



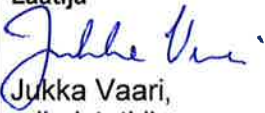

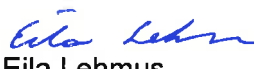
TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-R-03005-15

Pelastusopiston paloteatterin palonsimuloinnit

Kirjoittaja: Jukka Vaari

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi	
Pelastusopiston paloteatterin palonsimuloinnit	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite
Sisäministeriö, Pelastusosasto Jarkko Häyrinen PL 26 00023 VALTIONEUVOSTO	Sopimus SM-644-2014, SMDno-2014-1515
Projektin nimi	Projektin numero/lyhytnimi
Pelastusopiston paloteatterin toimivuuden arviointi	102419 / Paloteatteri_optio
Raportin laatija(t)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä
Jukka Vaari	30/-
Avainsanat	Raportin numero
palokokeet, huonepalo, sprinkleri, palonsimulointi	VTT-R-03005-15
Tiivistelmä	
<p>Tässä tutkimusraportissa kuvataan Pelastusopiston paloteatterin auditointiin liittyvän toimeksiannon toisen vaiheen tulokset. Työssä tutkittiin palonsimuloinnin keinoin paloteatterin fyysisten ominaisuuksien ja mittauspisteiden vaikutusta mittaustuloksiin, arvioitiin, minkä tyyppisiä paloja tiloissa voidaan esittää, jotta mittaustulokset vastaisivat esitettävää skenaariota, sekä tarkasteltiin tilojen soveltuvuutta paloteknisten laitteiden toiminnan esittelyyn.</p> <p>Paloteatterin polttilan paloteknisesti merkittävimmät fyysiset ominaisuudet ovat suhteellisen pieni tilavuus, polttilan seinä- ja kattorakenteiden rajallinen lämmönkesto, savunpoistopuhaltimiin perustuva ilmanvaihto, liikuteltavan katon ja seinien väliset aukot, sekä liikuteltavan katon yläpuolinen tila. Fyysisistä ominaisuuksista johtuu, että paloteatteri soveltuu vain pienikokoisten palojen, kuten paloteknisten laitteiden toiminnan demonstraatioihin tai huonepalon alkuvaiheen kehityksen demonstrointiin.</p> <p>Tässä työssä tehdyt huonepaloa ja paloteknisten laitteiden demonstraatiota koskeneet palonsimuloinnit osoittivat, että vastaavien demonstraatioiden suorittaminen realistisesti on mahdollista paloteatterissa. Tämä kuitenkin edellyttää, että demonstraatioiden instrumentointia sekä suoritustapaa kehitetään jatkossa siten, että demonstraatiot ovat informatiivisempia ja toistettavampia. Raportissa esitetään tähän liittyviä suosituksia.</p> <p>Simulointitulokset voivat myös auttaa paremmin ymmärtämään teatterissa jo aiemmin suoritettuja demonstraatioita ja niissä saatuja mittaustuloksia.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Espoo 24.6.2015	
Laatija	Tarkastaja
 Jukka Vaari, erikoistutkija	 Tuula Hakkarainen, erikoistutkija
	Hyväksyjä
	 Eila Lehmus, tutkimusalueen päällikkö
VTT:n yhteystiedot	
Jukka Vaari, VTT, PL 1000, 02044 VTT, jukka.vaari@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT)	
Sisäministeriö, Pelastusosasto, Jarkko Häyrinen, 1 kpl VTT, Arkisto, 1 kpl	
<p>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</p>	

Alkusanat

Tässä tutkimusraportissa kuvataan Pelastusopiston paloteatterin auditointiin liittyvän toimeksiannon toisen vaiheen tulokset. Työssä tutkittiin palonsimuloinnin keinoin paloteatterin fyysisten ominaisuuksien ja mittauspisteiden vaikutusta mittaustuloksiin, arvioitiin, minkä tyyppisiä paloja tiloissa voidaan esittää, jotta mittaustulokset vastaisivat esitettävää skenaariota, tarkasteltiin tilojen soveltuvuutta paloteknisten laitteiden toiminnan esittelyyn, sekä laadittiin esitys paloteatterin ja mittausjärjestelyiden kehittämistarpeista suhteessa nykyiseen käyttöön.

Kiitän Pelastusopiston paloteatterin auditointihankkeen ohjausryhmän jäseniä ylitarkastaja Jarkko Häyristä sisäministeriön pelastusosastolta, pelastuspäällikkö Seppo Männikköä Pirkanmaan pelastuslaitokselta, tekninen päällikkö Antti Rissasta Pelastusopistolta, riskienhallintapäällikkö Paavo Tiittaa Pohjois-Savon pelastuslaitokselta ja valvontapäällikkö Kati Tillanderia Keski-Uudenmaan pelastuslaitokselta toimivasta yhteistyöstä. Erityiset kiitokset esitän vanhempi opettaja Jani Jämsälle, opettaja Timo Loposelle ja opettaja Ari Mustoselle Pelastusopistolta kärsivällisestä ja yksityiskohtaisesta opastuksesta paloteatterin rakenteeseen ja toimintaan.

Espoo 24.6.2015

Tekijä

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo	3
1. Johdanto.....	4
2. Paloteatterin FDS-malli	4
3. Ilmanvaihdon simulointi.....	7
3.1 Puolitettu polttila	7
3.1.1 Perustapaus.....	7
3.1.2 Muutetut ilmanvaihto-olosuhteet	9
3.2 Täysikokoinen polttila.....	10
4. Huonepalon simulointi.....	10
4.1 Palokuormat	10
4.2 Sprinklerit	12
4.3 Instrumentointi	12
4.4 Tulokset.....	13
4.4.1 Vapaa palo.....	13
4.4.2 Sprinklattu palo	15
4.4.3 Muutetut ilmanvaihto-olosuhteet	18
4.4.4 Henkilöturvallisuus sprinklatussa huonepalossa	20
5. Sprinkleridemon simulointi	21
5.1 Simulointimalli.....	21
5.1.1 Palokuormat.....	21
5.1.2 Sprinklerit.....	22
5.1.3 Paloilmaisimet.....	22
5.1.4 Muut järjestelyt.....	23
5.2 Tulokset.....	23
5.2.1 Perustapaus.....	23
5.2.2 Palokuorman paikan vaikutus	25
5.2.3 Ilmanvaihto-olosuhteiden vaikutus	26
6. Johtopäätökset ja suositukset	27
6.1 Yleistä.....	27
6.2 Esitys paloteatterin ja mittausjärjestelyiden kehittämistarpeista suhteessa nykyiseen käyttöön.....	27
6.2.1 Polttilan ilmanvaihto	27
6.2.2 Huonepalo	28
6.2.3 Sprinkleridemo	30
Lähdeviitteet.....	30

1. Johdanto

Pelastusopisto on asettanut auditointiryhmän arvioimaan Pelastusopiston harjoitusalueella sijaitsevan paloteatterin soveltuvuutta huonepalossa syntyvien olosuhteiden demonstrointiin. Osana tätä auditointityötä sisäministeriö on tilannut VTT:ltä tutkimuksen paloteatterin mittalaitteiden ja tilojen toimivuudesta ja soveltuvuudesta käyttötarkoitukseensa. Selvitystyö on toteutettu kahdessa vaiheessa seuraavasti:

Vaihe 1

1. Paloteatterin mittaustekniikan toiminnan ja luotettavuuden arviointi kokonaisuutena
2. Paloteatterin mittausjärjestelmän soveltuvuuden arviointi ja rajoitteet huonepalossa syntyvien olosuhteiden arviointiin

Vaihe 2

1. Paloteatterin fyysisten ominaisuuksien (tilan muodon, ilmanvaihdon, aukkojen yms.) ja mittauspisteiden vaikutus mittaustuloksiin 2–3 valitun paloskenaariion pohjalta (vapaa ja sprinklattu palo)
2. Arvio, minkä tyyppisiä paloja tiloissa voidaan esittää, jotta mittaustulokset vastaisivat esitettävää skenaariota
3. Tilojen soveltuvuus paloteknisten laitteiden toiminnan esittelyyn ja esitys paloteatterin ja mittausjärjestelyiden kehittämistarpeista suhteessa nykyiseen käyttöön

Tässä tutkimusraportissa esitetään selvitystyön vaiheen 2 tulokset.

2. Paloteatterin FDS-malli

Paloteatterin polttotilan lattiapinta-ala on n. 8 m × 6 m ja korkeus n. 4.8 m. Polttotilassa on sähköisesti laskeutuva välikatto, jonka korkeutta lattiatasosta voidaan säätää välillä 1.8 m – 4.0 m. Yleisimmin käytetyt välikattokorkeudet ovat n. 2.5 m ja 3.5 m. Auditoriosta katsottuna polttotilan oikeanpuoleisen sivuseinän (laitetilan seinä) ja välikaton reunan väliin jää n. 35 cm:n levyinen aukko. Muiden seinien ja välikaton reunan välinen etäisyys vaihtelee välillä 1 cm – 7 cm.

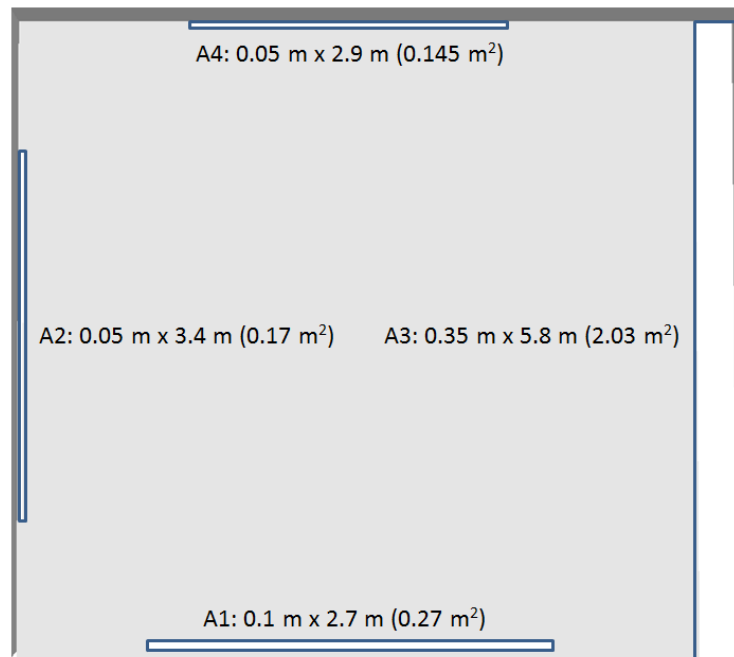
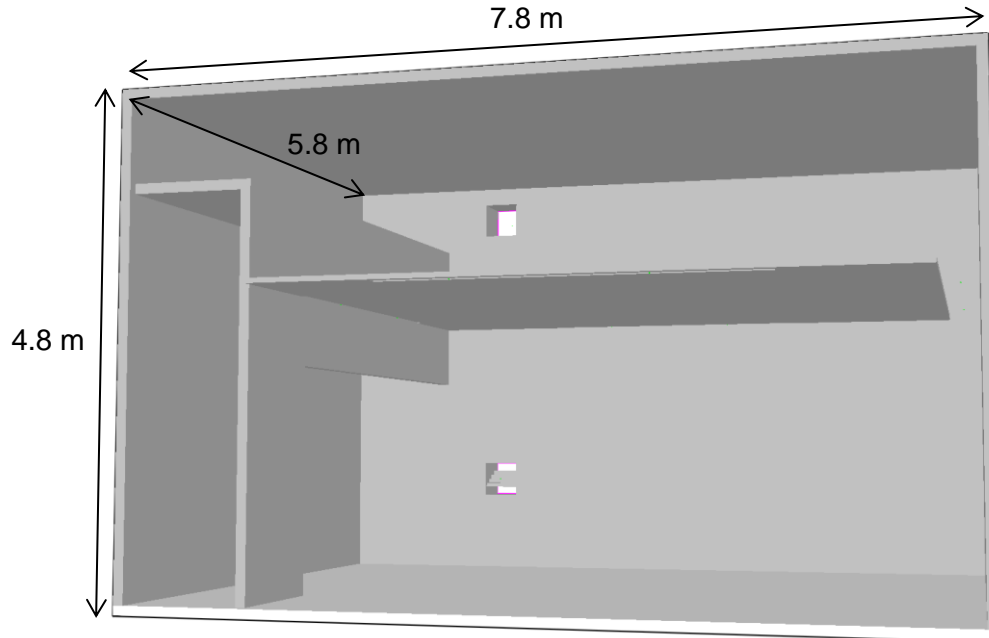
Tässä työssä raportoidut tulokset on laskettu Fire Dynamics Simulator –ohjelmalla (FDS 6.1.2, svn 21029). Paloteatterista muodostettu FDS-malli on esitetty kuvan 1 ylemmässä osassa siten, että auditorion ja polttotilan välinen seinä on jätetty näyttämättä. Liikuteltava katto on kuvan mallissa sijoitettu 3.0 m korkeuteen. Polttotilan takaseinän kaksi aukkoa ovat ilmanvaihtoa varten, ja molempien mitat ovat 0.4 m x 0.4 m. Aukot on puhkaistu 0.5 m paksun seinän läpi. Ylempi aukko kuvaa teatterin pienempää savunpoistopuhallinta. Se on toteutettu dynaamisena painereunaehtona. Alempi aukko kuvaa tuloilmaluukkuja, jossa on liikuteltava suljinpelti. Aukko on toteutettu avoimena reunaehtona, ja suljinpelti on rakennettu aukon sisään siten, että sulkimen ala- ja yläpuolelle jää 10 cm vapaa alue.

Laskennan paikkaerotuskyvyksi valittiin 5 cm, jolloin mitoiltaan 8.0 m x 6.4 m x 5.0 m olevassa mallissa oli n. 2 miljoonaa laskentakoppia. Laskenta rinnakkaistettiin jakamalla malli kahdeksaan hilaan (2 x 2 x 2) ja osoittamalla kullekin hilalle oma prosessinsa (MPI-rinnakkaistus).

Laskentaan valittu 5 cm paikkaerotuskyky vaikutti välikaton ja seinien välisten kapeiden aukkojen mallinnukseen. Ratkaisuksi tuli luoda sellaisia 5 cm tai 10 cm:n levyisiä aukkoja

katon ja seinien väliin, että aukkojen kokonaispinta-ala vastaa todellisuutta. Kuvan 1 alemmassa osassa on esitetty katon aukkojen mallinnus kokonaan avoimessa polttotilassa.

Paloteatterin lattia kuvattiin 0.1 m paksuna betonina, ja muut pinnat 1 mm paksuna teräksenä.



Kuva 1. Paloteatterin FDS-malli. Yllä: yleiskuva, jossa auditorion ja polttotilan välinen seinä on jätetty näyttämättä (mitat ovat polttotilan sisämittoja). Alla: liikuteltavan katon ja seinien väliin jäävien aukkojen mallinnus.

Tässä työssä esiintyvät simulointitapaukset on esitetty taulukossa 1. Tapaukset on valittu siten, että niiden avulla voidaan analysoida ilmanvaihto-olosuhteiden vaikutusta sekä huonepalodemonstraatioon että paloteknisten laitteiden demonstraatioon. Lisäksi tarkastellaan sprinklerin vaikutusta kahteen erilaiseen huonepalon järjestelyyn.

Taulukko 1. Työssä esiintyvät simulointitapaukset.

