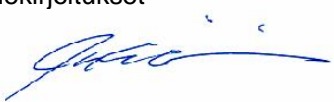



# **Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 osastolla 9 25.1.2007 tapahtuneen tulipalon mallintaminen**

Kirjoittajat: Jukka Hietaniemi

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 osastolla 9 25.1.2007 tapahtuneen tulipalon mallintaminen	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Onnettomuustutkintakeskus Kai Valonen johtava tutkija, DI Sörnäisten rantatie 33C 00580 HELSINKI puh. (09) 1606 7902 / 040 500 9992 email. <a href="mailto:kai.valonen@om.fi">kai.valonen@om.fi</a> , <a href="http://www.onnettomuustutkinta.fi">www.onnettomuustutkinta.fi</a>	Asiakkaan viite
Projektin nimi Pitkäniemen palontutkinta	Projektin numero/lyhytnimi Pitkäniemi
Raportin laatija(t) Jukka Hietaniemi	Sivujen lukumäärä 120
Avainsanat	Raportin numero VTT-R-00252-08
Tiivistelmä <p>Pitkäniemen sairaalan rakennuksessa 17, osastolla 9 syttyi tammikuun 25.päivänä 2007 psykiatrisessa hoidossa olleen potilaan tahallisesti sytyttämä tulipalo, joka aiheutti suurta vaaraa potilaille ja henkilökunnalle. Onnettomuudessa ei menetetty ihmishenkiä, mutta tapahtumia selvittäneiden tutkijoiden mukaan tilanne olisi voinut johtaa jopa moniuhriseen seuraamukseen. Siksi on tärkeää selvittää, miten tulipalo pääsi kehittymään niin uhkaavaksi ja miten vastaavien hoitolaitosten paloturvallisuus tulisi järjestää, jotta niiden potilaat ja henkilökunta olisivat turvassa.</p> <p>Tämä raportti keskittyy Pitkäniemen sairaalan palon määrälliseen analysointiin kokeellisesti sekä palon mallintamista ja simulointia käyttäen. Tavoitteena on tuottaa määrällistä tietoa tuon tulipalon ymmärtämiseksi ja tuottaa teknisiä perusteita psykiatristen osastojen paloturvallisuuden parantamiseen tähtääville toimenpiteille.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Espoo 18.2.2008 Allekirjoitukset   Jukka Hietaniemi, laatija      Eila Lehmus, hyväksyjä	
VTT:n yhteystiedot <a href="mailto:jukka.hietaniemi@vtt.fi">jukka.hietaniemi@vtt.fi</a>	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaja, onnettomuuden tutkintalautakunta ja VTT. Julkaistaan tilaajan internet-sivuilla.	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

## Alkusanat

Pitkäniemen sairaalan rakennuksessa 17, osastolla 9 syttyi tammikuun 25.päivänä 2007 psykiatrisessa hoidossa olleen potilaan tahallisesti sytyttämä tulipalo, joka aiheutti suurta vaaraa potilaille ja henkilökunnalle. Onnettomuudessa ei menetetty ihmishenkiä, mutta tapahtumia selvittäneiden tutkijoiden mukaan tilanne olisi voinut johtaa jopa moniuhriseen seuraamukseen. Siksi on tärkeää selvittää, miten tulipalo pääsi kehittymään niin uhkaavaksi ja miten vastaavien hoitolaitosten paloturvallisuus tulisi järjestää, jotta niiden potilaat ja henkilökunta olisivat turvassa.

Tämä raportti keskittyy Pitkäniemen sairaalan palon määrälliseen analysointiin kokeellisesti sekä palon mallintamista ja simulointia käyttäen. Tavoitteena on tuottaa määrällistä tietoa tuon tulipalon ymmärtämiseksi ja tuottaa teknisiä perusteita psykiatristen osastojen paloturvallisuuden parantamiseen tähtääville toimenpiteille.

Hankkeen johtoryhmänä toimi Onnettomuustutkintakeskuksen asettama mainitun tulipalon tutkintalautakunta.

Tekijä kiittää johtoryhmää sen antamista monista käytännön tiedoista ja neuvoista. Lisäksi kiitokset kuuluvat Pelastusopiston henkilökunnalle rekonstruktiokeiden järjestelyistä ja VTT:n tutkija Tuomo Rinteelle, joka suoritti mittaukset ja havaintojen teon toisessa polttokokeista sekä VTT:n tutkija Joonas Sorvarille avusta palonsimulointimallin laatimisessa.

Espoo 18.2.2008

Jukka Hietaniemi

## Sisällysluettelo

Alkusanat	3
1 Johdanto	6
2 Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointikokeet	7
2.1 Koejärjestelyn yleiskuvaus	7
2.2 Palokuorma	11
2.3 Mittaus- ja havainnointijärjestelyt	13
2.4 Mittaus- ja havainnointitulokset: polttokoe 1	14
2.5 Mittaus- ja havainnointitulokset: polttokoe 2	23
2.6 Koetulosten vertailu	31
3 Rekonstruointikokeiden simulointi	32
3.1 FDS-palonsimulointiohjelma	32
3.2 Kokeiden mallinnuksen kuvaus	32
3.2.1 Koejärjestelyiden kuvaus FDS-ohjelmalla	32
3.2.2 Palon kehittymisen ja leviämisen mallintaminen	33
3.3 Kokeiden mallinnuksen tulokset	35
3.3.1 Palosimulointiohjelmalla laskettu palonkehitys: lämpötilat ja paloteho	35
3.3.2 Koetulosten perusteella määritetty palonkehitys: lämpötilat ja paloteho	37
4 Simulointituloksia siitä, miten sprinklaus olisi vaikuttanut rekonstruktiokeiden palonkehittämiseen	40
4.1 Laskennassa käytetyn sprinklerisysteemin kuvaus	40
4.2 Sprinklereiden toiminta-aika	41
4.3 Sprinklerin todennäköisin vaikutus kokeissa: sammuttaminen	42
4.4 Palon kehittymisen mallintamistapa 1: FDS-ohjelmalla laskettu sprinklauksen vaikutus palotehon kehittämiseen	42
4.4.1 Palon kehittymisen mallintamistapa 2: empiiristen mallien soveltaminen sprinklauksen palotehoa alentavan vaikutuksen arviointiin	44
4.5 Yhteenveto simuloinnin antamista tuloksista siitä, miten sprinklaus olisi vaikuttanut rekonstruktiokeiden palonkehittämiseen	47
5 Pitkäniemen sairaalan tulipalon mallintaminen	51
5.1 Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu lainkaan	55
5.2 Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu osittain jättäen 30 cm suuruisen raon	64
5.3 Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin	72
5.4 Tulosten tarkastelu	80
5.5 Esitettyjen suureiden tulkinnasta	80
5.5.1 Pitkäniemen sairaalassa tapahtunutta tulipaloa vastaavan tilanteen simuloinnit	81
5.5.2 Eri palo-oven toimintatapoja tarkastelevien simulointien tulosten vertailua	83



---

6	Automaattisen sammutuslaitteiston vaikutuksen tutkiminen	86
6.1	Palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelutapa 1	86
6.2	Palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelutapa 2	95
6.3	Sprinklerijärjestelmän vaikutuksen arviointi	104
7	Muiden paloturvallisuustekijöiden vaikutuksesta	105
7.1	Lämpö- ja savuilmatisimet	105
7.2	Savunpoisto	105
7.3	Palokuorman määrä ja laatu	105
	7.3.1 Irtain palokuorma	105
	7.3.2 Pintakerrosten osallistumisesta paloon	106
8	Loppusanat	107
	Liite A. Palonsimulointiohjelman virtuaaliset mittarit	108
	Liite B. Palovammoista []	116
	Lähdeviitteet	119

# 1 Johdanto

Pitkäniemen sairaalan rakennuksessa 17, osastolla 9 syttyi tammikuun 25.päivänä 2007 psykiatrisessa hoidossa olleen potilaan tahallisesti sytyttämä tulipalo, joka aiheutti suurta vaaraa potilaille ja henkilökunnalle. Onnettomuudessa ei menetetty ihmishenkiä, mutta tapahtumia selvittäneiden tutkijoiden mukaan tilanne olisi voinut johtaa jopa moniuhriseen seuraamukseen. Siksi on tärkeää selvittää, miten tulipalo pääsi kehittymään niin uhkaavaksi ja miten vastaavien hoitolaitosten paloturvallisuus tulisi järjestää, jotta niiden potilaat ja henkilökunta olisivat turvassa, vaikka joku hoidokeista sytyttää tulipalon osaston yhteisessä tilassa - niin kuin Pitkäniemen sairaalan tulipalossa oli kyse tai omassa potilashuoneessaan - niin kuin kävi Växjön sairaalan psykiatrisella osastolla Ruotsissa elokuussa 2003, jolloin potilaan oman henkensä riistämiseen tähdännyt potilashuoneen sytyttäminen johti kahden muissa huoneissa olleiden potilaiden kuolemaan ja kolmen vakavaan loukkaantumiseen [1].

Tämä raportti keskittyy Pitkäniemen sairaalan palon määrälliseen analysointiin kokeellisesti sekä palon mallintamista ja simulointia käyttäen.

Työn kokeellisessa osassa tehtiin kaksi täyden mittakaavan palokoetta Pelastusopiston harjoitusalueelle rakennetulla sairaalan käytävää kuvaavalla mallilla (rekonstruointikokeet). Näiden rekonstruointikokeiden tulokset tulkittiin yhdessä Onnettomuustutkintakeskuksen asettaman tutkintalautakunnan kanssa ja tämän lisäksi ne mallinnettiin palonsimulointia käyttäen.

Pitkäniemen sairaalan tulipalotapauksen tutkiminen käsitti seuraavat tehtävät:

- Tapahtuneen tulipalotapauksen simulointi käyttäen apuna em. rekonstruointikokeiden tuloksia sekä muuta rakennusta, sen irtaimistoa ja palontorjuntalaitteistoja koskevaa tietoa;
- Simulointimallin soveltaminen eri tekijöiden merkityksen selvittämiseksi. Tässä tehtävässä keskityttiin erityisesti sprinklerijärjestelmän vaikutuksen arviointiin. Lisäksi selvitetään palonilmaisimien ja savunpoiston toimintaedellytyksiä sekä käydään läpi muita paloturvallisuuden kannalta olennaisten tekijöitä, kuten palokuorma, ovien toiminta, jne.

Raportointi koostuu edellä mainittujen tehtävien kuvauksesta ja niiden teknisestä tulkinnasta. Tulokset antavat teknisiä perusteita psykiatristen osastojen paloturvallisuuden parantamiseen tähtääville toimenpiteille.

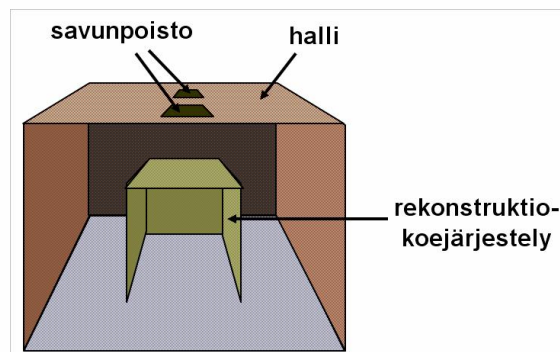
## 2 Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointikokeet

### 2.1 Koejärjestelyn yleiskuvaus

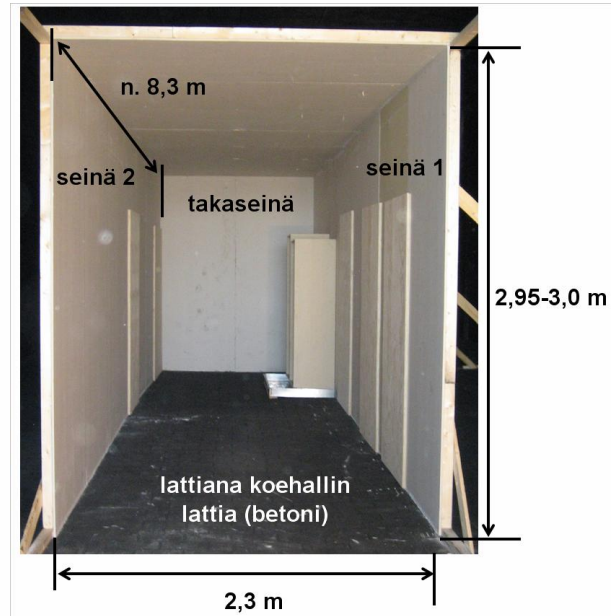
Polttokokeet tehtiin 6.6. ja 13.6. Pelastusopiston harjoitusalueen koehallissa kuvassa Kuva 1 esitetyllä tavalla.

Polttokokeiden kohde kuvasi sitä käytävän osaa, jossa palo syttyi (Kuva 2). Käytävästä toteutettiin noin 8,3 m pitkä, 2,95-3 m korkea ja 2,3 m leveä osuus, jonka toinen pää oli suljettu (takaseinä) ja toinen aukesi koehalliin koko leveydeltään ja korkeudeltaan (aukon koko oli siis noin 6,9 m<sup>2</sup>). Koejärjestelyn katto ja seinät (seinä 1, Kuva 3 ja seinä 2, Kuva 4) oli rakennettu palokipsilevystä ja lattiana toimi koehallin betonilattia.

Rekonstruktiossa ensimmäiseksi syttyvinä kohteina olivat koejärjestelyn avoimesta aukosta katsottuna oikean puoleisella seinällä (seinä 1, Kuva 3) olevat kaksi lastulevystä tehtyä edestä avointa vaatekaappia (Kuva 5).

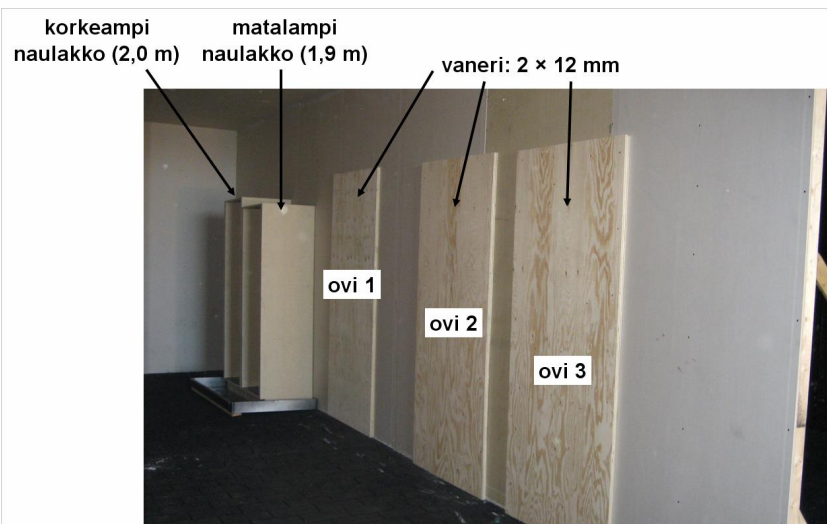


Kuva 1. Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointikokeiden järjestelyt Pelastusopiston harjoitusalueen koehallissa.

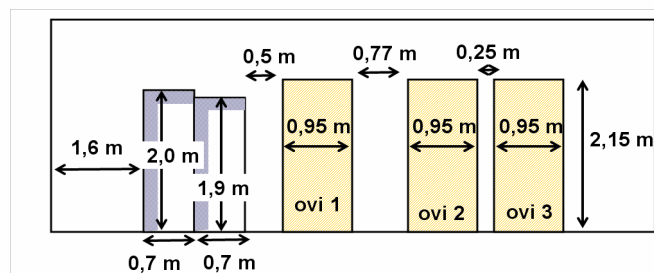


Kuva 2. Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointia varten rakennettu käytävä, yleiskuva.

a)

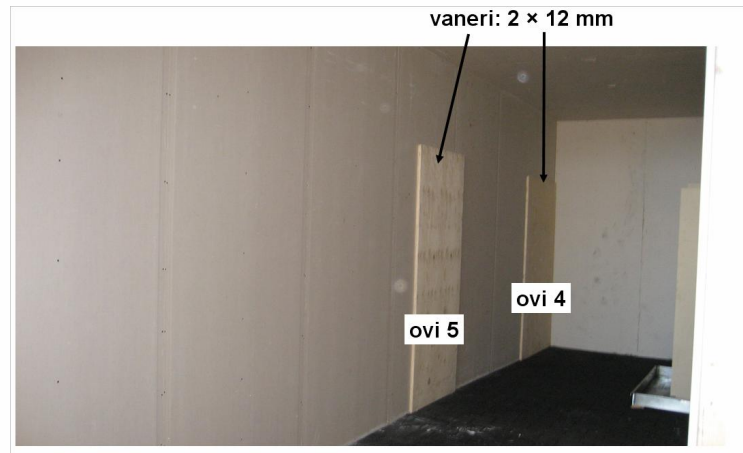


b)

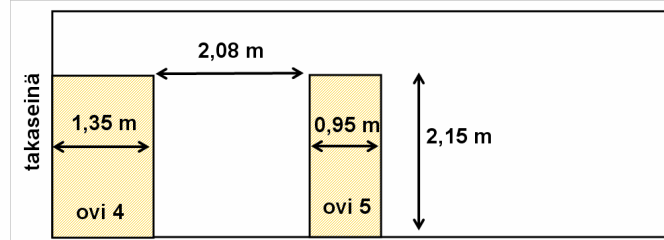


Kuva 3. Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointia varten rakennettu käytävä, seinä 1: a) valokuva ja b) mitat.

a)

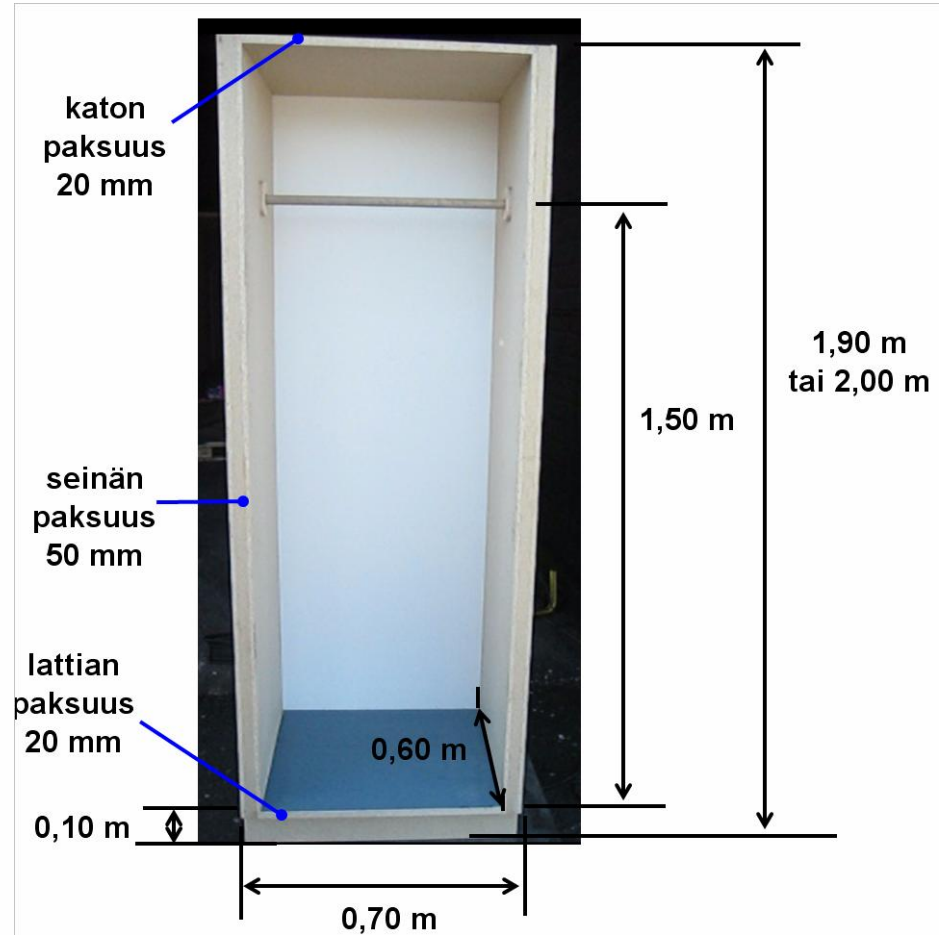


b)

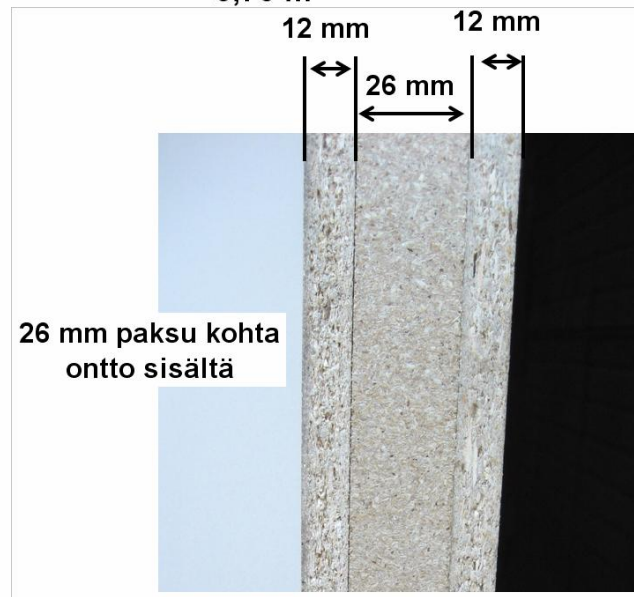


Kuva 4. Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointia varten rakennettu käytävä, seinä 2:  
a) valokuva ja b) mitat.

a)



b)



Kuva 5. Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointia varten rakennettu vaatekaappi: a) mitat ja b) sivuseinän yksityiskohta.

## 2.2 Palokuorma

Rekonstruktiokokeiden ensimmäiseksi syttyvinä kohteina olivat vaatekaapeissa olevat vaatteet sekä kaappien päällä olleet muovikorit, joissa oli pipoja lapasia. Näiden lisäksi paloon osallistuvia materiaaleja olivat lastulevystä tehdyt naulakkorakennelmat ja ovia kuvaanneet vanerilevyt.

Paloon osallistuvia materiaaleja kuvaavia tietoja esitetään taulukossa Taulukko 1.

Taulukko 1. Paloon osallistuvia kohteita kuvaavia tietoja.

kohte	massa	kommentti
vaatenaulakoissa sisällä ja niiden päällä olleet vaatteet: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 takkia</li> <li>• 12 pipoa</li> <li>• 12 lapasparia</li> </ul>	12,8 kg	punnitus
henkarit, (12 kpl)	0,67 kg	punnitus
matalampi vaatekaappi	61,0 kg	punnitus; ulkopinta-ala 8,5 m <sup>2</sup>
korkeampi vaatekaappi	63,8 kg	punnitus; ulkopinta-ala 8,9 m <sup>2</sup>
ovia kuvaavat vanerilevyt: korkeus 2,15 m, paksuus 24 mm <ul style="list-style-type: none"> <li>• ovi 1: leveys 0,95 m</li> <li>• ovi 2: leveys 0,95 m</li> <li>• ovi 3: leveys 0,95 m</li> <li>• ovi 4: leveys 1,35 m</li> <li>• ovi 5: leveys 0,95 m</li> </ul>	yht. 160 kg 29.4 kg 29.4 kg 29.4 kg 41.8 kg 29.4 kg	tiheys n. 600 kg/m <sup>3</sup> (arvio) ala 2,04 m <sup>2</sup> , tilavuus 0,049 m <sup>3</sup> ala 2,04 m <sup>2</sup> , tilavuus 0,049 m <sup>3</sup> ala 2,04 m <sup>2</sup> , tilavuus 0,049 m <sup>3</sup> ala 2,90 m <sup>2</sup> , tilavuus 0,070 m <sup>3</sup> ala 2,04 m <sup>2</sup> , tilavuus 0,049 m <sup>3</sup>

Taulukko 2. Muutaman näytteeksi punnitun takin painot ja materiaalit.

palokuorma	massa	materiaalimerkintä
talvitakki	1,05 kg	polyesteri
talvitakki	0,84 kg	polyesteri ja nylon
talvitakki	1,03 kg	polyesteri
puseromallinen	0,43kg	polyesteri ja nylon

Polyesterin lämpöarvo on noin 33 MJ/kg ja nylonin 31 MJ/kg [2]. Kun otetaan huomioon, että palaminen ei kokeen aikana ole täydellistä, voidaan takkien tehollisen lämpöarvon arvioida olevan noin 30 MJ/kg. Lastulevylle ja vanerille voidaan käyttää tekijällä kaksi alemmaa lämpöarvoa eli arvoa 15 MJ/kg. Taulukoissa Taulukko 3 ja Taulukko 4 esitetään näitä lämpöarvoja käyttäen laskettu arvio palokuorman määrälle.

Taulukko 3. Arvio palokuorman määrästä eriteltyinä eri paloon osallistuvien kohteiden mukaan.

paloon osallistuva kohde	massa	palokuorman määrän arvio
vaatenaulakoissa sisällä ja niiden päällä olleet vaatteet:	12,8 kg	384 MJ

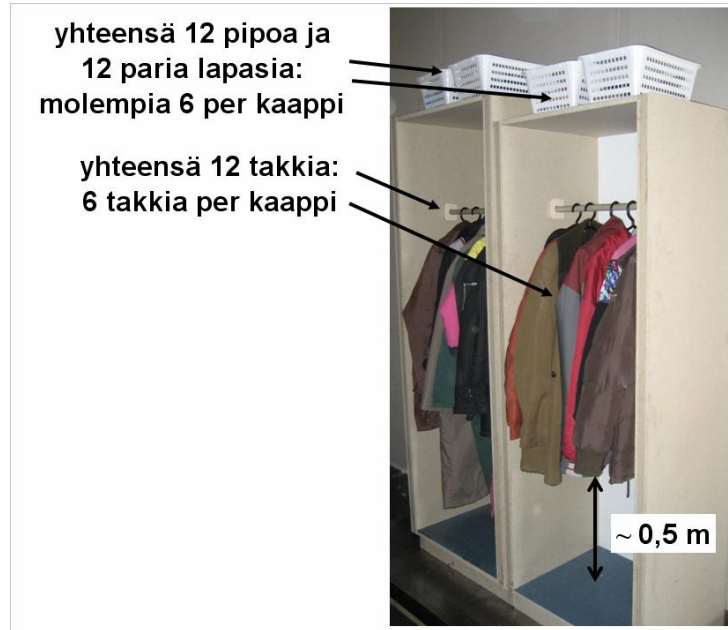
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 takkia</li> <li>• 12 pipoa</li> <li>• 12 lapasparia</li> </ul>		
henkarit, (12 kpl)	0,67 kg	20 MJ
matalampi vaatekaappi	61,0 kg	915 MJ
korkeampi vaatekaappi	63,8 kg	957 MJ
ovia kuvaavat vanerilevyt: korkeus 2,15 m, paksuus 24 mm	yht. 160 kg	2400 MJ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ovi 1: leveys 0,95 m</li> <li>• ovi 2: leveys 0,95 m</li> <li>• ovi 3: leveys 0,95 m</li> <li>• ovi 4: leveys 1,35 m</li> <li>• ovi 5: leveys 0,95 m</li> </ul>	29.4 kg	441 MJ
	29.4 kg	441 MJ
	29.4 kg	441 MJ
	41.8 kg	627 MJ
	29.4 kg	441 MJ

Taulukko 4. Arvio palokuorman määrästä ryhmiteltynä kolmeen pääluokkaan.

paloon osallistuva kohde	massa	palokuorman määrän arvio
vaatteet	13,5 kg	400 MJ
vaatekaapit	125 kg	1900 MJ
ovia kuvaavat vanerilevyt	160 kg	2400 MJ
<b>yhteensä</b>		<b>4700 MJ</b>
<b>palokuorman tiheys lattiapinta-alaa kohden</b>		<b>255 MJ/m<sup>2</sup></b>



a)



b)

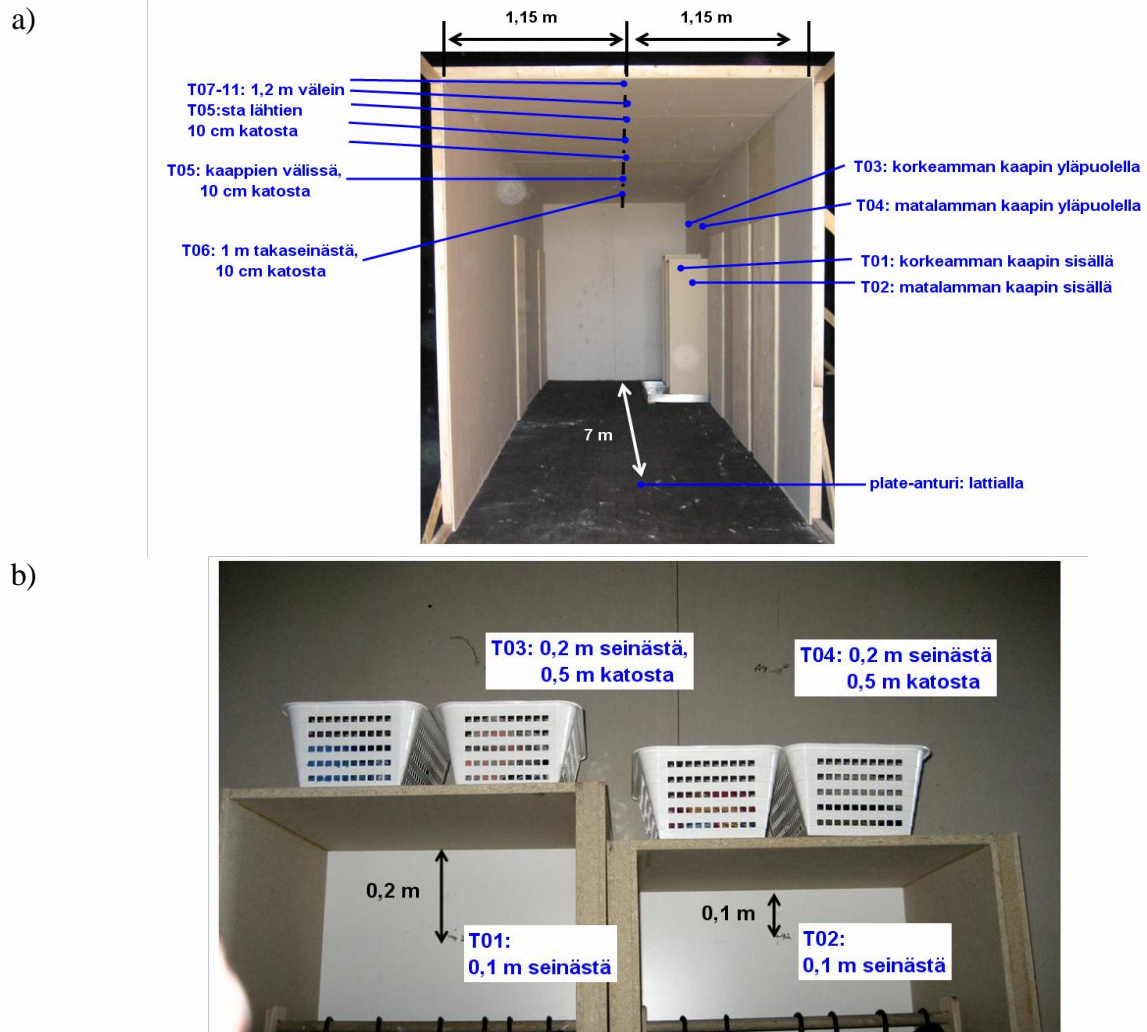


Kuva 6. Pitkäniemen sairaalan tulipalon rekonstruointikokeen takkien ja muun vaatetuksen sijoittelu lastulevykaapeissa: a) molemmat kaapit ja b) yksityiskohta matalammasta kaapista.

## 2.3 Mittaus- ja havainnointijärjestelyt

Kokeista tehtiin kaasun lämpötilan mittauksia käyttäen 11 K-tyyppin termoelementtilämpötila-anturia. Lisäksi mitattiin lattiaan kohdistuvaa lämpörasitusta käyttäen ns. plate-anturia [3]. Kokeet videoitiin ja niiden aikana otettiin kuvia digitaalisella kameralla.

Lämpötila-antureiden sijainti esitetään kuvassa Kuva 7.



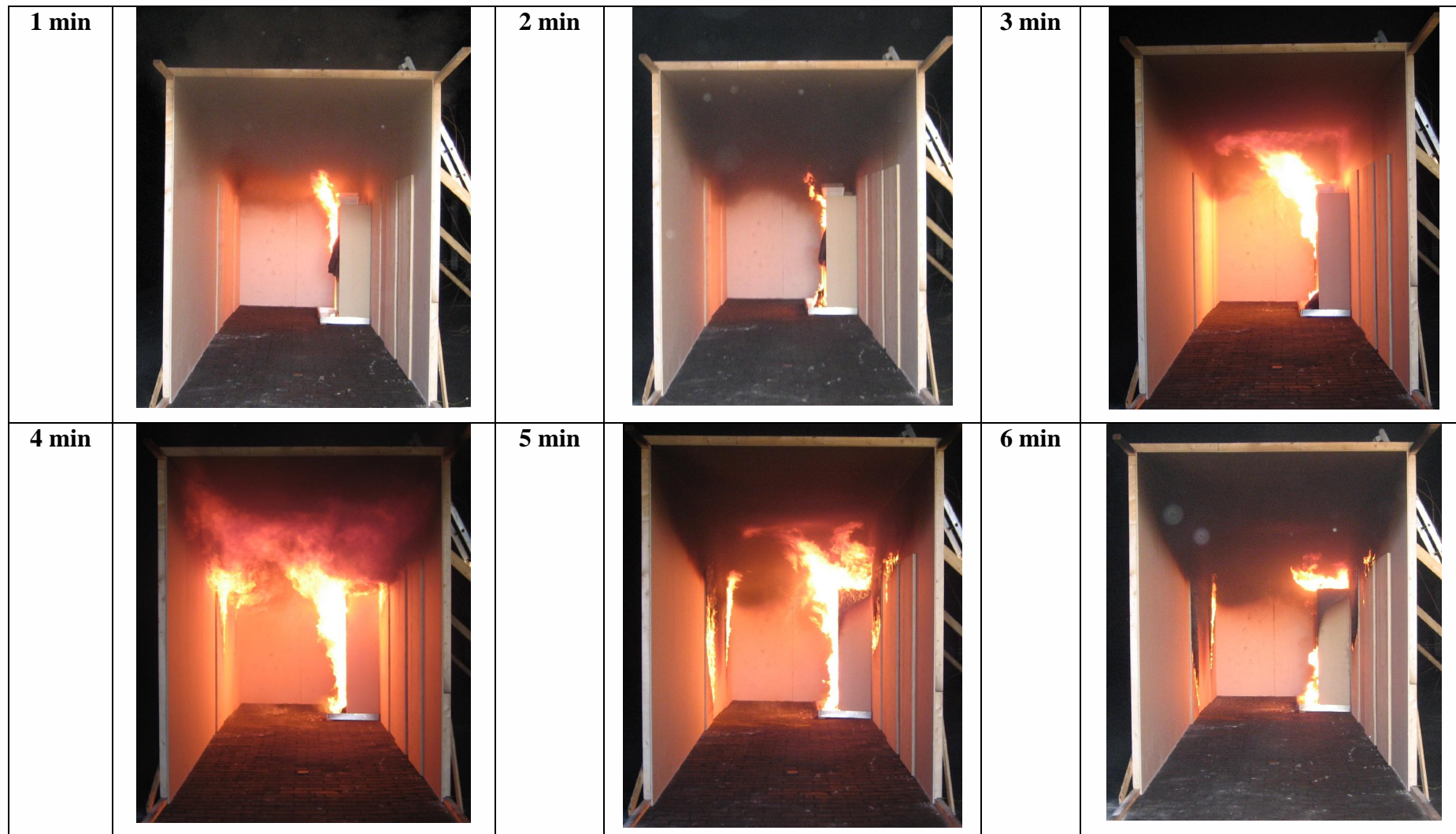
Kuva 7. Lämpötila-antureiden sijainti: a) kaikki anturit ja b) yksityiskohta antureiden T01-T04 sijoittelusta.

## 2.4 Mittaus- ja havainnointitulokset: polttokoe 1

Kesäkuun 6.2007 järjestetyn kokeen kehittyminen esitetään alla olevilla kuvasarjoilla (Kuva 8-Kuva 13). Palon kehittyminen jakaantuu kahteen selvästi erilliseen vaiheeseen:

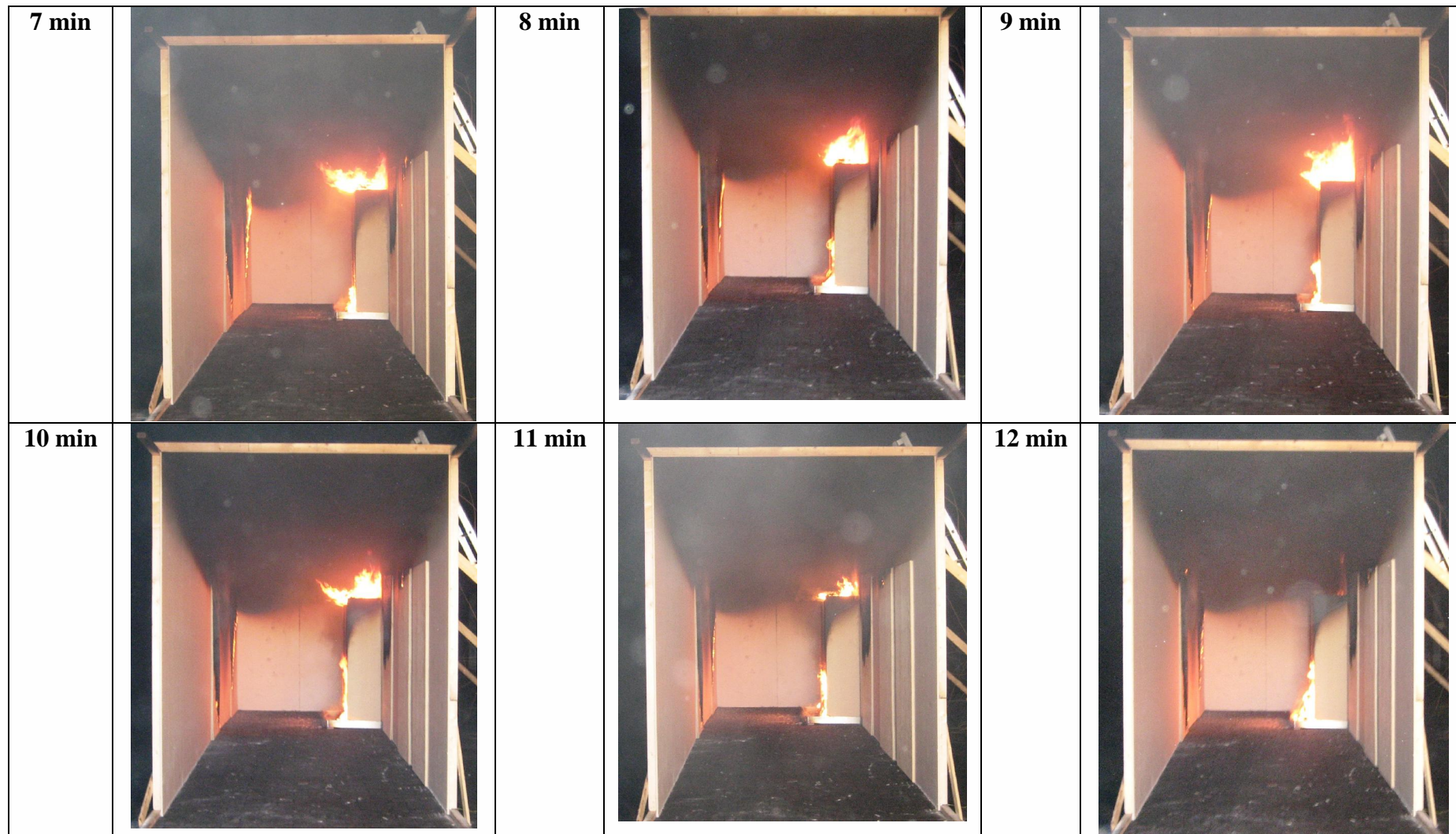
- vaatteiden palaminen, joka tapahtuu pääasiassa ensimmäisten 10 minuutin aikana ollen voimakkainta noin 3-5 minuutin kuluttua sytytyksestä
- kaappien palaminen, joka on voimakkaimmillaan noin 35-45 minuutin kuluttua sytyttämisestä.

Lämpötilan mittaustulokset esitetään kuvissa Kuva 14 ja Kuva 15.

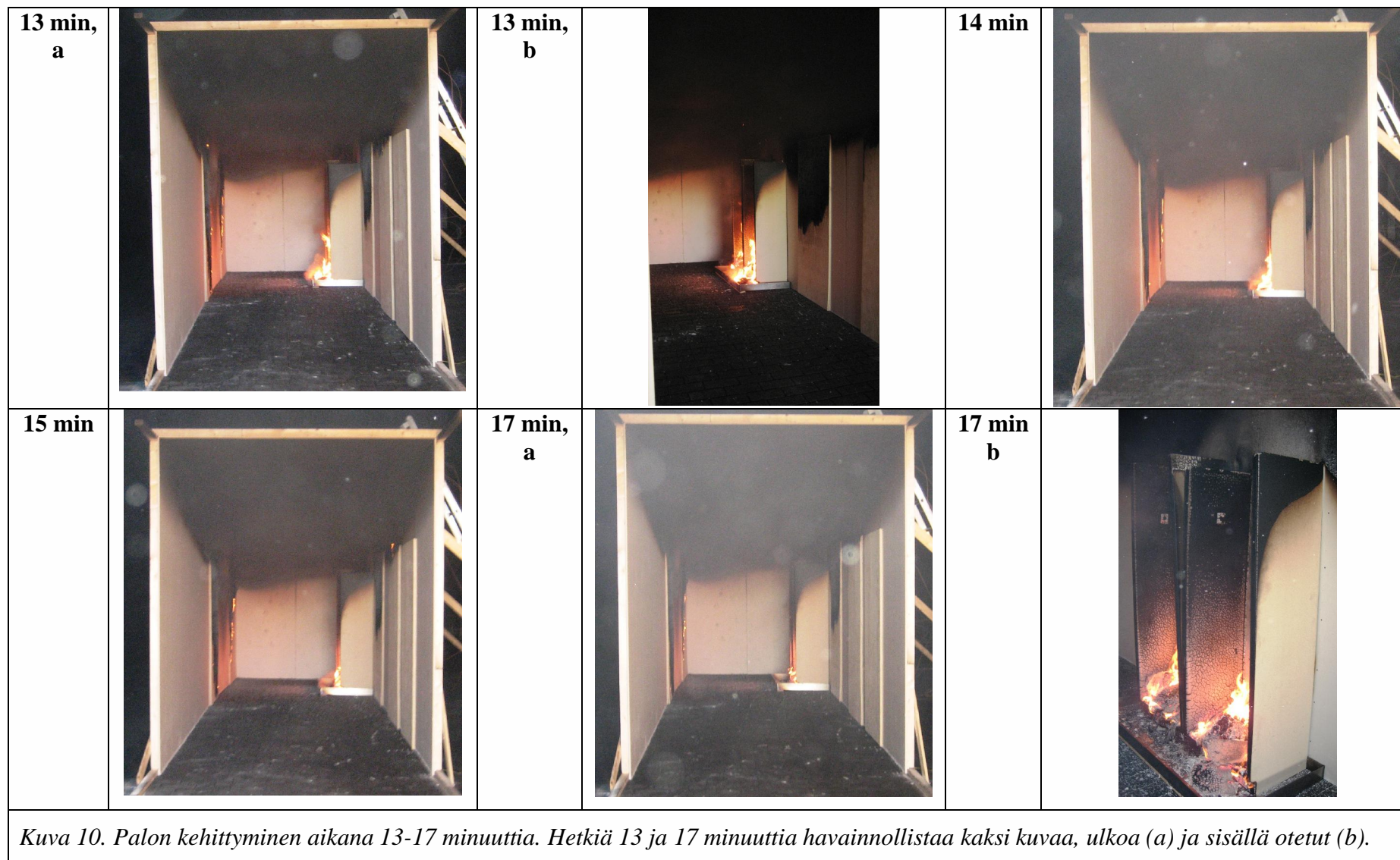


*Kuva 8. Palon kehittyminen ensimmäisen 6 minuutin aikana.*

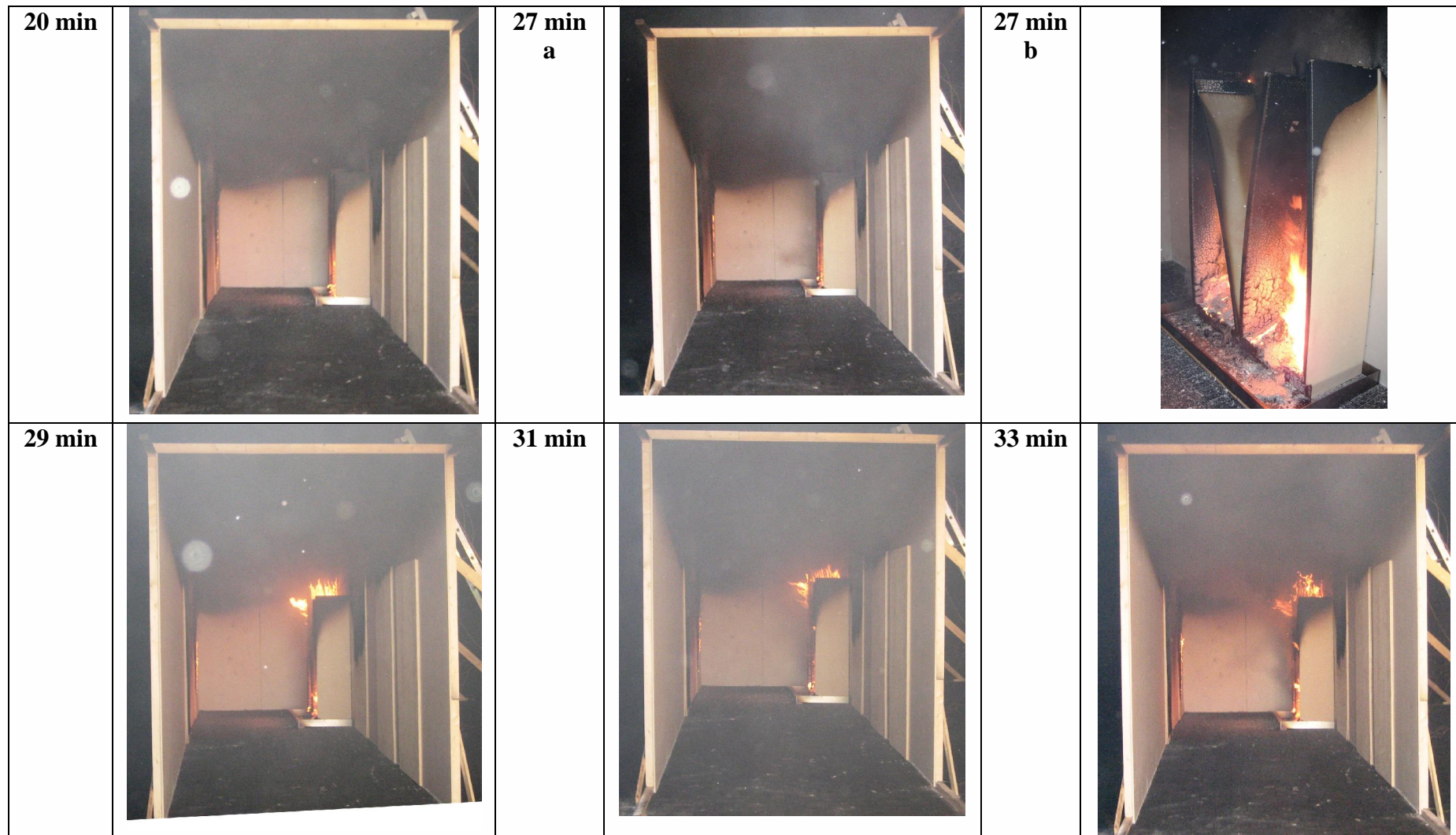




*Kuva 9. Palon kehittyminen aikana 7-12 minuuttia.*







*Kuva 11. Palon kehittyminen aikana 20-33 minuuttia. Hetkeä 27 minuuttia havainnollistaa kaksi kuvaa, ulkoa (a) ja sisällä otetut (b).*

