetta edesauttaa rakenteen avoimuus yhteen tai useampaan suuntaan ja mahdolliset savunpoistoluukut. Suurten kohteiden simuloinnissa voidaan simulointi aloittaa usein samalla tavalla kuin pienissä kohteissa. Ensin lasketaan lieskahduksen tarvitsema palokuorma ja herkistellään aukkotekijöitä sen mukaan. Herkistelyssä olisi hyvä ottaa huomioon, että savunpoistoluukutkin voivat vikaantua ja näin tulisi tarkastella myös tilanne missä savunpoisto ei tapahdu automaattisesti.

Suurissa ja avoimissa tiloissa lieskahdus ei tule usein rajoittavaksi tekijäksi ja tällöin edetään paikallisen palon mallin mukaiseen simulaatioon. Isoissa tiloissa on usein useita mahdollisia palon syttymispisteitä ja nämä pitää kartoittaa tarkasti pelastusviranomaisen kanssa. Mahdolliset syttymispisteet määritellään kriittisyydeltään ja todennäköisyydeltään taulukkoon, jonka jälkeen taulukoiduista arvoista ajetaan Monte Carlo -analyysi mikä rajaa käytettyjä tapauksia hallitummaksi joukkokokonaisuudeksi. Tämä joukkokokonaisuus käydään pelastusviranomaisen kanssa läpi ja näistä valitaan simuloitavat palotapaukset. Simuloitavissa palotapauksissa pitää ottaa huomioon palon mahdollisen leviämisen mahdollisuus sekä rajata sitä mahdollisesti käytettävällä automaattisella sammutusjärjestelmällä. Sammutusjärjestelmän käytössä pitää muistaa ottaa huomioon kahden vierekkäisen sprinklerin mahdollinen vikaantuminen (Viranomaishaastattelu, Palotarkastusinsinööri Tapio Sten, 26.10.2020).

Liekin lämpötilan kasvaessa yli 400c suurin osa lämpövuosta, mikä kohdistuu rakenteeseen, syntyy säteilyn seurauksena. Simulaatiossa täytyy ottaa huomioon palon mahdollinen korkeusasema, sillä palavan materiaalin sijaitessa esimerkiksi hyllykön päällä, palon neutraaliakseli siirtyy ylemmäs ja lämpöä alkaa siirtymään rakenteeseen myös konvektion kautta. Palavan materiaalin lämpövuoto, joka siirtyy säteilemällä, noudattaa Stefan-Boltzmanin lakia missä emittoituva lämpövuoto kerrotaan pinnan emissiviteetillä ja otetaan huomioon pinnan etäisyys ja kulma tarkasteltavasta kappaleesta (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

$$\dot{q}'' = \varepsilon \sigma T^4 \quad (36)$$

, missä  $\varepsilon$  on pinnan emissiviteetti.



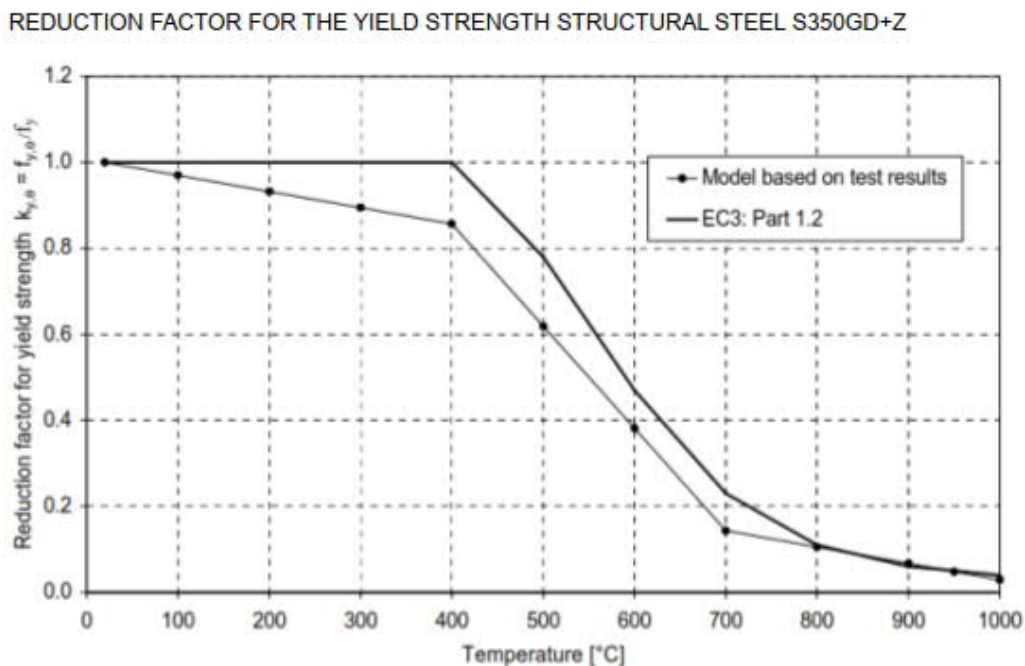
Kuva 44. Näkyvyystekijän määrittäminen (An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition, Dougal Drysdale).

$$\dot{q}'' = E \cdot \int_0^{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} \cdot dA_1 \quad (37)$$

Simulointi voidaan suorittaa käyttäen OZone -ohjelmistoa. Tällöin ohjelma antaa suurimman mahdollisen lämpötilan mikä pintaan kohdistuu. Jos suurin lämpötila on alle 400-astetta voidaan todeta rakenteen kestävän sillä lujuuden menetys alle 400c on hyvin pientä teräsrakenteilla ja korreloi suoraan palotilanteen pienentyn kuormituksen kanssa. Jos maksimilämpötila on yli 400 -astetta on syytä luoda palosta simulaatio ja tarkastella maksimilämpötilan sijaintia ja laajuutta. Jos lämpötilajakauma on pieni ja 400-asteen ylitykset hyvin paikallisia, voidaan olettaa rakenteen toimivan palossa vielä hyvin. Jos rakenteessa on suuria paikallisia lämpötilapiikkejä tai rakenteen lämpötila on kauttaaltaan yli 500 -astetta, on kehittyneiden laskentamenetelmien käyttö rungon stabiliteetille suotavaa.