Tapaus	Lyhyt kuvaus	Selostus
Ilmanvaihto		
IV-1	Puolitettu polttotila	Poistoilma palavasta huoneesta välikaton yläpuoliseen tilaan 0.21 m ² aukon kautta (kuva 2). Paloteatterin huonepalodemoissa käytetty järjestely, jossa välikaton ja laitetilan välinen aukko on tiivistetty niin hyvin kuin se käytännössä on mahdollista.
IV-2	Puolitettu polttotila	Poistoilma palavasta huoneesta 0.02 m ² poistoaukon kautta huoneen ulkopuolelle (kuva 5). Koko välikaton ja laitetilan välinen aukko tukittu.
IV-3	Puolitettu polttotila	Koko välikaton ja laitetilan välinen aukko avoin (kuva 6). Järjestelyä on käytetty joissain huonepalodemoissa.
IV-4	Täysi polttotila	Koko välikaton ja laitetilan välinen aukko avoin. Normaalisti käytössä oleva ilmanvaihdon järjestely paloteatterin sprinkleridemoissa.
IV-5	Täysi polttotila	Poistoilma palavasta huoneesta 0.02 m ² poistoaukon kautta tilan ulkopuolelle. Koko välikaton ja laitetilan välinen aukko tukittu.
Huonepalo		
UL-1	Nurkka, vapaa palo	UL1626-nurkkapalokuorma. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-1.
UL-2	Nurkka, vapaa palo	UL1626-nurkkapalokuorma. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-2.
UL-3	Nurkka, vapaa palo	UL1626-nurkkapalokuorma. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-3.
UL-4	Nurkka, sprinklattu palo	UL1626-nurkkapalokuorma. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-1.
UL-5	Nurkka, sprinklattu palo	UL1626-nurkkapalokuorma. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-2.
UL-6	Nurkka, sprinklattu palo	UL1626-nurkkapalokuorma. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-3.
NFPA-1	Vuode, vapaa palo	Palava vuode, nopea palonkehitys (NFPA 92B). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-1.
NFPA-2	Vuode, vapaa palo	Palava vuode, nopea palonkehitys (NFPA 92B). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-2.
NFPA-3	Vuode, vapaa palo	Palava vuode, nopea palonkehitys (NFPA 92B). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-3.
NFPA-4	Vuode, sprinklattu palo	Palava vuode, nopea palonkehitys (NFPA 92B). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-1.
NFPA-5	Vuode, sprinklattu palo	Palava vuode, nopea palonkehitys (NFPA 92B). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-2.
NFPA-6	Vuode, sprinklattu palo	Palava vuode, nopea palonkehitys (NFPA 92B). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-3.
Sprinkleridemo		
SD-1	Normaali sprinkleridemo	Palokuorman sijoittelu lähellä yhtä sprinkleriä (kuva 20). Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-4.
SD-2	Siirretty palokuorma	Palokuorman sijoittelu neljän sprinklerin keskellä. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-4.
SD-3	Muutettu ilmanvaihto	Palokuorman sijoittelu lähellä yhtä sprinkleriä. Ilmanvaihto kuten tapauksessa IV-5.

3. Ilmanvaihdon simulointi

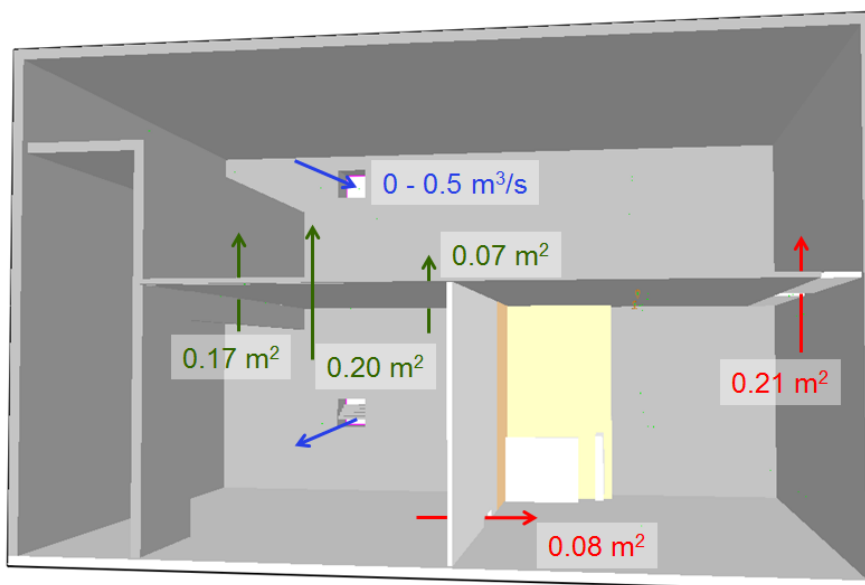
Polttotilan normaali poistoilmanvaihto toteutetaan pienellä poistopuhaltimella, jonka tilavuusvirta täydellä teholla on $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Poistopuhaltimen virtausta voidaan säätää taajuusmuuttajan avulla. Tulo- ja poistoilmavirtauksia on säädetty käytännön kokemukseen perustuen. Tässä työssä pyritään simuloinnin avulla tuomaan lisävalaistusta teatterin ilmanvaihdon toimintaan, ja aivan erityisesti selvittämään, mikä on ilmanvaihdon määrä paloteatterissa järjestettävissä huonepalodemonstraatioissa.

Simuloinnit toteutettiin muuttamalla poistoaukon dynaamista painetta, ja mittaamalla tilavuusvirtaa poisto- ja tuloaukoissa, katon ja seinien välisissä aukoissa, sekä palavan huoneen ilmanottoaukossa. Ilmanvaihdon simuloinneissa ei ollut läsnä tulipaloa, ja polttotilan ja ulkoilman oletettiin olevan samassa lämpötilassa ($20 \text{ }^\circ\text{C}$).

3.1 Puolitettu polttotila

3.1.1 Simuloinnin perustapaus

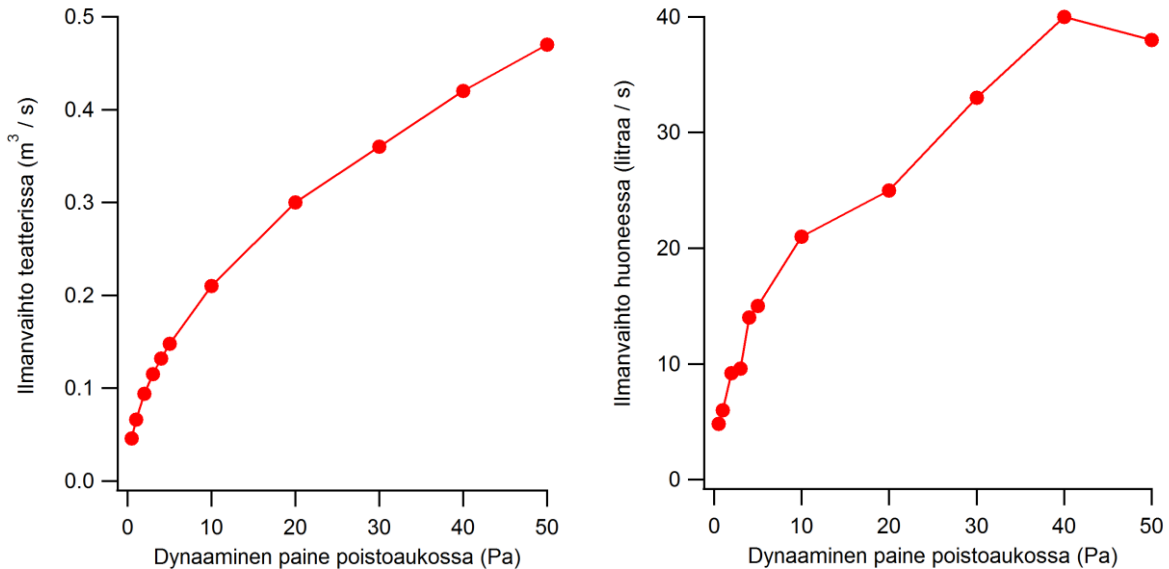
Ilmanvaihdon mallinnus paloteatterin huonepalodemonstraatiota vastaavassa järjestelyssä (taulukon 1 tapaus IV-1) on esitetty kuvassa 2. Huonepalodemonstraatiota varten polttotilan puoliväliin rakennetaan väliseinä, jolloin palavan huoneen mitat ovat likimain 3.6 m (leveys), 5.8 m (syvyys) ja 2.6 m (korkeus). Ilma huoneeseen tulee väliseinän alaosaan tehdyn $0.1 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ aukon kautta, ja ilma poistuu liikuteltavan katon ja laittilan puoleisen sivuseinän väliin tehdystä $0.35 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ aukosta. Muilta osin katon ja seinien väliset raot on tukittu.



Kuva 2. Ilmanvaihdon mallinnus huonepalodemonstraatiota vastaavassa geometriassa (tapaus IV-1).

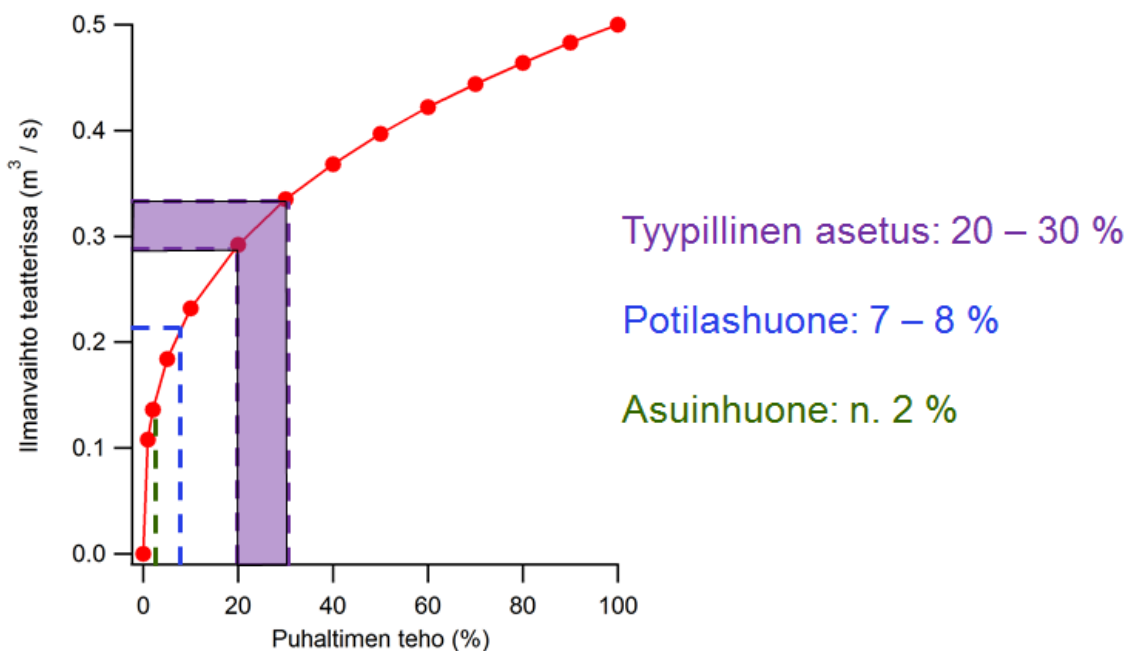
Ilmanvaihdon tilavuusvirta polttotilassa poistoaukon dynaamisen paineen funktiona on esitetty kuvan 3 vasemmalla puolella. Tuloksista nähdään, että dynaamisen paineen ollessa 50 Pa teatterin ilmanvaihdon määrä on noin $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, mikä vastaa savunpoistopuhaltimen maksimitehoa. Kuvan 3 oikealla puolella on esitetty ilmavaihdon tilavuusvirta palavan huoneen läpi. Kuvasta nähdään, että palavan huoneen läpi kulkee karkeasti ottaen 10 % koko polttotilan ilmanvaihdosta. Dynaamisen paineen ollessa 10 Pa huoneen ilmanvaihto on noin 20 litraa sekunnissa, mikä on RakMK D2:n määrittämä minimivaatimus kahden hengen potilashuoneelle (vaatimus on 10 l/s henkeä kohti). Dynaamisella paineella 5 Pa saadaan ilmanvaihdon minimimäärä kahden hengen asuinhuoneelle (vaatimus 6 l/s henkeä kohti,

kuitenkin ilman on vaihduttava kokonaan kerran kahdessa tunnissa). Palavan huoneen tilavuus on 54 m^3 , joten tilavuusvirralla 12 l/s yksi ilmanvaihto vie 75 minuuttia. Kuvan mukaan ilmanvaihdon määrän riippuvuus dynaamisesta paineesta palavassa huoneessa ei käyttydy yhtä tasaisesti kuin koko polttilan ilmanvaihdon määrä. Tämä johtuu siitä, että virtauskenttä polttilassa on pyörteinen, ja pyörteiden paikat ja voimakkuudet vaihtelevat dynaamisen paineen funktiona.



Kuva 3. Ilmanvaihdon määrä koko polttilassa (vasemmalla) ja palavassa huoneessa (oikealla). (IV-1)

Yhteys poistoaukon dynaamisen paineen ja poistopuhallinta ohjaavan taajuusmuuttajan asetuksen välille voidaan löytää pumppulakien avulla. Näiden niin nesteille kuin kaasuillekin pätevien lakien mukaan pumpun virtaama on suoraan verrannollinen akselin pyörimisnopeuteen, ja teho puolestaan verrannollinen pyörimisnopeuden kuutioon [1]. Näin saadaan kuvan 4 mukainen riippuvuus polttilan ilmanvaihdon ja taajuusmuuttajan asetuksen välille.

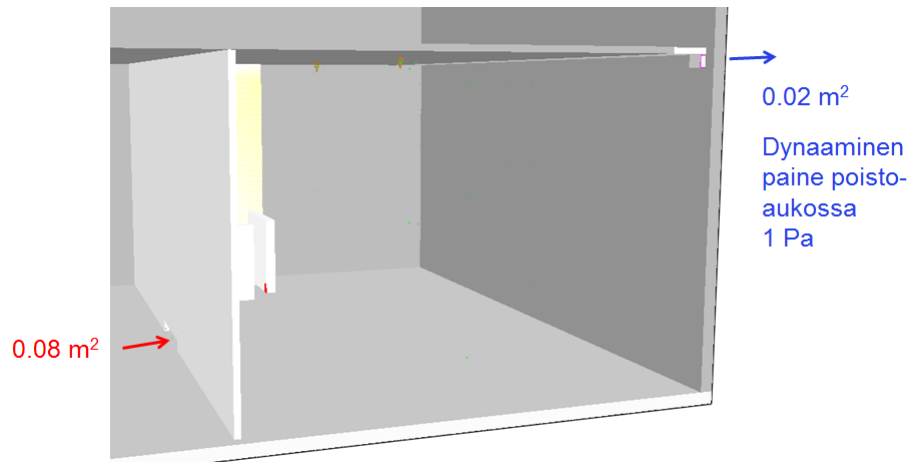


Kuva 4. Polttilan ilmanvaihdon tilavuusvirta savunpoistopuhaltimen taajuusmuuttajan asetuksen funktiona (IV-1).

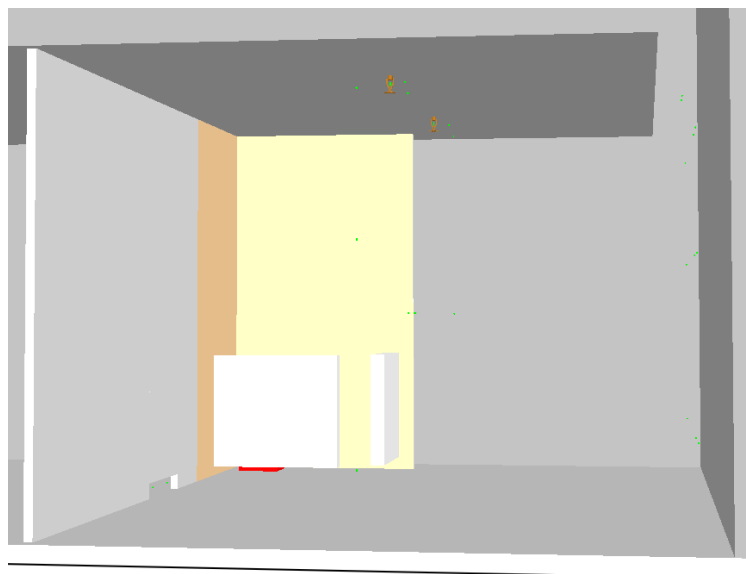
Tilavuusvirta riippuu voimakkaasti taajuusmuuttajan asetuksesta pienillä tehoilla, kun taas suurilla tehoilla riippuvuus on varsin heikko. Tyypillisesti paloteatterin demonstraatioissa puhallinta on käytetty 20–30 % teholla, jolloin ilmanvaihdon määrä on noin $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Ottaen huomioon, että noin 10 % koko polttotilan ilmanvaihdosta kulkee palavan huoneen läpi, saadaan normin mukainen ilmanvaihdon minimi kahden hengen potilashuoneelle teholla 7–8 %, ja kahden hengen asuinhuoneelle teholla ~2 %.

