



# Moniuhrinen tulipalo Espoossa 27.3.2008: analysointi käyttäen palonsimulointia

Kirjoittajat: Jukka Hietaniemi ja Teemu Karhula

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi <b>Moniuhrinen tulipalo Espoossa 27.3.2008: analysointi käyttäen palonsimulointia</b>		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Onnettomuustutkintakeskus Kai Valonen Sörnäisten rantatie 33C 00580 Helsinki		Asiakkaan viite
Projektin nimi Palonsimulointianalyysi		Projektin numero/lyhytnimi 31296
Raportin laatija(t) Jukka Hietaniemi ja Teemu Karhula		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 68
Avainsanat		Raportin numero VTT-R-11396-08
<b>Tiivistelmä</b> <p>           Espoossa tapahtui 27.3.2008 viisi kuolonuhria vaatinut tulipalo puolitoistakerroksisessa pientalossa. Tässä työssä tarkastellaan kyseistä tulipaloa palonsimulointia käyttäen. Tavoitteena oli arvioida vaarallisten olosuhteiden muodostumisen viiveitä rakennuksen eri osissa. Työ tehtiin niiden tietojen ja olettamusten perusteella, jotka sovittiin toimeksiantajan ja muiden onnettomuuden tutkintaan osallistuvien tahojen kanssa.         </p> <p>           Simulointi antaa selvän kuvan, miksi palo oli niin tuhoisa:         </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palo alkoi eteisessä, joka lieskahti nopeasti ja synnytti voimakkaan hormimaisen palon, jossa virtaus kulki ulko-ovelta eteisen ja porrashuoneen kautta yläkerran hallin rikkoutuneelle ikkunalle.</li> <li>• Hormimaisena palo oli hyvin kuuma ja siksi paloon osallistuneet verhoilumateriaalit pyrolysoituivat voimakkaasti; tämä edesauttoi palon muodostumista happirajoitteiseksi, jolloin palokaasujen CO-pitoisuus oli korkea.</li> <li>• Palossa syntyi siis hyvin nopeasti tilanne, jossa rakennuksen pääuloskäytävä paloi kuumana ja myrkyllisenä ja yritykset poistua rakennuksesta levittivät paloa myös muihin tiloihin.</li> </ul> <p>           Työssä tarkasteltiin kahden paloturvallisuutta parantavan toimenpiteen vaikutuksia: 1) tilojen jako osiin käyttäen EI 15 -luokan rakenneosia ja 2) kohteen varustaminen tyyppillisellä asutosprinklerijärjestelmällä. Yhteenvetona näiden toimenpiteiden vaikutuksesta voidaan todeta seuraavaa:         </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Osiin jako käyttäen EI15-luokan rakenteita estäisi palon leviämisen ja kehittymisen vaarallisen voimakkaaksi kunhan myös rakennuksen ulko-ovena käytetään EI15-luokan rakennetta.</li> <li>• Oikein mitoitettu, nopeatoiminen asutosprinklaus rajaisi palon sen alkutilaan, eteiseen, jossa paloteho on varsin alhainen ja lämpötilat pysyvät poistumisen kannalta turvallisella tasolla. Hiilimonoksidipitoisuus on noin tekijällä 4 alhaisempi kuin sprinklaamattomassa tapauksessa eikä hiilimonoksidille altistuvan ihmisen COHb-pitoisuus nouse henkeä uhkaavan korkeaksi.</li> </ul>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Espoo 23.3.2009		
Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Jukka Hietaniemi, erikoistutkija	Taneli Rasmus Lääninvalmiusjohtaja	Tuula Hakkarainen
Teemu Karhula, tutkija	Länsi-Suomen lääninhallitus	Tiiminvetäjä
VTT:n yhteystiedot Jukka Hietaniemi ( <a href="mailto:jukka.hietaniemi@vtt.fi">jukka.hietaniemi@vtt.fi</a> , puh. 020 722 4866)		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Onnettomuustutkintakeskus & VTT		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

## Alkusanat

Espoossa tapahtui 27.3.2008 viisi kuolonuhria vaatinut tulipalo puolitoistakerroksisessa pientalossa. Tässä työssä tarkastellaan kyseistä tulipaloa palonsimulointia käyttäen. Tavoitteena oli arvioida vaarallisten olosuhteiden muodostumisen viiveitä rakennuksen eri osissa. Lisäksi tarkastellaan, miten kohteen jakaminen tiloittain osiin käyttäen EI 15 -luokan rakenneosia tai kohteen varustaminen tyyppillisellä asuihin tarkoitettulla automaattisella vesisammutusjärjestelmällä (asuntosprinkleri) olisi vaikuttanut tilanteen kehittymiseen ja palovaaroihin. Työ tehtiin niiden tietojen ja olettamusten perusteella, jotka sovittiin toimeksiantajan ja muiden onnettomuuden tutkintaan osallistuvien tahojen kanssa.

Espoo 23.3.2009

Tekijät

## Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	6
2 Kohteen kuvaus.....	6
3 Palonsimulointimallin kuvaus.....	9
3.1 Yleistä .....	9
3.2 Malli .....	9
3.3 Palovaarojen arviointi.....	13
3.3.1 Lämpötila .....	13
3.3.2 Hiilimonoksidi .....	14
3.3.3 Näkyvyys.....	14
3.3.4 Palonkestävyyteen liittyviä tarkasteluja .....	14
4 Tarkastellut palotilanteet.....	15
4.1 Palon syttymispaikka ja alkupalon voimakkuus.....	15
4.2 Ihmisten toiminnan kuvaukset.....	17
5 Tulokset.....	17
5.1 Palon kehittyminen.....	17
5.1.1 Skenaario 1.....	17
5.1.2 Skenaario 2.....	21
5.1.3 Skenaario 3.....	27
5.1.4 Skenaario 4.....	29
5.2 Palovaarojen arviointi.....	35
5.2.1 Hiilimonoksidi .....	35
5.2.2 Lämpötila .....	41
5.2.3 Savu.....	41
6 Tarkastelu siitä, miten kohteen jakaminen osiin käyttäen EI15-luokan rakenneosia olisi vaikuttanut tilanteen kehittymiseen ja palovaaroihin.....	43
6.1 Osiin jakamisen kuvaus .....	43
6.2 Palonsimuloinnin antamat tulokset osiin jakamisen vaikutuksista.....	44
7 Tarkastelu siitä, miten kohteen varustaminen asuntospriklerillä olisi vaikuttanut tilanteen kehittymiseen ja palovaaroihin .....	49
7.1 Sprinklerin mallintamisen kuvaus.....	49
7.2 Palonsimuloinnin antamat tulokset sprinklerin vaikutuksista.....	51
8 Yhteenveto .....	53
Liite A: Puumateriaalille käytetty palamismalli .....	56
Liite B: Alkupalon kuvauksen määrittäminen .....	57

Liite C: Hiilimonoksidin aiheuttaman vaaran arviointi.....	61
Liite D: Asuntosprinklerin mallintamisen yksityiskohtia .....	65

## 1 Johdanto

Espoossa tapahtui 27.3.2008 viisi kuolonuhria vaatinut tulipalo puolitoistakerroksisessa pientalossa<sup>1</sup>. Tässä työssä tarkastellaan kyseistä tulipaloa palonsimulointia käyttäen.

Simulointien tavoitteena oli arvioida vaarallisten olosuhteiden muodostumisen viiveitä rakennuksen eri osissa. Tulosten perusteella esitetään myös yleistettyjä johtopäätöksiä tämänkaltaisten kohteiden paloturvallisuudesta. Työ tehtiin niiden tietojen ja olettamusten perusteella, jotka sovittiin toimeksiantajan ja muiden onnettomuuden tutkintaan osallistuvien tahojen kanssa.

Onnettomuus sattui öiseen aikaan, jolloin ainakin osa kohteessa olleista henkilöistä on ollut nukkumassa - ja oletettavasti ainakin jotkut henkilöt ovat olleet päihtyneitä. Lisäksi tilanne on kehittynyt nopeasti ja siksi sitä koskevista lausunnoista ei ole johdettavissa täysin varmana pidettävää kuvaa tilanteen kehittymisestä.

Tämän raportin pyrkimys ei ole antaa varmaa kuvaa siitä, miten palo on kehittynyt. Tässä raportissa tarkastellaan pelkästään joitain mahdollisia tapahtumakulkuja, jotka osin perustuvat onnettomuudesta hengissä selvinneiden henkilöiden tilanteesta antamiin kuvauksiin.

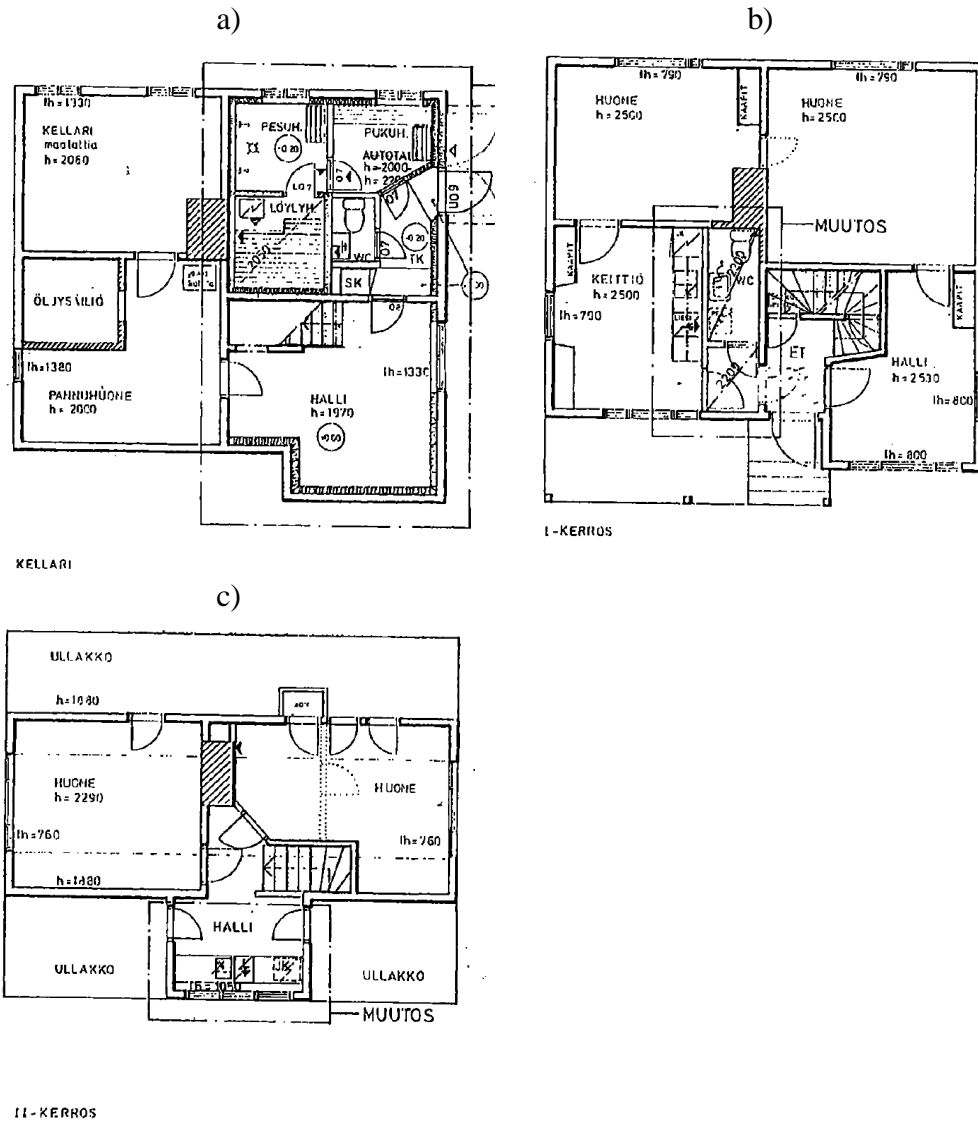
Tämän raportin päätarkoitus onkin tarkastella ja tuoda esille konkreettisesti niitä paloturvallisuusvaaroja, joita tämänkaltaisiin kohteisiin voi liittyä.

## 2 Kohteen kuvaus

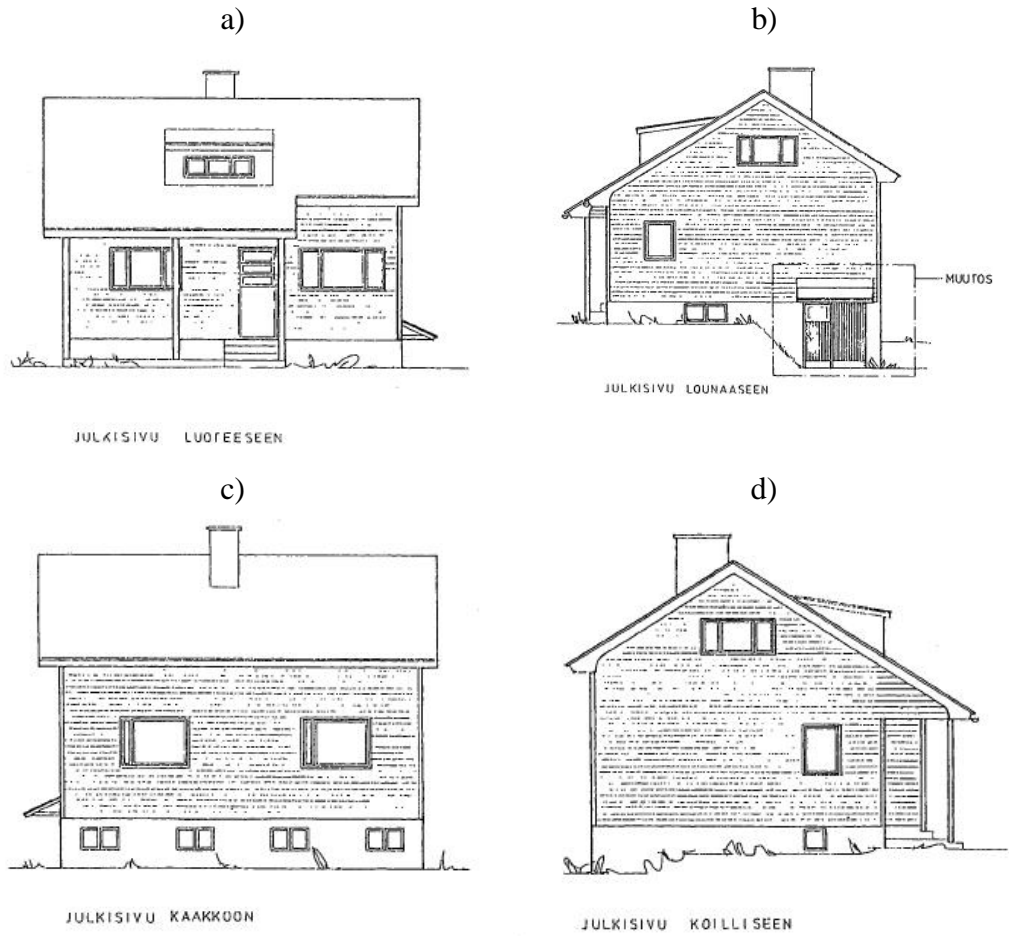
VTT sai Onnettomuustutkintakeskuksen asettaman tutkintalautakunnan puheenjohtajalta, lääninvalmiusjohtaja Taneli Rasmukselta kohteen asemakaava- sekä tasopiirustukset (kuvat 1 ja 2) sekä Espoon Rakennusvalvontavirastosta leikkauskuvan (kuva 3), josta ilmeni rakennuksen korkeusmitat sekä pohjakuvan, johon oli merkitty seinälinjojen ulkomitat.

---

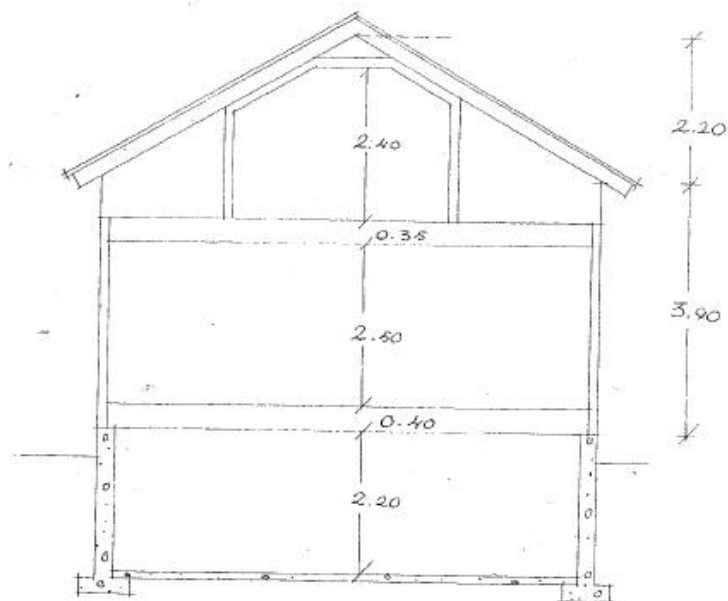
<sup>1</sup> Kohde oli tyypiltään ns. rintamamiestalo.



Kuva 1. Kohteen pohjakuvat: a) kellari, b) 1. kerros ja c) 2. kerros.



Kuva 2. Kohteen julkisivukuvat: a) luoteeseen, b) lounaaseen, c) kaakkoon ja d) koilliseen.



Kuva 3. Kohteen leikkauskuva.



### 3 Palonsimulointimallin kuvaus

#### 3.1 Yleistä

Mittojen ja kuvien perusteella koostettiin palonsimulointia varten malli rakennuksesta. Mallissa kohde kuvattiin seuraavasti:  
Kellarikerroksen seinät ovat 200mm betoniseiniä. Kellarikerros on alun perin rakennettu lämmöneristämättömänä. Kellarissa on ollut autosuoja ja maalattia. Muutostöissä puolet kellarista on eristetty sisäpuolelta. Autosuojan paikalle on rakennettu pesuhuone, sauna, pukuhuone, wc, eteistila sekä halli. Pannuhuone öljysäiliö ja kellaritila ovat eristämättömiä tiloja. Kellarista nousee suorat rappuset 1. kerroksen eteiseen. Rappusten ja eteistilan välillä on ovi. Alkuperäisestä keittiöstä on osa muutettu wc-tiloiksi ja kahden asuinhuoneen välinen ovi on poistettu. 1. kerroksesta menee portaat 2. kerrokseen. Toisen kerroksen portaita lähinnä olevan huoneen väliseinä on poistettu ja halliin on tehty joitakin muutoksia remontin aikana. Katto rakennusmallissa on tehty tuulettumattomana.

Tulipalon kannalta olennaisia tekijöitä ovat aukot eli ikkunat ja ovet ja niiden palonkestävyys, joka oville vastaa pääasiallisesti niiden materiaalia, rakennetta ja paksuutta ja ikkunoille niiden ikää, lasin paksuutta, kiinnitystä karmeihin ja lasiruutujen lukumäärää. Näiden suhteen tehtiin oletuksia, jotka esitetään tarkemmin jäljempänä palonsimulointimallin yksityiskohtaisen kuvauksen yhteydessä. Sama pätee myös rakennuksen sisäpuoleisiin pintoihin.

#### 3.2 Malli

Malli toteutettiin FDS-palonsimulointiohjelman versiolla 5 (maaliskuun 2008 kehitysversio) käyttäen  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$  suuruisella jaolla toteutettua laskentahilaa. Mallin geometria esitetään kuvissa 4-7.

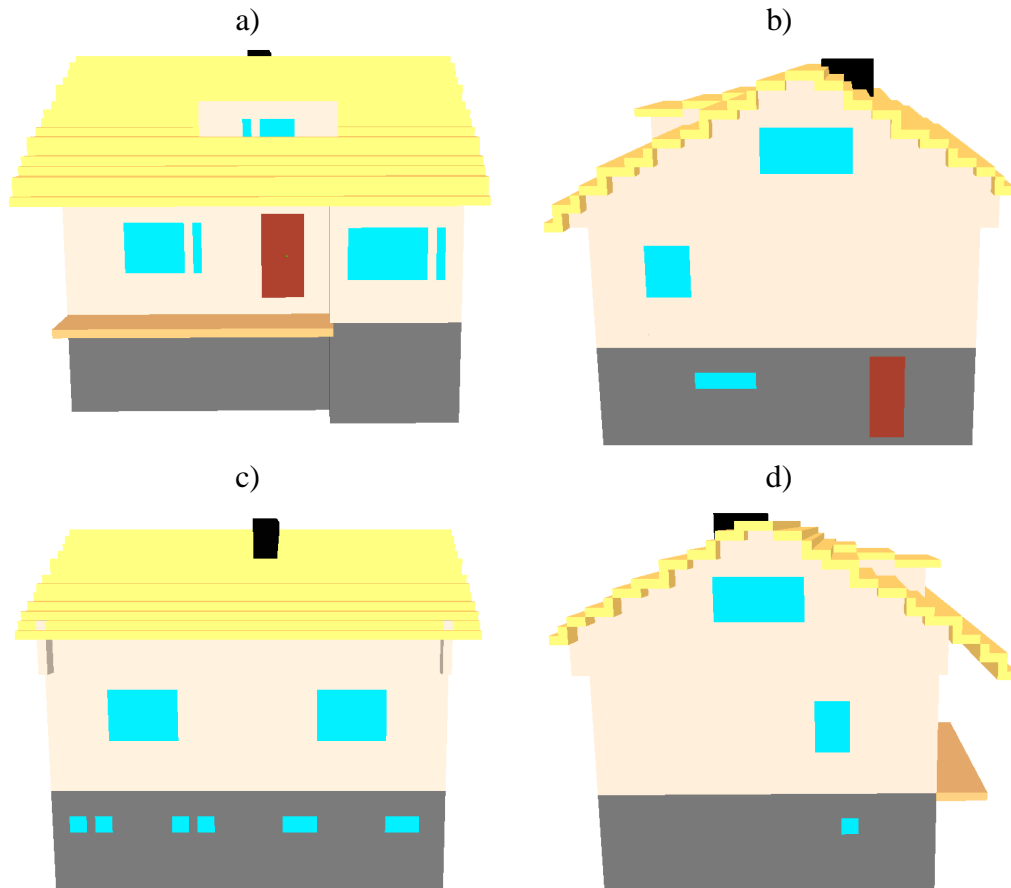
Eri puolille mallia sijoiteltiin lukuisa määrä virtuaalisia monitoreita (kuva 7a), jotka mittaavat seuraavia mallin laskemia suureita:

- kaasun lämpötila  $T_g$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- savuntiheys  $k$  [ $\text{m}^{-1}$ ]; näkyvyys  $V$  [m] on kääntäen verrannollinen savuntiheyteen:  $V = C/k$ , missä  $C = 3$  valoa heijastaville kohteille ja  $C = 8$  valoa lähettävälle kohteille [Mullholland 2002]. Tässä työssä käytetään valoa heijastavien kohteiden mallia,  $V = 3/k$ , koska kohteessa ei liene ollut valoa lähettäviä poistumistiemerkeitä.
- hiilimonoksidipitoisuus [ppm],
- ikkunoihin ja oviin kohdistuva lämpörasitus (lämpövuoto  $\text{HF}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ] ja adiabaattinen pintalämpötila  $\text{AST}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ])

Lisäksi malliin määritettiin eri suureiden arvoja osoittavia tasoja (kuva 7b), jotka havainnollistavat kulloinkin tarkasteltavan suureen paikallista jakautumista.

Ikkunoiden mahdollinen rikkoutuminen palon aiheuttaman kuumuuden vuoksi kuvattiin siten, että kunkin huoneen ikkunan sisäpuolelle 0,2 metrin päähän lasista asetettiin kaasun lämpötila-anturi, jonka ohjaamana ikkuna poistetaan (so. muutetaan avoimeksi aukoksi), mikäli anturin lämpötila nousee  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :een.

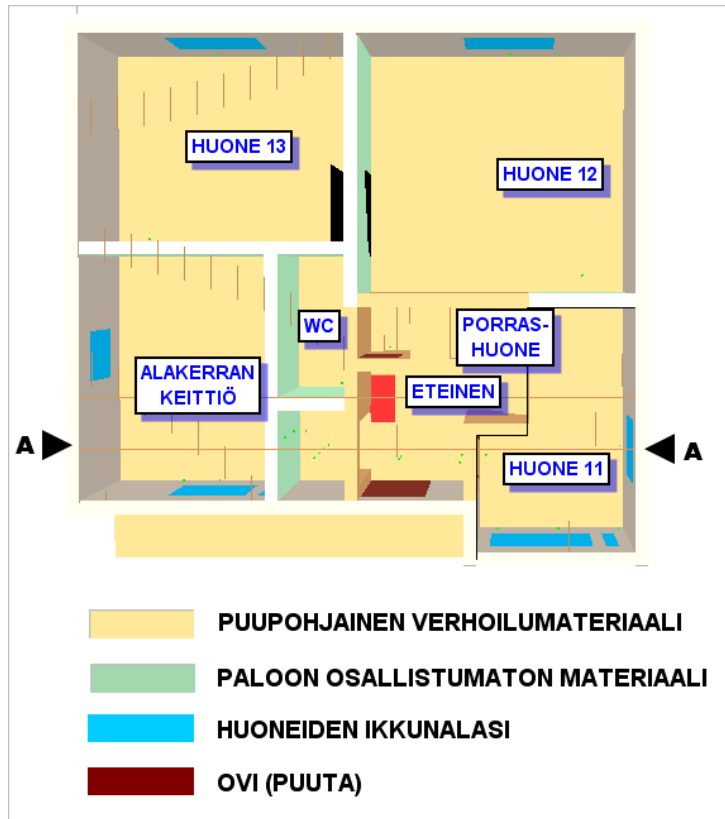
Ovien mahdollinen palaminen puhki tehtiin jälkikäsitteilynä siten, että kuhunkin oveen asetettiin anturi mittaamaan siihen kohdistuvaa lämpötilaa (AST) ja lämpövuota (HF), jotka osoittavat puisiksi oletettujen ovien hiiltymissyvyyden. Jos laskettu hiiltymissyvyys ylittää oven paksuuden, suoritettiin seuraava simulointiajo, jossa ovi poistetaan sillä hetkellä, jona hiiltymissyvyyden oli laskettu ylittävän oven paksuuden. Ovien puhkipalamista arvioitiin niiden ohuimpien kohtien mukaan, joiden paksuudeksi oletettiin 10-15 mm<sup>2</sup>).



