

# FDS-OHJELMAN KÄYTTÖ SUUREN KOHTEEN TULIPALON SIMULOINNISSA

Tuula Hakkarainen ja Jukka Hietaniemi  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
PL 1803, 02044 VTT

## Tiivistelmä

Tässä työssä esitellään kolmiulotteiseen virtauslaskentaan perustuvan FDS-palonsimulointiohjelman käyttöä suurten kohteiden tulipalon simuloinnissa. Esimerkkikohteena on Lappi Areena, monitoimihalli Ounasvaaran liikuntakeskusalueella. Tuloksia verrataan Lappi Areenan palonsimulointiin CFAST-vyöhykemalliohjelmalla. Tarkastelun painopiste on erityisesti henkilöturvallisuudessa lämpötilan, säteilyvuon tiheyden, savun ja hiilimonoksidipitoisuuden perusteella arvioituna. Vaikka FDS:n ja CFAST:n laskentatuloksissa on eroja, CFAST-simulointiin perustuvan paloturvallisuussuunnittelun pohjalta tehdyt ratkaisut turvaavat poistumisen tästä kohteesta käytettyjen mitoituspalojen tyyppisten tulipalojen sattuessa. FDS-ohjelman laskentatulosten perusteella lämpötilat ja CO-pitoisuudet pysyvät varsin matalina, eikä savu heikennä näkyvyyttä poistumisteiden tasossa. Suurin osa poistumisteistä on käyttökelpoisia läpi koko simulointijakson myös lämpösäteilytason huomioiden.

## JOHDANTO

Kolmiulotteiseen virtauslaskentaan perustuva Fire Dynamics Simulator –kenttämalliohjelma (FDS) [1, 2] on nykyhetken edistyneimpiä palonsimulointiohjelmiä. FDS-ohjelmaa kehitetään jatkuvasti, jotta sillä voitaisiin yhä luotettavammin ja monipuolisemmin mallintaa tulipalon kehittymistä. Yhtenä kehityskohteena on suurten kohteiden simuloinnin mahdollistaminen kehittämällä rinnakkaislaskentaa ja monilohkojärjestelmiä.

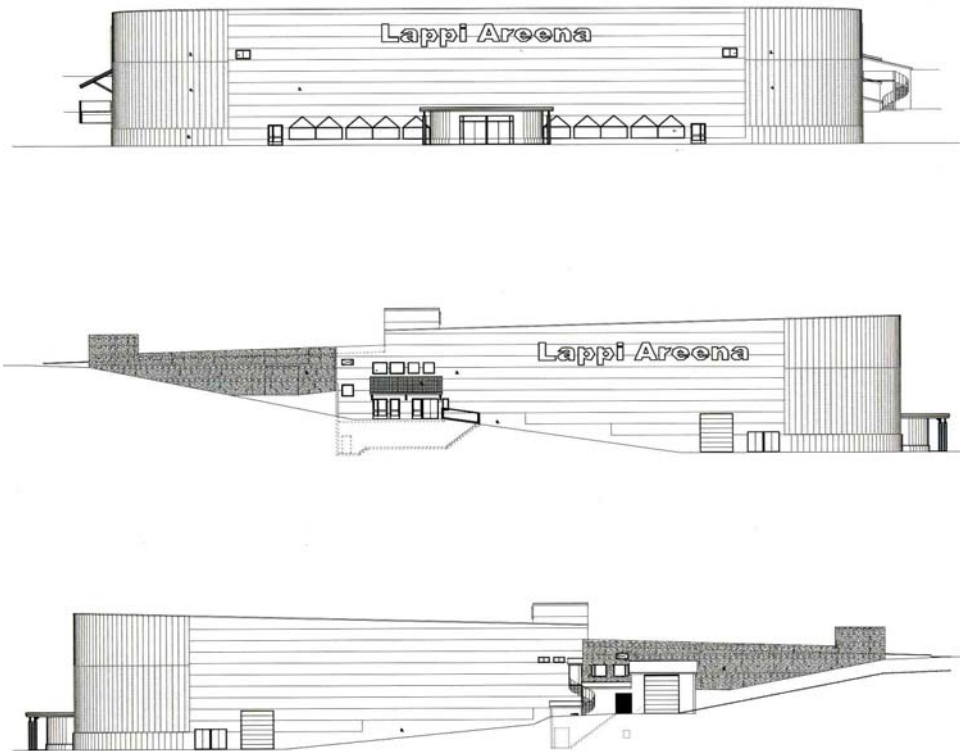
Tässä työssä on mallinnettu tulipalon kehittymistä monitoimihallissa FDS-ohjelmalla. Esimerkkikohteena on Ounasvaaran liikuntakeskusalueella Rovaniemellä sijaitseva Lappi Areena, jonka paloturvallisuussuunnittelua CFAST-vyöhykemalliohjelmalla on aiemmin käsitelty Ympäristöopas 103:ssa [3]. Näin ollen voidaan verrata vyöhyke- ja kenttämallin antamia laskentatuloksia toisiinsa. FDS-ohjelmassa rakennuksen geometria ja palokuormat sekä tulipalon kehittyminen voidaan kuvata tarkemmin kuin CFAST-ohjelmassa. Lisäksi FDS tuottaa monipuolisempia laskentatuloksia kuin CFAST.