3.1.2 Muutetut ilmanvaihto-olosuhteet

Huonepalon simulointeja suoritettiin kuvan 2 järjestelyn ohella myös kahdella muulla tavalla. Kuvassa 5 esitettyssä järjestelyssä on tavoitteena mahdollisimman realistinen huoneen ilmanvaihdon simulointi (tapaus IV-2). Koko liikuteltavan katon ja laitetilän puoleisen seinän välinen aukko on tukittu, jolloin palokaasuja ei pääse leviämään katon yläpuoliseen tilaan. Huoneen etuosassa olevaan ylänurkkaan on luotu pinta-alaltaan 0.02 m^2 poistoaukko, jolle on määritetty dynaaminen painereunaehto 1 Pa . Tällöin huoneen läpi kulkeva tilavuusvirta on noin 20 litraa sekunnissa. Kuvan 6 järjestelyssä (tapaus IV-3) puolestaan koko liikuteltavan katon ja laitetilän puoleisen seinän välinen aukko on auki. Tässä tapauksessa erillistä tilavuusvirran määrittystä huoneessa ei tehty.



Kuva 5. Todellista huonetta vastaava ilmanvaihtojärjestely (IV-2).



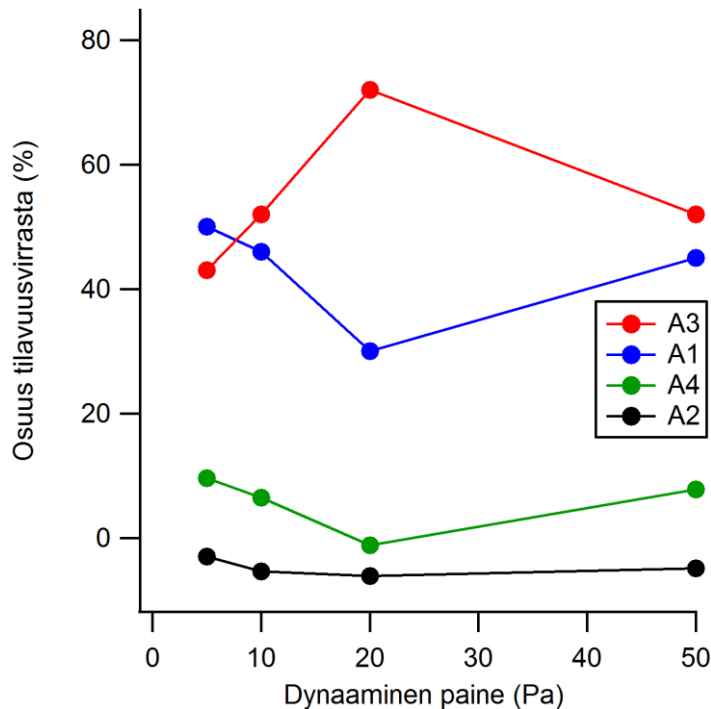
Kuva 6. Ilmanvaihtojärjestely, jossa liikuteltavan katon ja laitetilän välinen aukko on kokonaan auki (IV-3).

3.2 Täysikokoinen polttotila

Täysikokoisen polttotilan ilmanvaihtoa (tapaus IV-4) simuloitiin vain neljällä dynaamisella paineella (5, 10, 20 ja 50 Pa). Nämä tulokset osoittivat, että koko polttotilan ilmanvaihdon määrä ei riipu siitä, onko liikuteltavan katon alle rakennettu huoneistopalodemonstratio vai ei. Virtauskenttä polttotilassa on kuitenkin erilainen, koska liikuteltavan katon ja laitetytilan puoleisen seinän välissä on suuri aukko (ks. kuva 1).

Kuvassa 7 on esitetty dynaamisen paineen funktiona osuus tilavuusvirrasta, joka kulkee liikuteltavan katon ja seinän välistä eri kohdissa polttotilaa. Dynaamisesta paineesta riippuen 40–70 % tilavuusvirrasta kulkee suurimman aukon (A3) kautta. 30–50 % virtauksesta kulkee katon ja auditorion lasiseinän välisen aukon (A1) kautta. Virtaus muualta on vähäistä. Huomattakoon, että aukon A2 kautta kulkevan tilavuusvirran osuus on negatiivinen, mikä tarkoittaa, että virtaus kulkee tällä kohdin katon yläpuolelta alapuolelle.

Taulukon 1 tapaukselle IV-5 ei erikseen suoritettu ilmanvaihdon määrää koskevia simuloiteja. Poistoaukon dynaamisena paineena käytettiin arvoa 1 Pa, kuten tapauksessa IV-2.



Kuva 7. Ilmanvaihdon tilavuusvirran jakautuminen liikuteltavan katon ja seinän välissä tapauksessa IV-4 (vrt. kuva 1).

4. Huonepalon simulointi

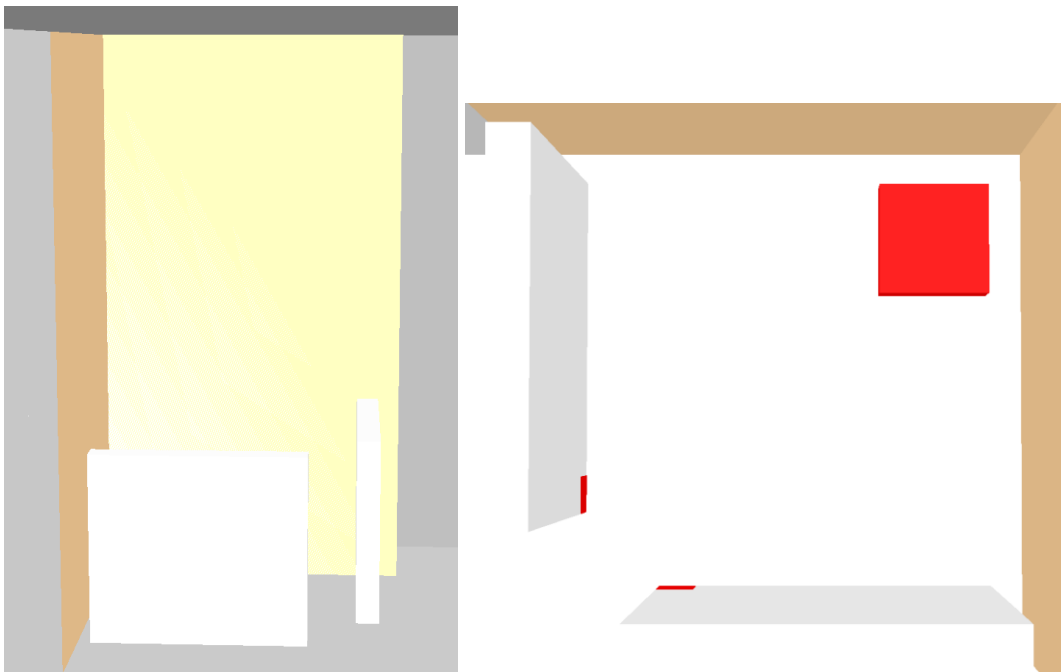
4.1 Palokuormat

Huonepalon simulointi toteutettiin kahden eri palokuorman avulla. Standardissa UL 1626 (Residential Sprinklers for Fire-Protection Service) [2] määritellään asuinhuoneen nurkkaa kuvaava palokuorma, joka koostuu seinään kiinnitetyistä vanerilevyistä, ja puulevyihin kiinnitetyistä vaahtomuovipaloista (kuva 8). Jälkimmäiset kuvaavat pehmustettujen huonekalujen päätyjä. Sytytyslähteenä on nestealtaan päälle asetettu puuritilä, sekä kaksi palavaan nesteeseen kastettua puuvillalankaa.



Kuva 8. Standardin UL 1626 määrittämä asuinhuonetta kuvaava palokuorma.

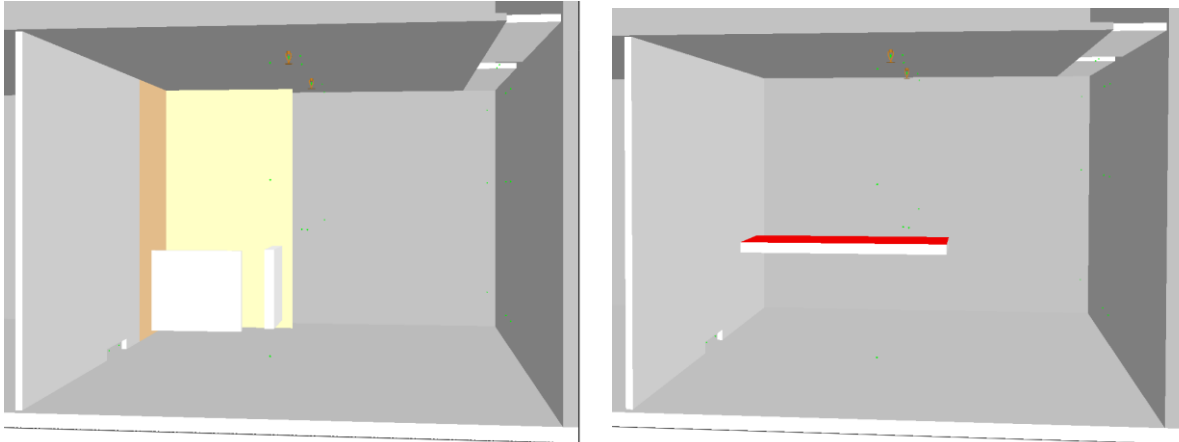
FDS-mallissa (kuva 9) vanerilevyt ja vaahtomuovi mallinnettiin pyrolyysimallin avulla. Käytetty 5 cm paikkaerotuskyky ei mahdollistanut sytytyslähteiden mallintamista pyrolyysimallilla, joten näille käytettiin oletettua palonkehitystä. Sytytyslähteiden osalta sprinklerin sammutusvaikutus huomioitiin FDS:n käyttäjän oppaassa esitellyn empiirisen sammutusmallin avulla määrittämällä pinnoille sammutusparametri $E_COEFFICIENT=0.4$.



Kuva 9. Standardin UL 1626 määrittämän asuinhuonetta kuvaavan palokuorman FDS-malli.

Toisena palokuormana (kuva 10) käytettiin tasomaista 2 m x 1 m estettä, joka oli asetettu 0.9 m korkeudelle, vastaten likimain potilasvuodetta. Esteen yläpinta määritettiin palavaksi, ja sen palonkehityksen oletettiin noudattavan standardissa NFPA 92B (Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces) [3] määritettyä nopeaa

palonkehitystä. Sprinklerin sammutusvaikutus huomioitiin määrittämällä pinnalle sammutusparametri $E_COEFFICIENT=0.4$.



Kuva 10. Huonepaloa kuvaavien palokuormien sijoittelu FDS-mallissa.

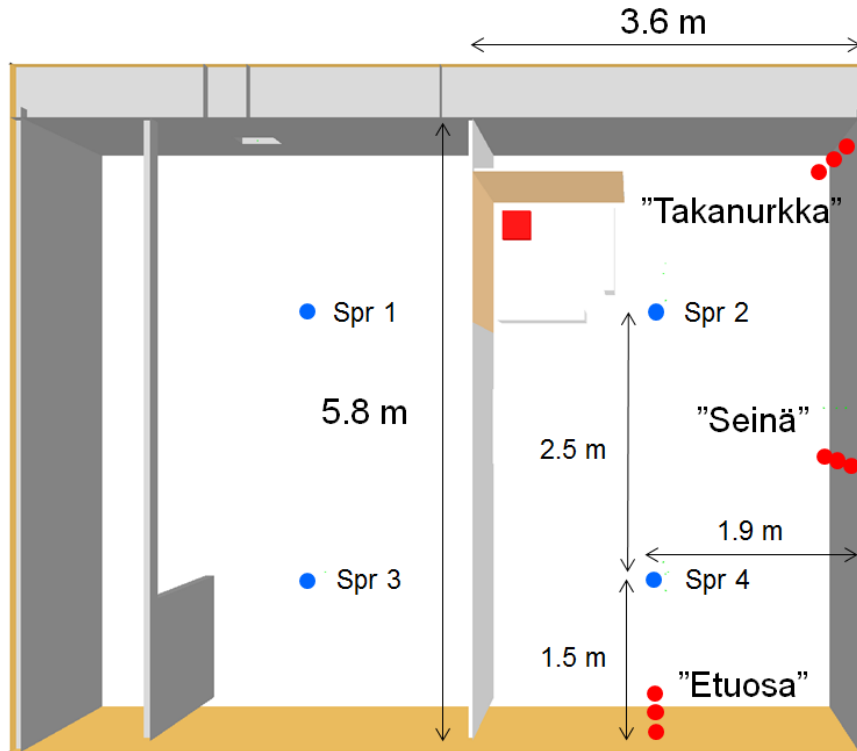
4.2 Sprinklerit

Palavassa huoneessa on kaksi kiinteästi asennettua paikkaa sprinklereille. Ne sijaitsevat huoneen keskilinjalla, 1.5 m päässä etu- ja takaseinistä, jolloin sprinklerien keskinäiseksi etäisyydeksi tulee n. 2.5 m. Demoissa käytettävä sprinklerityyppi mallinnettiin spraysprinklerinä, jonka K-arvo on $80 \text{ l/min/bar}^{1/2}$, laukeamislämpötila on 68 °C ja RTI-arvo $50 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$. Sprinklerit toimivat vesiverkoston paineella, joka maksimissaan voi olla 8 bar. Tätä painetta käytettiin myös simuloinneissa, jolloin virtaama suutinta kohti on 226 l/min . Keskimääräiseksi pisarakooksi asetettiin $1000 \text{ }\mu\text{m}$ ja pisaroiden lähtönopeudeksi 20 m/s . Näillä oletuksilla mallinnus vastaa paloteatterissa yleisimmin käytettyä sprinklerityyppiä.

4.3 Instrumentointi

Kuvassa 11 on esitetty palokuorman, sprinklerien sekä kaasupitoisuuksien (CO , O_2) ja lämpötilojen pistemittausten paikat simuloinneissa. Seinän mittauspisteet vastaavat paloteatterin nykyisiä kiinteitä mittauspisteitä.

Näiden lisäksi kaksi kaasulämpötilan mittauspistettä sijoitettiin sprinklerien välittömään läheisyyteen. Pistemittausten lisäksi kaasupitoisuudet ja lämpötilat tallennettiin kolmessa pystysuuntaisessa tasossa, joista kaksi kulki palavan huoneen keskilinjojen kautta, ja kolmas lähellä laitetilän seinää. Kaasupitoisuudet mitattiin myös koko huoneen ja koko katon yläpuolisen tilan tilavuuskeskiarvoina.