### 6.3 Rakenteen palosuojamaalauksen optimointi

Teräsrakenteet alkavat menettämään palotilanteessa lujuutta 400 -asteen jälkeen. Samassa pisteessä teräksen kimmomoduuli alkaa pieneneään, jolloin teräs muuttuu joustavammaksi. Ehkäistäkseen teräksen lujuuden pienenemistä ja siitä seuraavaa rakenteen romahtamista teräsrakenteet on ollut tapana ylimitoitaa tai suojata palotilannetta vastaan. Ylimitoittaminen on mahdollista R30 saakka. R60 palonkestoluokassa teräs joudutaan väistämättä palosuojaamaan jollakin tavalla. Palosuojausta varten teräsrakenteesta pitää laskea teräksen kriittinen lämpötila, mikä on lämpötila minkä pisteen jälkeen teräsrakenteen kuormankantokyky ylittyy. Käytettäessä kehittyneitä laskentamenetelmiä rakenteen kuormankantokyky määritellään sen ajan mukaan missä pisteessä teräksen muodonmuutoksen kulmakerroin on lähes pystysuora.

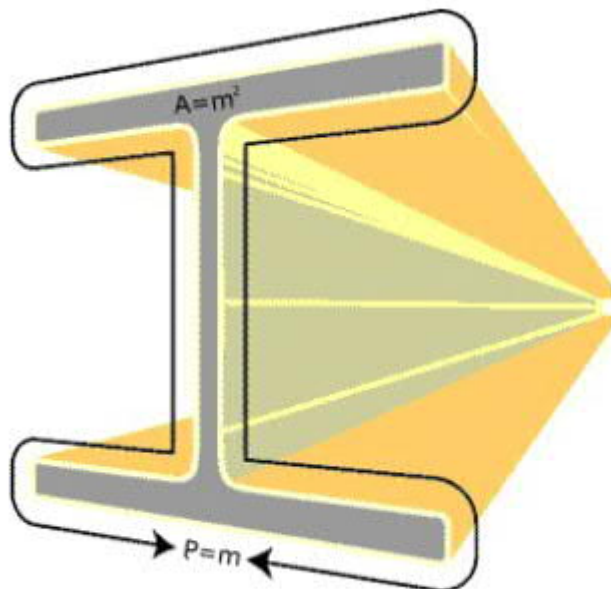


KUVA 45. Teräksen lujuuden heikentyminen lämpötilan nousun seurauksena

Perinteinen tapa suojata teräs on ollut palosuojamaalaus. Palosuojamaalausta varten tarvitaan teräksen kriittinen lämpötila sekä teräksen poikkileikkaustekijä, mikä tarkoittaa poikkileikkauksen pinta-alan suhdetta poikkileikkauksen piiriin. Poikkileikkaustekijää voidaan pienentää, jos kyseessä on avonainen profiili mihin pääsee muodostumaan varjomainen alue mihin palosta syntyvä lämpövuoto ei

pääse suoraan vaikuttamaan säteilyn muodossa. Tästä käytetään nimeä varjostustekijä. Muita menetelmiä ovat teräksen suojaaminen käyttäen apuna palamaton levytystä mikä voi olla mineraalivillaa tai kipsilevyä. Myös muita ruiskutettavia suoja-aineita on kuten vermikuliitti, sekä mineraalikuitu. Nämä menetelmät ovat harvoin käytössä, sillä niillä ei saada yhtä esteettistä pintaa aikaiseksi kuin palosuojamaalauksella.

Kohteen ollessa pääasiassa teräsrakenteinen, teräksen palosuojamaalaus muodostuu suureksi kustannustekijäksi. Teräsmateriaali maksaa n. 1€/kg ja maalaus 40€/m<sup>2</sup> /1mm maalia. Mitä enemmän maalia joudutaan käyttämään, sitä kalliimmaksi teräsrakenteen toteutus muodostuu. Usein pienemmillä palokestävyyssluokilla onkin järkevämpää ylimitoittaa rakenne esimerkiksi kasvattamalla teräksisen putkiprofiilin seinämävahvuutta. Paksut palosuojamaalaukset ovat myös esteettisesti ruman näköisiä sekä alttiita kolhuille ja paikkamaalauksille. Palosuojamaalauksen paksuus määräytyy usein maalityypistä. Nykyiset palosuojamaalit käyvät läpi Eurooppalaisen tuotehyväksynnän ja sen seurauksena niissä käytettävät maalipaksuudet ovat kasvaneet.



KUVA 46. Poikkileikkaustekijä (Ruukki, rakenteiden toiminnallinen palomitoitus, 2008)

Perinteinen tapa laskea teräsrakenteen palosuojamaalauksen vahvuus on ollut määritellä rakenteen kriittinen lämpötila, laskea poikkileikkaustekijä profiilille ja määritellä tämän mukaan käytettävä maali sekä paksuus. Tässä tavassa laskeaan ensin millä poikkileikkauksella rakenne kestää palossa, jonka jälkeen tätä poikkileikkausta käytetään poikkileikkaustekijän laskentaan ja tarkastetaan, että käytettävän maalityypin paksuus ei kasva kovin suureksi. Yleensä noin 1mm vahva palosuojamaalikerros alkaa olemaan luokitukseltaan paksu. On olemassa kuitenkin toinen tapa toteuttaa palosuojamaalauksen toteutus mikä on osoittautunut kustannustehokkaammaksi, mutta vaatii enemmän työkaluja ja paneutumista aiheeseen. Kun tiedetään käytettävä maalityyppi, sen hinta ja teräsrakenteen kilohinta, voidaan rakenne optimoida kustannuksien mukaan. Tämä vaatii kuitenkin useamman iterointikierron sekä tehtävään soveltuvan ohjelmiston. Tällä saavutetaan kuitenkin n. 23% säästö kustannuksissa (Optimization of tubular trusses using intumescent coating in fire, Rakenteiden Mekaniikka lehti, 2016).

Ekologisuus on nykyään arvostettu ominaisuus myös suunnittelutyössä ja tällöin voidaan ajatella, että teräsrakenteiden turhaa palosuojamaalausta tulisi välttää sillä sitä voidaan pitää resurssien haaskauksena. Säästetty palosuojamaalaus on myös kustannussäästö. Tarkemmilla analyyseillä pystytään vähentämään palosuojamaalauksen tarvetta ja jopa poistamaan se kokonaan. Toiminnallisella palosimuloinnilla voidaan osoittaa palosuojamaalaus tarpeettomaksi isoissa hallimaisissa tiloissa missä on pienet palokuormat. Toiminnallinen palomitoitus pitää kuitenkin tehdä valvovan viranomaisen kanssa yhteistyössä, eikä sen pääasiallinen tarkoitus ole tuoda vain kustannussäästöjä vaan tarkentaa suunnittelutyötä sekä tuoda tarkkuutta rakenneanalyyseihin. Toiminnallisen palomitoituksen käyttö pitää myös harkita tarkoin tapauskohtaisesti laskemalla millaiset säästöt simuloinnilla voitaisiin saavuttaa ja onko simuloitava rakenne sellainen, että siinä kannattaa alkaa simuloitua tekemään.