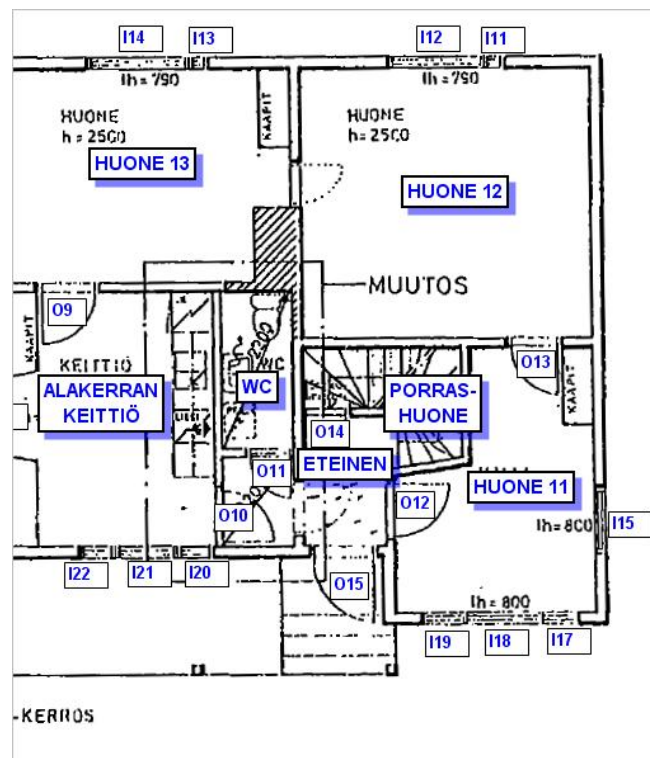
*Kuva 4. Simulointimallin julkisivukuvat: a) luoteeseen, b) lounaaseen, c) kaakkoon ja d) koilliseen.*

<sup>2</sup> Standardipalo-olosuhteissa puun hiiltymisnopeus on suunnilleen 1 mm/min, joten 10-15 mm paksu ovi palaisi puhki noin 10-15 minuutissa.

a)

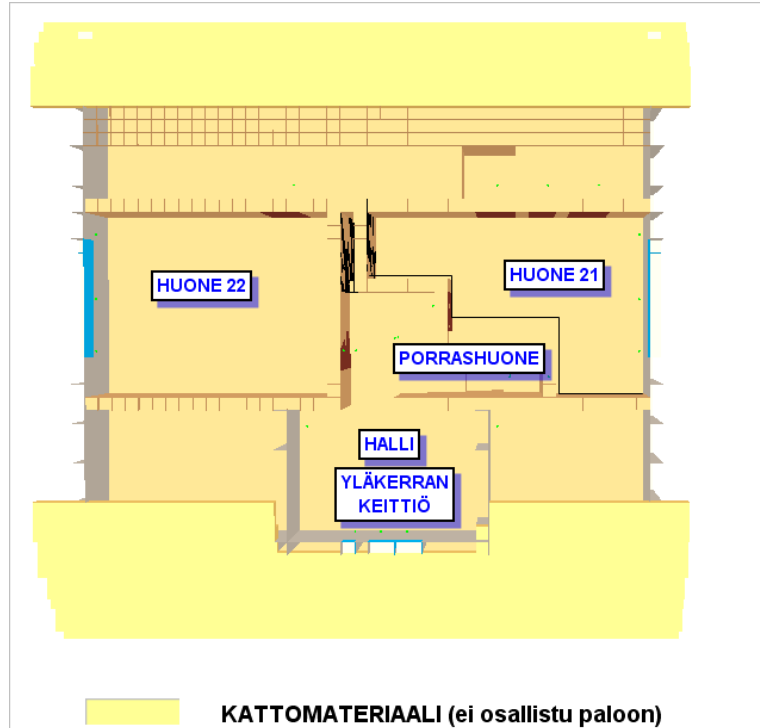


b)

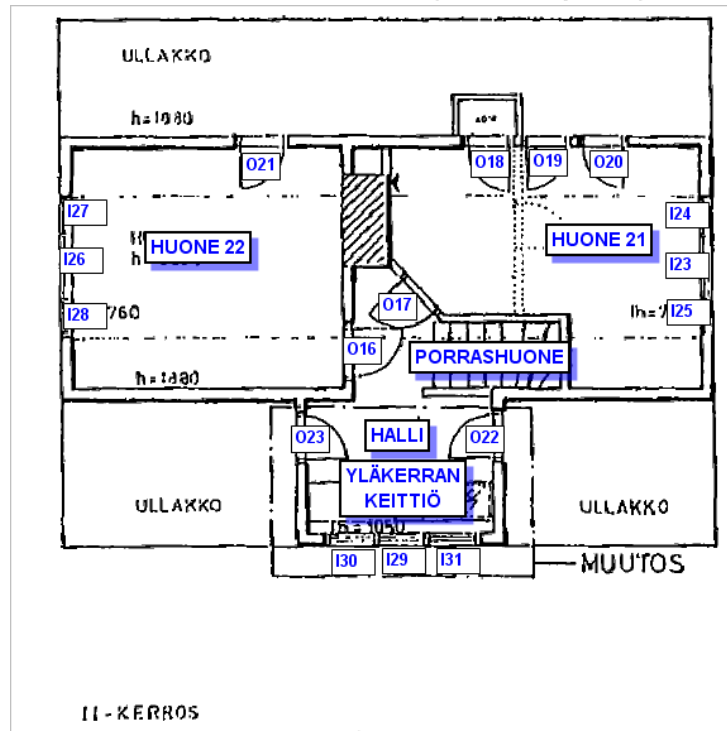


Kuva 5. a) Simulointimallin 1. kerros ja b) eri tiloista, ovista ja ikkunoista käytetyt nimitykset. Punainen suorakaide kuvaa erästä tarkasteltua alkupalon paikkaa.

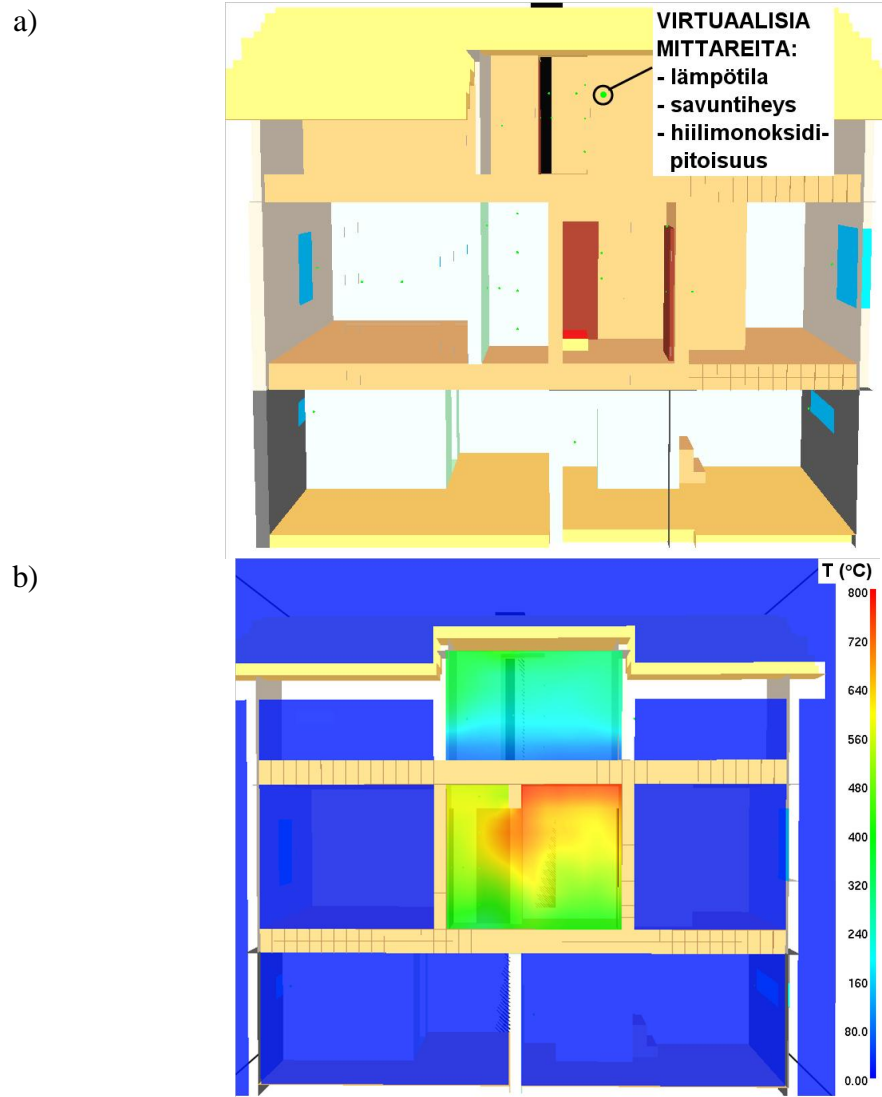
a)



b)



Kuva 6. a) Simulointimallin 2. kerros ja b) eri tiloista, ovista ja ikkunoista käytetyt nimitykset.



*Kuva 7. Mallin leikkauskuva linjaa A-A pitkin: a) pistemäisten ihmiselle vaarallisten olosuhteiden tekijöiden monitorointisensoreiden paikkoja ja b) esimerkki eri suureiden paikallisen jakautumisen esittämiseen soveltuvasta esitystavasta.*

### 3.3 Palovaarojen arviointi

#### 3.3.1 Lämpötila

Lämpötilan vaikutus ihmiseen riippuu useista tekijöistä, mm. siitä, uhkaako ihmistä tilan yläkerrokseen muodostunut kuuman savukerroksen säteily vai onko ihminen kokonaan kuumien kaasujen ympäröimä, jolloin hän helposti voi joutua hengittämään kuumia kaasuja, mikä puolestaan voi aiheuttaa hengitysteiden vaarallisen palamisen. Koska tässä tarkastelussa esiin tulevat lämpötilat tyypillisesti nousevat nopeasti varsin korkeiksi, lämpötilojen aiheuttamaa vaaraa arvioidaan seuraavalla hyvin yksinkertaisella tavalla:

- oletetaan, että ihminen sietää 100 °C:n lämpötilaa poistumiseen tarvittavan ajan

- jos lämpötila nousee 200 °C:een tai korkeammaksi, se estää poistumisen ja aiheuttaa lopulta hengitysteiden fataalin palamisen.

### 3.3.2 Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidin vaikutusta ihmiseen tarkastellaan liitteessä C. Siellä esitetyt olennaisimmat tulokset ovat seuraavat:

- Koska palaminen on happirajoitteista, laskennan antamaa CO-pitoisuutta tulee kasvattaa jollain tekijällä. Tässä käytetään arvoa 10.
- Hiilimonoksidin aiheuttama myrkytys johtuu veren COHb-pitoisuuden kasvamisesta. Ihmisen toimintakykyyn selvästi haitallisesti vaikuttavana COHb-pitoisuutena voidaan pitää arvoa 30 % ja yli 50 %:n suuruinen COHb-pitoisuus voidaan katsoa hengenvaaralliseksi.

### 3.3.3 Näkyvyys

Näkyvyys  $V$  [m] arvioidaan savuntiheyden  $k$  [ $\text{m}^{-1}$ ] avulla seuraavasti:  $V = 3/k$ . Koska kohde on siellä oleville henkilöille tuttu, riittää poistumisen onnistumiseksi suhteellisen lyhyt näkyvyys: tässä käytetään riittävän näkyvyyden menettämisen kriteerinä arvoa  $V < 1$  m, joka siis vastaa savuntiheydelle ehtoa  $k < 3 \text{ m}^{-1}$ .

### 3.3.4 Palonkestävyyteen liittyviä tarkasteluja

Tarkastelussa suoritetaan joitain arvioita siitä, miten kauan rakenteet, erityisesti ovet kestäisivät simuloinnin antamia lämpörasituksia. Lämpörasitukselle sopiva mittari on kohteeseen tiettyä aikana  $\Delta t$  kertynyt lämpövuoto  $q''$ , joka saadaan integroimalla kohteeseen kohdistuvaa lämpövuotoa  $\dot{q}''(t)$

$$q'' = \int_0^{\Delta t} \dot{q}''(t) dt . \quad (1)$$

missä lämpövuoto  $\dot{q}''(t)$  saadaan joko suoraan lämpövuosensorin (HF) lukemasta tai käyttäen kaavaa

$$\dot{q}''(t) = h \cdot (T(t) - T_s) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left( (T(t) + 273)^4 - (T_0 + 273)^4 \right) . \quad (2)$$

missä  $T(t)$  [°C] on kohdetta rasittava lämpötila,  $T_0 = 20$  °C ja  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ WK}^{-4} \text{ m}^{-2}$ . Lämmönsiirtokertoimelle voidaan käyttää arvoa  $h = 25 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  ja emissiviteetille arvoa  $\varepsilon = 1$ . Koska rakennustuotteet luokitellaan palonkestävyyden suhteen standardipalo-olosuhteiden mukaan, on palonkestävyyttä koskevat tulokset käytännöllistä ilmaista suhteessa ajan  $\Delta t_{std}$  kestävä standardipalorasitukseen, joka voidaan arvioida käyttäen edellä esitettyjä kaavoja seuraavasti:

$$q''_{std} = \int_0^{\Delta t_{std}} \dot{q}''_{std}(t) dt , \quad (3)$$

missä

$$\dot{q}_{std}''(t) = h \cdot (T_{std}(t) - T_0) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((T_{std}(t) + 273)^4 - (T_0 + 273)^4) \quad (4)$$

ja

$$T_{std}(t) = T_0 + 345 \text{ °C} \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1), \quad (5)$$

missä aika  $t$  ilmaistaan minuuteissa.

## 4 Tarkastellut palotilanteet

Palotilannetta tarkasteltiin käymällä läpi erilaisia uhkakuvamalleja eli skenaariota.

Tässä raportissa kunkin paloskenaarion kuvaus käsittää seuraavat asiat:

- Palon alkamista koskevat oletukset, jotka ovat ennalta valittuja oletuksia siitä, että
  - missä palo syttyy
  - kuinka voimakas alkupalo on.
- Palon aikana tapahtuvat ilmiöt ja ihmisten toimenpiteet, jotka käsitellään seuraavasti:
  - Palon aikana tapahtuvat ilmiöt, kuten lämpötilan kehittyminen, lasiruutujen särkyminen lämpötilan vaikutuksesta, ovien puhki palaminen, liekkien ja myrkyllisten kaasujen leviäminen, jne., lasketaan palonsimulointiohjelmalla.
  - Ihmisten toimenpiteisiin liittyvistä asioista olennaisia tässä tapauksessa ovat ovien ja ikkunoiden aukaisemiset ja sulkemiset, koska nämä vaikuttavat siihen, miten palo saa happea. Myös nämä asiat käsitellään olettamuksien perusteella.

On huomattava, että kaksi viimeksi mainittua tapahtumaa, so. puhtaasti fysikaaliset ilmiöt ja ihmisten toimintaan liittyvät tekijät, eivät ole erillisiä vaan vuorovaikuttavat voimakkaasti. Tässä tarkastelussa tulee esille etenkin ihmisten toiminnan suuri merkitys palon leviämislle.

### 4.1 Palon syttymispaikka ja alkupalon voimakkuus

Asuinrakennusten tulipalot syttyvät tyypillisesti tiloissa, joissa on ihmisiä ja/tai laitteita, jotka voivat syttyä esim. vikaantumisen vuoksi. Tässä raportissa tarkasteltavassa kohteessa alakerran keittiö olisi tämän perusteella todennäköisin syttymispaikka. Tapahtumasta saatujen kuvausten ja palojälkien perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että palo ei ole alkanut alakerran keittiöstä. Tätä tukee mm. se, että keittiön kaapistojen alalaidoissa on palon jälkeenkin vielä osittain palamattomia pintoja.

Tapahtumakuvaukset ja palojäljet viittaavat siihen, että palo olisi alkanut alakerran eteisessä. Tätä tukevat seuraavat seikat:

- Alakerran eteisen lattia on hiiltynyt voimakkaasti.
- Palon alkuvaiheessa huoneessa 11<sup>3)</sup> ollut henkilö avasi huoneen oven ja poistui talosta ulko-oven kautta. Tässä vaiheessa eteisessä paloi jo ehkä

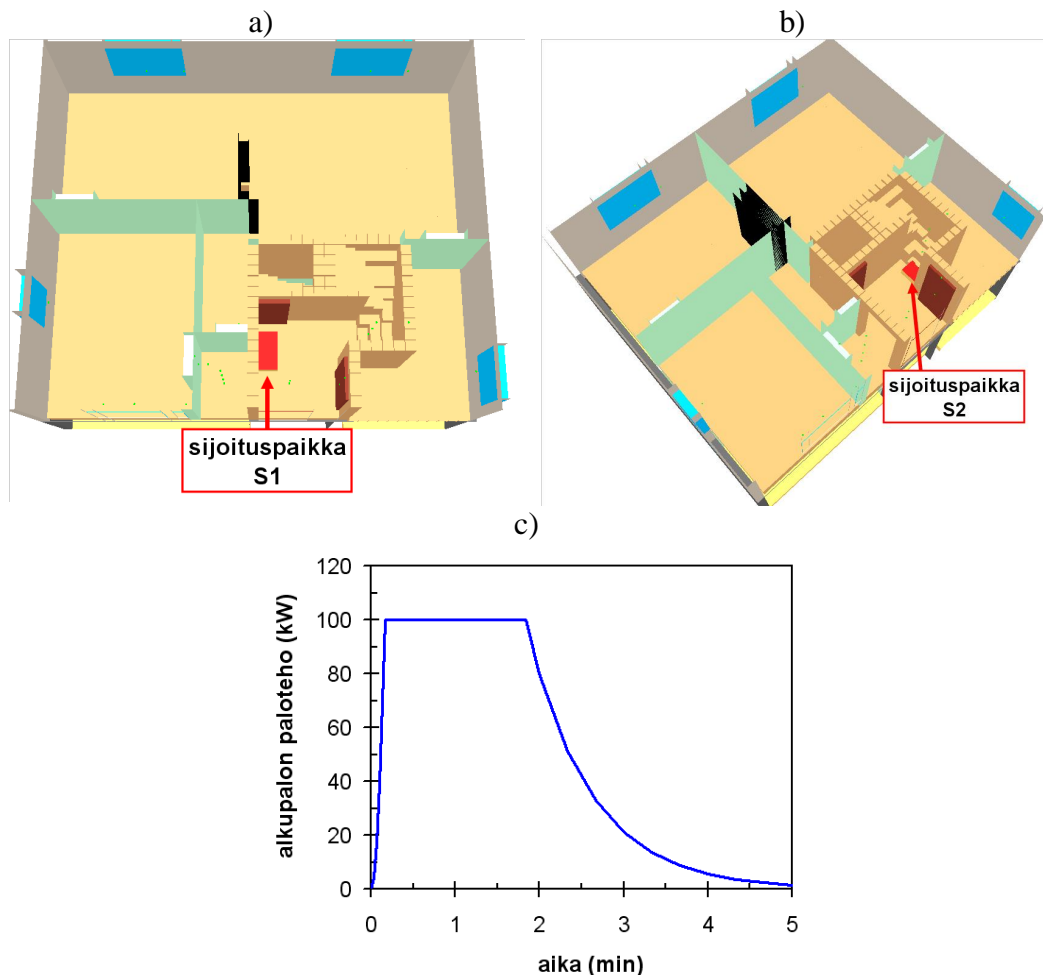
<sup>3</sup> Tässä raportissa käytettävät eri tilojen nimitykset on esitetty kuvassa 5.

suhteellisen voimakkaastikin, koska ko. henkilön hiukset paloivat jonkin verran.

- Alakerran keittiössä oli henkilö, joka avasi oven eteiseen (ovi o10), ja poistui tämän jälkeen keittiön ikkunan kautta.

Edellä mainituista syistä tässä raportissa keskitytään eteisessä tapahtuviin syttyimiin kuvassa 8a ja 8b esitetyissä paikoissa (sijainnit S1 ja S2).

VTT:n saamien tietojen perusteella ei voida sanoa, mikä olisi aiheuttanut palon syttymisen eteisessä. Myöskään palon tarkka alkamispaikka ei ole tiedossa. Siksi tässä tarkasteltava alkupalo on puhtaasti hypoteettinen tilanne, jossa jokin tekstiili, esim. matto tai huopa syttyy palavan nesteen vaikutuksesta. Tämä valinta perustuu mm. siihen, että tällaisesta syttymästä on olemassa dataa Yhdysvalloissa tehdyistä kokeista [Putorti 2001]. Asiaa tarkastellaan lähemmin liitteessä B. Tarkastelun tuloksena valittiin alkupalo, jonka maksimipaloteho on 100 kW ja ajallinen kesto pari minuuttia.



Kuva 8. Alkupalon sijaintipaikat (a ja b) ja c) sen palotehon ajallinen kehittyminen.



## 4.2 Ihmisten toiminnan kuvaukset

Siitä, miten uhrin ja henkiin jääneet henkilöt toimivat tulipalon sattuessa ei liene saatavilla yksikäsitteistä kuvaa. Siksi tässä raportissa tätäkin seikkaa lähestytään niiden kvalitatiivisten tietojen perusteella, joita VTT:lle tilanteesta on annettu [Anon 2008].

Ihmisten toiminnan suhteen tarkastellut tilanteet ovat seuraavat:

- **Skenaario S1:** Referenssitapauksena tarkastellaan tilannetta, jossa ihmiset eivät suoraan vaikuta palon leviämiseen, vaan ainoa palon leviämiseen vaikuttava tekijä on ulko-oven lasin rikkoutuminen noin minuutti palon alkamisen jälkeen. Oveen syntyvän reiän koon oletetaan olevan  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ .
- **Skenaario S2:** Toisena tapauksena tarkastellaan sitä, miten palon kehittymiseen vaikuttaa se, että huoneen 11 asukas poistui rakennuksesta oven O12 ja ulko-oven kautta. Poistumisen oletetaan tapahtuneen 60-70 s palon alkamisesta (ovi O12 aukeaa hetkellä 60 s ja ulko-ovi hetkellä 70 s). Tämän tilanteen suhteen tarkastellaan kahta eri vaihtoehtoa:
  - Ensimmäisessä vaihtoehdossa oletetaan, että ulko-ovi jää täysin auki ja ovi O12 raolleen.
  - Toisessa vaihtoehdossa oletetaan, että vain ulko-ovi jää auki ja ovi O12 sulkeutuu hetkellä 65 s.
- **Skenaario S3:** Kolmantena tapauksena tarkastellaan sitä, miten palon kehittymiseen vaikuttaa se, että yläkerran huoneen 21 asukas siirtyi jossain vaiheessa huoneeseen 22, johon hän sitten menehtyi. Mallissa oletetaan, että tämä siirtyminen tapahtui siten, että huoneen 21 ovi (ovi O17) avataan hetkellä 90 s palon alkamisesta ja että se jää auki. Alakerran asukkaiden suhteen sovelletaan edellä kuvattua tilannetta, jossa huoneen 11 asukas poistuu rakennuksesta siten, että ulko-ovi jää auki ja ovi O12 sulkeutuu hetkellä 65 s.
- **Skenaario S4:** Neljäntenä tapauksena tarkastellaan tilannetta, joka kehittyy edellä kuvatun kolmannen tilannekuvauksen mukaisesti, mutta että sen lisäksi keittiössä ollut asukas avaa keittiön ja eteisen välisen oven (O10), joka jää auki, kun ko. henkilö pakenee keittiöstä sen ikkunoiden kautta.

## 5 Tulokset

### 5.1 Palon kehittyminen

Tässä kohdassa esitetään palon kehittyminen eri skenaarioissa sellaisena, kuin palonsimulointiohjelman tuloksista suoraan, ilman jatkoanalyysijä on pääteltävissä. Tarkennuksia ja yleistyksiä koskien etenkin rakenteellista palonkestävyyttä sekä paloturvallisuutta esitetään kohdassa 5.2.

#### 5.1.1 Skenaario 1

Paloteho skenaariossa S1 esitetään kuvassa 9. Palon kehittymisen yleiskuvaus 1. ja 2. kerroksessa esitetään kuvissa 10 ja 11. Lämpötilakentät eteisen leikkaavassa tasossa esitetään kuvassa 12 ja palon kehittyminen ulkoa katsottuna kuvassa 13.

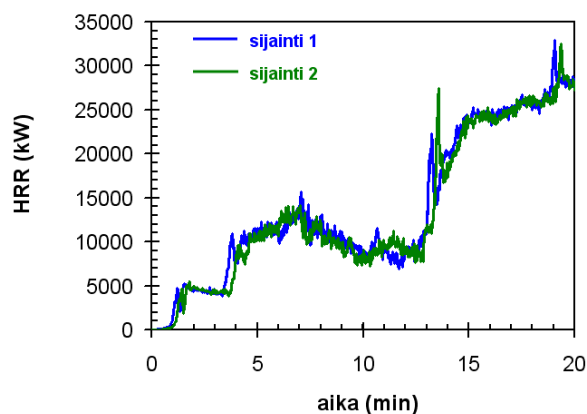
Tässä skenaariossa alkupalon sijainnilla ei ole olennaista merkitystä, kuten palotehon kehittyminen osoittaa. Siksi riittää tarkastella vain toista sijoituspaikkaa koskevia tuloksia; valitsemme sijoituspaikan 1.

Alkupalo kasvaa siten, että eteinen alkaa lieskahtaa jo ennen ulko-oven lasin rikkoutumista. Kun lasi rikkoutuu, palon kasvaminen kiihtyy voimakkaasti (kuvat 9, 10 a ja b sekä 12 a ja b). Liekkien ja kuumien kaasujen leviäminen suuntautuu ylös porrashuonetta (kuvat 10 b ja 11 a). Eteiseen syntyvä ylipaine aiheuttaa myös suhteellisen voimasta ulkoista liekehdtintää ulko-oven rikkoutuneen lasin luona (kuvat 10b ja 13a). Toisen kerroksen ylätasanteella tulee nopeasti niin kuuma, että sen ikkuna särkyä. Simuloinnin mukaan ikkuna rikkoutuu hetkellä 1 min 15 s (kuvat 11b ja 13a). Tämän ikkunan rikkoutumisen jälkeen porrashuone alkaa toimia hormina, mikä näkyy selvästi siitä, että ulkoinen liekehdtintä ulko-ovella suuntautuu sisäänpäin, kuten kuvien 10b ja 10c sekä kuvien 13a ja 13b vertaaminen osoittaa.

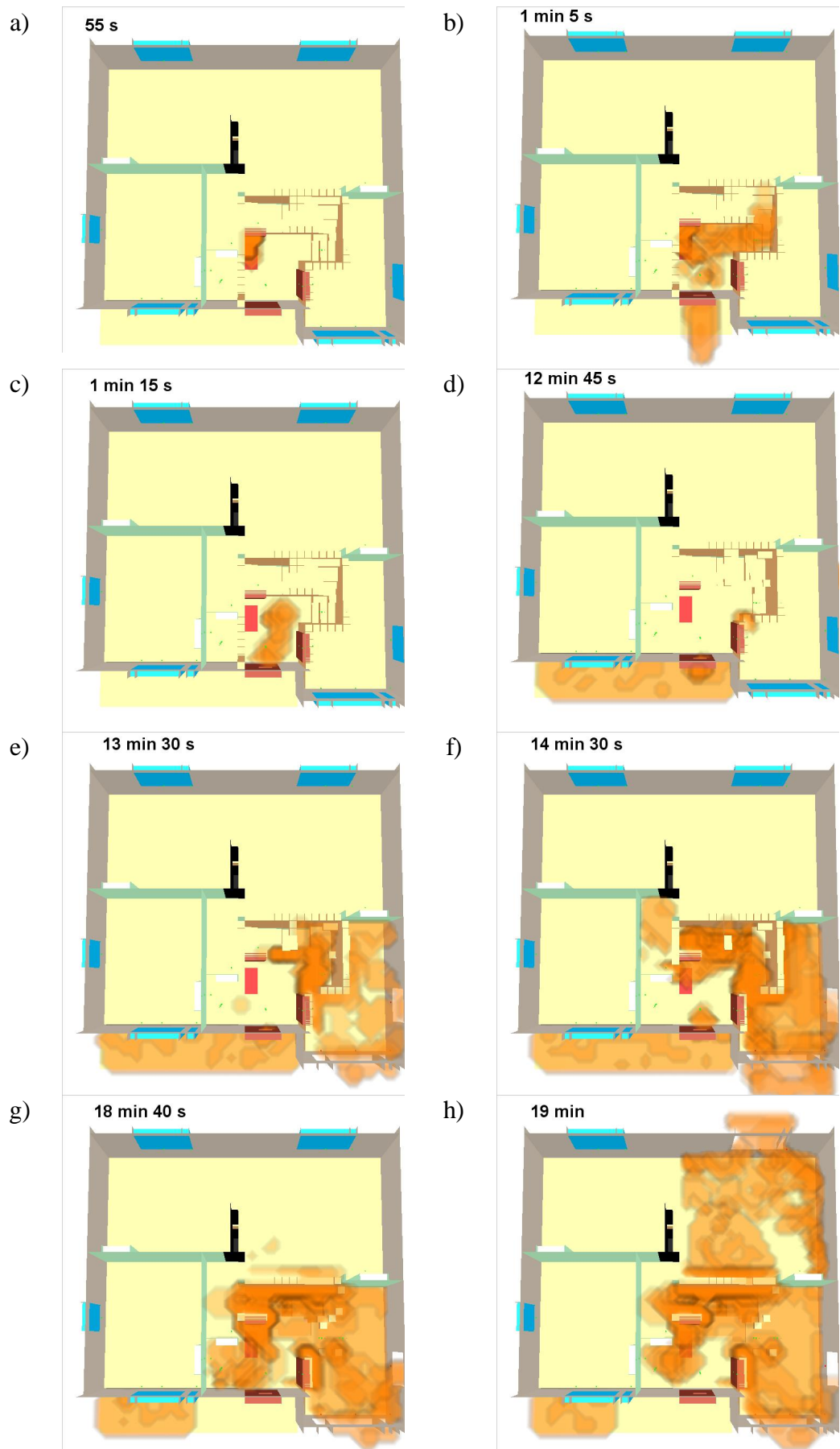
Tästä eteenpäin noin 10 minuutin ajan palo leviää ulkona räystäälle ja kuistille (kuvat 13c ja 13d). Sisällä liekehdtintä tapahtuu pääasiallisesti toisen kerroksen rikkoutuneen ikkunan luona. Lämpötilat eteisessä, porrashuoneessa ja 2. kerroksen hallissa ovat korkeita, noin 500-1000 °C (kuva 12c). Siksi paloon osallistuvat pinnat pyrolysoituvat nopeasti.

