

Historiallisesti arvokkaan kohteen toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu Esimerkkitapauksena Porvoon museo

Jukka Hietaniemi & Tuomo Rinne

ISBN 978-951-38-6623-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2007

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Kemistintie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7007

VTT, Kemistvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7007

VTT Technical Research Centre of Finland, Kemistintie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7007

Toimitus Anni Kääriäinen

Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka & Rinne, Tuomo		
Nimeke Historiallisesti arvokkaan kohteen toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu Esimerkkitapauksena Porvoon museo		
Tiivistelmä Säädöksissä esitetyt paloturvallisuusvaatimukset eivät kata historiallisten rakennusten paloturvallisuustarpeita, koska näissä kohteissa pyritään suojelemaan ja pelastamaan myös rakennus ja siellä oleva esineistö sekä usein myös koko interiööri. Lisäksi historiallisten rakennusten paloturvallisuus on toteutettava siten, että rakennusten alkuperäinen arkkitehtuuri, rakenteet sekä pintamateriaalien ja yleensä ottaen kohteen luonne säilytetään mahdollisimman hyvin. Tämä asettaa erityisvaatimuksia esim. paloilmaisimien, sammutuslaitteiden ja osastoivien rakenteiden asennuksille. Käytännössä historiallisten rakennusten kulttuuriarvojen säilyttäminen ja paloturvallisuusvaatimusten toteuttaminen noudattaen määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Siksi toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on erittäin hyvä ja joskus jopa ainut mahdollinen tapa historiallisten rakennusten paloturvallisuuden toteuttamiseen. Tässä julkaisussa esitetään historiallisten kohteiden toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun perusteet ja esimerkki menettelytavan soveltamisesta Porvoon museon paloturvallisuussuunnittelussa.		
ISBN 978-951-38-6623-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 1155
Julkaisu-aika Toukokuu 2007	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 136 s. + liitt. 44 s.
Projektin nimi POMO	Toimeksiantaja(t) Ympäristöministeriö	
Avainsanat performance-based fire safety engineering, museums, fire simulation, threats, evacuation time, personal safety, fire load, compartmentation, renovation, guarding, materials handling, heating, electrotechnical works, hot work operation	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Published by



Series title, number and
report code of publication

VTT Working Papers 71
VTT-WORK-71

Author(s) Hietaniemi, Jukka & Rinne, Tuomo		
Title Performance-based fire safety engineering of heritage buildings including a case study of the Porvoo museum		
Abstract <p>According to the ISO definition, fire safety engineering (FSE) means application of engineering principles, rules and expert judgement based on a scientific appreciation of the fire phenomena, of the effects of fire, and the reaction and behaviour of people, in order to: save life, protect property and preserve the environment and heritage; quantify the hazards and risk of fire and its effects; evaluate analytically the optimum protective and preventative measures necessary to limit, within prescribed levels, the consequences of fire.</p> <p>Thus, FSE-based approaches to provision of fire safety focus principally on achieving the desired goals, be them safeguarding life or property, and only secondarily on the means since any measures that provide the sufficient level of safety are equally valid. Thus, FSE gives a considerably wider freedom for the designer to obtain a safe result than the conventional approaches of fire safety design in which the designer must choose the safety measures strictly according to the prescriptions given in the fire regulations. In heritage buildings where the building materials, structures and lay-outs themselves are of great value, complying with the regulatory prescriptions can be very tedious or expensive and sometimes virtually impossible and in such cases, use of FSE may be the only rational solution. The publication describes the principles of use of FSE in fire safety design of heritage buildings as well as an application of FSE to improve the fire safety of a museum building from the 18th century in the town of Porvoo in Finland.</p>		
ISBN 978-951-38-6623-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 1155
Date May 2007	Language Finnish, English abstr.	Pages 136 p. + app. 44 p.
Name of project POMO	Commissioned by Ministry of the Environment	
Keywords performance-based fire safety engineering, museums, fire simulation, threats, evacuation time, personal safety, fire load, compartmentation, renovation, guarding, materials handling, heating, electrotechnical works, hot work operation	Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

Alkusanat

Säädöksissä esitetyt paloturvallisuusvaatimukset eivät kata historiallisten rakennusten paloturvallisuustarpeita, koska näissä kohteissa pyritään suojelemaan ja pelastamaan myös rakennus ja siellä oleva esineistö sekä usein myös koko interiööri. Lisäksi historiallisten rakennusten paloturvallisuus on toteutettava siten, että rakennusten alkuperäinen arkkitehtuuri, rakenteet sekä pintamateriaalien ja yleensä ottaen kohteen luonne säilytetään mahdollisimman hyvin. Tämä asettaa erityisvaatimuksia esim. paloilmaisimien, sammutuslaitteiden ja osastoivien rakenteiden asennuksille. Käytännössä historiallisten rakennusten kulttuuriarvojen säilyttäminen ja paloturvallisuusvaatimusten toteuttaminen noudattaen määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Siksi toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on erittäin hyvä ja joskus jopa ainut mahdollinen tapa historiallisten rakennusten paloturvallisuuden toteuttamiseen.

Tässä julkaisussa esitetään historiallisten kohteiden toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun perusteet ja esimerkki menettelytavan soveltamisesta Porvoon museon paloturvallisuussuunnittelussa.