## 7 YHTEENVETO

Työssä saatiin hyvin tietoa (siitä), mitä lainalaisuuksia ja vaatimuksia toiminnallisen palomitoituksen suorittamiselle on olemassa. Tulosten perusteella laaditaan ohjeistus A-Insinöörit Oy:lle tilanteista, missä toiminnallista palomitoitusta kannattaa hyödyntää sekä (ja) millä tavoin. Työssä nousi esille toiminnallista palomitoitusta tekevän henkilön tekniset sekä ammatilliset valmiudet. Tehdäkseen toiminnallista palomitoitusta, tekijän täytyy olla suorittanut riittävän määrän kursseja liittyen palon dynamiikkaan sekä rakenteen toimintaan palossa ja osata käyttää sekä ymmärtää käyttämäänsä ohjelmistoa. Työssä nousi esille myös valvojan viranomaisen esittämät vaatimukset simuloinnille sekä riittävälle herkkystarkastelulle liittyen palon sijaintiin, voimakkuuteen sekä leviämiseen.

Toiminnallista palomitoitusta voidaan hyödyntää hyvin laajasti kohdekohtaisesti erikokoisiin ja palokuormalla varustettuihin tiloihin. Tarkastelu voidaan suorittaa yksinkertaisesti hyödyntämällä yksi- ja kaksivivöhykemalleja tai luoda rakenteesta kehittyneempi virtausdynamiikkaan perustuva simulaatio. Pienissä tiloissa on hyödyllistä tarkastella palokuorman vaikutusta tilan lämpötilaan yksi- tai kaksivivöhykemallilla ja isommissa tiloissa korostuu palon paikallinen vaikutus. Tilasta ja simulaatiosta pitää aina tehdä mahdolliset herkkystarkastelut sekä hyödyntää mahdollisesti Monte Carlo -analyysiä useiden palotilanteiden tapauksessa. Paloviranomaisella on hankkeissa valvova rooli ja heidän kanssaan täytyy keskustella avoimesti, jos (mikäli) päädytään käyttämään toiminnallista palomitoitusta.

Toiminnallisella palomitoituksella on mahdollisesti (mahdollinen) ekologinen vaikutus, jos (mikäli) kohdetta tutkimalla ja simuloimalla pystytään vähentämään mahdollista palosuojauksen sekä rakennusmateriaalin tarvetta ja näin ollen välttämään rakenteen ylimitoittamista. Toiminnallinen palomitoittaminen tuo tieteellisen näkökulman taulukkomitoittamisen rinnalle. Palosimuloinnin tekeminen vaatii kuitenkin aina ammattitaitoa ja viranomaisvalvontaa. Vaikka saatavat hyödyt voivat olla suurissa hankkeissa merkittäviä, lisätutkimuksia toiminnallisen palomitoittamisen hyödyntämiseen rakennesuunnittelussa tarvitaan edelleen.



## LÄHTEET

### STANDARDIT JA ASETUKSET

Standardi EN 1991-1-2 "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions. Actions on structures exposed to fire"

848/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta

Jorma Jantunen, asetusehdotus, Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 2017

927/2020 Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta

NFPA 92, Standard for Smoke Control System, 2012

### KIRJALLISUUS

Dougal Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition

FDS User Guide, V6, 21.3.2021

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

RIL 195-1-2018, Rakenteellinen paloturvallisuus, Yleiset perusteet ja ohjeet

### TUTKIMUKSET

Y. Hasemi and T. Tokunaga, "Some Experimental Aspects of Turbulent Diffusion Flames and Buoyant Plumes from Fire Sources Against a Wall and in a Corner of Walls," Combustion Science and Technology, 40, pp. 1–17 (1984)

Alpert, R. L., "Fire Induced Turbulent Ceiling-Jet," FMRC Technical Report 19722-2," Factory Mutual Research Corporation (1971).

Staffansson, L. Selecting design fires, 2010

Steel Construction Institute, Design Of Columns Subject To Localised Fire, 2018

Ulf Wickström, Adiabatic Surface Temperature for Calculating Heat Transfer To Fire Exposed Structures, , Swedish Testing and Research Institute. 2007

J-F Cadorin , On The Application Field of Ozone V2, 2002

Jouko Hietaniemi, VTT Palon voimakkuuden kuvaaminen toiminnallisessa paloteknisessä suunnittelussa, 2007

#### SEMINAARIT JA JULKAISUT

Safir: A Thermal Program for Modeling Structures under Fire, Engineering Journal 2005

Palosimuloinnin soveltaminen savunpoistoon, Kling, T, Inspectan savunhallintaseminaari 17.6.2010

Ruukki, rakenteiden toiminnallinen palomitoitus, 2008

Optimization of tubular trusses using intumescent coating in fire, Rakenteiden Mekaniikka lehti, 2016

#### VERKKOSIVUT

FISE-paloturvallisuuden-suunnittelutehtävien-vaativuusluokitus, 16.4.2019

[www.tuni.fi](http://www.tuni.fi), opiskelijan opas, 20.3.2021

[oodi.aalto.fi](http://oodi.aalto.fi), opintotarjonta, 20.3.2021

#### OPINNÄYTETYÖT

Tuomas Kankaanpää, Laskentamenetelmät Teräsrakenteiden Toiminnallisessa palomitoituksessa, diplomityö, 2019.