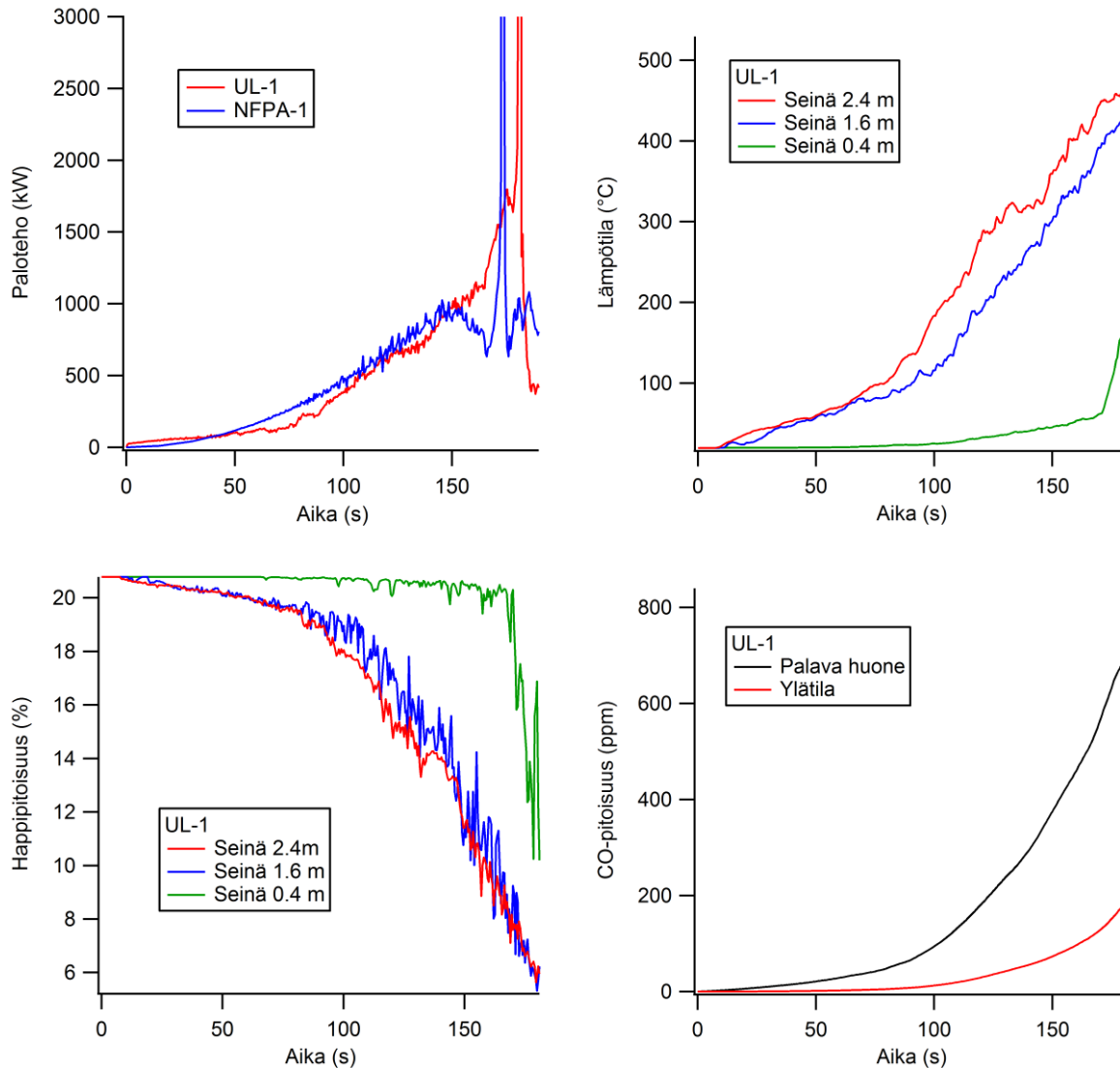


Kuva 11. Palokuorman, sprinklerien, sekä kaasupitoisuuksien ja lämpötilojen pistemittausten paikat simuloinneissa. Palokuorma on sijoitettu auditoriosta katsoen lähelle polttilan takaseinää. Mittapisteiden korkeudet lattiasta ovat 0.4m, 1.6m ja 2.4m. Mittapisteiden etäisyys seiniin on 10 cm.

4.4 Tulokset

4.4.1 Vapaa palo

Kuvassa 12 on esitetty palotehokäyrät vapaasti palavasta huonepalosta molemmille työssä käytetyille palokuormille (taulukon 1 tapaukset UL-1 ja NFPA-1). Vapaasti palavan palon tapauksessa havaitaan, että palotehon aikakehitys on eri palokuormille varsin samantapainen. Koska UL 1626 –palokuorman simulointi toteutettiin paloa levittävän materiaalimallin avulla, voidaan todeta, että tämä palokuorma edustaa nopeasti kehittyvää paloa. NFPA 92B-standardin määritelmän mukaan nopeassa palonkehityksessä paloteho 1 MW saavutetaan 146 s kuluttua sytytyksestä, kun paloteho riippuu ajan neliöstä.



Kuva 12. Simulointituloksia vapaasti palavasta huonepalosta. Ylhäällä vasemmalla: paloteho. Ylhäällä oikealla: kaasulämpötilan pystyjakauma seinän mittapisteissä. Alhaalla vasemmalla: happipitoisuuden pystyjakauma seinän mittapisteissä. Alhaalla oikealla: keskimääräinen CO-pitoisuus palavassa huoneessa ja liikuteltavan katon yläpuolisessa tilassa.

Kuvassa 12 on esitetty myös kaasulämpötila ja happipitoisuus seinän mittapisteissä sekä palavan huoneen ja katon yläpuolisen tilan keskimääräiset CO-pitoisuudet, kun palokuormana on UL1626-nurkkapalokuorma. Lämpötilat osoittavat, että palotehon ylittäessä arvon 1 MW palamista alkaa tapahtua huoneen kaikissa osissa. Happipitoisuuskäyriä tutkimalla havaitaan, että tässä vaiheessa happea on palamiselle riittävässä määrin ainoastaan huoneen alaosassa. Noin 170 s kohdalla simulointimalli ennustaa äkillisen yleissyttymisen kaltaisen ilmiön, jossa paloteho hetkellisesti kohoaa hyvin korkeaksi (yli 10 MW). Palotehon ollessa yli 1 MW:n simulointituloksiin on suhtauduttava varauksella, sillä voimakkaasti happirajoitteisten palojen tapauksessa (kuten suljetussa huoneessa olevat suuret palot) FDS:n palamismallia ei ole validoitu kovinkaan hyvin. Selvitystyön kannalta tällä ei kuitenkaan ole merkitystä, sillä 1 MW saakka kasvavia paloja paloteatterissa ei voi polttaa. Lisäksi, kuten alla luvussa 4.4.2 esitetään, sprinklerijärjestelmä laukeaa jo palotehon ollessa luokkaa 200 kW.

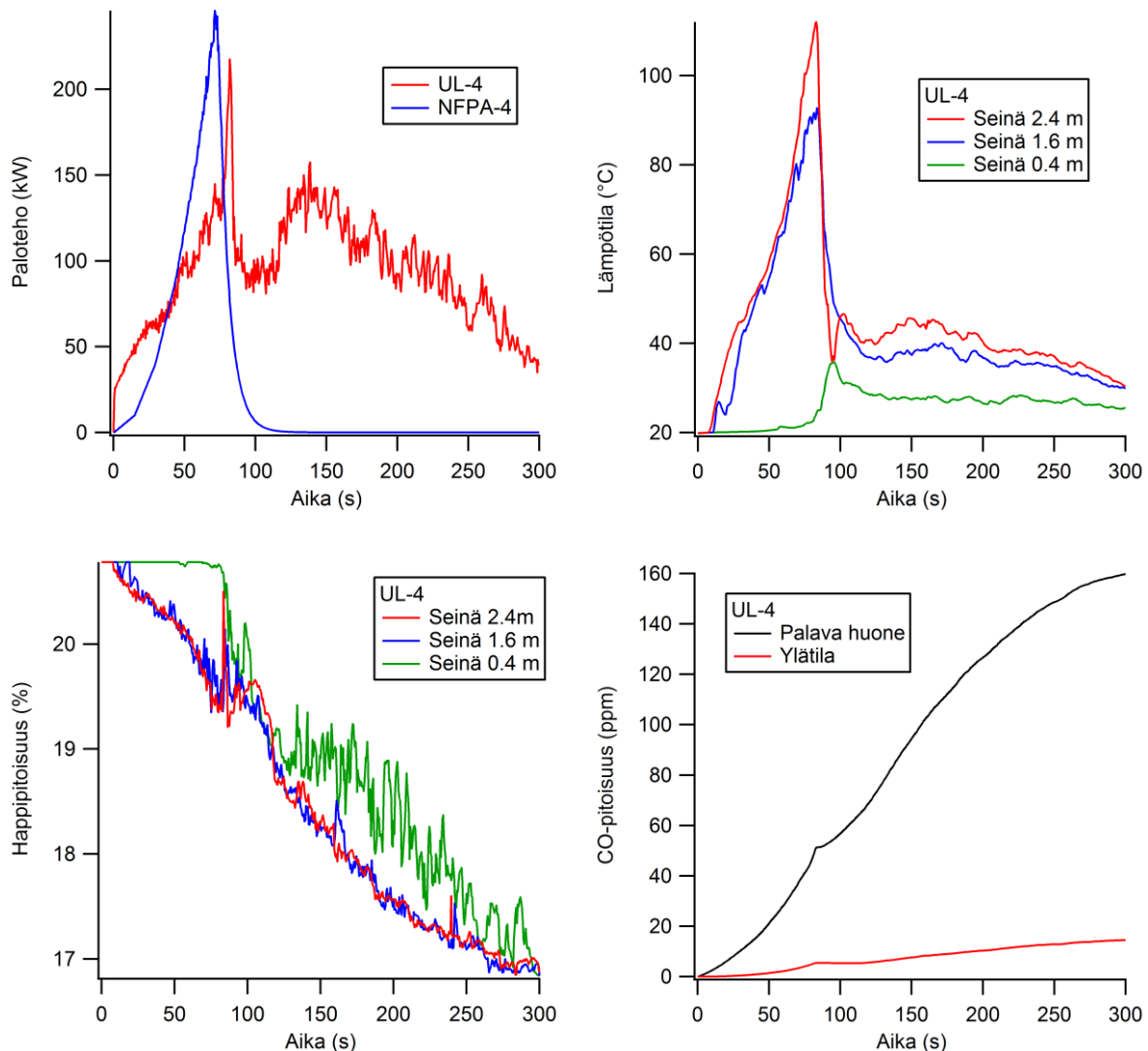
CO-pitoisuuksia laskettaessa simuloinnissa on oletettu tulipalon CO-tuotoksi 0.02 g/g, mikä on tyypillinen arvo runsaassa hapessa palavalle liekille. Palavassa huoneessa CO-pitoisuus kohoaa yleissyttymiseen mennessä tasolle 800 ppm. Välikaton yläpuolisessa tilassa CO-

pitoisuus jää tasolle 200 ppm, mikä kertoo siitä, että merkittäviä määriä palokaasuja ei karkaa palavasta huoneesta ilmanvaihtojärjestelyn vuoksi.

4.4.2 Sprinklattu palo

Kuvassa 13 on esitetty palotehokäyrät sprinklatusta huonepalosta molemmille työssä käytetyille palokuormille (taulukon 1 tapaukset UL-4 ja NFPA-4). Sprinklattujen palojen tapauksessa palotehokäyrät osoittavat, että palokuormaa lähinnä oleva sprinkleri laukeaa, kun paloteho on noin 200 kW. Tämän jälkeen sprinkleri sammuttaa nopeasti potilasvuodetta kuvaavan palon. Tämä johtuu siitä, että sprinkleristä tuleva vesi pääsee tehokkaasti kastelemaan vaakasuoraa palavaa pintaa, ja lisäksi sprinklerin virtaama on huomattavan suuri. Nurkkapalokuorman tapauksessa sprinkleri estää palon kehittymisen, ja alkaa hitaasti rajoittaa palotehoa. Palo ei kuitenkaan sammu välittömästi sprinklerin lauettua, sillä osa palokuormasta (erityisesti vaahtomuovilevyt) on vesisuihkun kannalta katveessa.

Kuvassa 13 on esitetty myös kaasulämpötila ja happipitoisuus seinän mittapisteissä, sekä palavan huoneen ja katon yläpuolisen tilan keskimääräiset CO-pitoisuudet, kun palokuormana on UL1626-nurkkapalokuorma.



Kuva 13. Simulointituloksia sprinklatusta huonepalosta. Ylhäällä vasemmalla: paloteho. Ylhäällä oikealla: kaasulämpötilan pystyjakauma seinän mittapisteissä. Alhaalla vasemmalla: happipitoisuuden pystyjakauma seinän mittapisteissä. Alhaalla oikealla: keskimääräinen CO-pitoisuus palavassa huoneessa ja liikuteltavan katon yläpuolisessa tilassa.

Sprinklerin laukeamishetkellä kaasulämpötila huoneen yläosassa on noussut hieman yli 100 °C:n, kun taas alaosassa oleva puhtaan ilman kerros on lähes alkulämpötilassaan 20 °C. Sprinklerin laukeaminen jäähdyttää nopeasti huoneen yläosan. Vesisuihku sekoittaa savupatjan ja puhtaan ilman kerroksen keskenään, jolloin lämpötila huoneen alaosassa nousee hieman.

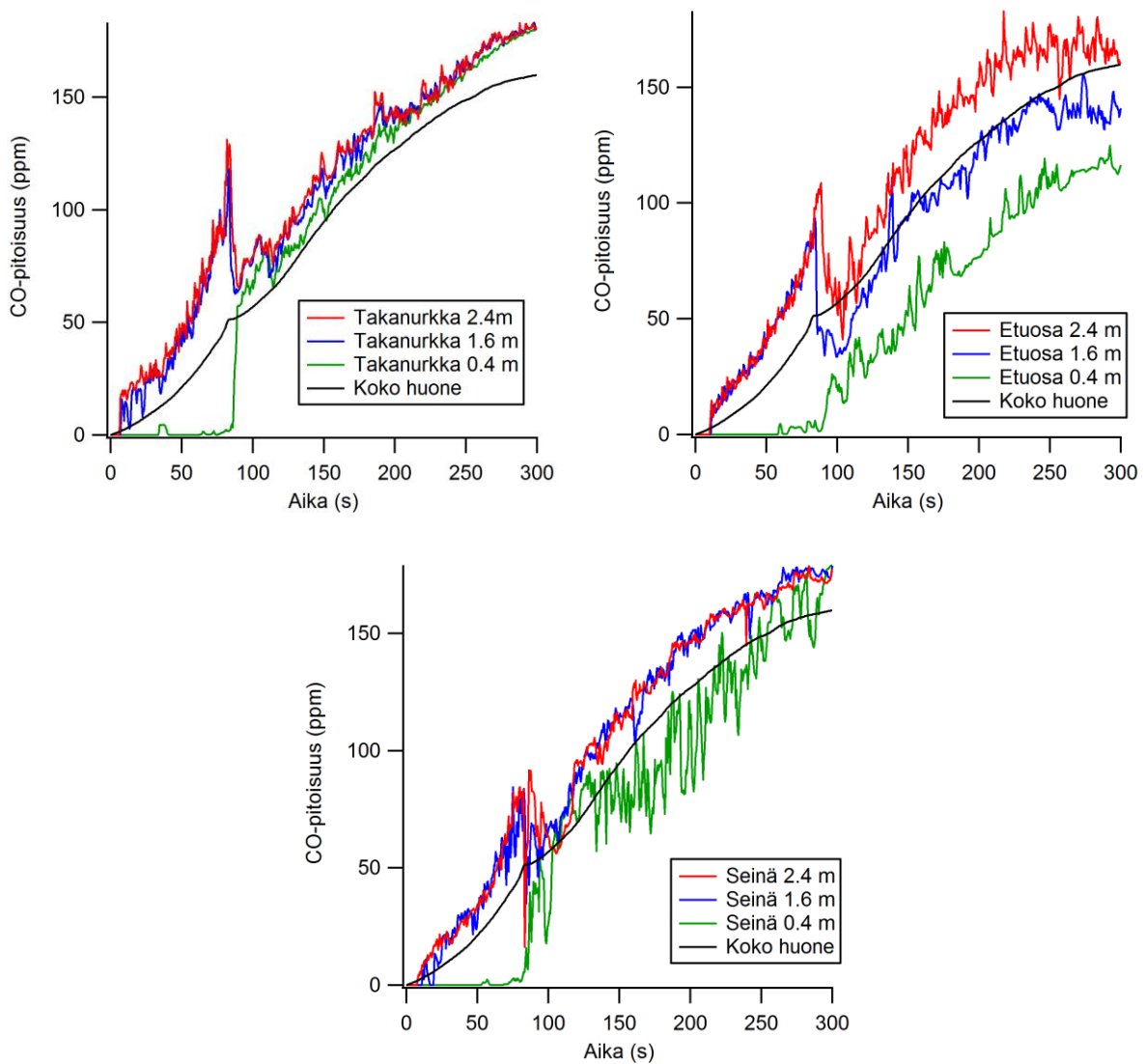
Savupatjan ja raittiin ilman kerroksen sekoittuminen näkyy selvemmin happipitoisuuskäyristä. Ennen sprinklerin laukeamista hapen tilavuusosuus huoneen alaosassa on 21 %, mutta sprinklerin laukeamisen jälkeen happipitoisuus on jakautunut korkeussuunnassa miltei tasaisesti. Koska palo ei sammunut nopeasti, happipitoisuus jatkaa hidasta pienenemistään.