## KOHTEEN KUVAUS

Suuren kohteen palonsimulointiin valittiin esimerkkikohteeksi Lappi Areena, joka valmistui Rovaniemelle Ounasvaaran liikuntakeskusalueelle loppuvuodesta 2003. Lappi Areena on monitoimihalli, jonka peruskäyttönä on jääliikunta ja lisäkäyttönä palloilu, suuret kokoukset, konsertit, tanssit ja messut.

Lappi Areenassa on kaksi jäähallia (kilpailu- ja harjoitushalli) sekä monitoimihallikäyttöjen tarvitsemat oheistilat. Rakennuksen tilavuus on  $75071 \text{ m}^3$ , kerrosala  $8885 \text{ m}^2$ , kokonaisala  $8885 \text{ m}^2$  ja pohjapinta-ala  $6632 \text{ m}^2$ . Rakennuksen suurin korkeus on noin 14,3 m. Rakennus on pääosin yksikerroksinen ja osittain kaksikerroksinen. Lisäksi siinä on kellari- ja ullakkotiloja.

Palonsimulointi on rajattu Lappi Areenan kilpailuhalliin, koska siellä esiintyvät suurimmat henkilömäärät ja paloriskit eri käyttötilanteissa. Tarkastelun painopiste on erityisesti henkilöturvallisuudessa lämpötilan, lämpösäteilyn, savun ja hiilimonoksidipitoisuuden perusteella arvioituna. Kuvassa 1 esitetään Lappi Areenan julkisivut ja kuvassa 2 pohjapiirros hallin toisesta kerroksesta.