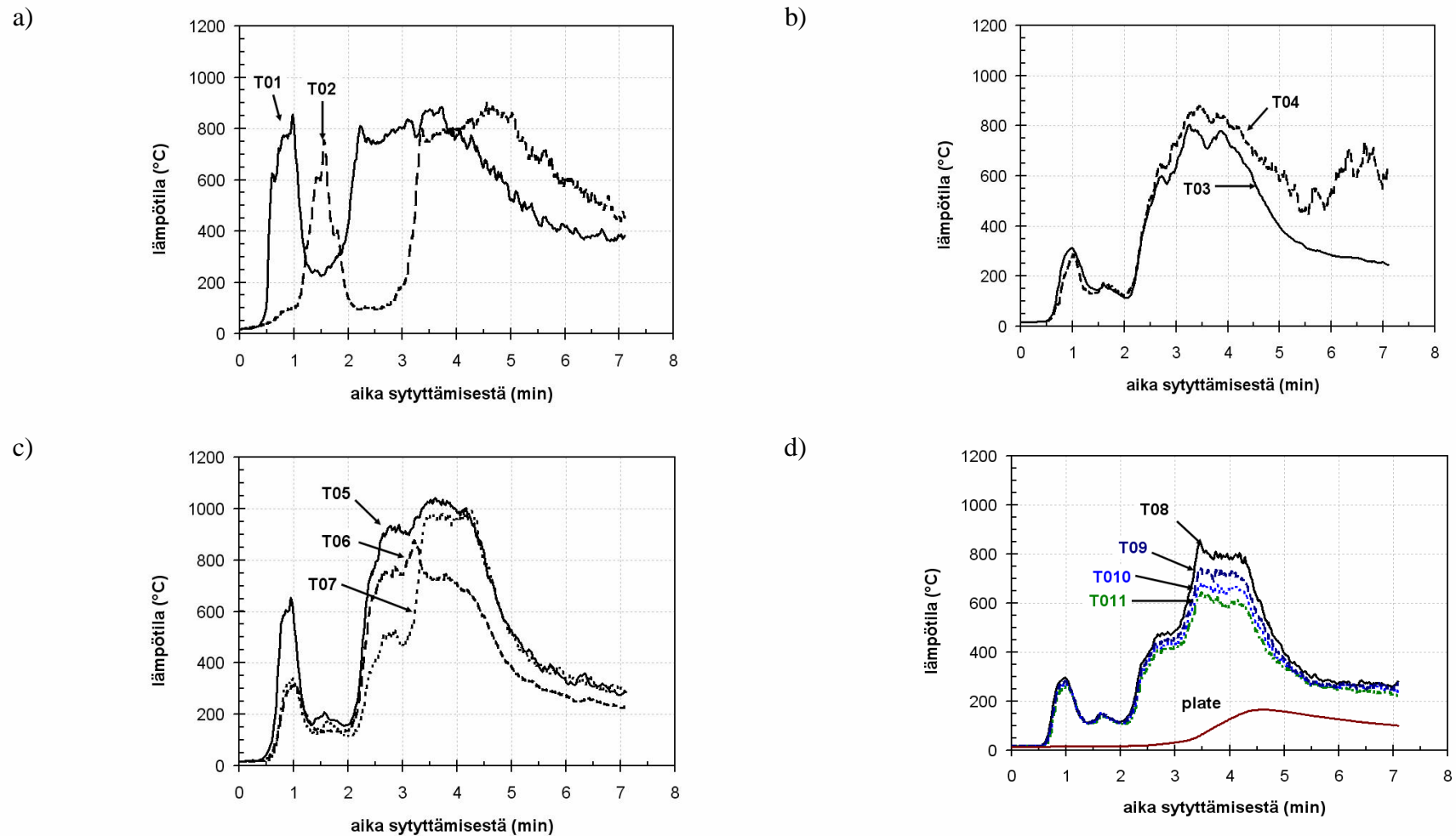


*Kuva 12. Palon kehittyminen aikana 39-45 minuuttia.*

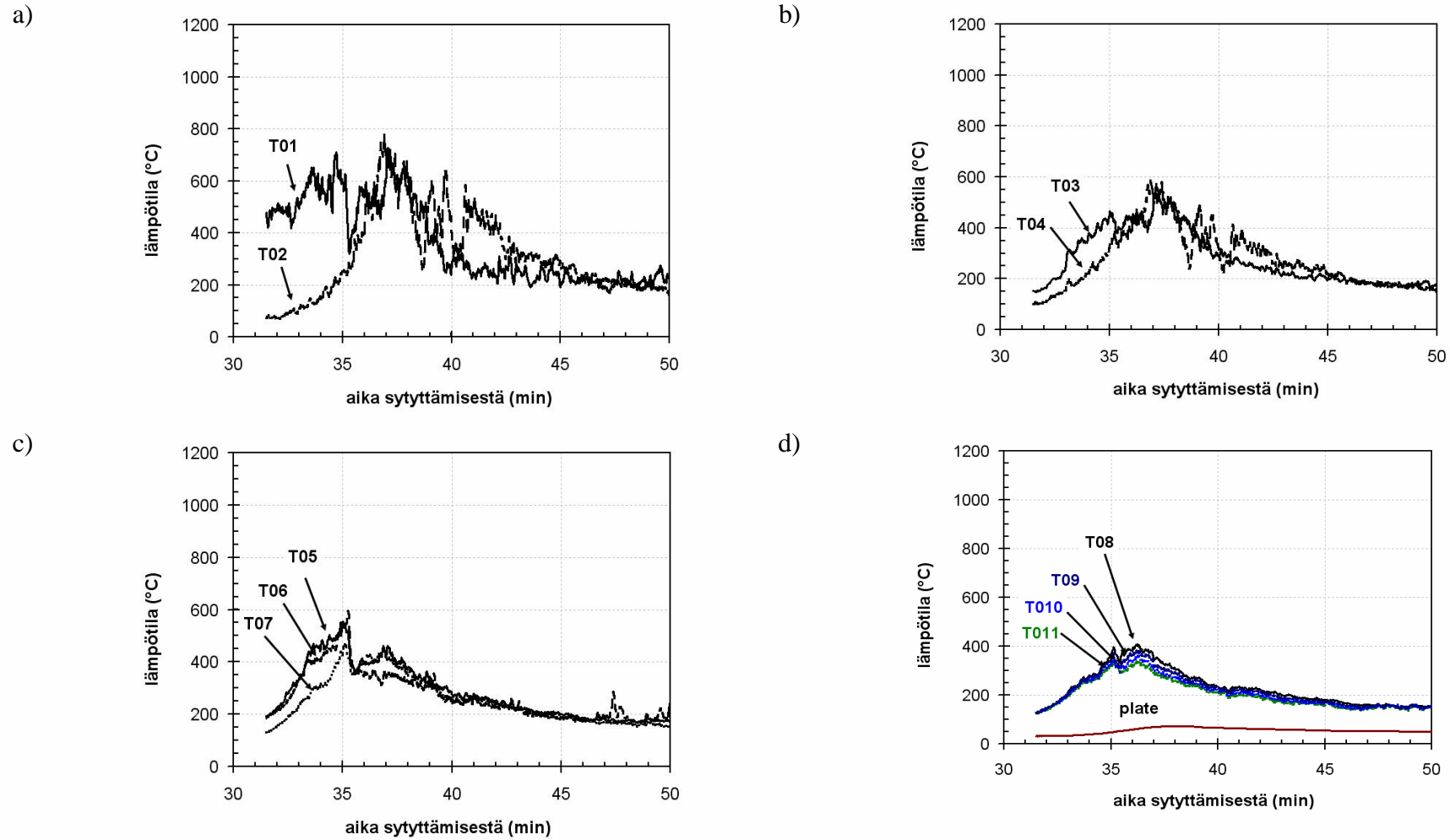








Kuva 14. Lämpötilat palon kehittymisen ensimmäisen vaiheen aikana, jolloin vaatteet palavat voimakkaasti: a) kaappien sisäpuolella, b) kaappien yläpuolella, c) käytävän keskellä kaappien lähistöllä ja d) loitompana kaapeista sekä plate-anturin lukema.



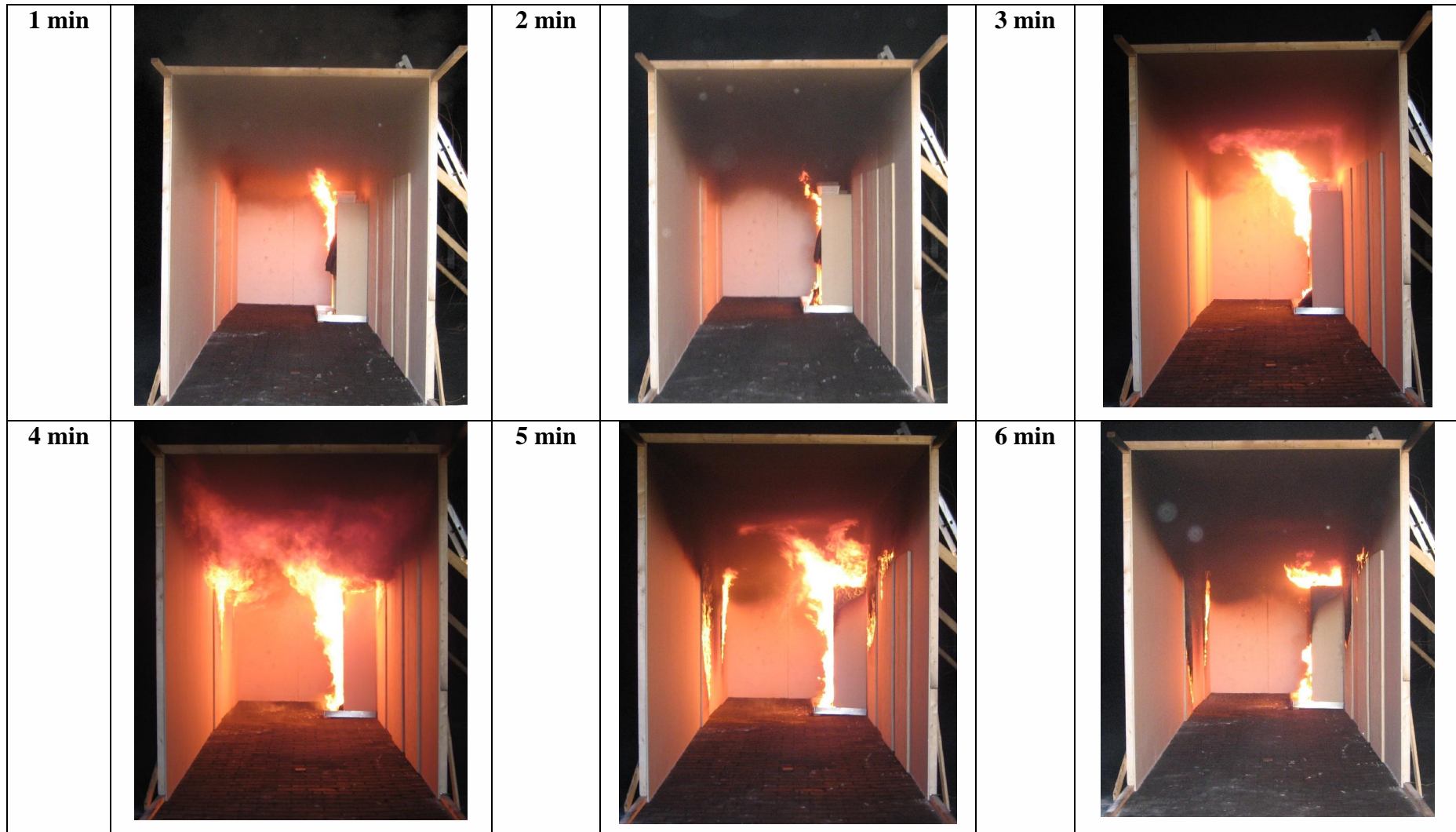
Kuva 15. Lämpötilat palon kehittymisen toisen vaiheen aikana, jolloin kaapit palavat voimakkaasti: a) kaappien sisäpuolella, b) kaappien yläpuolella, c) käytävän keskellä kaappien lähistöllä ja d) loitompana kaapeista sekä plate-anturin lukema.

## 2.5 Mittaus- ja havainnointitulokset: polttokoe 2

Kesäkuun 13.2007 järjestetyn kokeen kehittyminen esitetään alla olevilla kuvasarjoilla (Kuva 16-Kuva 21). Kuten ensimmäisessäkin kokeessa, tässäkin tapauksessa palon kehittyminen jakaantuu kahteen selvästi erilliseen vaiheeseen:

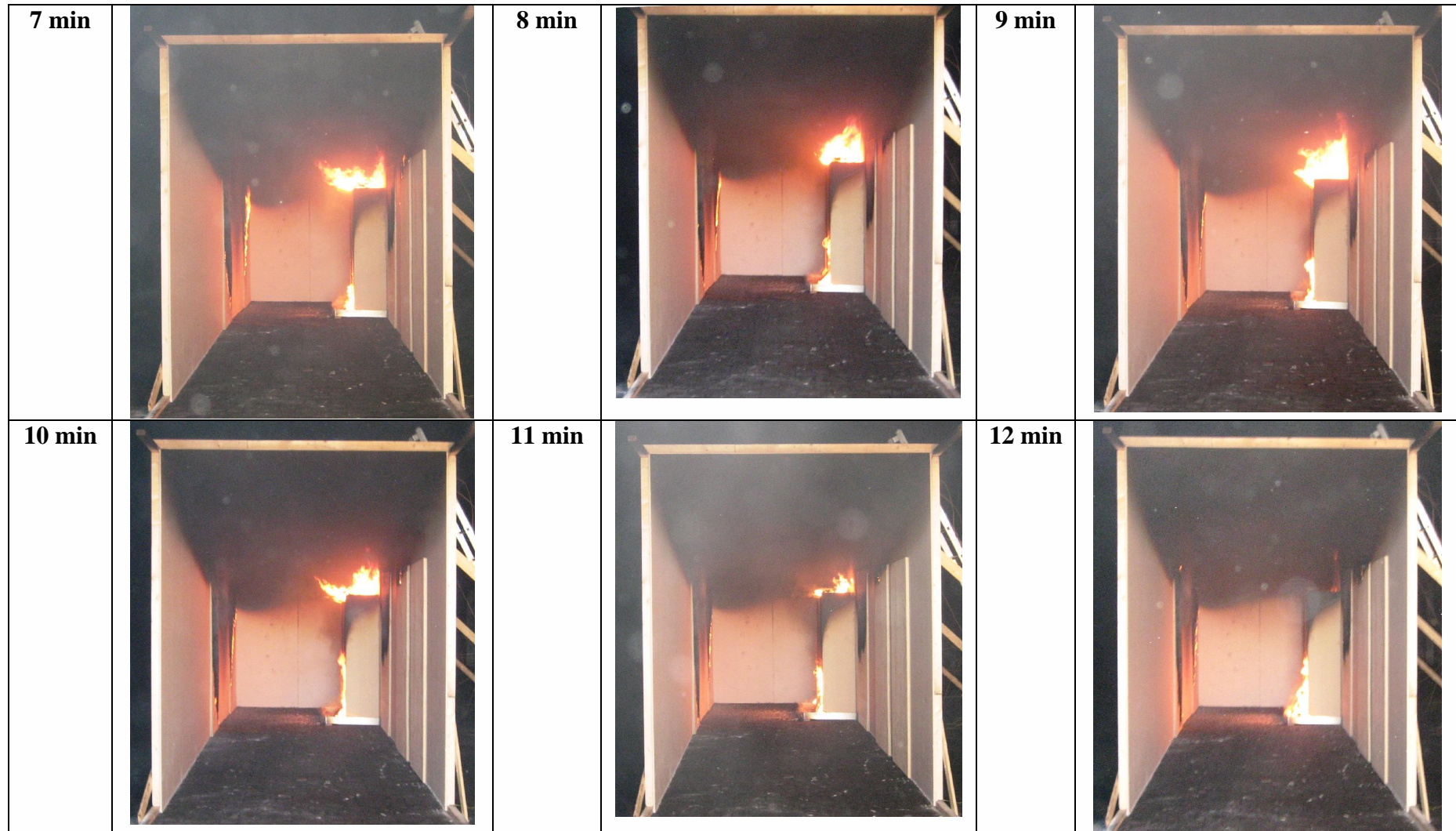
- vaatteiden palaminen, joka tapahtuu pääasiassa ensimmäisten 10 minuutin aikana ollen voimakkainta noin 3-5 minuutin kuluttua sytytyksestä
- kaappien palaminen, joka on voimakkaimmillaan noin 35-45 minuutin kuluttua sytyttämisestä.

Palonkehityksen 1. vaiheen lämpötilan mittaustulokset esitetään kuvassa Kuva 22.

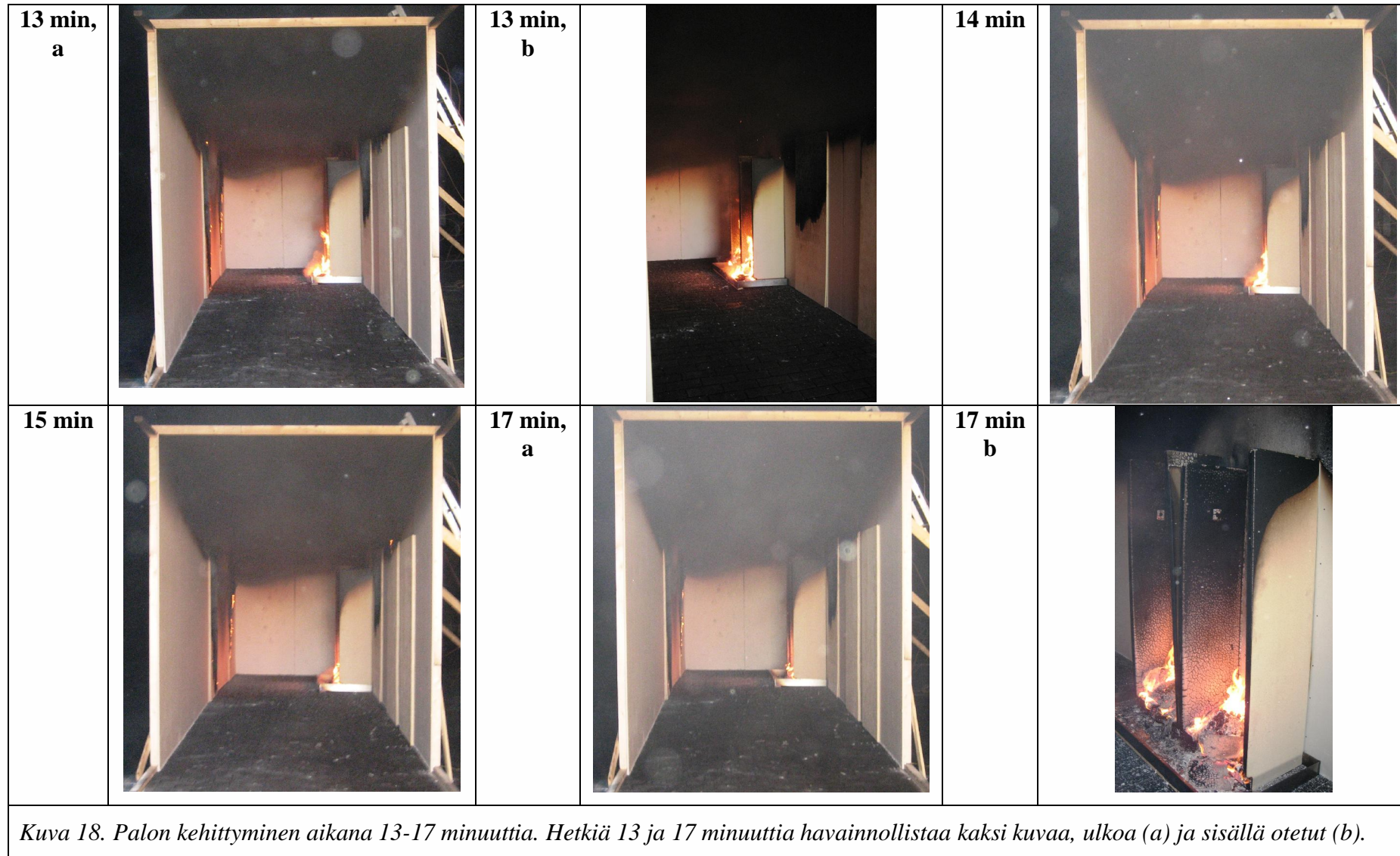


*Kuva 16. Palon kehittyminen ensimmäisen 6 minuutin aikana.*

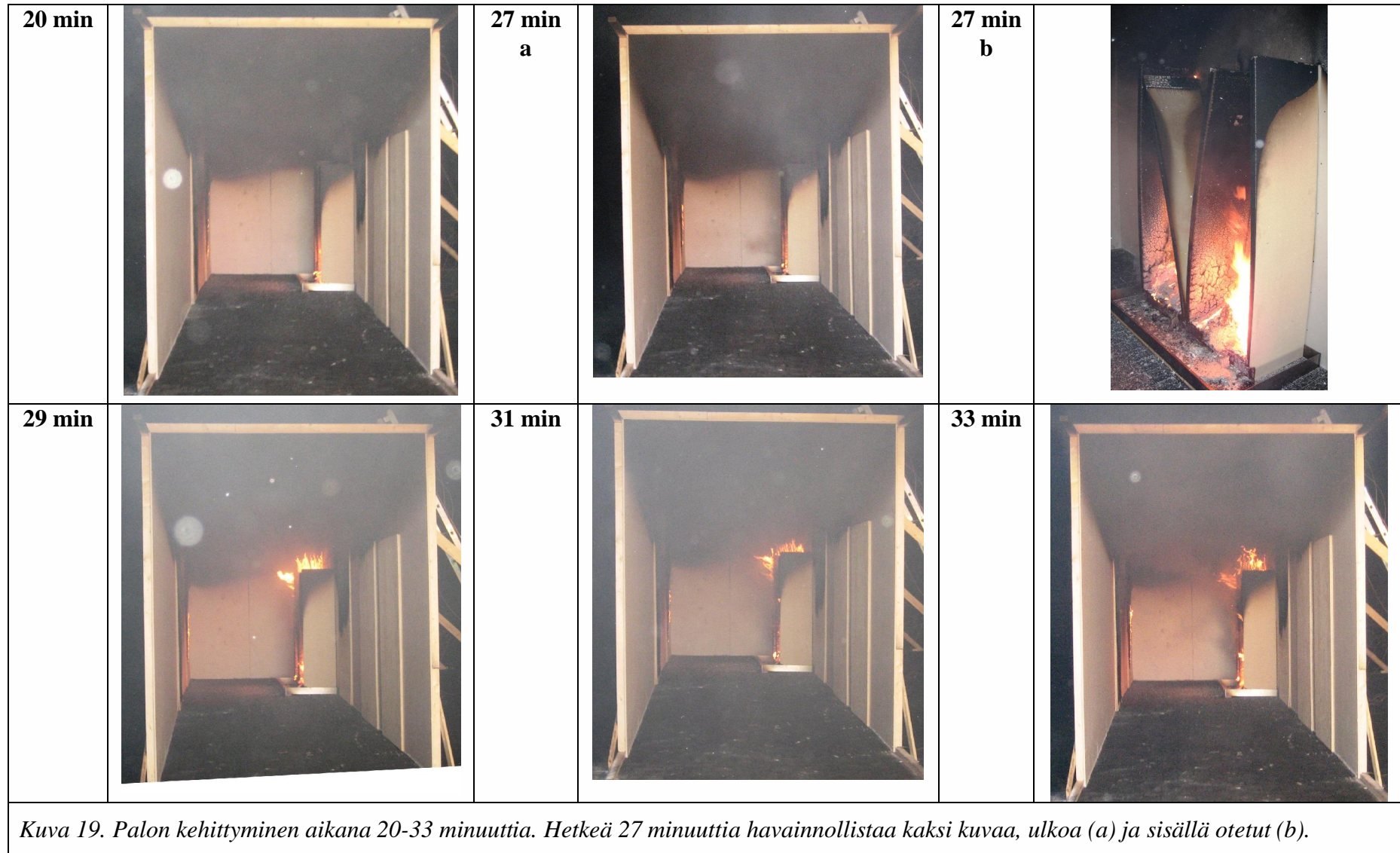




*Kuva 17. Palon kehittyminen aikana 7-12 minuuttia.*







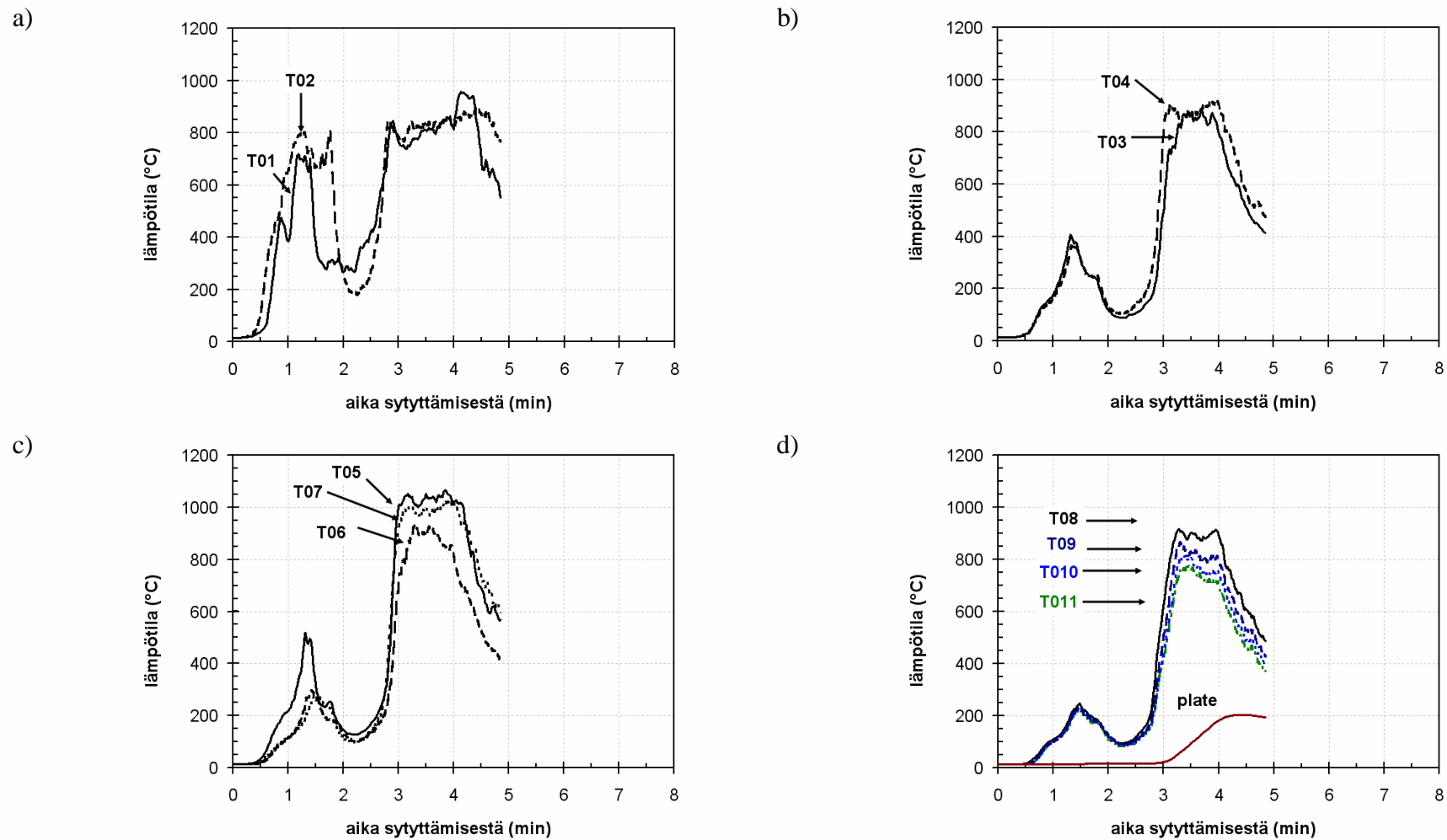


*Kuva 20. Palon kehittyminen aikana 39-45 minuuttia.*





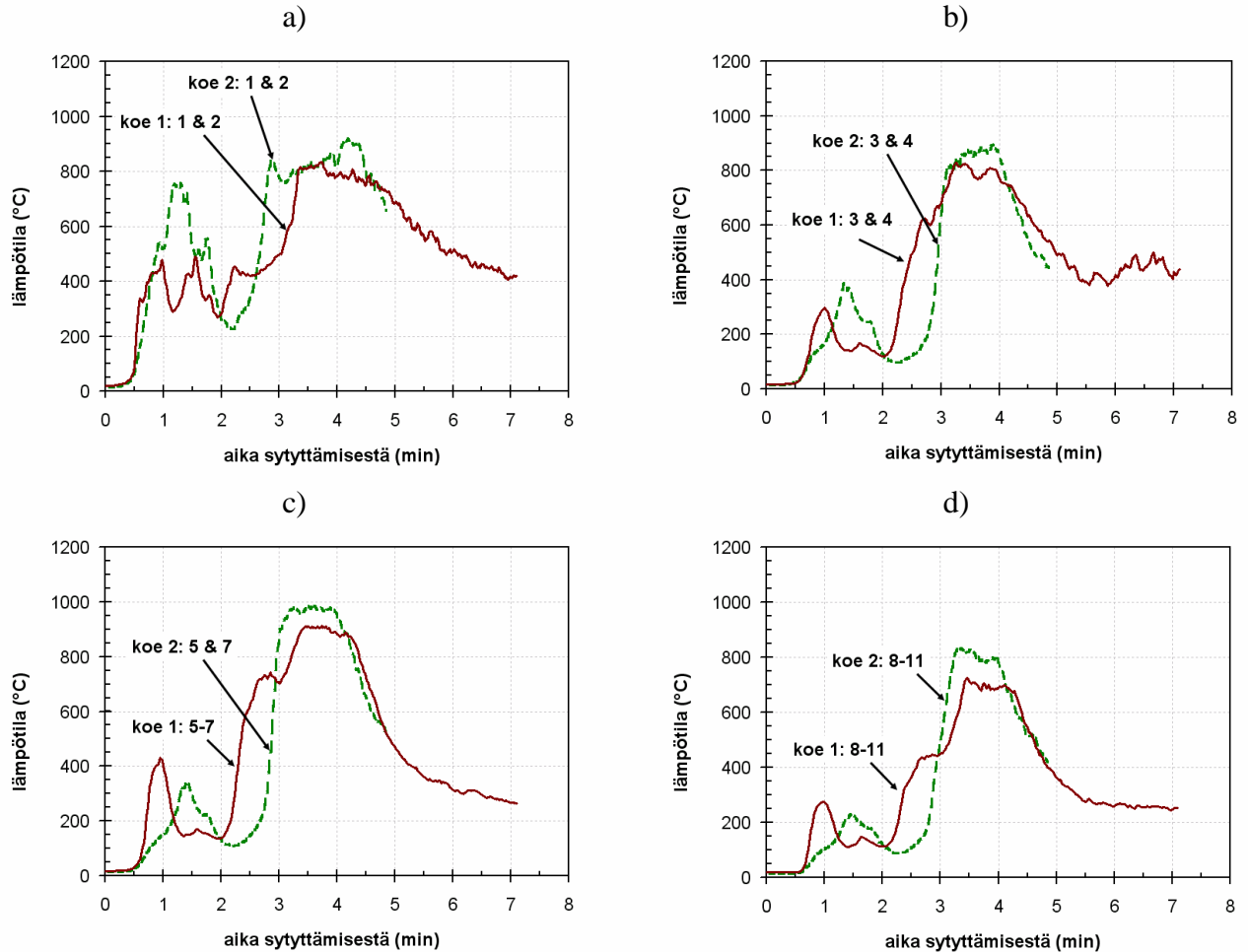
*Kuva 21. Palon kehittyminen aikana 49-56 minuuttia. Sammutus tehtiin 60 minuutin palon jälkeen.*



Kuva 22. Lämpötilat palon kehittymisen ensimmäisen vaiheen aikana, jolloin vaatteet palavat voimakkaasti: a) kaappien sisäpuolella, b) kaappien yläpuolella, c) käytävän keskellä kaappien lähistöllä ja d) loitompana kaapeista sekä plate-anturin lukema.

## 2.6 Koetulosten vertailu

Tehtyjen kokeiden tulokset ovat oleellisesti samanlaiset, kuten alla olevassa kuvassa (Kuva 23) esitetyt keskiarvoistetut lämpötilan kuvaajat osoittavat.



Kuva 23. Koetulosten vertaaminen keskiarvoistettujen lämpötilalukemien avulla: lämpötilat a) kaappien sisäpuolella, b) kaappien yläpuolella, c) käytävän keskellä kaappien lähistöllä ja d) loitompana kaapeista.

## 3 Rekonstruointikokeiden simulointi

### 3.1 FDS-palonsimulointiohjelma

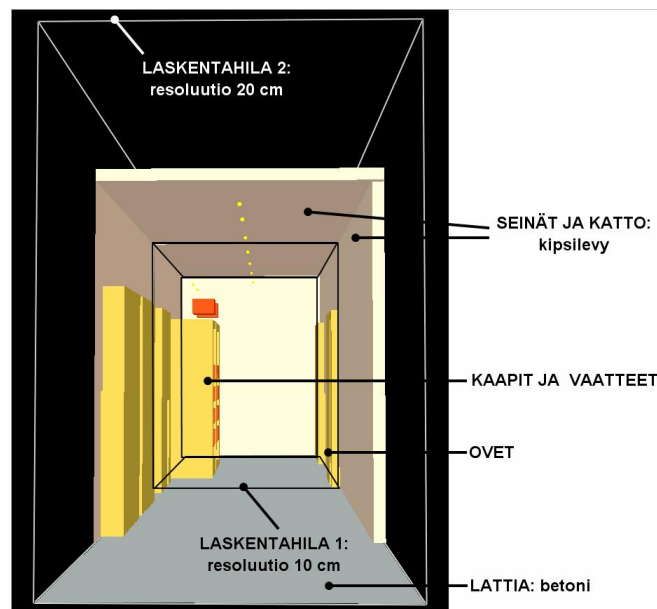
Rekonstruointikokeiden simulointiin käytettiin FDS-palonsimulointiohjelman versiota 4. FDS-ohjelman kelpoisuuden todentamiseksi on tehty paljon laskettujen tulosten ja vastaavien koetulosten vertailuja. Näitä tutkimuksia on tehty VTT:llä [4,5,6,7 liite C], NIST:ssä USA:ssa [8,9,10,11,12,13] samoin kuin muissa tutkimuslaitoksissa [14,15,16,17,18,19,20,21]. Kuten lukuisat referenssit osoittavat, FDS-ohjelma on erittäin perusteellisesti validoitu ja siksi se täyttää Suomen Rakennusmääräyskokoelman osassa E1 esitetyt laskentaohjelmille esitetyt vaatimukset.

### 3.2 Kokeiden mallinnuksen kuvaus

#### 3.2.1 Koejärjestelyiden kuvaus FDS-ohjelmalla

Koejärjestelyjen FDS-malli esitetään kuvassa Kuva 24. Laskenta-alue on jaettu kahteen alilaskentahilaan, joista alkupalon lähellä olevan hilan (laskentahila 1) paikkaresoluutio on 10 cm ja kauempana alkupalosta olevan laskentahilan (laskentahila 2) paikkaresoluutio on 20 cm.

Laskentamallin eri osien eli kaappien, ovien kuvaavien vanerilevyjen ja tilan reunojen (lattia, seinät ja katto) mitat ovat PEO:lla tehtyjen kokeiden järjestelyjen mukaiset sillä poikkeuksella, että laskentahilassa 1 mitat on pyöristetty lähimpään 10 cm:iin ja laskentahilassa 2 lähimpään 20 cm:iin. Myös lämpötila-antureiden paikat olivat samat kuin rekonsruktiokokeissa.



Kuva 24. Koejärjestelyjen FDS-malli.

Laskentamallin eri osien lämpö- ja palotekniset ominaisuudet ovat seuraavat:

- Lattia: normaalipainoinen betoni

- lämpötekniset ominaisuudet:
  - § tiheys  $2400 \text{ kg/m}^3$ ,
  - § lämmönjohtavuus: lämpötilariippuva normin EN1992-1-2 mukaisesti
  - § ominaislämpö: lämpötilariippuva normin EN1992-1-2 mukaisesti
- palotekniset ominaisuudet: materiaali ei osallistu paloon
- Seinät ja katto: kipsilevy
  - lämpötekniset ominaisuudet:
    - § tiheys:  $680 \text{ kg/m}^3$
    - § lämmönjohtavuus: lämpötilariippuva lähteen [22] mukaisesti
    - § ominaislämpö: lämpötilariippuva lähteen [22] mukaisesti
  - palotekniset ominaisuudet: materiaali ei osallistu paloon
- Ovia kuvaavat vanerilevyt:
  - lämpötekniset ominaisuudet:
    - § tiheys:  $750 \text{ kg/m}^3$
    - § lämmönjohtavuus: lämpötilariippuva normin EN1995-1-2 mukaisesti
    - § ominaislämpö: lämpötilariippuva normin EN1995-1-2 mukaisesti
  - palotekniset ominaisuudet (sovellettu FDS-ohjelman version nro. 4 hiiltyvän materiaalin pyrolyysi- ja palamismallia):
    - § hiiltyvä materiaali
    - § kosteus: 12 %
    - § syttymislämpötila:  $320 \text{ }^\circ\text{C}$
    - § lämpöarvo:  $15\,000 \text{ kJ/kg}$
    - § höyrystymislämpö<sup>1)</sup>:  $200 \text{ kJ/kg}$
    - §  $\dot{m}_{crit}''$ <sup>1)</sup>:  $0.02 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
    - §  $\dot{m}_{max}''$ <sup>1)</sup>:  $0.0065 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
    - § hiilen tiheys:  $150 \text{ kg/m}^3$
    - § hiilen lämmönjohtavuus:  $0,10 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$
    - § hiilen ominaislämpö:  $1,0 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Kaappien puumateriaali: sovellettu samoja parametriarvoja kuin vanerilevyille

### 3.2.2 Palon kehittymisen ja leviämisen mallintaminen

Palon kehittyminen ja leviäminen voidaan mallintaa FDS4-palonsimulointiohjelmassa kahdella eri tavalla:

1. Määritetään alkupalo antamalla sille tietty paikka ja sopiva sen palotehon ajallisen kehittymisen kuvaus (paloteho ajan funktiona) ja *lasketaan* palon kehittyminen tästä eteenpäin käyttäen FDS4-ohjelmaa: tätä lähestymistapaa käytettäessä alkupalon jälkeen syttyvien kohteiden syttyminen lasketaan niiden kuumentumisen, syttymisen ja syttymisen jälkeen vapautuvan palotehon avulla. Tätä lähestymistapaa käyttäen saadut tulokset esitetään kohdassa 3.3.1.
2. Kuvataan koko palon kehittyminen määrittämällä paloon osallistuville kohteille sopiva palotehon ajallinen kehittyminen. Tässä lähestymistavassa FDS-ohjelma ei laske palon leviämistä, vaan sitä käytetään pelkästään tilan kuumuuden ja savuisuuden kehittymisen arviointiin. Tätä lähestymistapaa käyttäen saadut tulokset esitetään kohdassa 3.3.2.

<sup>1</sup> FDS-ohjelman versiossa nro. 4 käytetty materiaalin syttyvyyttä ja palamisen voimakkuutta säätelevä parametri. Tässä käytetty arvo on määritetty koetulosten perusteella.

Tapa 1 on monimutkaisempi, koska siinä tulee pystyä määrittämään alkupaloon jälkeen syttyvien kohteiden lämpö- ja palotekniset ominaisuudet siten, että ne kuvaavat palon kehittymistä ja leviämistä ”oikein”, so., riittävän realistisella tavalla. Edellä kohdassa 2.1 esitetyt parametriarvot perustuvat VTT:llä ja muissa tutkimuslaitoksissa vuosien mittaan kertyneeseen kokemukseen ja ne toteuttavat tämän realistisuusvaatimuksen, kuten alla olevista koetulosten ja laskettujen tulosten vertaamisesta voidaan havaita.

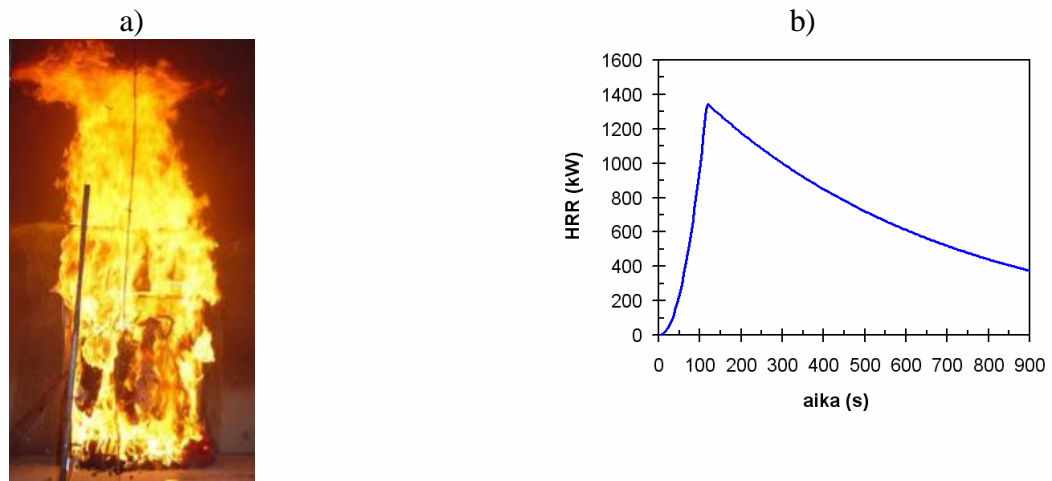
Tapa 2 on yksinkertaisempi, koska siinä riittää antaa palonsimulointiohjelmalle sellainen palotehosyöte, että lasketut tulokset vastaavat mitattuja. Sen käyttöä rajoittaa kuitenkin se, että pitää olla olemassa jotain koeaineistoa, jolla palotehon realistisuus voidaan varmentaa. Tässä tutkimuksessahan tällaista koeaineistoa on olemassa: syötepaloteho voidaan säätää sellaiseksi, että lasketut lämpötilat vastaavat PEO:lla tehdyissä kokeissa määritettyjä lämpötiloja.

Jos tarkasteltaisiin pelkästään Pitkäniemessä tapahtunutta palotapausta, jossa kohde ei ollut sprinklattu, palon mallintaminen voitaisiin tehdä käyttäen tapaa 2. Sprinklerijärjestelmän vaikutuksen arviointi on kuitenkin keskeinen asia tätä tutkimusta ja sen mallintamisessa tarvitaan lähestymistapaa 1: koska tässä lähestymistavassa FDS-ohjelma laskee palon kehittymisen ja leviämisen järjestelmän lämmönsiirron, geometrian ja materiaaliominaisuuksien perusteella, voidaan tähän mallin lisätä FDS-ohjelman sisältämät virtuaaliset sprinklerit ja ohjelma laskee, miten sprinklereiden antama vesi hillitsee palamista, lämmönsiirtoa ja pintojen kuumenemistä. Sprinklerijärjestelmän vaikutusta voidaan arvioida myös käyttäen lähestymistapaa 2, mutta tällöin laskenta ottaa huomioon vain sen, miten sprinklereistä tuleva vesi jäädyttää palotilan kaasuja; palotehon pienenemistä ei tässä lähestymistavassa voida laskea, vaan siihen on käytettävä empiirisiä malleja siitä, miten tietyn vesivuon tuottava sprinkleripää alentaa palamisen voimakkuutta. Nämä empiiriset mallit vastaavat jotain koejärjestelyä, joka luonnollisesti poikkeaa enemmän tai vähemmän tarkasteltavasta tilanteesta ja siksi niiden tarkkuus on varsin karkea; lisäksi eri tutkijoiden esittämät mallit voivat poiketa toisistaan verraten paljonkin (tilanteesta riippuen).

### 3.2.2.1 Alkupalon kuvaus

Siinä palon kehittymisen ja leviämisen kuvaamisen lähestymistavassa, jossa kuvataan vain alkupalo ja annetaan FDS-ohjelman laskea palon kehittyminen ja leviäminen (tapa 1) käytetty alkupalon kuvaus perustuu Hadjisophocleousen ja Zalokin tekemästä noin 10 takin naulakon ja naulakon päällä olevan sekalaisen tekstiilipalokuorman polttokokeesta saatuun koeaineistoon (Kuva 25).





Kuva 25. Hadjisophocleousen ja Zalokin tekemän noin 10 takin naulakon ja naulakon päällä olevan sekalaisen tekstiilipalokuorman polttokoe [23]: a) kuva hetkellä, jolloin palo on voimakkaimmillaan ja b) palotehon ajallinen kehittyminen.

### 3.3 Kokeiden mallinnuksen tulokset

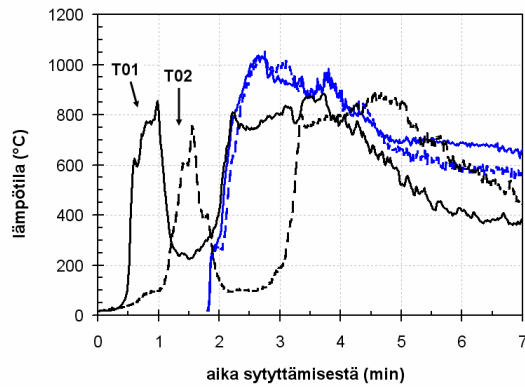
#### 3.3.1 Palosimulointiohjelmalla laskettu palonkehitys: lämpötilat ja paloteho

FDS4-ohjelman laskeman palonkehityksen antamat lämpötilat ja paloteho esitetään kuvissa Kuva 26 (lämpötilat) ja Kuva 27 (paloteho). Kuvassa Kuva 26 esitetään myös rekonstruktiokokeessa 1 mitatut lämpötilat: yhteensopivuus laskettujen ja mitattujen lämpötilakehitysten välillä on hyvä lukuun ottamatta palon syttymisvaihetta. Tämä poikkeama johtuu FDS-ohjelman perusominaisuuksista: FDS-ohjelma perustuu tulipalossa olevien turbulenttien virtausten mallintamiseen käyttäen ns. suurten pyörteiden mallia (Large-Eddy Simulation, LES). Siksi FDS-ohjelmaan annettavan alkupalon on oltava riittävän suuri, että LES-mallin perusedellytykset toteutuvat. Tässä raportissa kuvattavassa tapauksessa tämä merkitsee erityisesti sitä, että alkupalona ei voida käyttää tulitikun liekkiä tai edes muutaman vaateen syttymistä vastaavaa paloa, vaan alkupalona on käytettävä useiden vaatteiden vakiintunutta syttymää. Siksi tässä mallintamistavassa paloteho ja lämpötilat alkavat kasvaa vasta, kun palo on kehittynyt riittävän voimakkaaksi: palon alkuvaihe jätetään yksinkertaisesti mallintamatta.

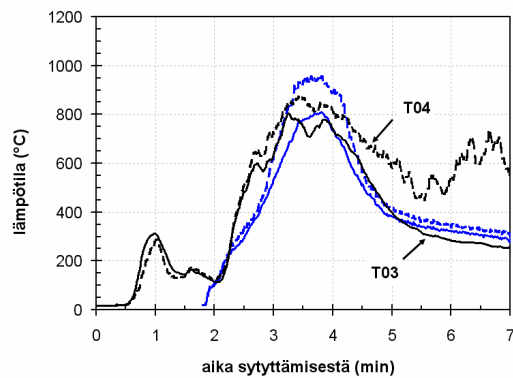
Havaitaan, että paloteho nousee 4 MW:n tasolle, mikä on selvästi suurempi kuin kuvassa Kuva 25b esitetty koetulos. Tämä johtuu siitä, että

1. kaapit syttyvät ja tuottavat palaessaan lisää palotehoa
2. kaappien sisällä tapahtuu paikallinen liekahdus eli ilmiö, jossa paloa lähellä olevista pinnoista tuleva lämpösäteily (säteilyn heijastumisen ja pintojen palamisen yhteisvaikutuksena syntyvä säteilevä lämpövuoto) kiihdyttää kaappien sisällä olevien vaatteiden palamista.