Simuloinnissa eteisen ja huoneen H11 välille syntyy yhteys puhkipalamisen vuoksi noin 12,5-13,5 minuutin kuluessa palon alkamisesta ja liekehdtintä leviää nopeasti huoneeseen H11, jonka ikkuna rikkoutuu pian palon leviämisen jälkeen (kuvat 10d, 10e ja 10 f sekä kuva 12d). Toisessa kerroksessa tapahtuu vastaavanlainen rajapinnan puhkipalaminen: ensin palo leviää hallista huoneeseen H21 ja hyvin pian tämän jälkeen huoneeseen H22 (kuvat 11e, 11f ja 11g). Nämä palon leviämiset näkyvät myös palotehossa, joka kasvaa noin 10 MW:sta noin 25 MW:iin. Palo leviää ensimmäisessä kerroksessa WC-tilaan noin 14,5 minuutissa, mutta hapen puutteen takia palo siellä ei ole niin voimakasta kuin muualla (kuvat 10f ja 10g).

Alakerrassa huone H11 palaa niin kuumana, että palo leviää huoneeseen H12 huoneiden välisen rajapinnan palaessa puhki noin ajassa 18,5-19 minuuttia.



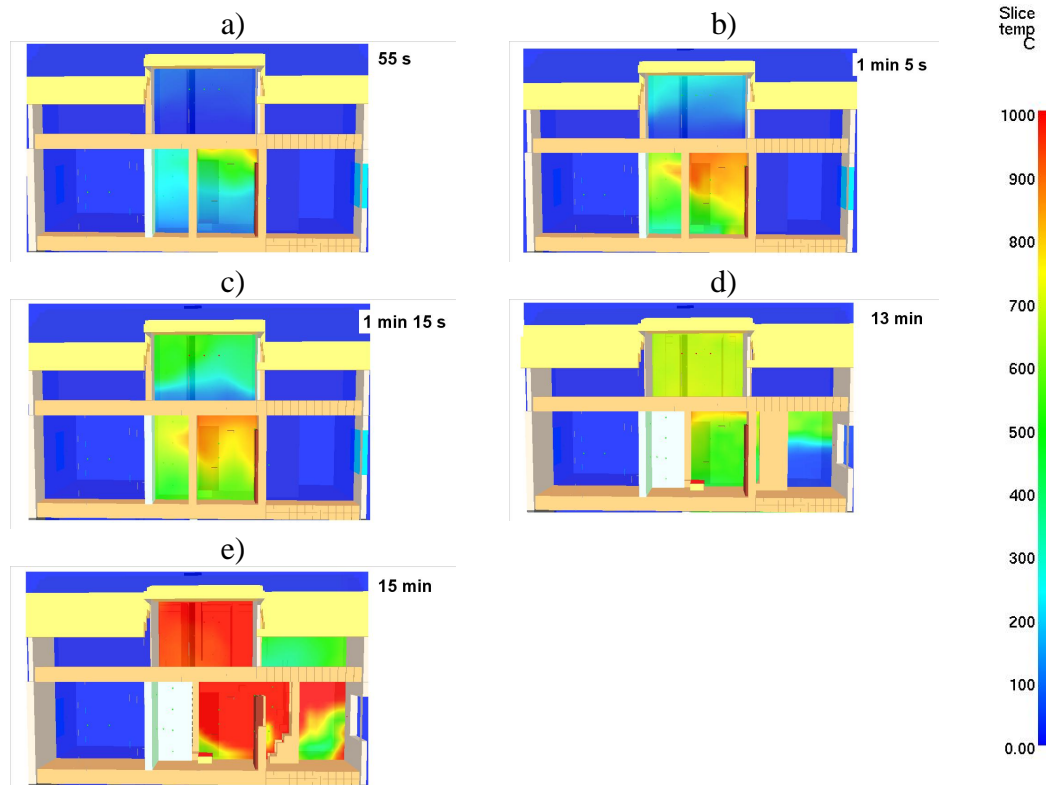
Kuva 9. Paloteho skenaariossa S1, kun alkupalo sijaitsee paikassa 1 tai paikassa 2.



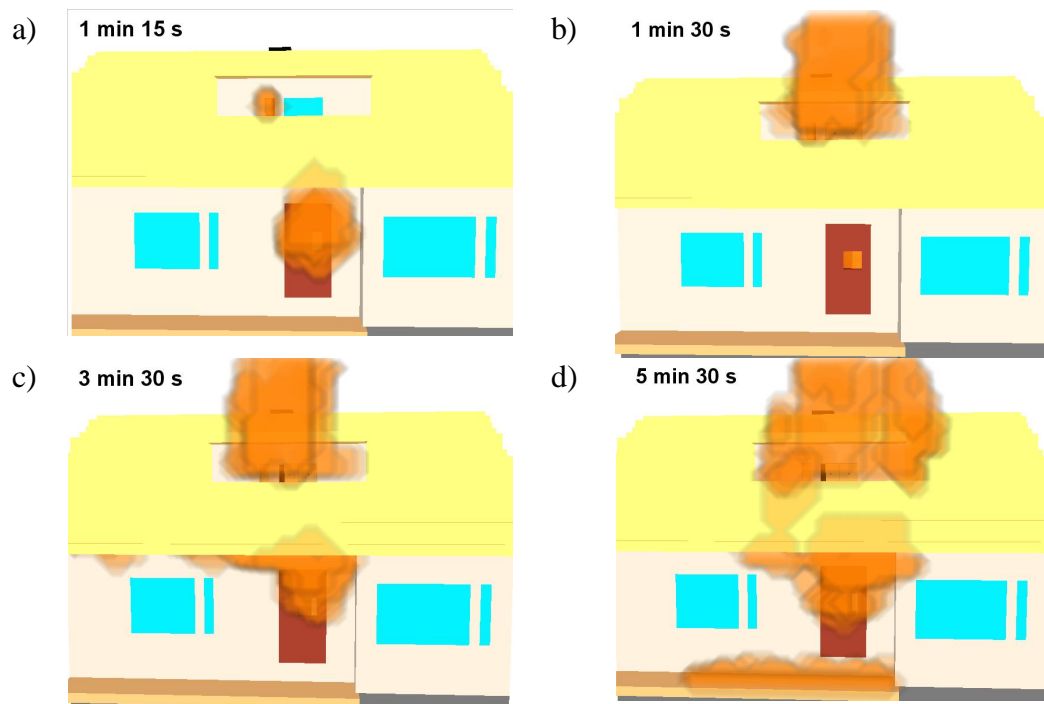
Kuva 10. Palon kehittyminen alakerrassa skenaariossa S1.



Kuva 11. Palon kehittyminen yläkerrassa skenaariossa S1.



Kuva 12. Lämpötilakenttä eteisen leikkaavassa tasossa skenaariossa S1.



Kuva 13. Palon kehittyminen skenaariossa S1 ulkopäin katsottuna.

### 5.1.2 Skenaario 2

Paloteho skenaariossa S2 esitetään kuvassa 14. Nähdään, että tässä tapauksessa alkupalon sijainnilla on vaikutusta siinä tapauksessa, jossa huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan noin 5 s:n kuluessa sen avautumisesta. Tapauksessa jossa

huoneen H11 ovi jää osittain auki sieltä poistuvan henkilön jäljiltä, alkupalon sijainnilla ei ole merkitystä palon kehittymiseen.

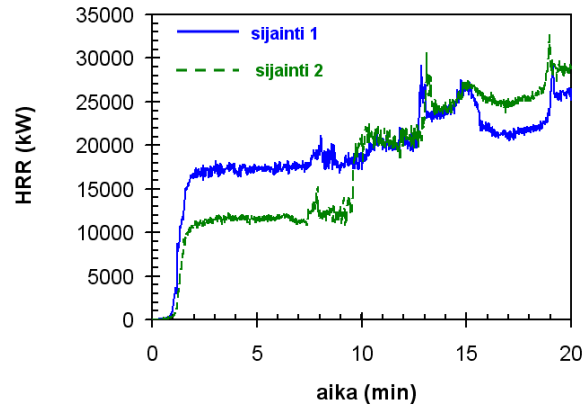
Syy tähän eroon näiden kahden oven O12 aukioloa ja alkupalon sijaintia koskevan vaihtoehdon välillä tulee esille kuvista 15 ja 16, joissa esitetään palon kehittyminen ulkoa katsottuna: kun alkupalo sijaitsee paikassa 1, joka on selvästi paikkaa 2 lähempänä ovea O12, alkupalon paikasta 1 liekit ehtivät työntymään huoneeseen H11 ja aiheuttamaan sen syttymisen, mikä johtaa ikkunan rikkoutumiseen, jonka jälkeen huoneeseen H11 syntyy itseään ylläpitävä palo (kuva 15). Kun alkupalo on paikassa 2, palo ei ehdi leviämään huoneeseen H11 (kuva 16).

Tilanteesta otetut valokuvat osoittavat, että pelastushenkilöstön saapuessa paikalle huoneessa H11 oli merkkejä palosta, mutta ei kuitenkaan niin voimakkaasta palosta, että ikkunat olisivat särkyneet kokonaan. Tämä tilanne sopii paremmin yhteen simulointien kanssa, kun alkupalon sijainti on 2 (portaiden alapäässä) ja tilanteeseen, jossa huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan sen jälkeen, kun siellä ollut henkilö on poistunut.

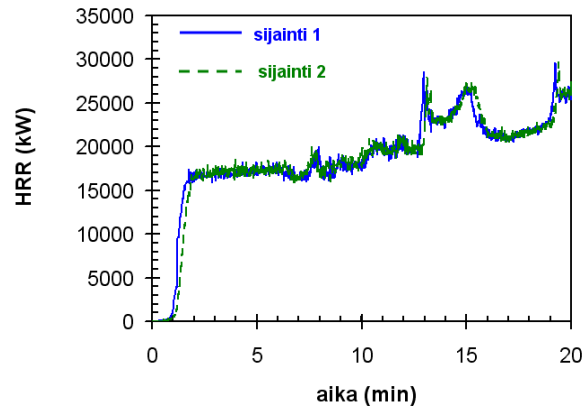
Palon kehittymisen yleiskuvaus 1. ja 2. kerroksessa skenaariossa 2 em. tilanteessa esitetään kuvissa 17 ja 18. Lämpötilakentät eteisen leikkaavassa tasossa esitetään kuvassa 19. Palon kehittyminen etenee seuraavalla tavalla:

- Eteinen lieskahtaa ulko-oven auki jäämisen jälkeen (kuvat 17b ja 19c).
- Liekkien ja kuumien kaasujen leviäminen suuntautuu ylös porrashuonetta ja noin hetkellä 1,5 minuuttia toisen kerroksen ylätasanteella tulee nopeasti niin kuuma, että sen ikkuna särkyä (kuvat 16c, 18c ja 19d).
- Yläikkunan rikkoutumisen jälkeen porrashuone alkaa toimia hormina, joka muuttuu hyvin kuumaksi (esim. 7 minuutin kohdalla keskimääräinen lämpötila on yli 1000 °C, kuva 19e).
- Palo leviää eteisestä huoneeseen H11 noin aikavälillä 9-9,5 min (kuvat 16e, 17d ja 17e).
- Yläkerrassa palo leviää huoneeseen H21 runsaan 13 minuutin palon jälkeen ja pian tämän jälkeen myös huoneeseen H22 (kuvat 18f-h).
- Alakerrassa palo leviää huoneeseen H12 18-19 minuutin palon jälkeen (kuvat 17h ja 17i).

a)

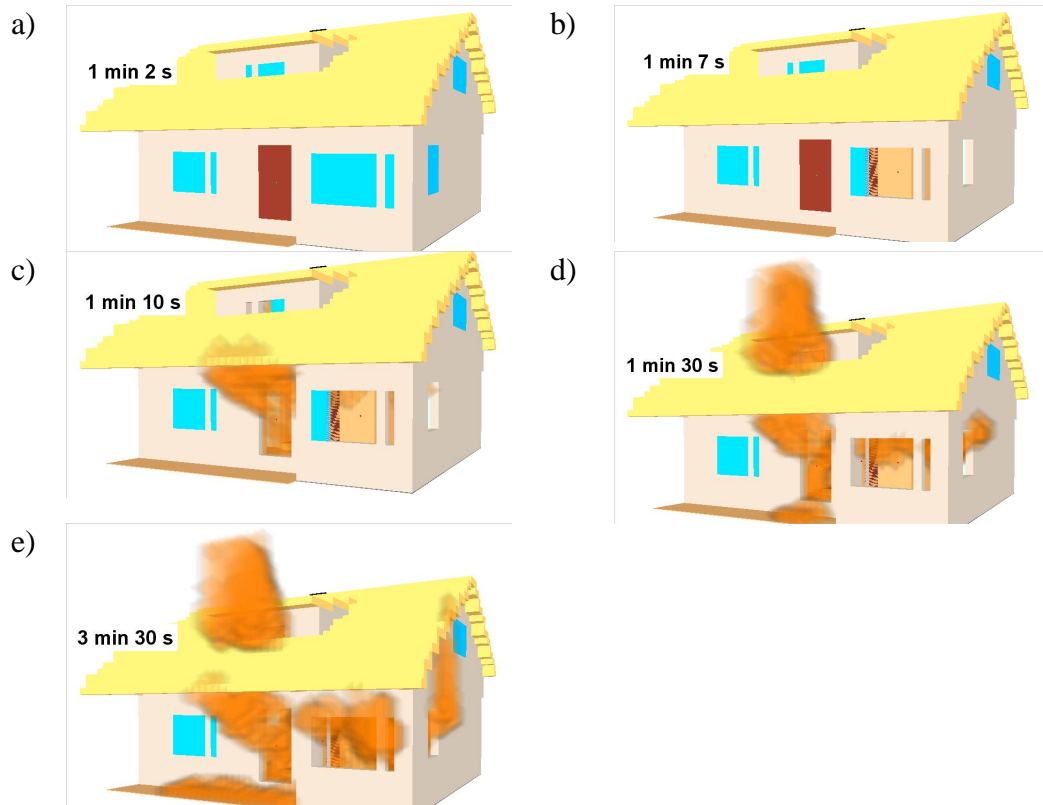


b)

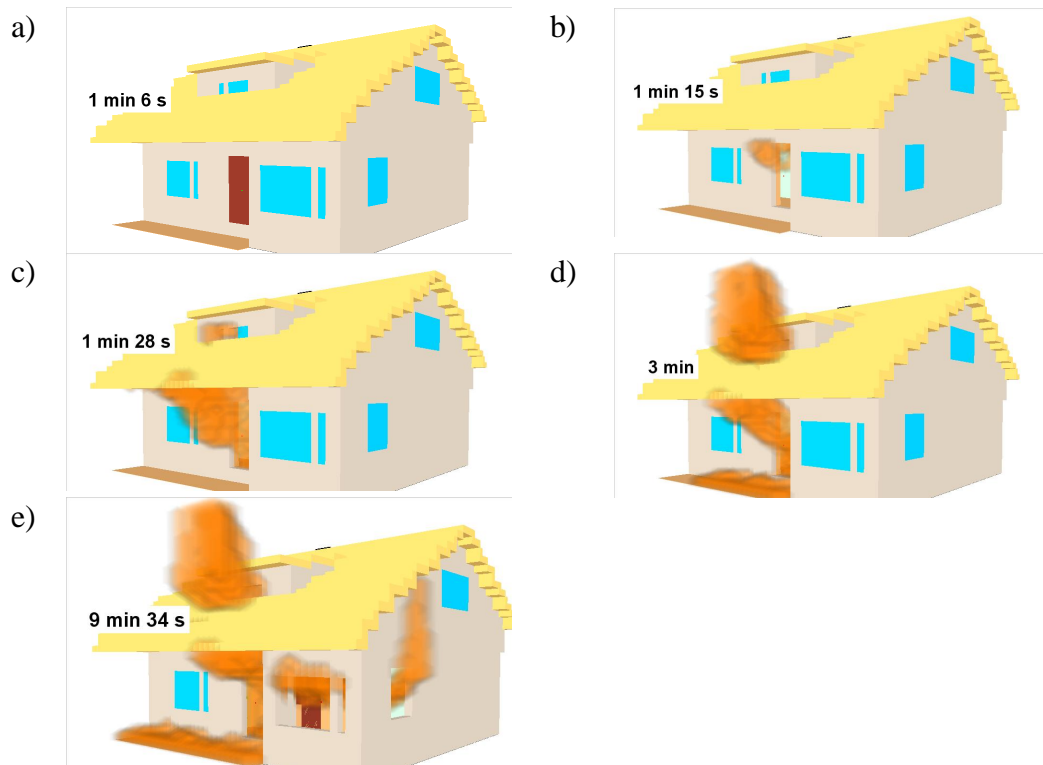


Kuva 14. Paloteho skenaariossa S2, kun alkupalo sijaitsee paikassa 1 tai paikassa 2: a) tapaus, jossa huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan noin 5 s:n kuluessa sen avautumisesta ja b) tapaus, jossa huoneen H11 ovi jää osittain auki sieltä poistuvan henkilön jäljiltä



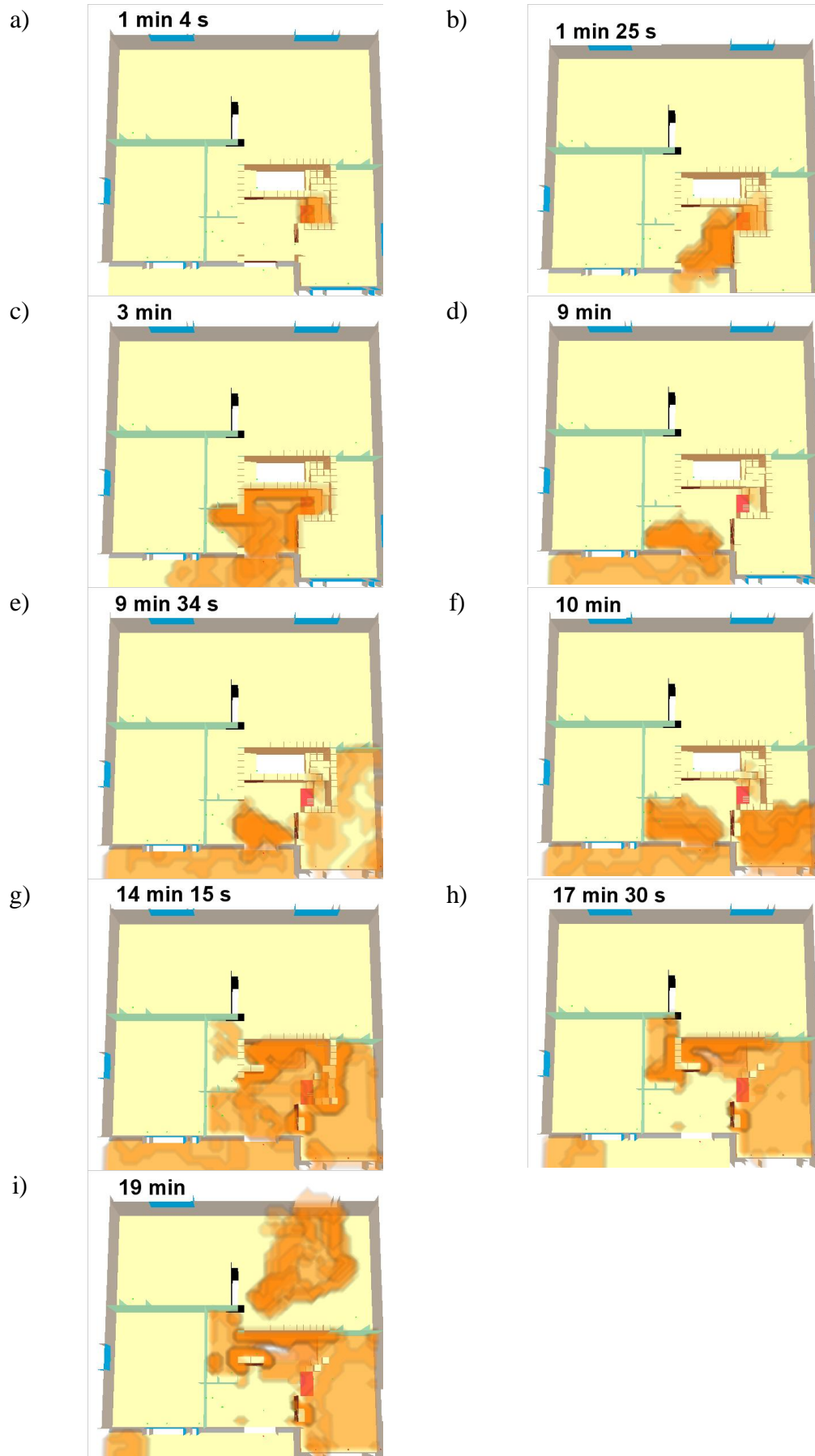


*Kuva 15. Palon kehittyminen ulkopäin katsottuna skenaariossa S2: tapaus, jossa alkupalo sijaitsee paikassa 1 ja huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan noin 5 s:n kuluessa sen avautumisesta.*

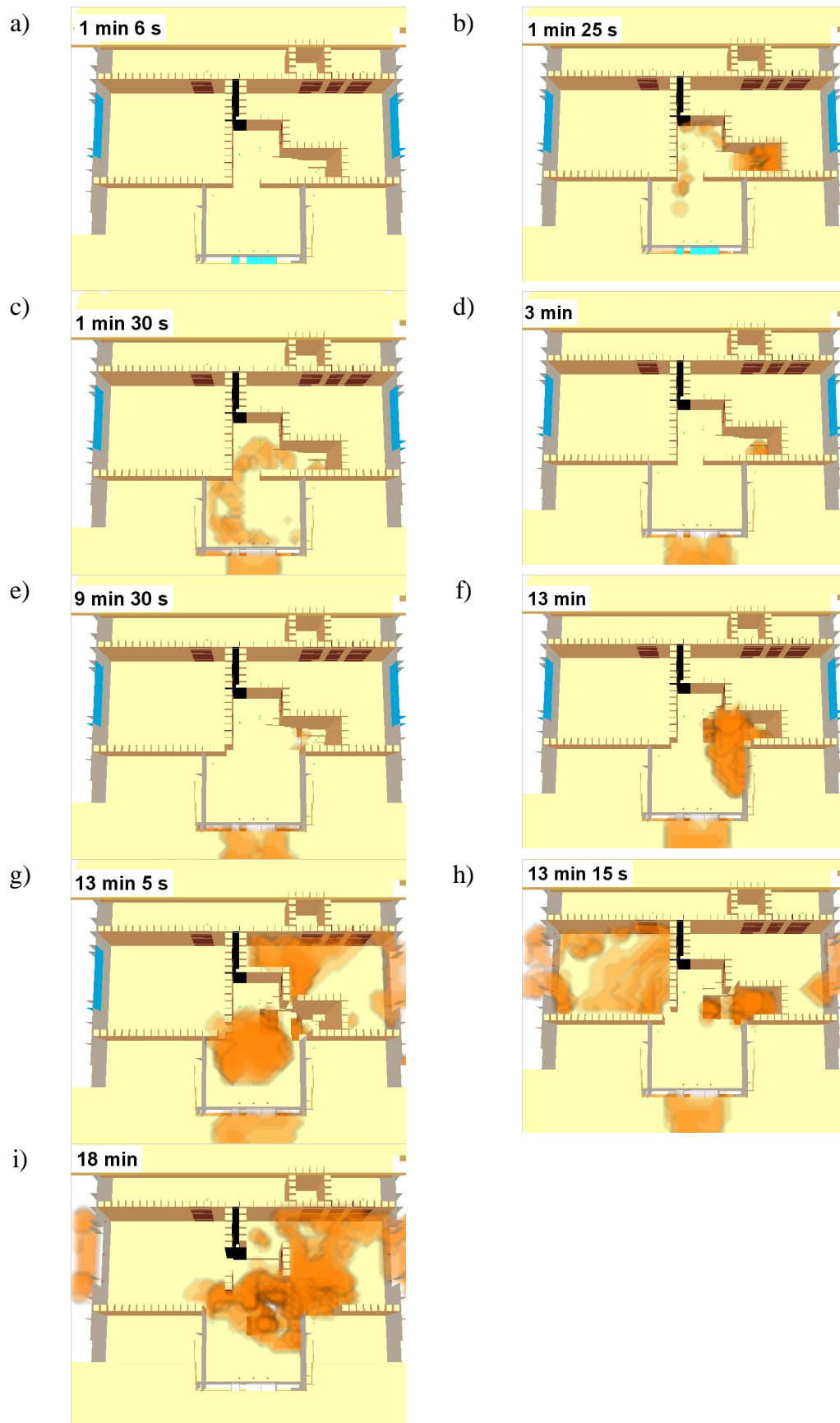


*Kuva 16. Palon kehittyminen ulkopäin katsottuna skenaariossa S2: tapaus, jossa alkupalo sijaitsee paikassa 2 ja huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan noin 5 s:n kuluessa sen avautumisesta.*

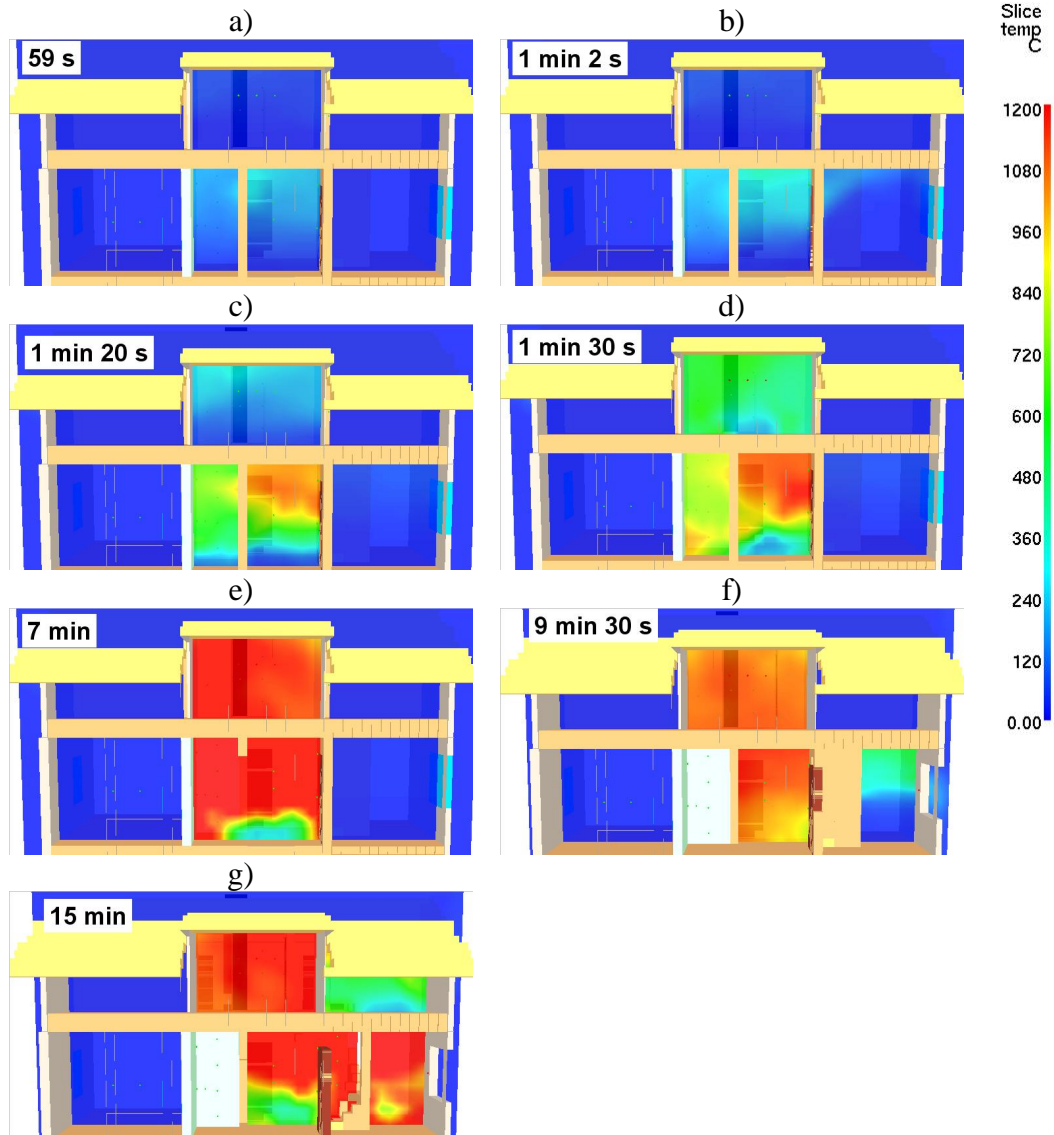




Kuva 17. Palon kehittyminen alakerrassa skenaariossa S2, kun alkupalon sijaintipaikka on 2 ja jossa huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan sen jälkeen, kun siellä ollut henkilö on poistunut.