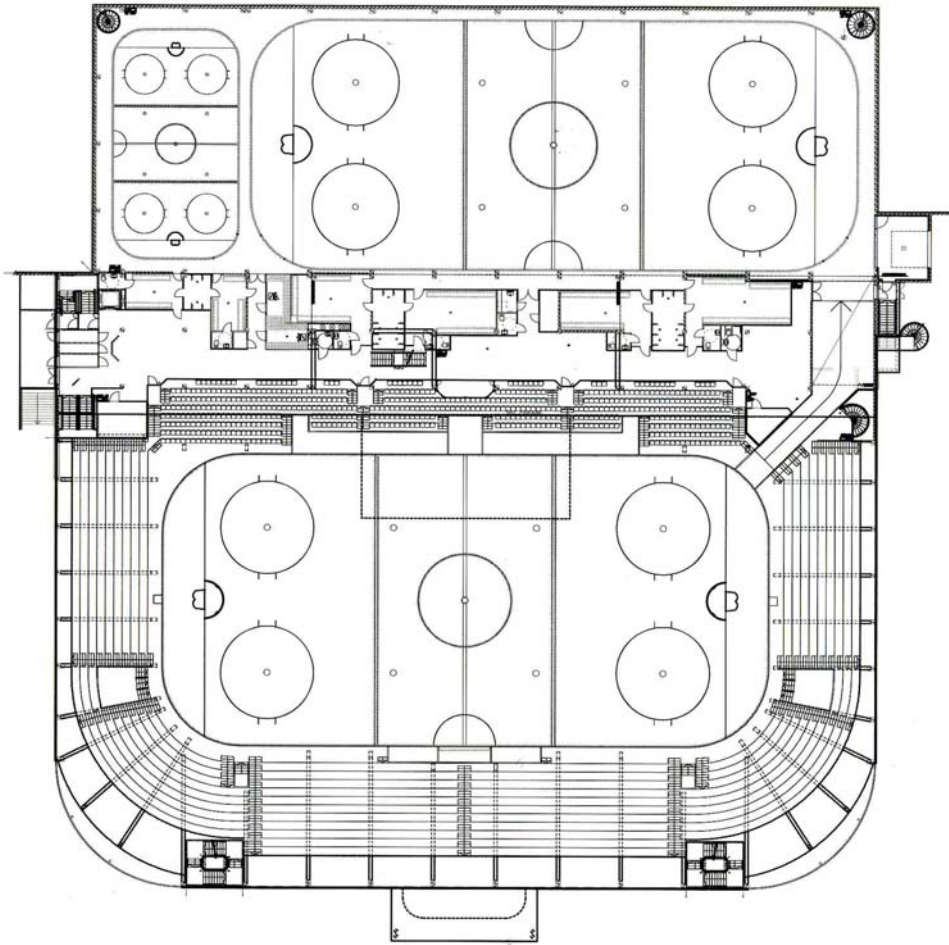


*Kuva 1. Lappi Areenan julkisivut.*

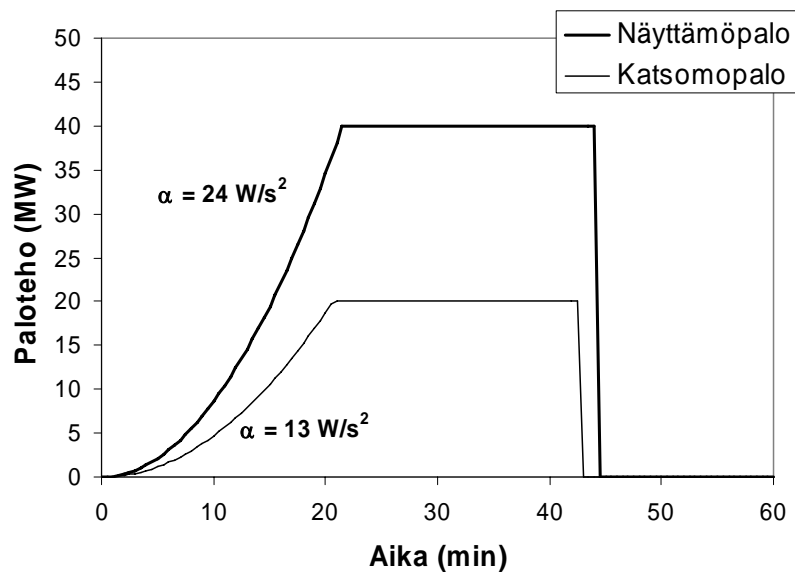
Ympäristöopas 103:ssa [3] esitetyssä paloteknisessä analyysissä päädyttiin esittämään Lappi Areenan suojaustasoksi automaattista paloilmointia ja tavallista alkusammutuskalustoa. Näin ollen rakennusta ei ole varustettu sprinklerilaitteistolla.

### **Paloskenaariot**

Tutkittuja palotapauksia oli kaksi: näyttämöpalo ja katsomopalo. Palotehon oletettiin kasvavan  $t^2$ -käyrän mukaisesti maksimiarvoonsa, minkä jälkeen palo jatkuu vakioteholla, kunnes palokuorma loppuu. Palotehokäyrät esitetään kuvassa 3. Simulointien laskentajakso oli 60 minuuttia palon syttymisestä. Pääosin katsomon istuimista sekä jäänpeitto- ja lattialevyistä (esim. konserttikäytössä) koostuvat palokuormat on arvioitu Ympäristöoppaassa 103 [3, s. 47 - 50].



Kuva 2. Lappei Areenan pohjapiirros (2. kerros).



Kuva 3. Näyttämöpalon ja katsomopalon oletetut palotehokäyrät. Kasvuvaiheessa paloteho  $Q$  määräytyy yhtälöstä  $Q = \alpha t^2$ .

Savunpoiston suhteen tarkasteltiin kahta tapausta: savunpoiston oletettiin toimivan automaattisesti savuilmajohdinten ohjaamana 150 s:n kuluttua tai lämpösulakkeen laukeamisesta tai käsiohjauksesta 380 s:n kuluttua palon syttymisestä.

## KENTTÄ- JA VYÖHYKEMALLIN VERTAILU

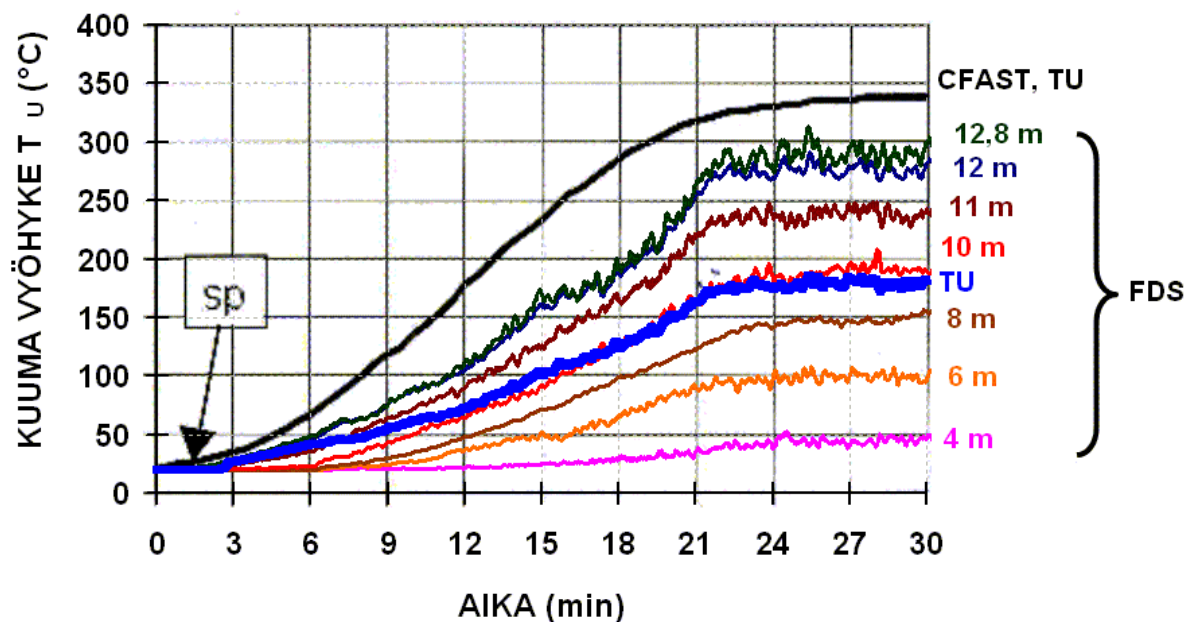
Vyöhykemallisimuloinnissa Lappi Arena kuvattiin yksinkertaistettuna mallina, jossa tilojen muodot muutettiin todellisia pinta-aloja ja tilavuuksia vastaaviksi suorakulmaisiksi särmiöiksi, ”huoneiksi”. Vertailevassa kenttämallinnuksessa käytettiin samaa tilojen kuvausta. Esimerkitapaukseksi otetaan tässä näyttämöpalo.