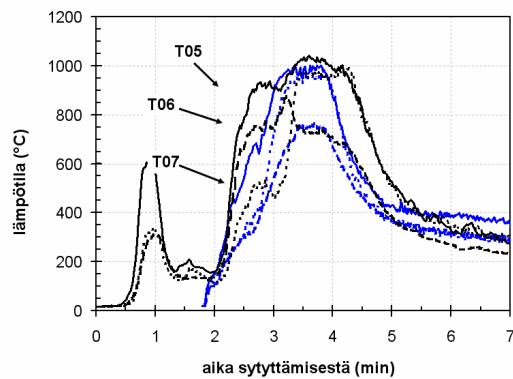
a)



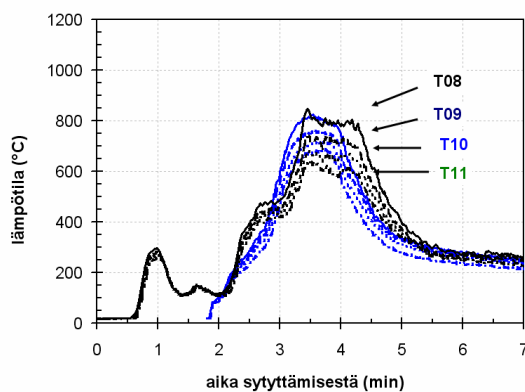
b)



c)

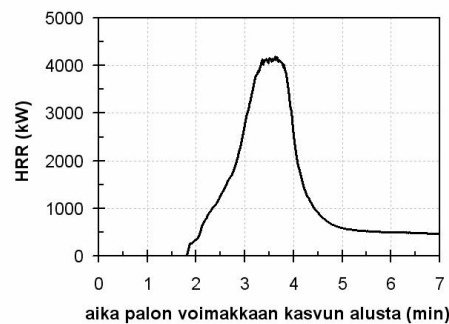


d)



Kuva 26. Mitatut (mustat käyrät) ja simuloitut (siniset käyrät) lämpötilat: a) lämpötila-anturit T1 ja T2, b) T3 ja T4, c) T5, T6 ja T7 sekä d) T8-T11.





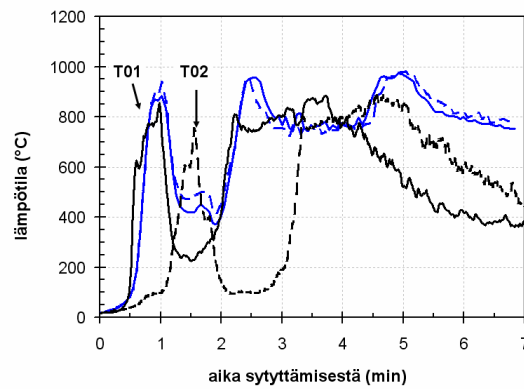
Kuva 27. FDS-ohjelman tuloksena antama palotehon ajallinen kehittyminen.

### 3.3.2 Koetulosten perusteella määritetty palonkehitys: lämpötilat ja paloteho

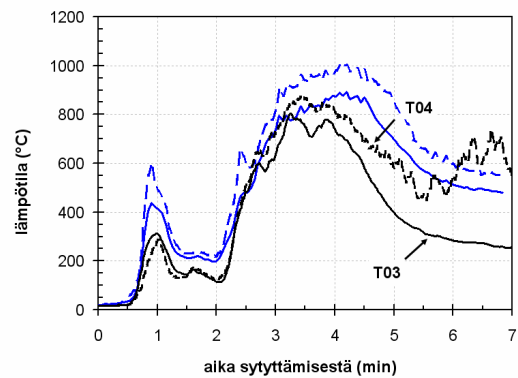
Kun tässä tutkimuksessa on saatavilla lämpötilan mittaustietoja, voidaan käyttää myös palon mallintamistapaa, jossa koko palon ajallinen kehitys annetaan syötteenä FDS4-ohjelmalle (tapa 2). Tässä lähestymistavassa siis säädetään palotehosyöte siten, että FDS-ohjelman laskemat lämpötilat vastaavat riittävän hyvin mitattuja lämpötiloja. Tulokset esitetään kuvissa Kuva 28 (lämpötilat) ja Kuva 29 (paloteho). Kuvassa Kuva 28 esitetään myös rekonstruktiokeksessä 1 mitatut lämpötilat: hyvä yhteensopivuus laskettujen ja mitattujen lämpötilakehitysten välillä on hyvä, mikä johtuu siitä, että paloteho on säädetty siten, että saavutetaan riittävän hyvä yhteensopivuus.

Havaitaan, että tässäkin tapauksessa paloteho nousee 4 MW:n tasolle, mikä on sopusoinnussa kohdassa 3.3.1 esitettyjen tulosten kanssa.

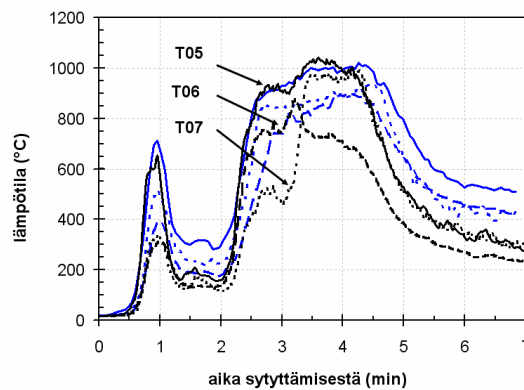
a)



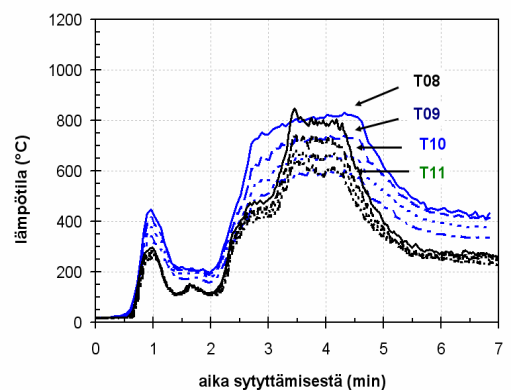
b)



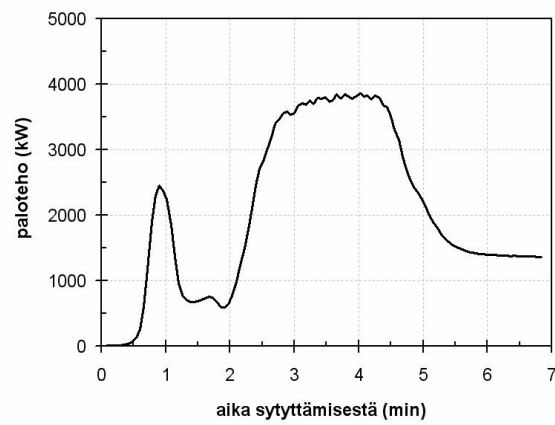
c)



d)



Kuva 28. Mitatut (mustat käyrät) ja simuloitut (siniset käyrät) lämpötilat: a) lämpötila-anturit T1 ja T2, b) T3 ja T4, c) T5, T6 ja T7 sekä d) T8-T11.



*Kuva 29. Lämpötilamittausten perusteella määritetty palotehon ajallinen kehittyminen.*

## 4 Simulointituloksia siitä, miten sprinklaus olisi vaikuttanut rekonstruktiokeiden palonkehittymiseen

Eräs mallintamisen hyöty on, että laaditulla mallilla voidaan suhteellisen helposti tarkastella eri tekijöiden vaikutusta (voidaan etsiä vastauksia ”mitäs, jos?” - tyyppisiin kysymyksiin). Tässä kohdassa tarkastellaan, miten palo olisi kehittynyt rekonstruktiokeissa, jos koejärjestelyyn olisi asennettu sprinklereitä.

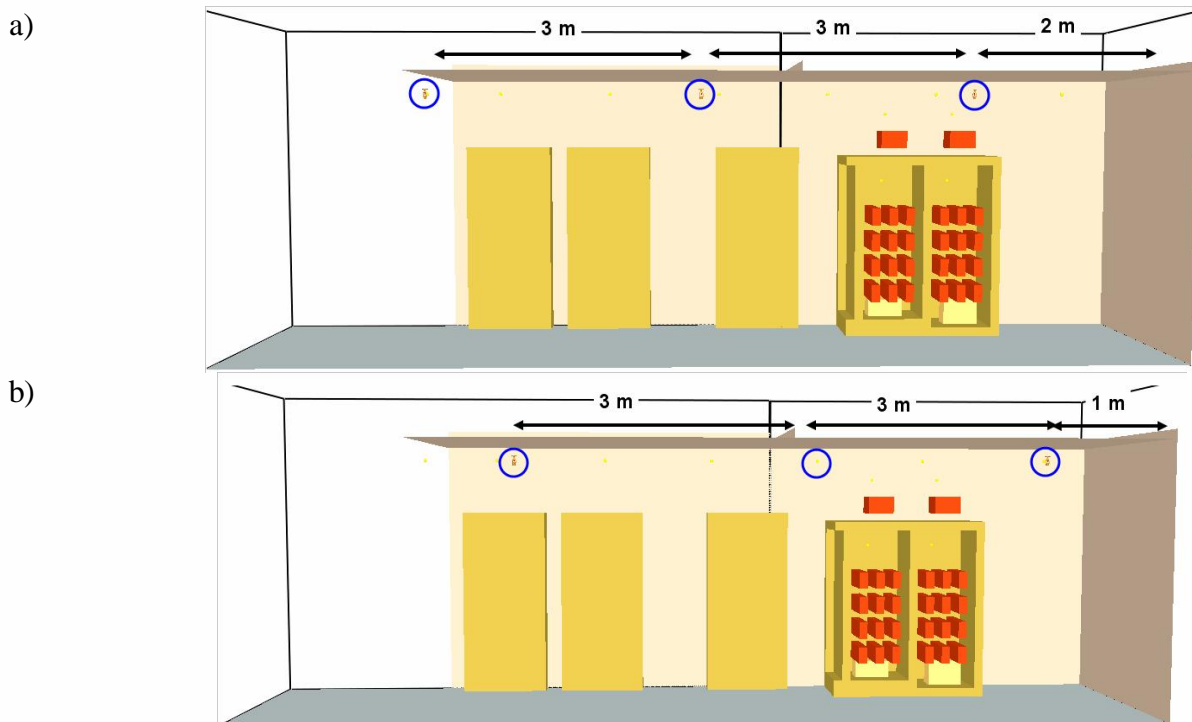
### 4.1 Laskennassa käytetyn sprinklerisysteemin kuvaus

Laskennassa käytetyt sprinklerisysteemiä kuvaavat suureet ovat

- vesivuo 5 mm/min,
- suojausala/sprinkleripää n. 9 m<sup>2</sup>,
- aktivoitumislämpötila  $T_{act} = 68$  °C,
- vasteaikaindeksi  $RTI = 100$  m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup>.

Sprinklereiden laukeamisaikaa arvioitaessa näiden muuttujien annettiin vaihdella niille tyypillisissä rajoissa<sup>2</sup>, jotta saatiin selville sprinklereiden toiminta-ajan arvioon liittyvä epävarmuus.

Sprinkleripäiden sijoittelun suhteen tarkasteltiin kahta vaihtoehtoa, jota esitetään kuvissa Kuva 30a ja Kuva 30b.



Kuva 30. Tarkastellut sprinkleripäiden paikat: a) sijoitustapa 1 ja b) sijoitustapa 2.

<sup>2</sup>  $RTI = 100, \dots, 200$  m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup> (tasajakauma);  $T_{act} = 58, \dots, 68$  °C (tasajakauma),  $H = 3$  m (tilan korkeus, vakioarvo); etäisyys palon ja lähimmän sprinkleripään välillä  $r = 0, \dots, r_{max}$ , missä  $r_{max}$  on sprinklereiden suojausalan määräämällä palon suurin mahdollinen etäisyys sprinkleripäästä.

## 4.2 Sprinklereiden toiminta-aika

Sprinklereiden toiminta-aika lasketaan lämpöön reagoivan laitteen lämpenemistä kuvata yhtälöllä

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{\tau} (T_g(t) - T_d) \quad (1)$$

missä  $T_d$  on lämpöön reagoivan elimen lämpötila [°C],  $T_g$  on palon synnyttämän kuuman kaasun lämpötila [°C] ja  $\tau$  aikavakio [s]

$$\tau = \frac{RTI}{\sqrt{u(t)}}, \quad (2)$$

missä RTI on laitteen RTI-indeksin arvo. Lämpötila  $T_g$  ja virtausnopeus  $u$  lasketaan Alpertin [24] esittämällä kaavoilla

$$T_g - T_\infty = \frac{16,9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad \text{kun } r < 0,18H, \quad (3)$$

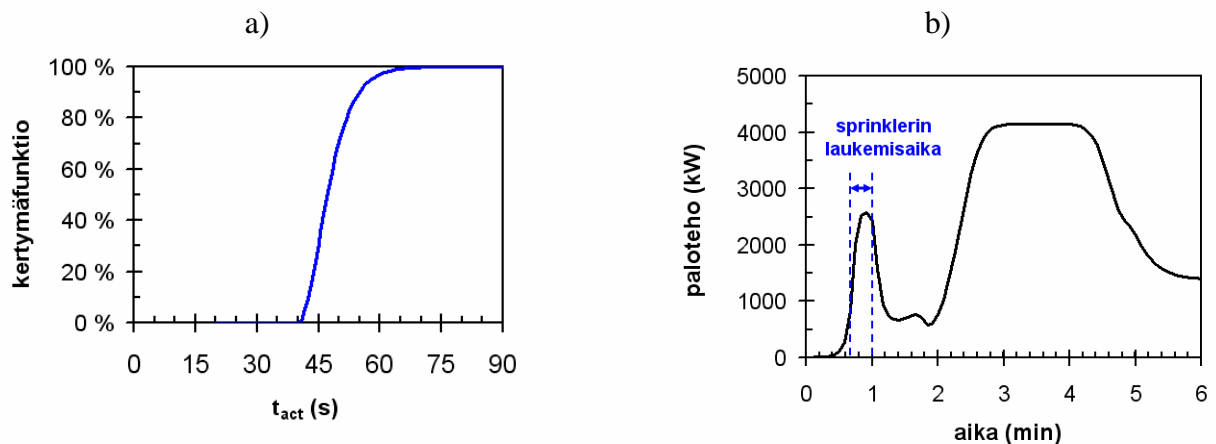
$$T_g - T_\infty = \frac{5,38 \cdot (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H}, \quad \text{kun } r \geq 0,18H, \quad (4)$$

$$u = 0,96 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{H}\right)^{1/3}, \quad \text{kun } r < 0,15H, \quad (5)$$

$$u = \frac{0,195 \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot H^{1/2}}{r^{5/6}}, \quad \text{kun } r \geq 0,15H, \quad (6)$$

missä  $T_\infty$  (°C) on ympäristön lämpötila,  $\dot{Q}$  on paloteho (kW),  $H$  (m) on korkeus palolähteestä kattoon ja  $r$  (m) on sprinkleripään vaakasuuntainen etäisyys palopatsaan akselilta.

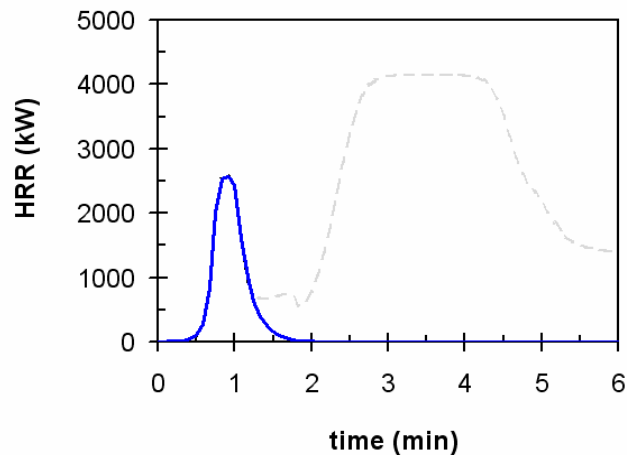
Sprinkleri laukeaa, kun sen lämpötila saavuttaa järjestelmän ominaisuuksista riippuvan lämpötilan  $T_{act}$ . Tuloksena saadaan kuvassa Kuva 31a esitetty sprinklerin toiminta-aika, jonka vaihtelevuuden 95 %:n varmuusväli on noin 40-60 sekuntia. Jatkossa eritettävissä simuloinneissa käytetään arvoa 60 s. Kun toiminta-aikaa verrataan palotehon ajalliseen kehittymiseen (Kuva 31b), havaitaan, että sprinklerit laukeaisivat jo alkupalon aikana, ennen kuin kaappi ja sen vaatteet saavuttavat täyden palamisen vaiheen.



Kuva 31. a) Sprinklereiden toiminta-ajan jakauma ja b) toiminta-ajan vertaaminen palotehon ajalliseen kehittymiseen.

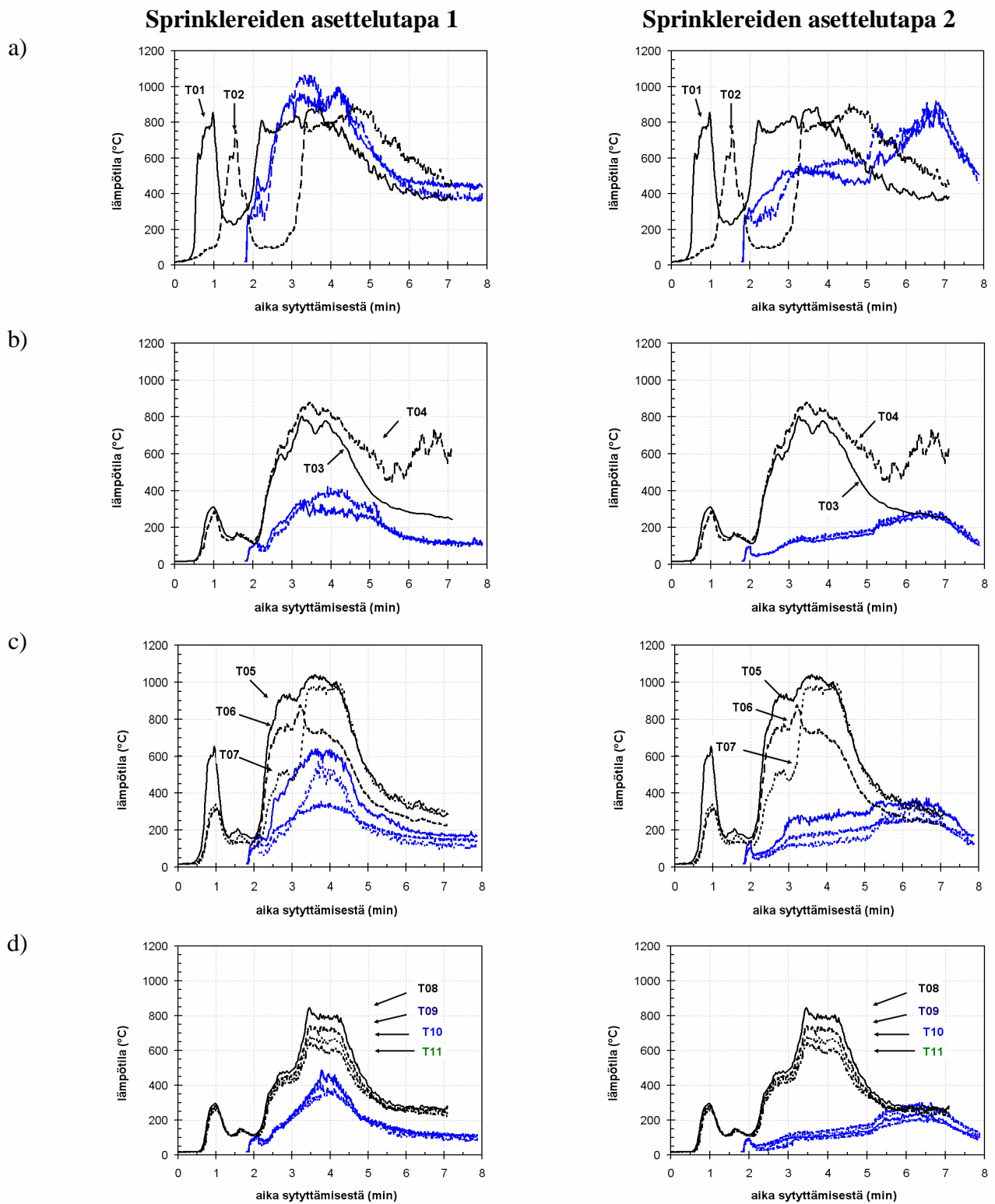
### 4.3 Sprinklerin todennäköisin vaikutus kokeissa: sammuttaminen

Kuten edellä havaittiin (Kuva 31b), sprinklerit laukeaisivat jo palon alkuvaiheessa hetkellä, jolloin saavuttaa ensimmäisen huippunsa ja kääntyy laskuun. Kokeessa alkupalo hiipui noin 500 kW:n tasolle, minkä jälkeen palo alkoi taas kasvaa kaapin ja vaatteiden täyden palamisen vaihetta kohti. Sprinklereiden toimiessa on varsin luultavaa, että ne olisivat saaneet palon sammumaan alkupalon hiivuttua pienimmilleen eikä siis kaapin ja vaatteiden täyden palon vaihetta olisi tapahtunut. Alla oleva kuva havainnollistaa tätä sprinklereiden todennäköisintä vaikutusta palon kehittymiseen rekonstruktiokekeissa.

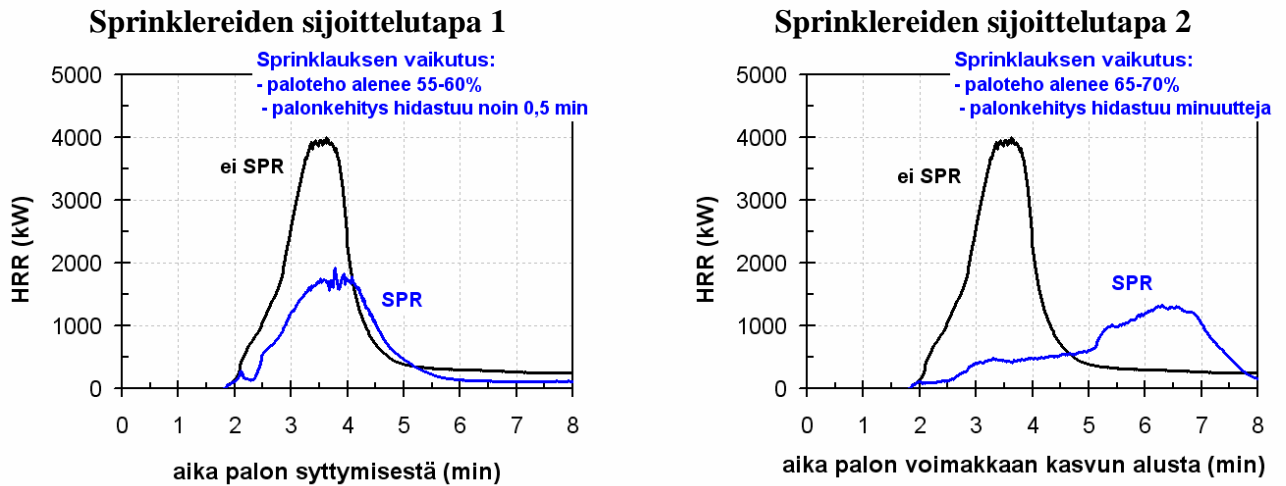


Kuva 32. Asiantuntija-arvioon perustuva näkemys sprinklerin todennäköisestä vaikutuksesta rekonstruktiokekeissa: palon sammuttaminen alkupalon hiipumisen jälkeen (sininen yhtenäinen käyrä).

### 4.4 Palon kehittymisen mallintamistapa 1: FDS-ohjelmalla laskettu sprinklauksen vaikutus palotehon kehittymiseen



Kuva 33. Mitatut (mustat käyrät) ja FDS-ohjelmalla simuloitut sprinklauksen vaikutuksen huomioon ottavat (siniset käyrät) lämpötilat: a) lämpötila-anturit T1 ja T2, b) T3 ja T4, c) T5, T6 ja T7 sekä d) T8-T11.



Kuva 34. FDS-ohjelman tuloksena antama palotehon ajallinen kehittyminen.

#### 4.4.1 Palon kehittymisen mallintamistapa 2: empiiristen mallien soveltaminen sprinklauksen palotehoa alentavan vaikutuksen arviointiin

Kokeellisten tulosten<sup>3</sup> mukaan sprinkeleiden vaikutuksesta paloteho yleensä kääntyy laskuun siten, että paloteho alenee eksponentiaalisesti

$$\dot{Q}_{SPR}(t) = \dot{Q}(t_p) \cdot \exp(-k \cdot (t - t_p)), \quad (7)$$

missä  $t_p$  on sprinklereiden laukeamishetki ja vakio  $k$  riippuu vesivuosta  $\dot{m}''$  ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Evansin [25], Haminsin & McGrattanin [26] ja Yun ym. [27] kokeellisista tuloksista voidaan analysoida seuraavat mallit palotehon hiipumisvakion  $k$  laskemiselle:

$$\text{Evans: } \frac{k}{\text{s}^{-1}} = 0,33 \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}} \right)^{1,85}, \quad (8)$$

$$\text{Hamins \& McGrattan: } \frac{k}{\text{s}^{-1}} = 0,19(6) \cdot \frac{\dot{m}''}{\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}} - 0,0007(66), \quad (9)$$

$$\text{Yu ym. } \frac{k}{\text{s}^{-1}} = 0,18 \cdot \frac{\dot{m}''}{\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}} - 0,01. \quad (10)$$

Tässä työssä näitä malleja sovelletaan siten, että vaimennustekijä muuttaa palotehon ajallista kehitystä eli paloteho sprinklatussa tapauksessa on

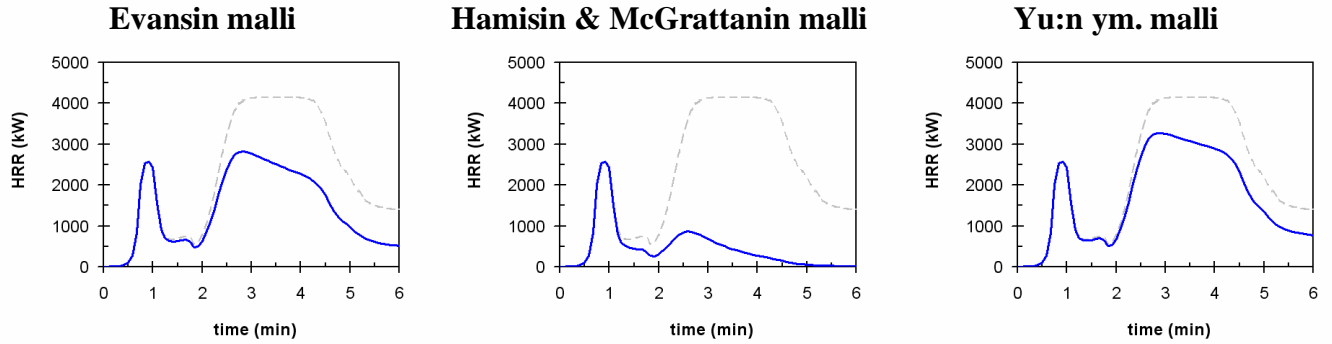
<sup>3</sup> Joita valitettavasti on julkaistu varsin vähän.



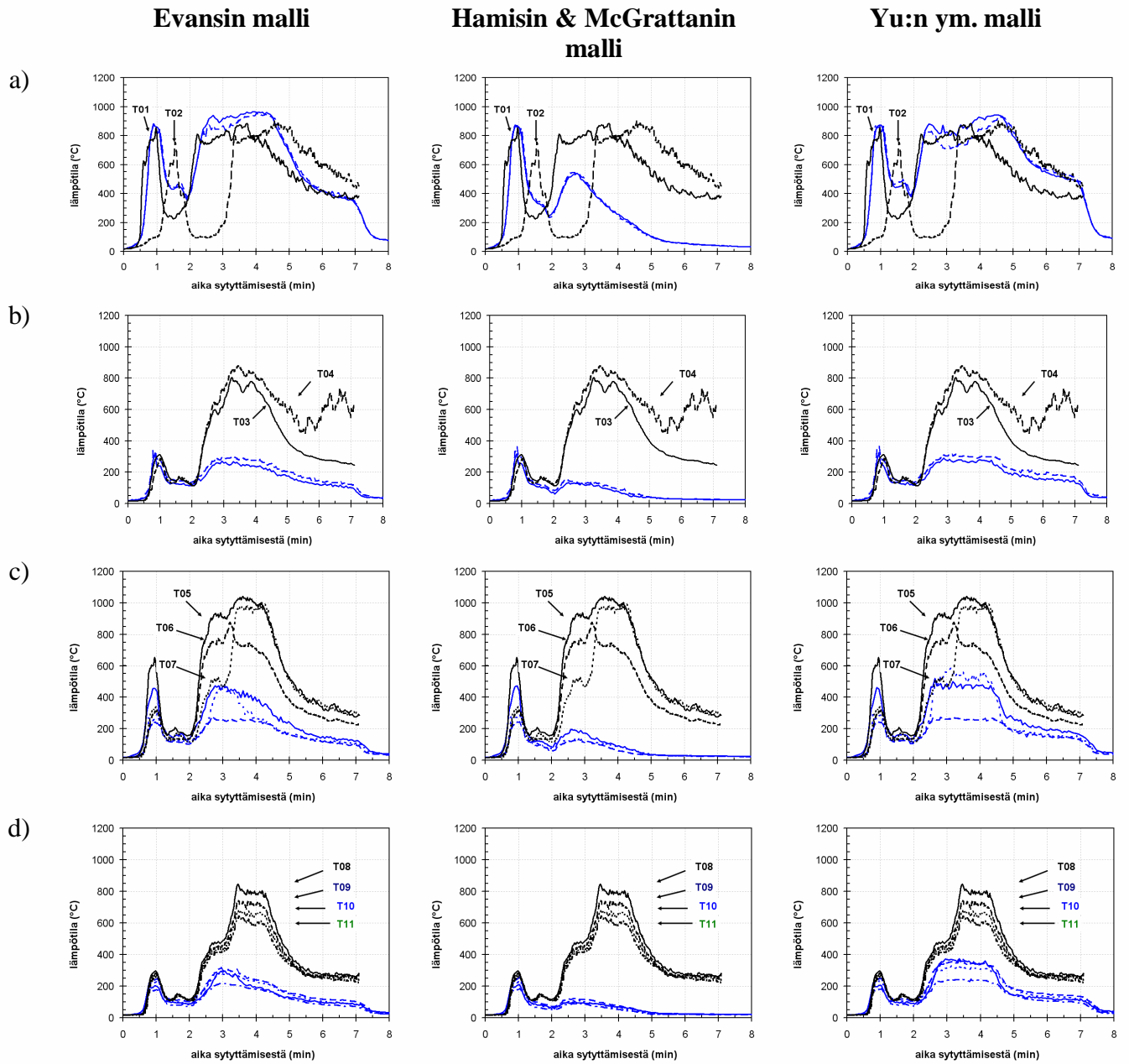
$$\dot{Q}_{SPR}(t) = \dot{Q}(t) \cdot \exp(-k \cdot (t - t_p)), \quad (11)$$

missä  $\dot{Q}(t)$  on palotehon ajallinen kehittyminen ilman sprinklausta.

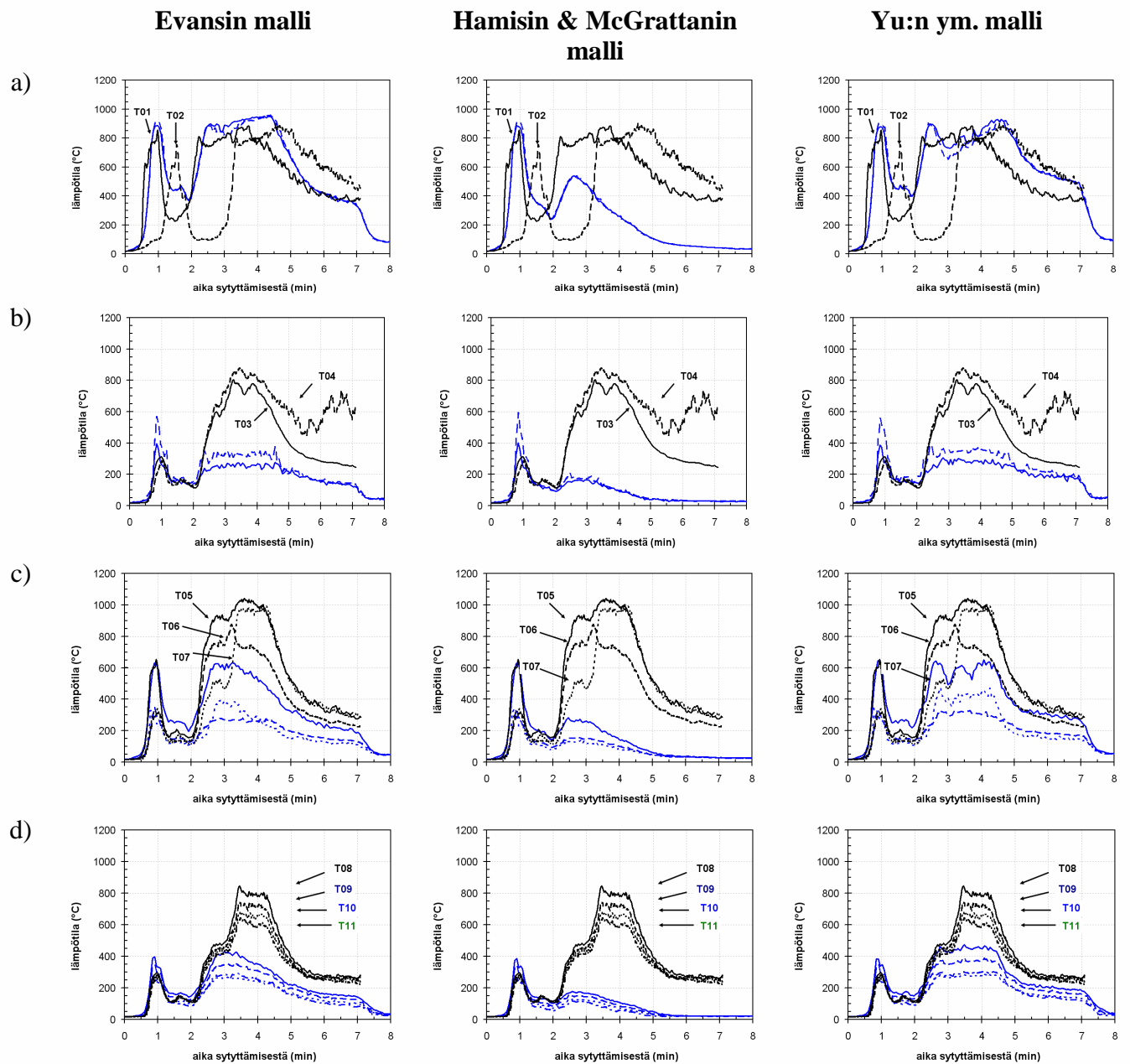
Eri malleja käyttäen saadut arviot palotehon ajalliselle kehitymiselle esitetään kuvassa Kuva 35. Vastaavat lasketut lämpötilat sprinklereiden eri sijoittelutavoilla esitetään kuvissa Kuva 36 (sijoittelutapa 1) ja Kuva 37 (sijoittelutapa 2).



Kuva 35. Empiiristen mallien käyttöön perustuvat palotehon ajallisen kehittymisen arviot.



Kuva 36. Mitatut (mustat käyrät) ja empiiristen mallien käyttöön perustuvat simuloitut sprinklauksen vaikutuksen huomioon ottavat (siniset käyrät) lämpötilat: a) lämpötila-anturit T1 ja T2, b) T3 ja T4, c) T5, T6 ja T7 sekä d) T8-T11. Sprinklereiden sijoittelutapa 1.



Kuva 37. Mitatut (mustat käyrät) ja empiiristen mallien käyttöön perustuvat simuloitut sprinklauksen vaikutuksen huomioon ottavat (siniset käyrät) lämpötilat: a) lämpötila-anturit T1 ja T2, b) T3 ja T4, c) T5, T6 ja T7 sekä d) T8-T11. Sprinklereiden sijoittelutapa 2.

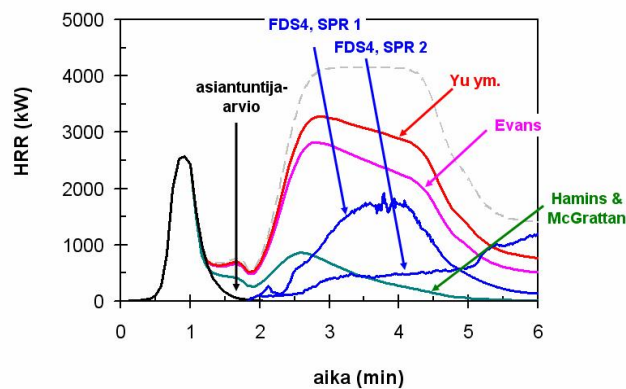
## 4.5 Yhteenvedo simuloinnin antamista tuloksista siitä, miten sprinklaus olisi vaikuttanut rekonstruktiokeiden palonkehittymiseen

Kuvassa Kuva 38a esitetään ylläesitettyjen eri sprinklauksen mallintamistapojen antamat palotehokäyrät. Tulosten poikkeavuus toisistaan heijastaa sitä tosiasiaa, että sprinklauksen mallintamisessa ollaan vielä tällä hetkellä selvästi palon mallintamisen ja simuloinnin tasoa. Asiantuntija-arvio, jonka mukaan

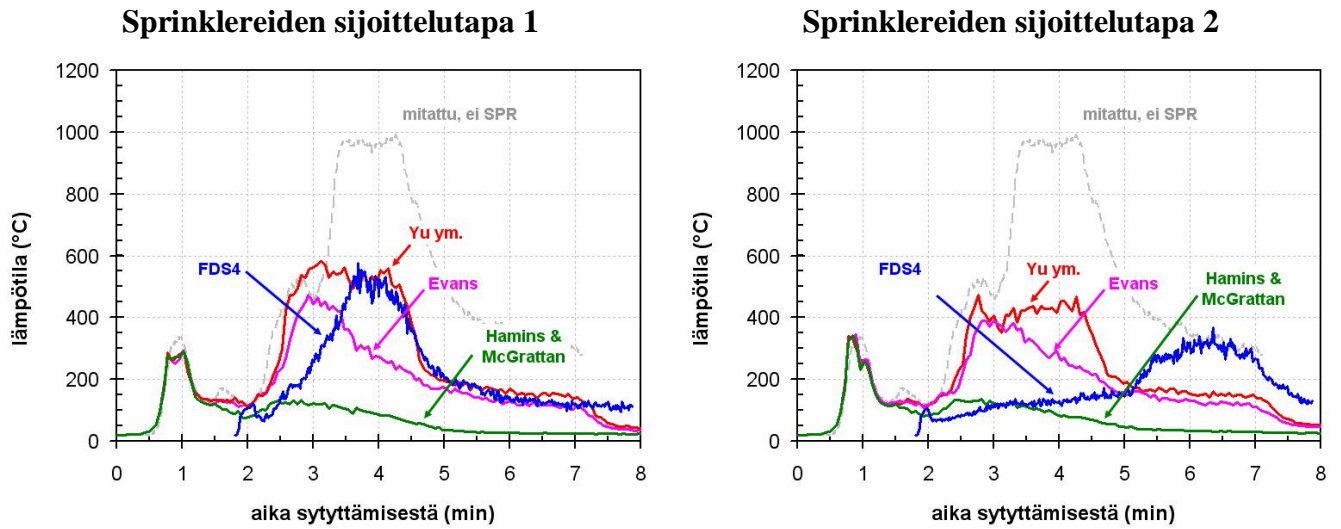
sprinkleri olisi sammuttanut rekonstruktiokekeen palon alkupalovaiheeseen, lienee realistisin arvio. FDS4-ohjelmalla lasketut tulokset eivät ota huomioon alkupaloa, vaan niissä mallinnus koske vain sitä vaihetta, jossa palo kehittyy voimakkaasti täyden palon vaiheeseen asti. Niistä voidaan havaita, että sprinklaus rajoittaa merkittävästi palamisen voimakkuutta täydenkin palon vaiheessa. Haminsin & McGrattanin tuloksista analysoitu empiirinen korrelaatio samansuuntaisen tuloksen kuin FDS4-ohjelma, joskin siinä paloteho voi olla jonkin verran liian alhainen. Yu:n ym. ja Evansin esittämät tulokset antavat varsin konservatiivisen arvion palotehosta.

Lämpötilojen suhteen FDS4-ohjelman antamat tulokset riippuvat merkittävästi sprinkleripäiden sijainnista palon suhteen, mikä on luonnollinen tulos, kun otetaan huomioon, että pääosa palokuormasta oli kaapissa, jonka kyky suojata palokuormaa sprinklereiden lähettämiltä vesipisaroilta luonnollisestikin riippuu sprinkleripään asemasta kaappiin nähden. Sprinklereiden sijoitusvaihtoehdossa a FDS4-ohjelman antamat tulokset ovat varsin lähellä Yu:n ym. ja Evansin empiirisiä malleja käyttäen laskettuja arvoja. Sprinklereiden sijoitusvaihtoehdossa b FDS4-ohjelman antamat tulokset ovat varsin lähellä Haminsin & McGrattanin empiiristä mallia käyttäen laskettuja arvoja.

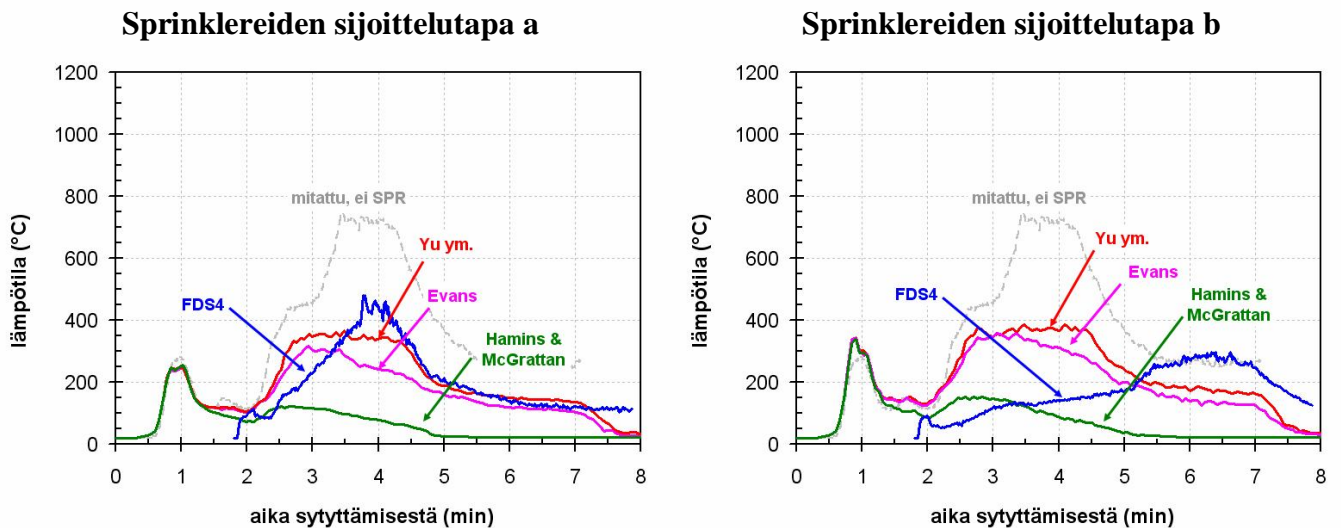
Kaiken kaikkiaan sprinklaus alentaa lämpötiloja merkittävästi: lähempänä paloa (1,2 m:n päässä palon keskikohdasta), kuuman kerroksen lämpötila laskee noin 1000 °C:sta 400-600 °C:een ja kauempana palosta vajaasta 800 °C:sta 100-n. 400 °C:een tasolle.



Kuva 38. a) Eri mallintamistapoja käyttäen saatuja arvioita sprinklerin todennäköisestä vaikutuksesta palotehon ajalliseen kehittymiseen rekonstruktiokekeissa.



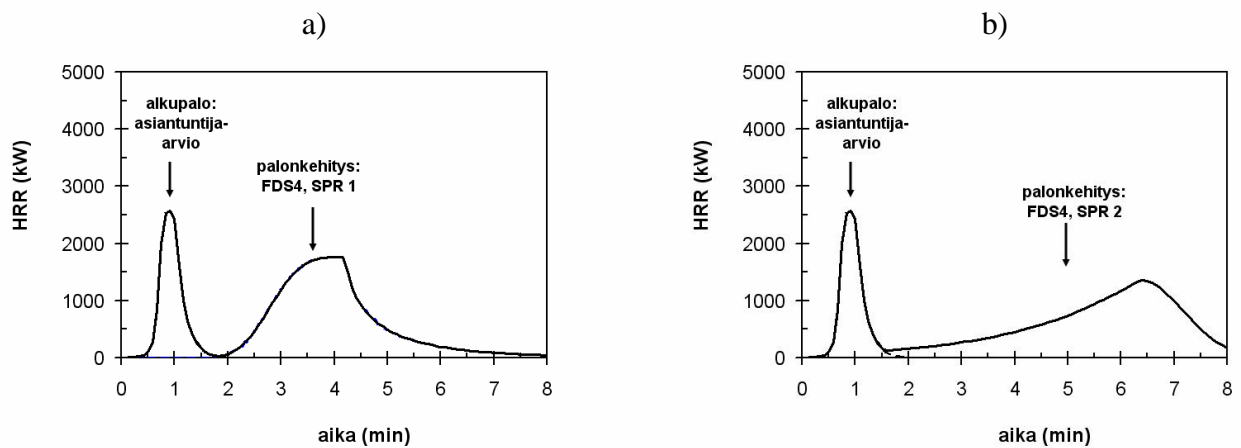
Kuva 39. Eri mallintamistapoja käyttäen saatuja arvioita sprinklerin todennäköisestä vaikutuksesta kuuman kerroksen lämpötilaan 1,2 m:n päässä palosta (anturi T7) rekonstruktiokeikeissa.



Kuva 40. Eri mallintamistapoja käyttäen saatuja arvioita sprinklerin todennäköisestä vaikutuksesta kuuman kerroksen lämpötilaan 3,6 m:n päässä palosta (anturi T9) rekonstruktiokeikeissa.

Tässä kohdassa esitetyn sprinklaustarkastelun tärkein tavoite on kehittää Pitkäniemen sairaalapalon tutkimisessa käytettävän sprinklauksen mallintamisen palotehokäyrä. Se määritetään edellä esitetyistä palotehokäyristä seuraavasti (Kuva 41):

- alkupalo: asiantuntija-arvio (kokeessa havaittu paloteho)
- palon kehittyminen alkupalon jälkeen: FDS-ohjelmalla laskettu palotehon ajallinen kehittyminen sprinklereiden sijoittelutavoille 1 ja 2.



Kuva 41. a) Pitkäniemen sairaalapalon tutkimisessa käytettävät sprinklauksen huomioon ottavat palotehokäyrät: a) srinklereiden sijoitteluitapa 1 ja b) srinklereiden sijoitteluitapa 2.

---

## 5 Pitkäniemen sairaalan tulipalon mallintaminen

Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 pohjapiirros esitetään kuvassa Kuva 42 ja siitä tehdyn FDS4-palonsimulointimallin geometria esitetään kuvassa Kuva 43.