Kuva 18. Palon kehittyminen yläkerrassa skenaariossa S2, kun alkupalon sijaintipaikka on 2 ja jossa huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan sen jälkeen, kun siellä ollut henkilö on poistunut.

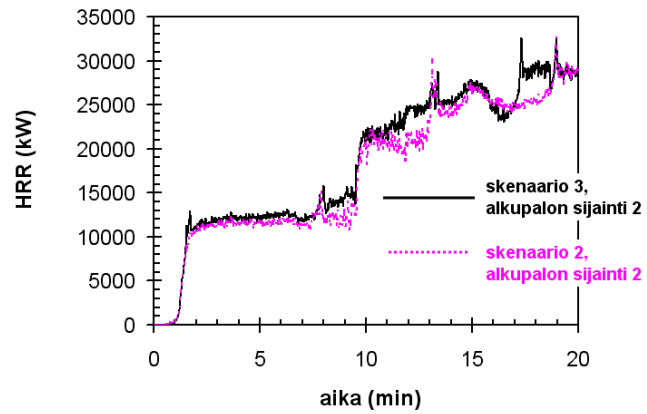


Kuva 19. Lämpötilakenttä eteisen leikkaavassa tasossa skenaariossa S2, kun alkupalon sijaintipaikka on 2 ja jossa huoneen H11 ovi sulkeutuu kokonaan sen jälkeen, kun siellä ollut henkilö on poistunut.

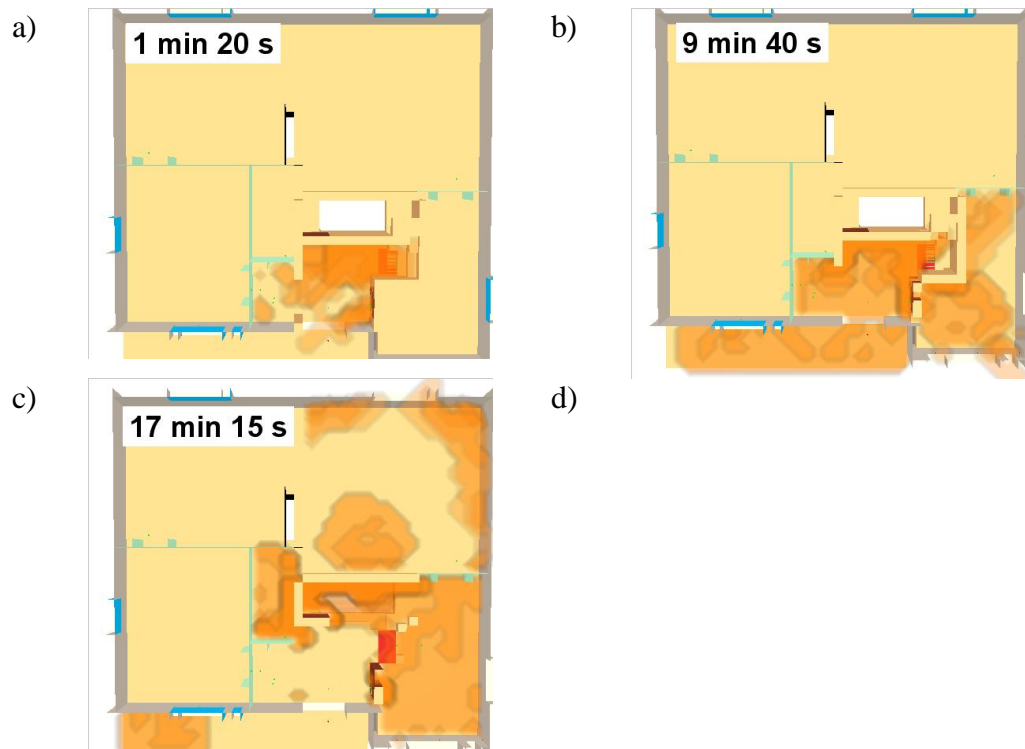
### 5.1.3 Skenaario 3

Paloteho skenaariossa S3 esitetään kuvassa 20. Tämä tulos on lähes identtinen skenaariossa 2 lasketun palotehon kanssa (esitetty vertailun helpottamiseksi kuvassa 20). Siksi onkin odotettavissa, että palon kehittyminen ja palovaarat ovat varsin samanlaiset näissä skenaariossa lukuun ottamatta tietenkin sitä, että skenaariossa 3 palo leviää yläkerran huoneeseen H21 oven O17 kautta jo hetkellä 90 s palon alkamisesta (skenaariossa 2 tämä tapahtuu palon jatkuttua runsaat 13 minuuttia).

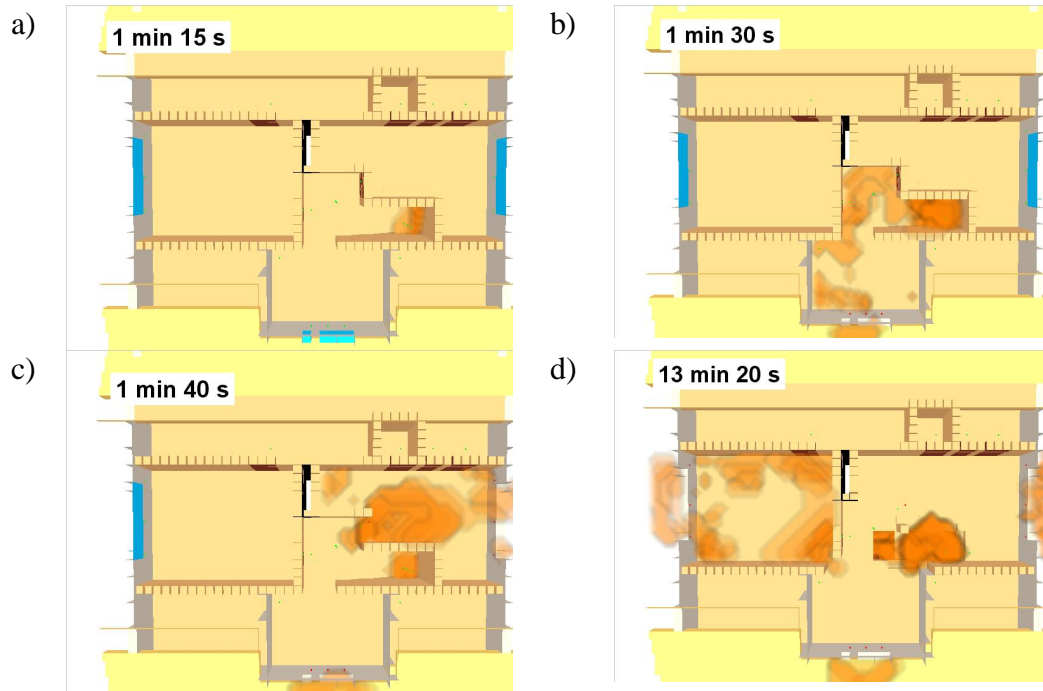
Kuvissa 21 ja 22 esitetyt kuvasekvenssit ja kuvassa 23 esitetty lämpötilajakauma osoittavat, että skenaarion 2 palonkehitys on huonetta H21 lukuun ottamatta hyvin samankaltainen skenaarion 2 kanssa.



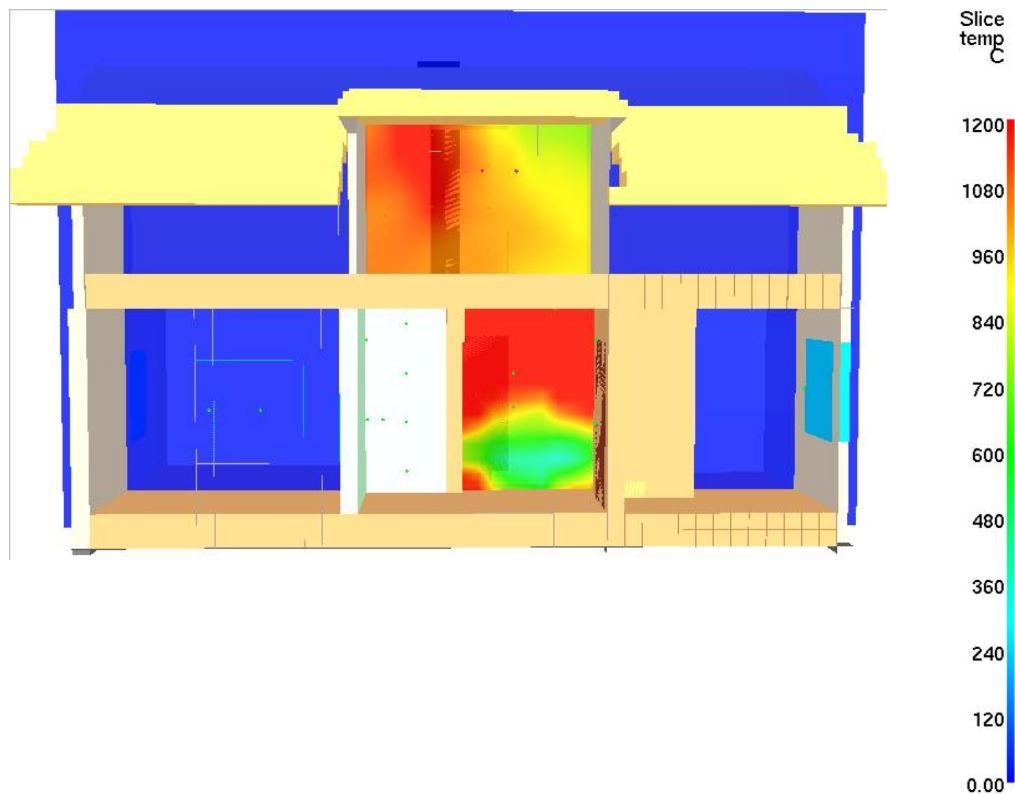
Kuva 20. Paloteho skenaariossa S3, kun alkupalo sijaitsee paikassa 2. Vertailun vuoksi esitetään myös samaa alkupalon paikkaa vastaava paloteho skenaariossa 2.



Kuva 21. Palon kehittyminen alakerrassa skenaariossa S3.



Kuva 22. Palon kehittyminen yläkerrassa skenaariossa S3.



Kuva 23. Lämpötilakenttä eteisen leikkaavassa tasossa skenaariossa S3 hetkellä 7 minuuttia.

#### 5.1.4 Skenaario 4

Paloteho skenaariossa S4 esitetään kuvassa 24. Nähdään, että skenaariossa 4 palo on ensimmäisen 15 minuutin aikana jonkin verran - noin neljänneksen - voimakkaampi kuin skenaariossa 2 ja 3. Tämä johtuu siitä, että keittiön oven

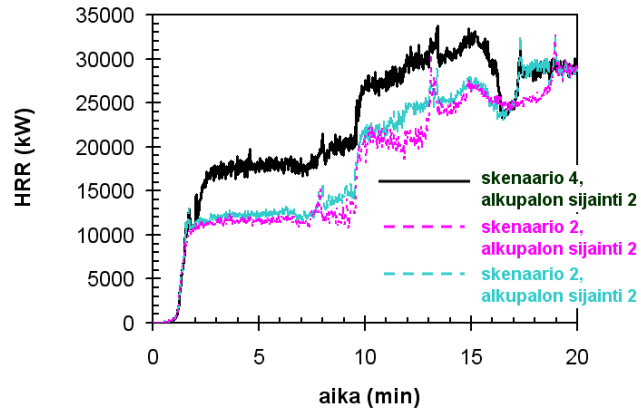
avaaminen tehostaa porraskäytävän toimintaa hormina alakerran ilma-aukkojen ja yläkerran ikkunan rikkoutuessa syntyvän aukon välillä.

On huomattava, että tässä skenaariossa saatu simulointitulokset vastaa varsin hyvin paikalta ennen sammutuksen aloittamista otettua valokuvaa, kuva 25.

Liekkien leviäminen ala- ja yläkerrassa sekä lämpötilan ja savuisuuden kehittyminen esitetään kuvissa 26-29. Tulosten mukaan palon kehittyminen etenee seuraavalla tavalla:

- Eteinen lieskahtaa ulko-oven auki jäämisen jälkeen (kuvat 26a ja 28a).
- Eteinen ja porrashuone täyttyvät nopeasti savulla siten, että sen kautta poistuminen olisi hyvin hankalaa (kuva 29 a ja 29b).
- Liekkien ja kuumien kaasujen leviäminen suuntautuu ylös porrashuonetta ja toisen kerroksen ylätasanteen ikkuna rikkoutuu noin hetkellä 1,5 minuuttia (kuvat 27b ja 28b).
- Kun yläkerran ikkuna on rikkoutunut, porrashuone alkaa toimia hormina, jossa liekit ja kuumat kaasut virtaavat ulko-ovelta ko. ikkunalle. Tämä kiihdyttää palamista niin, että eteinen ja porrashuone kuumenevat hyvin korkeaan lämpötilaan (n. 600-1200 °C, kuva 28c).
- Palo leviää yläkerran huoneeseen H21 suunnilleen samaan aikaan kun yläkerran ikkuna rikkoutuu eli hetkellä 1 min 30 s, kuva 27b ja 27c (tämä palon leviäminen kuuluu skenaarion kuvaukseen). Huoneen ikkuna rikkoutuu varsin nopeasti (alle 10 sekunnissa) sen jälkeen kun liekit ovat päässeet huonetilaan (kuva 27c).
- Alakerrassa palo leviää keittiöön hetkellä 2 min (tämä palon leviäminen kuuluu skenaarion kuvaukseen) ja tässäkin tapauksessa ikkunoiden rikkoutuminen tapahtuu nopeasti sen jälkeen, kun liekit ovat päässeet keittiöön (kuvat 26b ja 26c).
- Palo leviää eteisestä huoneeseen H11 noin 9 minuutissa (kuvat 26e ja 28f).
- Yläkerrassa palo leviää huoneeseen H22 vajaan 13,5 minuutin palon jälkeen H22 (kuva27f).
- Alakerran WC-tilaan palo leviää runsaan 14 minuutin jälkeen (kuva 26f).
- Alakerrassa palo leviää huoneeseen H12 n. 17 minuutin palon jälkeen (kuvat 26h).
- Simuloinnissa keittiön palo alkaa hiipua runsaan 15 minuutin jälkeen, mutta tämä aika riippuu pelkästään keittiöön määritellyn palokuorman määrästä, joka tässä simuloinnissa on vähäinen muodostuen pelkästään paloon osallistuvista pintaverhoilumateriaaleista.



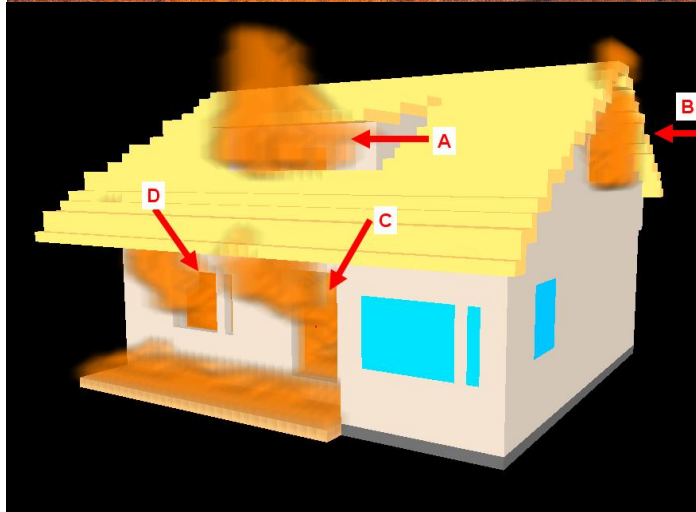


Kuva 24. Paloteho skenaariossa S4, kun alkupalo sijaitsee paikassa 2. Vertailun vuoksi esitetään myös samaa alkupalon paikkaa vastaava paloteho skenaarioissa 2 ja 3.

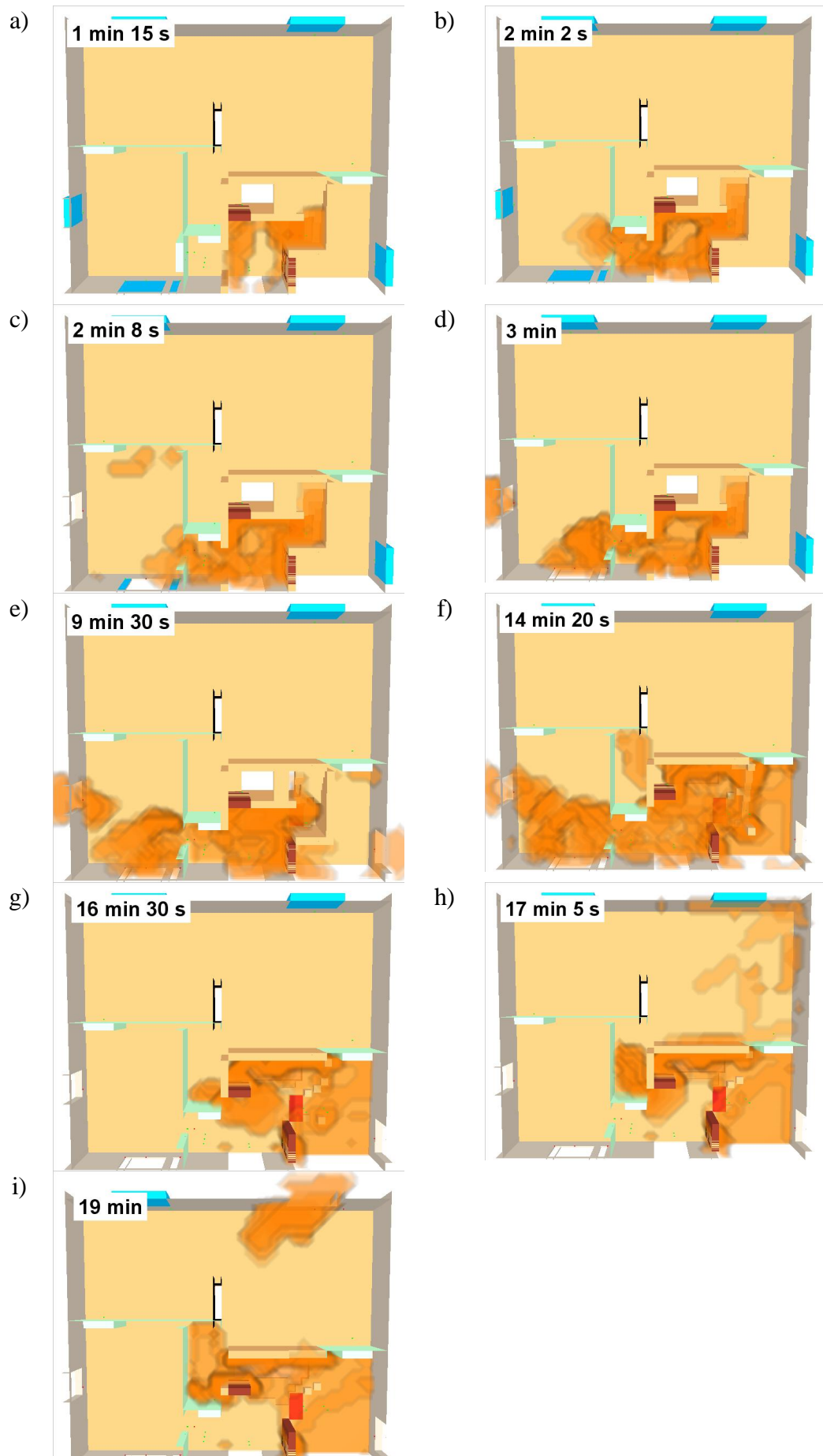
a)



b)

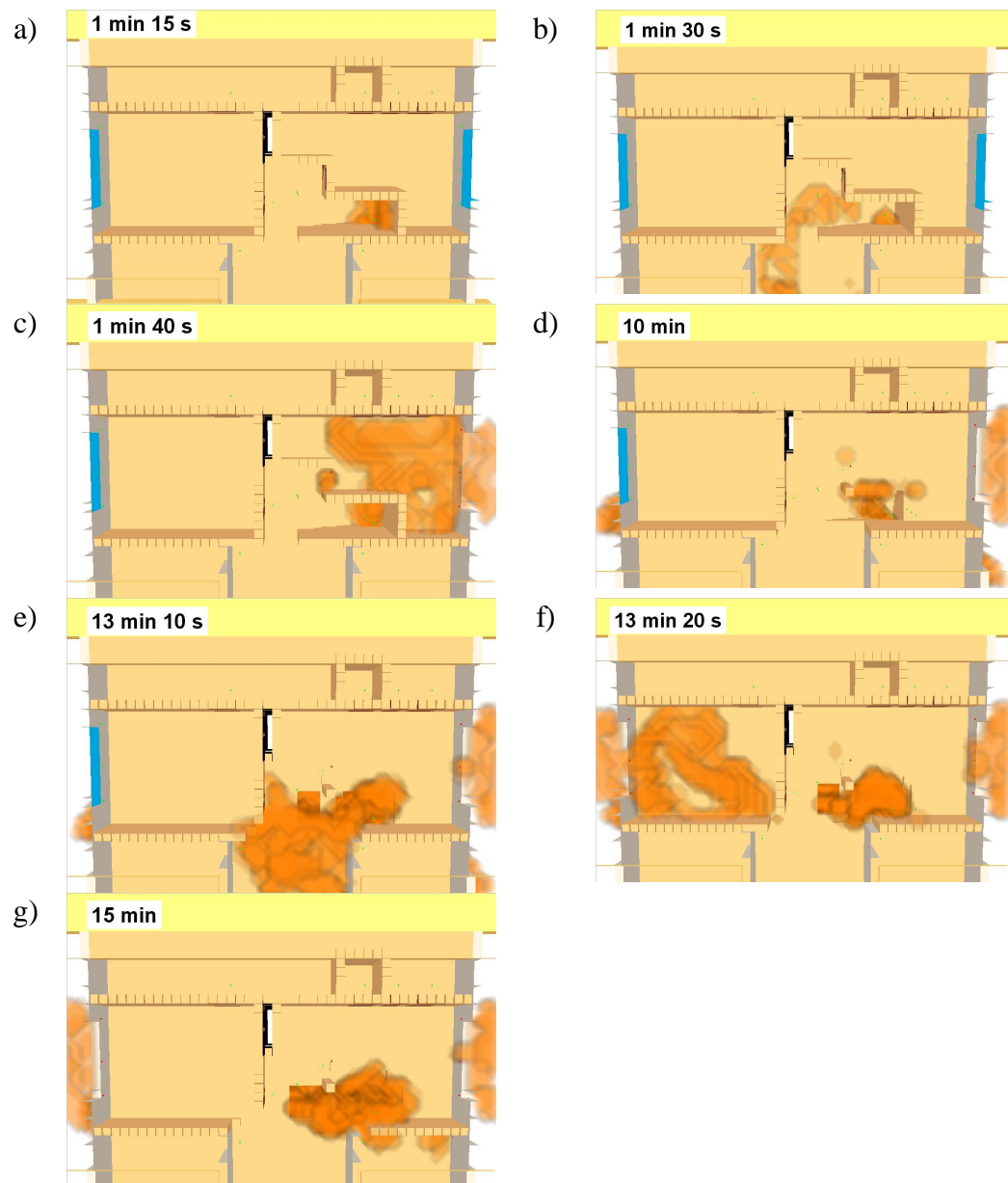


Kuva 25. a) Valokuva palon kehitysvaiheesta ennen sammuttamisen aloittamista [Espoon poliisi 2008]. b) Palonsimuloinnin antama tulos palonkehityksestä skenaariossa S4 noin 7 minuuttia palon alkamisen jälkeen, joka vastaa varsin hyvin kuvaa a), jossa liekit lyövät ulos yläkerran ikkunoista (A ja B), ulko-ovesta (C) ja keittiön ikkunasta (D).

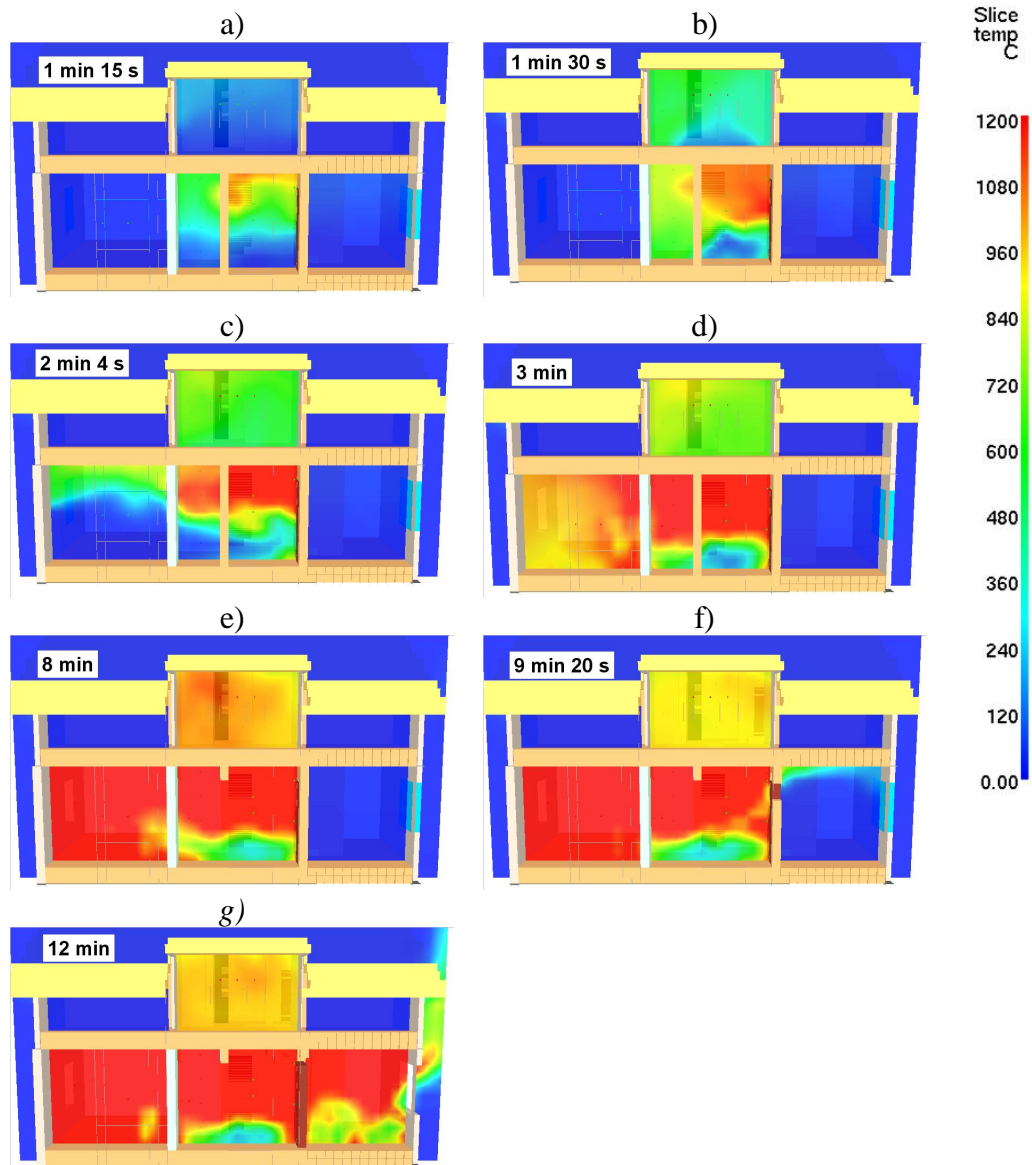


Kuva 26. Palon kehittyminen alakerrassa skenaariossa S4.