### Lämpötilat

Kuuman kerroksen lämpötilaa tarkasteltiin yksinkertaistetun mallin kolmessa huoneessa, joista ensimmäinen (nro 2) sisälsi näyttämöpalon, toinen (nro 6) oli pääkatsomon yläosassa suhteellisen lähellä paloa ja kolmas (nro 11) sijaitsi hallin vastakkaisessa päädyssä.

Kuvassa 4 esitetään eri malleilla simuloidut lämpötilat huoneessa 2. FDS-simuloinnin tuloksista havaitaan, että selkeätä kuuman kerroksen rajaa ei synny, vaan lämpötila nousee jatkuvasti mittauskorkeuden kasvaessa. CFAST-ohjelman ennustama kuuman kerroksen lämpötila on selvästi FDS-simuloinnin tulosta korkeampi.

## HUONE 2



Kuva 4. Simuloidut lämpötilat näyttämöpalon välittömässä läheisyydessä. Ylin käyrä on CFAST-simuloinnin tulos ja alemmat FDS-laskennasta eri korkeuksilta. TU-merkitty käyrä on FDS:n laskema keskimääräinen kuuman kerroksen lämpötila.

Kauempana palosta CFAST:n ja FDS:n antamat lämpötilatulokset olivat melko lähellä toisiaan. Huoneessa 6 CFAST-tulokset olivat yleensä FDS-tuloksia hiukan korkeampia. Hallin toisessa päädyssä huoneessa 11 tilanne oli päinvastainen: FDS ennusti korkeampaa lämpötilaa kuin CFAST. Tulosten ero oli enimmillään noin 30 °C.

## Lämpösäteily

Lämpösäteilyn vaikutusta poistumiseen tarkasteltiin seitsemällä poistumisreitillä. Poistumisreitti 1 oli näyttämöpalon vieressä, reitit 2 ja 7 noin 10 metrin ja reitit 3–6 yli 20 metrin etäisyydellä palosta. Poistumisen kannalta kriittisenä säteilyvuon tiheytenä pidettiin 2,5 kW/m<sup>2</sup>:a. FDS:n ja CFAST:n antamia tuloksia vertaillaan taulukossa 1. FDS ennusti selvästi pitempiä poistumiseen käytettävissä olevia aikoja kuin CFAST.

*Taulukko 1. Poistumisreittien käytettävyyss aika CFAST- ja FDS-simulointien perusteella.*

Poistumisreitti	Reitin käytettävyyss aika (min)	
	CFAST	FDS
1	< 3	n. 9
2	n. 10	n. 17
3	n. 40	> 60
4	> 40	> 60
5	> 40	> 60
6	n. 25	> 60
7	n. 6	n. 15