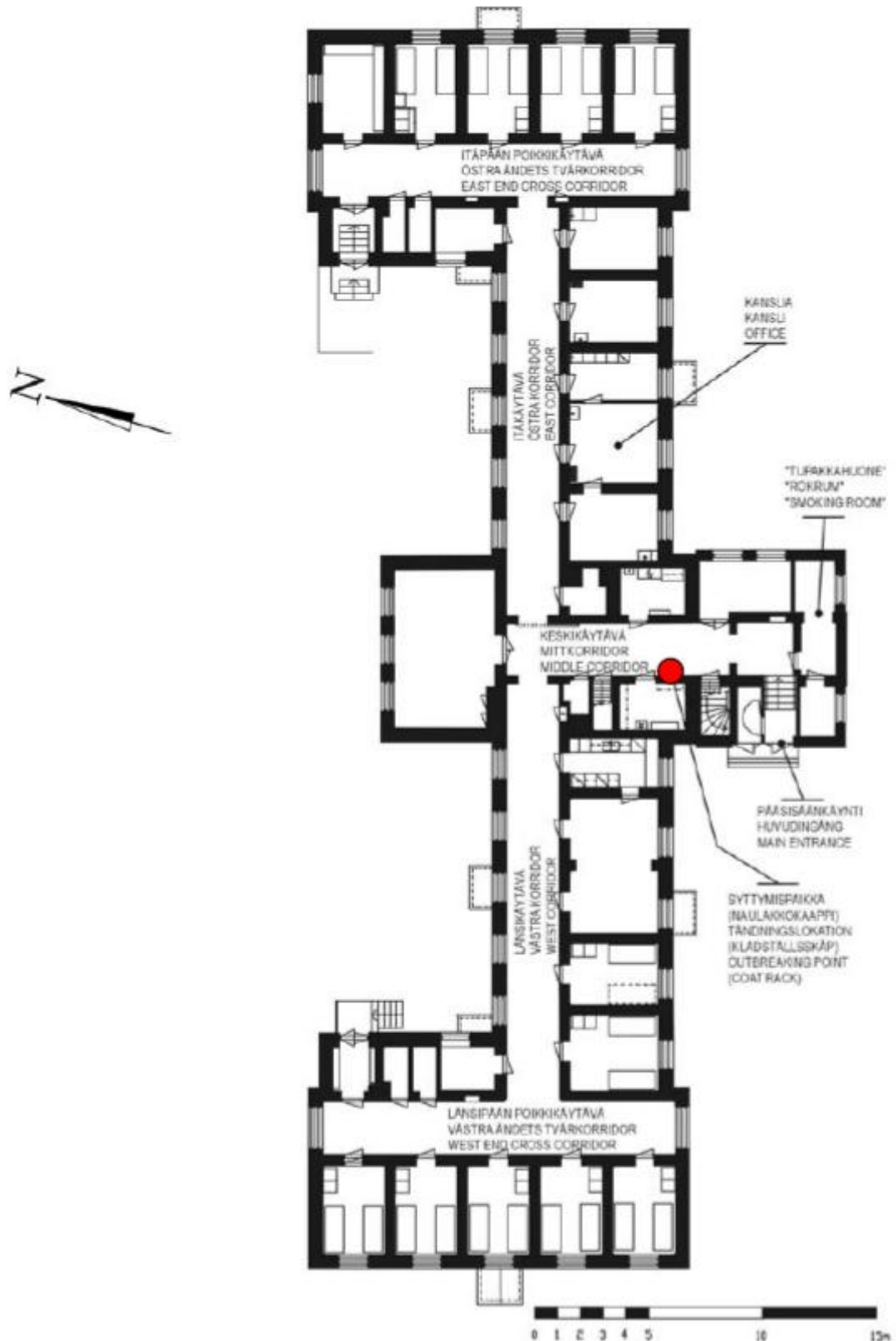
Palonsimulointimallin materiaaliominaisuudet ja palon kehittymisen malli ovat samat kuin PEO:lla tehtyjen rekonstruktiokeiden mallintamisessa. Palon synnyttämää lämpötilojen nousua ja savuisuutta monitoroidaan sekä kyseisen suureen ilmaisevilla tasoilla että pistemäisillä virtuaaliantureilla. Kyseisten tasojen paikat esitetään kuvassa Kuva 44 ja pistemäisten virtuaaliantureiden paikat kuvassa Kuva 45. Kaikkien pistemäisten antureiden koordinaatit esitetään tämän raportin lopussa olevassa liitteessä A.

Tässä luvussa esitettävissä palonsimuloinneissa tarkasteltiin kolmea erilaista itäsiipeen johtavan palo-oven toimintaa.

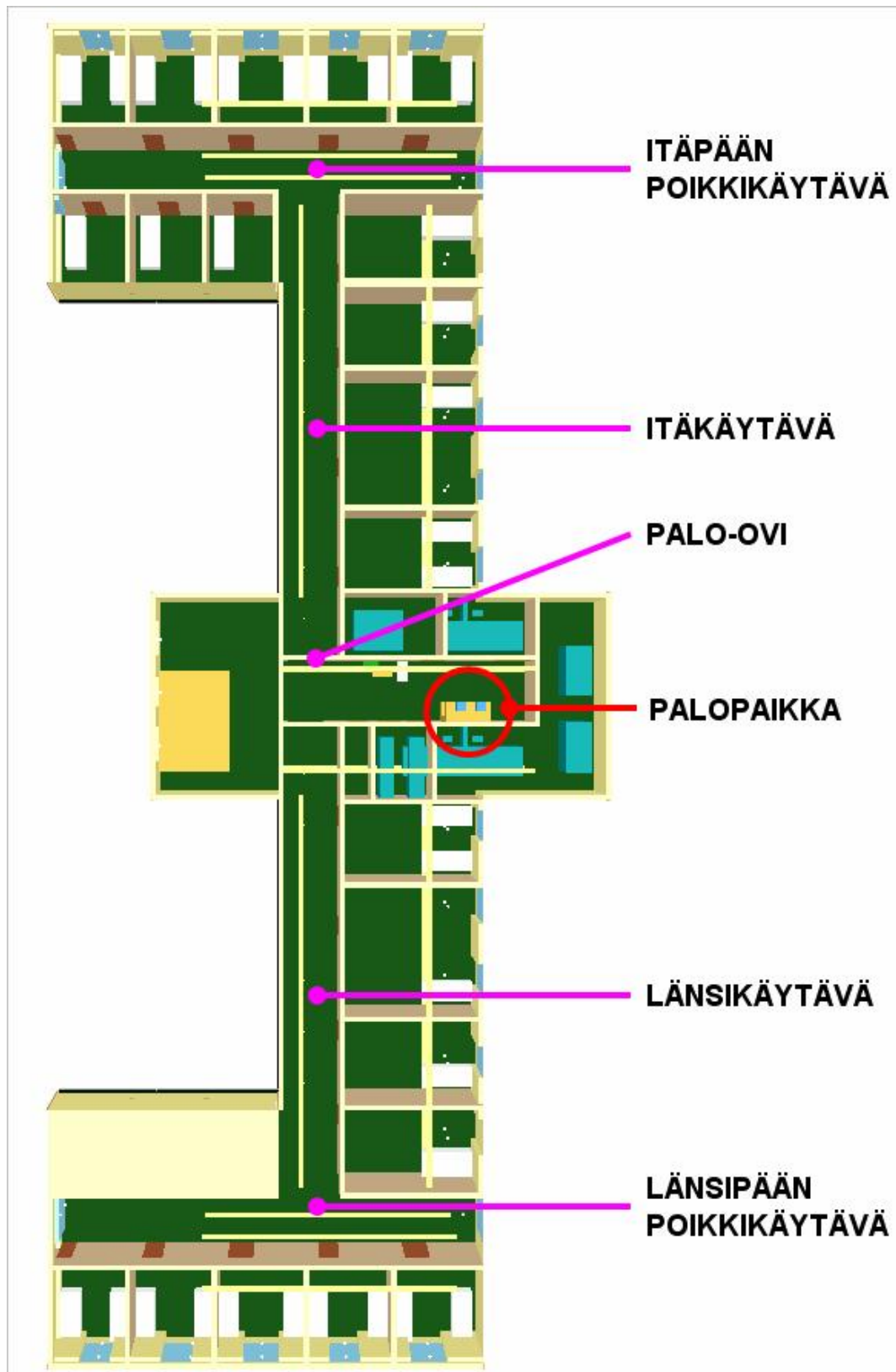
- a. palo-ovi ei sulkeudu lainkaan
- b. palo-ovi sulkeutuu vain osittain jättäen n. 30 cm leveän aukon
- c. palo-ovi sulkeutuu kokonaan.

Sprinklauksen vaikutusta tarkastellaan erikseen luvussa 6.

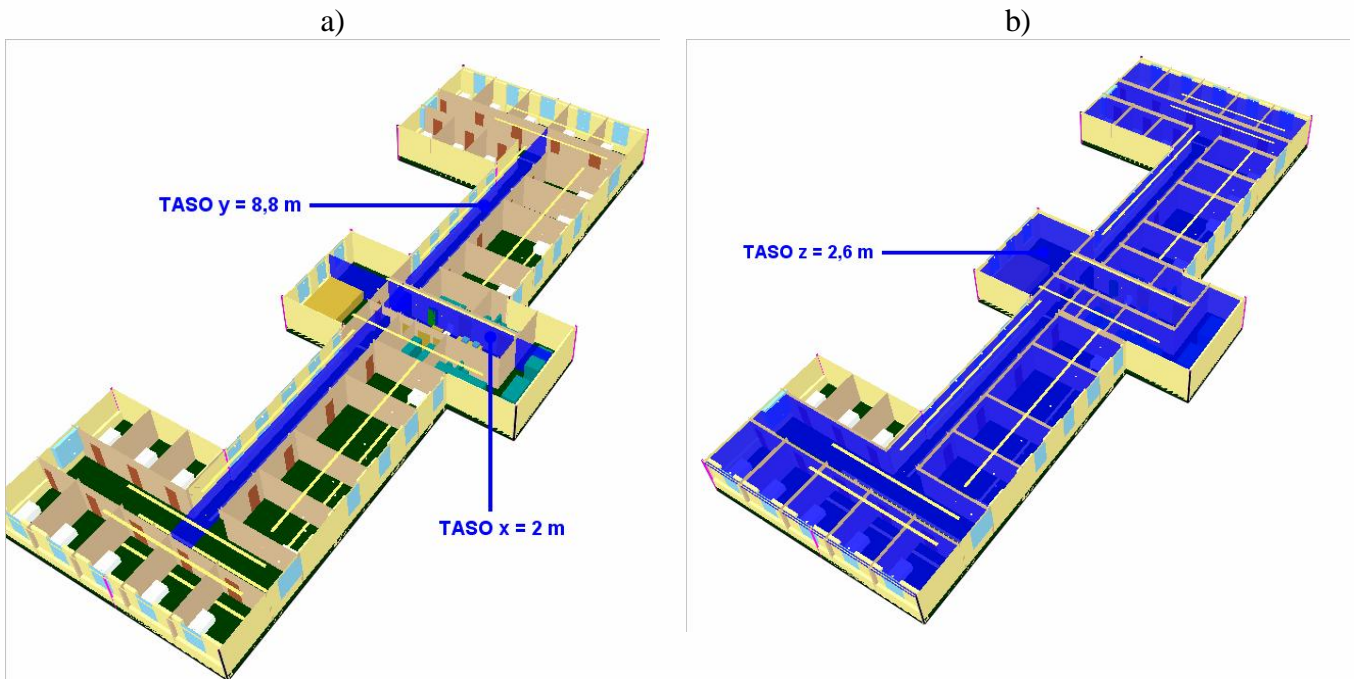




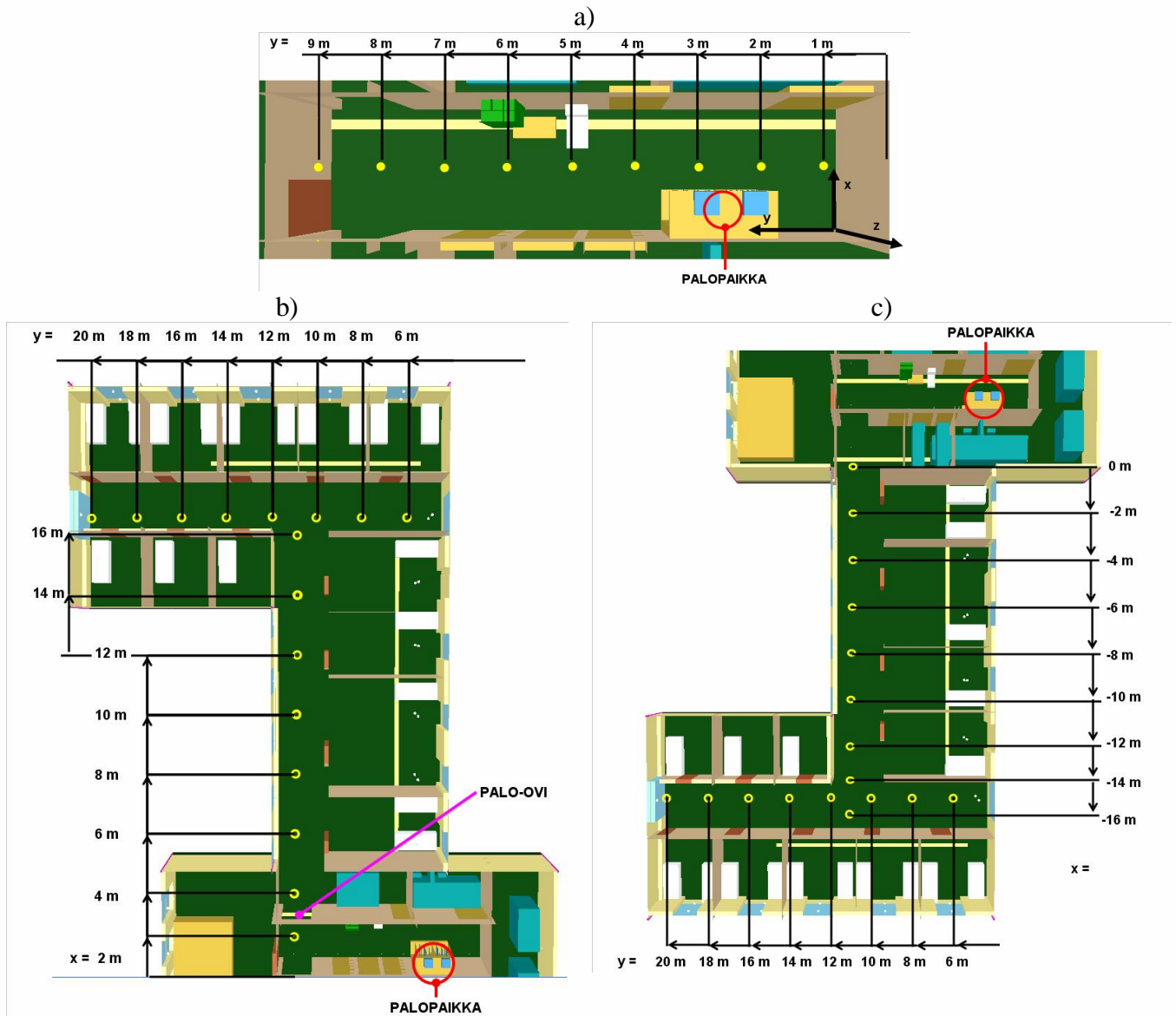
Kuva 42. Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 pohjapiirros, käytävien nimitykset, palon syttymispaikka, kanslia ja tupakkahuone [28].



Kuva 43. Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 FDS-malli.



Kuva 44. Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 FDS-mallin lämpötilojen ja savuntiheyden monitorointitasot: a) pystysuuntaiset tasot ja b) vaakasuuntainen taso.



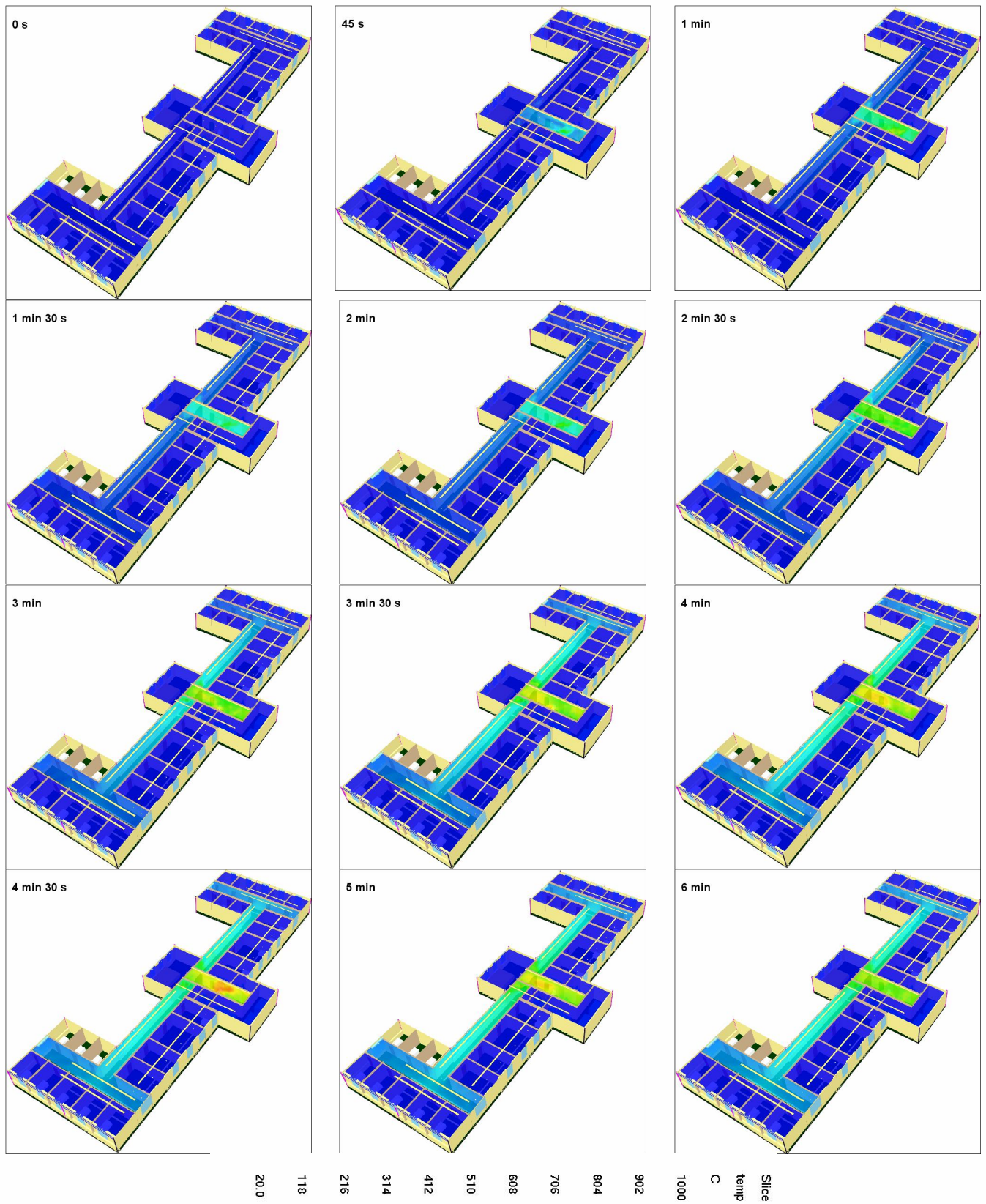
Kuva 45. Pitkäniemen sairaalan rakennuksen 17 FDS-mallin lämpötilojen ja savuntiheyden pistemäisten virtuaaliantureiden paikat: a) palokäytävä, b) itäsiipi ja c) länsisiipi.

## 5.1 Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu lainkaan

Tulokset tapauksessa, jossa palo-ovi ei sulkeudu lainkaan, esitetään kuvissa Kuva 46- Kuva 53:

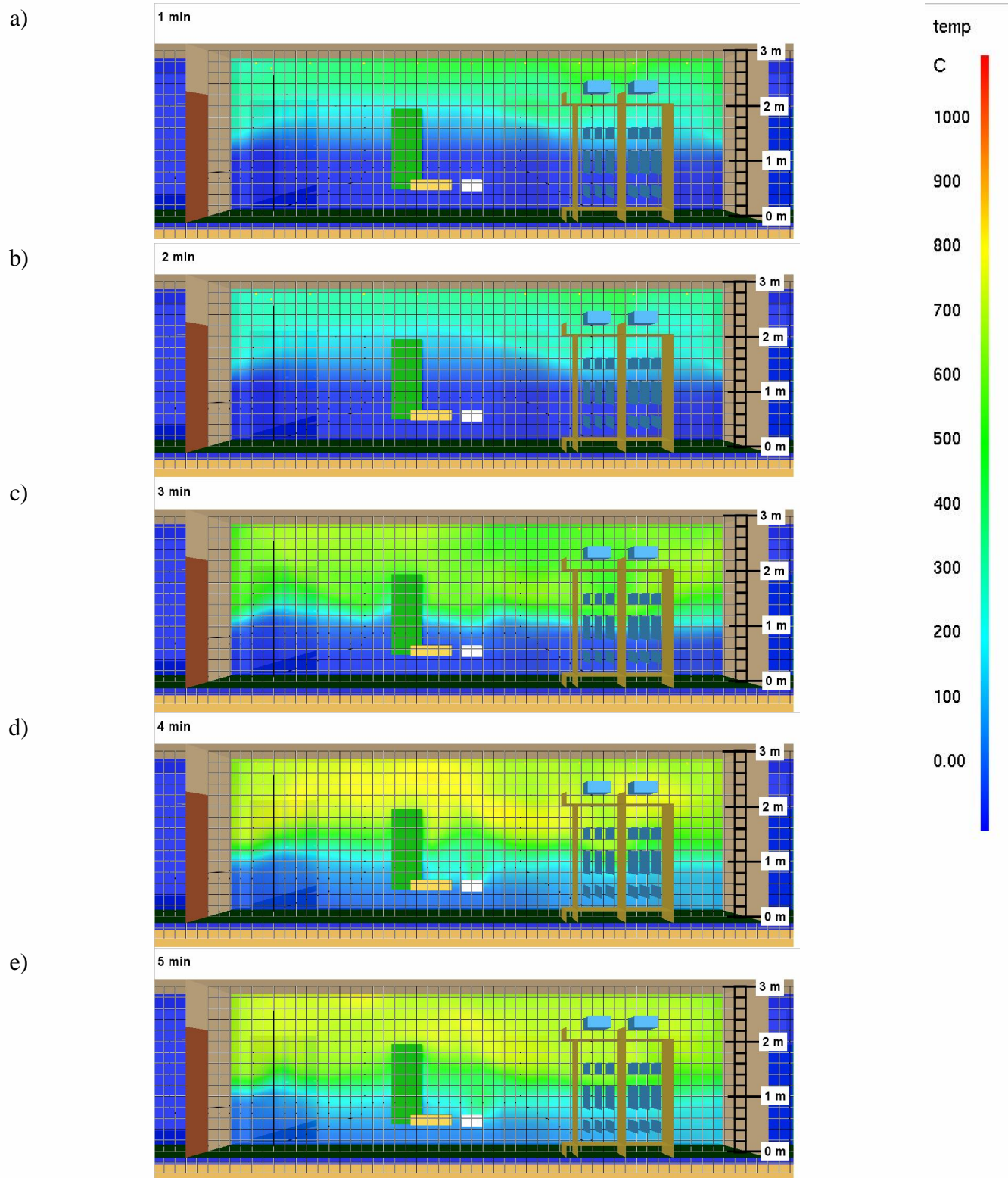
- Kuva 46 antaa yleiskuvan kuumien kaasujen leviämisestä;
- Kuvat Kuva 47 ja Kuva 48 esittävät palokäytävän lämpötila- ja savuntiheysjakauman eri ajanhetkinä;
- Kuvat Kuva 49 ja Kuva 50 esittävät itä-länsi -käytävän lämpötila- ja savuntiheysjakauman eri ajanhetkinä;
- Kuvat Kuva 51-Kuva 53 esittävät palo- ja itä-länsi -käytävän kuumen kerroksen lämpötilan ja savuntiheyden ajallisen kehittymisen.



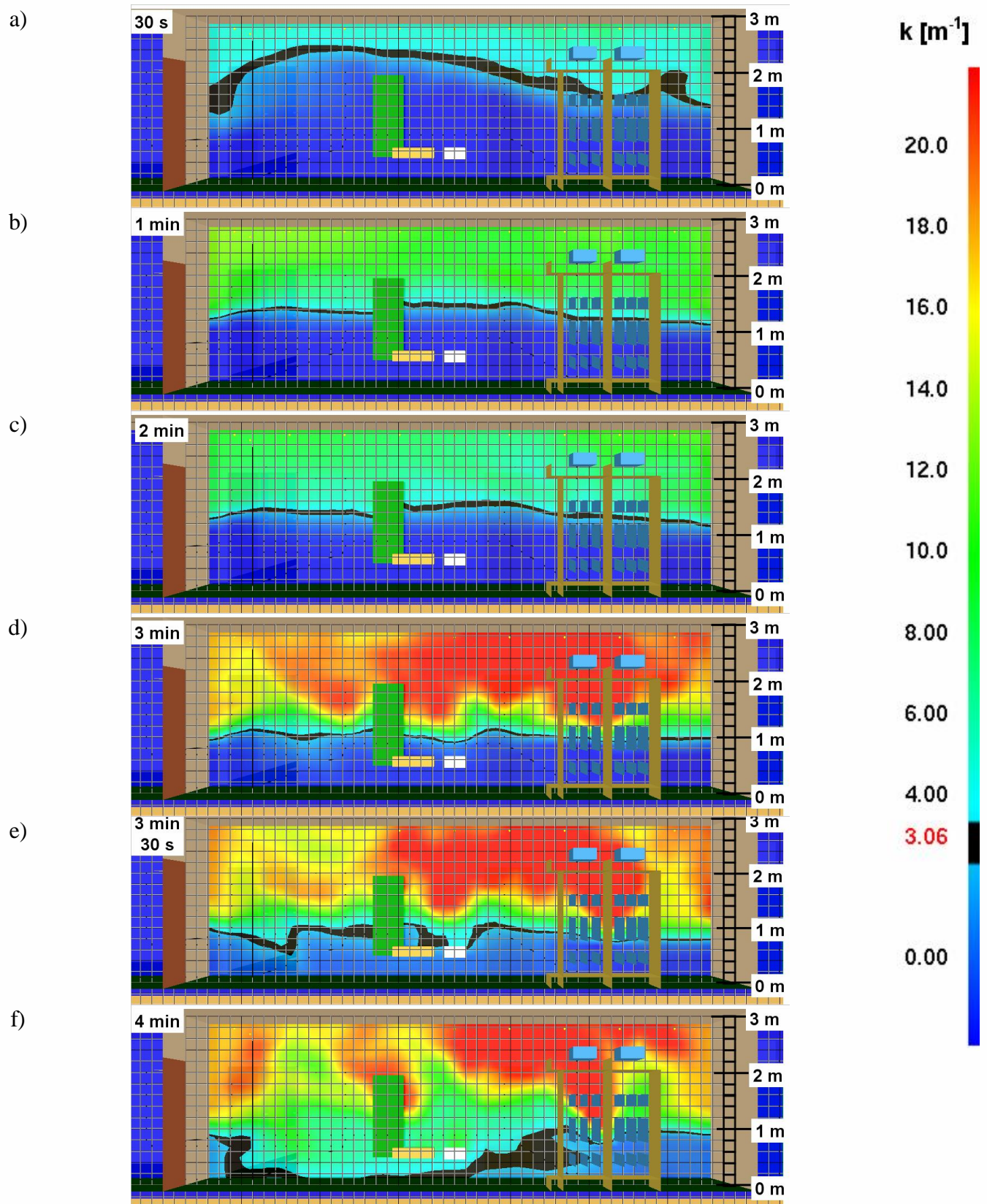


Kuva 46. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu: kuuman kerroksen lämpötilat tasossa  $z = 2,8$  m.



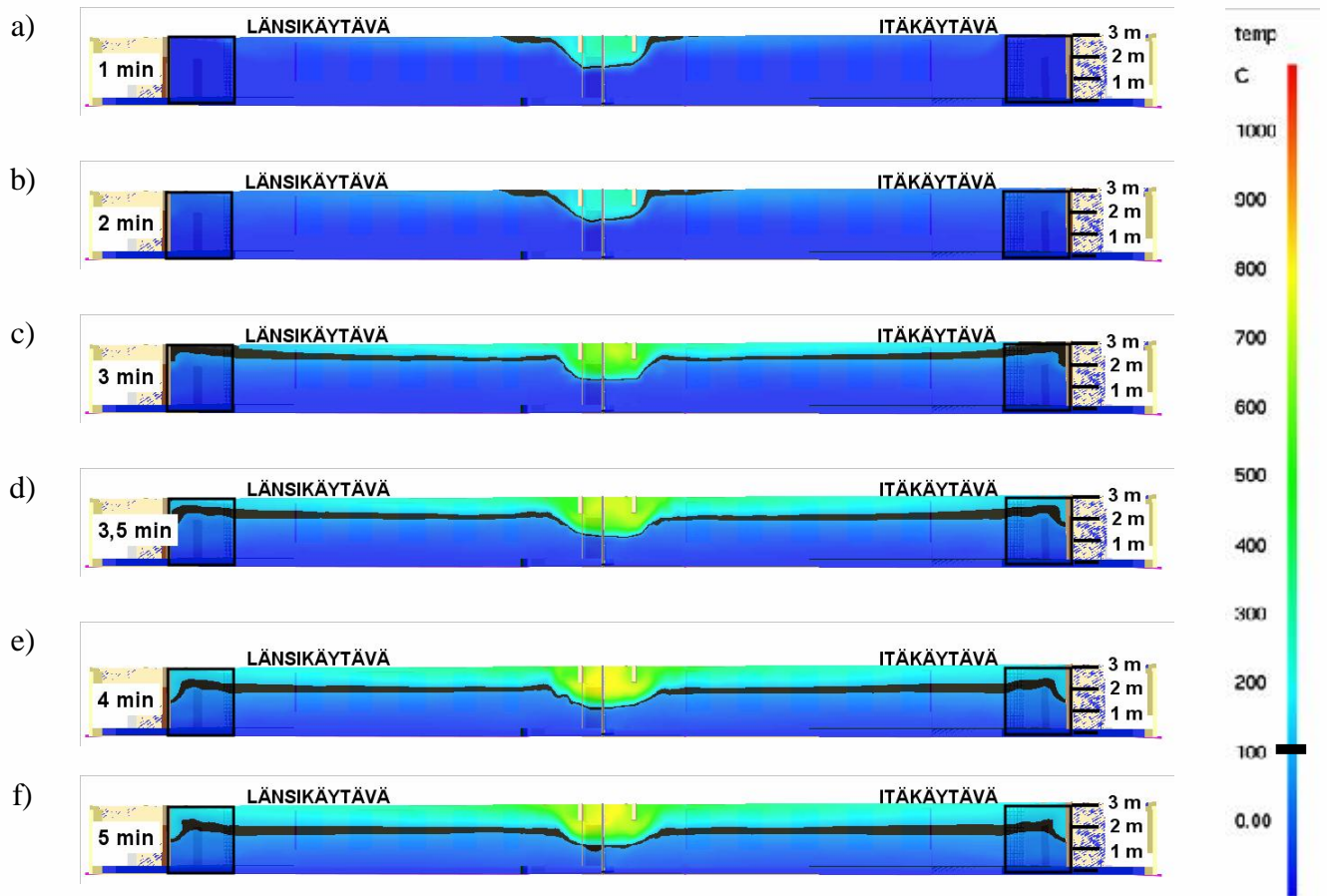


Kuva 47. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu: palokäytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.

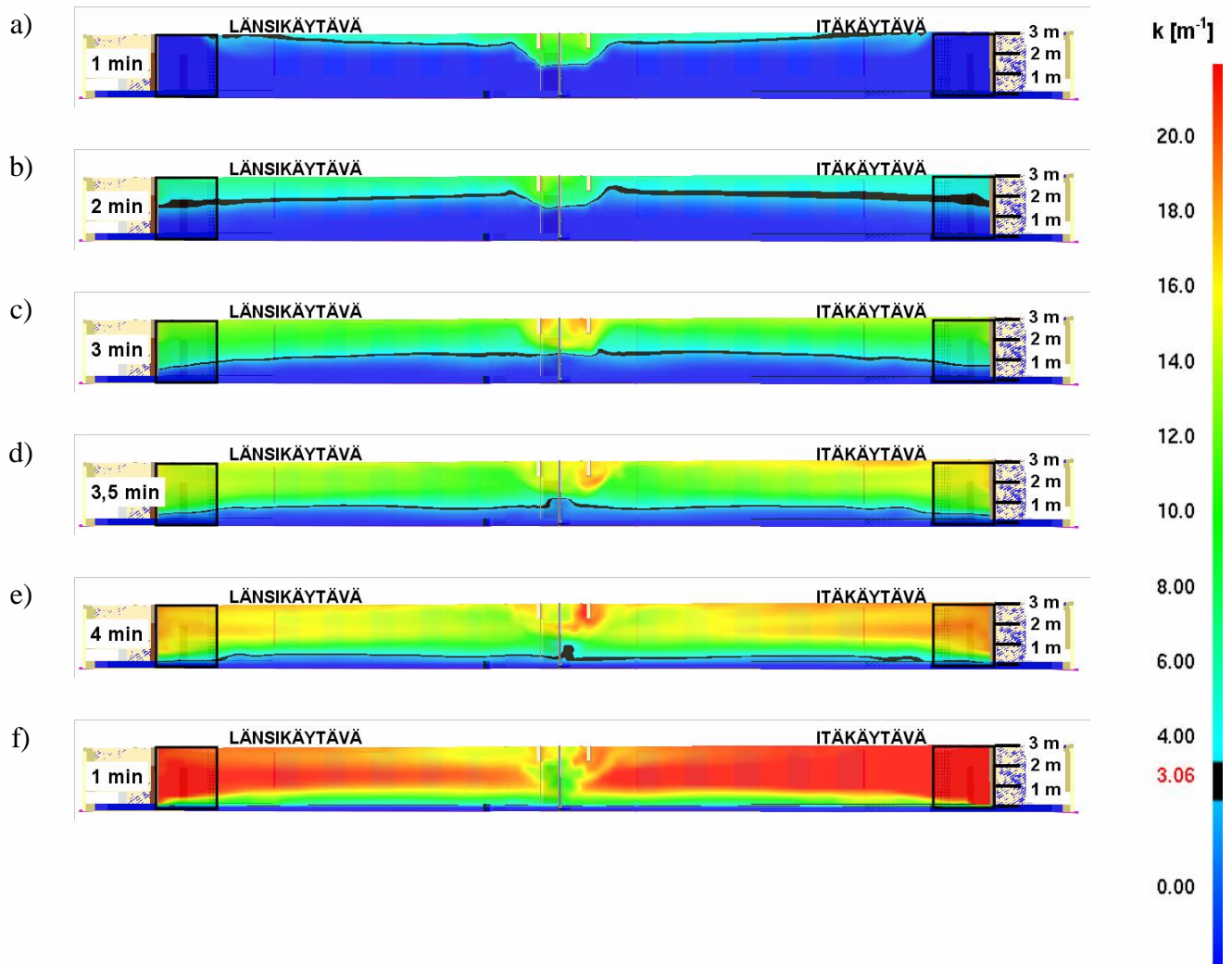


Kuva 48. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu: palokäytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.



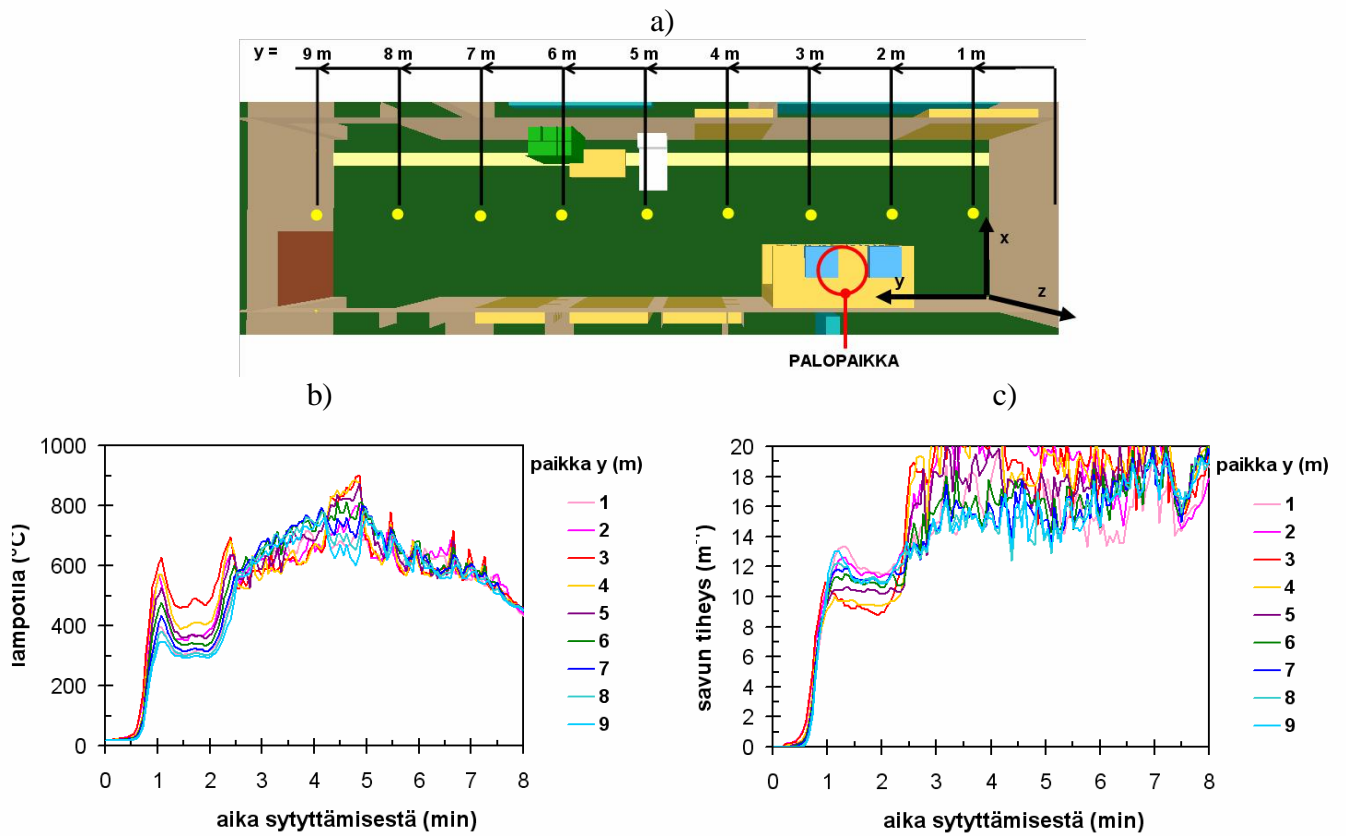


Kuva 49. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu: itä-länsi -käytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.

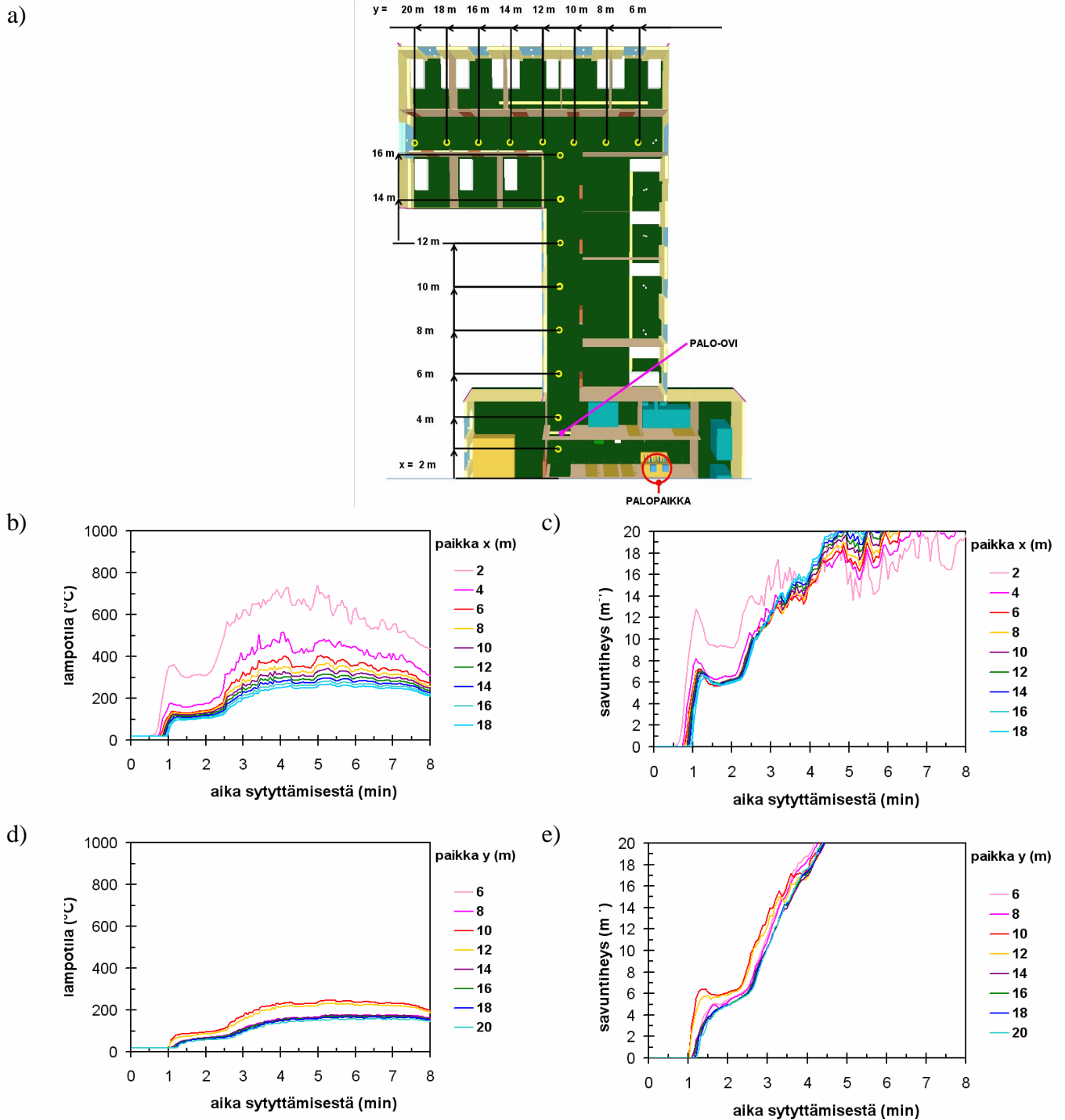


Kuva 50. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu: itä-länsi -käytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.

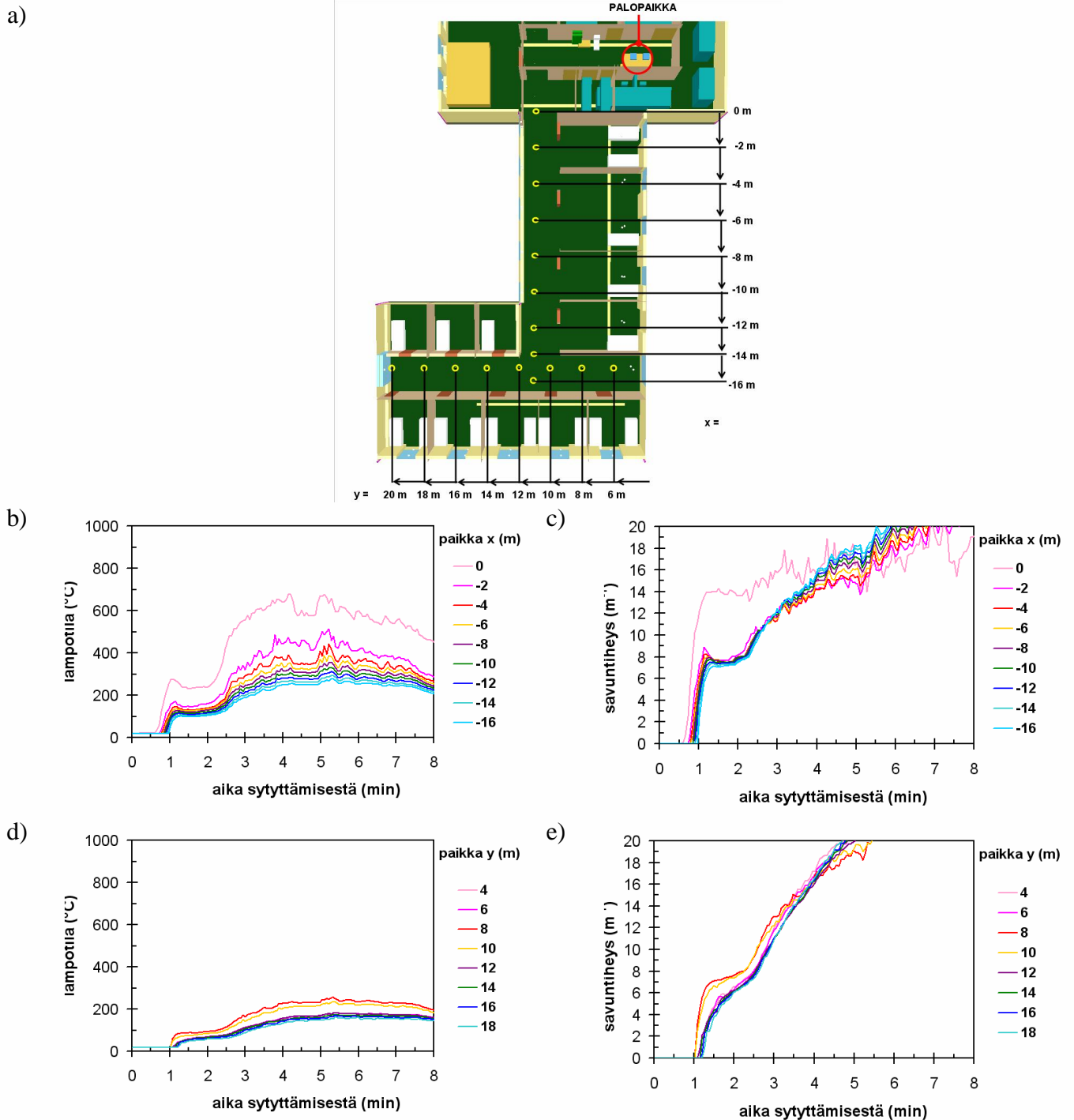




Kuva 51. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu, palokäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat ja c) savuntiheys.



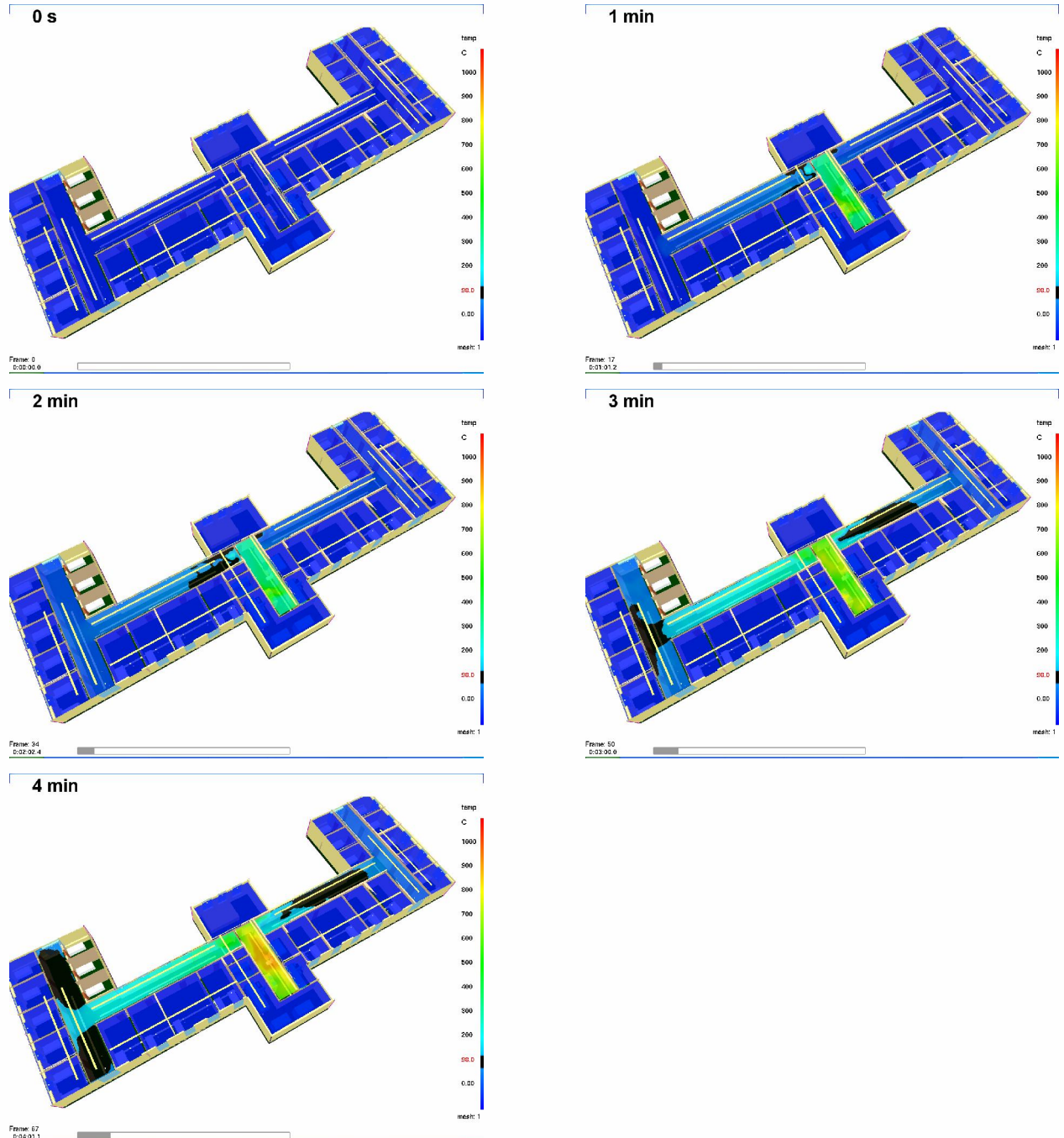
Kuva 52. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu, itäkäytävän ja itäpään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.