Mikko Nieminen, Rakennusten Automaattisten Sprinklerilaitteistojen Luotettavuus, diplomityö, 2018

## LIITTEET

Liite 1. Standardi- ja parametrinen lämpötila -aikakäyrä

ISO 834

$$T_{ISO}(t) := 20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right)$$

$$t := 1, 2 \dots 1800$$

$$T_{ISO}(1800) = 841.796$$

Parametric fire curve

$$A_V := 2 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 2 \text{ m}^2$$

$$A_f := 3.6 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} = 14.4 \text{ m}^2$$

$$h_{eq} := 2 \text{ m}$$

$$A_T := 3.5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 2 + 3.5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 2 + 2.4 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m} \cdot 2 = 72.8 \text{ m}^2$$

$$O := \frac{A_V \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_T} = 0.039 \text{ m}^{\frac{1}{2}}$$

$$0.02 < O < 0.2$$

$$\rho := 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_p := 880 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda := 0.9 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$b := \sqrt{\rho \cdot C_p \cdot \lambda}$$

$$\Gamma := \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160}\right)^2} \cdot \frac{\text{kg}^2}{(\text{m} \cdot \text{K}^2 \cdot \text{s}^5)} = 0.763$$

$$t_{star}(t) := \frac{t}{3600} \cdot \Gamma$$

$$\Theta(t) := 20 + 1325 \cdot \left(1 - 0.324 \cdot e^{-0.2 \cdot t_{star}(t)} - 0.204 \cdot e^{-1.7 \cdot t_{star}(t)} - 0.472 \cdot e^{-19 \cdot t_{star}(t)}\right)$$

$$t_{lim} := 900 \text{ s}$$

$$q_{t,d} := 600 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \cdot \frac{A_f}{A_T}$$

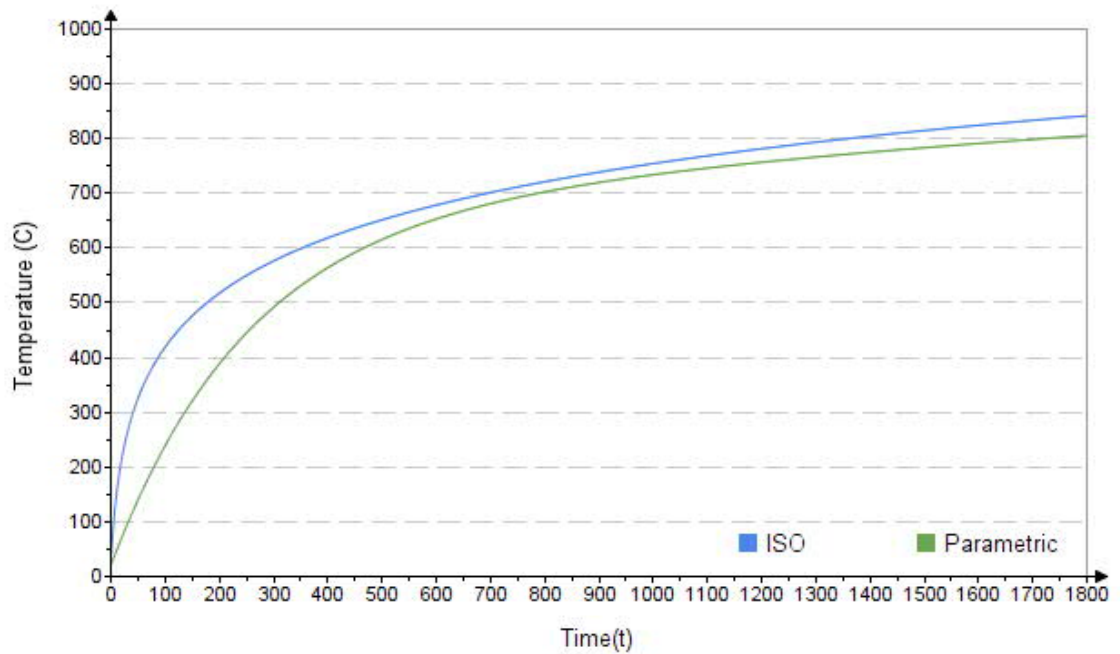
$$t_{max} := \max\left(\frac{0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{O} \cdot \frac{\text{m}^{2.5}}{\text{J} \cdot 10^6} \cdot 3600 \text{ s}, t_{lim}\right) = 2199.385 \text{ s}$$

$$t_{star.max} := \frac{t_{max} \cdot \Gamma}{3600 \text{ s}} = 0.466$$

$$\Theta_{max} := \Theta \left( \frac{t_{max}}{\text{s}} \right) = 831.499$$

$$x := 1$$

$$\Theta_g(t) := \begin{cases} \text{if } t < \frac{t_{max}}{\text{s}} \\ \quad \left\| \left\| 20 + 1325 \cdot \left( 1 - 0.324 \cdot e^{-0.2 \cdot t_{star}(t)} - 0.204 \cdot e^{-1.7 \cdot t_{star}(t)} - 0.472 \cdot e^{-19 \cdot t_{star}(t)} \right) \right. \right. \\ \quad \text{else} \\ \quad \left\| \left\| \Theta_{max} - 250 \cdot (3 - t_{star.max}) \cdot (t_{star}(t) - t_{star.max} \cdot x) \right. \right. \end{cases}$$



## Liite 2. Pakotetun ja luonnollisen konvektion laskenta

$$\rho := 1.204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$t := 1, 2 \dots 600$$

Air density

$$u := 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

*Velocity*

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ambient temperature

$$l := 1 \text{ m}$$

Charasteristic lenght

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Accelleration due gravity

$$\beta := \frac{1}{273} \frac{1}{\text{K}}$$

Coefficient of thermal expansion

$$\mu := 1.67 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$$

Dynamic viscosity of air

$$\nu := \frac{\mu}{\rho} = (1.387 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Kinematic viscosity of air

$$k_{\text{air}} := 0.026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Thermal conductivity of air

$$Pr := 0.7$$

Pradtl number

$$\Delta T(t) := T + 6 \cdot t \cdot 1 \text{ K}$$

Difference in temperatures

$$Re := u \cdot \frac{l}{\nu} = 2.884 \cdot 10^5$$

Reynolds number

### Forced convection:

**Table 2.5** Some recommended convective heat transfer correlations<sup>a,b</sup> (Kanury, 1975; Williams, 1982)

Nature of the flow and configuration of the surface	$\overline{Nu} = \frac{h l}{k_f}$
<b>Forced convection</b>	
Laminar flow, parallel to a flat plate of length $l$ ( $20 < Re < 3 \times 10^5$ )	$0.66 Re^{1/2} Pr^{1/3}$
Turbulent flow, parallel to a flat plate of length $l$ ( $Re > 3 \times 10^5$ )	$0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3}$
Flow round a sphere of diameter $l$ (general equation)	$2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$

$$Nu_{forced} := \begin{cases} \text{if } 20 < Re < 3 \cdot 10^5 \\ \left| \left| \left| 0.66 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right| \right| \right| \\ \text{if } Re > 3 \cdot 10^5 \\ \left| \left| \left| 0.037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right| \right| \right| \end{cases} = 314.699$$

Nusselt number

$$h_{forced} := \frac{k_{air}}{l} \cdot Nu_{forced} = 8.182 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Heat transfer coefficient forced