Hankkeen on rahoittanut ympäristöministeriö. Tekijät kiittävät rahoittajan lisäksi hankkeen johtoryhmää ja Porvoon aluepelastuslaitosta arvokkaasta opastuksesta ja hyvistä neuvoista hankkeen aikana.

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
OSA I. HISTORIALLISTA ARVOKKAAN KOHTEEN TOIMINNALLINEN PALOSUUNNITTELU – PERUSTEET JA YLEISIÄ OHJEITA	9
1. Johdanto.....	11
2. Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu.....	13
3. Historiallisesti arvokkaan kohteen paloturvallisuustavoitteet	15
4. Prosessi.....	16
5. Uhkakuvat ja niiden analysointi.....	17
5.1 Uhkakuvien valitseminen	17
5.2 Uhkakuvien määrällinen kuvaus: mitoituspalo.....	17
5.3 Palonsimulointi	20
5.3.1 Palonsimuloinnilla tarkasteltavat asiat	22
5.3.2 Palonsimulointi käyttäen FDS-ohjelmaa	22
5.4 Poistumislaskenta	24
5.4.1 Yleistä poistumislaskentamalleista.....	24
5.4.2 Poistumisajan laskenta.....	24
5.4.2.1 Palon havaitsemisvaihe	25
5.4.2.2 Reagointivaihe	26
5.4.2.3 Siirtymisvaihe.....	27
5.4.3 Monte Carlo -menetelmän käytöstä poistumisaikalaskelmissa.....	28
6. Saatujen tulosten turvallisuuden arviointi.....	30
6.1 Deterministiset, todennäköisyysperustaiset ja riskianalyttiset lähestymistavat.....	30
6.1.1 Esimerkkejä deterministisestä lähestymistavasta.....	30
6.1.2 Esimerkkejä todennäköisyysperustaisista lähestymistavoista	32
6.2 Henkilöturvallisuuden riskien suuruuden arviointiin perustuva lähestymistapa.....	34
6.2.1 F-N-käyrä.....	35
6.2.2 F-N-käyrän soveltaminen paloriskeihin.....	37
6.2.3 Palotilastoihin perustuva henkilöriskien F-N-käyrä.....	39
7. Historiallisten kohteiden palosuojaus erityispiirteitä.....	42
7.1 Palokuorma	42

7.2	Syttymisen estäminen.....	42
7.3	Palon kehittymisen rajoittaminen.....	44
	7.3.1 Sisä- ja ulkopinnat	44
	7.3.2 Katteet.....	44
7.4	Palo-osastointi.....	44
7.5	Rakenteiden kantavuuden säilyttäminen	45
7.6	Palon leviämisen estäminen naapurirakennuksiin	46
7.7	Poistuminen palon sattuessa	47
7.8	Sammutus- ja pelastustehtävien järjestely	47
8.	Korjausrakentamisen aikainen paloturvallisuus.....	48
8.1	Säädökset ja ohjeet	48
	8.1.1 Valtioneuvoston päätös rakennustöiden turvallisuudesta	48
	8.1.2 Laki ja asetus palo- ja pelastustoimesta.....	48
	8.1.3 Työturvallisuuslaki	49
	8.1.4 Suojeluohjeet.....	49
	8.1.5 Yleisohjeet	49
8.2	Vartiointi.....	50
8.3	Palavien materiaalien käsittely ja varastointi.....	50
8.4	Jätteiden käsittely ja hävittäminen	50
8.5	Lämmityslaitteet ja -järjestelmät.....	51
8.6	Sähköasennukset ja -laitteet.....	51
8.7	Tulityöt [RATU 2006].....	51
	8.7.1 Tulityölupa	52
	8.7.2 Tulityökortti	53
	8.7.3 Tulitöiden palosuojavarustus	53
	8.7.4 Työkohteen toimenpiteet ja tarkastukset	54
	8.7.4.1 Ennen tulitöitä.....	54
	8.7.4.2 Tulityön aikana	55
	8.7.4.3 Tulityön jälkeen	55
9.	Pelastussuunnitelma	56
OSA II. TOIMINNALLISEN PALOTURVALLISUUSSUUNNITTELUN SOVELTAMINEN PORVOON VANHAAN RAATIHUONEESEEN		57
10.	Johdanto	58
11.	Oletettuun palokehitykseen perustuvan tarkastelun soveltamisala	59
12.	Hyväksymiskriteerit	60
13.	Kohteen kuvaus	62

14. Henkilömäärä ja erilaisten henkilöiden suhteellinen osuus	67
15. Rakenteellinen paloturvallisuus ja paloturvallisuuslaitteet.....	69
15.1 Syttymisen ehkäisy ja palon kehittymisen rajoittaminen	69
15.2 Osastointi	69
15.3 Rakenteiden kantavuus	69
15.4 Poistumisturvallisuus.....	69
15.5 Paloturvallisuuslaitteet.....	70
15.6 Palokunnan toimintamahdollisuudet	70
16. Tarkastelun kohteeksi valitut uhkakuvat ja niiden analysointimenetelmien kuvaus	74
16.1 Palotilanteet.....	74
16.2 Poistumistilanteet	77
16.3 Menetelmien kuvaus.....	77
16.3.1 FDS-palonsimulointiohjelma	77
16.3.2 Poistumislaskelmat: ohjelma FDS+Evac ja sen käyttö	79
17. Uhkakuvien analysointi	84
17.1 Tulipalo pohjakerroksen vanhassa vaunuvarastossa	84
17.2 Informaatiopisteen palo 1. kerroksen sisääntuloaulassa.....	89
17.3 Toimistohuoneen palo 1. kerroksessa.....	99
17.4 Tietokoneiden ja tietokonepöydän palo 2. kerroksessa	104
17.5 Palavalla nesteellä sytytettävä tuhopoltto 2. kerroksen puuesineistöä sisältävässä huoneessa	108
17.6 Sähkölaitteiden palo 3. kerroksessa yläpohjan onteloon johtavissa portaissa.....	111
17.7 Tuhopoltto, jossa 3. kerroksen Vanhan Porvoon pienoismalli sytytetään palavalla nesteellä	120
17.8 Tulipalo yläpohjan ontelossa	124
18. Yhteenveto	128
Lähdeluettelo	130