Kuva 53. Tapaus, jossa palo-ovi ei sulkeudu, länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän kuumen kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.

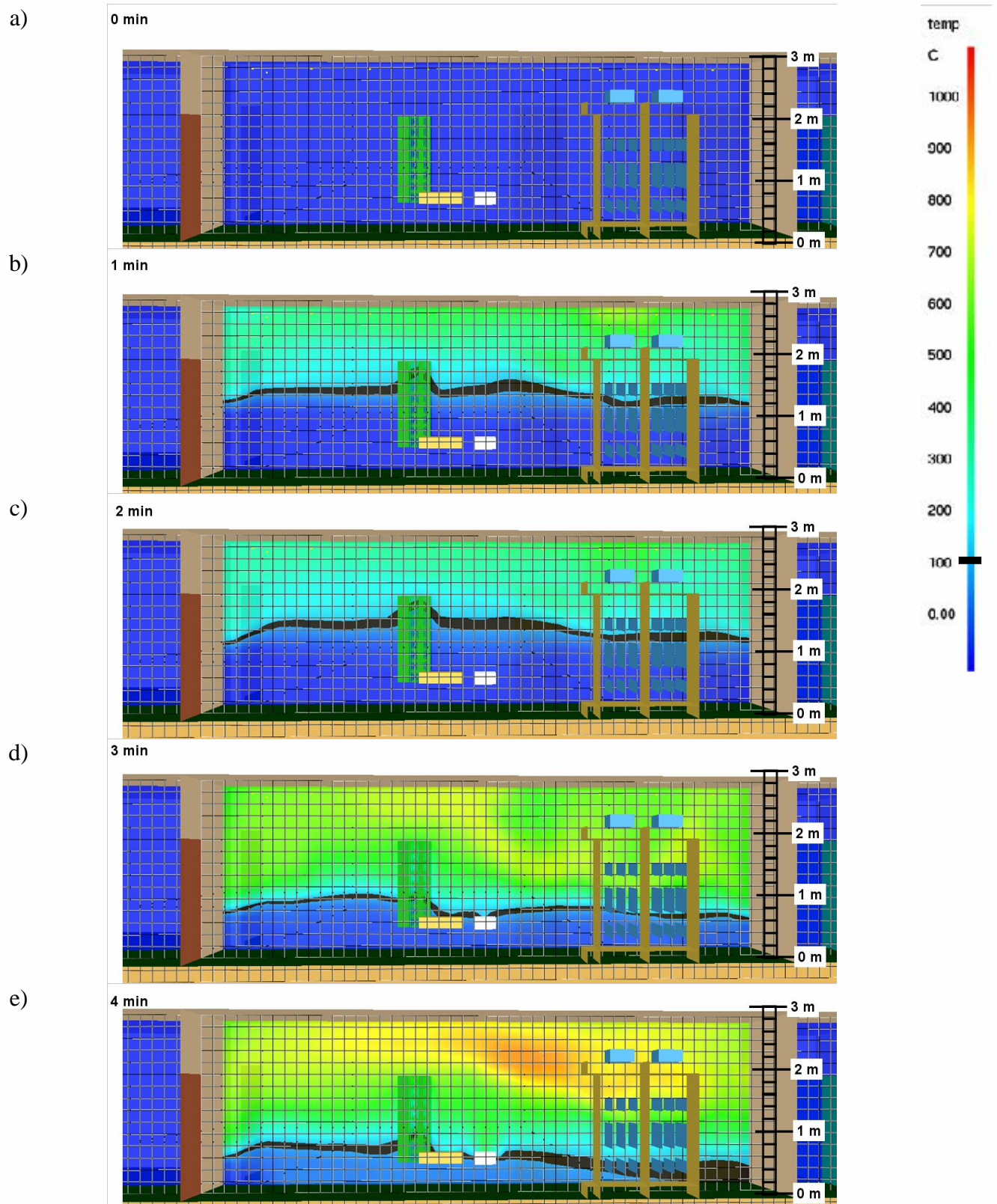
## 5.2 Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu osittain jättäen 30 cm suuruisen raon

Tulokset tapauksessa, jossa palo-ovi sulkeutuu osittain jättäen 30 cm suuruisen raon, esitetään kuvissa Kuva 54- Kuva 61. Kuvien esittämät seikat ovat samat kohdassa 5.1.



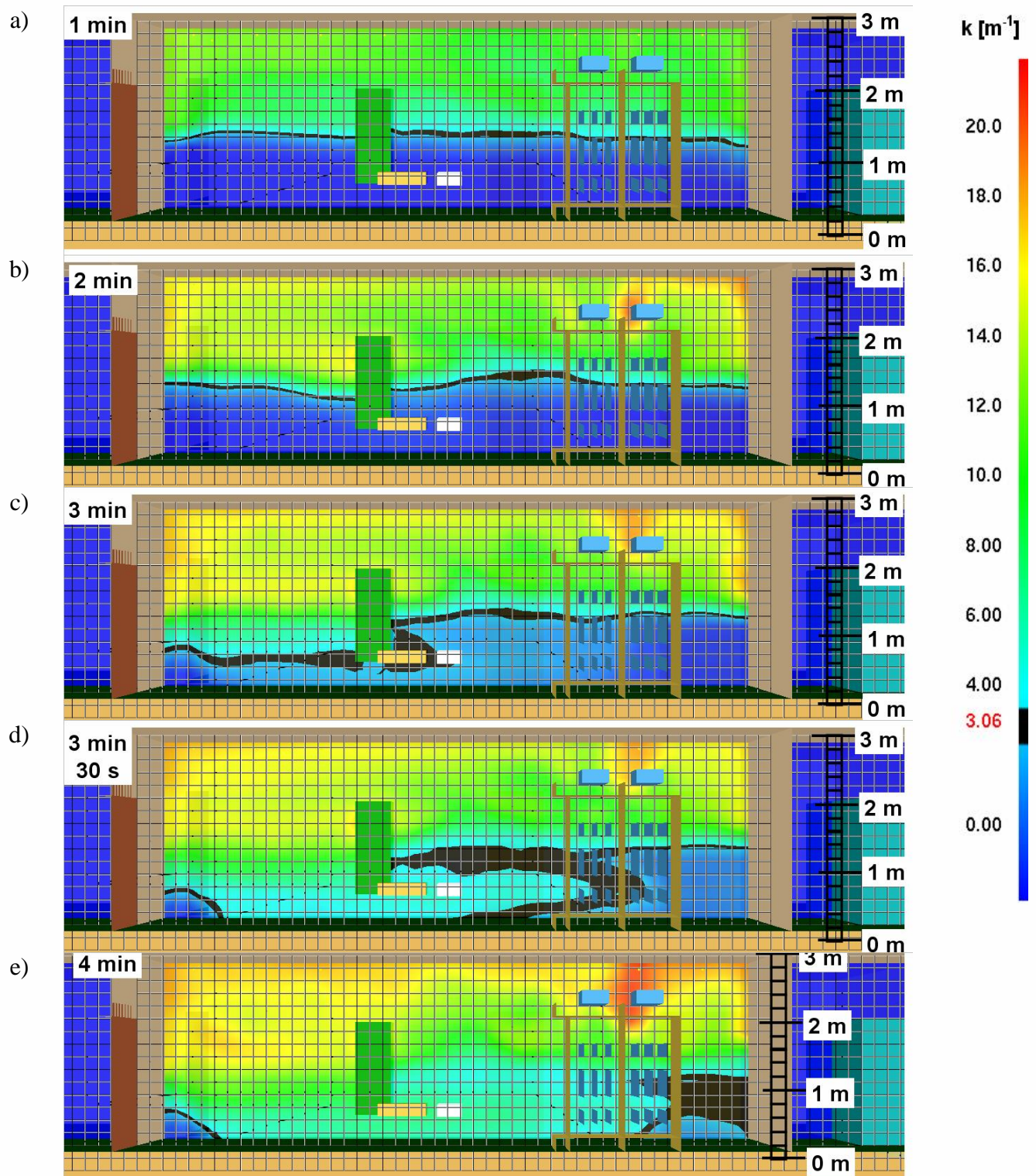
Kuva 54. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon: kuuman kerroksen lämpötilat tasossa  $z = 2,8$  m.



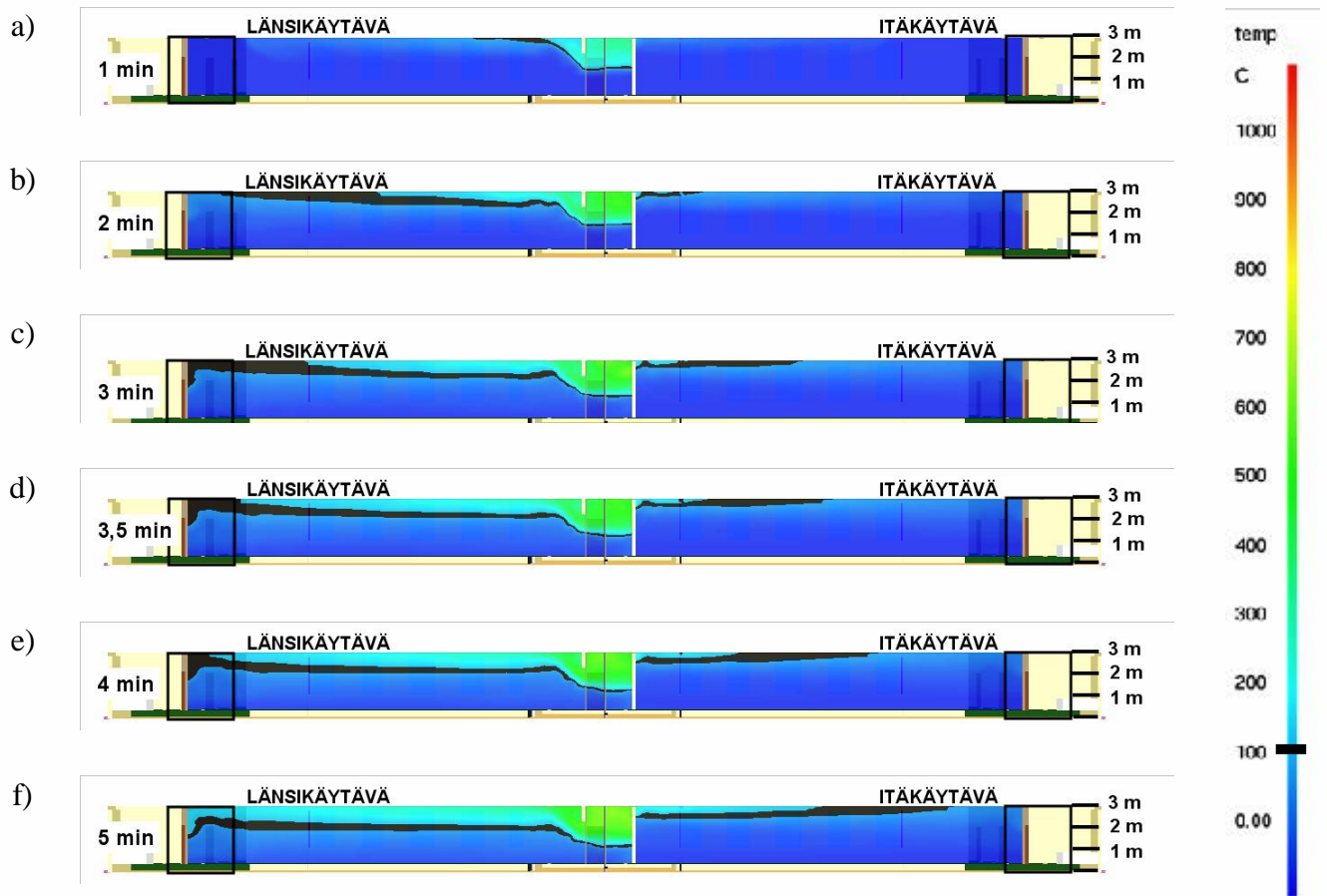


Kuva 55. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon: palokäytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.

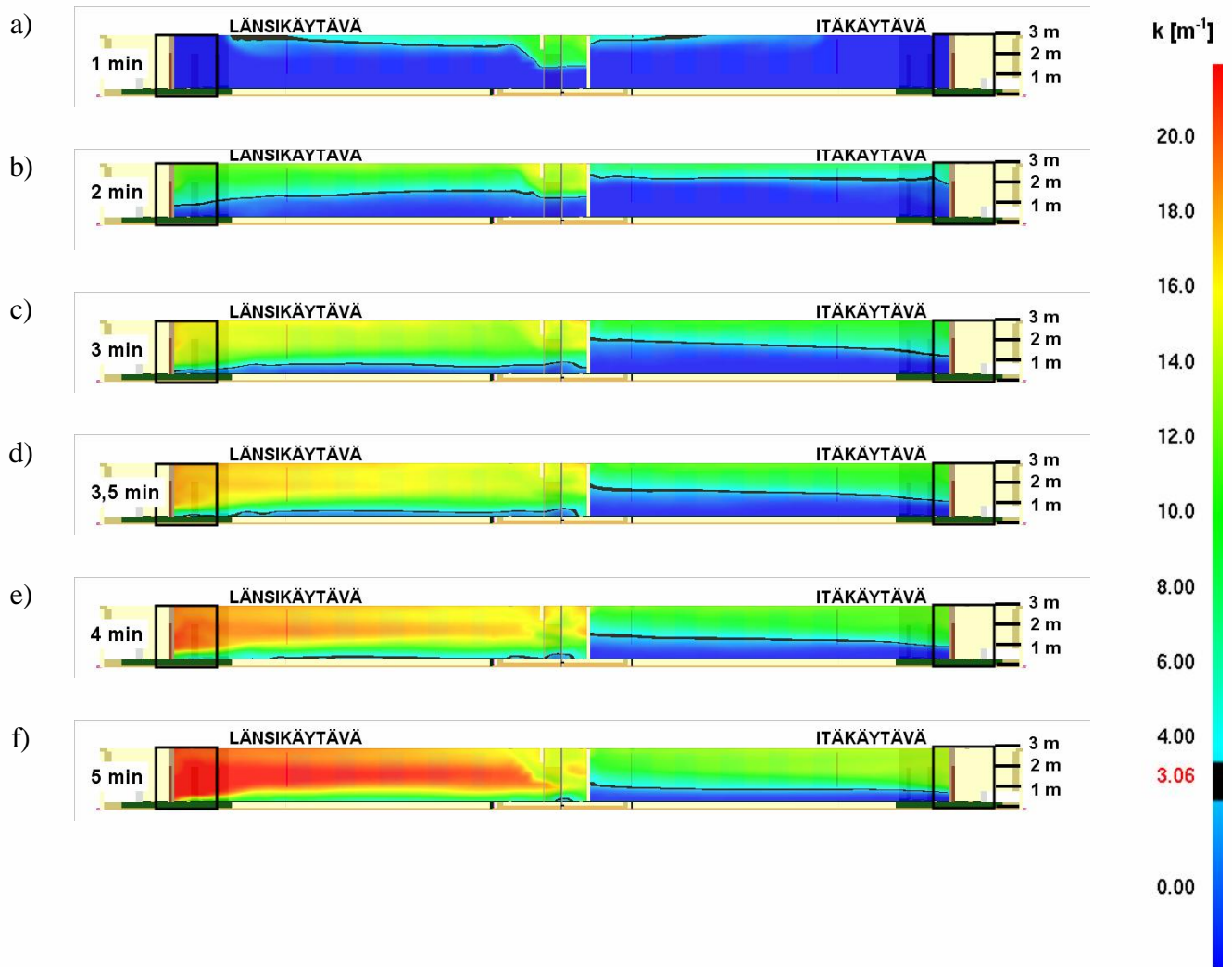




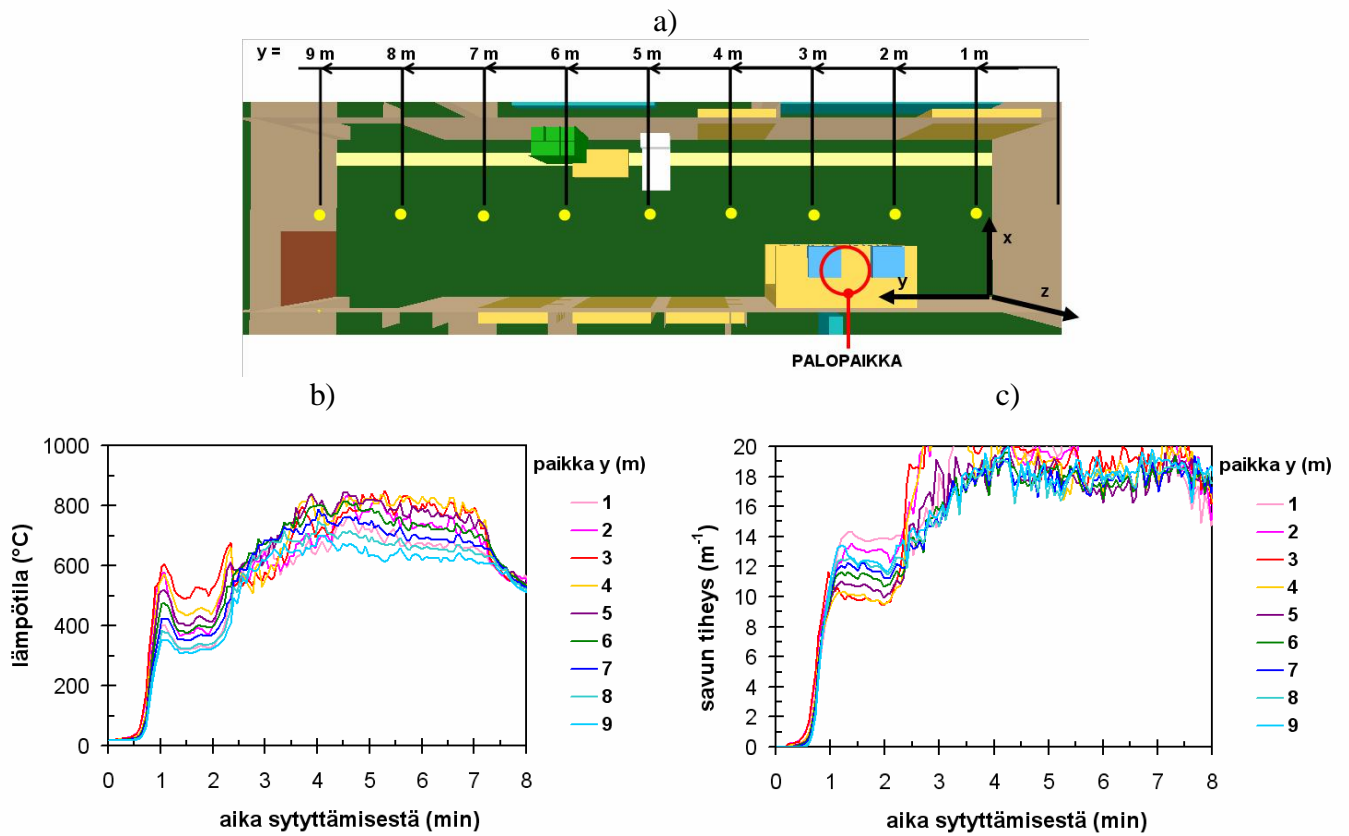
Kuva 56. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon: palokäytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.



Kuva 57. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon: itä-länsi -käytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.



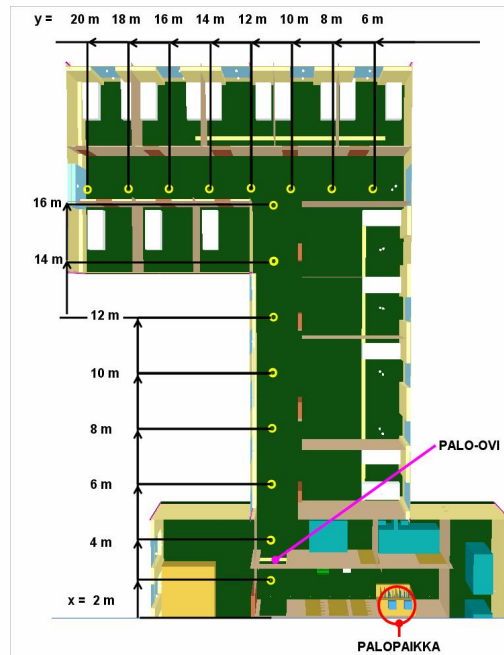
Kuva 58. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon: itä-länsi -käytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.



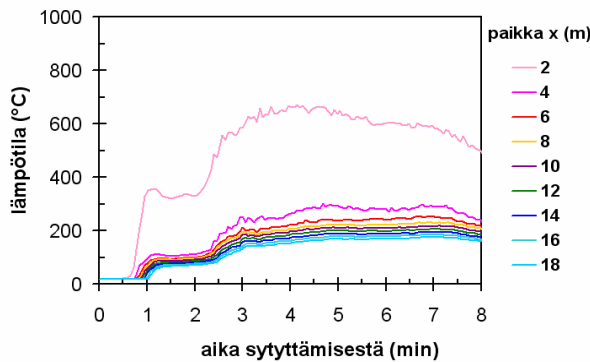
Kuva 59. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon, palokäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat ja c) savuntiheys.



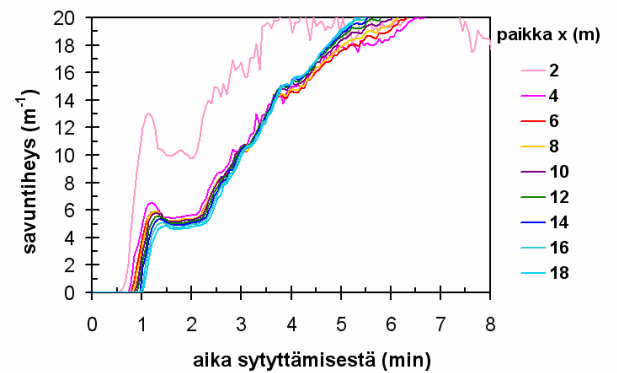
a)



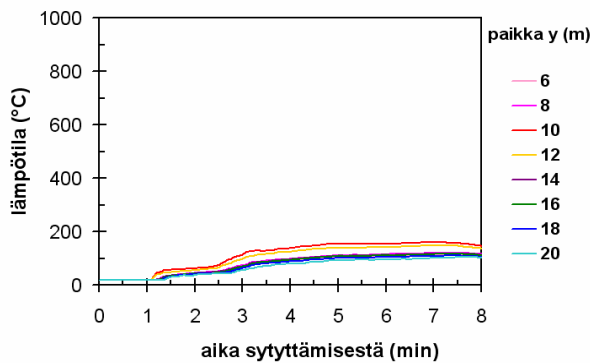
b)



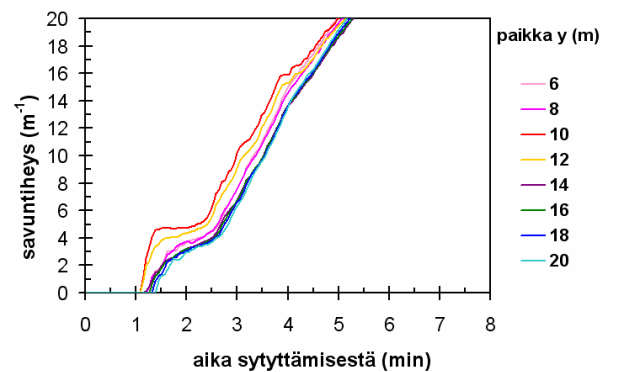
c)



d)

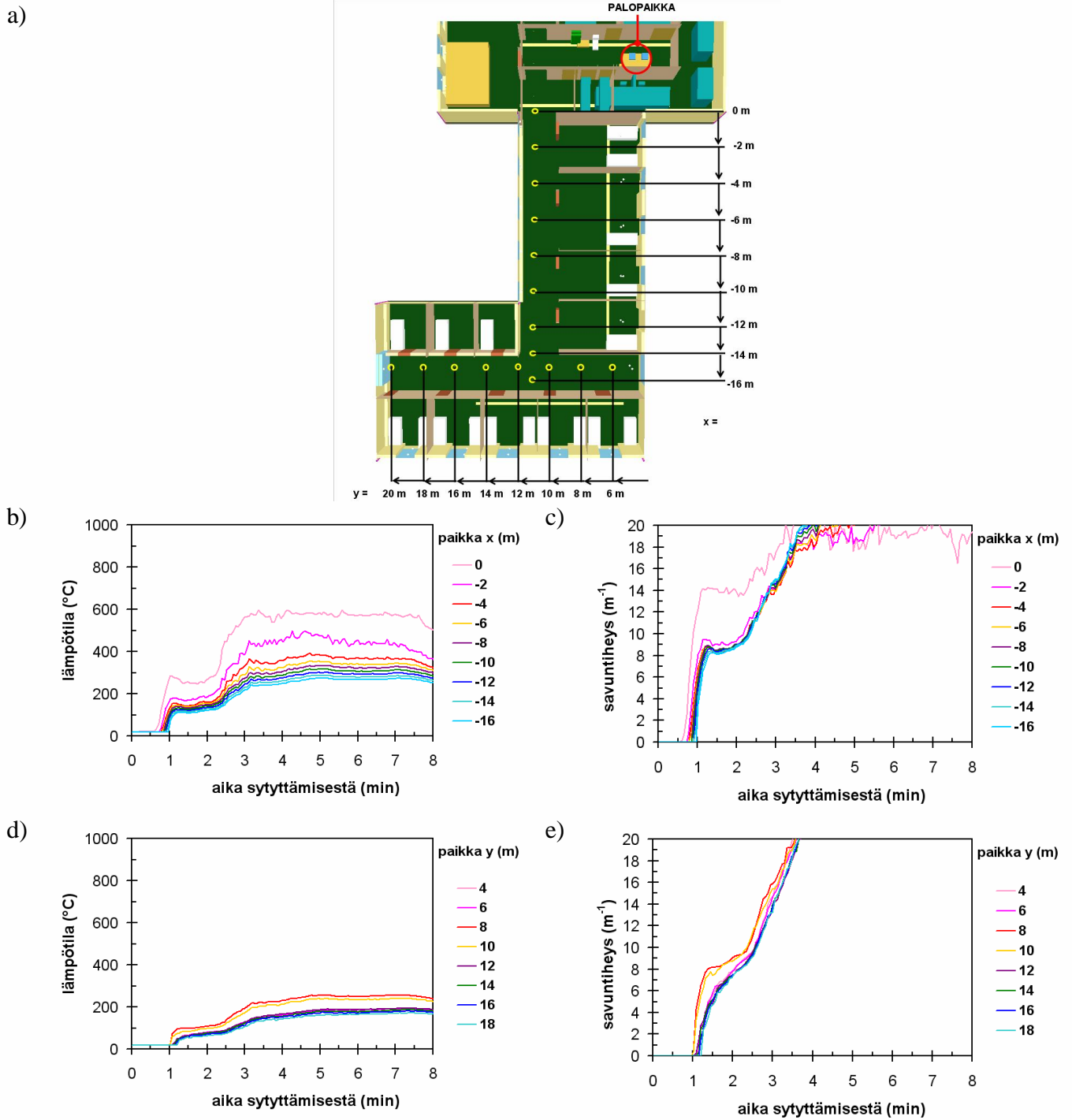


e)



Kuva 60. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon, itäkäytävän ja itäpään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.

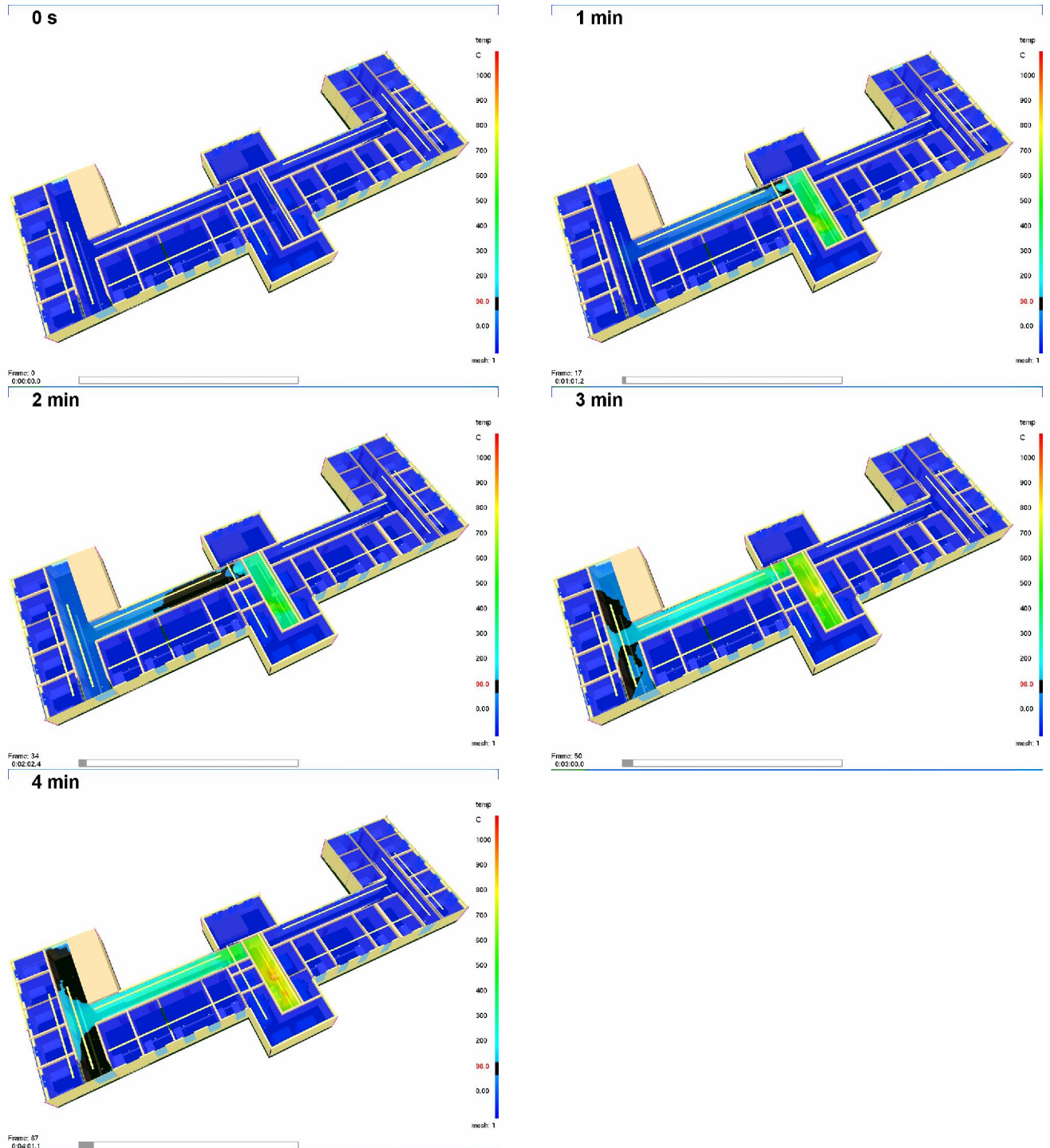




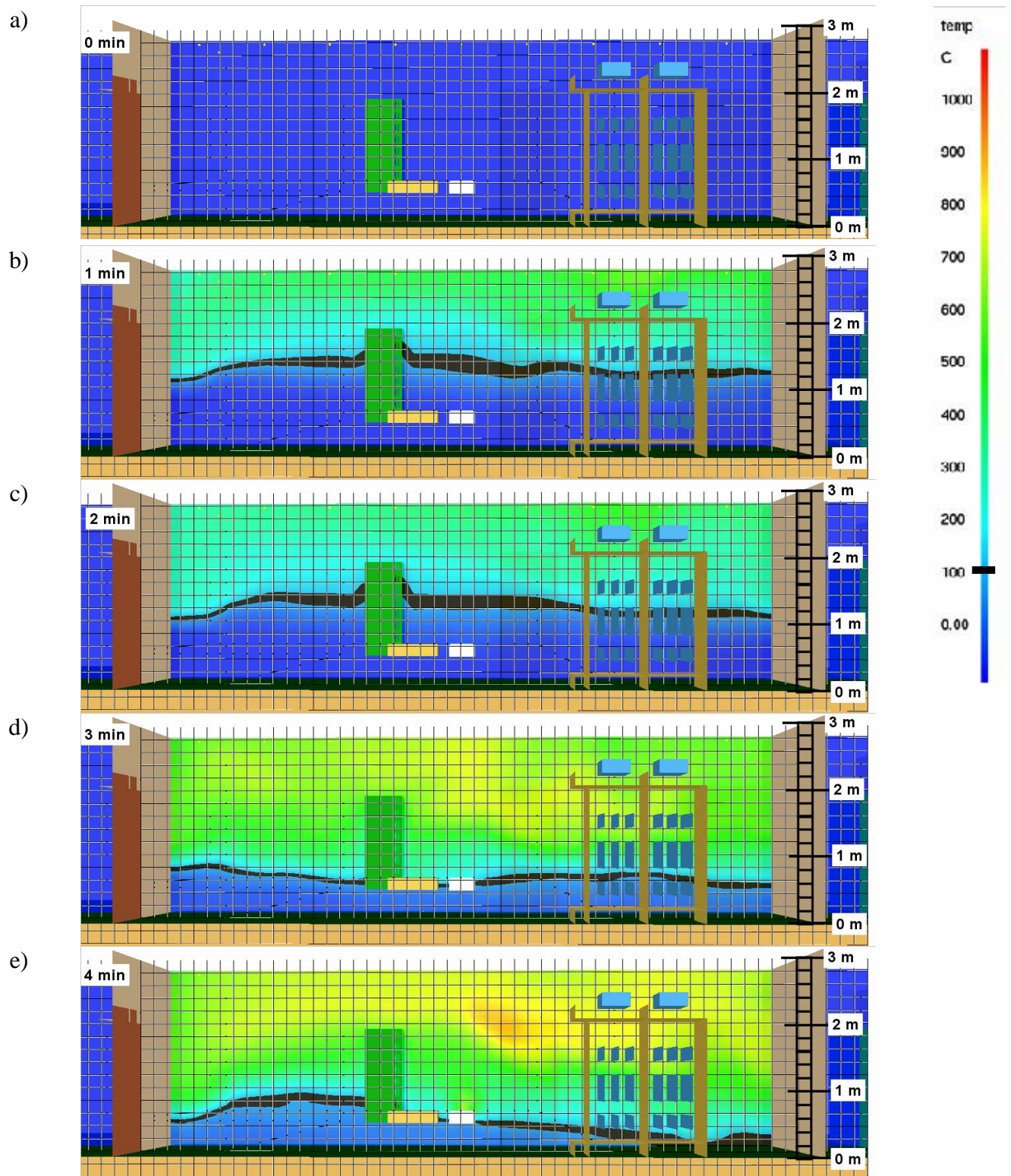
Kuva 61. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu jättäen raon, länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän kuumen kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.

### 5.3 Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin

Tulokset tapauksessa, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin, esitetään kuvissa Kuva 62-Kuva 69. Kuvien esittämät seikat ovat samat kohdissa 5.1 ja 5.2.

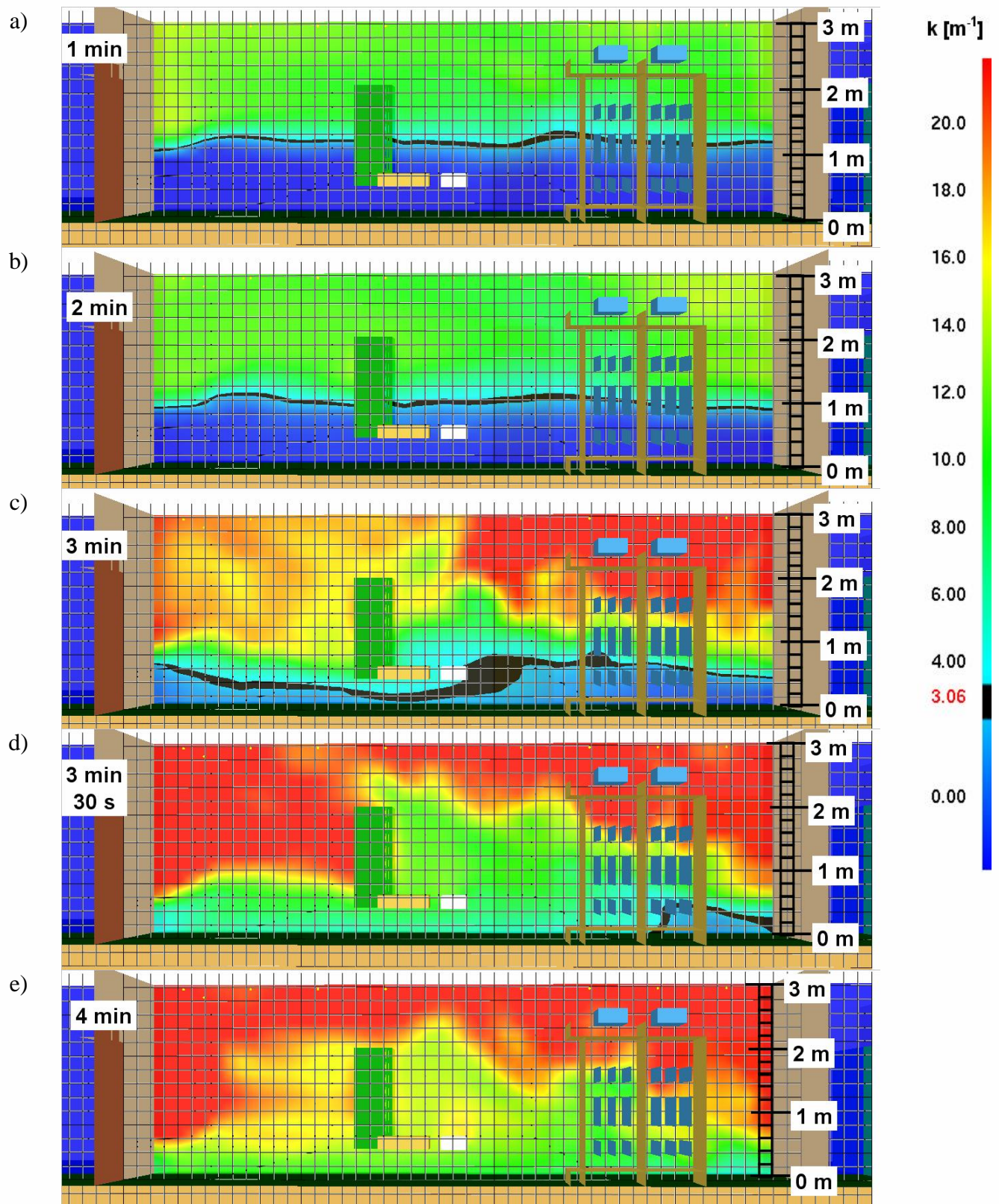


Kuva 62. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin: kuuman kerroksen lämpötilat tasossa  $z = 2,8$  m.

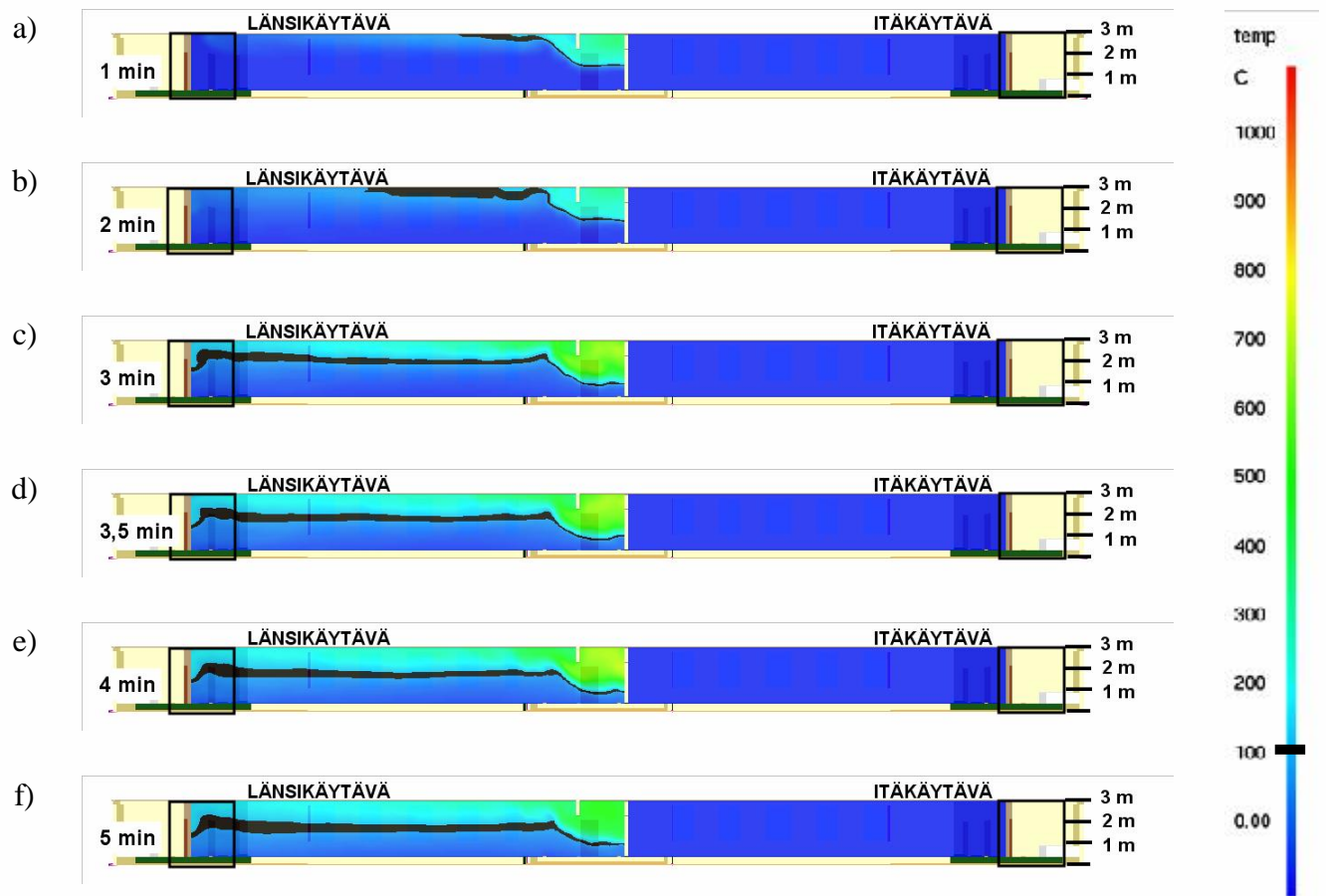


Kuva 63. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin: palokäytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.



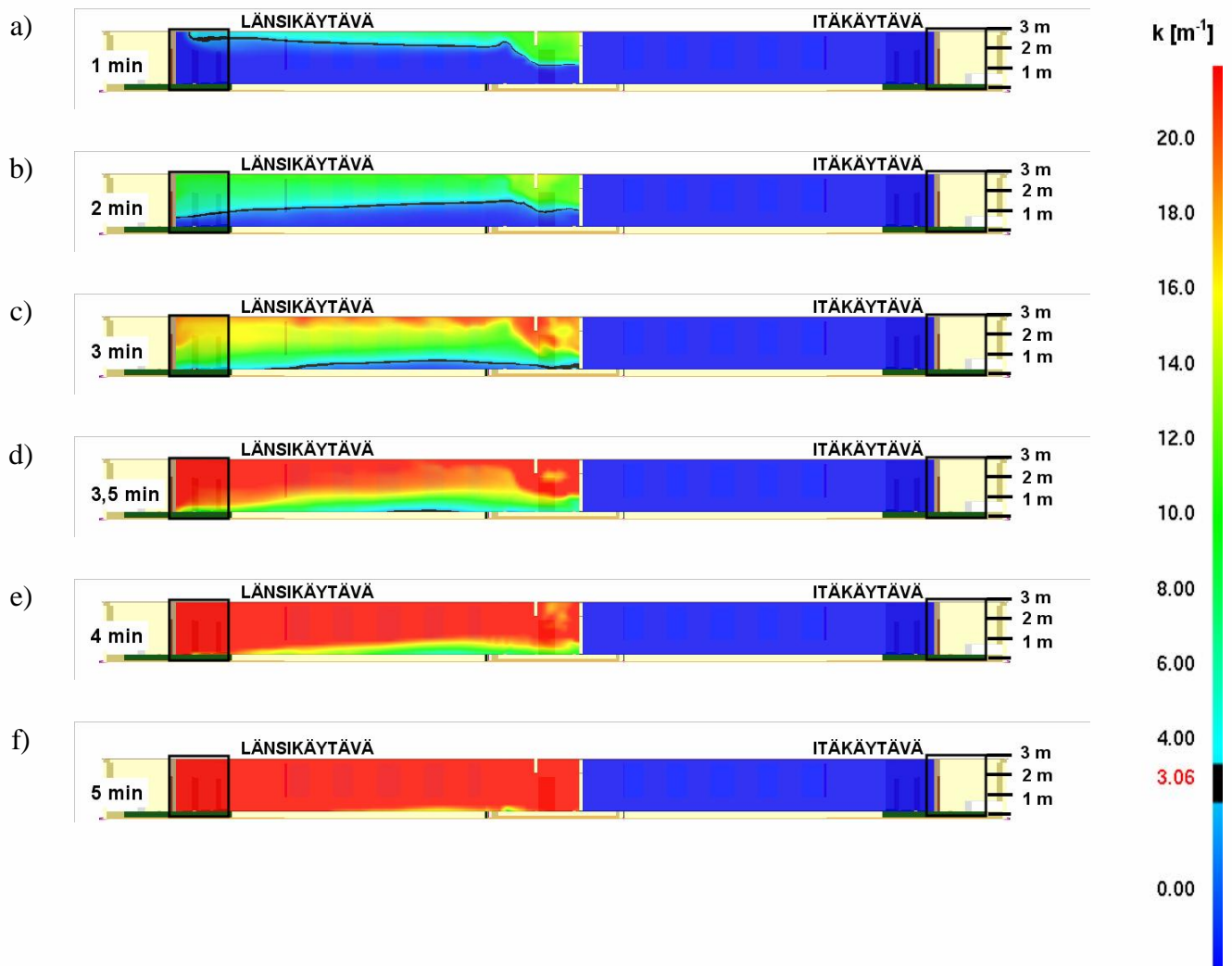


Kuva 64. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin: palokäytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.