Huoneen keskimääräinen CO-pitoisuus sprinklerin laukeamishetkellä on noin 50 ppm. Sprinklerin laukeaminen tuottaa huoneeseen hetkellisen alipaineen, joka aiheuttaa takaisinvirtausta välikaton yläpuolisesta tilasta huoneeseen. Tämä ilmiö on kuitenkin lyhytkestoinen (noin 20 sekuntia). Koska lisäksi katon yläpuolisen tilan CO-pitoisuus on alhainen, takaisinvirtauksella on vain vähäinen merkitys huoneen CO-pitoisuudelle. Palon jatkuminen pienellä teholla merkitsee myös CO-pitoisuuden kasvun jatkumista. On kuitenkin huomattava, että CO-pitoisuuden laskemiseen sprinklerin laukeamisen jälkeen sisältyy merkittävää epävarmuutta, sillä todellisuudessa kastuneen polttoaineen CO-tuotto voi olla merkittävästi suurempi kuin runsaassa hapessa palavan kuivan polttoaineen CO-tuotto. Simuloinneissa CO-tuotto pysyi arvossa 0.02 g/g myös sprinklerin laukeamisen jälkeen.

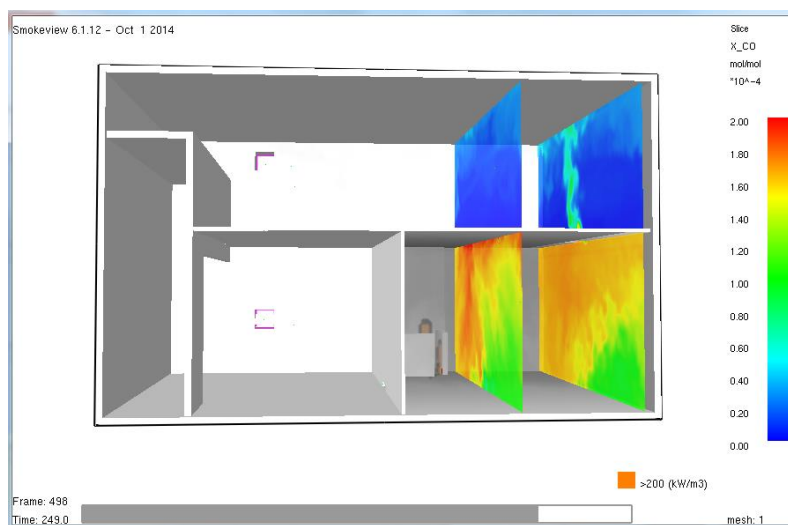
CO-pitoisuudet huoneen takanurkan, seinän ja etuosan mittapisteissä on esitetty kuvassa 14, jossa niitä on myös verrattu huoneen keskimääräiseen CO-pitoisuuteen (tapaus UL-4). Sprinklerin vaikutus CO-pitoisuuteen on selkeästi nähtävissä kaikissa mittauskohdissa. Ennen sprinklerin laukeamista CO-pitoisuus huoneen alaosassa on hyvin lähellä nollaa, kun taas sprinklerin laukeamisen jälkeen pitoisuudet tasoittuvat korkeussuunnassa, vastaavalla tavoin kuin happipitoisuudetkin.

Mittauspisteiden paikan vaikutus tuloksiin on suhteellisen pieni. Sprinklerin aiheuttama kaasukerrosten sekoittuminen on tehokkainta takanurkassa ja vähiten tehokasta etuosassa. Erot aiheutuvat sprinklerin vaikutuksesta virtauskuvaan huoneessa. Kuvassa 15 on esitetty CO-pitoisuudet kahdessa pystysuuntaisessa tasossa noin 100 sekuntia sprinklerin laukeamisen jälkeen (tapaus UL-4). Lähellä palokuormaa lauennut sprinkleri pumppaa tehokkaasti palokaasuja huoneen yläosasta alaosaan. Kauempana palokuormasta sijainnut sprinkleri ei lauennut, joten huoneen etuosassa vastaavaa sekoittumista ei pääse tapahtumaan.

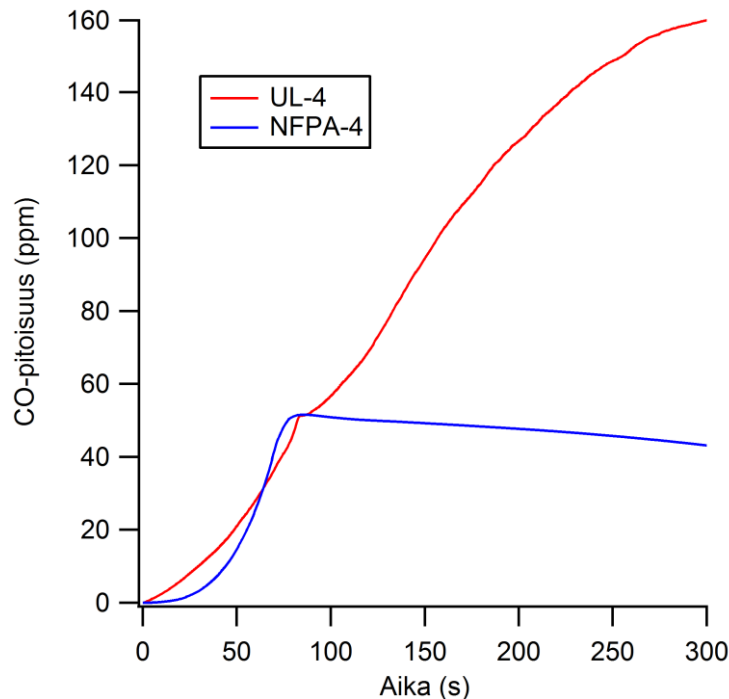
Sprinklerin toiminnan vaikutusta huoneen keskimääräiseen CO-pitoisuuteen on havainnollistettu kuvassa 16. Nurkkapalokuorman tapauksessa paloteho pysyy sprinklerin laukeamisen jälkeen n. 100 kW tasolla, mikä näkyy CO-pitoisuuden nousuna. Sen sijaan potilasvuodepalo sammuu nopeasti sprinklerin lauettua, jolloin myös CO:n tuotto putoaa nolliin. Tällöin huoneen CO-pitoisuus alkaa hitaasti laskea huoneen ilmanvaihdon vaikutuksesta.



Kuva 14. CO-pitoisuudet sprinklatussa huonepalossa (UL-4) huoneen eri kohdissa. Kussakin kuvassa on verrattu CO-pitoisuuksia eri korkeuksilla huoneen keskimääräiseen CO-pitoisuuteen.



Kuva 15. CO-pitoisuudet sprinklatussa huonepalossa (UL-4) kahdessa pystysuuntaisessa tasossa n. 100 s sprinklerin laukeamishetken jälkeen.



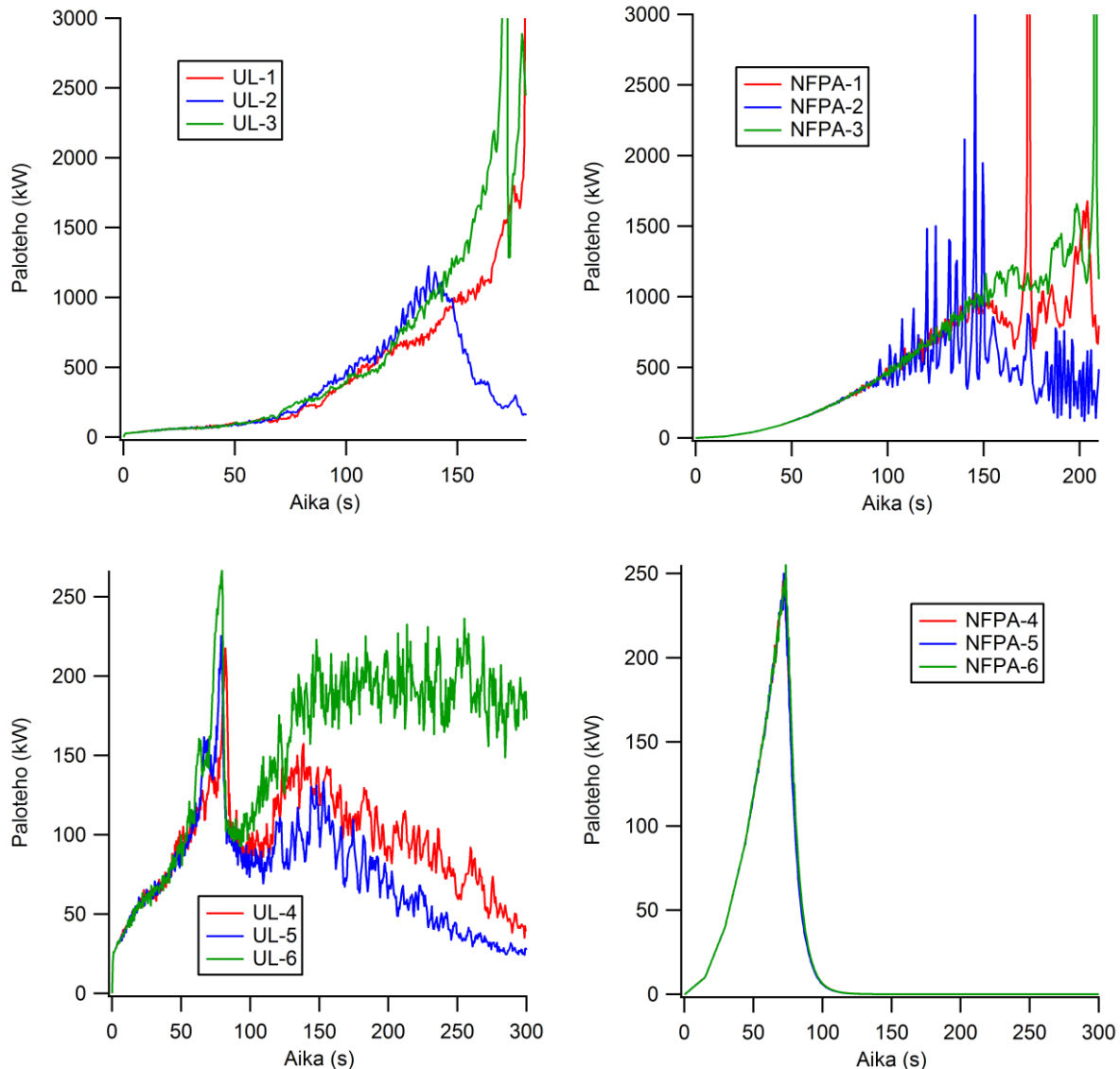
Kuva 16. Sprinklerin toiminnan vaikutus huoneen keskimääräiseen CO-pitoisuuteen nurkka- ja vuodepaloskenaarioissa.

4.4.3 Muutetut ilmanvaihto-olosuhteet

Ilmanvaihtojärjestelyjen vaikutus vapaan ja sprinklatun huonepalon palotehoon on esitetty kuvassa 17. Nurkkapalokuorman ja vapaan palon osalta merkillepantavaa on, että todellista huonetta vastaavassa tapauksessa simulointimalli ei ennusta äkillistä yleissyttymistä, vaan paloteho käy maksimissa (noin 1 MW), jonka jälkeen se alkaa laskea. Potilasvuodetta kuvaavan palokuorman tapauksessa palotehokäyrä todellisen huoneen simuloinnissa alkaa värähdellä 100 s tienoilla syttymishetkestä, mutta muutoin palotehokäyrän trendi on samantapainen kuin nurkkapalokuorman tapauksessa. Avoimen katon reunan tapauksessa potilasvuodeskenaarion yleissytyminen tapahtuu hieman myöhemmin kuin perustapauksessa. Molempien palokuormien osalta palonkehitys syttymishetkestä n. 1 MW palotehoon asti on kuitenkin vain heikosti riippuvainen tarkastelluista ilmanvaihdon järjestelyistä.

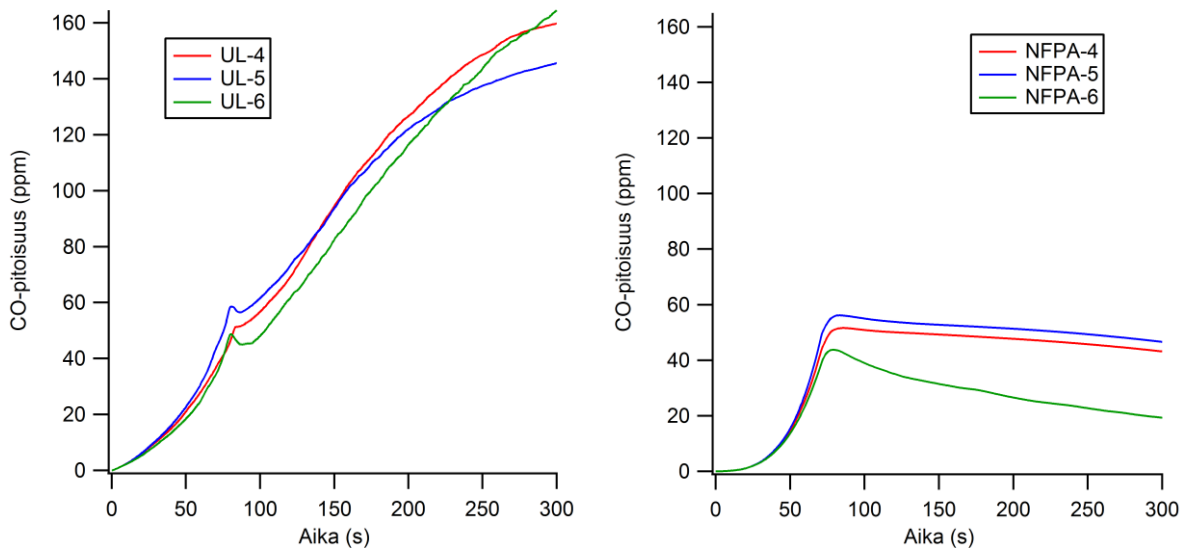
Palonkehityksen alkuvaiheen heikko riippuvuus ilmanvaihdon järjestelyistä näkyy sprinklattujen tapausten palotehoissa siten, että paloteho sprinklerin laukeamishetkellä sekä laukeamisen ajankohta riippuvat heikosti ilmanvaihdosta nurkkapalokuorman tapauksessa. Potilasvuodetta kuvaavan palokuorman tapauksessa riippuvuutta ei ole. Palotehon käyttäytyminen nurkkapalossa sprinklerin laukeamisen jälkeen riippuu heikosti ilmanvaihdosta siten, että avoimen katon reunan tapauksessa paloteho jää n. 200 kW tasolle. Todellisen huoneen tapauksessa paloteho laskee hieman nopeammin kuin perustapauksessa. Potilasvuodepalossa kaikki palotehokäyrät kulkevat päällekkäin myös sprinklerin laukeamisen jälkeen.

Lauenneitten sprinklerien määrä riippui nurkkapalossa ilmanvaihdosta siten, että perustapauksessa laukesi vain palokuormaa lähinnä ollut sprinkleri, muissa tapauksissa huoneen molemmat sprinklerit (lähes yhtäaikaaisesti). Potilasvuodepalossa kaikissa tapauksissa laukesi ainoastaan palokuormaa lähinnä ollut sprinkleri.



Kuva 17. Ilmanvaihtojärjestelyjen vaikutus vapaan ja sprinklatun huonepalon palotehoon. Pystyakselien skaalat ovat erilaiset vapaalle ja sprinklatulle palolle.