Liitteet

- Liite A: Pelastussuunnitelma Porvoon museolle
- Liite B: Paloteknisen mallintamisen yksityiskohtia
- Liite C: Mallien kelpoisuudesta
- Liite D: Riskianalyttisten menetelmien kuvauksia

**OSA I. HISTORIALLISTEesti ARVOKKAAN
KOHTEEN TOIMINNALLINEN
PALOSUUNNITTELU
– PERUSTEET JA YLEISIÄ OHJEITA**

1. Johdanto

Laki vaatii, että rakennuksen ja muun rakennuskohteen tulee täyttää seuraavat paloturvallisuuden olennaiset vaatimukset [Ympäristöministeriö 2002]:

- Rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan.
- Palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua.
- Palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa.
- Rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin.
- Pelastushenkilöstön turvallisuus on otettava huomioon rakentamisessa.

Nämä vaatimukset koskevat pääsääntöisesti uusia rakennuksia. Historiallisissa kohteissa niiden toteutumista vaaditaan yleensä sen jälkeen, kun kohteessa tehdään merkittäviä korjausrakennustoimenpiteitä.

Edellä mainittujen paloturvallisuusvaatimusten katsotaan täyttyvän, kun

1. rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattaen näiden määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja tai
2. rakennus suunnitellaan ja rakennetaan perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. Vaatimuksen täytyminen todennetaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon rakennuksen ominaisuudet ja käyttö.

Jälkimmäistä tapaa kutsutaan usein myös toiminnalliseksi paloturvallisuussuunnitteluksi (performance-based fire safety design). Myös tässä julkaisussa käytetään tätä nimitystä. Termin ”toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu” käyttöä voi perustella seuraavasti:

- Termi viittaa siihen, että rakennuksen toiminta palon sattuessa suunnitellaan sellaiseksi, että paloturvallisuusvaatimukset täyttyvät.
- Termi yhdistää tämän tavan suorittaa paloturvallisuuden suunnittelu yleisempään, toiminnasta lähtevään suunnittelutapaan, jota sovelletaan monilla raken-

tamisen suunnittelun eri aloilla, kuten talotekniikkaan liittyvässä suunnittelussa (ilmastointi, lämpöviihtyvyys jne.).

Edellä esitetyt paloturvallisuusvaatimukset eivät kata historiallisten rakennusten paloturvallisuustarpeita, koska näissä kohteissa pyritään suojelemaan ja pelastamaan myös rakennus ja siellä oleva esineistö sekä usein myös koko interiööri ml. mahdolliset seinä- ja kattomaalaukset. Lisäksi historiallisten rakennusten paloturvallisuus on toteutettava siten, että rakennusten alkuperäinen arkkitehtuuri, rakenteet sekä pintamateriaalien ja yleensä ottaen kohteen luonne säilytetään mahdollisimman hyvin. Tämä asettaa erityisvaatimuksia esim. paloilmaisimien, sammutuslaitteiden ja osastoivien rakenteiden asennuksille. Palon sattuessa historiallisten rakennusten sammuttaminen on vaativa tehtävä, koska se tulee yleensä tehdä pyrkien minimoimaan veden käyttö, koska vesi voi vaurioittaa kohteen esineistöä ja interiööriä: tämä pätee niin automaattisiin sammutusjärjestelmiin kuin palokunnan toimenpiteisiin.

Käytännössä historiallisten rakennusten kulttuuriarvojen säilyttäminen ja paloturvallisuusvaatimusten toteuttaminen noudattaen määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Siksi toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on erittäin hyvä ja joskus jopa ainut mahdollinen tapa historiallisten rakennusten paloturvallisuuden toteuttamiseen. Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu vaatii kohteen paloturvallisuuden varsin syvällistä, määrällisellä tasolla tehtävää arviointia, ja siksi se luonnollisesti vaatii ”tavanomaista” eli määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja noudattavaa lähestymistapaa korkeampia taloudellisia panostuksia. Kustannuksia arvioitaessa on kuitenkin hyvä pitää mielessä se, että historiallinen rakennus on ainutlaatuinen kokonaisuus, jonka arvo ei ole mitattavissa rahassa.