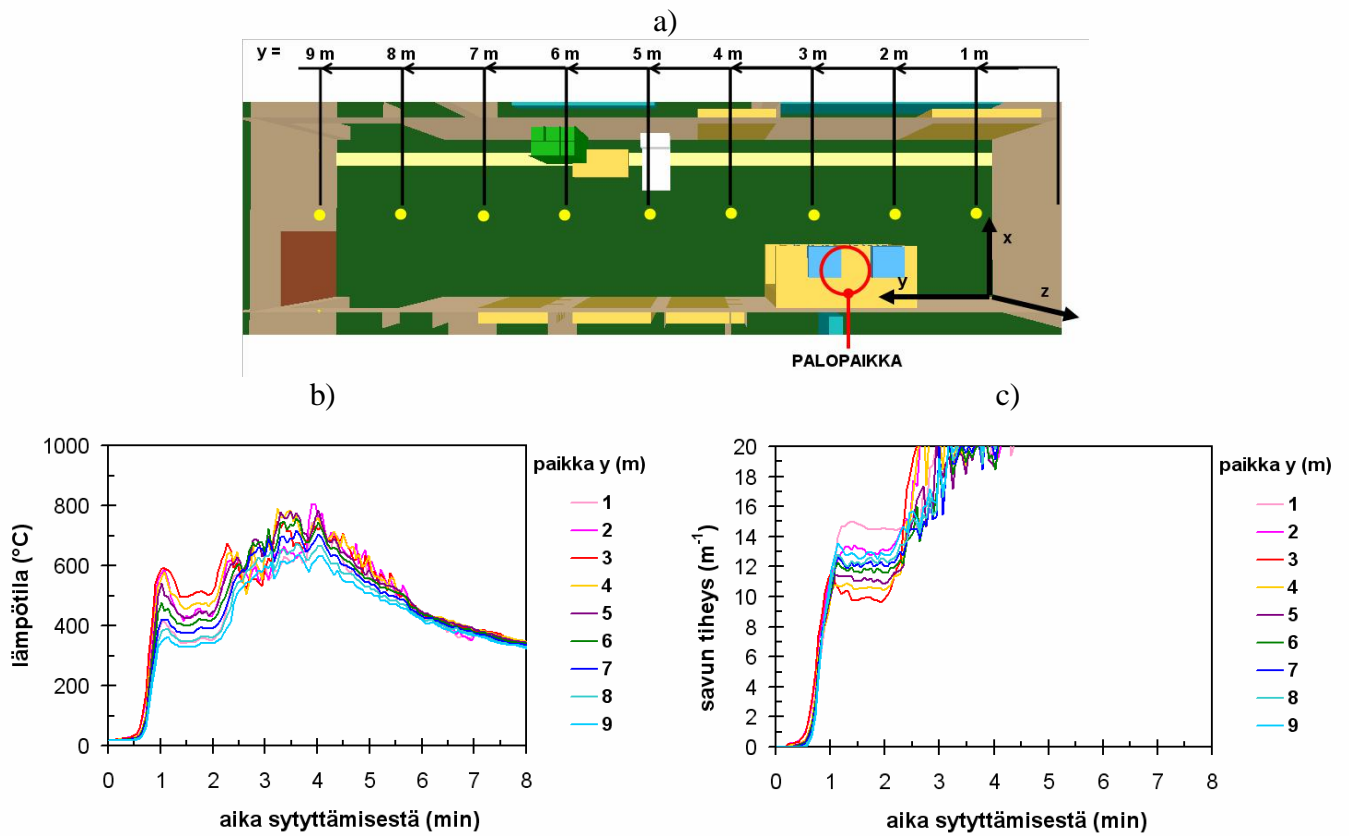


Kuva 65. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin: itä-länsi -käytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.



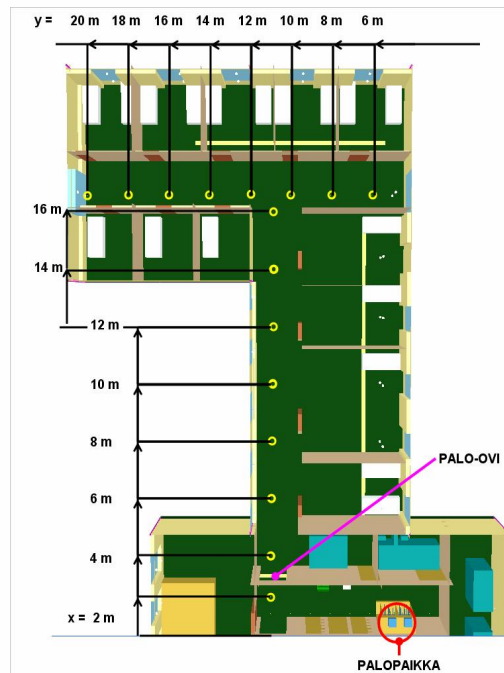


Kuva 66. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin: itä-länsi -käytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.

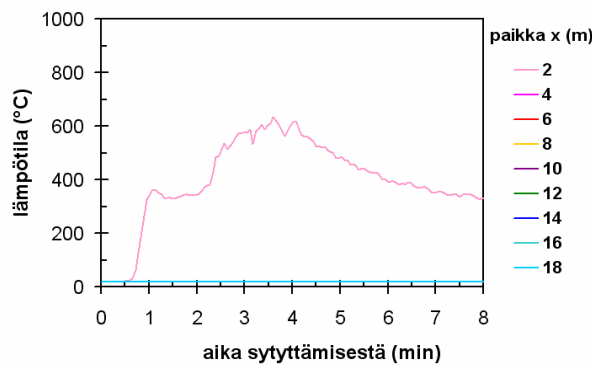


Kuva 67. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin, palokäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat ja c) savuntiheys.

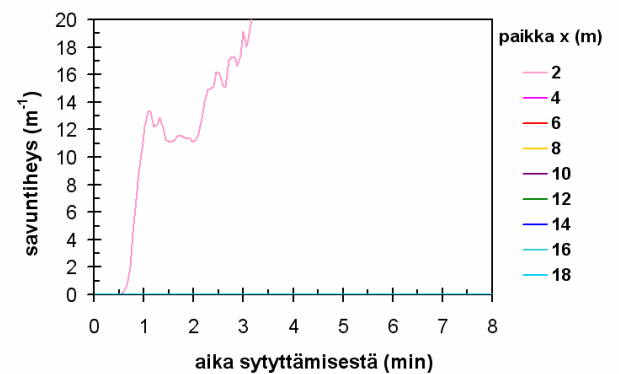
a)



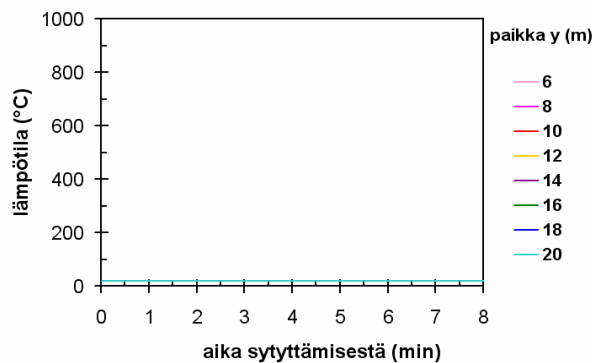
b)



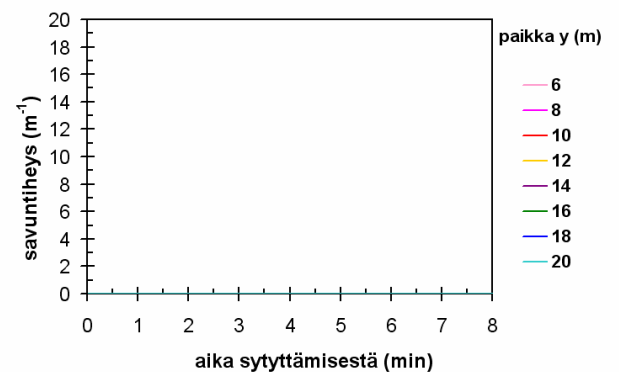
c)



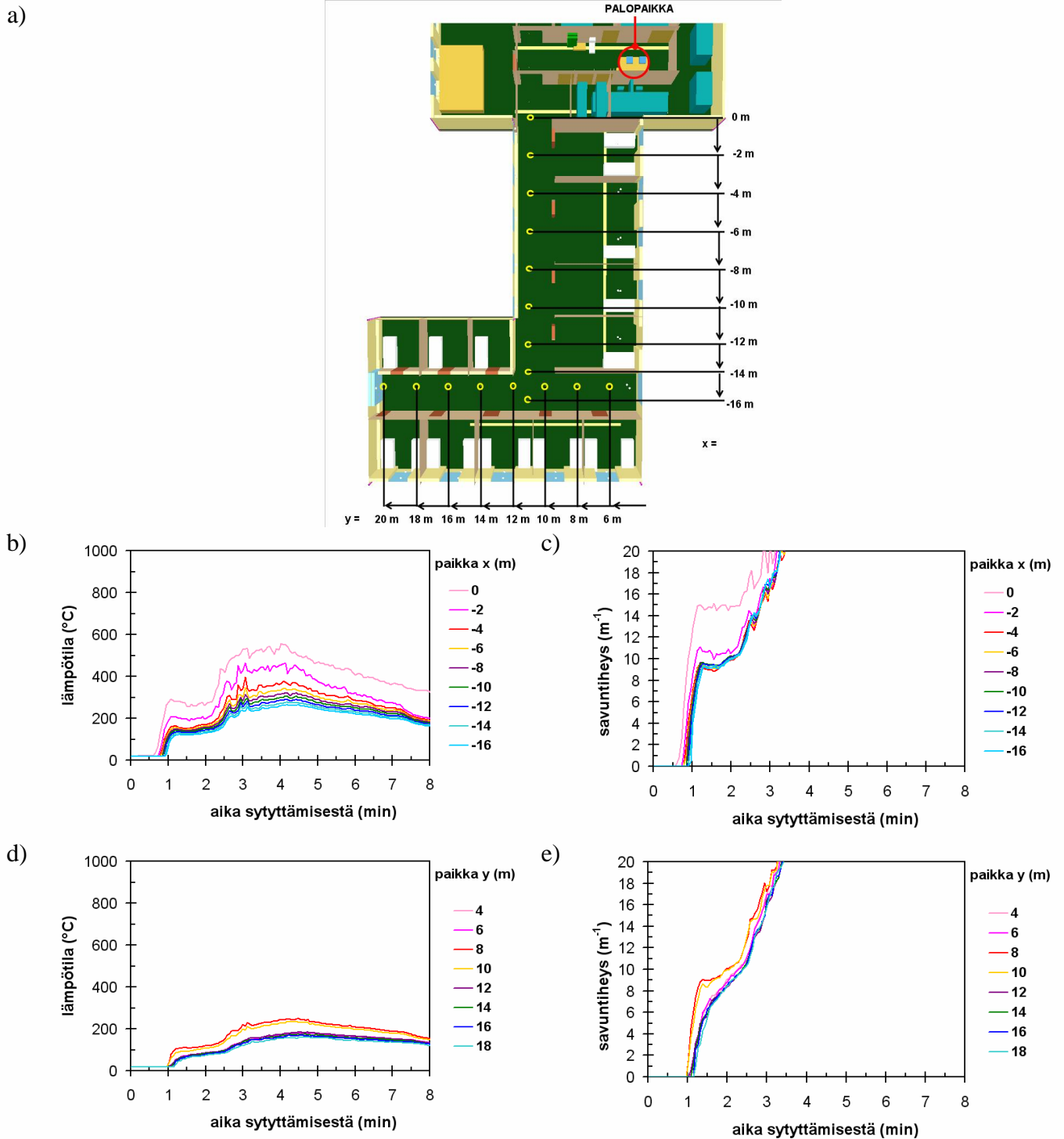
d)



e)



Kuva 68. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin, itäkäytävän ja itäpään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.



Kuva 69. Tapaus, jossa palo-ovi sulkeutuu täysin, länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.



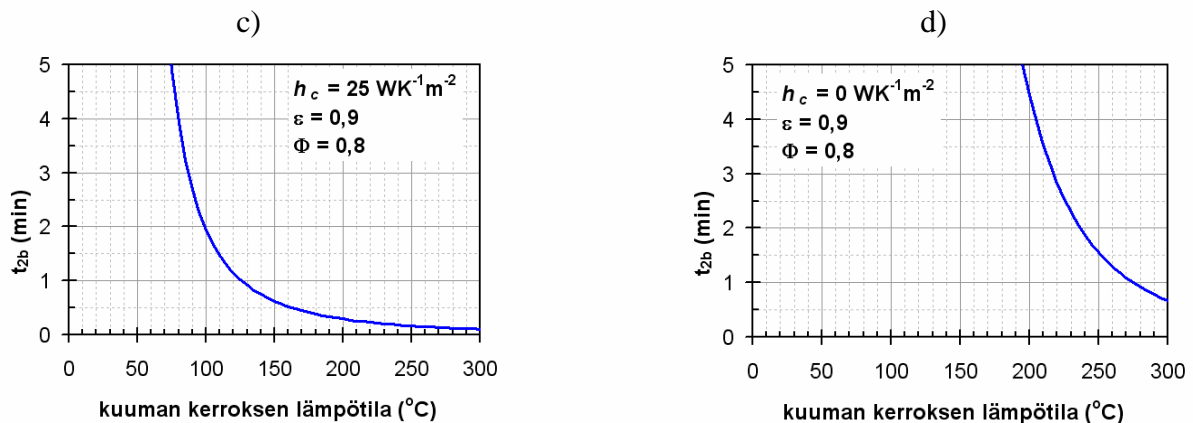
## 5.4 Tulosten tarkastelu

## 5.5 Esitettyjen suureiden tulkinnasta

Yllä olevissa esityksissä tarkastellaan olennaisimpia palon aiheuttamia muutoksia tilan olosuhteissa eli lämpötilan nousua ja savuntiheyden kasvamista. Näiden tekijöiden perusteella voidaan arvioida riittävän hyvin myös esim. lämpösäteilyyn ja palokaasujen myrkyllisyyteen liittyviä uhkia.

Palon aiheuttamien lämpötilojen ja niiden ihmisille aiheuttaman uhan arvioinnissa voidaan käyttää toisen (2.) asteessa palovamman muodostumisvaaraa. Tällainen palovamma on pinnallinen ihovaurio (ks. liite B), jossa palanut alue ulottuu ihon syvempiin pintakerroksiin ja ihon pinnalle muodostuu rakkuloita, joiden muodostuminen saattaa kestää kaksikin vuorokautta. Vaurioalue on punoittava, turvonnut ja erittäin kivulias. Alla olevassa kuvassa esitetään arvio 2. asteen palovamman muodostumisen aiheuttavan lämpöaltistuksen kestoajan riippuvuudelle palotilaan muodostuvan kuuman kerroksen lämpötilasta. Sen mukaan toisen asteen palovamma muodostuu erityyppisissä lämpöaltistuksissa seuraavasti:

1. Tilanteessa, jossa altistuvan henkilön kehon osia on kuuman kerroksen sisällä, 2. asteen palovamma syntyy, jos iho altistuu 0,5-2 minuutin ajan kuuman kerroksen lämpötilalle, joka on noin 100-150 °C.
2. Tilanteessa, jossa altistuvan henkilön ja kuuman kerroksen välillä ei ole suoraa kosketusyhteyttä, 2. asteen palovamma syntyy, jos iho altistuu noin 1-5 minuutin ajan kuuman kerroksen lämpötilalle, joka on noin 200-250 °C.

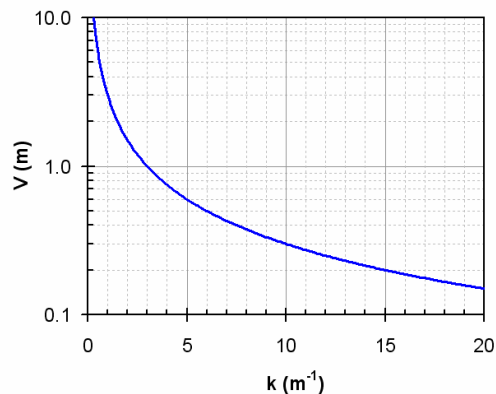


Kuva 70. Arvio 2. asteen palovamman muodostumisen aiheuttavan lämpöaltistuksen kestoajan  $t_{2b}$  riippuvuudelle palotilaan muodostuvan kuuman kerroksen lämpötilasta (tuloksen perustelu esitetään liitteessä B): a) lämpö siirtyy sekä konvektion että säteilyn välityksellä ja b) lämpö siirtyy vain säteilyn välityksellä.

Tilan savuisuus esitetään savuntiheyttä kuvaavan suureen  $k$  (yksikkö  $\text{m}^{-1}$ ) avulla, joka ilmaisee, miten voimakkaasti savu pimentää tilaa. Savuntiheys vastaa näkyvyyttä  $V$  (yksikkö  $\text{m}$ ) välillä kääntäen verrannollisesti eli

$$V = \frac{C}{k}, \quad (12)$$

missä valo heijastaville pinnoille vakiolle  $C$  käytetään yleensä arvoa 3 [29], jolloin esim. arvoa  $k = 3 \text{ m}^{-1}$  vastaa  $V = 1 \text{ m}$ :n näkyvyys. Tätä relaatiota havainnollistetaan alla olevassa kuvassa.



Kuva 71. Näkyvyyden  $V$  ja savutiheyttä kuvaavan suureen  $k$  välinen riippuvuus valoa heijastaville pinnoille. Huomaa, että pystyasteikko on logaritminen.

### 5.5.1 Pitkäniemen sairaalassa tapahtunutta tulipaloa vastaavan tilanteen simuloinnit

Pitkäniemen sairaalassa tapahtuneessa tulipalossa palo-ovi sulkeutui vain osittain jättäen n. 30 cm leveän aukon. Se vastaa siis edellä kohdassa käsiteltyä 5.2 tapausta (tapaus b).

#### 5.5.1.1 Kuumien kaasujen ja savun leviämisen yleiskuvas

Kuvasta Kuva 54 nähdään, että palossa muodostuvassa kuumassa ja savuisessa kerroksessa kuumat kaasut ja siten myös savu leviävät varsin nopeasti:

- 100 °C:een lämpötilaa vastaava rintama täyttää palokäytävän ja etenee itä-länsi -suuntaiselle käytävälle jo alkupalon aikana (simuloinnissa noin 1 minuutin kuluttua syttymisestä).
- Aikavälillä 1-2 minuuttia palon voimakkuus hiipuu ja siksi tilanne ei juurikaan muutu tällä aikavälillä (kuumia kaasuja ja savua leviää hieman länsikäytävään, mutta ei itäkäytävään)
- Aikavälillä 2-3 minuuttia palo kasvaa lähellä suurinta voimakkuuttaan ja kuumat kaasut ja savu leviää koko länsikäytävään saavuttaen länsipään poikkikäytävän. Itäkäytävällekin leviää kuumia kaasuja ja savua siten, että 100 °C:een lämpötilaa vastaava rintama saavuttaa noin käytävän puolen välin.
- Aikavälillä 3-4 minuuttia palo palaa suurimmalla voimakkuudellaan siten, että se alkaa hiipua noin 4 minuutin jälkeen. Tällä aikavälillä länsikäytävän kuumien kerroksen lämpötila ja savuisuus kasvavat ja 100 °C:een lämpötilaa vastaava rintama täyttää länsipään poikkikäytävän. Itäkäytävän kuumien kerroksen olosuhteet eivät juuri muutu siitä, millaiset ne olivat 3 minuutin kohdalla; kuuma kerros ulottuu hieman kauemmas kuin 3 minuutin kohdalla, mutta 100 °C:een lämpötilaa vastaava rintama ei ole vielä saavuttanut itäpään poikkikäytävää.

#### 5.5.1.2 Palokäytävän olosuhteet

Olosuhteet käytävässä, jossa palo tapahtuu, muuttuvat ihmisille vaarallisiksi varsin nopeasti. Kuvista Kuva 55, Kuva 56 ja Kuva 59 nähdään, että käytävään muodostuu heti alkupalon aikana (noin yhdessä minuutissa) kuuma ja savuinen kerros, jonka alarajan korkeus on aluksi (1-2 minuuttia) noin 1,2-1,5 m ja

laskee tämän jälkeen palon kiihtyessä alle 1 metrin tason. Kuumen kerroksen lämpötila on satoja asteita ja savuntiheys suuruusluokkaa  $10 \text{ m}^{-1}$ , joka vastaa hyvin vähäistä näkyvyyttä (muutamia kymmeniä senttimetrejä). Kuumassa kerroksessa vallitsevat olosuhteet ovat siis ihmiselle erittäin vaaralliset aivan alkupalosta lähtien.

Kuumen kerroksen alapuolella on selvästi viileämpi kerros. Jos käytävässä mahdollisesti olevat henkilöt kumartuvat siten, että kuuma kerros ei altista heitä suoraan, niin he voisivat sietää olosuhteita parin ensimmäisen minuutin ajan. Tämän jälkeen, kun palo alkaa kiihtyä kohti täyden palamisen vaihetta, olosuhteet tulevat ihmiselle sietämättömiksi myös tässä viileämmässä kerroksessa.

### 5.5.1.3 Itäkäytävän ja itäpäähän poikkikäytävän olosuhteet

Kuvista Kuva 57 ja Kuva 58 nähdään, että itäkäytävään muodostuva kuuma ja savuinen kerros on lämpötilan suhteen selvästi vähemmän kriittinen kuin savuisuuden suhteen.

Jos kuumen kerroksen rajaksi valitaan esim.  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , niin itäkäytävään alkaa muodostua kuuma kerros noin 2 minuutin kuluttua syttymisestä (Kuva 57). Tämä lämpötilakerrostuma on koko palon ajan varsin ohut (sen alareuna pysyy noin 2,5 m:iä ylempänä). Lämpötilan suhteen itäkäytävän ja itäpäähän poikkikäytävän olosuhteet säilyvät ihmiselle siedettävänä koko palon ajan. Jos käytävässä mahdollisesti oleva henkilö lähestyy palokäytävää, niin häneen kohdistuu palo-oven raosta lämpörasitus, jota voi ylittää ihmisen sietorajan, kun etäisyys henkilön ja palokäytävän välillä on pieni.

Itäkäytävään muodostuvan kuumen kerroksen savuntiheys nousee siten, että se on 1-2 minuutin välillä tasolla  $5 \text{ m}^{-1}$  (näkyvyys noin 0,6 m) ja nousee tämän jälkeen vähitellen yli  $10 \text{ m}^{-1}$ :n tasolle (näkyvyys alle 0,3 m). Kerroksen alareuna on aina noin 2 minuuttiin asti yli 2 metrin tasolla. Koska savun kerrostuminen on hyvin jyrkkä (alempi kerros on oleellisesti savuton), tämä tarkoittaa sitä, että aina 2 minuuttiin saakka savu ei haitta ihmisten toimintaa ja liikkumista. Aikaan 3 minuuttia mennessä savukerroksen alareuna laskeutuu poikkikäytävän päässä 1 m:n tasolle ja säilyy lähempänä palokäytävää 2 m:n tasolla (tämä ilmiö johtuu siitä, että savu kylmenee kun se menettää lämpöenergiaa käytävän reunapintoihin ja siksi sen noste pienenee etäisyyden palolähteessä kasvaessa). Tähän aikaan mennessä käytävässä ihminen voisi kulkea käytävässä kumartumalla savun alareunan alapuolelle. Noin 4-5 minuutin jälkeen savukerros on laskeutunut niin alas, että sen välttäminen kumartumalla tulee yhä hankalammaksi.

### 5.5.1.4 Länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän olosuhteet

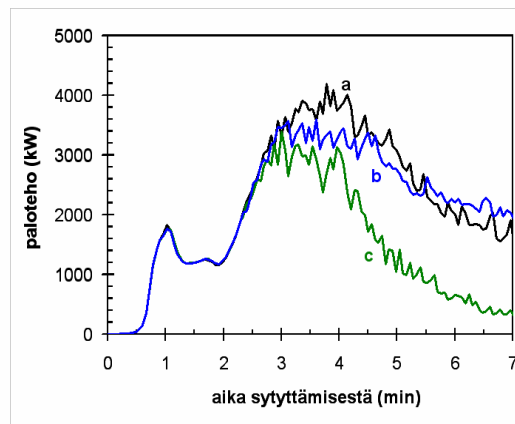
Länsikäytävään muodostuu kuuma kerros (lämpötila yli  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) noin 1 minuutissa (Kuva 57). Lähelle palokäytävää muodostuu suunnilleen vakiokokoisena pysyvä alue, jonka lämpötila on välillä 1-2 minuuttia noin  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  ja nousee tämän jälkeen  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ :n tasolle. Muulla länsikäytävässä kuumen kerroksen alareunan korkeus laskee vähitellen saavuttaen noin 2 m:n tason 5 minuutissa. Länsipään poikkikäytävässä kuumen kerroksen alareunan korkeus on hieman länsikäytävän tasoa suurempi.

Länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän savuisuus nousee nopeasti ihmisen kulkemista haittaavalle ja lopulta sen estävälle tasolle (Kuva 58): 1 minuutin kohdalla savukerroksen alaraja on vielä yli 2,5 m:n tasolla, mutta laskeutuu 3 minuuttiin mennessä lähelle lattian tasoa. Savukerroksen savuntiheys nousee noin 3 minuutissa tasolle  $20 \text{ m}^{-1}$  (Kuva 61), mikä vastaa hyvin alhaista näkyvyyttä (10-20 cm).

## 5.5.2 Eri palo-oven toimintatapoja tarkastelevien simulointien tulosten vertailua

### 5.5.2.1 Palon voimakkuus

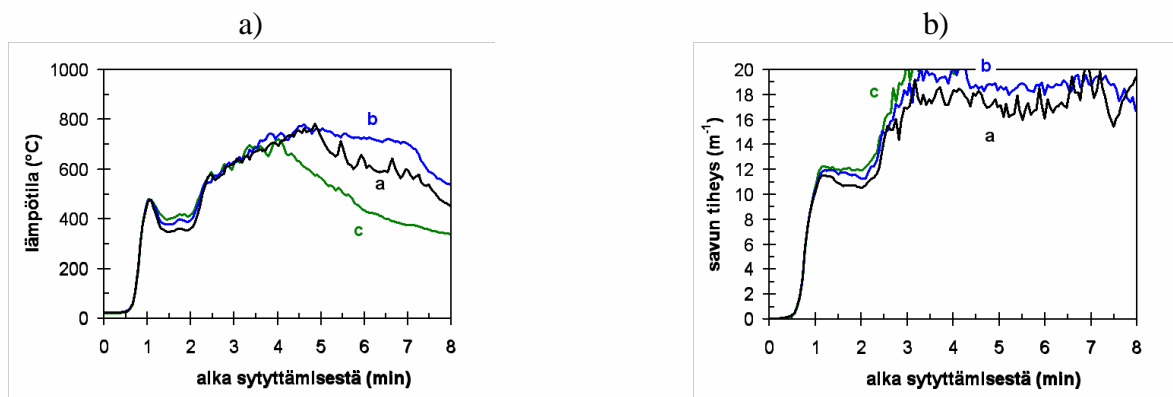
Palo on voimakkain tapauksessa, jossa palo-ovi ei sulkeudu lainkaan ja heikoin tapauksessa, jossa palo-ovi sulkeutuu kokonaan (Kuva 72). Tämä on luonnollinen seuraus siitä, että palo-oven ollessa auki palo saa enemmän happea kuin silloin kuin ko. ovi on kokonaan kiinni. Tilanne, jossa palo-ovi jää jonkin verran raolleen, ei poikkea paljoakaan tilanteesta, jossa ovi on kokonaan auki.



Kuva 72. Paloteho eri tapauksissa: a: palo-ovi ei sulkeudu lainkaan, b: palo-ovi sulkeutuu vain osittain jättäen n. 30 cm leveän aukon ja c: palo-ovi sulkeutuu kokonaan.

### 5.5.2.2 Palokäytävän olosuhteet

Olosuhteet käytävässä, jossa palo tapahtuu, ovat käytännön paloturvallisuuden kannalta (erityisesti palon alkuvaiheissa, jotka ovat henkilöturvallisuuden kannalta kriittisimmät, ks. Kuva 73) olennaisesti samat riippumatta palo-oven toiminnasta.

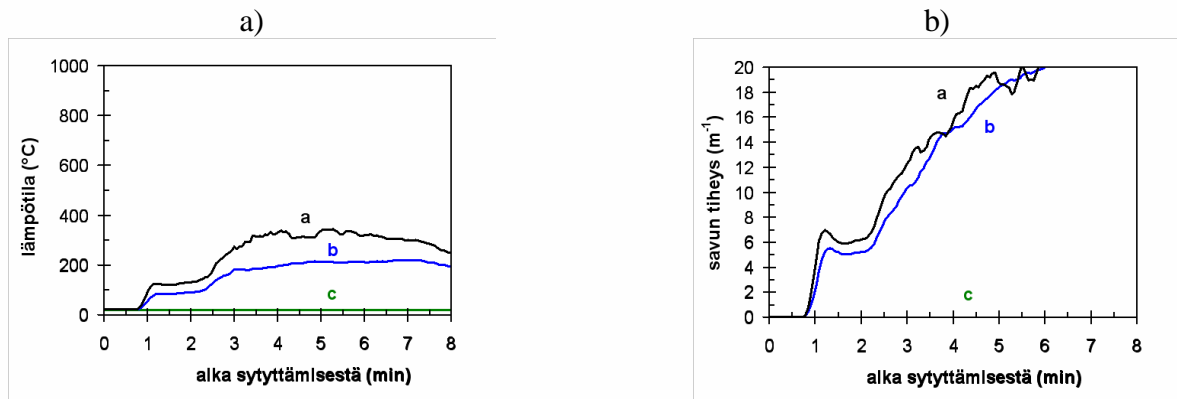


Kuva 73. Palokäytävän kuuman kerroksen keskimääräinen lämpötila (a) ja savuntiheys (b) eri tapauksissa: a: palo-ovi ei sulkeudu lainkaan, b: palo-ovi sulkeutuu vain osittain jättäen n. 30 cm leveän aukon ja c: palo-ovi sulkeutuu kokonaan.



### 5.5.2.3 Itäkäytävän ja itäpään poikkikäytävän olosuhteet

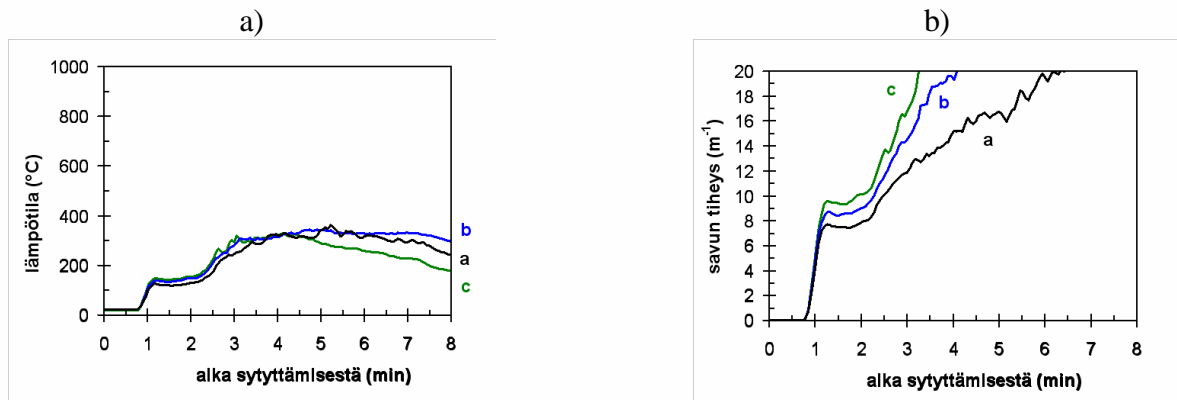
Olosuhteet itäkäytävässä ja itäpään poikkikäytävässä huonontuvat luonnollisesti sitä enemmän, mitä avoimempi palo-ovi on: suurin merkitys oven avoimuudella on kuuman savukerroksen alareunan korkeuden suhteen (kuvat Kuva 49, Kuva 57 ja Kuva 65 sekä kuvat Kuva 50, Kuva 58 ja Kuva 66) ja vähäisempi kuuman kerroksen lämpötilan ja savuisuuden suhteen (Kuva 74) (ellei ovi ole kokonaan kiinni, jolloin mitään palotuotteita ei pääse käytävään).



Kuva 74. Itäkäytävän kuuman kerroksen keskimääräinen lämpötila (a) ja savutiheys (b) eri tapauksissa: a: palo-ovi ei sulkeudu lainkaan, b: palo-ovi sulkeutuu vain osittain jättäen n. 30 cm leveän aukon ja c: palo-ovi sulkeutuu kokonaan.

### 5.5.2.4 Länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän olosuhteet

Länsikäytävässä ja länsipään poikkikäytävässä ihmisen toiminnan ja liikkumisen kannalta kriittisin tekijä on savukerroksen alareunan korkeus ja siinä vallitseva suuri savutiheys. Koska itäkäytävään pääsee sitä enemmän savua, mitä enemmän palo-ovi on auki, niin vastaavasti länsikäytävään tulee sitä *vähemmän* savua, mitä enemmän palo-ovi on auki (kuvat Kuva 50, Kuva 58 ja Kuva 66). Lämpötilan mukaan määritetty kuuman kerroksen alarajan korkeus voi laskeutua ihmisiä haittaavalle tasolle lähinnä tilanteessa, jossa palo-ovi on kokonaan kiinni (muissa tapauksissa kontakti kuumaan kerrokseen voidaan välttää kumartamalla). Myös kuuman kerroksen lämpösäteily haittaa vakavasti ja jopa voisi estää ihmisen toimintaa länsikäytävässä, koska kuuman kerroksen lämpötila nousee noin 300 °C:een tasolle (Kuva 75).



Kuva 75. Itäkäytävän kuuman kerroksen keskimääräinen lämpötila (a) ja savuntiheys (b) eri tapauksissa: a: palo-ovi ei sulkeudu lainkaan, b: palo-ovi sulkeutuu vain osittain jättäen n. 30 cm leveän aukon ja c: palo-ovi sulkeutuu kokonaan.

## 6 Automaattisen sammutuslaitteiston vaikutuksen tutkiminen

Tässä luvussa tutkitaan, miten automaattinen sammutuslaitteisto - sprinklerijärjestelmä -olisi vaikuttanut Pitkämäen sairaalassa tapahtuneen palon kulkun. Sprinklerijärjestelmän mallintaminen tehtiin samalla tavalla kuin PEO:lla tehtyjen kokeiden simuloinnin yhteydessä eli sprinklerisysteemiä kuvaavat suureet ovat

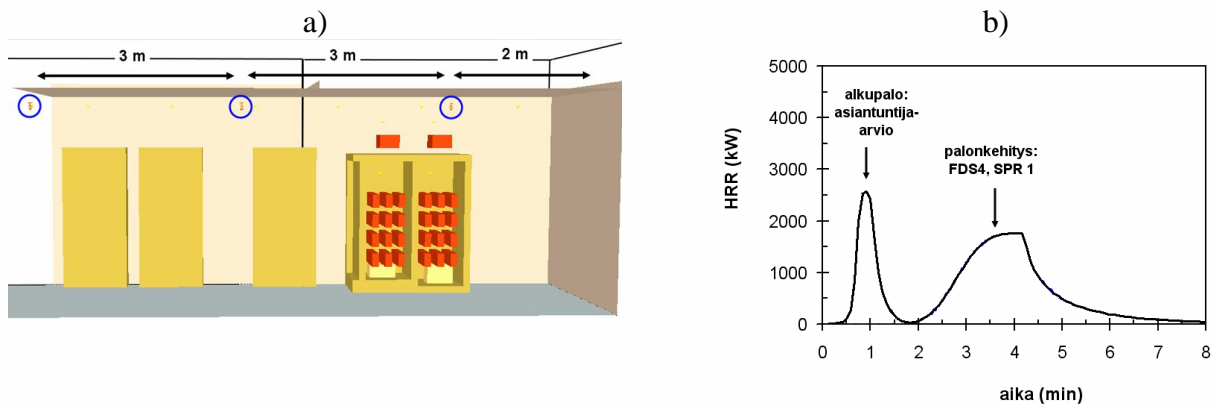
- vesivuo 5 mm/min,
- suojausala/sprinkleripää n. 9 m<sup>2</sup>,
- aktivoitumislämpötila  $T_{act} = 68$  °C,
- vasteaikaindeksi  $RTI = 100$  m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup>.

ja palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelun suhteen tarkasteltiin kahta vaihtoehtoa, jota esitetään kuvissa Kuva 30a ja Kuva 30b.

Palo-oven toiminnan suhteen simuloitava tapaus on se, jossa ovi jää raolleen eli tapahtunutta paloa vastaava tilanne.

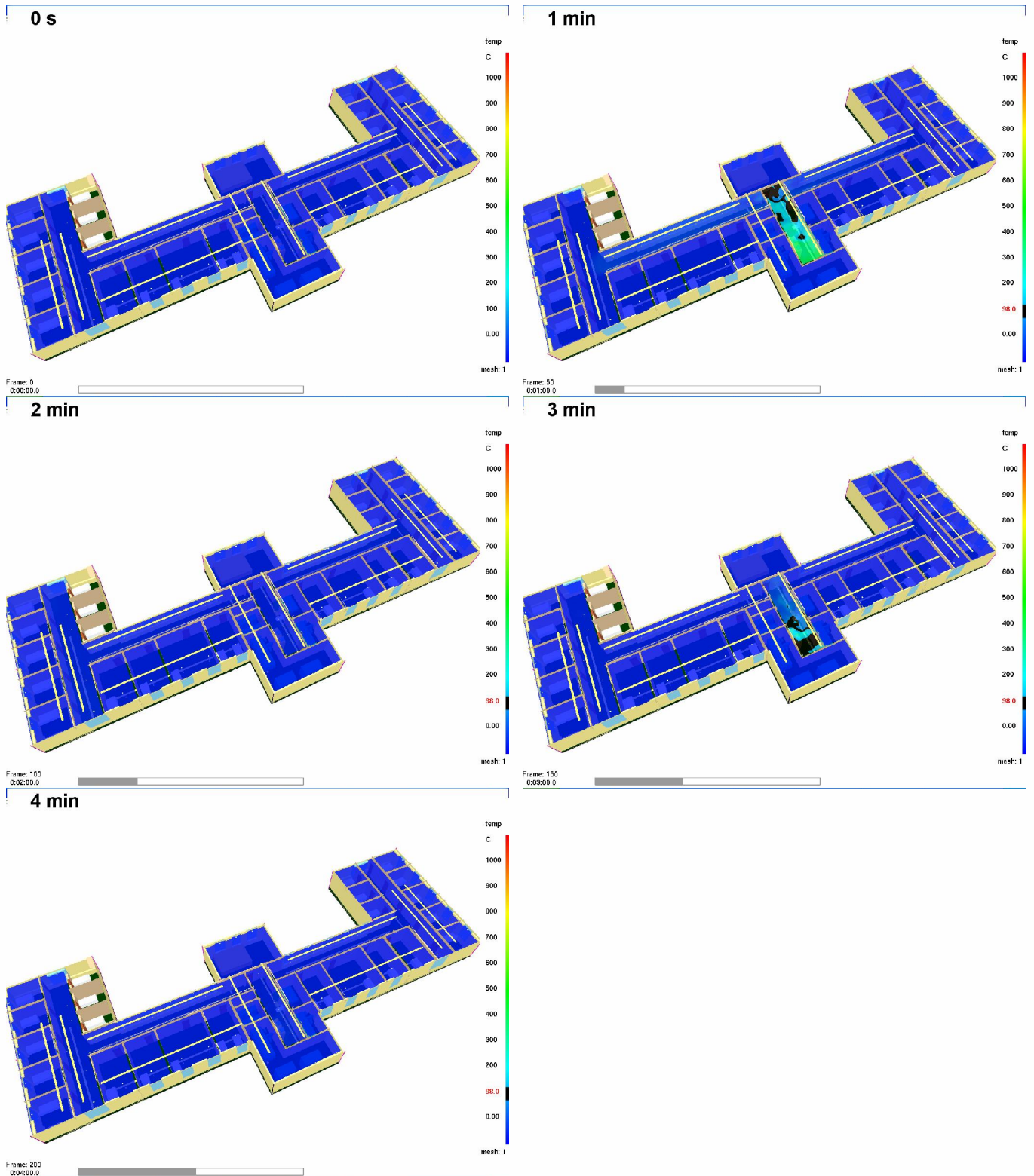
### 6.1 Palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelutapa 1

Palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelutapauksen 1 asetelma ja FDS-ohjelmalle syötteenä annettu palotehon ajallinen kehittyminen esitetään alla olevassa kuvassa.



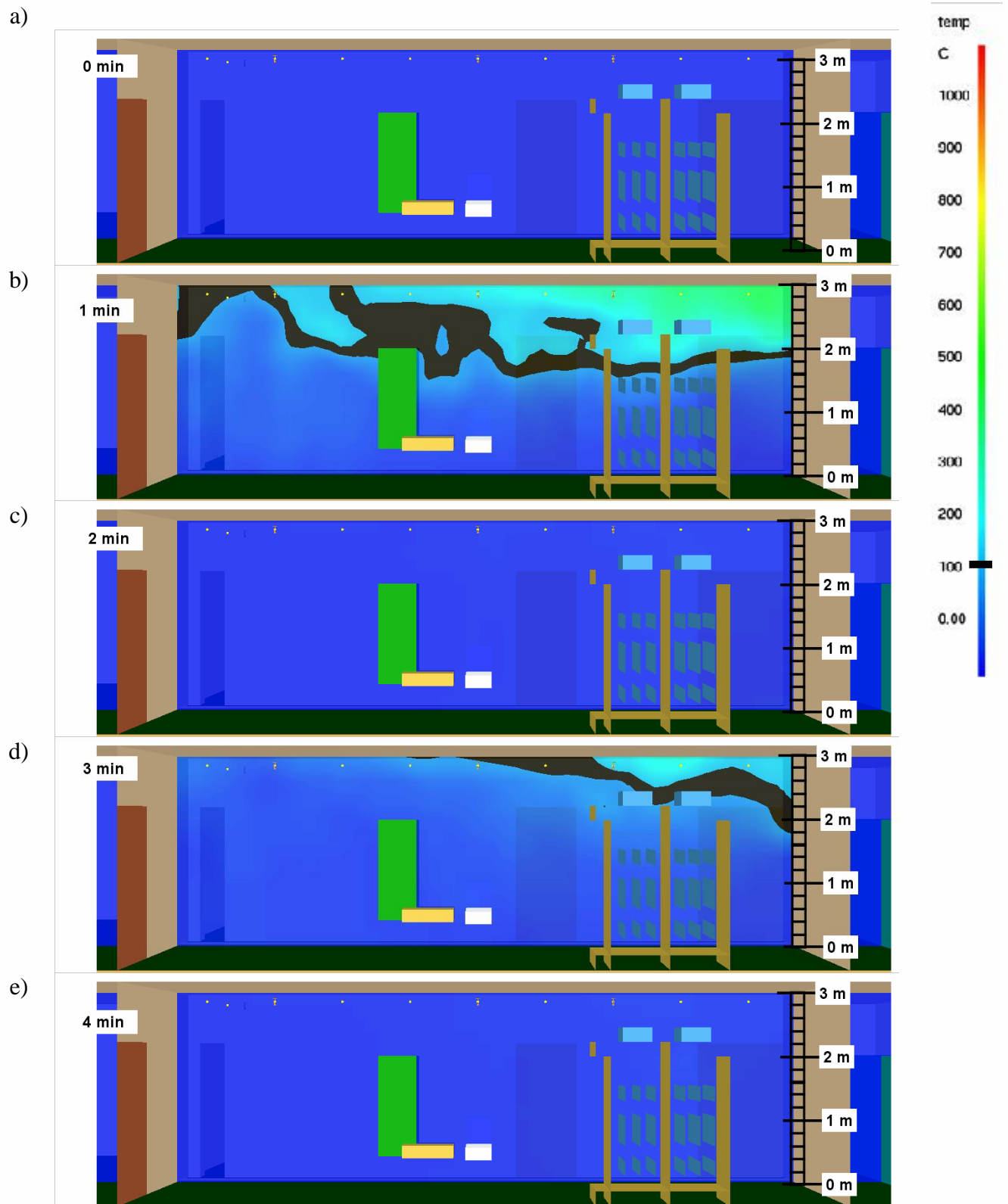
Kuva 76. Sprinkleripäiden sijoitustapa 1: sprinkleripäiden paikat palokäytävässä ja b) paloteho.

Tulokset tapauksessa, jossa palo-ovi sulkeutuu osittain jättäen 30 cm suuruisen raon, esitetään kuvissa Kuva 54- Kuva 61. Kuvien esittämät seikat ovat samat kohdassa 5.1.

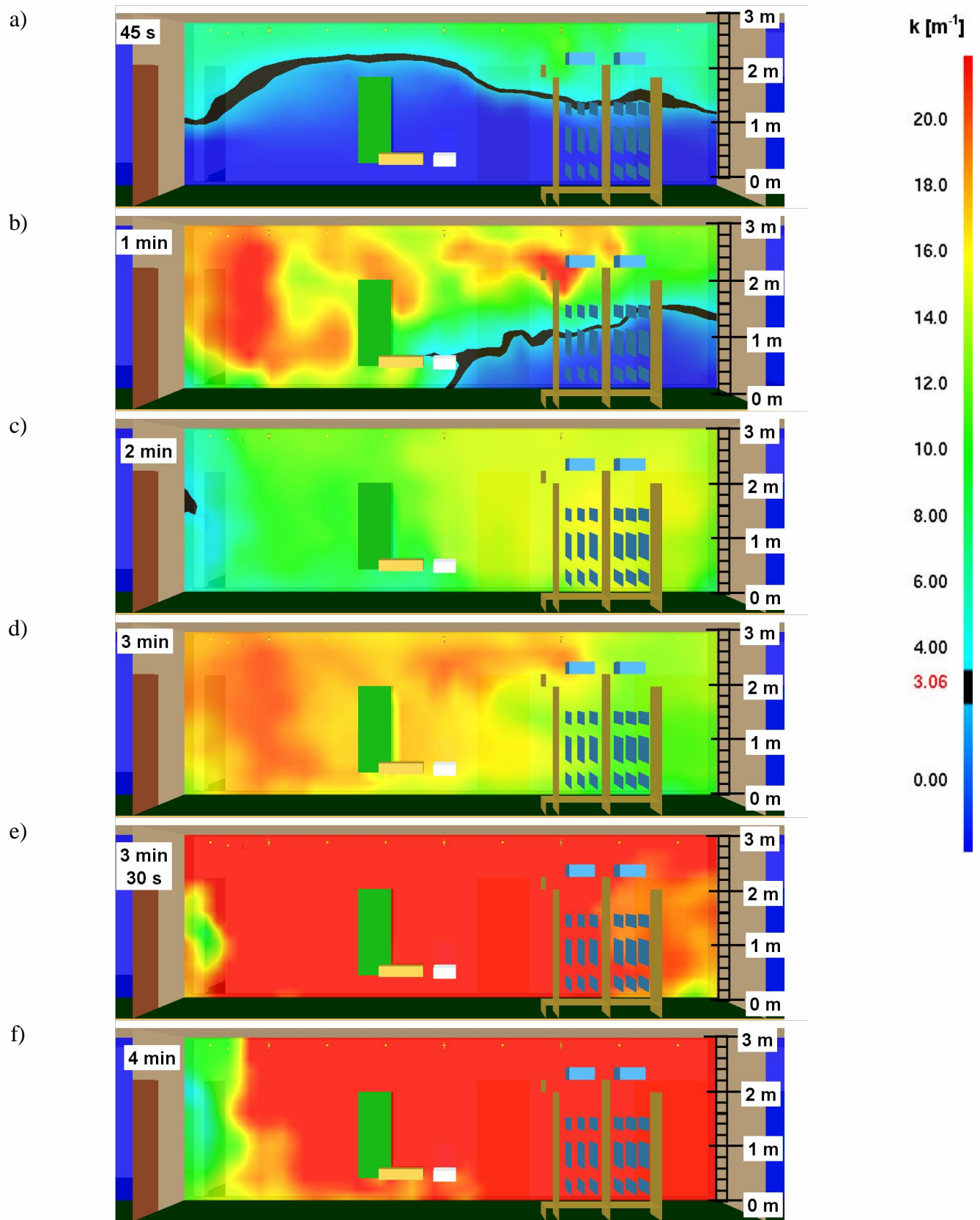


Kuva 77. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapaus 1: kuuman kerroksen lämpötilat tasossa  $z = 2,8$  m.