### Natural convection:

<b>Natural convection</b>	
Laminar: natural convection at a vertical flat plate of length $l$ (Figure 2.15) ( $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$ )	$0.59 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$
Turbulent: natural convection at a vertical flat plate of length $l$ ( $Gr \cdot Pr > 10^9$ )	$0.13 (Gr \cdot Pr)^{1/3}$
Laminar: natural convection at a hot horizontal plate of length $l$ (face up) ( $10^5 < Gr \cdot Pr < 2 \times 10^7$ )	$0.54 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$
Turbulent: natural convection at a hot horizontal plate of length $l$ (face up) ( $2 \times 10^7 < Gr \cdot Pr < 3 \times 10^{10}$ )	$0.14 (Gr \cdot Pr)^{1/3}$
Vertical parallel plates, separation $l$ :	
$Gr < 2 \times 10^3$	1
$2 \times 10^3 < Gr < 2.1 \times 10^5$	$0.2 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$
$2.1 \times 10^5 < Gr < 1.1 \times 10^7$	$0.071 (Gr \cdot Pr)^{1/3}$
Laminar free convection around a heated horizontal cylinder ( $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ )	$0.525 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$

$$Gr(t) := g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \frac{\Delta T(t)}{\nu^2}$$

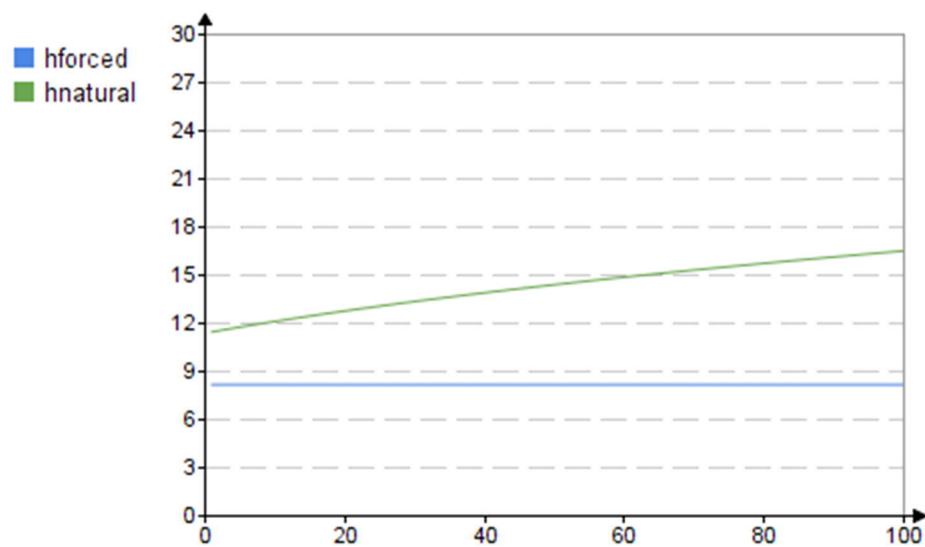
Grashof number

$$Nu_{natural}(t) := \begin{cases} \text{if } 10^4 < Gr(t) \cdot Pr < 10^9 \\ \left\| \left\| \begin{array}{l} 0.59 \cdot (Gr(t) \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \\ \text{if } Gr(t) \cdot Pr > 10^9 \\ \left\| \left\| \begin{array}{l} 0.13 \cdot (Gr(t) \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \end{array} \right\| \right\| \end{array} \right. \end{cases}$$

Nusselt number

$$h_{natural}(t) := \frac{Nu_{natural}(t) \cdot k_{air}}{1}$$

Heat transfer coefficient natural



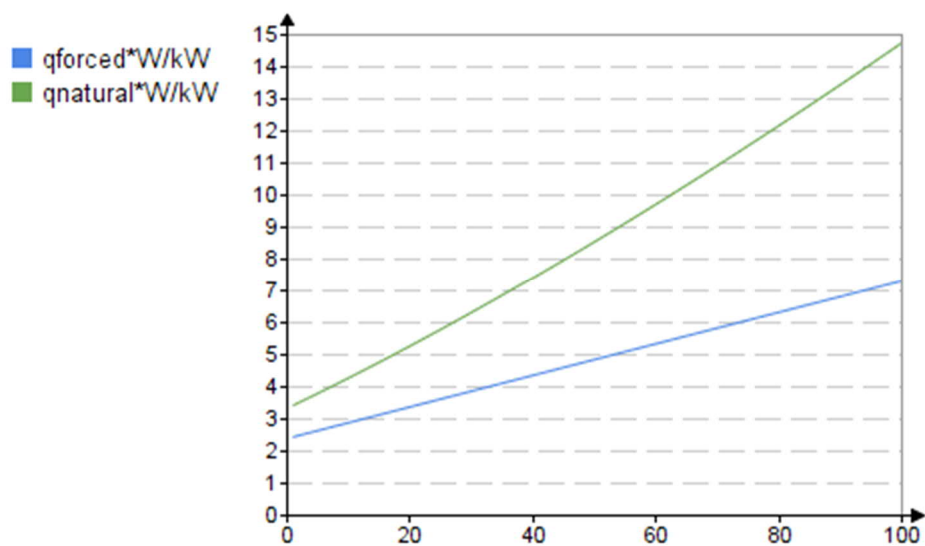
**Calculation of convective heat flux:**

$$q_{forced}(t) := h_{forced} \cdot \Delta T(t)$$

Convective heat flux(forced)

$$q_{natural}(t) := h_{natural}(t) \cdot \Delta T(t)$$

Convective heat flux(natural)



$$q_{natural}(100) = 14.754 \frac{\text{m} \cdot \text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$q_{forced}(100) = 7.308 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$



## Liite 3. Reaktioyhtälöiden laskeminen palotapahtumassa

**Room dimensions:**

$$b := 3.5 \text{ m}$$

Width

$$l := 4 \text{ m}$$

Length

$$h := 2.5 \text{ m}$$

Height

$$A_{\text{floor}} := b \cdot l = 14 \text{ m}^2$$

Floor area

$$V := b \cdot l \cdot h = 35 \text{ m}^3$$

Volume

$$Q_f := 600 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

Fire load density

**Rooms fuel mass according fuel type:**

Wood:

$$H_{c\_wood} := 16.4 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Heat of combustion

$$m_{\text{wood}} := A_{\text{floor}} \cdot \frac{Q_f}{H_{c\_wood}} = 512.195 \text{ kg}$$