Museovirasto [Jokinen ym. 2004] on laatinut oppaan historiallisten kohteiden paloturvallisuudesta. Koska tuo opas luo erinomaisen yleiskatsauksen historiallisten kohteiden paloturvallisuuteen, tässä julkaisussa ei lähdetä toistamaan tuota esitystä, vaan keskitytään nimenomaan historiallisten kohteiden toiminnalliseen paloturvallisuussuunnitteluun. Ensin esitellään toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu (luvut 2–6) ja sitten käydään läpi nimenomaan historiallisen kohteen toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun erityispiirteitä (luku 7). Julkaisun osassa II (luvusta 10 alkaen) esitetään esimerkkikohteen, Porvoon museon, toiminnallinen paloturvallisuus-suunnittelu. Koska korjausrakentamisen paloturvallinen toteuttaminen samoin kuin pelastussuunnitelma ovat olennainen osa historiallisten kohteiden paloturvallisuutta, esitetään niitä koskevia ohjeita ennen esimerkkikohteen käsittelyä luvuissa 8 ja 9. Julkaisussa on neljä liitettä, joissa esitellään tarkemmin pelastussuunnitelman sisältöä (liite A), palon ja poistumisen simuloinnin yksityiskohtia (liitteet B ja C) sekä määrälliseen riskianalyysiin (liite D) liittyviä teknisiä asioita.

2. Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu

Toiminnallisessa paloturvallisuussuunnittelussa lähdetään kohteen ominaisuuksista ottaen huomioon kaikki paloturvallisuuden kannalta relevantit tekijät. Suunnittelu perustuu *tulipalon uhkakuviin*, joita kohteessa voi esiintyä. Uhkakuvat ovat kuvauksia kohteen eri tiloissa alkavista paloista, joita palosuunnittelija käsittelee laadullisesti ja määrällisesti arvioiden mm. palon alkamisen todennäköisyyttä, sen kasvamis tapoja ja -nopeuksia ja palon leviämisen mahdollisuutta. Uhkakuvista sovitaan paloviranomaisten kanssa suunnitteluprosessin alussa. Tässä arvioinnissa otetaan huomioon kohteen ominaisuudet tarkastellen mm. tilojen ja rakenteiden ominaisuuksien (esim. palavat materiaalit) ja eri palontorjuntalaitteiden, kuten alkusammuttimien, palonilmaisimien, savunpoistolaitteiden ja automaattisten sammuuslaitteiden, vaikutusta. Jos uhkakuvaan liittyy henkilöturvallisuuden arviointi, tulee suunnittelijan määrittää henkilömäärä, henkilöiden jakautuminen toimintakyvyltään erilaisiin henkilötyyppeihin ja näiden eri henkilötyyppien toiminta eli tiedon saaminen palosta ja tähän tietoon reagoiminen ja poistumisen vaatima aika. Yleensä yhdenkin uhkakuvan tarkastelussa käydään läpi useita eri vaihtoehtoja, kunnes löydetään paloturvallisuustavoitteet täyttävä ratkaisu. Se, täyttyvätkö paloturvallisuustavoitteet, selvitetään vertaamalla kohteen toimintaa palon sattuessa sen toiminnalle asetettuihin hyväksymiskriteereihin. Vielä tällä hetkellä hyväksymiskriteerit sovitaan kohdekohtaisesti paikallisten palo- ja rakennusviranomaisten kanssa. Tilanne on epätydyttävä siinä mielessä, että *tulkinnat* siitä, mikä on turvallista ja mikä ei, poikkeavat eri paikkakunnilla, kun turvallisuus sinänsä ei toki voi riippua siitä, missä kunnassa ollaan.

Kohteen toiminta tulipalon sattuessa eli se, miten savu ja kuumat kaasut leviävät, milloin ilmaisimet tai sammutinlaitteet toimivat jne., määritetään käyttäen palonsimulointia, jossa termi ”simulointi” viittaa todellisuuden jäljittelyyn. Palon simuloinnin tietokoneohjelmat ovat ohjelmistoja, joilla kuvataan tulipaloa kyseisessä kohteessa. Parhaat nykyään saatavilla olevat ohjelmat pystyvätkin täyttämään tämän tehtävän riittävän hyvin, joten kohteen palonaikaiseen toimintaan viittaava termi ”toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu” on sopivampi kuin vielä säädöksissä esiintyvä termi ”oletettuun palonkehitykseen perustuva” suunnittelu. Ihmisten poistumista arvioidaan poistumisen simulointiohjelmissä, jotka pyrkivät mahdollisimman hyvin ottamaan huomioon ihmisten todellista käyttäytymistä palon sattuessa. Rakenteiden vasteen laskentaan voidaan käyttää erilaisia laskentamalleja yksinkertaisista yksittäisten rakenneosien toiminnan käsinlaskentakaavoista aina rakennejärjestelmien lämpömekaanisen toiminnan FEM-perustaisiin tietokoneohjelmiin.

Toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun olennaiset tekijät ovat siis

- paloturvallisuustavoitteiden asetanta

- suunnitteluprosessi
- uhkakuvat, jotka käsitellään määrällisesti käyttäen
 - palonsimulointia
 - poistumislaskentaa
 - rakenteiden toiminnan laskentaa
- saatujen tulosten turvallisuuden arviointi vertaamalla kohteen toiminnalle saatuja tuloksia paloturvallisuusvaatimuksiin ja niihin liittyviin hyväksymiskriteereihin.

3. Historiallisesti arvokkaan kohteen paloturvallisuustavoitteet

Historiallisessa kohteessa paloturvallisuustavoitteet ovat yleensä laajemmat kuin tavanomaisissa kohteissa, koska näissä kohteissa pyritään suojelemaan ja pelastamaan myös rakennus ja siellä oleva esineistö sekä usein myös koko interiööri ml. mahdolliset seinä- ja kattomaalaukset yms. Lakisääteiset paloturvallisuustavoitteet ja niihin historiallisissa kohteissa liittyvät tarkennukset ja lisäykset esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Historiallisesti arvokkaan kohteen paloturvallisuustavoitteet.