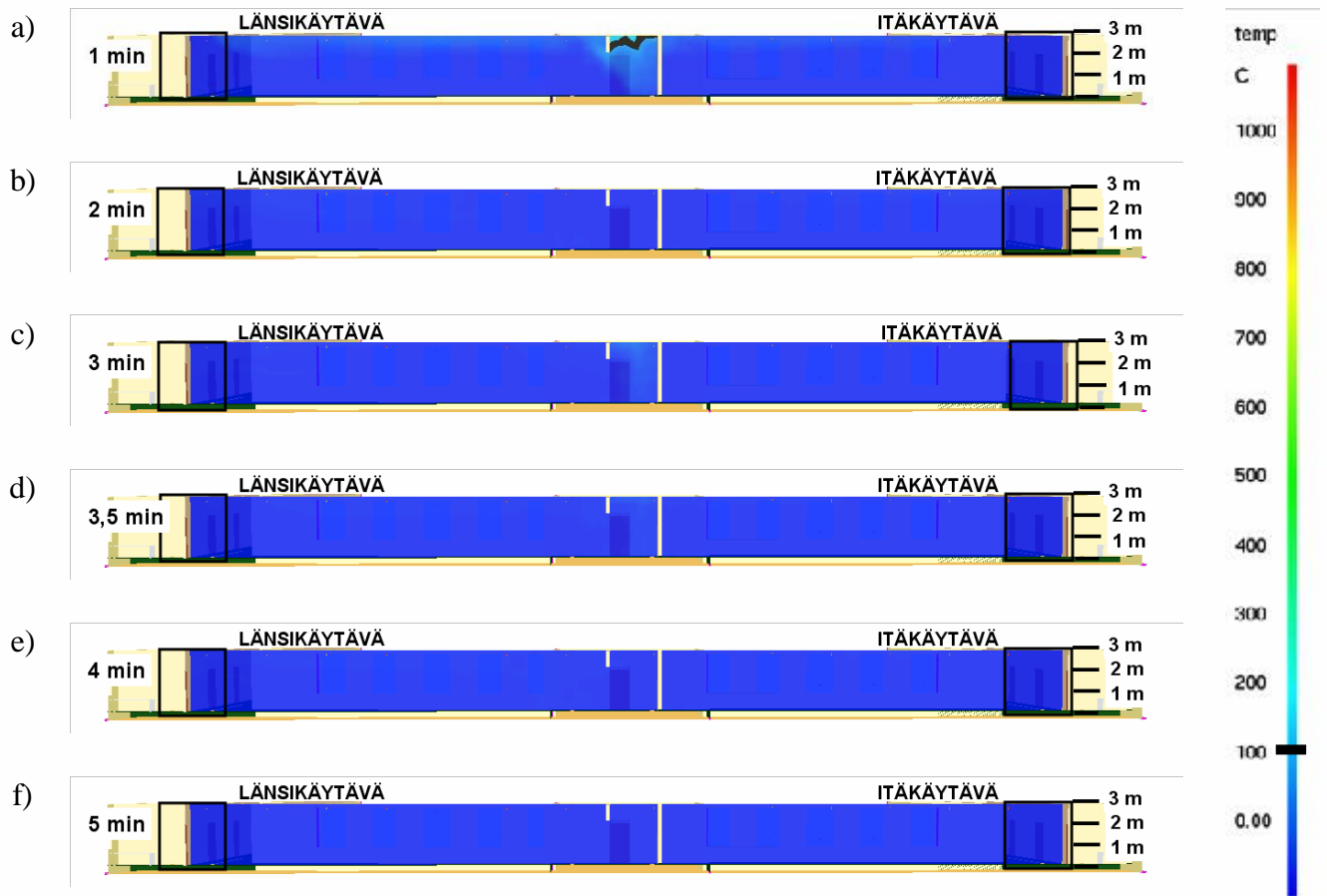




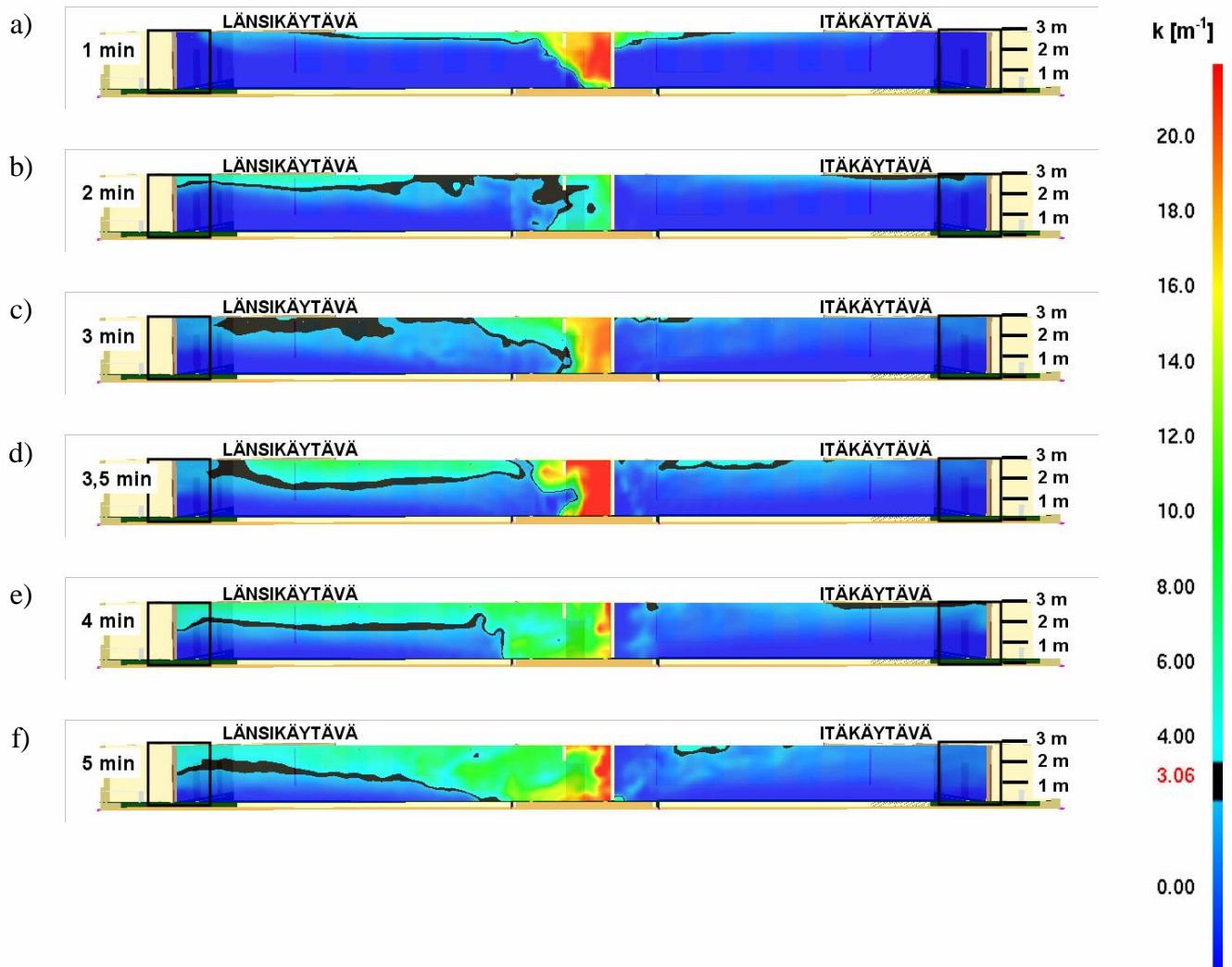
Kuva 78. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1: palokäytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.



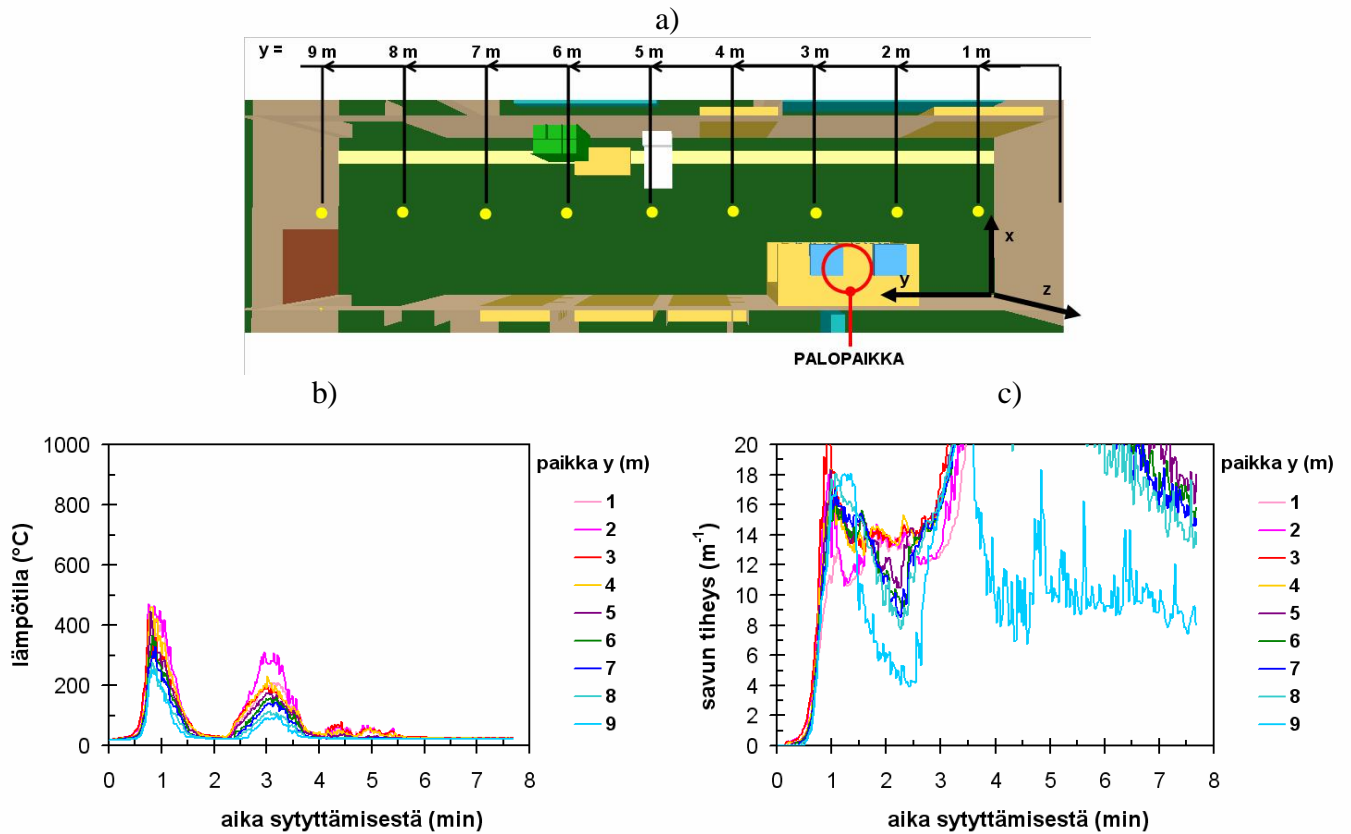
Kuva 79. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1: palokäytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.



Kuva 80. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1: itä-länsi -käytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.

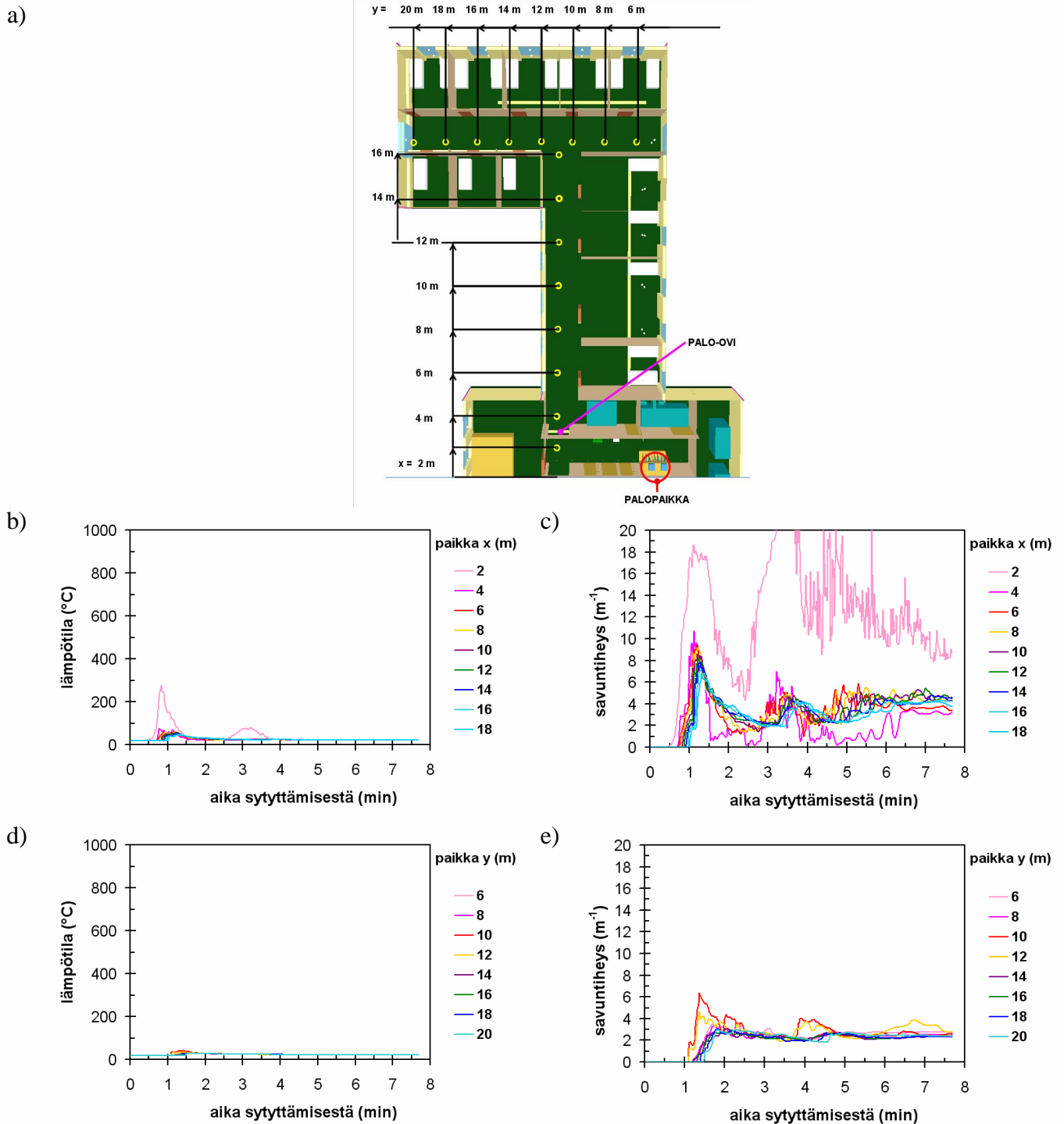


Kuva 81. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1: itä-länsi -käytävän savutiheysjakauma eri ajan hetkinä.

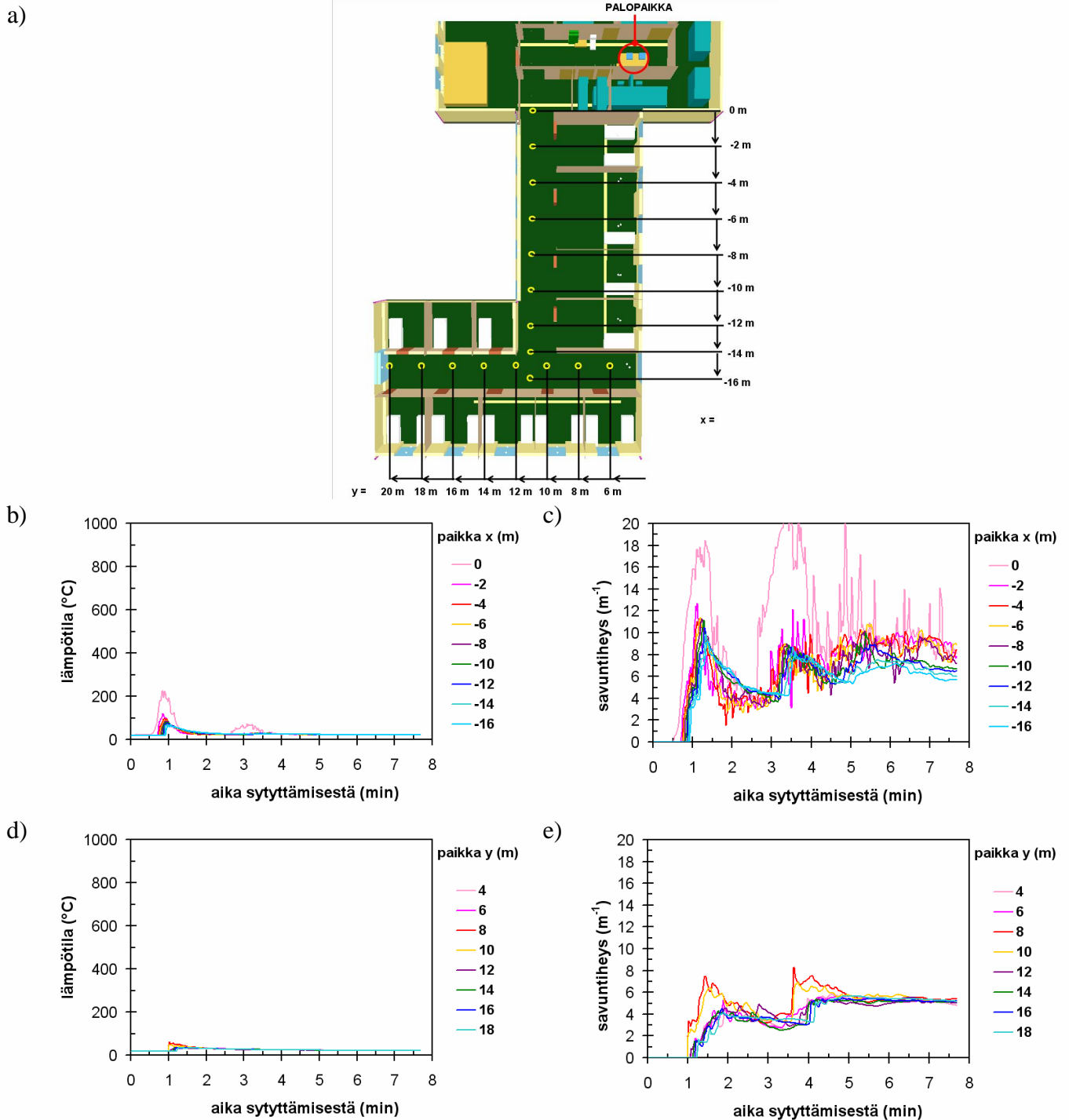


Kuva 82. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1, palokäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat ja c) savuntiheys.





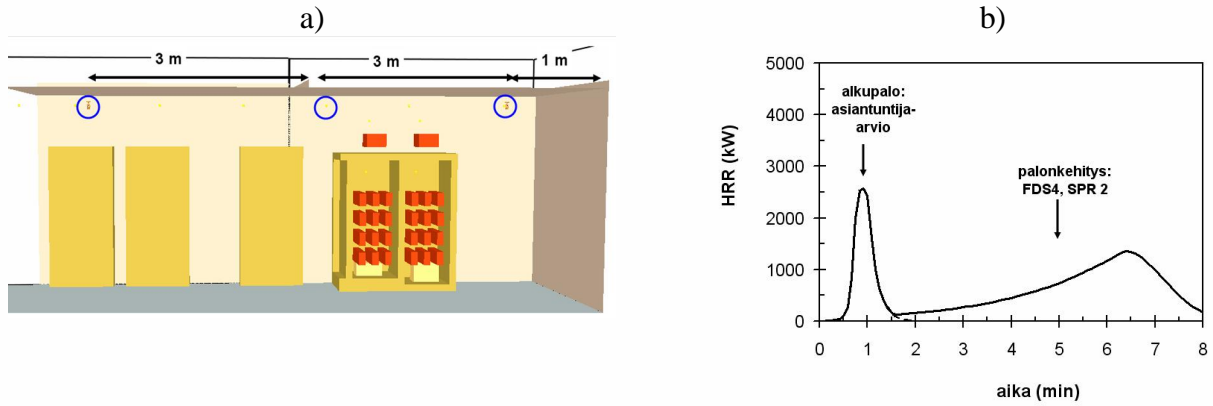
Kuva 83. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1, itäkäytävän ja itäpään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.



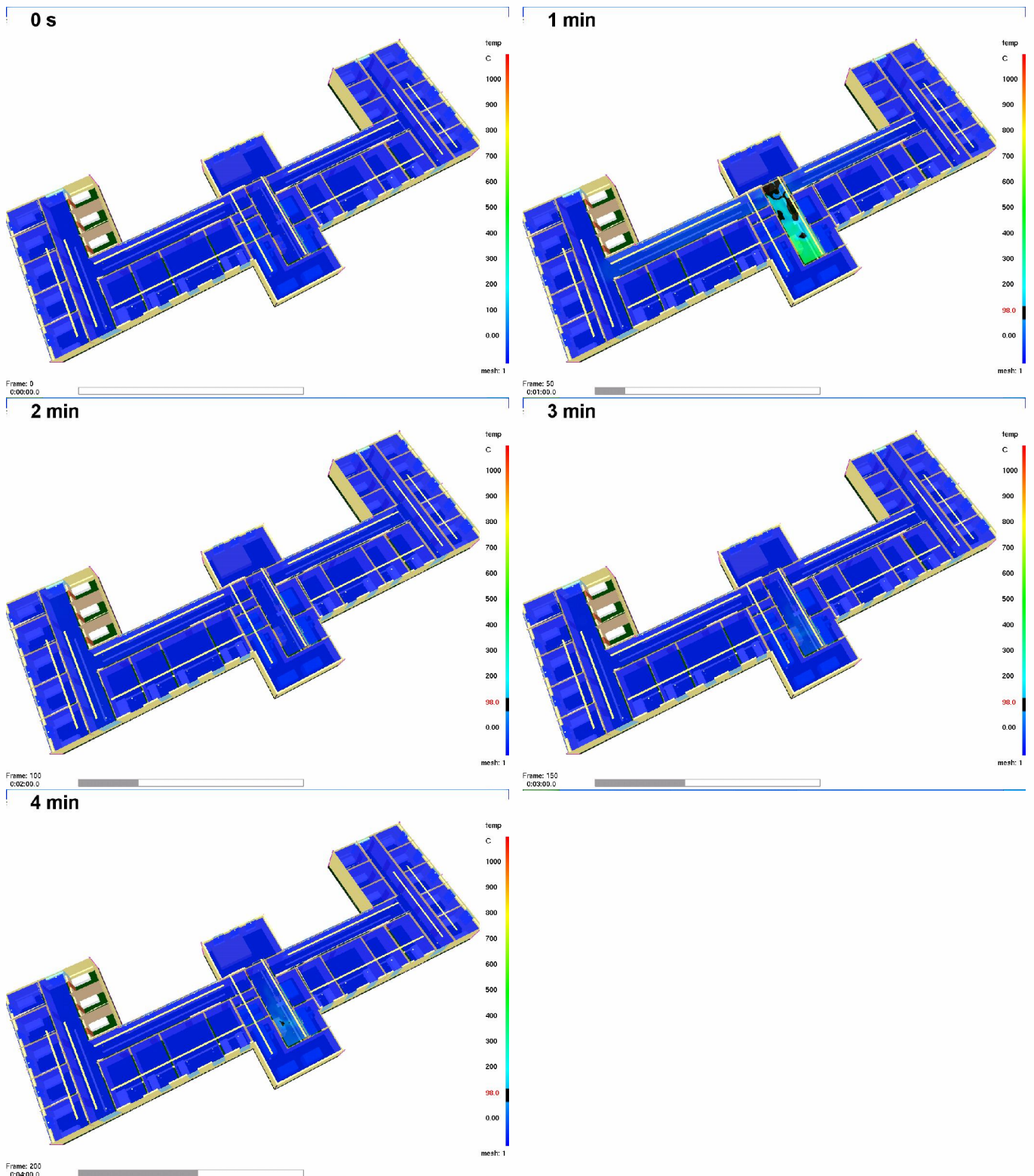
Kuva 84. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 1, länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.

## 6.2 Palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelutapa 2

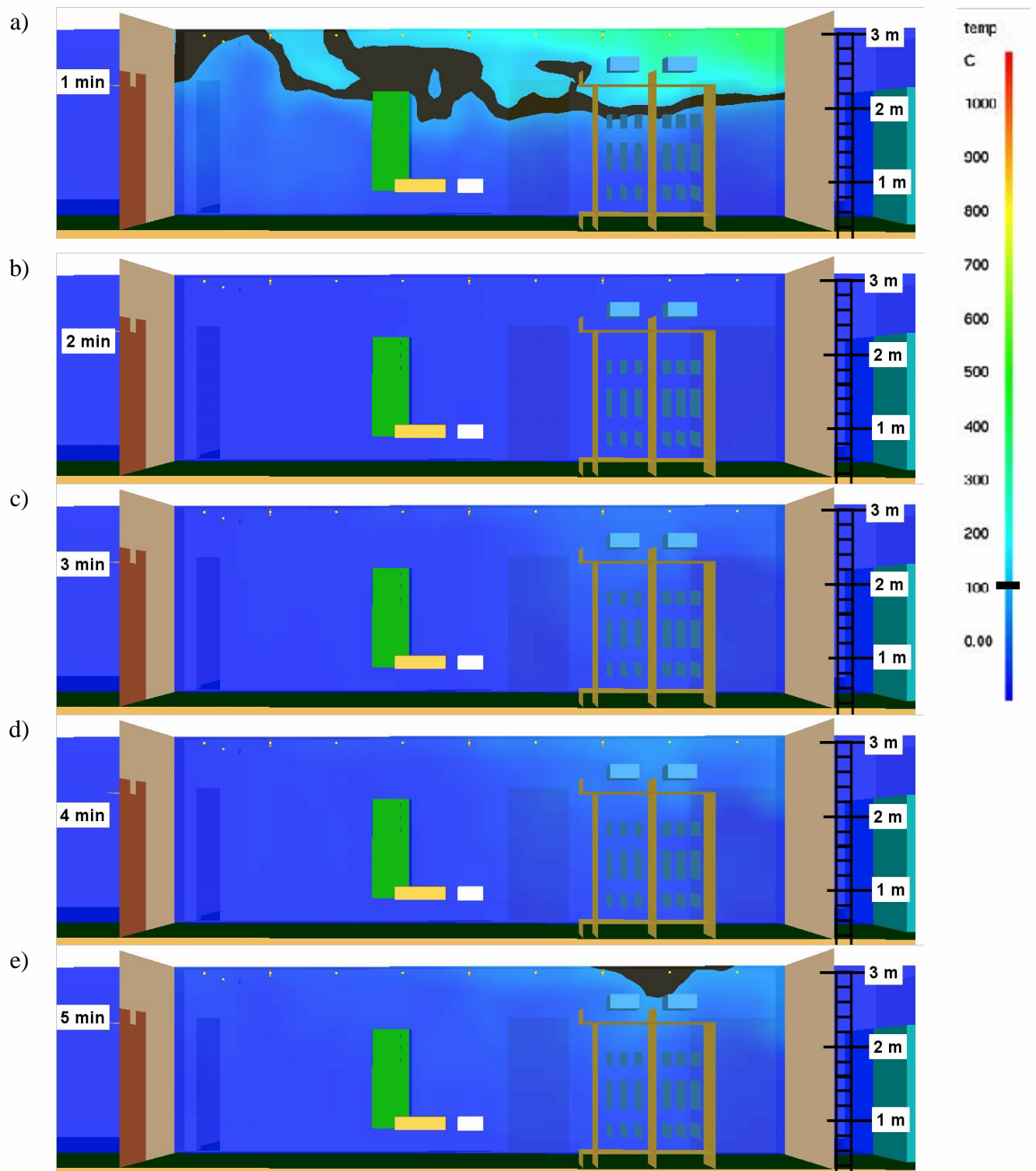
Palokäytävän sprinkleripäiden sijoittelutapauksen 2 asetelma ja FDS-ohjelmalle syötteenä annettu palotehon ajallinen kehittyminen esitetään alla olevassa kuvassa.



Kuva 85. Sprinkleripäiden sijoitustapa 2: sprinkleripäiden paikat palokäytävässä ja b) paloteho.

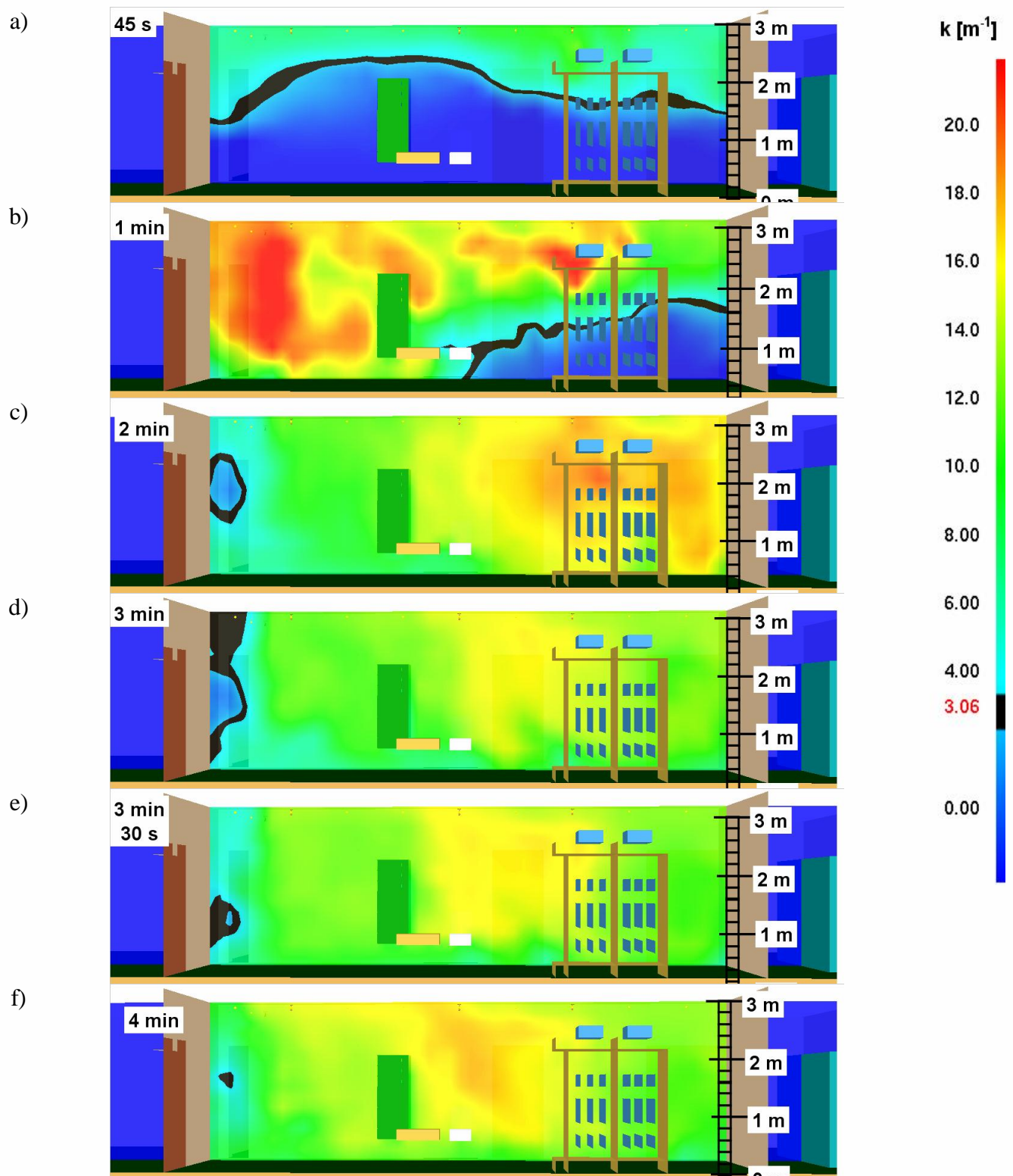


Kuva 86. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2: kuumen kerroksen lämpötilat tasossa  $z = 2,8$  m.

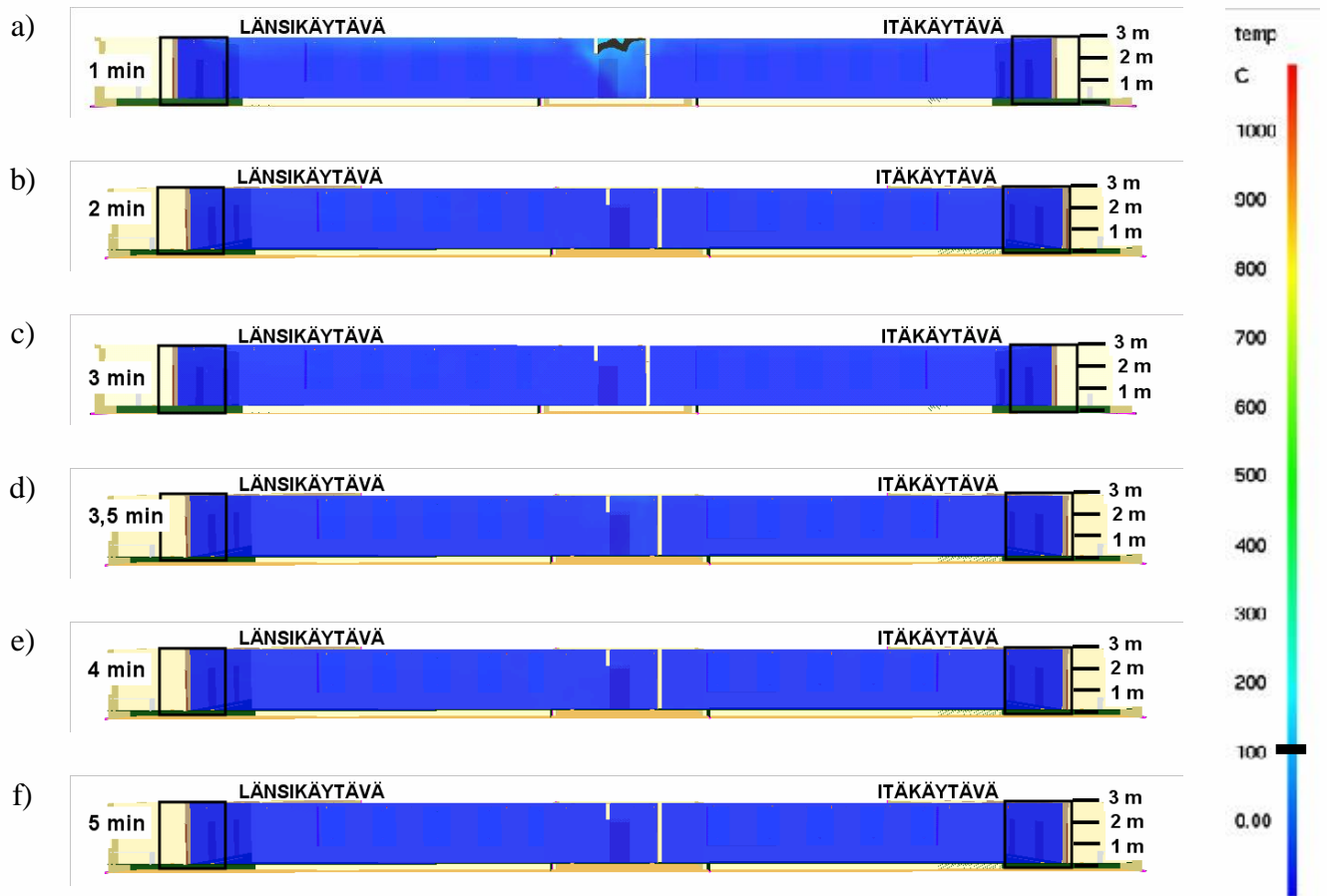


Kuva 87. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2: palokäytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.

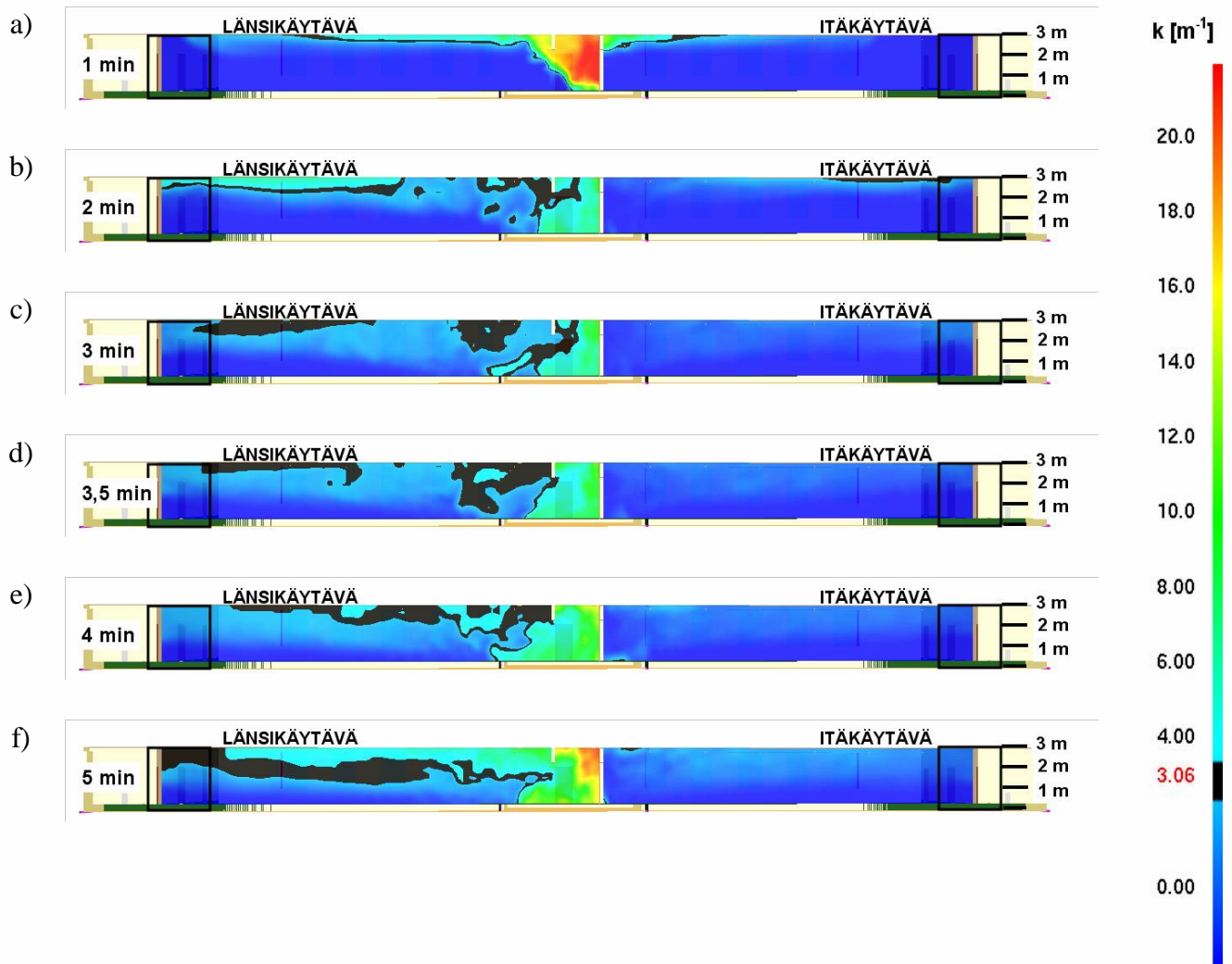




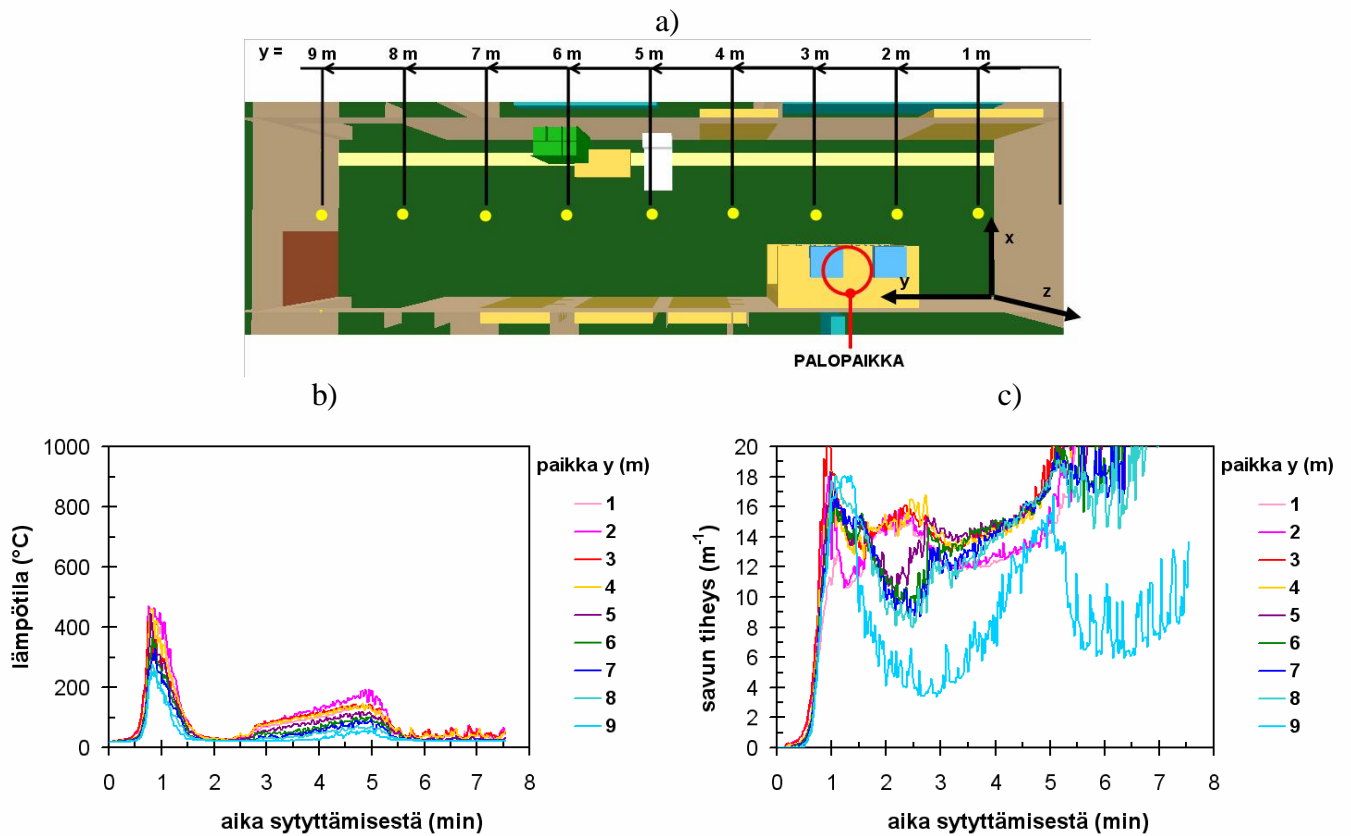
Kuva 88. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2: palokäytävän savuntiheysjakauma eri ajan hetkinä.



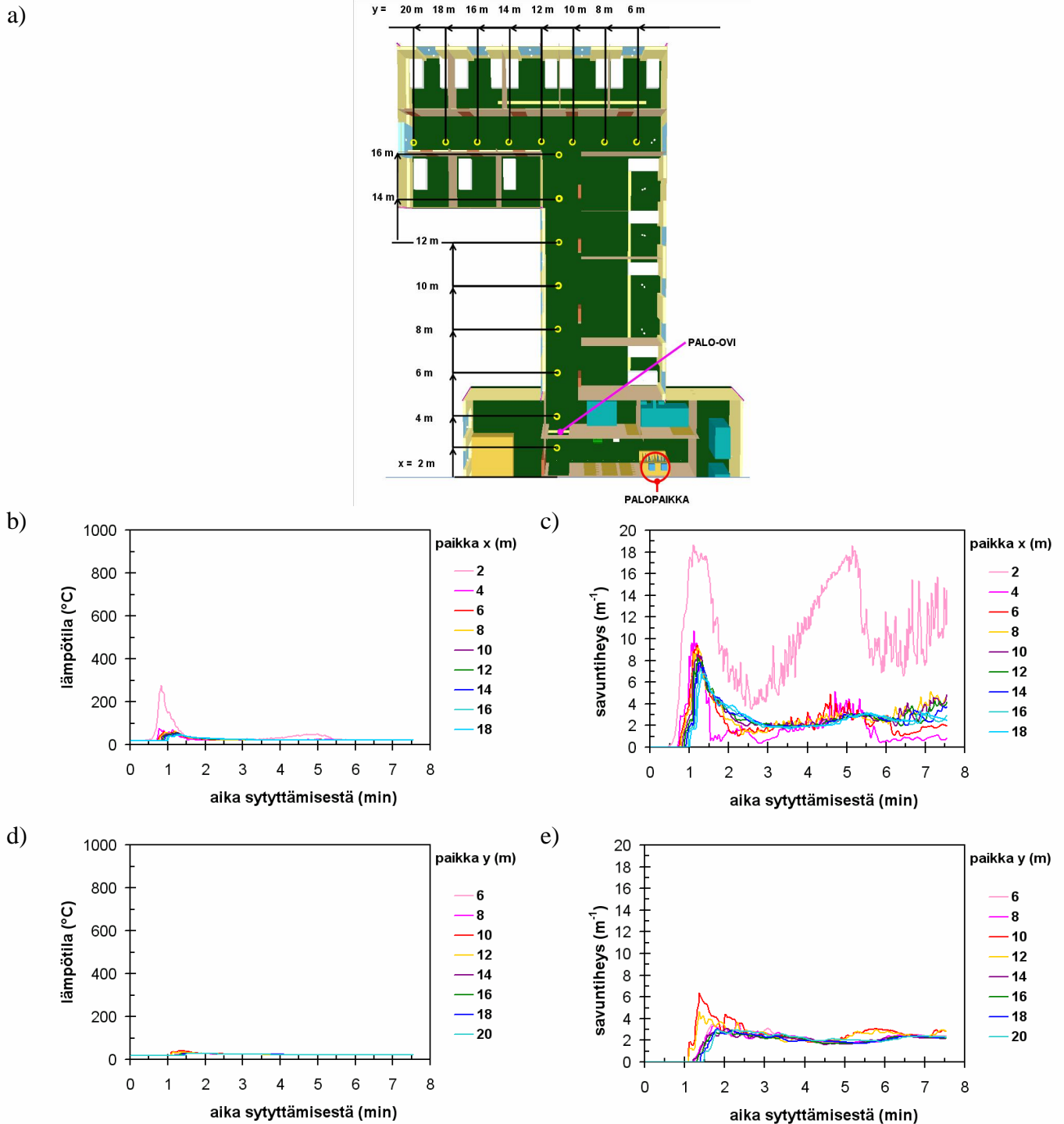
Kuva 89. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2: itä-länsi -käytävän lämpötilajakauma eri ajan hetkinä.



Kuva 90. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2: itä-länsi -käytävän savutiheysjakauma eri ajan hetkinä.