Ilmanvaihtojärjestelyjen vaikutus keskimääräiseen CO-pitoisuuteen sprinklatun huonepalon tapauksessa on esitetty kuvassa 18. Nurkkapalon tapauksessa CO-pitoisuuden riippuvuus ilmanvaihtojärjestelystä on heikko. Potilasvuodepalon tapauksessa riippuvuus on heikko ennen sprinklerin laukeamista, mutta laukeamisen jälkeen CO-pitoisuus laskee nopeimmin tapauksessa, jossa katon ja laittilan välinen aukko on kokonaan auki. Kummankin paloskenaarion tapauksessa käyrien keskinäiset erot eivät ole merkittäviä henkilöturvallisuuden kannalta.



Kuva 18. Ilmanvaihtojärjestelyjen vaikutus keskimääräiseen CO-pitoisuuteen sprinklatussa huonepalossa.

4.4.4 Henkilöturvallisuus sprinklatussa huonepalossa

Vapaasti kehittyvä huonepalo johtaa nopeasti ihmisen kannalta hengenvaaralliseen lämpötilaan. Sprinklatussa huonepalossa välitön hengenvaara voi aiheutua, mikäli syttymislähde on kiinni ihmisessä. Muussa tapauksessa henkilöturvallisuuteen vaikuttavat ensisijaisesti kaasupitoisuudet, joista tämän työn simulointien kannalta tärkein on hiilimonoksidi (CO).

Hiilimonoksidin vaikutus ihmiseen riippuu pitoisuudesta ja altistusajasta. Työterveyslaitoksen onnettomuuden vaaraa aiheuttavien aineiden turvallisuusohjeissa on esitetty hiilimonoksidin liittyviä altistusarvoja eritasoisille vaikutuksille ihmiseen [4]. Lieviä muutoksia sydämen ja hermoston toiminnassa voi ilmetä jo 50 ppm:n häikäpitoisuudessa (tähän liittyvät ohjeen antamat HTP-arvot 30 ppm / 8h ja 75 ppm / 15 min). Häikäpitoisuus 200 ppm aiheuttaa noin tunnin altistuksen jälkeen voimakasta päänsärkyä ja 500 ppm:n pitoisuus noin 20 minuutin kuluttua. Pitoisuus 1 000 - 10 000 ppm aiheuttaa päänsärkyä, huimausta, hengästyneisyyttä ja pahoinvointia noin 10 minuutin jälkeen ja kuoleman, jos altistuminen jatkuu 10 - 45 minuuttia pitoisuudesta riippuen.

Sprinklattujen palojen CO-pitoisuudet simuloinneissa olivat pääsääntöisesti alle 200 ppm, mitä yllä olevan valossa voidaan pitää henkilöturvallisuuden kannalta turvallisena arvona, mikäli huoneessa oleva henkilö pääsee itsekseen tai avustettuna poistumaan huoneesta. Näin ollen simuloinneissa esiintyvät eroavuudet CO-pitoisuuksissa eri paloskenaarioissa, eri korkeuksilla tai erilaisissa ilmanvaihdon olosuhteissa eivät ole henkilöturvallisuuden kannalta merkittäviä. On myös huomattava, että vaikka todellisuudessa CO-tuotto kasvaisi merkittävästi sprinklerin lauettua, henkilöturvallisuuden kannalta merkittävään CO-altistukseen kuluu silti useita minutteja.

Tämän työn tuloksia voidaan verrata VTT:llä tehtyihin asuntospinklauskokeisiin [5], joissa henkilöturvallisuutta sprinklatussa huonepalossa arvioitiin FED-arvon [6] avulla. FED-arvo (Fractional Effective Dose) huomioi CO:n ja syaanivedyn (HCN) tukahduttavan vaikutuksen sekä normaalia suuremman CO₂-pitoisuuden vaikutuksesta kiihtyvän hengitystiheyden aiheuttaman lisäaltistuksen tukahduttaville kaasuille. Eri ihmisten reaktiot tietyille kertyneelle FED-arvolle ovat tilastollisesti jakautuneita, ja tilastollisen jakautuman frekvenssikäyrän maksimi on määritelmän mukaan kohdassa, jossa FED saavuttaa arvon 1.0. FED-arvon ollessa 1.0 katsotaan, että palamiskaasuilla on poistumista vakavasti haittaavia vaikutuksia 50 %:lle altistuneista henkilöistä. Kun FED on 0.3, tällaisia haittavaikutuksia oletetaan

aiheutuvan 11,4 %:lle altistuneista. FED-arvot 1.0 ja 0.3 ovat usein käytettyjä raja-arvoja arvioitaessa poistumisen turvallisuutta. UL 1626 -nurkkapalokuormalla tehdyissä kokeissa FED-arvo 0.3 ylittyi yhdessä kokeessa kahdeksasta, 9.5 minuutin kohdalla. FED-arvo 1.0 ei ylittynyt yhdessäkään kokeessa. Varsinaiset CO-pitoisuudet kokeissa vaihtelivat pääsääntöisesti välillä 200-500 ppm. VTT:n nurkkapalokokeissa palavan huoneen ovi oli auki. Koesarjassa tehtiin kuitenkin kokeita myös sohvapalokuormalla, jolloin palavan huoneen ovi oli kiinni. Näissä kokeissa CO-pitoisuudet 5 minuutin kohdalla sytytys hetkestä olivat pääsääntöisesti välillä 100-400 ppm, mutta kohosivat 15 minuuttiin mennessä välille 600-1200 ppm. FED-arvo 0.3 ylittyi kokeesta riippuen ajassa 10-17 minuuttia. FED-arvo 1.0 ei ylittynyt. Johtopäätöksenä kokeista oli, että sprinklerin toiminnan ansiosta ihmisen poistuminen palavasta huoneesta olisi ollut mahdollista.

5. Sprinkleridemon simulointi

Osana paloteknisten laitteiden toiminnan demonstraatioita paloteatterissa suoritetaan sprinklerilaitteiston toiminnan demonstraatio. Tässä palokuormana käytetään kahta lieskahduslaatikkoa sekä palavan nesteallasta (kuva 19).



Kuva 19. Paloteatterin sprinkleridemon palokuorma. Vasemmalla piilopaloa simuloiva laatikko, keskellä avopaloa simuloiva laatikko, ja oikealla nesteallas.

Laatikot ovat lastulevyä, ja niiden sisälle asetetaan lastulevyn ja vaahtomuovin kappaleita. Toisen laatikon avoin sivu suunnataan ylöspäin ja toisen sivulle, millä luodaan avopalo ja piilopalo. Demonstraatiossa molemmat laatikot sekä nesteallas sytytetään yhtä aikaa, minkä jälkeen sprinklerin annetaan lauetta palossa syntyvän lämmön johdosta. Tämän jälkeen seurataan sprinklerin sammuttavaa vaikutusta palokuorman eri osiin. Sprinklerin ohella demonstraatiossa voi olla läsnä paloilmamaisimia.

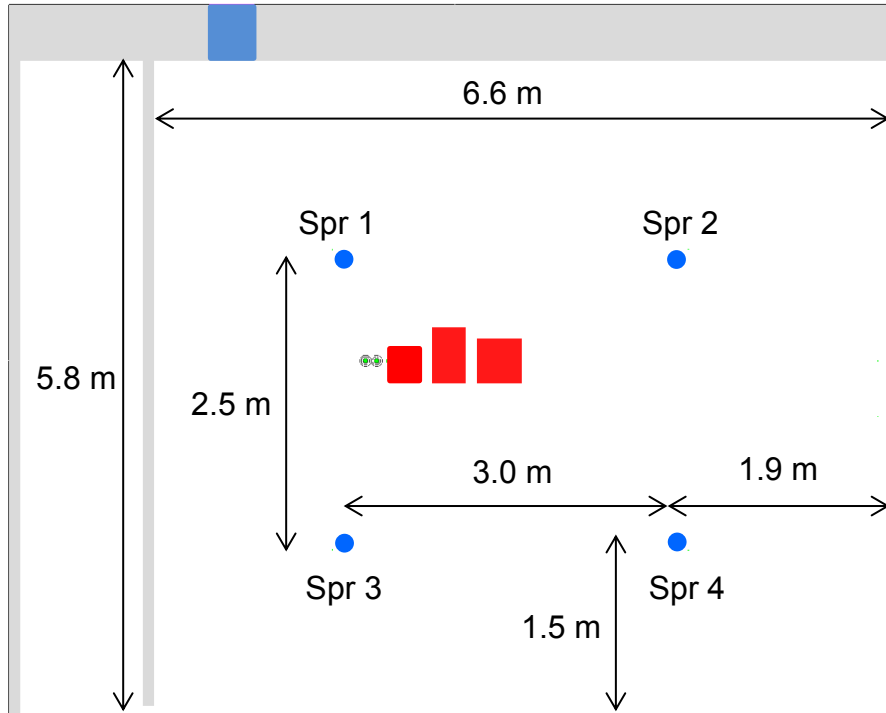
5.1 Simulointimalli

5.1.1 Palokuormat

Suoritetuissa simuloinneissa palokuormat kuvattiin voimakkaasti yksinkertaistaen. Palokuormat asetettiin 0.9 m korkeudelle lattiasta. Lieskahduslaatikoiden pohjat sekä nestealtan pinta oletettiin palaviksi pinnoiksi, joille määrättiin vakio paloteho. Laatikoiden sisältämää palokuormaa ei erikseen mallinnettu. Piilopaloa kuvaavan laatikon pohjapinta-ala oli 0.09 m² (0.3 m x 0.3 m), ja palotehoksi pinta-alayksikköä kohti valittiin 600 kW/m², jolloin

palotehoksi tuli 54 kW. Avopaloa kuvaavalle laatikolle vastaavat luvut ovat 0.15 m^2 ($0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$), 300 kW/m^2 , ja 45 kW, sekä nestealtaalle 0.16 m^2 ($0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$), 500 kW/m^2 , ja 80 kW. Sprinklerin sammutusvaikutus huomioitiin määrittämällä pinnoille sammutusparametri $E_COEFFICIENT=0.4$.

Palokuorman tyypillistä sijoittelua sprinkleridemossa on havainnollistettu kuvassa 20. Kolme punaista suorakaidetta kuvaavat palokuorman eri osia. Palokuorman vieressä olevat kaksi pyöreää symbolia kuvaavat paloilmaisimien sijaintia. Sininen suorakaide kuvaa paloteatterin takaseinässä olevien ilmanvaihtoaukkojen sijaintia. Palokuorma on tarkoituksellisesti sijoitettu lähelle sprinkleriä 'Spr 1', sillä käytännössä tämä on usein ainoa demossa käytetty sprinkleri.



Kuva 20. Palokuorman sijoittelu sprinkleridemossa. Kuvan punaiset suorakulmiot edustavat palokuorman eri osia (vrt. kuva 19).

5.1.2 Sprinklerit

Polttilassa on neljä kiinteästi asennettua paikkaa sprinklereille (Spr 1 – Spr 4, ks. kuva 20). Ne sijaitsevat symmetrisesti polttilan keskikohdan suhteen, 1.5 m päässä etu- ja takaseinistä, ja n. 1.9 m päässä sivuseinistä, jolloin sprinklerien keskinäiseksi etäisyydeksi tulee leveyssuunnassa n. 3 m ja syvyysuunnassa n. 2.5 m. Demoissa käytettävä sprinklerityyppi mallinnettiin spraysprinklerinä, jonka K-arvo on $80 \text{ l/min/bar}^{1/2}$, laukeamislämpötila on 68 °C ja RTI-arvo $50 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$. Sprinklerit toimivat vesiverkoston paineella, joka maksimissaan voi olla 8 bar. Tätä painetta käytettiin myös simuloinneissa, jolloin virtaama suutinta kohti on 226 l/min . Keskimääräiseksi pisarakooksi asetettiin $1000 \text{ }\mu\text{m}$ ja pisaroiden lähtönopeudeksi 20 m/s . Näillä oletuksilla mallinnus vastaa paloteatterissa yleisimmin käytettyä sprinklerityyppiä.

5.1.3 Paloilmaisimet

Paloteatterissa on käytössä useita eri paloilmaisintyyppiä. FDS-ohjelmalla ei näitä kaikkia pystytä simuloimaan. Tässä työssä mallinnettiin kolme erilaista paloilmaisinta. Lämpöilmaisimelle oletettiin RTI-arvoksi $5 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ ja ilmaislämpötilaksi 68 °C . Lisäksi mallinnettiin kaksi savuilmaisinta, joissa savun kuljettuminen ilmaisimen sisään kuvattiin neliparametriseen Clearyn mallin avulla. Toiselle ilmaisimelle nämä parametrit otettiin FDS:n

validointioppaan simuloinneista (NIST Smoke Alarms), samoin kuin ilmaisukynnys 6.6 %/m. Toiselle ilmaisimelle käytettiin FDS:n käyttäjän oppaan antamia oletusparametrejä sekä ilmaisukynnystä 3.24 %/m.

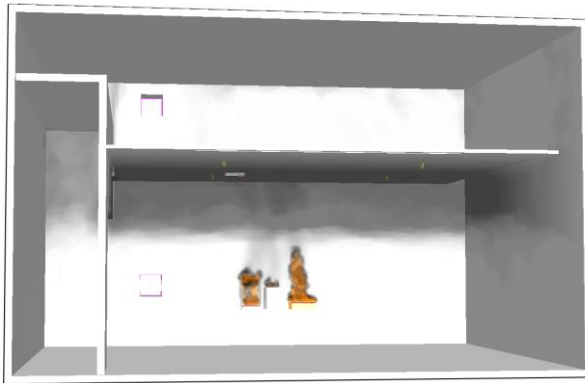
5.1.4 Muut järjestelyt

Simuloinneissa liikutettava katto oli asetettu korkeudelle 3.0 m, jota tyypillisesti käytetään sprinkleridemossa. Ilmanvaihtoa varten teatterin poistoaukon dynaaminen paine asetettiin arvoon 10 Pa. Ilmanvaihto-olosuhteiden vaikutusta tutkittiin myös sulkemalla kaikki katon ja seinien väliset aukot (vastaten jälleen todellisen huoneen tapausta). Tällöin polttilan laitilan puoleiseen seinään (auditorion puoleinen nurkka, katonraja) tehtiin vastaavanlainen poistoilma-aukko kuin huonepalon tapauksessa.

5.2 Tulokset

5.2.1 Perustapaus

Kuvassa 21 on verrattu liekin muotoa ja savun leviämistä simulaation ja todellisen sprinkleridemon (SD-1) kesken juuri ennen hetkeä, jolloin sprinkleri laukeaa. Koska lieskahduslaatikoista ja nestealtaasta ei ollut olemassa mitattua palotehoa, jouduttiin simuloinnissa käytetty paloteho arvioimaan kuvan 21 kaltaisella vertailulla, jossa liekin muoto pyrittiin silmämääräisesti asettamaan todellisuutta vastaavaksi. Kokonaispalotehoksi muodostui tällöin 179 kW, joka laukaisi sprinklerin (Spr 1) 42 s kuluttua syttymishetkestä. Spr 1 oli ainoa sprinkleri, joka simulaatiossa laukesi. Kokeessa, josta kuvan 21 kuvakaappaus on otettu (22.10.2014), sprinkleri laukesi 44 s kuluttua hetkestä, jolloin palokuorman kaikki osat oli sytytetty.

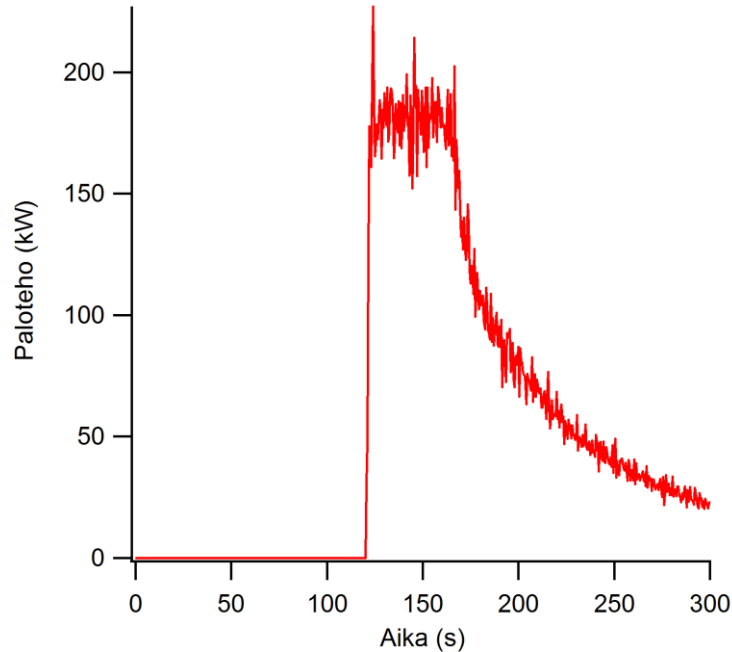


Kuva 21. Liekin muoto ja savun leviäminen sprinkleridemossa juuri ennen sprinklerin laukeamista (SD-1).