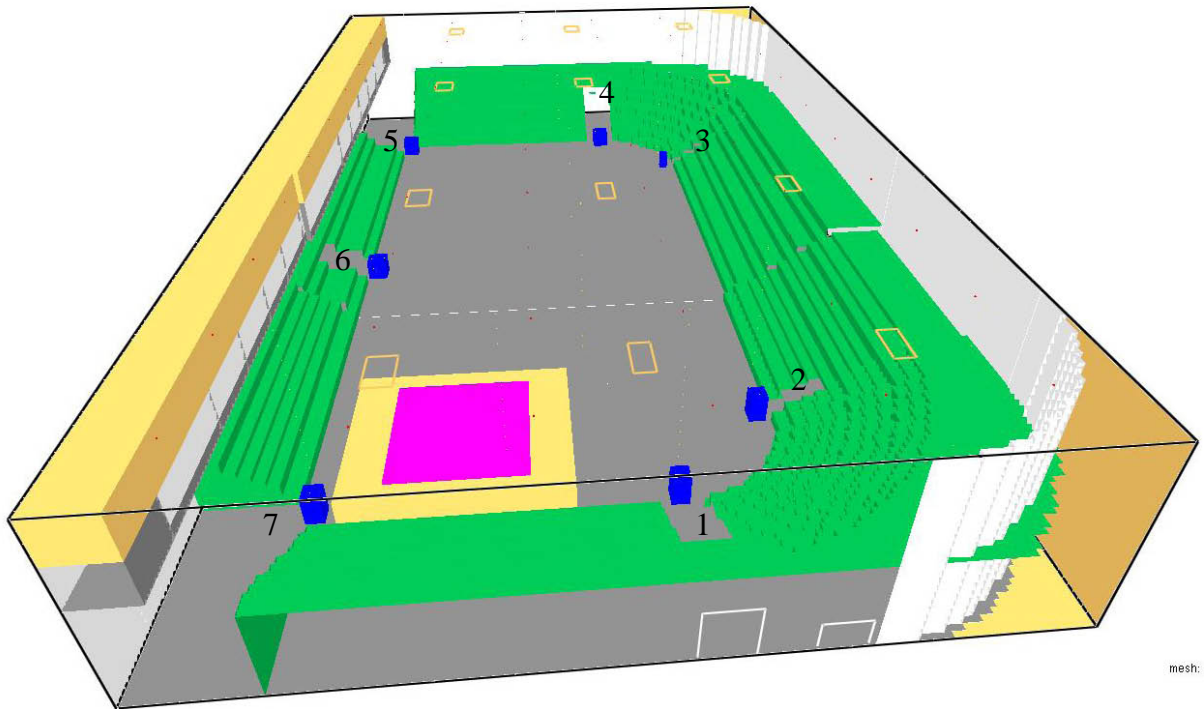
## FDS-SIMULOINNIT TARKEMMIN KUVATULLA GEOMETRIALLA

FDS-ohjelman käyttö mahdollisti Lappi Areenan todellisen geometrian ja katsomorakenteiden määrittelyn tarkemmin kuin CFAST-ohjelmassa oli mahdollista. Tässäkin kuvauksessa oli toki vielä yksinkertaistuksia, esimerkiksi hallin viisto sisäkatto kuvattiin vaakatasona. Simuloinneissa käytetty geometria nähdään kuvassa 5.

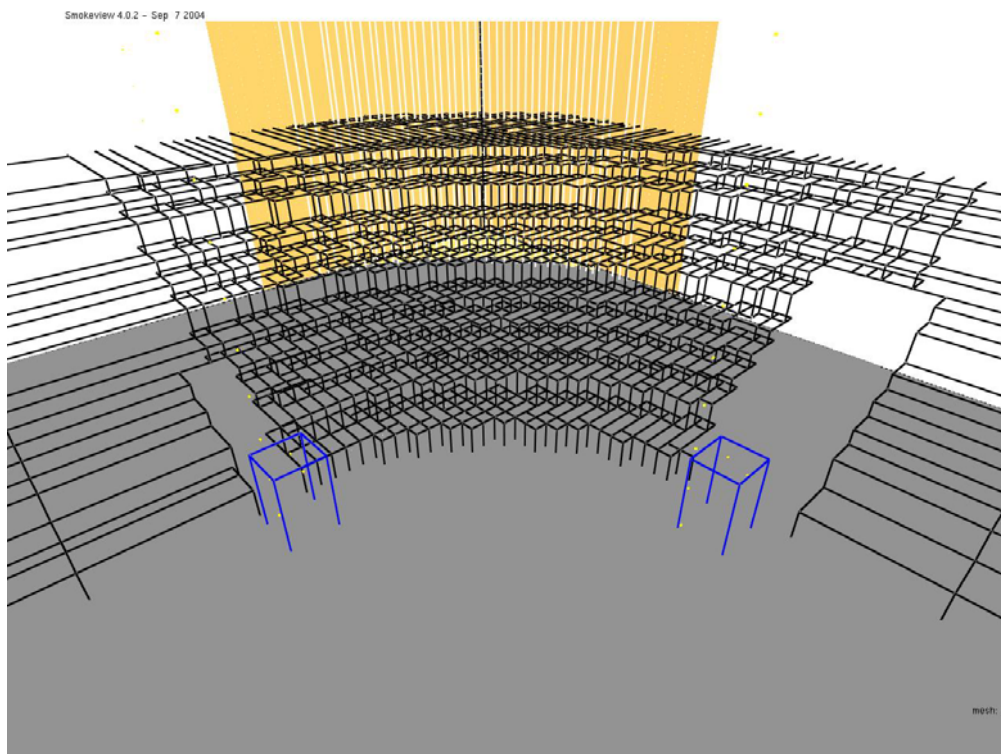
Ulkoseinien kaarevat osat ja pääkatsomon rakenteet luotiin taulukkolaskentaa käyttäen. Katsomo muodostettiin pysty- ja vaakatasoista, jotka koostuivat vierekkäin ja lomittain asetetuista suorakulmioista. Kaarten muodostumista havainnollistaa kuva 6. Kymmenrivisen katsomon kuvaukseen FDS-ohjelman syöttötiedostossa tarvittiin yli 2500 riviä koodia, joten rakenteen määrittely taulukkolaskennan avulla käsinsyötön sijasta oli tarpeellista.