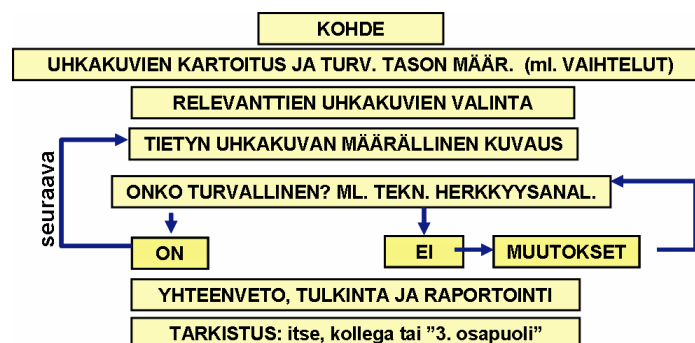
Lakisääteiset tavoitteet	Muita tavoitteita ja tarkennuksia
<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan. 	<ul style="list-style-type: none"> Historiallisesti arvokkaan kohteen kantavien rakenteiden voidaan vaatia kestävän koko palon aiheuttaman lämpö- rasituksen hiipumisvaihe mukaan lukien, eli rakennuksen arvosta johtuen ja huolimatta sen muodollisesta paloluokasta lienee usein syytä soveltaa P1-paloluokan rakennusten vaatimustasoa.
<ul style="list-style-type: none"> Palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua. 	<ul style="list-style-type: none"> Palon lieskahtamisen (yleissyttymisen) mahdollisuus tulisi mahdollisuuksien mukaan estää kaikissa rakennuksen tiloissa, koska lieskahtanut palo tuhoaa lieskahtavan tilan esineistön ja vaurioittaa rakennusta vakavasti. Lisäksi se voi johtaa palon leviämiseen palon alkamisosaston ulkopuolelle. Savu voi muodostaa vakavan uhan historiallisesti ja kulttuurillisesti arvokkaille esineille, mikä painottaa savun hallinnan tärkeyttä.
<ul style="list-style-type: none"> Palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa. 	<ul style="list-style-type: none"> Historiallisesti arvokkaat kohteet muodostavat usein osan arvokasta rakennuskokonaisuutta, mikä painottaa tärkeyttä ehkäistä palon leviämisen lähistöllä oleviin rakennuksiin.
<ul style="list-style-type: none"> Rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin. 	<ul style="list-style-type: none"> Historiallisesti arvokkaissa kohteissa voi olla joitain erityisen arvokkaista esineitä (koruja, taideteoksia jne.), joiden pelastamisesta voi olla syytä tehdä samantyyppiset pelastamissuunnitelmat kuin henkilöiden pelastamisesta. Myös siihen, että esineistön poistaminen palavasta rakennuksesta ei ole mahdollista, tulisi varautua esim. palon sattuessa laukeavien suojausten avulla.
<ul style="list-style-type: none"> Pelastushenkilöstön turvallisuus on otettava huomioon rakentamisessa. 	<ul style="list-style-type: none"> Pelastushenkilöstön turvallisuuden takaamisen lisäksi tulisi huolehtia siitä, että palokunta pääsee mahdollisimman vaivattomasti (ja vähällä vesimäärällä) sammuttamaan kohdetta. Eräs erityiskohde, joka tähän liittyen pitää ottaa huomioon, on erilaisten onteloiden, esim. yläpohjan ontelon, tulipalot, joiden sammuttaminen voi olla hyvin vaikeaa. Sammuttamista tulee siksi helpottaa esim. asentamalla onteloihin kuivasprinklaus.

4. Prosessi

Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on aina kohdekohtainen tarkastelu. Kohteesta tulee ottaa huomioon ainakin seuraavat tekijät:

- Perustiedot rakennuksesta ja sen käytöstä:
 - rakennuksen koko, tilojen järjestely, rakenteet (kantavat ja ei-kantavat), aukot
 - palavien aineiden sijaintipaikat ja potentiaaliset syttymiskohteet
 - toiminnot rakennuksessa ja sen miehitys eri aikoina
- Tiedot paloturvallisuusmenetelmistä ja -laitteista:
 - poistumistiet, palovaroittimet ja -ilmoittimet, alkusammutuskalusto, savunpoisto, sprinklaus, palokunnan toimintamahdollisuudet kohteessa (aikatekijät ja palokunnan koko)
 - rakenteiden palonkestävyys
- Tulipalojen kuvaus:
 - mahdollisten paloskenaarioiden valinta
 - eri skenaarioiden palon peruskuvaus (ilman palontorjuntatoimenpiteitä)
- Palontorjuntatoimenpiteiden vaikutuksen arviointi:
 - palon havaitseminen
 - ilmaisimien ja sprinklereiden laukeaminen
 - henkilökunnan suorittamat sammutustoimenpiteet
 - palokunnan saapuminen paikalle ja sen toimenpiteiden vaikutus (mikä voidaan tehdä määrällisesti eri ajoille laadittavien tapahtumapuiden avulla; ks. ajasta riippuvat tapahtumapuut [Korhonen ym. 2002, Hietaniemi ym. 2002a])
- Henkilöille ja omaisuudelle aiheutuvien seuraamusten kvantitatiivinen kuvaaminen suoritetaan laskennallisen tarkastelun avulla:
 - savun, myrkyllisten kaasujen ja kuumuuden kehittyminen palon alkutilassa ja muissa tiloissa
 - rakenteiden lämpeneminen
 - ihmisten poistuminen rakennuksesta
- Saatujen tulosten arviointi eli täyttävät esitetyt paloturvallisuusratkaisut hyväksymille asetetut kriteerit. Seuraamusten katsotaan realisoituvan, kun tietyt kriteerit täyttyvät.