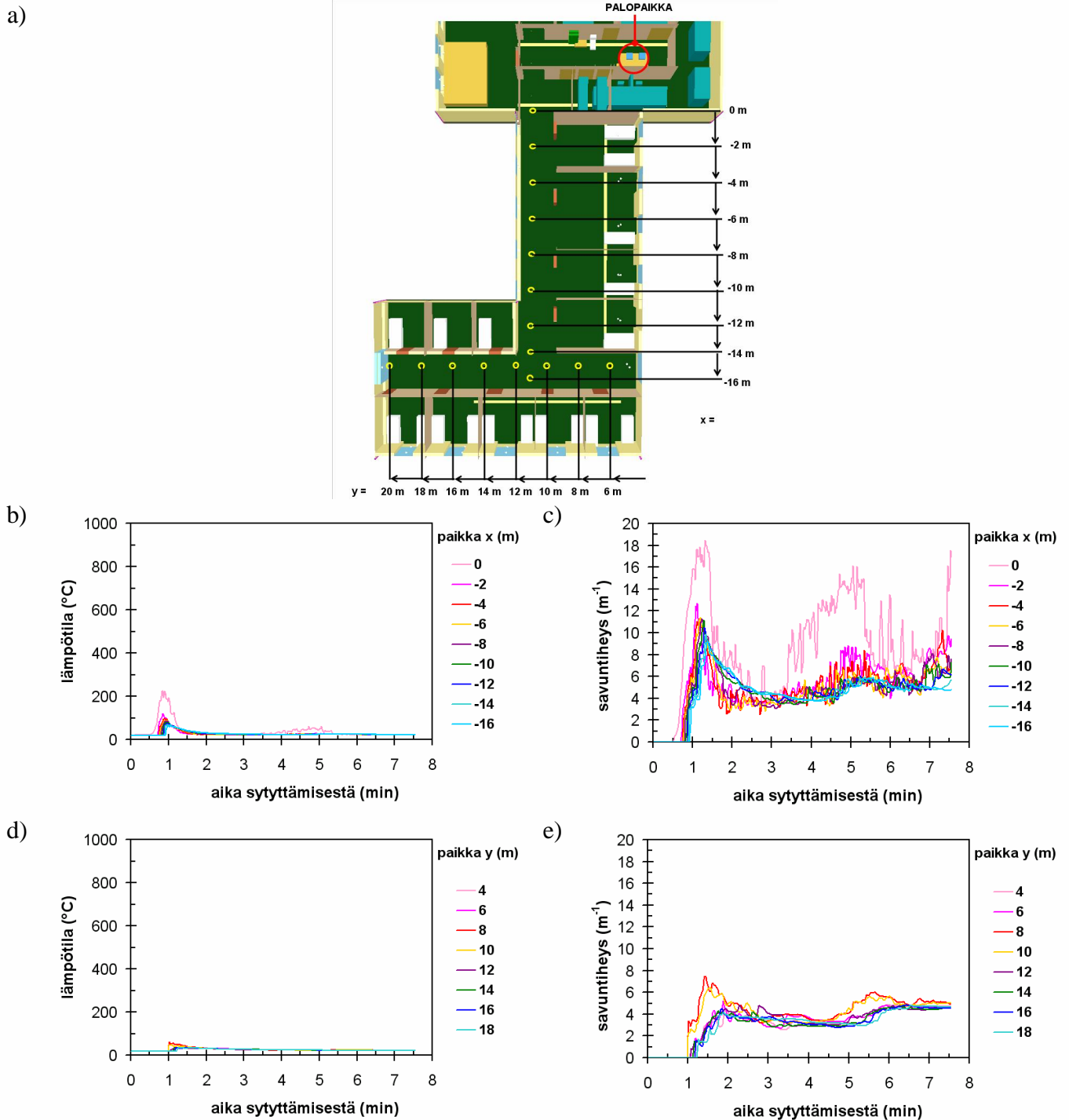


Kuva 91. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2, palokäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat ja c) savuntiheys.



Kuva 92. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2, itäkäytävän ja itäpään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.





Kuva 93. Sprinklerijärjestelmän vaikutus, sijoitustapa 2, länsikäytävän ja länsipään poikkikäytävän kuuman kerroksen lämpötilojen ja savuntiheyden ajallinen kehittyminen: a) antureiden paikat, b) lämpötilat itäkäytävässä, c) savuntiheys itäkäytävässä, d) lämpötilat itäpään poikkikäytävässä ja e) savuntiheys itäpään poikkikäytävässä.

## 6.3 Sprinklerijärjestelmän vaikutuksen arviointi

Koska sprinklerijärjestelmä alkaisi kohdan 4.2 mukaan toimia todennäköisesti alle 1 minuutin palon jälkeen eli vaiheessa, jossa alkupalo alkaa hiipua ennen kuin vaatteiden ja kaapien palo alkaa kasvaa kohti täyden palamisen vaihetta, todennäköisin sprinklauksen vaikutus olisi ollut se, että palo olisi sammunut ennen täyden palamisen vaihetta.

Tässä luvussa on kuitenkin tarkasteltu sitä mahdollisuutta, että palo olisi kehittynyt täyden palamisen vaiheeseen kuvissa Kuva 76b ja Kuva 85b esitetyllä tavalla.

Simulointien mukaan lämpötilat itä- ja länsisiivessä olisivat siinäkin tapauksessa, että palo olisi kehittynyt täyden palamisen vaiheeseen, pysyneet koko palon ajan niin alhaisina, että ne eivät olisi aiheuttaneet uhkaa ihmisille (kuvat Kuva 77, Kuva 80, Kuva 83 ja Kuva 84 sekä Kuva 86, Kuva 89, Kuva 92 ja Kuva 93). Palokäytävässä kuumen kerroksen lämpötilat kohoaisivat alkupalon aikana hetkellisesti (noin 1 minuutin ajan) suunnilleen tasolle 200-400 °C, mikä voisi aiheuttaa lähellä paloa olevalle henkilölle palovammoja (todennäköisesti 1. tai 2. asteen palovammoja).

Simulointien mukaan savuisuus itäkäytävässä tai itäpäähän poikkikäytävässä ei olisi haitannut henkilöiden toimintaa tai liikkumista, koska näihin tiloihin muodostuva savukerros on varsin ohut siten, että sen alaraja on selvästi ihmisen pään korkeuden yläpuolella (kuvat Kuva 80 ja Kuva 89). Savukerroksen savuntiheys on myös selvästi sprinklaamatonta tapausta alhaisempi (kuvat Kuva 60, Kuva 83 ja Kuva 92).

Simulointien mukaan savuisuus myös länsikäytävässä tai länsipään poikkikäytävässä olisi sprinklatussa tapauksessa merkittävästi sprinklaamatonta tapausta vähäisempää (kuvat Kuva 61, Kuva 84 ja Kuva 93). Savukerroksen paksuus on myös selvästi sprinklaamatonta tapausta alhaisempi siten, että sprinklatussa tapauksessa länsikäytävään jää palokäytävän läheisyydessä olevaa aluetta lukuun ottamatta noin 1 metrin korkuinen savuton kerros, jossa liikkuminen olisi mahdollista kumartuneena tai kontaten (kuvat Kuva 81 ja Kuva 90).

Yhteenvedona voidaan todeta, että palonsimulointien antamien tulosten mukaan sprinklatussa tapauksessa palon synnyttämät olosuhteet eivät suurella todennäköisyydellä olisi muodostaneet uhkaa ihmishengille, kun taas sprinklaamattomassa tapauksessa olosuhteet muodostuivat varsin vakaviksi ja olisivat voineet johtaa ihmishenkien menetykseen.

## 7 Muiden paloturvallisuustekijöiden vaikutuksesta

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti muihin paloturvallisuustekijöihin kuin automaattiseen sammutusjärjestelmään liittyviä kysymyksiä.

### 7.1 Lämpö- ja savuilmaisimet

Simuloinnit osoittavat, että tilan savuisuus kehittyy nopeammin ja voimakkaammin kuin lämpötila. Siksi savun havainnointiin perustuvat ilmaisimet antavat hälytyksen palosta selvästi lämpöön reagoivia laitteita nopeammin ja antavat siten tärkeää lisäaikaa pelastumiselle. Savuilmaisin reagoi niin nopeasti, että myös alkusammutuksen onnistumisen todennäköisyys on selvästi lämpöilmaisimiin perustuvaa systeemiä korkeampi.

### 7.2 Savunpoisto

Simulointien mukaan savutiheys nousee tasolle  $20 \text{ m}^{-1}$  tai korkeammallekin. Tämä vastaa savun massatiheyttä, joka on suuruusluokkaa  $20/10\,000 \text{ m}^{-1}/8000 \text{ m}^2/\text{kg} = 0,0025 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Kun paloteho on suuruus luokkaa 1-5 MW ja tehollinen lämpöarvo noin 20 MJ/kg, on palossa tapahtuvan massahäviön suuruus  $(1-5)/20 \text{ kg}/\text{s} = 0,05-0,25 \text{ kg}/\text{s}$ . Savun muodostumisnopeus tilavuusyksiköissä on siis suuruusluokkaa  $(0,05-0,25) \text{ kg}/\text{s} / 0,0025 \text{ kg}/\text{m}^3 = 20-100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Jotta savunpoistosysteemi olisi tehokas, sen tulisi pystyä vaikuttamaan näin suureen savun muodostumiseen ja tämä vaatii käytännössä varsin järeää koneellista savunpoistoa. Käytännössä tällaisen järjestelmän sovittaminen tyypillisiin psykiatriisiin sairaalaosastoihin lienee varsin hankalaa. Myös ikkunoiden särkymiseen tai muuhun vastaavaan toimintoon perustuva painovoimainen savunpoistojärjestelmä lienee hyvin vaikea saada riittävän tehokkaaksi.

Savunpoiston suhteen on huomattava, että järjestelmä, joka käynnistetään palokunnan toimesta o auttamattomasti myöhässä ihmishenkien pelastamiseksi.

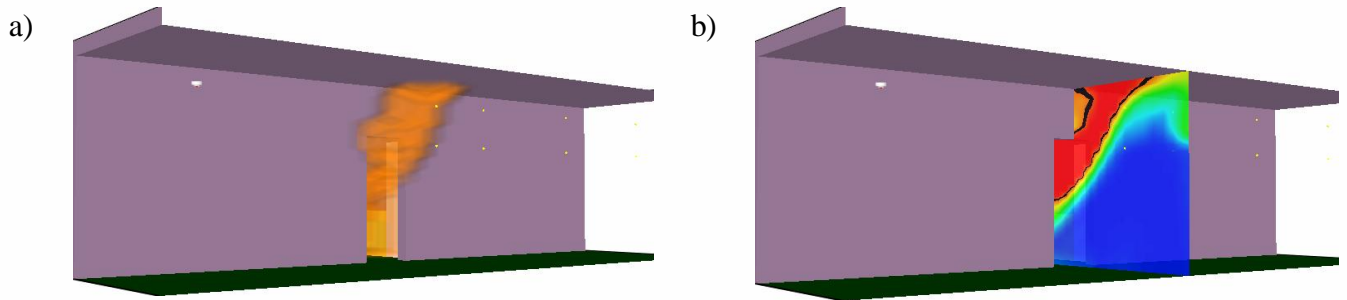
### 7.3 Palokuorman määrä ja laatu

Psykiatrisilla osastoilla on aina palokuormaa: niissä on tyypillisesti jokin varsin normaalilla tavalla kalustettu oleskelutila, toimistotilaa, vaatteiden ja vuodevaatteiden säilytystiloja, keittiötiloja ja potilaiden vaatteita ja muita tavaroita. Osastoja ei voida kokonaan ”riisua” palokuormasta, koska tällaisen toimenpiteen aiheuttamilla seuraamuksilla lienisi varsin negatiivisia seuraamuksia hoidon onnistumisen suhteen: riisuttu osasto alkaisi muistuttaa vankilaympäristöä, joka ei ainakaan edistäisi osastolla olevien normaalia henkisesti hauraampien ihmisten toipumista. Kuitenkin palokuormaa tulisi pyrkiä rajaamaan siinä määrin kuin toimintojen kannalta on mahdollista.

#### 7.3.1 Irtain palokuorma

Sairaalan omat palavat tavarat, kuten vuodevaatteet ja muut tekstiilitavarat, toimistojen ja henkilökunnan huoneiden palokuorma, keittiön palokuorma, jne. tulisi säilyttää lukittuna olevien ovien takana. Tämä lieneekin Suomessa noudatettava käytäntö. Potilaiden omat tavarat tulee säilyttää potilashuoneissa ja

niiden ovien tulisi olla itsesulkeutuvia (ovipumppu), koska tällöin voidaan ehkäistä alla esitetyn (Kuva 94) kaltainen potilashuoneen palon leviäminen käytävään.

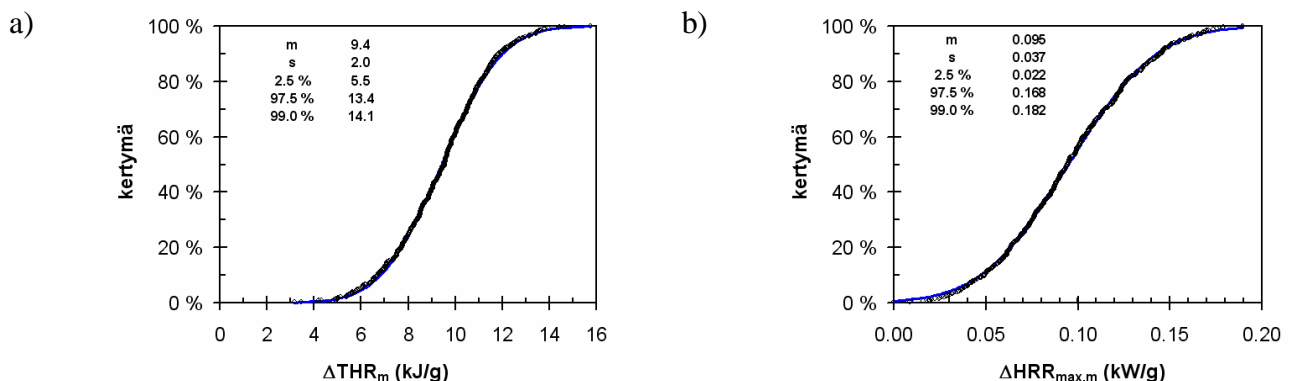


Kuva 94. Tyypillinen liekastaneesta potilashuoneesta käytävälle tuleva liekki: a) liekin koko ja b) lämpötilajakauma (musta väritys osoittaa 1000° C:een lämpötilatason).

Osastojen käytävillä ei saisi säilyttää mitään palokuormaa. Erityisesti käytävillä ei saa olla kaappeja, joissa voidaan säilyttää palokuormaa, elleivät nämä kaapit ole lukittuja (avaimet henkilökunnalla). Pitkäniemen sairaalan palon suuri voimakkuus johtui pääasiallisesti siitä, että käytävällä sytytetty vaatteet olivat kaapissa, jonka muodostaa suljetun tilan ja voi siksi lieskahtaa. Näin kävi PEO:lla tehdyissä rekonstruktiokokeissa ja simuloinneissa. Niin on siis mitä ilmeisimmin käynyt myös Pitkäniemensairaalan palossa.

### 7.3.2 Pintakerrosten osallistumisesta paloon

Seinien, katon ja lattian pintakerrokset voivat osallistua paloon, jos niiden materiaali on palavaa. Markerin [30] tekemien tutkimusten mukaan 1 gramma maalia ohueksi pinnaksi levitettynä voi tuottaa lämpöenergiaa noin 10 kJ/g ( $\pm 20\%$ ) ja palotehoa maksimissaan noin 0,1 kW/g ( $\pm 40\%$ ) (Kuva 95). Jos maalikerroksen paksuus on esim. 100-300 g/m<sup>2</sup>, voi se lisätä palon palotehoa noin 10-30 kW/m<sup>2</sup>:n osuudella. Pitkäniemen sairaalan palokäytävän pituus oli noin 8 m ja leveys noin 2,5; jos maali osallistuisi paloon noin 1 metrin matkalla katosta lukien (kuuma kerros), palava maalipinta olisi siis noin 20 m<sup>2</sup>, joka voisi maalikerroksen paksuudesta riippuen lisätä maksimipalotehoa muutamalla sadalla kilowatilla eli suuruusluokkaa 10 % tässä raportissa arvioidusta maksimipalotehosta.



Kuva 95. Tyypillinen maalatun pinnan palaessa maalin massayksikköä syntyvä a) kokonaisenergia  $\Delta THR_m$  ja b) maksimipaloteho  $\Delta HRR_{max,m}$ . Jakaumat perustuvat Markerin esittämien [30] koetulosten analysointiin.

## 8 Loppusanat

Sairaaloiden psykiatristen osastojen paloturvallisuuden ylläpitäminen on ongelmallista useista syistä, mm.

- Potilaiden luonteen vuoksi tahallisesti sytytetyn palon mahdollisuus on paljon korkeampi kuin useimmissa muissa kohteissa: osa potilaista on itsetuhoisia - ja tulipalo voi tarjota mahdollisuuden toteuttaa itsemurha, osa potilaista voi olla harhaisia ja sytyttää tulipalon harhojensa ohjaamina ja jotkut potilaat voivat esim. yrittää kostaa tulipalon avulla pakkohoidon aiheuttaman vapaudenriiston, jne.
- Tulipalon sattuessa osa potilaista ei ymmärrä tilannetta eikä osaa toimia rationaalisesti oman henkensä turvaamiseksi: tämä hidastaa ja vaikeuttaa osaston tyhjentyä palon sattuessa;
- Osastot ovat usein suljettuja, joka haittaa potilaiden omaehtoista poistumista palon sattuessa;
- Palon syttymien mahdollisuutta voidaan vähentää vain rajallisesti näiden osastojen primäärisen toiminnan - henkisesti sairastuneiden ihmisten parantaminen/auttaminen - vuoksi: esim. palokuormaa voidaan rajoittaa vain tiettyyn rajaan asti ja sytytyslähteiden joutumista potilaiden oluttuville ei voida kokonaan estää (etenkin kun tupakointi potilaiden parissa on hyvin yleistä).

Tässä työssä tarkasteltiin Pitkäniemen sairaalan psykiatrisella osastolla sattunutta tulipaloa, josta olisi voinut tulla myös henkilöuhreja vaatinut onnettomuus, koska rekonstruktiokeiden ja simulointien perusteella osaan tiloista syntyi ihmishenkeä uhkaavat olosuhteet. Tässä nimenomaisessa tapauksessa palo kehittyi voimakkaaksi siksi, että sytytetty kohde oli sairaalan käytävällä ollut vaatteita sisältävä paloon osallistuvasta materiaalista tehty kaappi, joka lieskahti paikallisesti aiheuttaen voimakkaimmillaan lähes 5 MW:n suuruisen palon. Simulointien mukaan automaattinen vesisammutusjärjestelmä, (tässä työssä tarkasteltiin sprinklerijärjestelmää) olisi lieventänyt onnettomuutta hyvin merkittävästi: tulosten perusteella voidaan katsoa, että ihmishenkeä uhkaavia olosuhteita ei sprinklerijärjestelmään ansiosta olisi muodostunut.



## Liite A. Palonsimulointiohjelman virtuaaliset mittarit

Palonsimulointiohjelmassa palon synnyttämää savua sekä kuumia ja myrkyllisiä kaasuja voidaan monitoroida ajan funktiona käyttäen virtuaalisia pistemäisiä sensoreita, jotka sijoitetaan tilaan käyttäjän määrittämiin paikkoihin x-y-z -koordinaatistossa. Seuraavassa on lueteltu tässä työssä käytetyn FDS4-mallin virtuaaliset sensorit ja niiden paikat.

### ITÄSIIPi

no.			x	y	z	PROPERTY
1	&THCP	XYZ =	2	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
2	&THCP	XYZ =	4	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
3	&THCP	XYZ =	6	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
4	&THCP	XYZ =	8	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
5	&THCP	XYZ =	10	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
6	&THCP	XYZ =	12	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
7	&THCP	XYZ =	14	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
8	&THCP	XYZ =	16	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
9	&THCP	XYZ =	18	9	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
10	&THCP	XYZ =	2	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
11	&THCP	XYZ =	4	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
12	&THCP	XYZ =	6	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
13	&THCP	XYZ =	8	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
14	&THCP	XYZ =	10	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
15	&THCP	XYZ =	12	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
16	&THCP	XYZ =	14	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
17	&THCP	XYZ =	16	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
18	&THCP	XYZ =	18	9	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
19	&THCP	XYZ =	2	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
20	&THCP	XYZ =	4	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
21	&THCP	XYZ =	6	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
22	&THCP	XYZ =	8	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
23	&THCP	XYZ =	10	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
24	&THCP	XYZ =	12	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
25	&THCP	XYZ =	14	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
26	&THCP	XYZ =	16	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
27	&THCP	XYZ =	18	9	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
28	&THCP	XYZ =	2	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
29	&THCP	XYZ =	4	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
30	&THCP	XYZ =	6	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
31	&THCP	XYZ =	8	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'

32	&THCP	XYZ =	10	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
33	&THCP	XYZ =	12	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
34	&THCP	XYZ =	14	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
35	&THCP	XYZ =	16	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
36	&THCP	XYZ =	18	9	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
37	&THCP	XYZ =	2	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
38	&THCP	XYZ =	4	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
39	&THCP	XYZ =	6	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
40	&THCP	XYZ =	8	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
41	&THCP	XYZ =	10	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
42	&THCP	XYZ =	12	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
43	&THCP	XYZ =	14	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
44	&THCP	XYZ =	16	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
45	&THCP	XYZ =	18	9	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
46	&THCP	XYZ =	2	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
47	&THCP	XYZ =	4	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
48	&THCP	XYZ =	6	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
49	&THCP	XYZ =	8	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
50	&THCP	XYZ =	10	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
51	&THCP	XYZ =	12	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
52	&THCP	XYZ =	14	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
53	&THCP	XYZ =	16	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
54	&THCP	XYZ =	18	9	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
55	&THCP	XYZ =	21	4	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
56	&THCP	XYZ =	21	6	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
57	&THCP	XYZ =	21	8	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
58	&THCP	XYZ =	21	10	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
59	&THCP	XYZ =	21	12	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
60	&THCP	XYZ =	21	14	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
61	&THCP	XYZ =	21	16	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
62	&THCP	XYZ =	21	18	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
63	&THCP	XYZ =	21	20	2.8	QUANTITY = 'TEMPERATURE'
64	&THCP	XYZ =	21	4	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
65	&THCP	XYZ =	21	6	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
66	&THCP	XYZ =	21	8	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
67	&THCP	XYZ =	21	10	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
68	&THCP	XYZ =	21	12	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
69	&THCP	XYZ =	21	14	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
70	&THCP	XYZ =	21	16	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
71	&THCP	XYZ =	21	18	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'
72	&THCP	XYZ =	21	20	2.8	QUANTITY = 'VELOCITY'

73	&THCP	XYZ =	21	4	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
74	&THCP	XYZ =	21	6	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
75	&THCP	XYZ =	21	8	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
76	&THCP	XYZ =	21	10	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
77	&THCP	XYZ =	21	12	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
78	&THCP	XYZ =	21	14	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
79	&THCP	XYZ =	21	16	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
80	&THCP	XYZ =	21	18	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
81	&THCP	XYZ =	21	20	2.8	QUANTITY = 'extinction coefficient'
82	&THCP	XYZ =	21	4	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
83	&THCP	XYZ =	21	6	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
84	&THCP	XYZ =	21	8	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
85	&THCP	XYZ =	21	10	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
86	&THCP	XYZ =	21	12	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
87	&THCP	XYZ =	21	14	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
88	&THCP	XYZ =	21	16	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
89	&THCP	XYZ =	21	18	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
90	&THCP	XYZ =	21	20	2.8	QUANTITY = 'carbon monoxide'
91	&THCP	XYZ =	21	4	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
92	&THCP	XYZ =	21	6	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
93	&THCP	XYZ =	21	8	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
94	&THCP	XYZ =	21	10	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
95	&THCP	XYZ =	21	12	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
96	&THCP	XYZ =	21	14	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
97	&THCP	XYZ =	21	16	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
98	&THCP	XYZ =	21	18	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
99	&THCP	XYZ =	21	20	2.8	QUANTITY = 'carbon dioxide'
100	&THCP	XYZ =	21	4	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
101	&THCP	XYZ =	21	6	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
102	&THCP	XYZ =	21	8	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
103	&THCP	XYZ =	21	10	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
104	&THCP	XYZ =	21	12	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
105	&THCP	XYZ =	21	14	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
106	&THCP	XYZ =	21	16	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
107	&THCP	XYZ =	21	18	2.8	QUANTITY = 'oxygen'
108	&THCP	XYZ =	21	20	2.8	QUANTITY = 'oxygen'

**PALOKÄYTÄVÄ**

no.				x	y	z	PROPERTY		
108	&THCP	XYZ	=	1.2	1	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
109	&THCP	XYZ	=	1.2	2	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
110	&THCP	XYZ	=	1.2	3	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
111	&THCP	XYZ	=	1.2	4	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
112	&THCP	XYZ	=	1.2	5	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
113	&THCP	XYZ	=	1.2	6	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
114	&THCP	XYZ	=	1.2	7	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
115	&THCP	XYZ	=	1.2	8	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
116	&THCP	XYZ	=	1.2	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
117	&THCP	XYZ	=	1.2	1	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
118	&THCP	XYZ	=	1.2	2	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
119	&THCP	XYZ	=	1.2	3	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
120	&THCP	XYZ	=	1.2	4	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
121	&THCP	XYZ	=	1.2	5	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
122	&THCP	XYZ	=	1.2	6	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
123	&THCP	XYZ	=	1.2	7	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
124	&THCP	XYZ	=	1.2	8	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
125	&THCP	XYZ	=	1.2	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
126	&THCP	XYZ	=	1.2	1	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
127	&THCP	XYZ	=	1.2	2	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
128	&THCP	XYZ	=	1.2	3	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
129	&THCP	XYZ	=	1.2	4	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
130	&THCP	XYZ	=	1.2	5	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
131	&THCP	XYZ	=	1.2	6	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
132	&THCP	XYZ	=	1.2	7	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
133	&THCP	XYZ	=	1.2	8	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
134	&THCP	XYZ	=	1.2	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
135	&THCP	XYZ	=	1.2	1	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
136	&THCP	XYZ	=	1.2	2	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
137	&THCP	XYZ	=	1.2	3	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
138	&THCP	XYZ	=	1.2	4	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
139	&THCP	XYZ	=	1.2	5	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
140	&THCP	XYZ	=	1.2	6	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
141	&THCP	XYZ	=	1.2	7	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
142	&THCP	XYZ	=	1.2	8	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
143	&THCP	XYZ	=	1.2	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
144	&THCP	XYZ	=	1.2	1	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
145	&THCP	XYZ	=	1.2	2	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'

146	&THCP	XYZ	=	1.2	3	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
147	&THCP	XYZ	=	1.2	4	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
148	&THCP	XYZ	=	1.2	5	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
149	&THCP	XYZ	=	1.2	6	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
150	&THCP	XYZ	=	1.2	7	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
151	&THCP	XYZ	=	1.2	8	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
152	&THCP	XYZ	=	1.2	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
153	&THCP	XYZ	=	1.2	1	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
154	&THCP	XYZ	=	1.2	2	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
155	&THCP	XYZ	=	1.2	3	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
156	&THCP	XYZ	=	1.2	4	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
157	&THCP	XYZ	=	1.2	5	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
158	&THCP	XYZ	=	1.2	6	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
159	&THCP	XYZ	=	1.2	7	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
160	&THCP	XYZ	=	1.2	8	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
161	&THCP	XYZ	=	1.2	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	



**LÄNSIKÄYTVÄ**

no.				x	y	z	PROPERTY		
161	&THCP	XYZ	=	0	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
162	&THCP	XYZ	=	-2	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
163	&THCP	XYZ	=	-4	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
164	&THCP	XYZ	=	-6	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
165	&THCP	XYZ	=	-8	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
166	&THCP	XYZ	=	-10	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
167	&THCP	XYZ	=	-12	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
168	&THCP	XYZ	=	-14	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
169	&THCP	XYZ	=	-16	9	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
170	&THCP	XYZ	=	0	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
171	&THCP	XYZ	=	-2	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
172	&THCP	XYZ	=	-4	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
173	&THCP	XYZ	=	-6	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
174	&THCP	XYZ	=	-8	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
175	&THCP	XYZ	=	-10	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
176	&THCP	XYZ	=	-12	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
177	&THCP	XYZ	=	-14	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
178	&THCP	XYZ	=	-16	9	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
179	&THCP	XYZ	=	0	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
180	&THCP	XYZ	=	-2	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
181	&THCP	XYZ	=	-4	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
182	&THCP	XYZ	=	-6	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
183	&THCP	XYZ	=	-8	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
184	&THCP	XYZ	=	-10	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
185	&THCP	XYZ	=	-12	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
186	&THCP	XYZ	=	-14	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
187	&THCP	XYZ	=	-16	9	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
188	&THCP	XYZ	=	0	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
189	&THCP	XYZ	=	-2	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
190	&THCP	XYZ	=	-4	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
191	&THCP	XYZ	=	-6	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
192	&THCP	XYZ	=	-8	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
193	&THCP	XYZ	=	-10	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
194	&THCP	XYZ	=	-12	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
195	&THCP	XYZ	=	-14	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
196	&THCP	XYZ	=	-16	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
197	&THCP	XYZ	=	0	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'

198	&THCP	XYZ	=	-2	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
199	&THCP	XYZ	=	-4	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
200	&THCP	XYZ	=	-6	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
201	&THCP	XYZ	=	-8	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
202	&THCP	XYZ	=	-10	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
203	&THCP	XYZ	=	-12	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
204	&THCP	XYZ	=	-14	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
205	&THCP	XYZ	=	-16	9	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
206	&THCP	XYZ	=	0	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
207	&THCP	XYZ	=	-2	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
208	&THCP	XYZ	=	-4	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
209	&THCP	XYZ	=	-6	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
210	&THCP	XYZ	=	-8	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
211	&THCP	XYZ	=	-10	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
212	&THCP	XYZ	=	-12	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
213	&THCP	XYZ	=	-14	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
214	&THCP	XYZ	=	-16	9	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
215	&THCP	XYZ	=	-19	4	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
216	&THCP	XYZ	=	-19	6	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
217	&THCP	XYZ	=	-19	8	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
218	&THCP	XYZ	=	-19	10	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
219	&THCP	XYZ	=	-19	12	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
220	&THCP	XYZ	=	-19	14	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
221	&THCP	XYZ	=	-19	16	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
222	&THCP	XYZ	=	-19	18	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
223	&THCP	XYZ	=	-19	20	2.8	QUANTITY=	'TEMPERATURE'	
224	&THCP	XYZ	=	-19	4	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
225	&THCP	XYZ	=	-19	6	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
226	&THCP	XYZ	=	-19	8	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
227	&THCP	XYZ	=	-19	10	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
228	&THCP	XYZ	=	-19	12	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
229	&THCP	XYZ	=	-19	14	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
230	&THCP	XYZ	=	-19	16	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
231	&THCP	XYZ	=	-19	18	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
232	&THCP	XYZ	=	-19	20	2.8	QUANTITY=	'VELOCITY'	
233	&THCP	XYZ	=	-19	4	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
234	&THCP	XYZ	=	-19	6	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
235	&THCP	XYZ	=	-19	8	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
236	&THCP	XYZ	=	-19	10	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
237	&THCP	XYZ	=	-19	12	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'

238	&THCP	XYZ	=	-19	14	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
239	&THCP	XYZ	=	-19	16	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
240	&THCP	XYZ	=	-19	18	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
241	&THCP	XYZ	=	-19	20	2.8	QUANTITY=	'extinction	coefficient'
242	&THCP	XYZ	=	-19	4	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
243	&THCP	XYZ	=	-19	6	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
244	&THCP	XYZ	=	-19	8	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
245	&THCP	XYZ	=	-19	10	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
246	&THCP	XYZ	=	-19	12	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
247	&THCP	XYZ	=	-19	14	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
248	&THCP	XYZ	=	-19	16	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
249	&THCP	XYZ	=	-19	18	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
250	&THCP	XYZ	=	-19	20	2.8	QUANTITY=	'carbon	monoxide'
251	&THCP	XYZ	=	-19	4	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
252	&THCP	XYZ	=	-19	6	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
253	&THCP	XYZ	=	-19	8	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
254	&THCP	XYZ	=	-19	10	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
255	&THCP	XYZ	=	-19	12	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
256	&THCP	XYZ	=	-19	14	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
257	&THCP	XYZ	=	-19	16	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
258	&THCP	XYZ	=	-19	18	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
259	&THCP	XYZ	=	-19	20	2.8	QUANTITY=	'carbon	dioxide'
260	&THCP	XYZ	=	-19	4	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
261	&THCP	XYZ	=	-19	6	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
262	&THCP	XYZ	=	-19	8	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
263	&THCP	XYZ	=	-19	10	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
264	&THCP	XYZ	=	-19	12	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
265	&THCP	XYZ	=	-19	14	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
266	&THCP	XYZ	=	-19	16	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
267	&THCP	XYZ	=	-19	18	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	
268	&THCP	XYZ	=	-19	20	2.8	QUANTITY=	'oxygen'	

## Liite B. Palovammoista [31]

### Palovamman laajuus ja syvyys

Palovammat luokitellaan laajuuden ja syvyyden mukaan.

Syvyyden suhteen vamma voidaan todeta

- pinnalliseksi eli 1. ja 2. asteen vammaksi
- syväksi vammaksi eli 3. asteen vammaksi

Pinnallinen palovamma paranee noin viikon kuluessa ilman, että siitä jää arpi. Syvän palovamman paraneminen kestää kauan ja vaatii yleensä leikkaushoidon.

Laajuutta määriteltäessä käytetään yhdeksän prosentin sääntöä. Kämmenen laajuus on 1 % , yläraajan on 9 % ja alaraajan  $2 \times 9$  % kehon pinta-alasta. Pienten verisuonien vioituttua palaneelta alueelta tiheää runsaasti verinestettä. Jos vamma on laaja, voi verinesteen menetys johtaa sokkiin. Vakavissa palovammoissa on sokin vaara, jos palovamman pinta-ala on aikuisella yli 15 % , ja lapsella yli 5–10 % .

### Pinnallinen palovamma

**Ensimmäisessä (1.) asteessa** kudonvaurio rajoittuu ihon pintakerrokseen. Palovamman aiheuttaa esimerkiksi aurinko tai kuuma neste. Iho on pinnalta kuiva, punoittava ja arka kosketukselle. Siinä on kirvelevää kipua, mutta ei rakkuloita.

**Toisessa (2.) asteessa** palanut alue ulottuu ihon syvempiin pintakerroksiin. Palovamman aiheuttaa esimerkiksi kuuma vesi, vesihöyry tai öljy. Ihon pinnalle muodostuu rakkuloita, joiden muodostuminen saattaa kestää kaksikin vuorokautta. Vammasta voi irrota ihon ulointa kerrosta. Vaurioalue on punoittava, turvonnut ja erittäin kivulias.

### Syvä palovamma

**Kolmannen (3.) asteen** palovamma ulottuu kaikkien ihokerrosten läpi, mutta voi ulottua myös syvempiin kudoksiin. Palovamman aiheuttaa esimerkiksi tuli, sähkö tai sula metalli. Vaurioalue on kuiva ja se ei aisti kipua, koska hermopäätteet ovat vaurioituneet. Kipua voi tuntua kuitenkin reuna-alueilla. Iho on väriltään harmaa, helmenvalkoa tai tumma, hiiltynyt. Palovamma paranee hitaasti, ja siihen muodostuu aina arpi. Laajat ja vaikeat palovammat hoidetaan aina ihosiirroilla.

Toisen asteen palovamman syntyminen kuumien kaasujen lähettämän lämpösäteilyn vaikutuksesta

Tässä työssä tarkastellaan lämmön mahdollisesti ihmisille aiheuttamien vammojen suhteen 2. asteen palovammojen syntymistä. Niiden syntyminen riippuu iholle tulevan lämpörasituksen, lämpövuon (yksikkönä  $\text{kW}/\text{m}^2$ ), voimakkuudesta ja altistuksen kestoajasta ( $t_{2b}$ ). Alla olevassa kuvassa (Kuva 96a ja b) esitetään Wieczorekin & Dembseyn [32] esittämä kokeellisesti määritetty riippuvuus altistuksen kestoajan ja lämpövuon välillä ja mittauspisteisiin pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen

sovitettu käyrä. Jos lämpövuoto aiheutuu palotilaan muodostuvasta kuumasta kerroksesta, lämpövuonon  $\dot{q}_{hot}$  ja kerroksen lämpötilan  $T_{hot}$  välillä vallitsevaa riippuvuutta voidaan arvioida kaavalla

$$\dot{q}_{hot} = h_c \cdot (T_{hot} - T_{\infty}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \Phi \cdot (T_{hot}^4 - T_{\infty}^4), \quad (13)$$

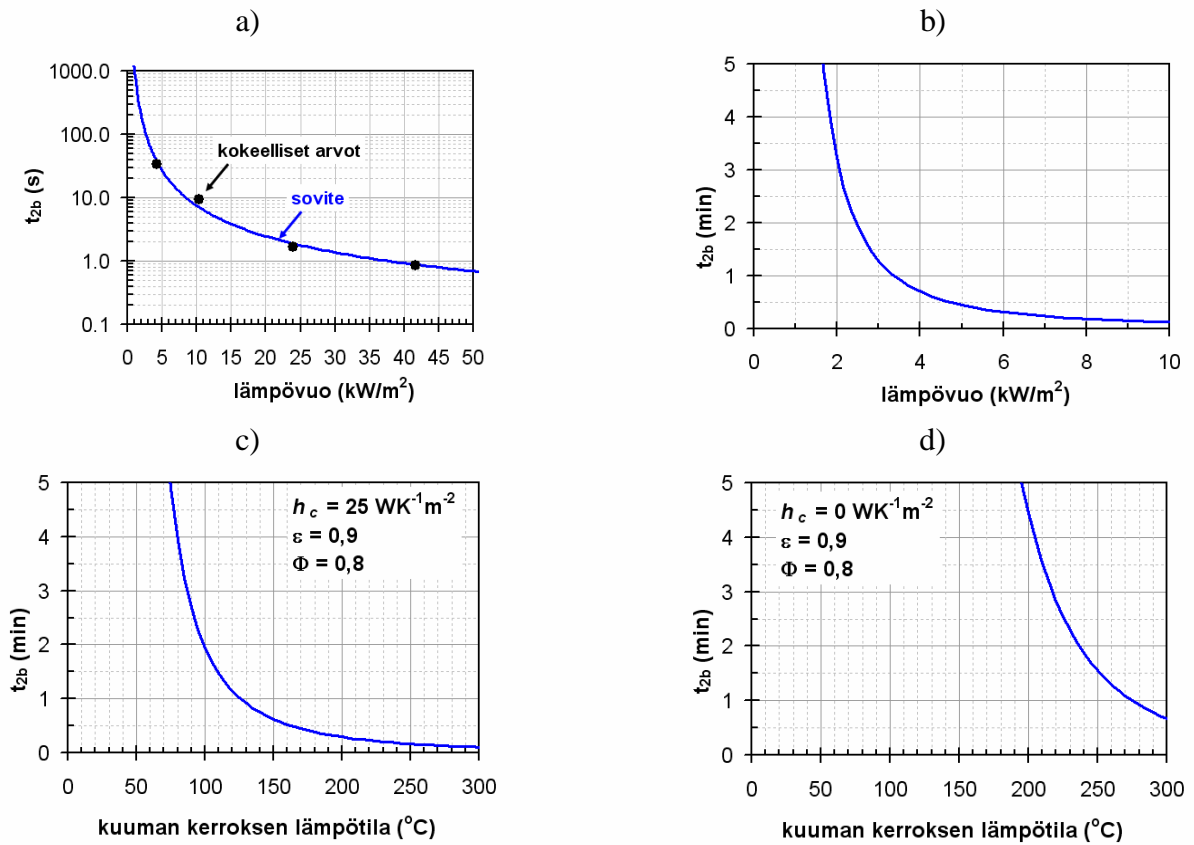
missä  $s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-4}$  on Stefan-Boltzmanin vakio sekä  $h_c$ ,  $\varepsilon$  ja  $\Phi$  on tilannetta kuvaava lämmönsiirtokerroin (yksikkönä  $\text{WK}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ), emissiviteetti ja näkyvyyskerroin.

Lämpöaltistuksessa voidaan erottaa kaksi tapausta:

1. Tilanne, jossa altistuvan henkilön kehon osia on kuumien kerrosten sisällä, jolloin lämpöä siirtyy henkilöön sekä konvektion ja säteilyn välityksellä. Tulipalossa tämä tilanne vastaa esim. tilannetta, jossa kuumien kerrosten alareuna on laskeutunut niin alas, että kuuma kerros ”koskettaa” tilassa olevaa henkilöä. Tällöin em. suureille voidaan käyttää seuraavia, niille varsin tyypillisiä arvoja:  $h_c = 25 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ,  $\varepsilon = 0,9$  ja  $\Phi = 0,8$ . Näitä arvoja käyttäen saadaan kuvassa Kuva 96c esitetty riippuvuus kuumien kerrosten lämpötilan ja 2. asteen palovamman muodostumisajan välille<sup>4</sup>.
2. Tilanne, jossa altistuvan henkilön ja kuumien kerrosten välillä ei ole suoraa kosketusyhteyttä. Tulipalossa tämä tilanne vastaa esim. tilannetta, jossa kuumien kerrosten alareuna ei vielä ole laskeutunut kovin alas. Tällöin lämpöä siirtyy henkilöön vain säteilyn välityksellä, jota voidaan mallintaa asettamalla eo. lämmönsiirtoyhtälössä  $h_c = 0 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Kun emissiviteetille ja näkyvyyskerroinille käytetään arvoja  $\varepsilon = 0,9$  ja  $\Phi = 0,8$ , saadaan kuvassa Kuva 96d esitetty riippuvuus kuumien kerrosten lämpötilan ja 2. asteen palovamman muodostumisajan välille

<sup>4</sup> Tämä tulos julkaistuun tietoon perustuva tulos ja sinänsä siis kelpoisa, joskin on todettava, että kuvan Kuva 96c mukaan ihmiselle muodostuisi 2. asteen palovamma 2 minuutin kestoisessa altistuksessa 100 °C:een lämpötilalle, mikä on vastoin suomalaisille tuttua empiiristä havaintoa, että 100 °C:een lämpötilalle lämmitetyssä saunassa ei synny palovammoja. Tulos on siis paloteknisessä kirjallisuudessa usein esiintyvä konservatiivinen arvio.





Kuva 96. a) Wieczorekin & Dembseyn [32] esittämä kokeellisesti määritetty riippuvuus 2. asteen palovamman muodostumisen aiheuttavan altistuksen kestoajan (sekunneissa, logaritminen asteikko) ja lämpövuon välillä ja mittauspisteisiin pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen sovitettu käyrä. b) altistuksen kesto aika minuuteissa lämpövuon funktiona, c) arvio altistuksen kestoajalle minuuteissa kuuman kerroksen lämpötilan funktiona, kun lämpö siirtyy sekä konvektion että säteilyn välityksellä ja d) arvio altistuksen kestoajalle minuuteissa kuuman kerroksen lämpötilan funktiona, kun lämpö siirtyy vain säteilyn välityksellä.

# Lähdeviitteet

---

1. Hertzberg, T., Blomqvist, P. & Tuovinen, H. Reconstruction of an arson hospital fire. *Fire and Materials*. 2007, vol. 31, s.225–240
2. Tewarson, A. 2002. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. Teoksessa: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2002. S. 3-82 – 3-161. ISBN 087765-451-4.
3. Ingason, H. & Wickström, U. 2007. Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer. *Fire Safety Journal*, Volume 42, s. 161-166.
4. Hietaniemi, J., Hostikka, S. & Vaari, J. 2004. FDS simulation of fire spread - comparison of model results with experimental data. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2004. 45 p. + App. 6 p. (VTT Working Papers 4) ISBN 951-38-6556-8
5. J. Hietaniemi, T. Hakkarainen, J. Huhta; T. Korhonen, J. Siiskonen & J. Vaari. 2002. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 125 p. + App. 63 p. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2128.)
6. Hostikka, S. & Axelsson, J. Modelling of the radiative feedback from flames in cone calorimeter 2003. *NORDTEST*, Espoo. 41 s. *NORDTEST technical report* : 540
7. Korhonen, T. & Hietaniemi, J. 2004. Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa . Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 58 s. + liitt. 36 s. 2004. VTT Tiedotteita - Research Notes: 2253.
8. P. Friday & F. W. Mowrer. 2001. Comparison of FDS Model Predictions with FM/SNL Fire Test Data. NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
9. A. Hamins, A. Maranghides, K.B. McGrattan, E. Johnsson, T.J. Ohlemiller, M. Donnelly, J. Yang, G. Mulholland, K. Prasad, S. Kukuck, R. Anleitner & T. McAllister. 2004. Report on Experiments to Validate Fire Dynamic and Thermal-Structural Models for Use in the World Trade Center Investigation. NIST Special Publication in preparation, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
10. A. Hamins, A. Maranghides, K.B. McGrattan, Ohlemiller & R. Anletiner. 2004. Experiments to Validate Models of Fire Growth and Spread for use in the World Trade Center Investigation. NIST Special Publication in preparation, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
11. J. Floyd. 2002. Comparison of CFAST and FDS for Fire Simulation with the HDR T51 and T52 Tests. NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
12. A. Hamins and K.B. McGrattan. 2003. Reduced-Scale Experiments on the Water Suppression of a Rack-Storage Commodity Fire for Calibration of a CFD Fire Model. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*. International Association for Fire Safety Science, 457–468.
13. K. B. McGrattan and A. Hamins. 2003. Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001. NISTIR 6902, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. Joint Publication of NIST and the US Nuclear Regulatory Commission (NUREG/CR-6793).

- 
14. J.E. Floyd, C. Wiecek & U. Vandsburger. 2001. Simulations of the Virginia Tech Fire Research Laboratory Using Large Eddy Simulation with Mixture Fraction Chemistry and Finite Volume Radiative Heat Transfer. In Proceedings of the Ninth International Interflam Conference. Interscience Communications.
  15. A. Piergiorgio, D. Giuseppe, F. Dino, G. Zappellini & A. Ferrari. 2001. CFD Simulations of a Truck Fire in the Underground Gran Sasso National Laboratory. In Proceedings of the 5th Italian Conference on Chemical and Process Engineering. Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica (AIDIC).
  16. V. D'Souza, J.A. Sutula, S.M. Olenick, W. Zhang & R.J. Roby. 2001. Use of Fire Dynamics Simulator to Predict Smoke Detector Activation. In Proceedings of the 2001 Fall Technical Meeting, Eastern States Section. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania.
  17. T. Ma and J. Quintiere. 2003. Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations. *Fire Safety Journal*, 38:467–492.
  18. Y. Xin, J.P. Gore, K.B. McGrattan, R.G. Rehm & H.R. Baum. 2002. Large Eddy Simulation of Buoyant Turbulent Pool Fires. In Proceedings of the 2002 Spring Technical Meeting, Central States Section. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania.
  19. A. Kashef, N. Benichou, G.D. Lougheed & C. McCartney. 2002. A Computational and Experimental Study of Fire Growth and Smoke Movement in Large Spaces. Technical Report NRCC-45201, National Research Council Canada.
  20. S. Cochard. Validation of Fire Dynamics Simulator (Version 2.0) Freeware. *Tunnel Management International Journal*, 6(4), December 2003.
  21. W. Zhang, A. Hamer, M. Klassen, D. Carpenter & R. Roby. 2002. Turbulence Statistics in a Fire Room Model by Large Eddy Simulation. *Fire Safety Journal*.
  22. Harmanthy, T.Z. 1988. Properties of Building Materials. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 6. Society of Fire Protection Engineers/National Fire Protection Association, Boston, United States.
  23. Hadjisophocleous, G. & Zalok, E. 2007. Experiments for the characterization of design fires for commercial buildings. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University. 1125 Colonel By Drive, Ottawa, Ontario K1S 5B6, Canada
  24. Alpert, R.L. Calculation of response time of ceiling mounted fire detectors. *Fire Technology*, Vol. 8, s. 181-195. 1972.
  25. Evans DD (1993). Sprinkler fire suppression algorithm for HAZARD, Report NISTIR 5254, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
  26. Hamins, A.; McGrattan, K. B. 2003. Reduced-Scale Experiments on the Water Suppression of a Rack-Storage Commodity Fire for Calibration of a CFD Fire Model. Teoksessa: Fire Safety Science. Proceedings, 7<sup>th</sup> International Symposium. International Association for Fire Safety Science (IAFSS). June 16-21, 2003, Worcester, MA, Intl. Assoc. for Fire Safety Science, Boston, MA, Evans, D. D., Editor(s), s. 457-468.
  27. Yu, H. Z., Lee, J. L. & Kung, H. C. 1994. Suppression of Rack-Storage Fires by Water. teoksessa: Fire Safety Science, Proceedings, 4<sup>th</sup> International Symposium, International Association of Fire Safety Sciences. S. 901-912.
  28. Onnetomuustutkintakeskus, 2008. Tulipalo Pitkaniemen sairaalassa Nokialla 25.1.2007. Tutkintaselostus B1/2007Y.
  29. McGrattan, K. & Forney, G. 2004. Fire Dynamics Simulator (Version 4): User's Guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019, 90 s.

---

30. Marker, T. 2001. Heat Release and Flammability Testing of Surrogate Panels. Federal Aviation Administration, USA. Technical Note: DOT/FAA/AR-TN01/112 (saatavilla: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/01-112.pdf>)

31. [http://www.terveysportti.fi/terveysportti/ekirjat.NaytaArtikkeli?p\\_artikkeli=spr00009](http://www.terveysportti.fi/terveysportti/ekirjat.NaytaArtikkeli?p_artikkeli=spr00009) (viitattu 15.1.2008)

32. Wieczorek, C. J. & Dembsey, N. A. 2001. Human Variability Correction Factors for Use with Simplified Engineering Tools for Predicting Pain and Second Degree Skin Burns. *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 11, s. 88