Fuel mass

**Polyethylene**

$$H_{c\_poly} := 43.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Heat of combustion

$$m_{\text{poly}} := A_{\text{floor}} \cdot \frac{Q_f}{H_{c\_poly}} = 192.661 \text{ kg}$$

Fuel mass

**Propane**

$$H_{c\_prop} := 46.45 \cdot 10^6 \frac{J}{kg}$$

Heat of combustion

$$m_{prop} := A_{floor} \cdot \frac{Q_f}{H_{c\_prop}} = 180.84 \text{ kg}$$

Fuel mass

**Required air for fuel for burning:**

Fuel = propane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

$$MW := 44.096 \frac{g}{mol}$$

Molecular weight

$$H_c := 2044 \cdot 10^3 \frac{J}{mol}$$

Heat of combustion

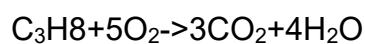
$$n_{C_3H_8} := Q_f \cdot \frac{A_{floor}}{H_c} = (4.11 \cdot 10^3) \text{ mol}$$

Mole amount

$$m_{C_3H_8} := n_{C_3H_8} \cdot MW = (1.812 \cdot 10^5) \text{ g}$$

Mass C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

Required O<sub>2</sub>



-> 1mole propane consumes 5 moles O<sub>2</sub>

$$n_{O_2} := n_{C_3H_8} \cdot 5 = (2.055 \cdot 10^4) \text{ mol}$$

Mole amount

$$MW_{O_2} := 32 \frac{g}{mol}$$

Molecular weight

$$m_{O_2} := MW_{O_2} \cdot n_{O_2} = (6.575 \cdot 10^5) \text{ g}$$

Required O<sub>2</sub>

$$w := 0.23$$

O<sub>2</sub> mass fraction

$$m_{air} := \frac{m_{O_2}}{w} = (2.859 \cdot 10^6) \text{ g}$$

Required air

$$\rho := 1200 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Air density

$$V_{reg} := \frac{m_{air}}{\rho} = (2.382 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

Required air volume

**Possible time for burning:**

$$HRR := 1000 \text{ kW}$$

Heat release rate

$$n_{O_2\_available} := n_{O_2} \cdot \frac{V}{V_{reg}} = 301.875 \text{ mol}$$

Available oxygen

$$n_{C_3H_8\_available} := n_{C_3H_8} \cdot \frac{V}{V_{reg}} = 60.375 \text{ mol}$$

Combustible propaine

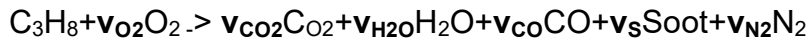
$$E := n_{C_3H_8\_available} \cdot H_c = (1.234 \cdot 10^8) \text{ J}$$

Sum energy

$$t := \frac{E}{HRR} = 123 \text{ s}$$

Time

Reaction formulas



$$x := 3$$

$$y := 8$$

$$z := 0$$

$$v := 0$$

$$X_H := 0$$

Hydrogen volume fraction

$$y_{co} := 0.05$$

CO yield

$$y_s := 0.01$$

Soot yield

$$W_f := x \cdot 12.011 + y \cdot 1.008 + z \cdot 15.99 + v \cdot 14.007 = 44.097$$

Fuel mole weight

$$W_s := 12.011$$

Soot mole weight

$$W_{CO} := 12.011 + 15.99 = 28.001$$

CO mole weight

$$v_{co} := \left( \frac{W_f}{W_{CO}} \right) \cdot y_{co} = 0.079$$

CO coefficient

$$v_s := \left( \frac{W_f}{W_s} \right) \cdot y_s = 0.037$$

Soot coefficient

$$v_{H_2O} := \frac{y}{2} - \frac{X_H}{2} \cdot v_s = 4$$

H<sub>2</sub>O coefficient

$$v_{CO_2} := x - v_{co} - (1 - X_H) \cdot v_s = 2.885$$

CO2 coefficient

$$v_{O_2} := v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2} = 4.924$$

O2 coefficient

$$v_{N_2} := \frac{v}{2} = 0$$

N2 coefficient

Heats of formation

$$\Delta H_{f,CO_2} := -393.51 \cdot 10^3 \frac{J}{mol}$$

CO<sub>2</sub>

$$\Delta H_{f,H_2O} := -241.83 \cdot 10^3 \frac{J}{mol}$$

H<sub>2</sub>O

$$\Delta H_{f,CO} := -110.55 \cdot 10^3 \frac{J}{mol}$$

CO

$$\Delta H_{f,SOOT} := 0 \frac{J}{mol}$$

SOOT

$$\Delta H_{f,O_2} := 0 \frac{J}{mol}$$

O<sub>2</sub>

$$\Delta H_{f,C_3H_8} := -103.6 \cdot 10^3 \frac{J}{mol}$$

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

**$\Sigma \Delta H_{f,products}$**

$$\Delta H_{f,PROD} := v_{CO_2} \cdot \Delta H_{f,CO_2} + v_{H_2O} \cdot \Delta H_{f,H_2O} + v_{CO} \cdot \Delta H_{f,CO} + v_s \cdot \Delta H_{f,SOOT} = -2.111 \cdot 10^6 \frac{J}{mol}$$

**$\Sigma \Delta H_{f,reactants}$**

$$\Delta H_{f,REAC} := \Delta H_{f,C_3H_8} + v_{O_2} \cdot \Delta H_{f,O_2} = -1.036 \cdot 10^5 \frac{J}{mol}$$

**Δhreaction**

$$\Delta H_{f,REACTION} := \Delta H_{f,PROD} - \Delta H_{f,REAC} = -2.008 \cdot 10^6 \frac{J}{mol}$$

Adiapatic temperature

$$v_{N2\_adiap} := v_{O2} \cdot \left( \frac{0.79}{0.21} \right) = 18.523$$

Nitrogen coefficient

C3H8 + **4.92** O2 **18.523** N2 -> **2.88** CO2 + **4** H2O + **0.08** CO + **0.04** Soot +  
**18.523** N2

$$T_0 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ambiant temperature

$$\Delta H_c := \Delta H_{f,REACTION}$$

Heat power

$$C_{pCO2} := 54.3 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Thermal capacities:

$$C_{pH2O} := 41.2 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$C_{pCO} := 33.2 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$C_{pN2} := 32.7 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Thermal capacity

$$C_p := v_{CO2} \cdot C_{pCO2} + v_{H2O} \cdot C_{pH2O} + v_{co} \cdot C_{pCO} + v_{N2\_adiap} \cdot C_{pN2} = 929.757 \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot K \cdot mol}$$