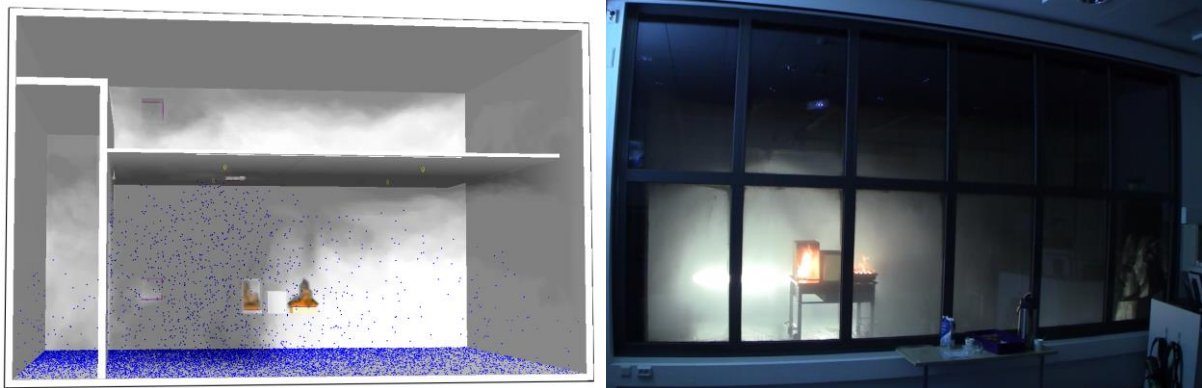
Simuloinnissa savuilmaisimet laukesivat käytännössä heti kun savu saavutti ne (ilmaisuaikat 3.4 s ja 5.1 s sytytyshetkestä), lämpöilmaisimen laukeaminen tapahtui 20 s sytytyshetkestä. Näiden osalta vertailua kokeisiin ei voi tehdä, koska simuloidut ilmaisimet eivät perustu paloteatterissa käytössä olevien ilmaisimien spesifikaatioihin. Tulos kuitenkin osoittaa laadullisesti, että savuilmaisin toimii lämpöilmaisinta nopeammin, ja herkkä lämpöilmaisin taas on nopeampi kuin sprinkleri.

Paloteho simuloidusta sprinkleridemosta on esitetty kuvassa 22. Sytytys tapahtuu hetkellä 120 s. Tämä johtuu siitä, että ilmanvaihdon aiheuttama virtauskuva polttilassa vaatii aikaa stabiloituaakseen. Sytytyshetkellä paloteho nousee välittömästi keskimääräiseen arvoon 179 kW (kohina palotehokäyrässä aiheutuu palamisen turbulentista luonteesta). Sprinkleri laukeaa ajanhetkellä 162 s, jonka jälkeen paloteho lähtee pienenemään likimain eksponentiaalisesti.

Kuvassa 23 on esitetty liekin muoto ja savun leviäminen ajanhetkellä 192 s (30 s sprinklerin laukeamisen jälkeen) simulaatiossa ja kokeessa. Tästä havaitaan, että sprinkleri on sammuttanut avopaloa simuloivan lieskahduslaatikon täysin, kun taas nesteallas ja piilopalo jatkavat palamistaan, joskin pienentyneinä. Simulointituloksesta havaitaan myös, että sprinkleristä purkautuva vesisuihku sekoittaa katon alle kertyneen savupatjan ja polttilan alaosassa olevan puhtaan ilman kerroksen vesisuihkun vaikutusalueelta aivan vastaavasti kuin havaittiin huonepalosimuloinneissa.



Kuva 22. Paloteho sprinkleridemon simuloinnissa (SD-1).

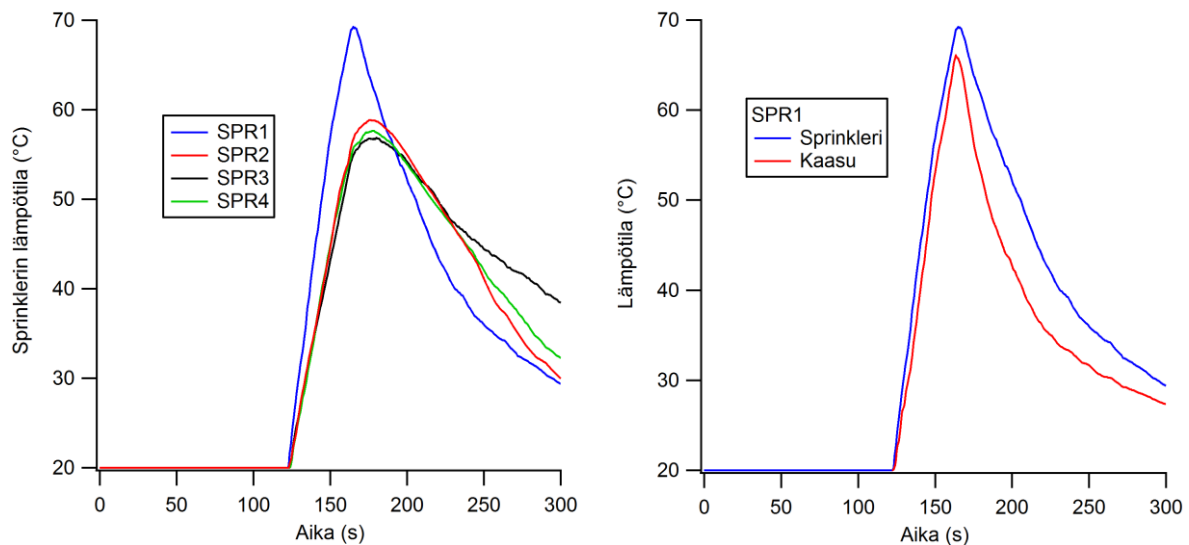


Kuva 23. Liekin muoto ja savun leviäminen sprinkleridemossa 30 s sprinklerin laukeamisen jälkeen (SD-1).

Kuvassa 24 on vasemmalla esitetty sprinklerien lasikapselien lämpötilat simuloinnissa. Kuvasta nähdään, että sprinklerin Spr 1 lauetessa muut sprinklerit ovat vielä noin 10 asteen päässä laukeamislämpötilastaan. Sprinklerin Spr 1 laukeaminen kääntää kaikkien lasikapselien lämpötilat nopeasti laskuun. Tämä johtuu yhtäältä vesisuihkun kaasua jäähdyttävästä vaikutuksesta, ja toisaalta palotehon pienenemisestä.

Kuvan 24 oikealla puolella on vertailtu launneen sprinklerin lasikapselin lämpötilaa sprinklerin vieressä suoritettuun kaasulämpötilan mittaukseen. Käytännön kannalta lämpötilat ovat riittävällä tarkkuudella samat. Kuitenkin on hieman yllättävää, että simuloinnissa mitattu kaasulämpötila on alhaisempi kuin sprinklerin lasikapselin lämpötila. Tälle voidaan löytää

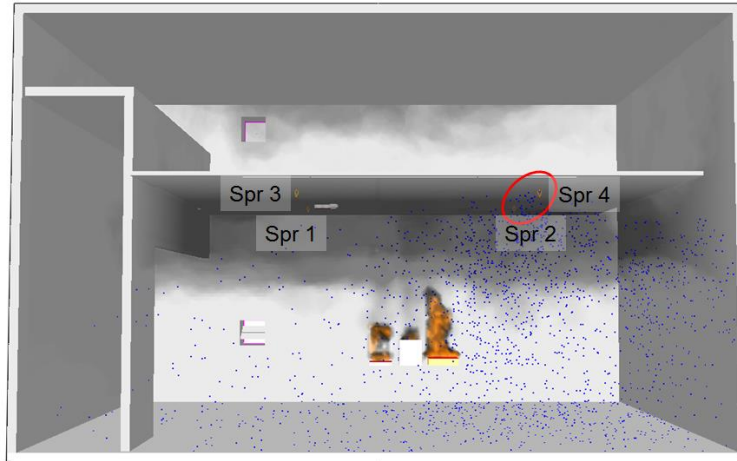
kaksi selittävää tekijää. Ensiksi, kaasulämpötilan mittauspiste on 10 cm etäisyydellä kattopinnasta, kun taas sprinklerin lasikapseli on 5 cm etäisyydellä. On siis mahdollista, että mittauspiste on viileämmässä kohdassa kattosuihkua kuin sprinkleri. Lisäksi laskennassa käytetty 5 cm paikkaerotuskyky saattaa olla liian karkea kattosuihkun lämpötilaprofiilin tarkaksi erottamiseksi. Toiseksi, todelliset lämpötila-anturit ovat 3 mm paksuja, vaipallisia antureita. Anturielementin paksuus otettiin huomioon simuloinnissa, mutta anturin mineraalieristettä ei. Tällainen paksu anturi seuraa todellista kaasulämpötilaa jollakin viiveellä. Simuloinnissa ei tällaista vertailua tehty, ja toisaalta anturin ja sprinklerin lasikapselin keskinäisestä lämpöherkkyydestä ei ole tietoa. Kuitenkin mikäli anturin terminen massa on suurempi kuin lasikapselilla, seurauksena on, että anturin lukema on sprinklerin laukeamishetkellä alhaisempi kuin sprinklerin nimellinen laukeamislämpötila.



Kuva 24. Vasemmalla: sprinklerien lasikapselien lämpötila sprinkleridemon simuloinnissa. Oikealla: Lauenneen sprinklerin lasikapselin lämpötila ja kaasulämpötila launneen sprinklerin vieressä. (SD-1)

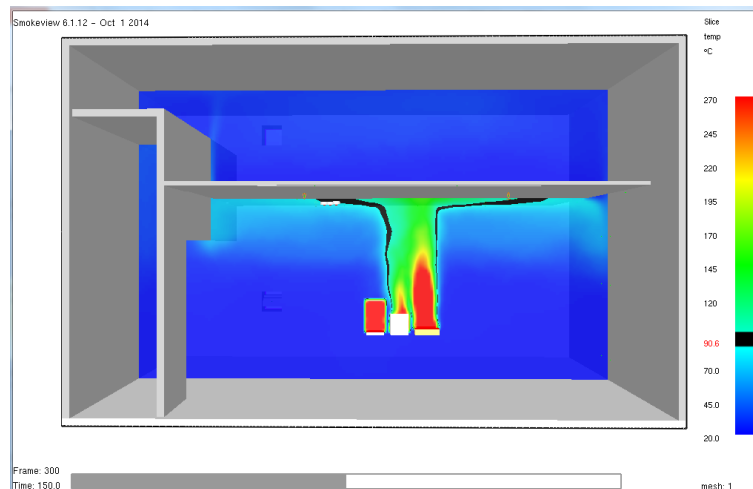
5.2.2 Palokuorman paikan vaikutus

Palokuorman paikan vaikutusta sprinklerien ja palonilmaisimien toimintaan tarkasteltiin siirtämällä palokuormaa 0.5 m kohti laittilan puoleista sivuseinää (tapaus SD-2), jolloin se sijaitsee likimain symmetrisesti sprinklerien keskellä. Kuten kuvasta 25 havaitaan, tällä pienellä siirroksella on oleellinen merkitys sprinklerijärjestelmälle, sillä tässä tapauksessa sprinklerit Spr 1 ja Spr 3 eivät laukea lainkaan, mutta sprinklerit Spr 2 ja Spr 4 laukeavat 52 s kuluttua syttymishetkestä. Palokuorman paikalla on vain vähäinen vaikutus savu- ja lämpöilmaisimien ilmaisuaikeihin.



Kuva 25. Sprinklerien laukeaminen sprinkleridemossa, kun palokuormaa on siirretty 0.5 m laitetilaan päin (SD-2).

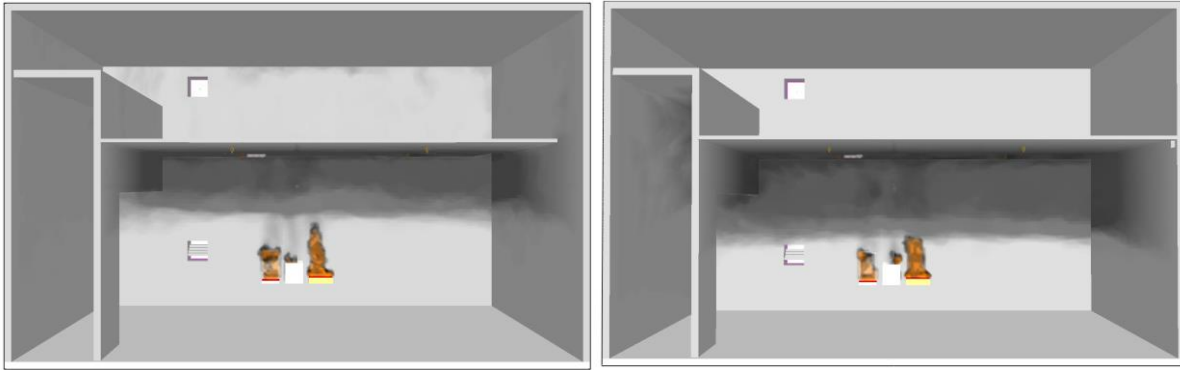
Yhtenä selittävänä tekijänä on liikuteltavan katon ja laitetytilän seinän välinen aukko, josta suuri osa palamisen tuottamasta lämmöstä siirtyy katon yläpuolelle. Tämä palon ja ilmanvaihdon yhteisesti tuottama virtauskuva johtaa siihen, että palopatsas taipuu aavistuksen verran laitetilaan päin kohdatessaan liikuteltavan katon alapinnan. Tätä on havainnollistettu kuvassa 26. Vaikka vaikutus ei ole suuri, se on sprinklerien aktivoinnin kannalta ratkaiseva tapauksessa, jossa palokuorma sijaitsee symmetrisesti sprinklereihin nähden.



Kuva 26. Palopatsaan taipuminen kohti laitetilan seinää (SD-2).

5.2.3 Ilmanvaihto-olosuhteiden vaikutus

Sprinkleridemon suorittaminen todellista huonetta vastaavissa olosuhteissa ei tuo mitään merkittäviä muutoksia simulointituloksiin, kun palokuorma on kuvan 20 mukaisessa paikassa. Ainoa sprinkleri (Spr 1) laukeaa 65 s kuluttua sytytyshetkestä. Savuilmaisimet laukeavat 3.1 ja 4.1 s kuluttua sytytyshetkestä, ja lämpöilmaisin 10 s sytytyshetkestä. Palotehokäyrä sprinklerin lauettua käyttäytyy miltei identtisesti kuvan 22 käyrän kanssa. Kuvassa 27 verrataan savupatjan paksuutta sprinklerin laukeamishetkellä paloteatterin ja todellisen huoneen tapauksissa. Todellisen huoneen tapauksessa savupatja laskeutuu jonkin verran alemmaksi, koska poistoaukko on kooltaan pieni.



Kuva 27. Savupatjan paksuus sprinklerin laukeamishetkellä paloteatterin (SD-1, vasemmalla) ja todellisen huoneen (SD-3, oikealla) tapauksissa.

6. Johtopäätökset ja suositukset

Tässä luvussa esitettävät johtopäätökset ja suositukset perustuvat selvitystyön vaiheiden 1 ja 2 tuloksiin, sekä raporttien kirjoittajien kokemukseen.

6.1 Yleistä

Paloteatterin polttilan paloteknisesti merkittävimmät fyysiset ominaisuudet ovat suhteellisen pieni tilavuus, polttilan seinä- ja kattorakenteiden rajallinen lämmönkesto, savunpoistopuhaltimiin perustuva ilmanvaihto, liikuteltavan katon ja seinien väliset aukot, sekä liikuteltavan katon yläpuolinen tila. Fyysisistä ominaisuuksista johtuu, että paloteatteri soveltuu vain pienikokoisten palojen, kuten paloteknisten laitteiden toiminnan demonstraatioihin tai huonepalon alkuvaiheen kehityksen demonstrointiin.