Suunnitteluprosessia havainnollistetaan kuvassa 1.



Kuva 1. Suunnitteluprosessin kaaviollinen esitys.

5. Uhkakuvat ja niiden analysointi

5.1 Uhkakuvien valitseminen

Uhkakuva on toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun peruskäsite: tietyn uhkakuvan voidaan luonnehtia olevan käyttötarkoitukseensa nähden riittävän yksityiskohtainen kuvaus olosuhteista palon aikana. Tietyn kohteen paloturvallisuutta tarkasteltaessa käydään läpi usein monia erilaisia mahdollisia uhkakuvia ja toiminnallisen suunnittelun perustaksi valitaan näistä ne, jotka ovat mitoittavia. Mitoittava palotapahtuma valitaan ja sijoitetaan siten, että palon seurauksena syntyvät vaarallisimmat olosuhteet eri palorasitustekijöiden suhteen, missä vaaraa tulee mitata riskinä eli ottaen huomioon myös uhkakuvan todennäköisyys.

5.2 Uhkakuvien määrällinen kuvaus: mitoituspalo

Yleisin tapa kvantifioida paloa sen kasvuvaiheessa on kuvata palon kehittymistä ns. t^2 -mallilla, joka esitetään liitteessä B. Tässä lähestymistavassa palotehon oletetaan kasvavan neliöllisesti ajan mukana, kunnes se saavuttaa maksimiarvonsa. Palaminen jatkuu maksimiteholla, kunnes palo alkaa hiipua, mikä tapahtuu tyypillisesti, kun polttoainees-ta on palanut noin 60–80 % [CEN 2002].

Mitoituspalon olennaiset tekijät ovat

- palon kasvunopeus
- palon suurin voimakkuus
- palon kestoaika.

Näille tekijöille ei (vielä) ole olemassa malleja, joilla ne voitaisiin laskea niihin vaikuttavien tekijöiden, kuten polttoaineen laatu, geometria ja määrä, perusteella. Tämä on kuitenkin eräs tärkeimpiä palotutkimuksen aiheita, ja palonsimulointimalleilla on pystytty toistamaan lukuisia kokeellisia palon kehittymistä koskevia tuloksia, ks. esim. Hietaniemi ym. [2004]. Palot jaotellaan usein neliöllisen palon kasvamisen mallin kasvuaikatekijän mukaan neljään luokkaan. Kasvuajan mukaan jaoteltuna luokat ovat seuraavat: hidas $t_g = 600$ s, normaalisti kasvava $t_g = 300$ s, nopea $t_g = 150$ s ja erittäin nopeasti kasvava palo $t_g = 75$ s. Esimerkiksi kirjastolle suositellaan Eurocode 1:ssä [CEN 2002] arvoa 150 s.

Palon voimakkuuden suurin arvo \dot{Q}_{\max} määräytyy joko polttoaineen tai hapen syöttönopeudesta. Tulipalossa nämä molemmat rajoittavat tekijät voivat vaikuttaa myös samanaikaisesti, esimerkkinä tästä on nestemäisen polttoaineen palaminen altaassa: vaikka pääasiallinen rajoittava tekijä on altaan koosta johtuva, palamisreaktioihin osallistuvan polttoaineen määrän rajoittuminen, rajoittaa palotehoa osittain myös riittämätön hapen saanti etenkin suurien altaiden keskellä. Tulipaloissa rajoittavana tekijänä voi luonnollisesti olla myös ulkopuolinen sammutus (sprinklerit tai palokunnan sammutustoimet).

Jos polttoaineen ja hapen saanti ovat riittäviä, suljetussa tilassa palava tulipalo voi äkillisesti kasvaa rajusti rajatulla alueella tapahtuvasta paikallisesta palosta koko tilan kattavaksi paloksi: tilan sanotaan lieskahtavan. Lieskahtaminen johtuu siitä, että tulipalon ja tilan muodostamassa systeemissä lämpötuotot ovat suuremmat kuin lämpöhäviöt, minkä vuoksi systeemi ei päädy tasapainotilaan, vaan ajautuu termisesti epästabiliin tilaan, jossa katastrofaalinen käyttäytyminen eli tilan lieskahtaminen voi tulla mahdolliseksi.

Polttoaineen saannin rajoittamassa palossa täysin kehittyneen vaiheen palotehoa voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{\text{fire}}(t) = \dot{Q}_{\max} = \dot{Q}'' \cdot A_f, \text{ kun } t_1 \leq t \leq t_2, \quad (1)$$

missä \dot{Q}_{\max} on maksimipaloteho, \dot{Q}'' on palavan kohteen tuottama paloteho pinta-alayksikköä kohti, A_f on palavan kohteen pinta-ala ja t_2 on hetki, jolloin palon hiipuminen alkaa. Yksittäisille tuotteille ja materiaaleille pinta-alayksikköä kohti syntyvää palotehoa \dot{Q}'' voidaan arvioida esim. kartiokalometrikoekesien tuloksista. Tyypillisiä arvoja ovat esimerkiksi seuraavat:

- puun tasainen palaminen 100–150 kW/m²
- PVC-muovi 150–300 kW/m² (vaihtelee muovin klooripitoisuudesta riippuen)
- palosuojaamaton PU-muovi (esim. huonekalujen pehmusteet) 200–500 kW/m²
- palosuojaamaton polyeteeni tai polypropeeni 1000–2000 kW/m²
- öljyaltaan palaminen¹ 2000 kW/m² [McGrattan ym. 1997].