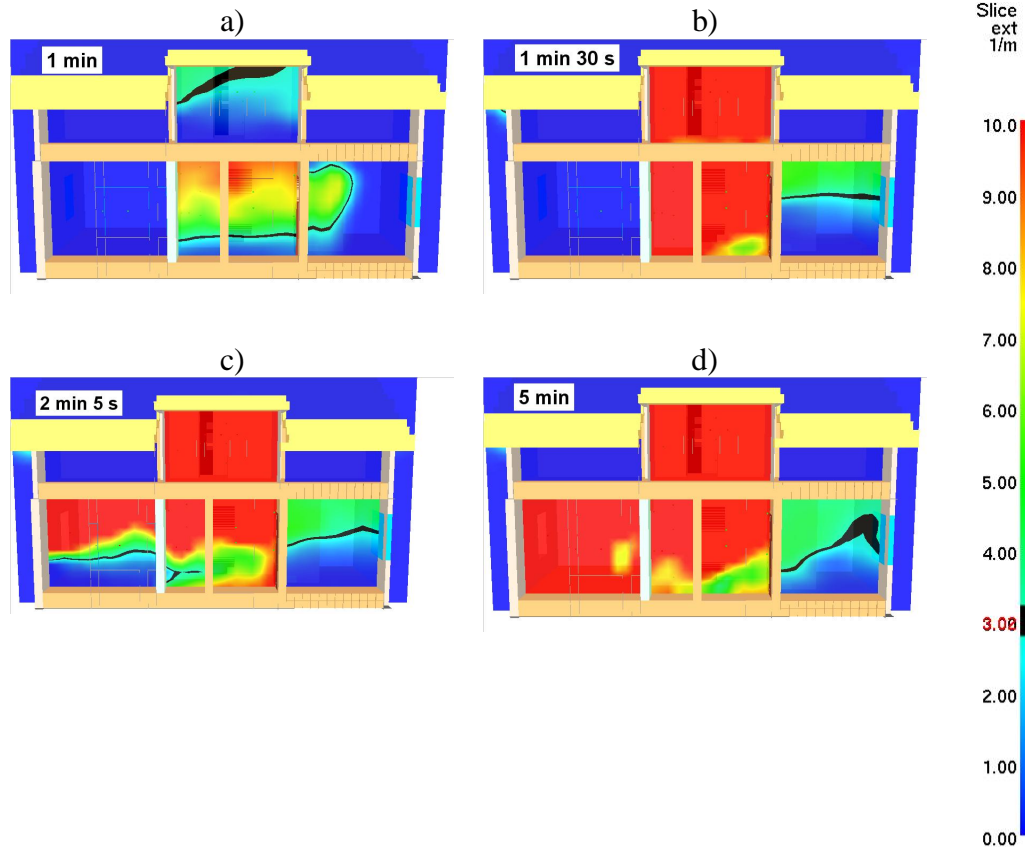




Kuva 27. Palon kehittyminen yläkerrassa skenaariossa S4.



Kuva 28. Lämpötilakenttä eteisen leikkaavassa tasossa skenaariossa S4.



Kuva 29. Savuntiheys eteisen leikkaavassa tasossa skenaariossa S4. Musta korostus vastaa arvoa  $3 \text{ m}^{-1}$ , joka kuvaa 1 m:n näkyvyyden rajaa.

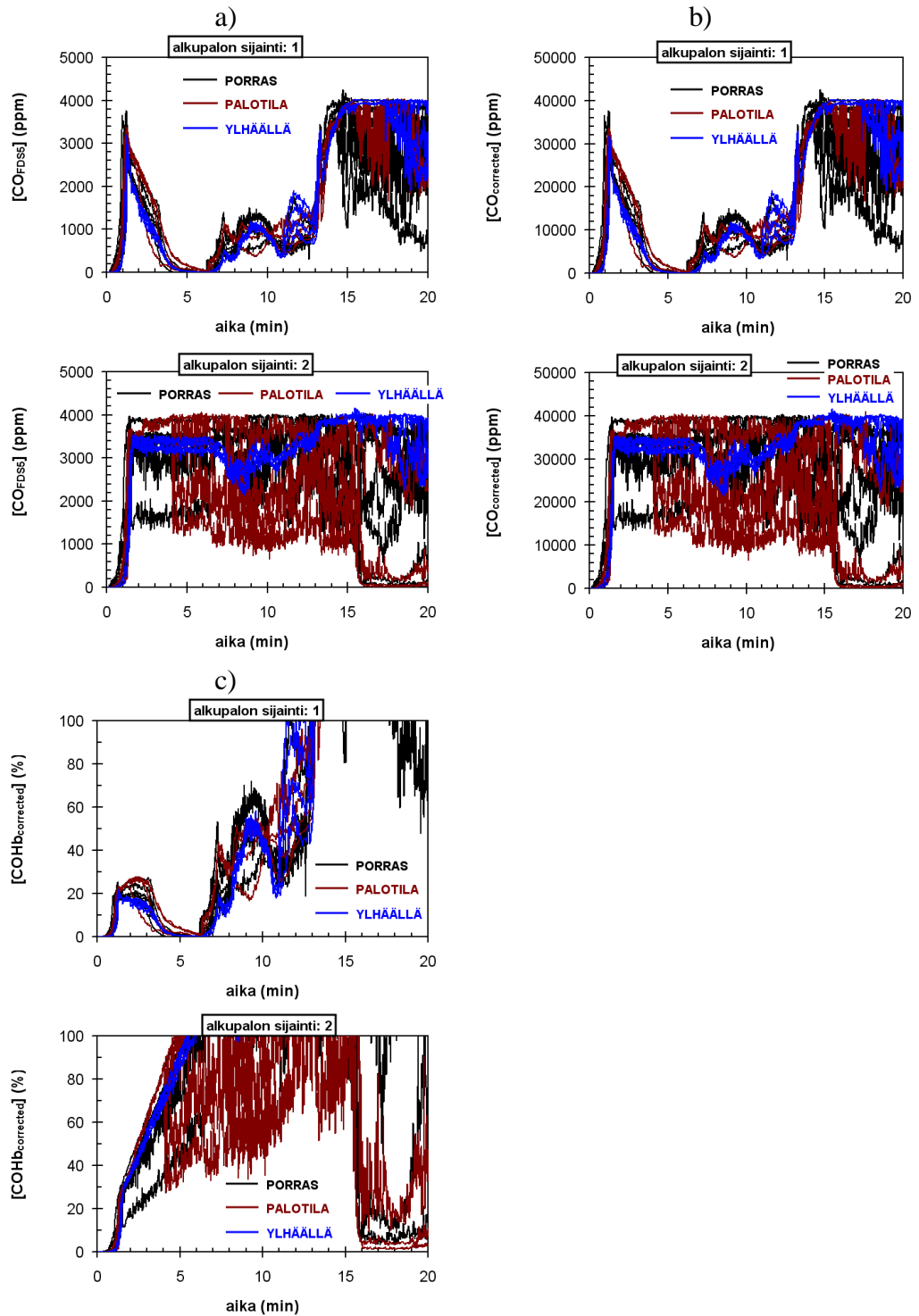
## 5.2 Palovaarojen arviointi

### 5.2.1 Hiilimonoksidi

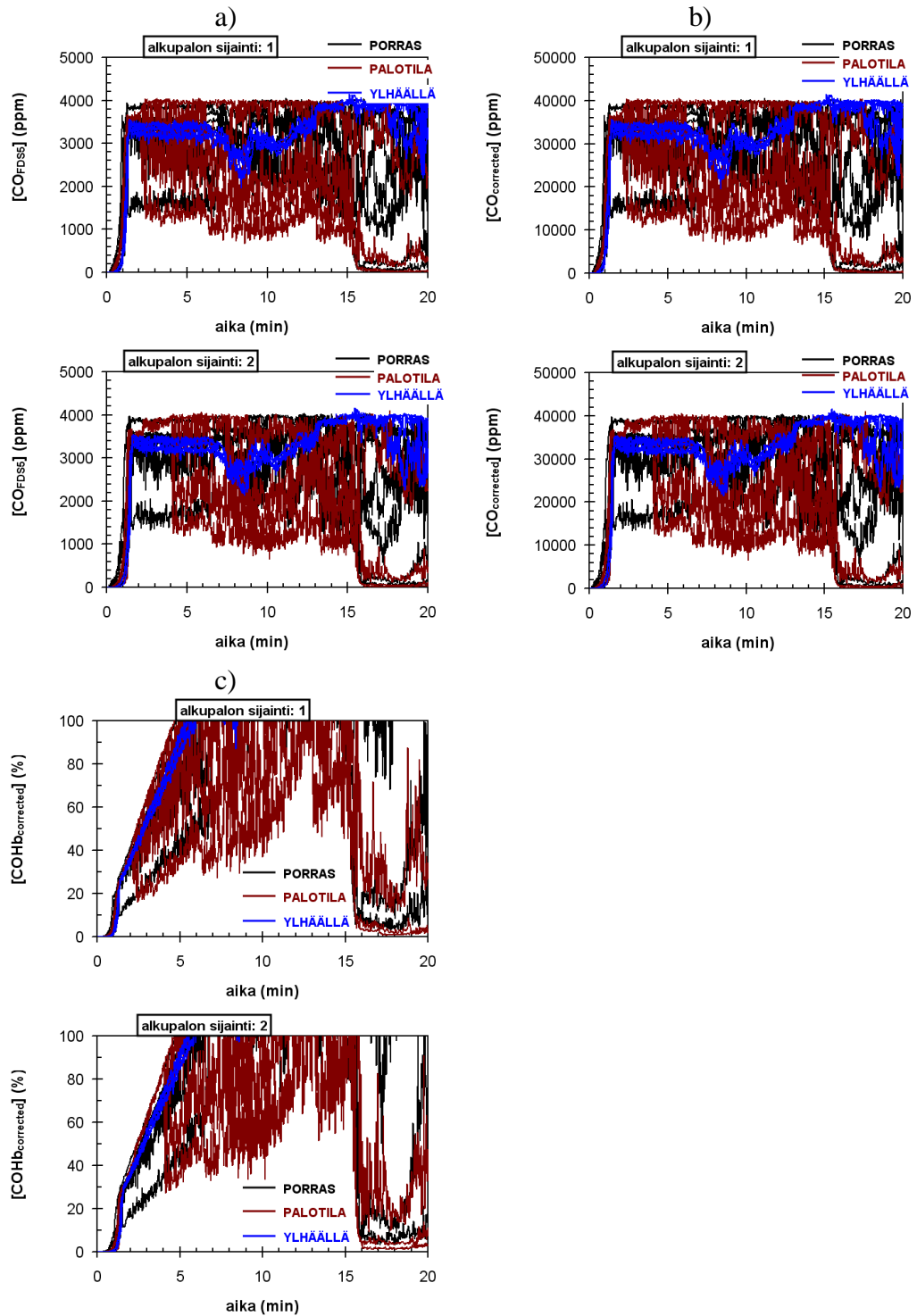
Kuvissa 30-33 esitetään hiilimonoksidipitoisuuksia ja niitä vastaavia CO:lle altistuvan henkilön veren COHb-pitoisuuksia palon alkutilassa (eteinen), porrashuoneessa ja 2. kerroksen ylätasanteella.

Voidaan havaita, että vain hiilimonoksidin muodostama uhka on olennaisesti samanlainen - yhtä vakava - skenaariossa 2, 3 ja 4 sekä myös skenaarion 1 tapauksessa, jossa alkupalon sijaintipaikka on 2: näissä tilanteissa palon happirajoitteisuuden suhteen korjattu CO-pitoisuus nousee heti eteisen lieskahdettua paikasta riippuen noin 1-4 % tasolle (1 % = 10 000 ppm). Näin korkea CO-pitoisuus nostaa sille altistuvan henkilön veren COHb-pitoisuuden nopeasti hengenvaaralliselle tasolle eli noin 50 %:iin tai korkeammaksi: simulointitulosten mukaan näin tapahtuu muutamassa minuutissa.

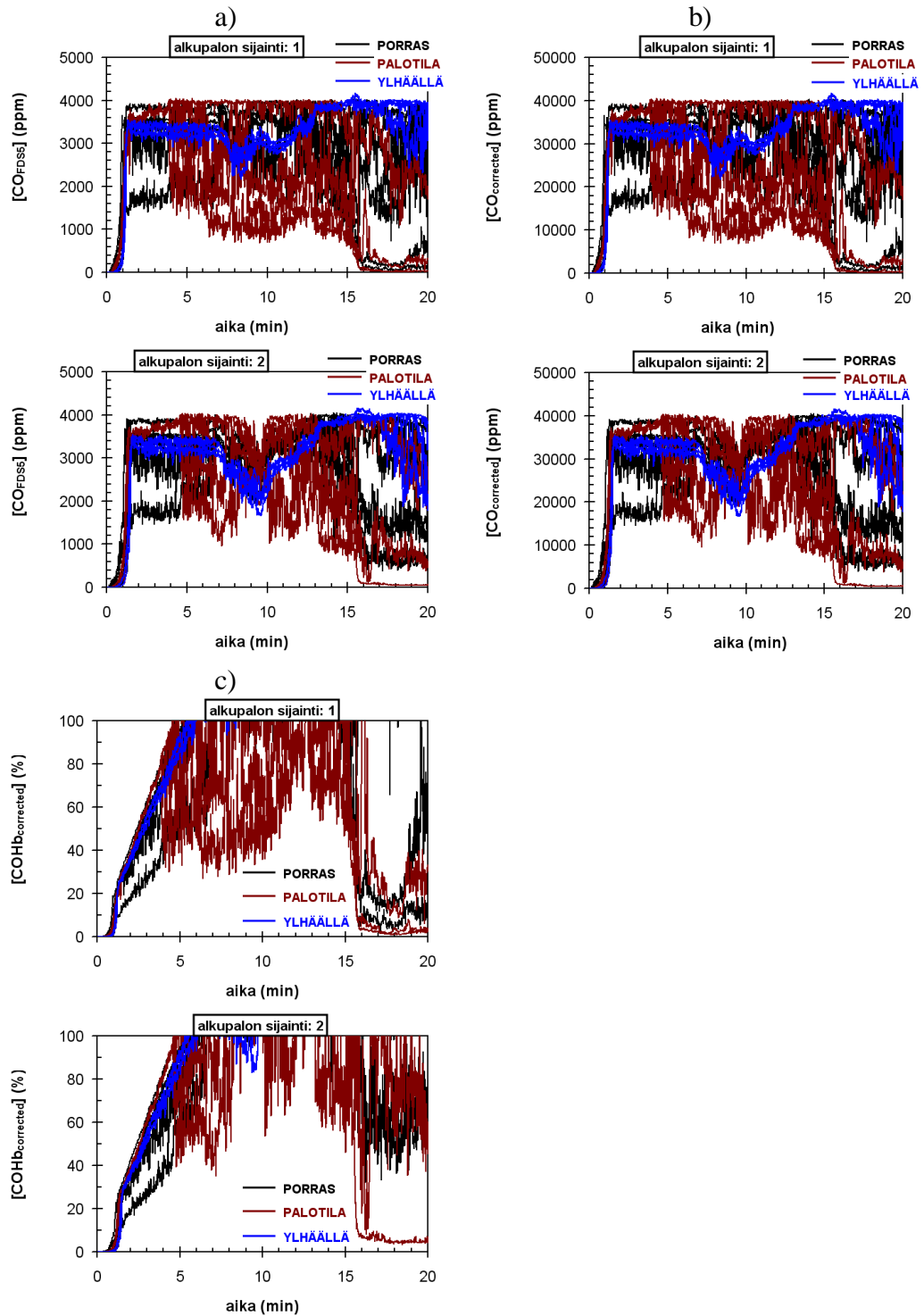
CO-pitoisuuden suhteen muista poikkeavassa skenaariossa eli skenaarion 1 tapauksessa, jossa alkupalon sijaintipaikka on 1, hengenvaaralliseksi COHb-pitoisuus muodostuu noin 7-8 minuutissa.



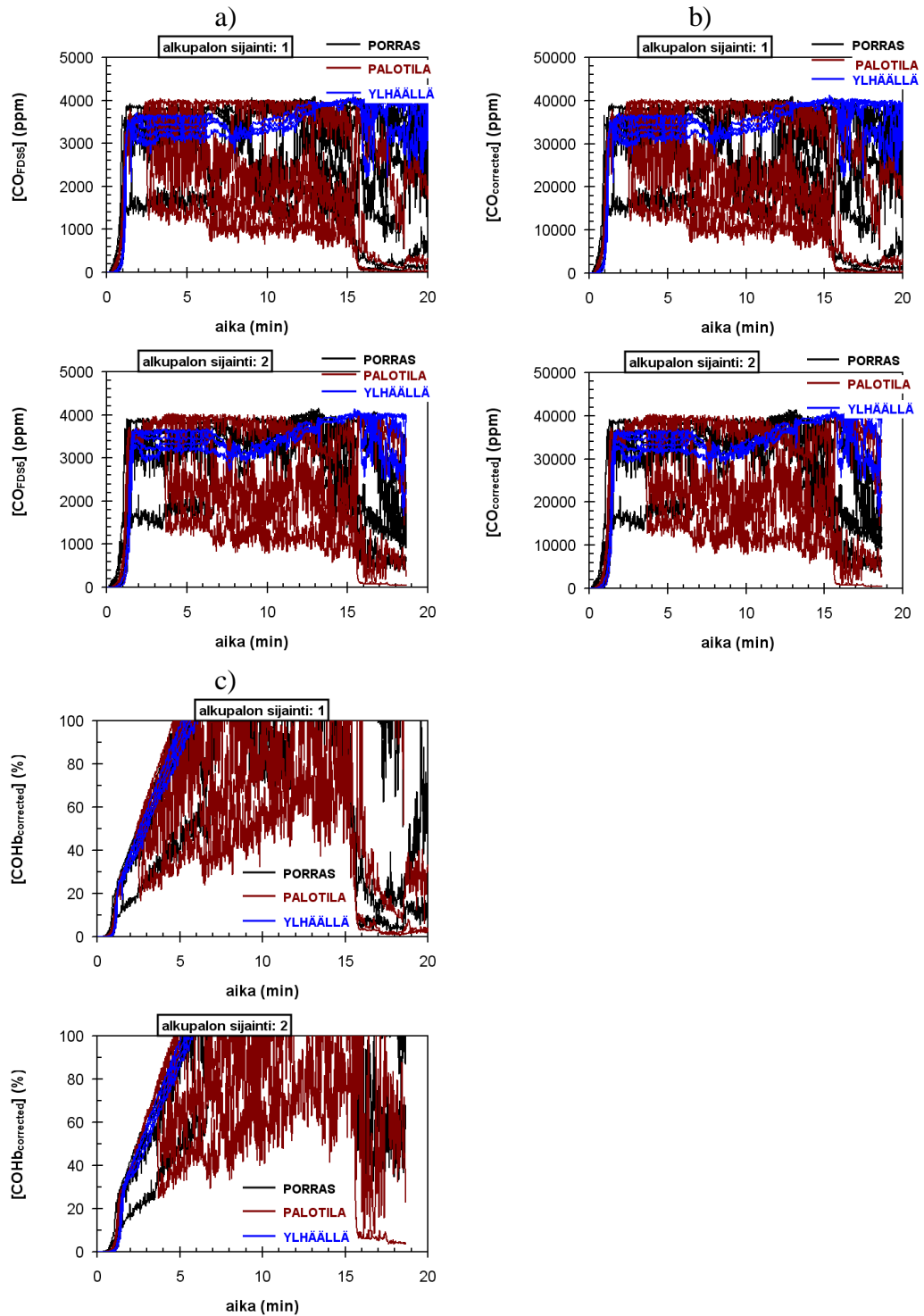
Kuva 30. Skenaario 1: a) laskennan antama CO-pitoisuus, b) palamisen happirajoittuneisuuden suhteen korjattu CO-pitoisuus ja c) korjattua CO-pitoisuutta vastaava henkilön veren COHb-pitoisuus.



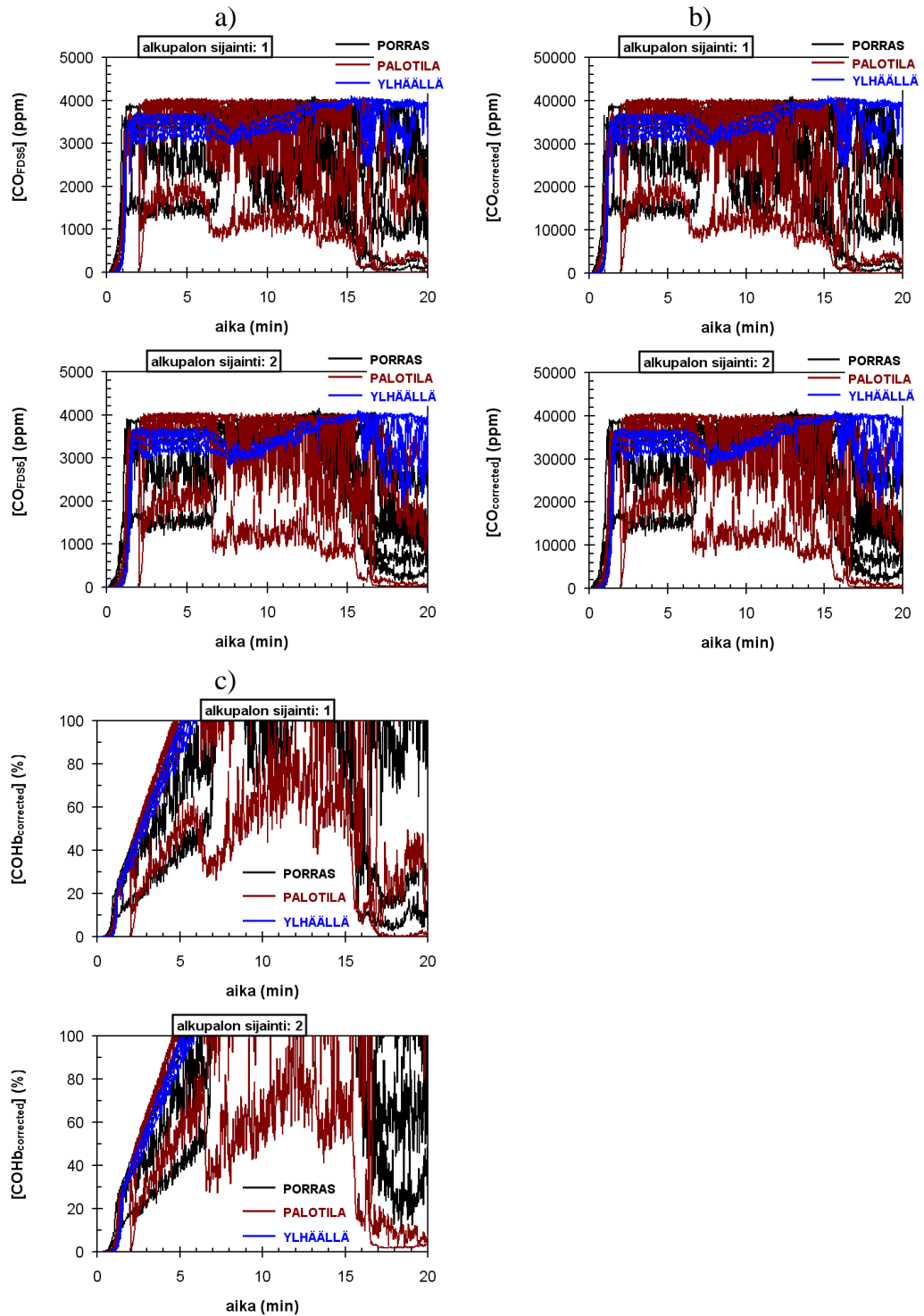
Kuva 31. Skenaario 2, tilanne, jossa huoneen H12 ovi jää osittain auki siellä olevan henkilön poistumisen jälkeen: a) laskennan antama CO-pitoisuus, b) palamisen happirajoittuneisuuden suhteen korjattu CO-pitoisuus ja c) korjattua CO-pitoisuutta vastaava henkilön veren COHb-pitoisuus.



Kuva 32. Skenaario 2, tilanne, jossa huoneen H12 ovi sulkeutuu siellä olevan henkilön poistumisen jälkeen: a) laskennan antama CO-pitoisuus, b) palamisen happirajoittuneisuuden suhteen korjattu CO-pitoisuus ja c) korjattua CO-pitoisuutta vastaava henkilön veren COHb-pitoisuus.



Kuva 33. Skenaario 3: a) laskennan antama CO-pitoisuus, b) palamisen happirajoittuneisuuden suhteen korjattu CO-pitoisuus ja c) korjattua CO-pitoisuutta vastaava henkilön veren COHb-pitoisuus.



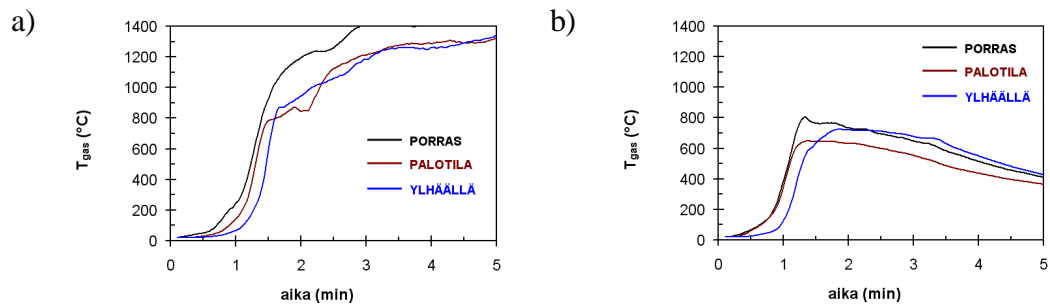
Kuva 34. Skenaario 4: a) laskennan antama CO-pitoisuus, b) palamisen happirajoittuneisuuden suhteen korjattu CO-pitoisuus ja c) korjattua CO-pitoisuutta vastaava henkilön veren COHb-pitoisuus.



## 5.2.2 Lämpötila

Lämpötilojen ajallinen kehittyminen palon alkutilassa (eteinen), porrashuoneessa ja 2. kerroksen ylätasanteella esitetään kuvassa 35.

Lämpötiloille pätee sama kuin hiilimonoksidipitoisuudelle eli kuumuuden muodostama uhka on olennaisesti samanlainen skenaariossa 2, 3 ja 4 sekä myös skenaarion 1 tapauksessa, jossa alkupalon sijaintipaikka on 2: koska näissä tilanteissa on kyseessä pienehkön paloon osallistuvalla rakennustarvikkeella verhoillun tilan lieskahtava palo, lämpötilat nousevat nopeasti hyvin korkeiksi. Muista poikkeavassa skenaariossa eli skenaariossa 1 tapauksessa, jossa alkupalon sijaintipaikka on 1, lämpötilan kehitys ei ole yhtä voimakasta kuin muissa skenaarioissa, mutta ihmisen sietokyvyn kannalta (ks. kohta 3.3.1) ero on merkityksetön.