## Poistumisturvallisuus

Lappi Areenan henkilöturvallisuusriskejä arvioitaessa olennaiset suureet olivat lämpötila, lämpösäteily, savutiheys ja hiilimonoksidipitoisuus. Tarkastelu tehtiin erityisesti poistumisteiden läheisyydessä.



*Kuva 5. FDS-simuloinneissa käytetty Lappi Areenan geometrian kuvaus näyttämöpalon tapauksessa. Numerot 1–7 viittaavat poistumisteiden numerointiin.*



*Kuva 6. Ääriviivakuva Lappi Areenan pääkatsomon kaarteesta, joka FDS-simuloinnissa koostui vierekkäin ja lomittain asetetuista suorakulmioista. "Laatikot" poistumisteiden edustalla ovat säteilyvuon tiheyden mittauspaiikkoja.*

## Lämpötila ja lämpösäteily

Taulukossa 2 on esimerkkejä sietoajoista eri säteilyvuon tiheyksillä ja ilman lämpötiloilla [4]. Tarkastellut lämmönsiirtotavat ovat säteily ja konvektio. Lämmönjohtuminen on fysiologisesti merkittävä vain silloin, kun iho on kontaktissa kuumaan pintaan, esimerkiksi ovenkahvaan. Yhden sekunnin kestävä kontakti metallipintaan, jonka lämpötila on 60 °C, voi aiheuttaa palovamman.

Taulukko 2. Sietoajoja eri lämpöaltistuksille [4].

Lämmönsiirtomuoto	Intensiteetti	Sietoaika
Säteily	< 2,5 kW/m <sup>2</sup>	> 5 min
	2,5 kW/m <sup>2</sup>	30 s
	10 kW/m <sup>2</sup>	4 s
Konvektio	< 60 °C, 100 % satur.	> 30 min
	100 °C, < 10 % H <sub>2</sub> O	12 min
	120 °C, < 10 % H <sub>2</sub> O	7 min
	140 °C, < 10 % H <sub>2</sub> O	4 min
	160 °C, < 10 % H <sub>2</sub> O	2 min
	180 °C, < 10 % H <sub>2</sub> O	1 min

FDS-simulointien mukaan lämpötilat Lappi Areenan poistumisteiden lähistöllä 1–2 metrin korkeudella ovat varsin matalia sekä näyttämö- että katsomopalon tapauksessa. Näyttämöpalossa tyypilliset lämpötilat poistumisteillä ovat 20–25 °C ja maksimilämpötilatkin enintään 35 °C. Katsomopalossa lämpötilat jäivät vieläkin alemmiksi, enimmilläänkin noin 25 °C:een.

Arvioitaessa lämpösäteilyn vaikutusta henkilöturvallisuuteen tarkasteltavaksi raja-arvoksi valittiin 2,5 kW/m<sup>2</sup>. Taulukkoon 3 on koottu näyttämöpalon aiheuttamat säteilyvuon tiheyden maksimiarvot vaaka- ja pystysuunnassa sekä ajat, jolloin raja-arvo ylittyi eri poistumisteiden luona.

Taulukko 3. Säteilyvuon tiheyden maksimiarvot pysty- ( $HF_{vert,max}$ ) ja vaakasuunnassa ( $HF_{horiz,max}$ ) sekä ajat, jolloin 2,5 kW/m<sup>2</sup>:n raja-arvo ylittyi eri poistumisteiden luona näyttämöpalossa.

Poistumistie	$HF_{vert,max}$ (kW/m <sup>2</sup> )	Aika, jolloin 2,5 kW/m <sup>2</sup> ylittyi	$HF_{horiz,max}$ (kW/m <sup>2</sup> )	Aika, jolloin 2,5 kW/m <sup>2</sup> ylittyi
1	2,5	–	4,4	18 min
2	1,9	–	2,8	30 min
3	1,1	–	1,0	–
4	1,1	–	0,9	–
5	0,9	–	0,9	–
6	1,3	–	2,1	–
7	5,1	17 min	4,1	19 min

Laskettujen säteilyvuon tiheyksien perusteella kaikki poistumistiet ovat näyttämöpalotilanteessa käytettävissä noin 17 minuutin ajan palon syttymisestä. Tämän jälkeen palavan näyttämön vieressä olevat poistumistiet saattavat olla kulkukelvottomia, mutta hallin keskeltä ja vastakkaisesta päädyistä poistuminen on edelleen mahdollista. Katsomopalotapauksessa säteilyvuon tiheys ei saavuttanut  $2,5 \text{ kW/m}^2$ :a yhdelläkään poistumistiellä.

Lämpötilat ja säteilyvuon tiheydet poistumisteiden lähistöllä pysyivät siis alhaisina. Suurin osa poistumisteistä oli käyttökelpoisia koko 60 minuutin laskentajakson ajan. Näin ollen kuumuus ei vaaranna poistumisturvallisuutta.