Flame temperature

$$T_f := T_0 + \left( \frac{\Delta H_c}{C_p} \right) = -2139 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Liite 4. Nestepalon säteilyn lämpövuoto

$$\Delta H_C := -44.4 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$m_\infty := 0.055 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$k\beta := 2.1 \cdot \frac{1}{\text{m}}$$

$$D := 15 \text{ m}$$

$$A_f := \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 176.715 \text{ m}^2$$

Area of the flame

$$m_f := m_\infty \cdot (1 - e^{-k\beta \cdot D}) = 0.055 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Mass flux

$$\chi_{comb} := 1$$

Combustion efficiency

$$Q := \chi_{comb} \cdot (-\Delta H_C) \cdot m_f \cdot A_f = 431.537 \text{ MW}$$

Heat release rate

$$\chi_r := 0.1$$

Radiative factor

$$Q_r := \chi_r \cdot Q = 43.154 \text{ MW}$$

Radiative heat release rate

$$Q_c := (1 - \chi_r) \cdot Q = 388.383 \text{ MW}$$

Convective heat release rate

$$l_f := 0.23 \cdot \left( \frac{Q_c}{\text{kW}} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \text{m} - 1.02 \cdot D = 24.276 \text{ m}$$

Flame height

$$E(d) := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Q_r \cdot \cos(\alpha(d))}{l_f \cdot D} \right)$$

Emissive power of one face

$$L_2 := \frac{D}{2}$$

$$L_1 := h_{\text{window}}$$

$$\phi_1(d) := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{\frac{L_1}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_1}{d}\right)^2}} \cdot \text{atan} \left( \frac{\frac{L_2}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_1}{d}\right)^2}} \right) + \frac{\frac{L_2}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_2}{d}\right)^2}} \cdot \text{atan} \left( \frac{\frac{L_1}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_2}{d}\right)^2}} \right) \right)$$

$$L_4 := \frac{D}{2}$$

$$L_3 := l_f - h_{\text{window}}$$

$$\phi_2(d) := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{\frac{L_3}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_3}{d}\right)^2}} \cdot \text{atan} \left( \frac{\frac{L_4}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_3}{d}\right)^2}} \right) + \frac{\frac{L_4}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_4}{d}\right)^2}} \cdot \text{atan} \left( \frac{\frac{L_3}{d}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_4}{d}\right)^2}} \right) \right)$$

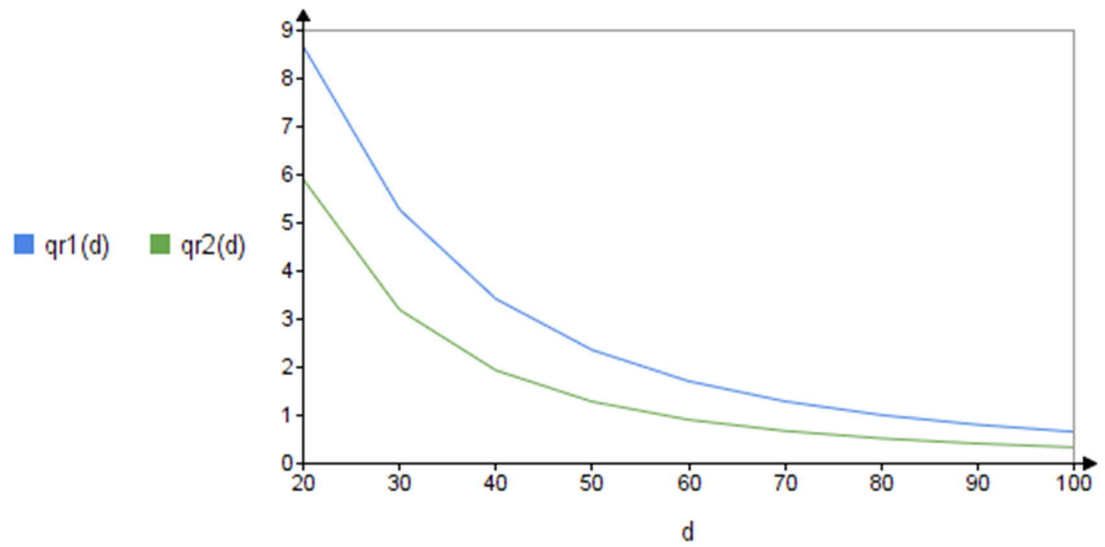
$$\phi(d) := 2 \cdot \phi_1(d) + 2 \cdot \phi_2(d)$$

View factor



$$q_{r2}(d) := E(d) \cdot \phi(d)$$

Incident radiative heat flux



$$q_{r2}(x_2) = 1.502 \frac{kW}{m^2}$$

## Liite 5. Palopatsaan mallit sekä massavirtaus

**Fire plume model**

Initial data:

$$\text{Heat release rate} \quad Q := 330 \text{ kW} \quad Q_{conv} := 0.7 \cdot Q = 231 \text{ kW}$$

$$\text{Area of flame} \quad A_f := 0.6 \text{ m} \cdot 0.6 \text{ m} = 0.36 \text{ m}^2$$

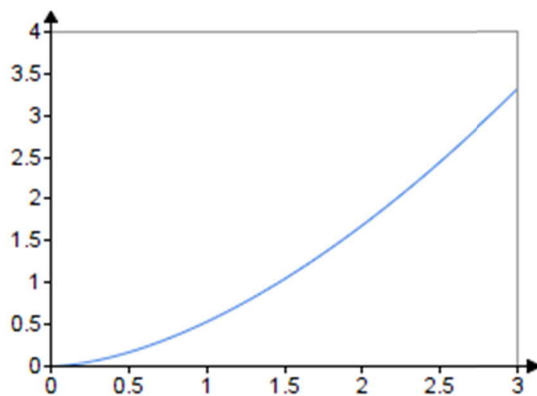
$$\text{Air temperature} \quad T_\infty := 273 \text{ K} + 5 \text{ K}$$

$$\text{Air density} \quad \rho_\infty := 1.269 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Specific heat of air} \quad C_p := 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

**Ideal plume model**

$$m_{ideal}(z) := 0.2 \cdot \left( \frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{C_p \cdot T_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Q^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}}$$