Tässä työssä tehdyt huonepaloa ja paloteknisten laitteiden demonstraatiota koskeneet palonsimuloinnit osoittivat, että vastaavien demonstraatioiden suorittaminen realistisesti on mahdollista paloteatterissa. Tämä kuitenkin edellyttää, että demonstraatioiden instrumentointia sekä suoritustapaa kehitetään jatkossa siten, että demonstraatiot ovat informatiivisempia ja toistettavampia.

Simulointitulokset voivat myös auttaa paremmin ymmärtämään teatterissa jo aiemmin suoritettuja demonstraatioita ja niissä saatuja mittaustuloksia.

6.2 Esitys paloteatterin ja mittausjärjestelyiden kehittämistarpeista suhteessa nykyiseen käyttöön

6.2.1 Polttilan ilmanvaihto

Tämän työn simuloinneissa tehtiin oletus, jonka mukaan pientä savunpoistopuhallinta ohjaavan taajuusmuuttajan ollessa täydellä teholla teatterin ilmanvaihdon määrä on $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Edelleen oletettiin, että tuloilma polttilaan tulee ainoastaan tuloilma-aukosta, polttilan ollessa muutoin hermeettisen tiivis. Todellista ilmanvaihdon määrää ei kuitenkaan ole kokeellisesti määritetty. Ilmanvaihdon määrän mittaaminen niin poistoilma- kuin tuloilma-aukosta taajuusmuuttajan asetuksen funktiona on suositeltavaa. Mittaukseen voisi samalla yhdistää paine-eromittauksen polttilan ja ulkoilman välillä. Näin saataisiin tietoa paitsi ilmanvaihdon määrästä, myös polttilan tiiveydestä. Mittausten tekoa tulisi harkita sekä kesä- että talviolosuhteissa.

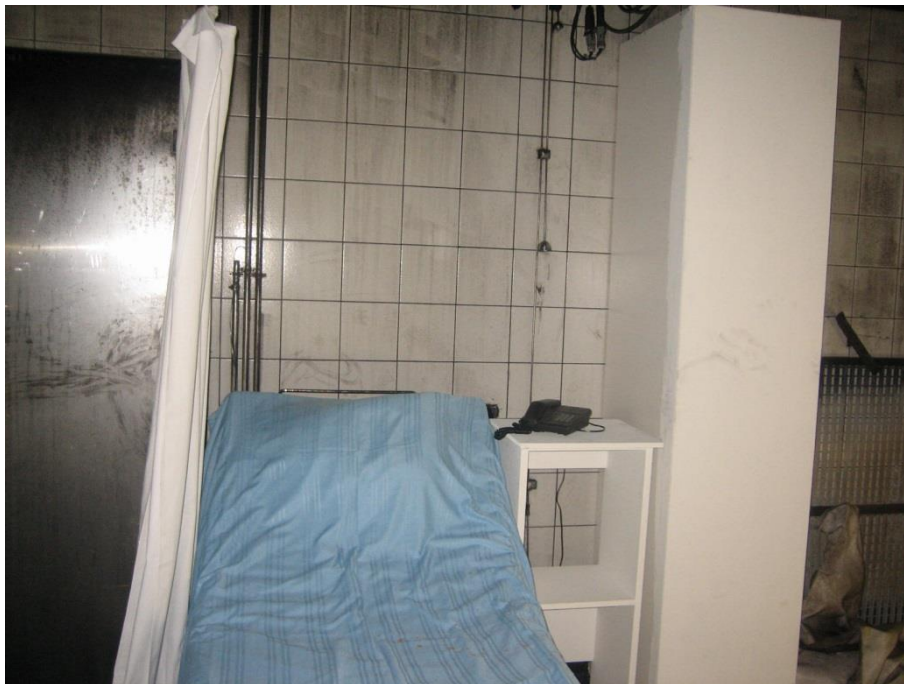
Ilmanvaihtoa koskeneet simuloinnit osoittivat, että katon alapuoliseen tilaan tuleva tuloilma kulkeutuu katon yläpuoliseen tilaan pääasiassa katon ja auditorion lasiseinän välistä sekä

katon ja laittilan puoleisen seinän välistä. Tämä luo polttotilaan epäsymmetrisen virtauskuvan, joka saattaa vaikuttaa lämmön ja savun leviämiseen katon alapuolisessa tilassa, erityisesti jos palo on pienikokoinen tai vain kytevä. Lisäksi, mikäli savunpoistopuhallinta käytetään suurella teholla, virtauskuva saattaa muodostua pyörteiseksi, mikä vaikuttaa savun ja lämmön leviämiseen ei-ennustettavalla tavalla. Tästä syystä erityisesti täysikokoisessa polttotilassa tehtävien demojen suhteen olisikin arvioitava, voiko demonstraatiot suorittaa siten, että ilmanvaihto on kokonaan pois kytkettynä (ja tuloilma-aukon pelti suljettuna) sytytysketkestä siihen asti, kunnes kaikki halutut ilmaisimet ja sprinklerit ovat toimineet.

6.2.2 Huonepalo

Huonepalon kohdalla on yhdeksi keskustelun aiheeksi noussut liikuteltavan katon yläpuolisen tilan vaikutus kaasupitoisuuksiin huoneessa. Näin siksi, että huoneen ilmanvaihdon poistoaukko avautuu tähän yläpuoliseen tilaan. Tässä työssä tehdyt simuloinnit ovat kuitenkin osoittaneet, että katon yläpuolisen tilan vaikutus kaasupitoisuuksiin huoneessa on varsin pieni. Yhtenä selittävä tekijänä tälle on, että kaikissa tarkastelluissa ilman poistoaukon toteutuksissa tuloilma-aukko pysyi samana, ja se rajoitti ilmanvaihdon määrää tapauksissa, joissa poistoilma-aukon pinta-ala oli tuloilma-aukon pinta-ala suurempi. Riippumatta siitä, miten ilmanvaihto jatkossa tullaan huonepalodemossa toteuttamaan, on oleellista, että ilmanvaihdon aukkojen paikat ja koot dokumentoidaan huolellisesti sekä piirroksin että valokuvin. On myös suositeltavaa, että ilmanvaihdon määrä huoneen läpi mitataan vastaavasti kuin koko polttotilan ilmanvaihdon tapauksessa.

Tämän työn huonepalosimulointeja suunniteltaessa pyrittiin kiinnittämään erityistä huomiota palokuorman ja mittapisteiden sijoitteluun. Paloteatterissa aiemmin tehdyissä huonepaloissa on käytetty järjestelyjä, jotka ovat voineet vaikuttaa mittaustulosten ja paloskenaarioiden väliseen vastaavuuteen. Esimerkki tällaisesta on kuvassa 28, jossa on yksityiskohta potilashuonepalon järjestelystä.



Kuva 28. Yksityiskohta potilashuoneesta kuvaavasta koejärjestelystä.

Palon syttymiskohta sijaitsee vuoteen vieressä olevan verhon juurelle asetetussa roskakorissa. Verho ja vuode on sijoitettu vasten laittilan seinää kohtaan, jossa sijaitsevat polttotilan seinän kiinteäasetteiset mittapisteet lämpötilalle (verhon vieressä) ja kaasuille (yöpöydän kohdalla). Ilmanvaihdon poistoaukko sijaitsee suoraan sytytyskohdan yläpuolella.

Mittapisteet sijaitsevat niin lähellä palokuormaa, että niiden lukemat saattavat merkittävästi poiketa huoneen keskimääräisistä olosuhteista, erityisesti mikäli mittapisteet joutuvat liekin sisään palon leviessä. Lisäksi joidenkin mittapisteiden sijainti esteiden takana voi aiheuttaa poikkeamaa huoneen keskimääräisistä olosuhteista. Ilmanvaihdon poistoaukon sijainti suoraan syttymiskohdan yläpuolella voi johtaa siihen, että merkittävä osa palokaasuista kulkeutuu katon yläpuoliseen tilaan palon alkuvaiheessa, jolloin huoneesta mitatut pitoisuudet aliarvioivat tilannetta todelliseen huoneeseen verrattuna. Samoin lämmön kuljettuminen katon yläpuoliseen tilaan voi viivästyttää sprinklerin laukeamista.

Suosituksena jatkoa varten onkin sijoittaa niin palokuorma kuin mittapisteet riittävälle etäisyydelle (1-2 m) ilmanvaihtoaukoista, ja lisäksi jättää riittävä etäisyys (1-2 m) palokuorman ja mittapisteiden välille. Mittapisteiden tulee sijaita esteettömässä kohdassa. Esteeksi voidaan katsoa myös laittilan seinä, joten olisi suositeltavaa, että mittapisteiden etäisyyttä seinästä voitaisiin kasvattaa. Mikäli halutaan varautua jatkossa useammantyyppisiin huonepalodemoihin, olisi pohdittava kiinteäasenteisten mittapisteiden muuttamista liikuteltaviksi.

Tietokonesimulointien yhtenä etuna on, että simulointeihin on mahdollista sisällyttää lukuisia erilaisia piste-, taso-, ja tilavuusmittauksia esimerkiksi kaasupitoisuuksille. Kokeellisesti mittapisteiden lukumäärä on aina kustannuskysymys. Tämän työn simuloinnit kuitenkin ovat osoittaneet, että huonepalon kaasupitoisuuksien ymmärtämisen kannalta olisi aivan keskeistä pystyä mittaamaan kaasupitoisuuksia sekä huoneen ylä- että alaosassa jatkuvatoimisesti sytytyshetkestä aina kokeen päättymiseen asti. Tällöin sprinklerin toiminnan aiheuttama savupatjan ja puhtaan ilman kerroksen sekoittuminen tulisi demonstroitua määrällisesti, ei ainoastaan visuaalisesti. Tarkastelemalla esimerkiksi pelkästään kaasupitoisuuksia huoneen alaosassa kokeen aikana voidaan osin virheellisesti päätellä, että sprinklerin toiminta synnyttää ihmisille haitallisia kaasuja. Polttoaineen kastuminen voi luonnollisesti lisätä haitallisten kaasujen tuottoa, mutta koska paloteknisesti 'tuotto' tarkoittaa palamistuotteen massaa suhteessa palaneen polttoaineen massaan, sprinklerin aiheuttama palotehon pieneneminen kompensoi tuoton kasvua.

Tietokoneella simuloidut huonepalot ovat erittäin toistettavia. Kokeelliset huonepalodemot, jotka myös ovat simuloituja huonepaloja, ovat luonnostaan vähemmän toistettavia. Paloteatterissa tehdyissä demoissa on saattanut esimerkiksi käydä niin, että periaatteessa kahdessa samalla tavoin järjestetyssä kokeessa on sprinkleri lauennut toisessa, toisessa ei. Koejärjestelyn huono toistettavuus herättää kysymyksen siitä, voidaanko erityyppisten sammutusjärjestelmien sammutustehoa mielekkäästi verrata toisiinsa. Toistettavuus vaikuttaa myös siihen, minkä mielikuvan demonstraation katsoja saa sprinklerijärjestelmän suorituskyvystä. Mikäli palo leviää juuri sen verran, että sprinkleri laukeaa (ja sammuttaa palon helposti), katsojalle jää mielikuva sprinklerin hyvästä suorituskyvystä, mutta ei tietoa suorituskyvyn todellisesta syystä, joka on huonosti paloa levittävä koejärjestely. Toistettavuuden lisääminen kokeissa on mahdollista, mutta vaatii hieman vaivannäköä. Tämän työn huonepalosimuloinneissa käytetty UL 1626 -standardiin perustuva palokuorma on esimerkki järjestelystä, joka on sangen toistettava myös kokeellisesti. Näin on oltavakin, koska palokuormaa käytetään asuntospinklerien hyväksyntätesteissä. Sen ominaispiirteitä ovat yksinkertaiset mutta hyvin määritellyt materiaalit, yksinkertainen geometria, selkeät sytytylähteet ja sytytysproseduuri, sekä kyky levittää paloa niin suureksi, että ilman sammutusjärjestelmää seurauksena on huoneen yleissytyminen. Tämä palon leviämispotentiaali varmistaa myös sen, että sprinkleri laukeaa aina. Yhtenä mahdollisena kehittämiskohteenä onkin paloteatterin fyysisille ominaisuuksille sopivan (yhden tai useamman), toistettavan huonepaloskenaarioiden kehittäminen. Osana tätä kehitystyötä tulisi harkita myös sellaisen huonepalodemon tekoa, jossa olisi läsnä avoin ovi (käytännössä väliseinään puhkaistaisiin oviaukko). Tällöin ilmanvaihto hoituisi luonnollisesti oven läpi, katon rajassa olevat aukot voitaisiin tukkia kauttaaltaan, ja polttotilan ilmanvaihto käynnistää vasta sammutusjärjestelmän lauettua.

6.2.3 Sprinkleridemo

Kaasulämpötilan mittaus sprinklerin lähellä on käytännössä osoittautunut melko huonosti toistettavaksi, sillä kaasulämpötila sprinklerin lauetessa on toisinaan suurempi ja toisinaan pienempi kuin sprinklerin nimellinen laukeamislämpötila. Tämän työn simuloinnit osoittivat, että mikäli paksu vaipallinen anturi on etäämmällä katosta kuin sprinklerin lasikapseli, sen antama lukema voi sprinklerin laukeamishetkellä olla alhaisempi kuin sprinklerin laukeamislämpötila. Tällaiset tulokset voivat antaa demoja seuraavalle yleisölle harhaanjohtavan kuvan sprinklerien luotettavuudesta. Suosituksena on, että kaasulämpötilan mittauspiste (siis anturin kärki) asetetaan samalle korkeudelle sprinklerin lasikapselin kanssa. Anturityyppi voisi olla herkempi, ts. anturi voisi olla ohuempi, jolloin se paremmin seuraisi todellista kaasulämpötilaa.

Simuloinnit, joissa oli läsnä neljä sprinkleriä, osoittivat, että sprinklerien laukeaminen on herkkä palokuorman paikalle. Tämän, sekä sprinklerin luona tapahtuvan kaasulämpötilan mittauksen toistettavuuden vuoksi palokuorman paikka olisi hyvä pyrkiä pitämään mahdollisimman samana kerrasta toiseen. Myös lieskahduslaatikoiden sisään asetettavien vahtomuovien ja lastulevyn palasten asettelun voisi vakioida, jolloin palonkehitys laatikoiden sisällä muuttuisi toistettavammaksi.

Liikuteltavan katon ja laittilan puoleisen seinän välinen suuri aukko aiheuttaa palopatsaan taipumista laittilaan päin. Vaikkakin tämän merkitys käytännön kannalta on vähäinen, ihanteellista olisi, että savu ja lämpö nousisivat suoraan ylöspäin ja jakautuisivat symmetrisesti kaikkiin suuntiin kattosuihkussa. Ilmanvaihdon kytkeminen pois päältä auttaa asiaa osin, mutta parasta olisi, jos katon ja laittilan puoleisen seinän välistä aukkoa voitaisiin pienentää siten, että sen pinta-ala olisi samaa suuruusluokkaa muiden katon ja seinien välisten aukkojen kanssa.

Lähdeviitteet

1. Mott, R.L. and Untener, J.A. Applied Fluid Mechanics, 7th Edition. Prentice Hall, 2014.
2. UL 1626. Residential Sprinklers for Fire-Protection Service, 3rd edition. Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, IL, 2001.
3. NFPA 92B. Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces. 2009 Edition. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
4. Työterveyslaitos. OVA-ohje: hiilimonoksidi. www.ttl.fi/ova/hiilimono.html (viitattu 16.6.2015)
5. Jukka Vaari, Kati Tillander, Tuomo Rinne ja Tuomas Paloposki. Asuntosprinklaus Suomessa. Vaikuttavuuden arviointi, osa 2. VTT Tiedotteita 2527. www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2527.pdf (viitattu 16.6.2015)
6. ISO 13571:2007. Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data.