¹Palavien nesteiden palotehoa voidaan arvioida tarkemmin esim. Babrauskasin [2002] esittämällä menetelytavalla.

Useita materiaaleja sisältävissä kohteissa suuretta \dot{Q}'' voidaan arvioida sopivalla painotetulla keskiarvolla eri materiaalien osuuksista tai käyttämällä kirjallisuudesta mahdollisesti löytyviä arvoja, kuten seuraavat tiedot: myymälöissä ja kokoontumistiloissa, joissa \dot{Q}'' -arvon voidaan Eurocode 1:n mukaan olettaa olevan 500 kW/m^2 , ja 250 kW/m^2 asunnoissa, majoitustiloissa ja hoitolaitoksissa sekä työpaikkatiloissa. Nämä arvot ovat kuitenkin vain asiantuntija-arvioita, ja niihin tulee suhtautua sellaisina.

Hapen saannin rajoittamassa palossa paloteho riippuu tilan aukkojen koosta. Suurin mahdollinen aukkojen koon sallima paloteho on [Karlsson & Quintiere 2000]

$$\frac{\dot{Q}_{\max}}{\text{kW}} = 1500 \cdot \left(\frac{A_o}{\text{m}^2} \right) \sqrt{\frac{h_o}{\text{m}}}, \quad (2)$$

missä A_o on tilassa olevien aukkojen pinta-ala ja h_o on aukkojen keskimääräinen korkeus. Mikäli tilassa on useita aukkoja, yhdistetään niiden korkeudet ja pinta-ala laskennallisesti Eurocode 1:ssä [CEN 2002] esitetyllä tavalla. Tämän laskutavan mukaan usean aukon tapauksessa korkeudelle käytetään arvoa, joka saadaan aukkojen pinta-alalla painotettuna keskiarvona eri aukkojen korkeuksista, ja aukkopinta-ala on aukkojen pinta-alan summa.

Kun palon kasvunopeus ja maksimipaloteho tunnetaan, palon kestoaikaa voidaan arvioida palokuorman määrän perusteella: palontehon ajallisen riippuvuuden kuvaajan integraali yli koko palon kestoajan on sama kuin paloon osallistuvan materiaalin sisältämä palossa vapautuva lämpöenergia Q . Tätä lämpöenergiamäärää arvioidaan tyypillisesti kahdella eri tavalla:

1. Etsitään tilastoista tai muista tiedonlähteistä kohdetta kuvaava palokuorman tiheys lattiapinta-alaa kohden q'' [MJ/m^2] ja kerrotaan se lattiapinta-alalla A_f [m^2]: $Q = q \times A_f$ [MJ]. On huomattava, että palokuorman tiheys q'' on stokastinen (vaihteleva) suure, jota voidaan luonnehtia esim. Gumbel-jakaumalla [CEN 2002]: esim. kirjastoille suuren q'' keskimääräinen arvo on 1500 MJ/m^2 ja 80 %:n fraktiiliarvo on 1824 MJ/m^2 .
2. Määritetään kohteen palavan materiaalin laadut (mikä materiaali) ja massat ja lasketaan kokonaispalokuorma laskemalla yhteen eri materiaalien palokuorma, joka saadaan kertomalla materiaalin massa sen tehollisella lämpöarvolla.