Kuva 35. Lämpötilan kehittyminen: a) skenaariot 2, 3 ja 4 sekä skenaario 1, kun alkupalon sijaintipaikka on 2 (tässä esimerkkinä skenaario 4) sekä b) skenaario 1, kun alkupalon sijaintipaikka on 1. Käyrät esittävät keskiarvoa useista eri mittauspisteistä.

## 5.2.3 Savu

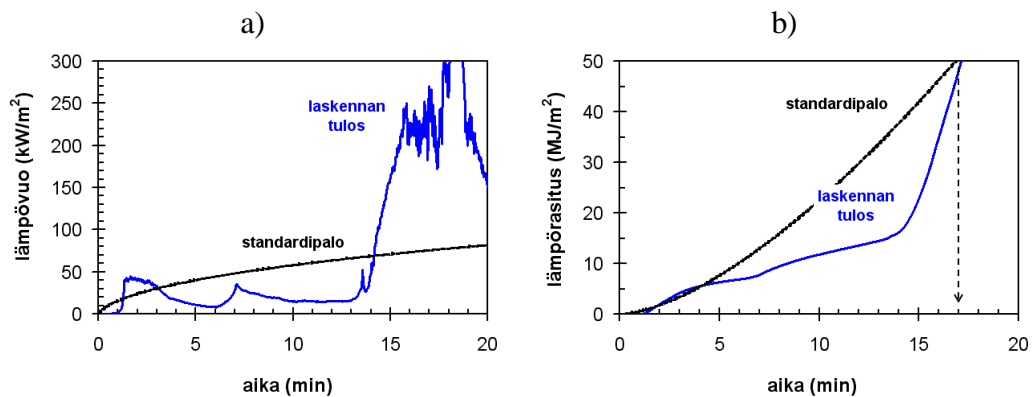
Savun muodostuminen ja leviäminen vastaa hiilimonoksidin ja lämpötilojen kehittymistä ja siksi tässä ei erikseen analysoida savuisuuteen liittyviä vaaroja: hiilimonoksidin ja lämpötiloihin liittyvien vaarojen perusteella voidaan arvioida, että myös savuun liittyvät vaarat tarkastellussa palossa ovat korostuneen vakavia.

### 5.2.3.1 Palonkestävyyteen liittyviä tarkasteluja

Kohdassa 5.1 esitettiin skenaarioita käyttäen palonsimuloinnin antamat yleiskuvat siitä, miten palo on saattanut levitä. Tässä kohdassa tarkastellaan hieman lähemmin rakenteisiin kohdistuvaa lämpörasitusta ja arvioidaan palonkestoaikaa oville, jotka ovat tyypillisesti sisäpuolisten rakenteiden heikoin kohta.

Skenaariolle 1 lasketut tulokset esitetään kuvassa 36. Voidaan havaita, että tässä skenaariossa lämpörasitus on palon ensimmäisen 15 minuutin aikana pääasiassa pienempi kuin standardipalossa. 15 minuutin jälkeen lämpörasitus kasvaa selvästi standardipalorasitusta ankarammaksi. Oveen kertynyt lämpörasitus [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ] on samansuuruinen kuin standardipalossa hetkellä 17 minuuttia (kuva 36b). Tämä voidaan tulkita siten, että EI15-luokan

vaatimukset täyttävät ovet estäisivät palon leviämistä ovien kautta skenaarion 1 kaltaisessa palossa noin 17 minuuttia palon alkamisesta.

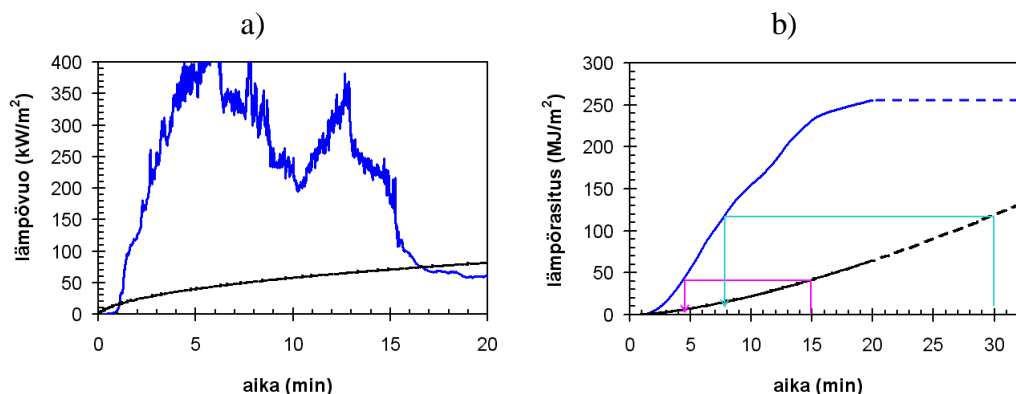


Kuva 36. Keittiön oveen (O10) kohdistuvan lämpörasituksen vertaaminen standardipalon lämpörasitukseen skenaariossa 1. Tulos pätee molemmille alkupalon sijaintipaikoille sekä myös oville O12 (eteisestä huoneeseen H11) ja O17 (yläkerran huoneen H21 ovi).

Skenaariolle 2 lasketut tulokset esitetään kuvassa 37. Voidaan havaita, että tässä skenaariossa lämpörasitus on heti palon lieskahtamisen jälkeen selvästi suurempi kuin standardipalossa. 15 minuutin jälkeen lämpörasitus kasvaa selvästi standardipalorasitusta ankarammaksi. Kuvasta 37b voidaan lukea seuraavaa:

- EI15 luokan vaatimukset täyttävät ovet estäisivät palon leviämistä ovien kautta skenaarion 2 kaltaisessa palossa noin 4-5 minuuttia palon alkamisesta.
- EI30 luokan vaatimukset täyttävät ovet estäisivät palon leviämistä ovien kautta skenaarion 2 kaltaisessa palossa noin 8 minuuttia palon alkamisesta.

Tulos pätee myös skenaariolle 3 ja 4 molemmilla alkupalon sijaintipaikoilla sekä myös oville O12 (eteisestä huoneeseen H11) ja O17 (yläkerran huoneen H21 ovi).



Kuva 37. Keittiön oveen (O10) kohdistuvan lämpörasituksen vertaaminen standardipalon lämpörasitukseen skenaariossa 2. Tulos pätee myös skenaariolle 3 ja 4 molemmilla alkupalon sijaintipaikoilla sekä myös oville O12 (eteisestä huoneeseen H11) ja O17 (yläkerran huoneen H21 ovi).

## 6 Tarkastelu siitä, miten kohteen jakaminen osiin käyttäen EI15-luokan rakenneosia olisi vaikuttanut tilanteen kehittymiseen ja palovaaroihin

### 6.1 Osiin jakamisen kuvaus

Lähtökohtana osiin jakamisessa on Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 kohdassa 5.2.2 [Ympäristöministeriö 2002] asetettu vaatimus, että poistumisen turvaamiseksi tai pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi palo-osastot jaetaan lisäksi osiin siten, että majoitustilat ja hoitolaitokset jaetaan osiin majoitushuoneittain. Lisäksi tässä tarkastelussa on katsottu, että osiin jakaminen ei toteuta poistumisen turvaamista riittävästi ellei se koske myös porrashuonetta. Samoin on katsottu, että palon, kuumien myrkyllisten kaasujen ja savun leviämisen luotettava rajoittaminen vaatii, että osiin jakavien rakenneosien oviin tulee soveltaa Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 kohdassa 7.3.2 esitettyä määräystä, jonka mukaan osastoivan oven tulee yleensä olla itsestään sulkeutuva ja salpautuva. Tämä tulee toteuttaa myös ulko-ovessa, kuten seuraavassa tarkastelussa selvästi tulee esille.

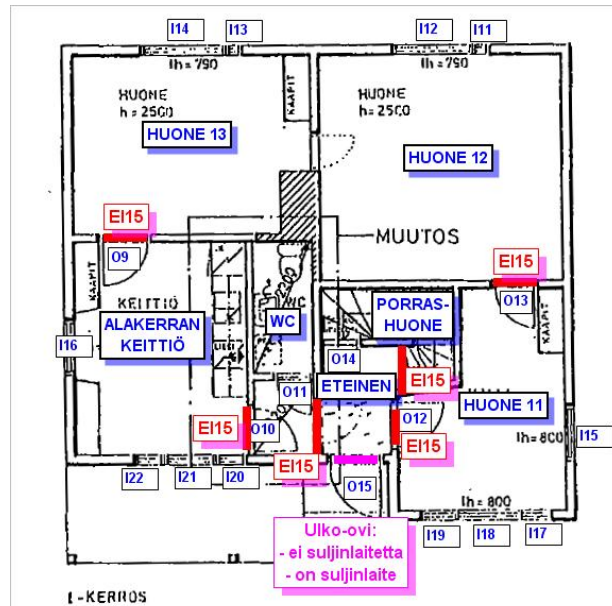
Tässä raportissa tarkastellaan nimenomaan ulko-oven suhteen kahta eri tapausta:

- Ulko-ovea ei ole varustettu suljinlaitteella ja siksi se voi jäädä kokonaan auki.
- Ulko-ovi on varustettu suljinlaitteella ja siksi sen aukioloaika on varsin lyhyt. Tässä tapauksessa tarkastellaan kahta tapausta:
  - ulko-oven lasi rikkoutuu ja palo saa happea tätä kautta;
  - ulko-oven lasi pysyy ehjänä.

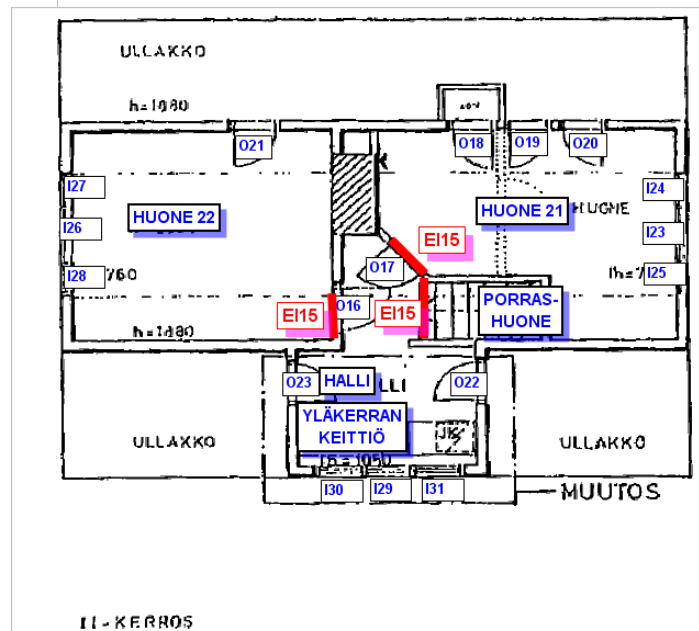
Tarkasteltava paloskenaario on skenaario 4 edellä esitetyistä skenaariosta, koska se tuottaa lähimmin palotapahtumassa toteutuneet ilmiöt. Alkupalon sijainnin suhteen tarkastellaan vain tilannetta S1.

Laskennassa käytetty osiin jako esitetään kuvassa 38.

a)



b)



Kuva 38. Kohteen osiin jakaminen: a) 1. kerros ja b) 2. kerros.

## 6.2 Palosimuloinnin antamat tulokset osiin jakamisen vaikutuksista

Paloteho kolmessa tarkastellussa tapauksessa esitetään kuvassa 39, liekehdinnän käyttäytyminen kuvissa 40-43 ja eteisen lämpötilat kuvassa 44. Voidaan havaita seuraavaa:

- Tapauksessa, jossa ulko-ovea ei ole varustettu suljinlaitteella ja se jää kokonaan auki, eteinen lieskahtaa, kun ulko-ovi avautuu n. 1 minuutin kuluttua palon alkamisesta. Palaminen tapahtuu eteistilassa noin 5-6 MW:n suuruisena, kunnes eteisen palokuorma loppuu noin 15 minuutin jälkeen. Palo leviää kuistille ja jatkuu siinä vielä eteisen palon sammumisen jälkeen.
- Tapauksessa, jossa ulko-ovessa on suljinlaite, mutta sen lasiruutu rikkoutuu, eteinen ei lieskahda, vaan palaminen tapahtuu ulkoisena palona

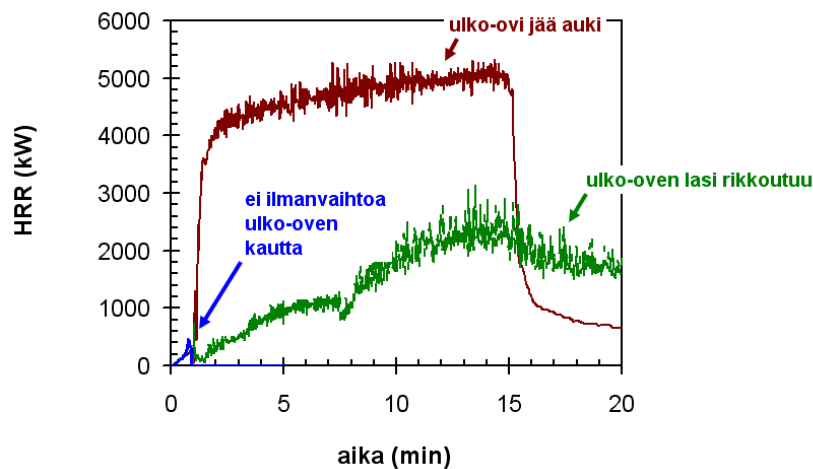
rikkoutuneen ikkunarauudun luona. Tällöin paloteho on noin 1 MW. Tässäkin tapauksessa palo leviää kuistille, joskin noin 5 minuuttia edellä tarkasteltua tapausta myöhemmin ja paloteho nousee noin 2 MW:iin.

- Tapauksessa, jossa ulko-oveissa on suljinlaite ja sen lasiruutu säilyy ehjänä, palo sammuu hapen puutteeseen n. 1 minuutin kuluessa sen syttymisestä.

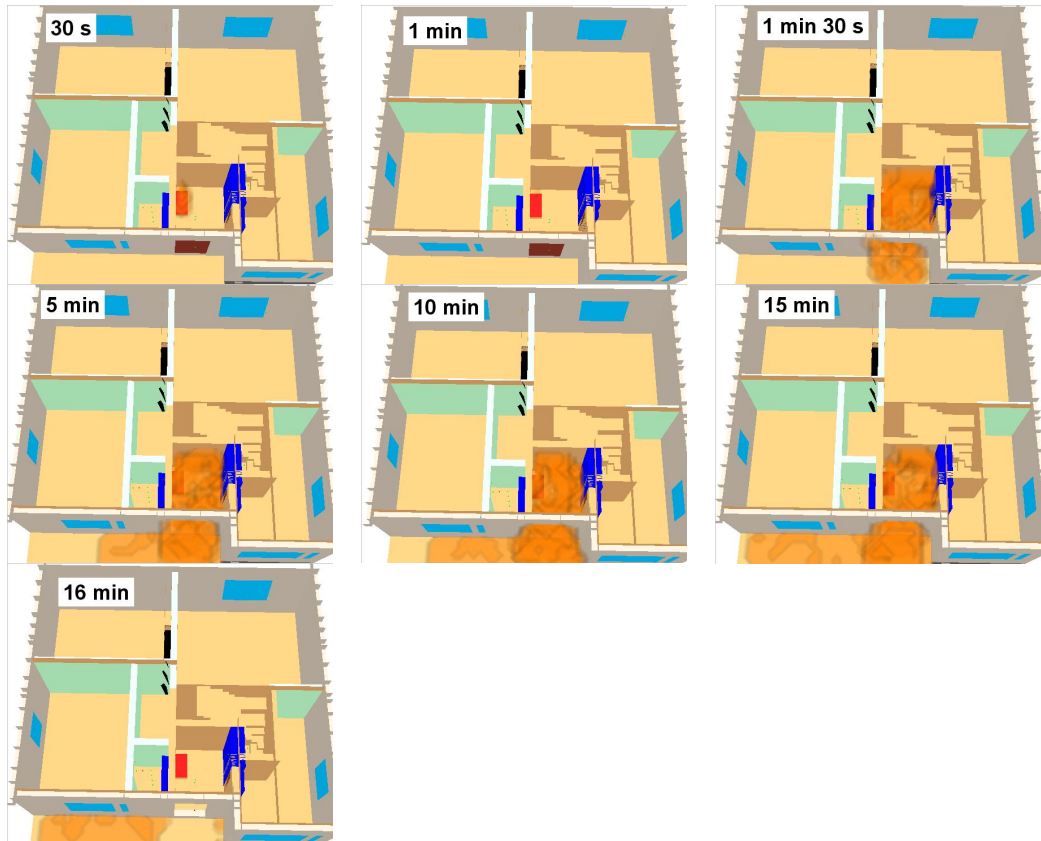
Kuvassa 45 esitetään, millainen lämpörasitus eteisen rakenteisiin kohdistuu tapauksessa, jossa ulko-ovea ei ole varustettu suljinlaitteella ja se jää kokonaan auki. Voidaan havaita, että lämpörasitus on selvästi standardipalo-olosuhteita rankempi siten, että EI15-luokan rakenteen laskennallinen palonkestävyys eteisen palossa on vain noin 5 minuuttia.

Tapauksessa, jossa palo saa hapetta ulko-oven rikkoutuneen ikkunan kautta (kuva 46), lämpörasitus on selvästi standardipalo-olosuhteita lievempi siten, että EI 15-luokan rakenne kestäisi paloa sen sammumiseen/sammuttamiseen saakka. Sama pätee myös tapaukseen, jossa palo ei saa hapetta ulko-oven kautta.

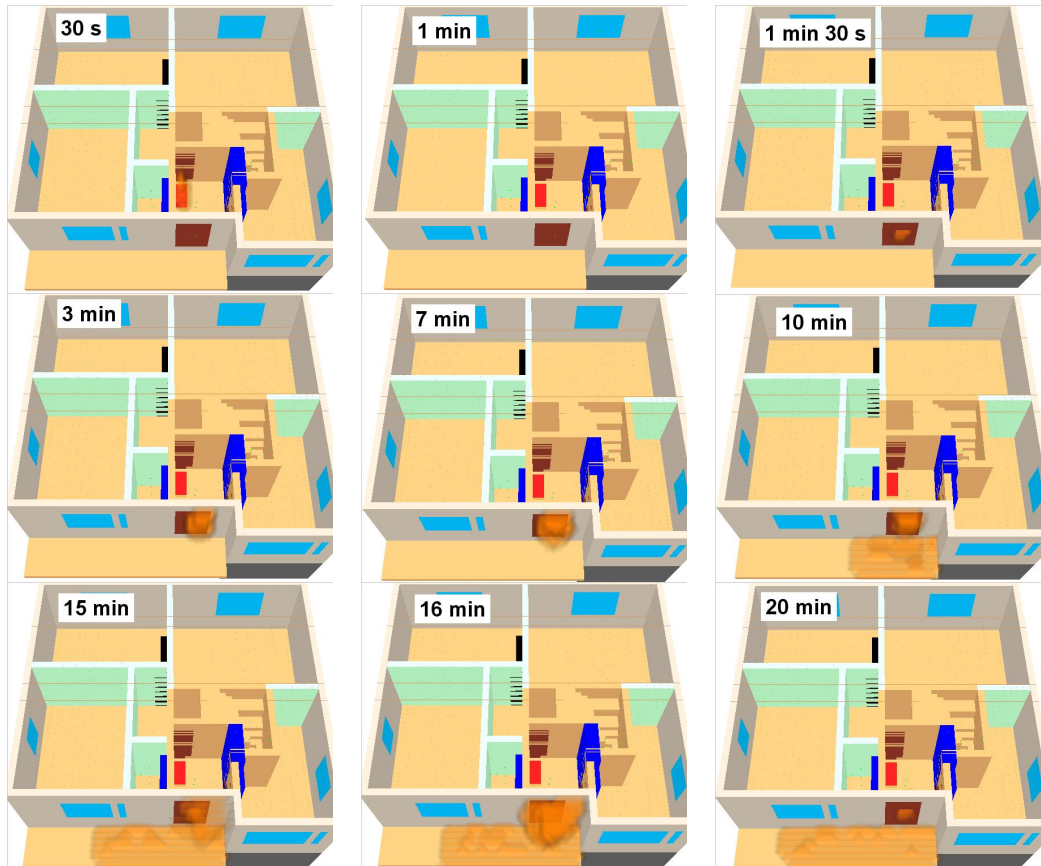
Yhteenvedon voidaan todeta, että osiin jako käyttäen EI15-luokan rakenteita estäisi palon leviämisen ja kehittymisen vaaralliseksi kunhan myös rakennuksen ulko-ovena käytetään EI15-luokan rakennetta.



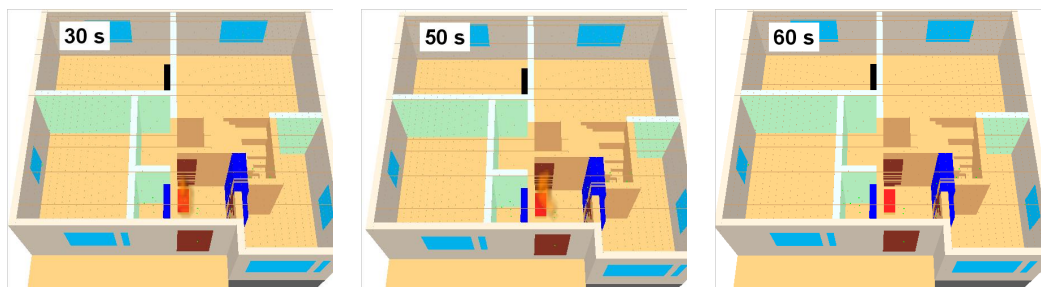
Kuva 39. Paloteho kolmessa tarkastellussa tapauksessa.



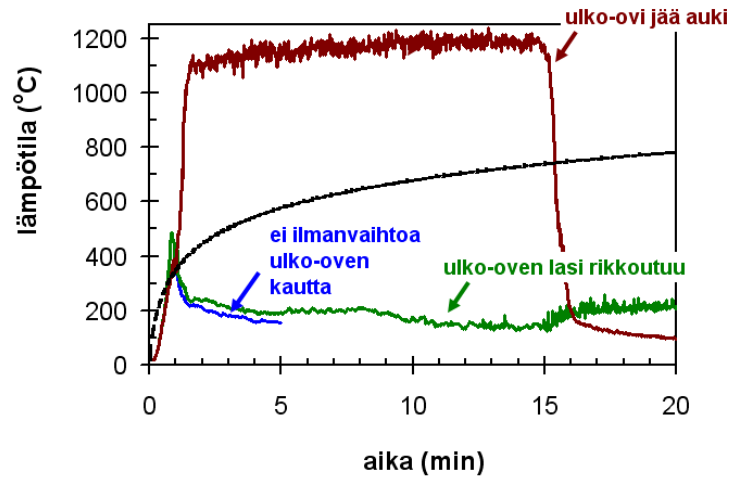
*Kuva 40. Palotapahtuman kehittyminen tapauksessa, jossa ulko-ovea ei ole varustettu suljinlaitteella ja se jää kokonaan auki.*



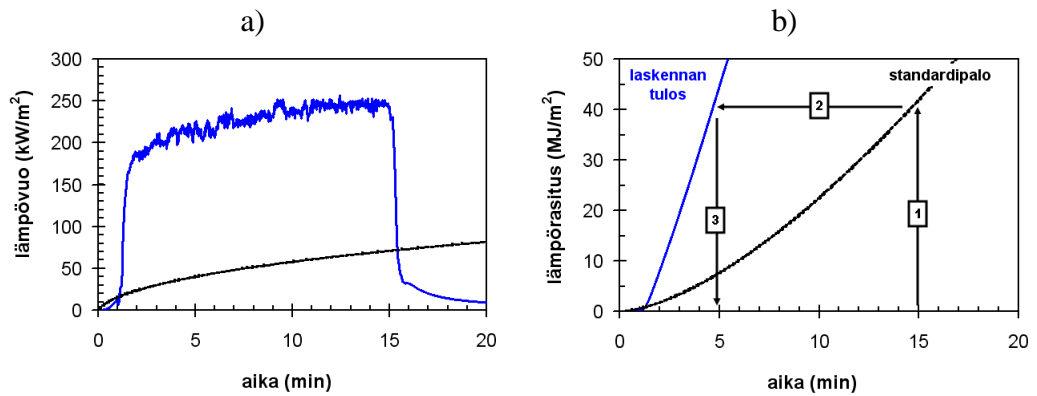
*Kuva 41. Palotapahtuman kehittyminen tapauksessa, jossa ulko-ovi on varustettu suljinlaitteella, mutta sen lasi rikkoutuu ja palo saa happea tätä kautta.*



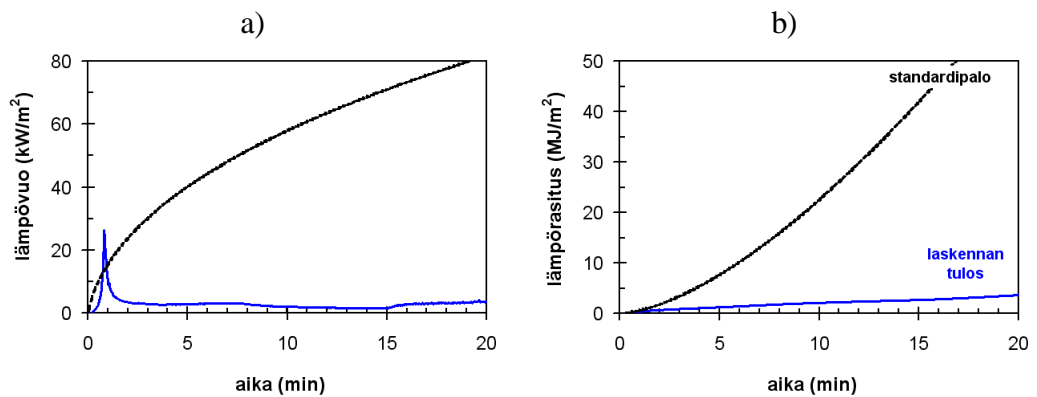
*Kuva 42. Palotapahtuman kehittyminen tapauksessa, jossa ulko-ovi on varustettu suljinlaitteella ja sen lasi säilyy ehjänä.*



Kuva 43. Eteisen lämpötilan ajallinen kehittyminen.



Kuva 44. Eteisen osiin jakaviin rakenteisiin kohdistuva lämpörasitus ja sen vertaaminen standardipalo-olosuhteissa palolle altistuvan kohteen lämpörasitukseen tapauksessa, jossa ulko-ovea ei ole varustettu suljinlaitteella ja se jää kokonaan auki: a) lämpövuoto ja b) rakenneosaan kertyvä lämpörasitus ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).



Kuva 45. Eteisen osiin jakaviin rakenteisiin kohdistuva lämpörasitus ja sen vertaaminen standardipalo-olosuhteissa palolle altistuvan kohteen lämpörasitukseen tapauksessa, jossa ulko-ovi on varustettu suljinlaitteella, mutta sen lasi rikkoutuu: a) lämpövuoto ja b) rakenneosaan kertyvä lämpörasitus ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).