## Savuntiheys

Poistumiskokeiden perusteella sallittavaksi savuntiheydeksi kirjallisuudessa esitetyt savun vaimennuskertoimen arvot ja niitä vastaavat näkyvyydet vaihtelevat riippuen rakennuksen geometriasta ja poistuvista henkilöistä. Esimerkiksi Jin ehdottaa rajaksi vaimennuskerrointa 0,15 1/m, kun poistuvat henkilöt eivät tunne hyvin rakennusta [5]. Tämä arvo vastaa noin 13 metrin näkyvyyttä. Useimmat muut ehdotukset ovat samaa suuruusluokkaa tai sallivat heikomman näkyvyyden.

Suurimmat savun vaimennuskertoimen arvot poistumisteiden tasolla Lappi Areenan simuloinneissa olivat vain noin kymmenesosa Jinin ehdottamasta maksimiarvosta sekä näyttämö- että katsomopalon tapauksessa. Simulointia visualisoivan Smokeview-ohjelman perusteella savukerros laskeutui hallissa pääkatsomon yläriveille noin 6 metrin korkeudelle asti, mutta tämän tason alapuolella näkyvyys oli hyvä koko palon ajan.

## Hiilimonoksidipitoisuus

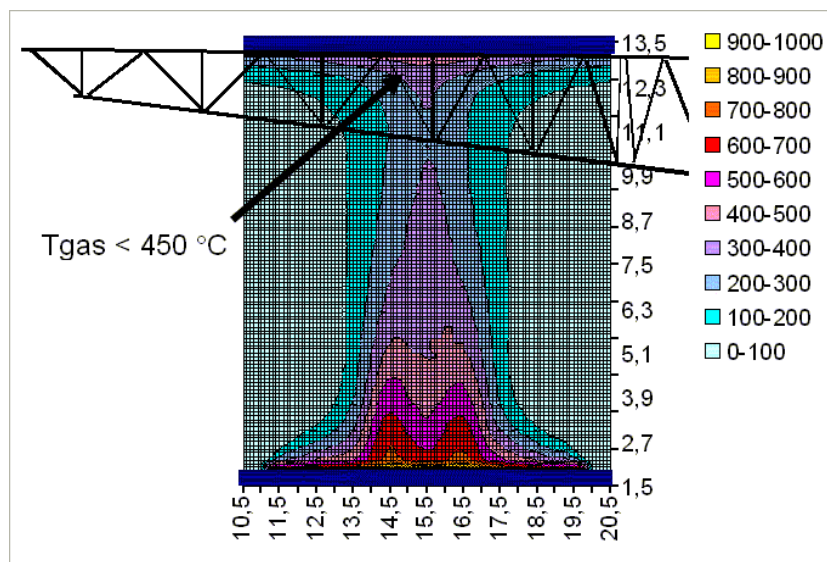
Hiilimonoksidi (CO) on suurin syy ihmisten lamaantumiseen tulipalossa ja todennäköisesti tulipalojen uhrien pääasiallinen kuolinsyy. Hiilimonoksidin myrkyllisyys riippuu annoksesta, jonka altistuva henkilö hengittää sisään altistumisaikana. Jos CO-pitoisuus ilmassa on vakio,  $\text{CO-annos} = \text{CO-pitoisuus} \times \text{aika}$ . Tajunnan menetykseen johtavaksi CO-annokseksi on arvioitu noin 27000 ppm·min. Näin ollen esimerkiksi 500 ppm:n CO-pitoisuudessa lamaantumisaika on noin 54 minuuttia.

FDS-ohjelma olettaa, että hiilimonoksidi syntyy liekissä ja kuljettuu palamistuotteiden mukana. Laskennan tulokset riippuvat parametreista, jotka liittyvät palavan aineen ja hapen reaktioihin kaasufaasissa. Käytännössä CO-tuottoon vaikuttaa siis palokuorman koostumus, jota ei yleensä tarkkaan tunneta. Myös eri materiaalien palamisreaktioihin liittyvät parametrit aiheuttavat epävarmuutta laskentatuloksiin.

Lappi Areenan simuloinneista tuloksina saadut CO-pitoisuudet olivat kuitenkin niin pieniä, että pitkilläkin altistusajoilla ei ole vaaraa poistuvien henkilöiden lamaumisesta hiilimonoksidin vaikutuksesta. Poistumisteiden tasossa CO-pitoisuudet olivat enimmillään 10 ppm:n suuruusluokkaa.