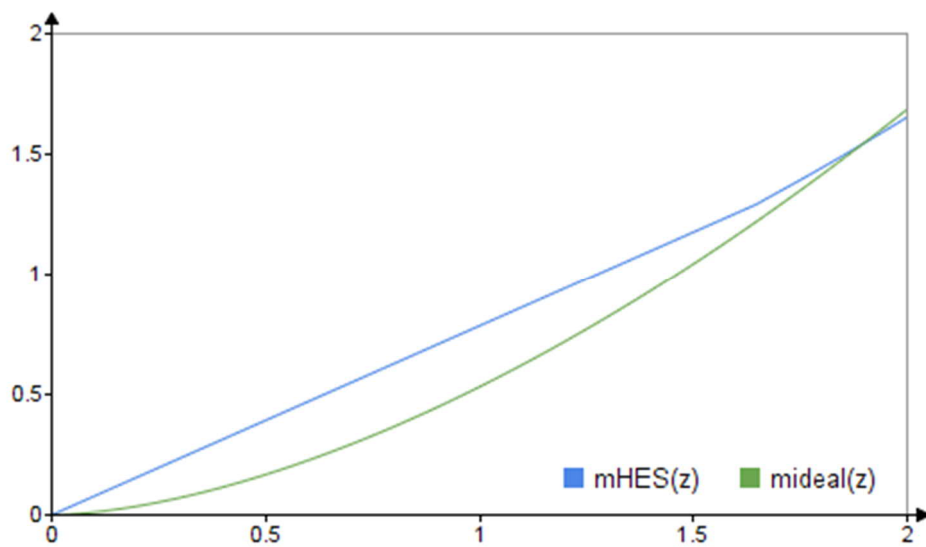
**Heskestad**

$$\text{Flame radius} \quad D := 2 \cdot \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} = 0.677 \text{ m}$$

$$\text{Mean flame height} \quad L_f := 0.23 \cdot \left( \frac{Q}{\text{kW}} \right)^{\frac{2}{5}} - 1.02 \cdot \frac{D}{\text{m}} = 1.649$$

$$\text{Virtual origin of flame} \quad z_0 := 0.083 \cdot \left( \frac{Q}{\text{kW}} \right)^{\frac{2}{5}} - 1.02 \cdot \frac{D}{\text{m}} = 0.154$$

$$m_{HES}(z) := \begin{cases} \text{if } z > L_f \\ \left\| \left\| 0.071 \cdot \left( \frac{Q_{conv}}{kW} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (z - z_0)^{\frac{5}{3}} + 1.92 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{Q_{conv}}{kW} \right) \right\| \right\| \\ \text{if } z < L_f \\ \left\| \left\| 0.0056 \cdot \left( \frac{Q_{conv}}{kW} \right) \cdot \frac{z}{L_f} \right\| \right\| \end{cases}$$



$$A_V := 1.5 \text{ m}^2$$

$$C_d := 0.6$$

$$T_0 := 273 \text{ K} + 5 \text{ K}$$

$$z := 1.4 \text{ m}, 1.41 \text{ m}..2.3 \text{ m}$$

$$T_U := 273 \text{ K} + 128.5 \text{ K}$$

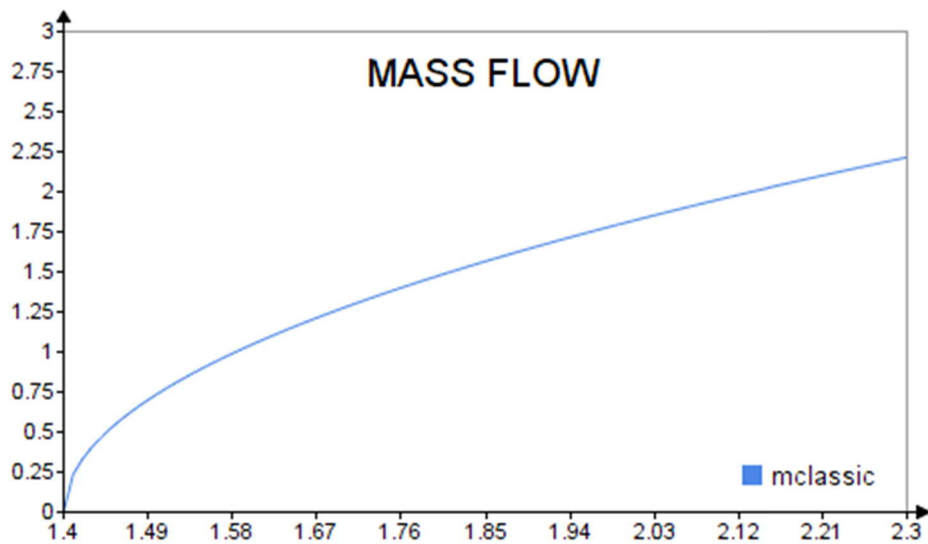
$$H_u := 2.3 \text{ m}$$

$$z_L := 1.4 \text{ m}$$

$$\rho_0 := 1.269 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m := A_V \cdot \left( \frac{\rho_0 \cdot T_0}{T_U} \right) \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_U} \right) \cdot g \cdot (H_u - z_L)}{\frac{T_0}{T_U}}} = 2.214 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{\text{classic}}(z) := A_V \cdot \left( \frac{\rho_0 \cdot T_0}{T_U} \right) \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_U} \right) \cdot g \cdot (z - z_L)}{\frac{T_0}{T_U}}}$$



Liite 6. Lieskahdukseen tarvittava vähimmäis palokuorma

Minimum HRR for flashover

$$k_{concrete} := 0.9 \frac{W}{m \cdot K}$$

Thermal conductivity

$$\delta_{wall} := 200 \text{ mm}$$

Wall thickness

$$h_{ef} := \frac{k_{concrete}}{\delta_{wall}} = 0.005 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$$

Effective heat transfer coefficient

$$A_D := 2 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 2 \text{ m}^2$$

Vent area

$$H_D := 2 \text{ m}$$

Height of vent

$$A_T := 3.5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 2 + 3.5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 2 + 2.4 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m} \cdot 2 = 72.8 \text{ m}^2$$

Total wall area

$$610 \cdot \left( \frac{h_{ef}}{\frac{kW}{m^2 \cdot K}} \cdot \frac{A_T}{m^2} \cdot \frac{A_D}{m^2} \cdot \sqrt{\frac{H_D}{m}} \right)^{0.5} \cdot kW = 587.2 \text{ kW}$$

Minimum HRR for flashover

$$1500 \cdot \left( \frac{A_D}{m^2} \right) \cdot \left( \frac{H_D}{m} \right)^{0.5} \cdot kW = 4242.6 \text{ kW}$$

Ventilation factor for flashover