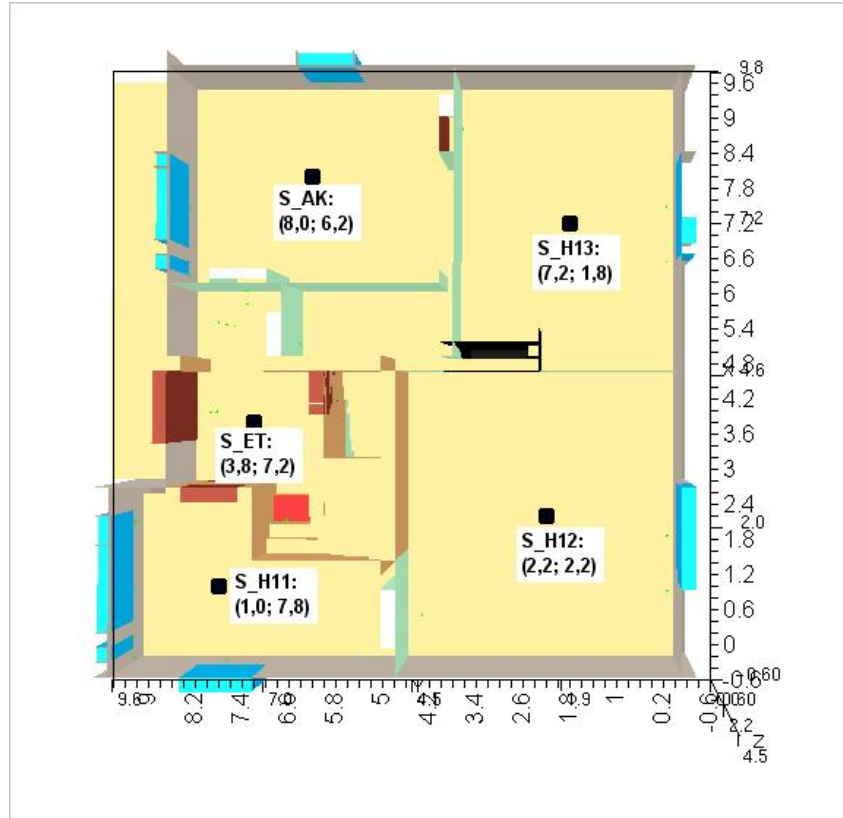
## **7 Tarkastelu siitä, miten kohteen varustaminen asuntosprinklerillä olisi vaikuttanut tilanteen kehittymiseen ja palovaaroihin**

### **7.1 Sprinklerin mallintamisen kuvaus**

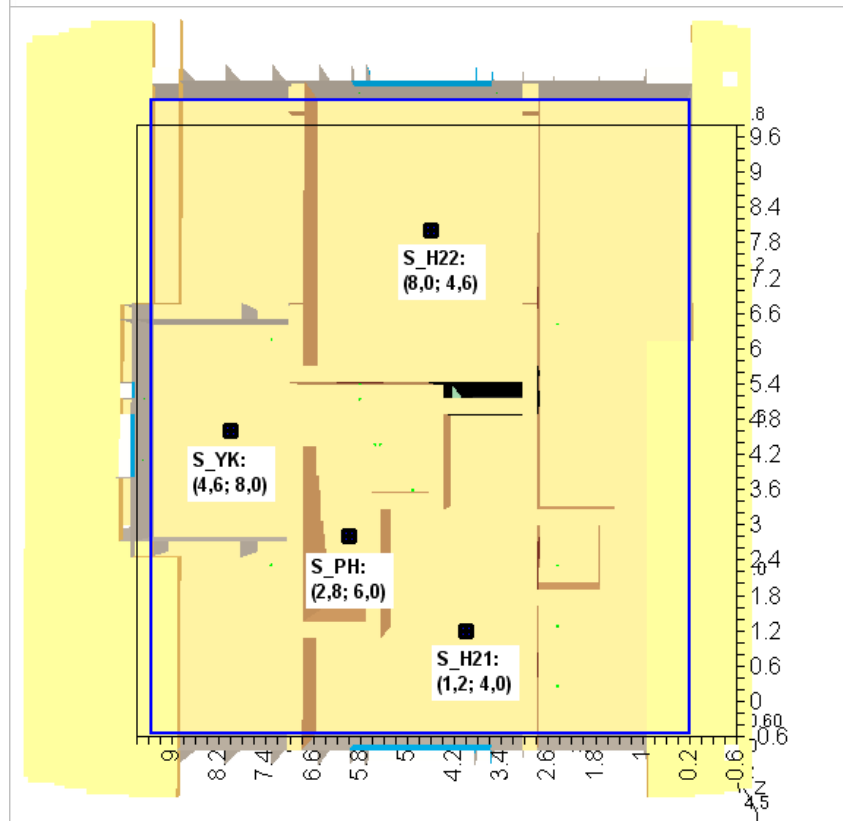
Oleellinen kysymys sprinklerijärjestelmän toiminnan mallintamisessa on sprinklerisuuttimen antaman veden määrän ja sen jakautumisen oikeaan osuva kuvaaminen. VTT:llä on tätä raporttia kirjoitettaessa (tammikuu 2009) meneillään asuntosprinklausta koskeva tutkimushanke, jossa todennäköisesti laaditaan myös mittauksiin ja muuhun luotettavaan tietoon perustuvia malleja asuntosprinklerijärjestelmän suutinten kuvaamiseen. Näitä malleja ei vielä ole laadittu ja tässä raportissa käytetään suuttimelle liitteellä D esitettyä mallia, joka vastaa tiettyjä asuntosprinklerijärjestelmien ominaisuuksia, esim. että järjestelmä estää lieskahtamisen ja että sen vesivuo vastaa suunnilleen LH-luokkaa.

Asuntosprinklerijärjestelmä mallinnettiin siten, että jokaiseen huoneeseen sekä eteiseen ja porrashuoneen kattoon asetettiin yksi suutin (kuva 46).

a)



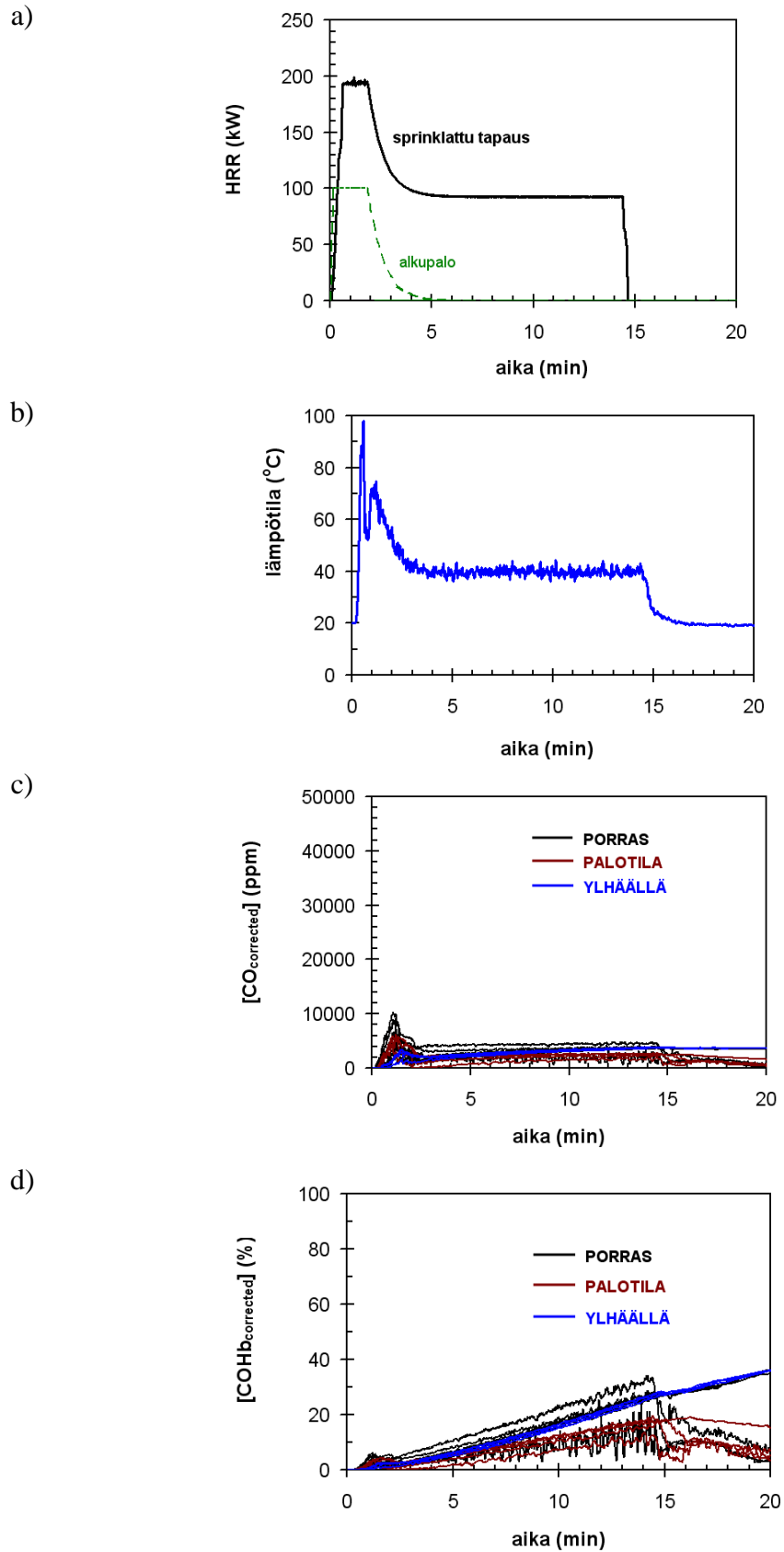
b)



Kuva 46. Sprinkleripäiden sijoittelu: a) 1. kerros ja b) 2. kerros.

## 7.2 Palonsimuloinnin antamat tulokset sprinklerin vaikutuksista

Palonsimuloinnin antamat tulokset sprinklerin vaikutuksista esitetään kuvassa 47. Palo ei leviä eteisestä muihin tiloihin ja paloteho pysyy hyvin rajoitettuna (kuva 47a). Tästä johtuen lämpötilat eteisessäkin ovat ennen sprinklerin laukeamista tapahtuvaa hetkellistä lämpötilan nousua poistumisen kannalta turvallisella tasolla (40-70 °C). Hiilimonoksidipitoisuus on noin tekijällä 4 alhaisempi kuin sprinklaamattomassa tapauksessa eikä hiilimonoksidille altistuvan ihmisen COHb-pitoisuus nouse henkeä uhkaavan korkeaksi.



Kuva 47. Sprinklattu tapaus: a) paloteho, b) lämpötila eteisessä, c) tekijällä 10 korjattu CO-pitoisuus eteisessä, portaassa ja ylätasanteella sekä d) vastaava altistuvan henkilön COHb-pitoisuus.

## 8 Yhteenveto

Espoossa 27.3.2008 sattunut tulipalo oli hyvin tuhoisa. Tässä raportissa on tullut esille seuraavia tekijöitä, jotka selittävät palon tuhoisuutta.

Palo alkoi mitä ilmeisimmin eteisessä. Tarkastellussa rakennuksessa tämä syttymispaikka on ehkä pahin mahdollinen, koska se on tilavuudeltaan pieni, paloon osallistuvalla rakennustarvikkeella verhottu tila, joka lieskahtaa nopeasti jo suhteellisen pienelläkin alkupalolla.

Eteistila jatkuu suoraan porrashuoneeseen, jonka verhoilu oli paloon osallistuvaa rakennustarviketta, ja siitä edelleen toisen kerroksen halliin, jossa oli ikkuna. Jos kehittyvä palo tämän kaltaisessa asetelmassa saa riittävästi happea, se leviää erittäin nopeasti ja kuumana eteisestä yläkertaan. Tällöin on olemassa suuri vaara sille, että yläkerran ikkuna rikkoutuu.

Tarkastellun kaltaisessa kohteessa eteistilan lieskahtaneelle palolle on helposti tarjolla em. nopeaan palon leviämiseen tarvittava happi. Tuo palamiseen tarvittava ilmavirtaus voi tulla ulko-oven lasin kautta, joka on rikkoutunut lieskahtaneen palon aiheuttaman voimakkaan lämpörasituksen vuoksi tai sitten se voi tulla myös alakerrassa avattavista ovista. Tässä raportissa tarkasteltiin pääasiassa tilannetta, jossa 1. avoin, happea palolle syöttänyt ovi oli ulko-ovi, joka oli auki sen kautta tapahtuneen pelastautumisen vuoksi. Simuloinnit osoittivat selvästi, että eteisen lieskahtanut palo aiheuttaa voimakkaan paineen nousun eteistilassa ja siksi on luonnollista ja ilmeistä, että ulospäin avautuva ulko-ovi jää tulipaloa paettaessa auki.

Kun alakerrassa oli avoinna palolle happea syöttävä aukko ja yläkerrassa oli avoin ikkuna, jonka kautta palossa syntyvät kaasut ja paine saattoivat purkautua, porrashuone alkoi simulointitulosten mukaan toimia hormin tavoin ja sen lämpötila nousi hyvin korkeaksi. Simuloinnin mukaan siis pian sen jälkeen, kun palo oli alkanut kasvaa, rakennuksessa vallitsi tilanne, jossa eteinen ja porrashuone - eli rakennuksen pääuloskäytävä - paloivat erittäin voimakkaasti. Tällainen tilanne on luonnollisesti erittäin vaarallinen, koska jos jonkin toisen tilan ovi avataan näin voimakkaasti palavaan tilaan, syöksyvät liekit ja kuumat kaasut voimallisesti tuohon toiseen tilaan. Näin on mitä ilmeisimmin käynyt, koska onhan toki luonnollista pyrkiä pois palavasta talosta sen pääuloskäytävän kautta.

Simulointien tuloksiin perustuvat palonkestävyysarviot osoittivat, että vaikka ovia eteiseen, porraskäytävään tai yläkerran halliin ei olisi avattu, ne olisivat saattaneet palaa puhki alle 5 minuutissa siitä, kun eteisen palo lieskahti.

Tapahtuneessa tulipalossa siis talon keskeinen kulkuväylä muuttui nopeasti hyvin kuumaksi liekkimereksi - simulointien mukaan muutaman minuutin sisällä siitä hetkestä, kun palo alkoi kasvaa. Saatujen tulosten mukaan myös tuo eteisen, porrashuoneen ja yläkerran hallin muodostama tila muodostui muutamassa minuutissa hengenvaarallisen myrkylliseksi, kun sen häikäpitoisuus kasvoi prosenttien suuruusluokkaan.

Työssä tarkasteltiin myös kahden paloturvallisuutta parantavan toimenpiteen vaikutusta tilanteen kehittymiseen ja palovaaroihin. Näistä ensimmäinen on kohteen jakaminen tiloittain osiin käyttäen EI 15 -luokan rakenneosia ja toinen kohteen varustaminen tyypillisellä asuntoihin tarkoitettulla automaattisella vesisammutusjärjestelmällä (asuntosprinkleri). Yhteenvetona näiden toimenpiteiden vaikutuksesta voidaan todeta seuraavaa:

- Osiin jako käyttäen EI15-luokan rakenteita estäisi palon leviämisen ja kehittymisen vaarallisen voimakkaaksi kunhan myös rakennuksen ulko-ovena käytetään EI15-luokan rakennetta.
- Oikein mitoitettu, nopeatoiminen asuntosprinklaus rajaisi palon sen alkutilaan, eteiseen, jossa paloteho olisi varsin alhainen ja lämpötilat pysyisivät poistumisen kannalta turvallisella tasolla (40-70 °C). Hiilimonoksidipitoisuus olisi noin tekijällä 4 alhaisempi kuin sprinklaamattomassa tapauksessa eikä hiilimonoksidille altistuvan ihmisen COHb-pitoisuus nousisi henkeä uhkaavan korkeaksi.

## Lähdeviitteet

Anon. 2008. Palaveri 29.12.2008, johon osallistuivat tutkinnanjohtaja Rasmus, Espoon poliisin edustajia sekä tämän raportin laatijat.

Mulholland, G.W. 2002. Smoke Production and Properties. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association..

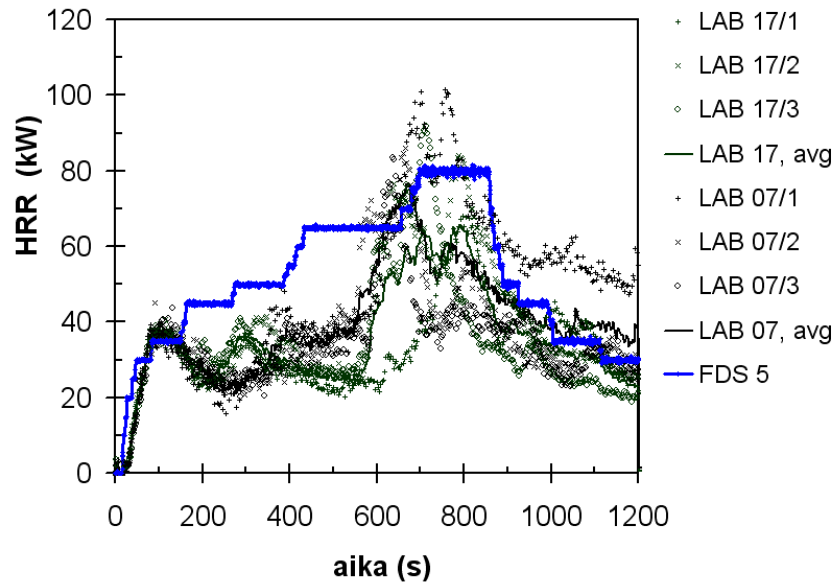
Putorti, A. D. 2001. Flammable and Combustible Liquid Spill/Burn Patterns. Washington, DC. USA: National Institute of Justice. Office of Science and Technology. 2001. 55 s. (NIJ Report 604–00)

Tewarson, A. 2002. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

Ympäristöministeriö. 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. 40 s.

## Liite A: Puumateriaalille käytetty palamismalli

Olellaisin paloon osallistuva materiaali tässä raportissa tarkastelluissa paloskenaarioissa on puu. Puun palamiselle käytetty malli määritettiin käyttäen hyväksi SBI-kokeessa mäntypaneelille saatuja palotehokäyriä siten, että mallin parametrit valittiin siten, että SBI-laitetta kuvaavassa FDS-mallissa saadut palotehokäyrät vastasivat suhteellisen hyvin koetuloksia (kuva A1).



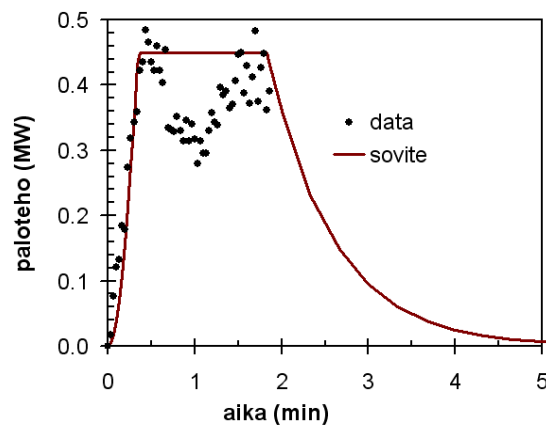
*Kuva A1. Puun palamismallin kelpoisuuden osoittaminen: palamismallilla laskettu arvio vastaa varsin hyvin SBI-kokeessa mitattua mäntypaneelin palotehoa.*



## Liite B: Alkupalon kuvauksen määrittäminen

Alkupalon kuvauksen perustana käytetään Putortin [2001] USA:ssa tekemiä kokeita, joissa hän poltti erilaisille alustoille levitettyä palavaa nestettä. Nesteinä Putorti käytti kokeissaan bensiiniä ja kerosiinia ja alustoina kiinteitä, sileitä alustoja (parketti ja vinylilattia) sekä huokoisia alustoja, joissa vanerilevyn päälle oli kiinnitetty muovimattoa kuvaava näyte. Ensimmäinen näyte oli polyolefiinimuovia (esim. PE- tai PP-muovi) ja toinen näyte oli nylonia polyuretaanin päällä.

Tässä työssä tarkastelemme polyolefiinimuoviin perustuvalla matolla tehtyjä kokeita. Kun tälle näytteelle kaadettiin 1 litra bensiiniä, siihen paloi noin 0,3 m<sup>2</sup>:n suuruinen vaurio ja paloteho kehittyi ajallisesti kuvassa B1 esitetyllä tavalla. Kaksi minuuttia kestäneen palotehomittauksen aikana maksimipaloteho oli vajaat 500 kW.



Kuva B1. Mustat merkit esittävät Putortin [2001] 1litran suuruisella bensiinimäärällä ja polyolefiinimuoviin perustuvalla matolla tekemän kokeen palotehomittauksen tulosta ja yhtenäinen käyrä ko. tulosta silmämääräisesti suhteellisen hyvin kuvaavaa mallia.

Mittaustulos mallinnettiin käyttäen palotekniikassa yleisesti käytettyä  $t^2$ -mallia, jossa paloteho  $\dot{Q}(t)$  kehittyy ajan  $t$  mukana seuraavasti:

$$\dot{Q}(t) = \begin{cases} 1000 \text{ kW} \cdot (t/t_g)^2, & t \in [0, t_1] \\ \dot{Q}_{\max}, & t \in [t_1, t_2] \\ \dot{Q}_{\max} \cdot \exp(-(t-t_2)/\tau), & t \in [t_2, \infty] \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

$$t_1 = t_g \cdot \sqrt{\dot{Q}_{\max} / 1000 \text{ kW}}$$

Mallin parametrit määritettiin siten, että se kuvaa mittaustuloksia silmämääräisesti kelvollisesti; tuloksena saatiin seuraavat arvot:

- kasvuaikatekijä  $t_g = 30$  s,
- maksimipaloteho  $\dot{Q}_{\max} = 450$  kW,
- hiipumisen alkamishetki  $t_2 = 110$  s ja

- hiipumisen aikavakio  $\tau = 45$  s ( $\tau$  määritettiin perustuen siihen kokeellisesti havaittuun ilmiöön, että palon hiipumisaikana vapautuva energia on noin 30 % palossa vapautuvasta kokonaisenergiasta)

Alkupalon suurimman voimakkuuden  $\dot{Q}_{\max}$  suhteen tehtiin herkkyystarkasteluja käyttäen arvoja

- 450 kW, joka maksimipaloteholtaan vastaa suunnilleen Putortin tulosta ja kokonaisenergiämäärältään noin 4 kg puuta tai paperia,
- 100 kW, joka maksimipaloteholtaan vastaa noin 1 m<sup>2</sup>:n suuruisen puupinta-alan luovuttamaa palotehoa ja kokonaisenergiämäärältään noin 1 kg puuta tai paperia
- 20 kW, joka maksimipaloteholtaan vastaa toimistoroskakorin palamista [Ahonen ym. 1984] ja kokonaisenergiämäärältään noin 0,2 kg puuta tai paperia.

Nämä palotehokäyrät esitetään kuvassa B2a. Alkupalot sijoitettiin kahteen paikkaan (kuva B2b): toinen lähempänä keittiönä (sijoituspaikka S1) ja toinen porrashuoneen alimman portaan viereen (sijoituspaikka S2).

Sopivan alkupalon voimakkuuden ja sijoituspaikan selvittämiseksi tehtiin lyhyehköt, 5 minuuttia kestävät simuloinnit palon kehittymisestä vastaten alkupalon eri variaatioita. Tulokset esitetään kuvassa B3. Siitä voidaan havaita seuraavaa:

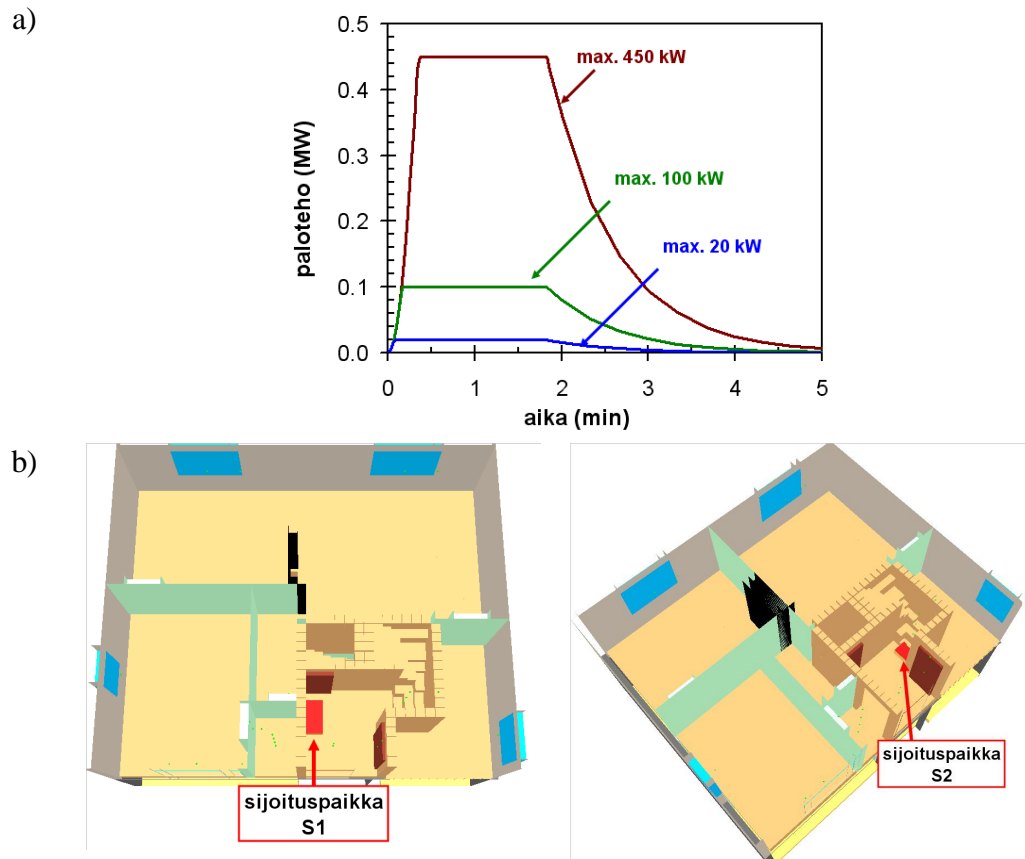
- Kun alkupalon maksimipaloteho oli 450 kW tai 100 kW, palo levisi porrashuoneen kautta yläkertaan rikkoen yläkerran keittiön ikkunan. Kun alkupalon maksimipaloteho oli 20 kW, palo ei levinnyt.
- Palotehon ajallisessa kehittymisessä ja yläkerran keittiön ikkunan rikkoutumishetkessä ei ole olennaista eroa alkupalon sijoituspaikan suhteen.
- Palon leviäminen on hieman hitaampaa palossa, jossa alkupalon maksimi on 100 kW kuin palossa, jossa se on 450 kW. Ero ei kuitenkaan ole merkittävä.
- Eteisessä eli palon alkamistilassa, lämpötilat ulko-oven lähellä ovat hieman korkeammat, kun alkupalo on paikassa S1 eli lähempänä ovea. Olennaista on kuitenkin, että molemmilla alkupalon sijoituspaikoilla S1 ja S2 ulko-oveen kohdistuu varsin pian (0,5-1 minuuttia) palon alkamisen jälkeen yli 400 °C:een lämpötila, joka merkitsee mallimme puitteissa - ja varsin todennäköisesti myös todellisuudessa - sitä, että ulko-oven lasi rikkoutuu kuumuuden vaikutuksesta jo varhaisessa palon kehitysvaiheessa.

Alkupalon valinnan suhteen em. tulokset tarkoittavat seuraavaa:

- Malli ennustaa, että palo leviää, kunhan alkupalon maksimipaloteho on vähintään 100 kW; tilanne, jossa alkupalon maksimipaloteho on 450 kW ei poikkeakaan olennaisesti tästä.
- Palon sijoituspaikalla eteisessä ei ole olennaista merkitystä.