## RAKENTEIDEN PALONKESTÄVYYS

Lappi Areenan kantavat rakenteet ovat teräsputkista tehtyjä ristikkorakenteita. Niiden mitoittava palorasitus on palavan alueen yläpuolella olevien liekkien ja palopatsaan tuottama paikallinen palorasitus. Mitoituspalojen palavat alueet ovat varsin laajoja niiden suurimpaan palotehoon nähden. Palon laatua kuvaava dimensioton paloteho on selvästi alle arvon 0,2, mikä tarkoittaa sitä, että yleiset palopatsasmallit eivät välttämättä kuvaa kyseisiä paloja kovin hyvin [6]. Siksi tässä työssä mallinnettiin paikallista palorasitusta FDS-ohjelmalla käyttäen tiheää laskentahilaa, jonka vaakadimensiot olivat samat kuin mitoituspalon dimensiot ja korkeus sama kuin rakennuksen korkeus. Kuva 7 esittää paikallisen palorasituksen lämpötiloja näyttämöpaloskenaariossa. Nähdään, että lämpötilat ovat suurimmillaankin alle 450 °C, mikä on selvästi alhaisempi lämpötila kuin teräsristikoiden elementtien kriittiset lämpötilat (> 600 °C [3]). Näiden tulosten perusteella teräsrakenteet voitaisiin toteuttaa kokonaan ilman palosuojausta. Tämä tulos on linjassa sen varsin yleisesti pätevän seikan kanssa, että mitä kehittyneempää laskentaa palon aiheuttamien seuraamusten laskennassa käytetään, sitä pienempiä varmuuskertoimia käyttäen saadaan aikaan turvallinen lopputulos.



Kuva 7. Paikallisen palorasituksen aiheuttamat lämpötilat näyttämöpaloskenaariossa.

## HUOMIOITAVAA SUUREN KOHTEEN FDS-SIMULOINNISSA

Suurten kohteiden palonsimulointi vaatii luonnollisestikin suurta laskentakapasiteettia. Yhä suurempien kohteiden simulointia on mahdollistettu ja nopeutettu kehittämällä rinnakkaislaskentaa ja monilohkojärjestelmiä FDS-ohjelmassa.

Laskentasolujen lukumäärä on suurtenkin kohteiden simuloinneissa pyrittävä pitämään kohtuullisena. Nyrkkisääntönä on, että soluja tulisi olla enintään miljoona. Tähän päästään käyttämällä erilaisia laskentahiloja simuloitavan kohteen eri kohdissa. Lähellä paloa käytetään suhteellisen tiheätä laskentahilaa, mutta kaukana palosta laskentahila voi olla selvästi karkeampi. Laskentahilojen rajapinnat ovat kuitenkin simuloinnin läpiviemisen kannalta kriittisiä. Huonosti yhteensopivat laskentahilat voivat johtaa laskennan epästabiilisuuteen. Tämän välttämiseksi on pyrittävä asettamaan vierekkäisten hilojen laskentasolujen rajat kohdakkain.

## **YHTEENVETO**

Tässä työssä käsiteltiin suuren kohteen tulipalon simulointia FDS-ohjelmalla esimerkki-kohteena Lappi Arena, monitoimihalli Ounasvaaran liikuntakeskusalueella.

FDS- ja CFAST-ohjelmien laskentatuloksissa havaittiin selkeitä eroja. FDS:n ennustama lämpötila tulipalon läheisyydessä oli selvästi alempi kuin CFAST:n antama tulos. Kauempana palosta lämpötilatulokset olivat melko lähellä toisiaan. Poistumisteiden käytettävyyttä säteilyvuon tiheyden perusteella arvioitaessa FDS-simulointi antoi tulokseksi pitempiä käytettävyyssaiakoja kuin CFAST.

Lappi Areenan FDS-simuloinneissa tarkemmin kuvatulla geometrialla tarkasteltiin henkilöturvallisuutta lämpötilan, lämpösäteilyn, savun ja CO-pitoisuuden perusteella. Tulosten perusteella ihmiset voivat poistua kohteesta turvallisesti käytettyjen mitoituspalojen tyyppisten tulipalojen sattuessa.

## **KIITOKSET**

Tätä tutkimusta on rahoittanut Tekes (päätos nro 40475/03). Kiitämme Simo Lehtimäkeä (IRH Oy) konsultaatiosta CFAST-simulointeihin liittyen ja Simo Hostikkaa (VTT) neuvoista FDS-simuloinneissa.

## **LÄHDELUETTELO**

1. McGrattan, K. B. (ed.) Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical Reference Guide. Gaithersburg, MA, USA: National Institute of Standards and Technology, 2004. 85 s. (NIST Special Publication 1018.)
2. McGrattan, K. B. & Forney, G. P. Fire Dynamics Simulator (Version 4) – User’s Guide. Gaithersburg, MA, USA: National Institute of Standards and Technology, 2004. 90 s. (NIST Special Publication 1019.)
3. Lehtimäki, S. Monitoimihallin paloturvallisuus. Helsinki: Ympäristöministeriö ja opetusministeriö, 2003. 114 s. (Ympäristöopas 103.) ISBN 951-682-729-2.
4. Purser, D. Human tenability. United Engineering Foundation Conference, San Diego, USA, 7 – 11 January 2001.
5. Jin, T. Visibility and human behaviour in fire smoke. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3<sup>rd</sup> Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-42 – 2-53. ISBN 087765-451-4.
6. Hietaniemi, J., Hostikka, S., Lindberg, L. & Kokkala, M. Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2000. 51 s. + liitt. 14 s. (VTT Tiedotteita 2027.) ISBN 951-38-5664-5.