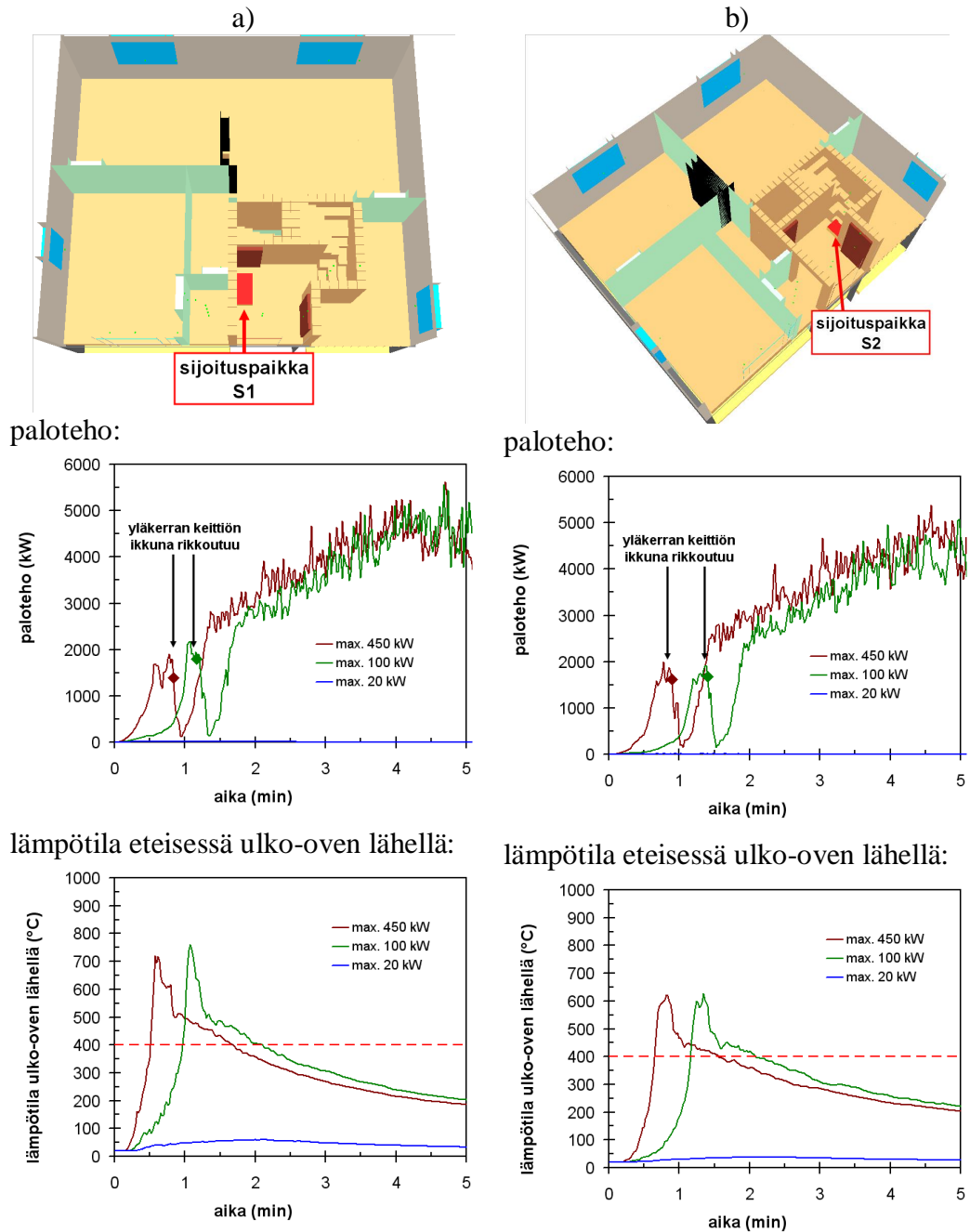
Tämän perusteella simuloinneissa käytettiin alkupalona paloa, jonka maksimipaloteho on 100 kW. Alkupalon sijoituspaikan suhteen simuloinnit tehtiin käyttäen sekä paikkaa S1 että S2. Tämä johtuu siitä, että vaikka edellä kuvatuissa

tarkasteluissa näiden paikkojen välillä ei ollut olennaista eroa, varsinaisissa simuloinneissa vaihdeltiin ovien avautumissekvenssejä eikä näissä tapauksissa voida varmuudella etukäteen arvata, onko alkupalon sijainnilla jotain merkitystä.



Kuva B2. Alkupalon suurimman voimakkuuden  $\dot{Q}_{\max}$  suhteen tehdyt varioinnit: a) palotehon ajallinen kehittyminen ja b) sijoituspaikka.

On vielä huomattava, että se, että malliin valittiin 100 kW:n suuruinen suhteellisen lyhytkestoinen palo, ei toki poissulje sitä mahdollisuutta, että palo olisi saattanut alkaa selvästi pienempänäkin palona. On aivan mahdollista, että palo on alkanut esim. jonkin puuseinän vieressä olevan objektin kytevässä palona, joka sitten on itse syttynyt liekehtivään paloon tai sytyttänyt seinän liekehtivään paloon. Tässä tarkastelussa käytetyllä palosimulointiohjelmalla ei kuitenkaan kannata simuloida tällaista tapahtumaa, koska siihen liittyy hyvin merkittäviä epävarmuustekijöitä. Nopeasti kasvava alkupalo valittiin myös laskennan vaatimien aikojen lyhentämiseksi, koska lähtökohtaisesti oli selvää, että kovin tarkkaa tapahtumien aikajanaa tässä työssä ei pystytä luomaan.



Kuva B3. Palon kehittyminen ensimmäisen 5 minuutin aikana eri suuruisilla ja eri paikoissa sijaitsevilla alkupaloilla.

## Liitteen B lähdeviitteet

Ahonen, A., Kokkala, M. & Weckman, H. 1984. Burning characteristics of potential ignition sources of room fires. Espoo, VTT. 48 s. Tutkimuksia / Valtion teknillinen tutkimuskeskus; 285. ISBN 951-38-2089-0.

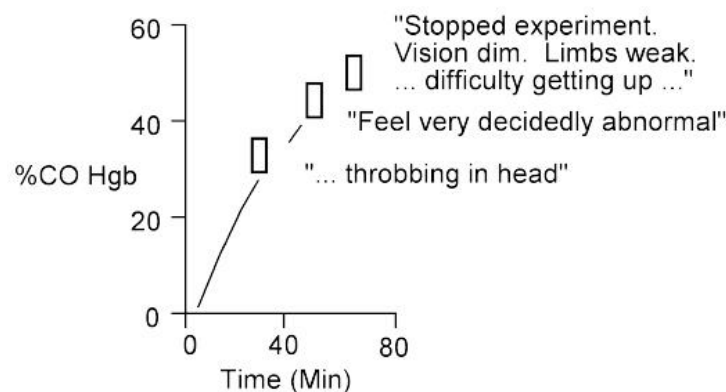
Putorti, A. D. 2001. Flammable and Combustible Liquid Spill/Burn Patterns. Washington, DC. USA: National Institute of Justice. Office of Science and Technology. 2001. 55 s. (NIJ Report 604-00)

## Liite C: Hiilimonoksidin aiheuttaman vaaran arviointi

Hiilimonoksidin terveydelle haitalliset vaikutukset perustuvat suurelta osin karboksyhemoglobiinin (COHb) syntyyn, mikä heikentää veren kykyä kuljettaa happea. Hiilimonoksidille altistuneen ihmisen vointi ja toimintakyky heikkenevät veren COHb-pitoisuuden noustessa seuraavasti [Gosselin ym. 1984]:

- 0 – 10% COHb: ei oireita tai hengästyneisyys voimakkaassa lihasrasituksessa.
- 10 – 20% COHb: lievä päänsärky ja hengästyneisyys kohtuullisessa lihasrasituksessa.
- 20 – 30% COHb: jyskyttävä päänsärky, ärtyneisyys, emotionaalinen epätasapaino, heikentynyt arvostelukyky, muistihäiriöt ja nopea uupuminen.
- 30 – 40% COHb: ankara päänsärky, heikkous, pahoinvointi ja oksentelua, huimaus, näön hämärtyminen, sekavuus.
- 40 – 50% COHb: lisääntyvä sekavuus, aistihäiriöitä (joskus), liikkeet hyvin haparoivia, kiihtynyt hengitys.
- 50 – 60% COHb: tajuttomuus sekä ajoittaisia kouristeluja, sydämen nopealyöntisyys ja heikko pulssi, kalpeus ja sinisyys.
- 60 – 70% COHb: syvenevä tajuttomuus, virtsan ja ulosteiden pidätyskyvyttömyys.
- 70 – 80% COHb: syvä tajuttomuus, refleksit heikot tai puuttuvat kokonaan, hyvin heikko pulssi, epäsäännöllinen hengitys, täydellinen liikkumattomuus.
- yli 80 % COHb: kuolema hengityksen pysähtymiseen.

Tutkija John Haldane [1895] teki CO-altistuskokeita lähimpänä olevalla koehenkilöllä eli itsellään (peräti 11 koetta)<sup>4</sup>. Kuvassa C1 esitetään joitain hänen tuloksistaan. Näin uhrautuva tutkimus ansaitsee hieman tarkemmankin tarkastelun; se annetaan taulukossa C1.



Kuva C1. Haldanen omakohtaisen empiirisen tutkimuksen tuloksia hiilimonoksidialtistuksen vaikutuksista [Haldane 1895].

<sup>4</sup> Esimerkillinen tutkija!

*Taulukko C1. Haldanen [1895] omakohtaisen empiirisen 11 kokeen tutkimussarjan tuloksia hiilimonoksidialtistuksen vaikutuksista: tulokset niistä 8 kokeesta, joissa CO-pitoisuus oli yli 1000 ppm.*

Koe no.	[CO], altistusaika, COHb ja tuntemus/oire
1	- 5000 ppm, 11,5 min, COHb -: ei oireita
2	- 3900 ppm, 15 min, COHb 23 %: ei oireita - 3900 ppm, 30,5 min, COHb 39%: yläkertaan juokseminen aiheutti huimausta ja voimakasta hengästymistä, sydämentykytystä, lieviä näköoireita
3	- 4000 ppm, 24 min, COHb 27 %: ei oireita, paitsi yläkertaan juokseminen aiheutti huimausta ja poikkeuksellista hengästymistä
4	- 3600 ppm, 29 min, COHb 39 %: jyskytystä päässä ja sydämentykytystä, juostessa hengästymistä
5	- 4100 ppm, 29 min, COHb 37 %: näkö- ja kuulo-oireita 1-2 min ajan
6	- 1200 ppm, 33 min, COHb 18 %: pulssi 96/min - 1200 ppm, 67 min, COHb -: lievää sydämentykytystä, unettavuutta - 1200 ppm, 120 min, COHb 37 %: selvää hengästymistä ja sydämentykytystä, selvästi epämukava olo, juoksemisen jälkeen heikkoutta jaloissa, selviä näkö- ja kuulohäiriöitä
7	- 2100 ppm, 34 min, COHb -: lievästi omituinen olo, päänsärkyä - 2100 ppm, 40 min, COHb 39 %: - - 2100 ppm, 71 min, COHb 49 %: näkö hämärtynyt, raajat heikot, vaikea nousta ylös ja kävellä ilman apua
8	- ainakin 4300 ppm 10 min ajan, 35 min, COHb 59 %: ei tahdo pysyä pystyssä, käveleminen ilman apua johtaa kaatumiseen

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan ihmisen toimintakykyyn selvästi haitallisesti vaikuttavana COHb-pitoisuutena pitää arvoa 30 %. Yli 50 %:n suuruinen COHb-pitoisuus voidaan katsoa hengenvaaralliseksi, koska tällöin ihminen menettää tajuntansa eikä siten voi poistua tilasta, minkä johdosta hän altistuu CO:lle yhä pahemmin, kunnes hänen verensä COHb-pitoisuus nousee kohtalokkaalle tasolle.

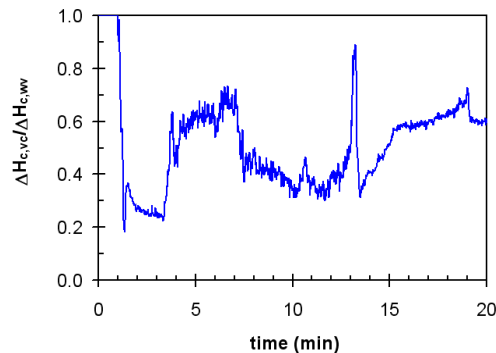
Palotilanteissa, joita luonnehtii lyhyt altistus korkeille CO-pitoisuuksille, veren COHb-pitoisuutta voidaan arvioida Stewardin [1973] mallia käyttäen, jonka mukaan vakioiselle CO-pitoisuudelle ja hengitysnopeudelle on

$$\frac{\text{COHb}(\Delta t_{\text{exp}})}{\%} = A_{\text{CO}} \cdot \left( \frac{[\text{CO}]}{\text{ppm}} \right)^{1.036} \cdot \left( \frac{\dot{V}_b}{\text{L/min}} \right) \cdot \left( \frac{\Delta t_{\text{exp}}}{\text{min}} \right), \quad (8-1)$$

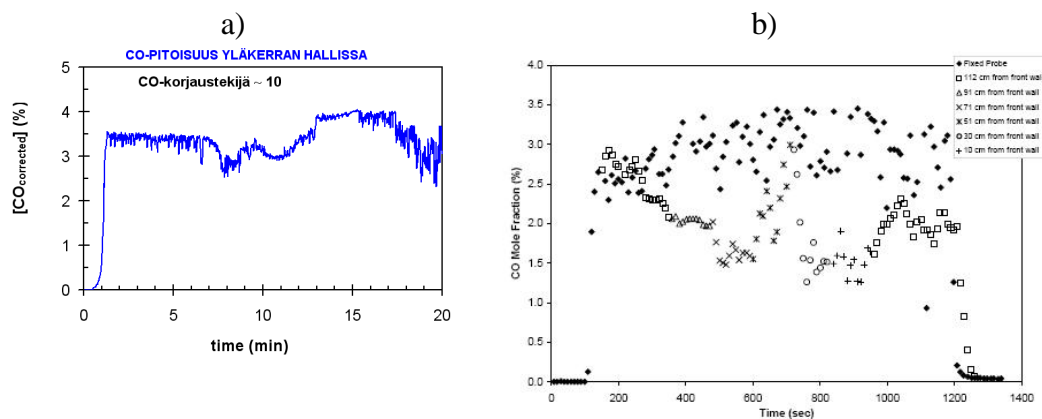
missä  $A_{\text{CO}} = 3.317 \cdot 10^{-5}$ , [CO] on hiilimonoksidipitoisuus [ppm],  $\dot{V}_b$  on hengitysnopeus [L/min] ja  $\Delta t_{\text{exp}}$  on altistusaika [min]. Tässä käytetään hengitysnopeudelle arvoa 10 litraa/min.

Tarkastelluissa skenaarioissa palo on varsin voimakkaasti hapen saannin rajoittama. Määrällinen arvio hapen saannin vaikutukselle voidaan saada vertaamalla palossa toteutuvaa lämpöarvoa  $\Delta H_{\text{c,vc}}$  lämpöarvoon  $\Delta H_{\text{c,wv}}$ , joka

vastaa hyvin happea saavan palamisen lämpöarvoa<sup>5)</sup>. Näiden tekijöiden suhde esitetään kuvassa C2. Voidaan havaita, että palamisen happirajoittuneisuus on suuruusluokkaa 50 %, mikä Tewartsonin [2002] esittämien tulosten mukaan aiheuttaa voimakkaan CO-tuoton kasvamisen. FDS5-palonsimulointiohjelmassa on olemassa optio, jolla tätä CO-tuoton ja siten myös CO-pitoisuuden kasvua happirajoitteisessa palossa voidaan pyrkiä laskemaan. Tämä piirre on kuitenkin suhteellisen uusi ja sen kelpoisuutta ei vielä ole arvioitu kovinkaan laajalti. Tässä esityksessä käytetäänkin perinteisempää lähestymistapaa, jossa CO-pitoisuus lasketaan ohjelmalle annetun vakioisen tuottoarvon  $y_{CO}$  mukaan ja näin saatua CO-pitoisuutta korjataan ylöspäin sopivalla tekijällä  $\zeta$ . Tässä työssä käytetyt arvot ovat  $y_{CO} = 0,025$  kg/kg ja  $\zeta = 10$ . Tämä korjaustekijä tuottaa CO-pitoisuuksia, jotka ovat suuruusluokkaa 30 000 - 40 000 ppm eli 3-4 % (kuva C3a), mikä vastaa varsin hyvin Brynerin ym. huonepalokokeissa mittaamia noin 3-3,5 %:n suuruisia CO-pitoisuuksia (kuva C3b).



Kuva C2. Lämpöarvon  $\Delta H_{c,vc}$  suhde lämpöarvoon  $\Delta H_{c,wv}$ , skenaariossa S1.



Kuva C3. Lasketulle CO-pitoisuudelle tehdyn korjauksen kelpoisuuden arviointi: a) esimerkki korjatusta CO-pitoisuudesta eräässä tässä raportissa tarkastellussa paloskenaariossa ja b) Brynerin ym. [1994] huonepalokokeissa mittaamia CO-pitoisuuksia.

<sup>5</sup> Tässä käytetään Tewartsonin [2002] mukaisia merkintöjä, jossa alaindeksi "vc" viittaa termiin "ventilation controlled" ja "wv" termiin "well-ventilated".

## **Litteen C lähdeviitteet**

Bryner, N., Johnsson, R. J., Pitts, W. M. 1994. Carbon Monoxide Production in Compartment Fires – Reduced-Scale Enclosure Test Facility. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5568 (1994).

Gosselin, R.E., R.P. Smith & H.C. Hodge. 1984. Clinical Toxicology of Commercial Products. 5. painos. Baltimore: Williams and Wilkins. s. III-98

Haldane, J. The action of carbonic acid on man. J. Physiol. vol. 18, s. 430-462. (1895)

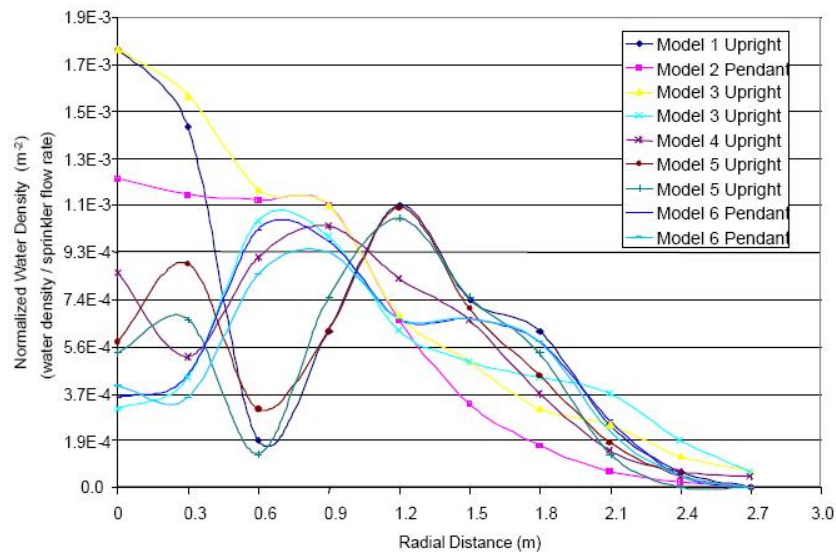
Stewart, R.D., Peterson, J.E., Fisher, T.N., Hosko, M.J., Baretta, E.D. & Dodd, H.C. Experimental human exposure to high concentrations of carbon monoxide. Arch. Environ. Health, vol. 26, s.1–7. (1973)

Tewarson, A. 2002. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-53–3-124.



## Liite D: Asuntosprinklerin mallintamisen yksityiskohtia

Olellainen kysymys sprinklerijärjestelmän toiminnan mallintamisessa on sprinklerisuuttimen antaman veden määrän ja sen jakautumisen oikeaan osuva kuvaaminen. Veden määrä ilmaistaan yleensä yksiköissä mm/min (vesivuo), joka vastaa sprinklerin toimiessa minuutin aikana neliömetrin suuruiselle pinta-alalle lankeavaa vesimäärää litroissa. Sprinklerisuutin suunnitellaan siten, että se antaa halutun vesivuon halutun suuruiselle alueelle, joka kutsutaan ko. sprinkleripään suojausalaksi. On huomattava, että vesimäärä ei tyypillisesti jakaudu tasaisesti suojausalalla, vaan vesivuo vaihtelee sprinkleripäästä mitatun etäisyyden funktiona sekä yleensä myös eri suunnissa: kuvassa D1 esitetään esimerkki Sheppardin [2002] mittaamista erityyppisten sprinkleripäiden vesivuon jakaumista.



Kuva D1. Sheppardin [2002] mittaamista erityyppisten sprinkleripäiden vesivuon jakaumista.

Taulukko D1. CEA 4001:2007-06(fi):n liitteen O mukaiset suunnitteluperusteet.

	MITOITUS 5)	VESIVUON- TIHEYS (mm/min) 1)	TOIMINTA- AIKA (min) 3)	VESILÄHTEEN LUOKKA 4)	SUUTIN 1) 2)
<b>ASUINTALOT JA ERITYISASUMINEN</b>					
1–2 huoneistoa	2 sprinkleriä	2,25	10	C	asuntosprinkleri
rivitalo	2 sprinkleriä	2,25	30	C	asuntosprinkleri
kerrostalo 2–8 krs	4 sprinkleriä	2,25	30	C	asuntosprinkleri nopeatoiminen sprinkleri
kerrostalo yli 8 krs, korkeusero alimman ja ylimmän sprinklerin välillä enintään 45 m	4 sprinkleriä	2,25	60	B	asuntosprinkleri nopeatoiminen sprinkleri
<b>PIENET MAJOITUSTILAT JA PIENET HOITOLAITOKSET</b>					
rakennukset 1–8 krs	4 sprinkleriä	2,25	30	C	asuntosprinkleri nopeatoiminen sprinkleri
kerrostalo yli 8 krs, korkeusero alimman ja ylimmän sprinklerin välillä enintään 45 m	4 sprinkleriä	2,25	60	B	asuntosprinkleri nopeatoiminen sprinkleri
1) Vesisumu- ja muiden vaihtoehtoisten järjestelmien vesivuontiheys ja suutintyyppi määräytyvät kyseisen järjestelmän tyyppihyväksynnässä. 2) Asuntosprinklereitä (residential) käytetään asuin- ja majoitushuoneistoissa. Nopeatoimisia (quick response) sprinklereitä käytetään muissa kuin majoittumiseen tai asumiseen tarkoitetuissa tiloissa. 3) Kohteissa, joissa vaatimus automaattisesta sammutuslaitteistosta perustuu siihen, että asukas ei itse pysty pelastautumaan, toiminta-ajan tulee olla turvallisuusselvityksen pelastusaikalaskelman tarkoittama asukkaan pelastamiseen tarvittava aika, kuitenkin vähintään tämän taulukon mukainen. 4) C-luokan vesilähteenä voidaan käyttää - monikäyttöistä talojohtoa edellyttäen, että muu kulutus huomioidaan syöttöputken mitoituksessa - kohdan 8.5 mukaista painesäiliötä. 5) Mikäli yhtenäinen huonetilä asuntona käytetyissä rakennuksissa on yli 75 m <sup>2</sup> (esimerkiksi palvelutalon ruokailutila), tulee mitoitusala kasvattaa ylimenevältä osalta yhdellä sprinklerillä jokaista alkavaa 50 m <sup>2</sup> kohden.					

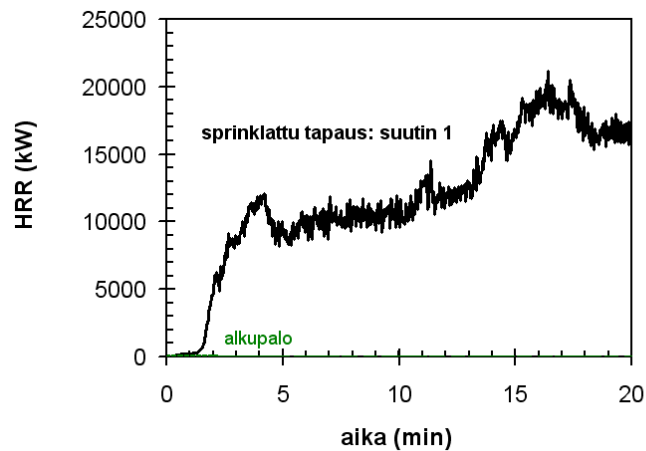
Tässä raportissa asuntosprinkleri mallinnettiin perustuen yleisen sprinklerilaitteistojen suunnittelua ja asentamista ohjaavan julkaisun CEA 4001 (CEA 4001:2004-03(fi)) liitteen O määrittelyihin (taulukko D1). Tämä tarkoittaa sitä, että keskimääräisenä vesivuon tavoitearvona pidettiin arvoa 2,25 mm/min. Tämän lisäksi sovellettiin myös sitä NFPA:n standardin 13R perusajatusta, että kerrostalojen sprinklerilaitteistojen tarkoituksena on estää yleissyttyminen (lieskahtaminen) siinä huoneessa, jossa palo syttyy [NFPA 13R, liitteen F2 kohta F2.2] siten, että mallinnetun sprinklerilaitteiston tulee estää yleissyttyminen. Näiden lähtökohtien perusteella sprinkleripäiden mallintaminen tehtiin vaiheittain seuraavasti:

- Ensin tarkasteltiin mallia, jonka keskimääräinen vesivuo oli n. 2,25 mm/min. Tälle sprinklerimallille laskennan tulos ei kuitenkaan täyttänyt lieskahtamisen estämistä koskevaa tavoitetta, vaan eteinen lieskahti (kuva D2) ja palo levisi sisäovien avautumisten myötä alakertaan. Yläkertaan palo ei tälläkään sprinkleripään mallilla kuitenkaan levinnyt, vaan porrashuoneessa ollut sprinkleripää esti palon leviämisen.
- Seuraavaksi tarkasteltiin mallia, jonka vesivuon jakautuminen esitetään kuvassa D3. Vesivuo ylittää arvon 2,25 mm/min noin 25-70 %:lla, mutta koska tämä malli toteutti lieskahtamisen estämistavoitteen,

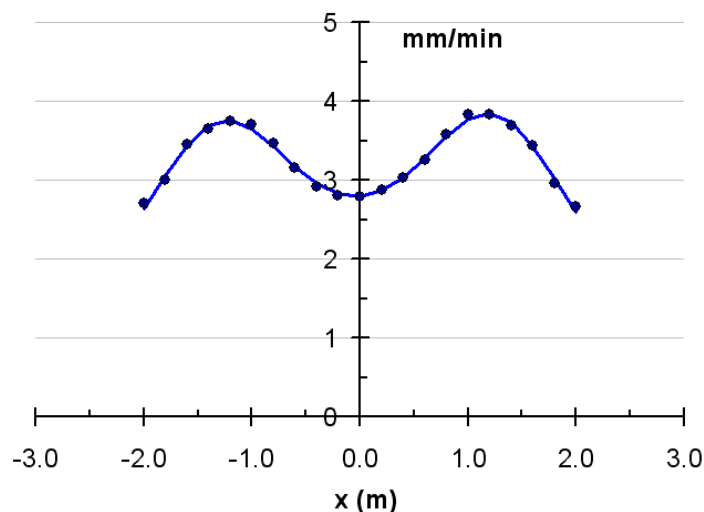
palonsimulointimallissa käytettiin sitä. Huomattakoon, että asuntosprinklerin suuttimen tämänhetkiseen mallintamiseen liittyvän suhteellisen merkittävän epävarmuuden puitteissa em. vesivuon arvoa ei välttämättä voida pitää tyypillisestä asuntosprinkleristä poikkeavana arvona.

Laitteen muut olennaiset tekniset ominaisuudet ovat seuraavat:

- laukeamislämpötila 57 °C,
- RTI-arvo  $50 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ ,
- K-arvo 80 litraa/min,
- käyttöpaine 1,4 bar.



*Kuva D2. Paloteho sprinklerisuuttimen mallintamisen ensimmäisessä yrityksessä.*



*Kuva D3. Tässä raportissa asuntosprinkleriä kuvaamaan käytetyn järjestelmän sprinkleripään vesivuon jakauma.*

## **Litteen C lähdeviitteet**

CEA 4001:2004-03(fi). Sprinklerilaitteistot: suunnittelu ja asentaminen. Comité Européen des Assurances, Pariisi, Ranska. 182 s.

Sheppard, D. T. 2002. Spray Characteristics of Fire Sprinklers. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 206 s. NIST GCR 02-838