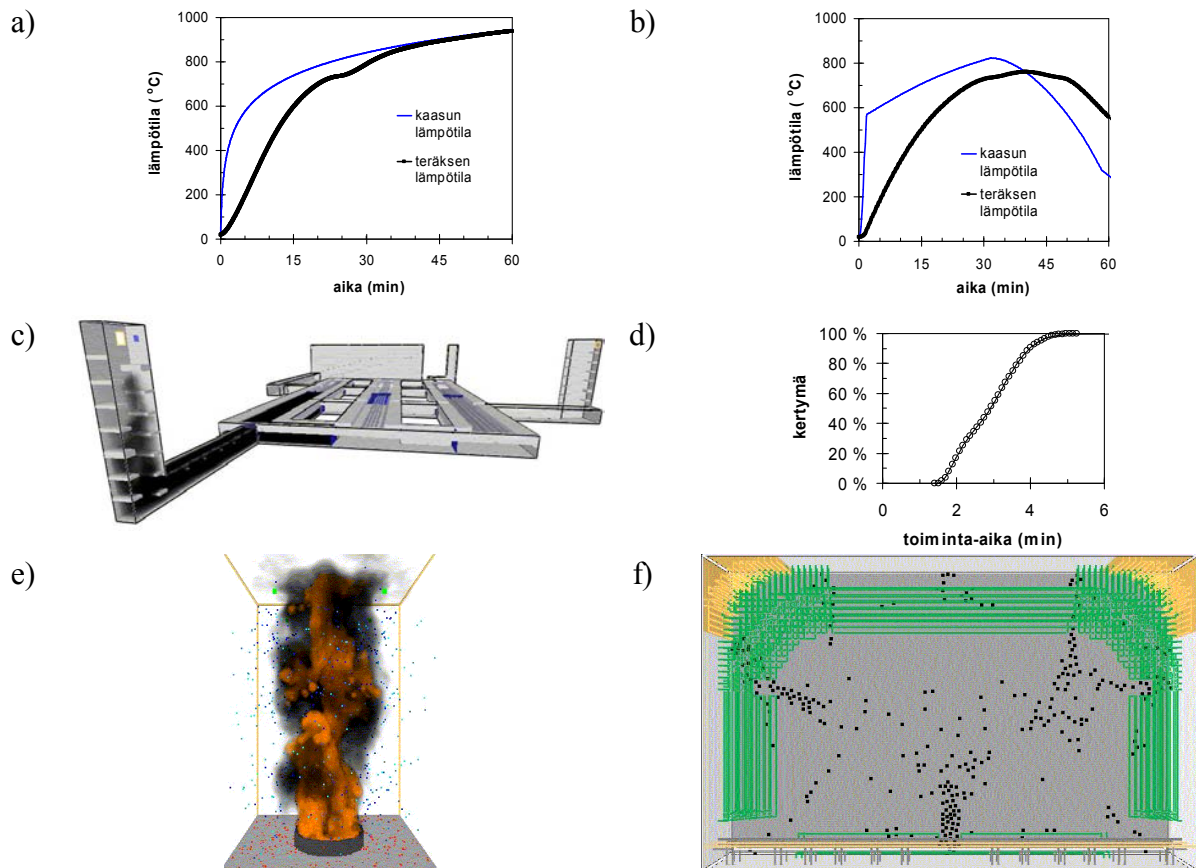
Historiallisille kohteille näistä tavoista jälkimmäinen on ehdottomasti suositeltavampi, koska historialliset kohteet ovat usein yksilöitä ja siksi niille – kirjastoja lukuun ottamatta – on vaikea löytää sopivia tilastollisia arvoja.

Liitteessä B esitetään tarkempia tietoja koskien bensiinin, roskakorin, puutavaran, paperin tai pahvin ja sähkölaitteen palamisen voimakkuuden arviointia.

5.3 Palonsimulointi

Palotekniikassa mallinnusta ja simulointia käytetään tulipalon ja sen vaikutusten määrälliseen kuvaamiseen, joka on ennustavaa silloin, kun paloteknistä mallinnusta käytetään rakennusten tai muiden kohteiden suunnittelussa, mutta simulointia voidaan käyttää myös palotilanteen rekonstruoinnissa esim. palosyyntutkinnassa. Palonsimulointimenetelmät voidaan jaotella kolmeen eri luokkaan, jotka ovat yksinkertaisimmista alkaen seuraavat:

- Suljetussa muodossa esitettävissä olevat mallit, joita usein kutsutaan analyttisiksi malleiksi (esim. McCaffreyn, Quintieren ja Harkleroadin laatima kehittyvän palon malli [McCaffrey ym. 1981] ja Pettersonin ym. (1976) kehittämä Eurocode 1:ssä [CEN 2002] esitetty täysin kehittyneen palon lämpötilan laskentamalli).
- Vyöhykemallit, joissa palotilaan ajatellaan muodostuvan pystysuunnassa kaksi kerrosta: ylempi savua ja palotuotteita sisältävä kuuma kerros ja alempi kerros, joka on selvästi ylempää kerrosta kylmempi ja sisältää vain vähän savua ja palotuotteita. Vyöhykemalleista tunnetuin on CFAST [Peacock ym. 1993], mutta myös muita malleja on lukuisia määriä [Friedman 1992], joista esim. OZone-ohjelmassa [Cadorin & Franssen 2003] on kiinnitetty paljon huomiota käytettävyyden helppouteen.
- Kenttämallit, joissa tarkasteltavan tilan lämpötila- ja virtauskentät ratkaistaan lähtien virtausmekaniikan perusyhtälöistä. Pitkälle kehittyneitä kenttämalleja ovat mm. SOFIE [esim. Moss & Rubini 1997], JASMIsNE [Cox & Kumar 1987] ja FDS [McGrattan 2004].



Kuva 2. Esimerkkejä paloteknisestä mallintamisesta: a) standardilämpötila ja sille altistetun teräsrakenteen lämpötila, b) vyöhykemallilla laskettu lämpötila ja sille altistetun teräs-rakenteen lämpötila, c) savun leviämisen mallintaminen maanalaisessa pysäköintitilassa, d) stokastisen mallintamisen tuloksena saatu ilmaisimen toiminta-ajan todennäköisyys, e) tulen, savun ja sprinklauksen mallintaminen ja f) ihmisten poistumisen mallintaminen.

Paloteknisen mallintamisen kyky tuottaa luotettavia tuloksia on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosien aikana lähinnä kahden tekijän vuoksi: toinen on palotekniikan tieteellisen ymmärtämisen kypsyminen yhä paremmin todellisuutta kuvaaviksi malleiksi ja toinen on laskennan tehostuminen, johon vaikuttavat tietokoneiden laskentatehon voimakas kasvu sekä paloteknisten mallien tehokas ohjelmointi tietokoneille. Tämä kehitys näkyy siinä, että toisaalta palon deterministisessä mallintamisessa ollaan siirtymässä yksittäisten tekijöiden laskennasta monta tekijää samanaikaisesti laskeviin laskennallisiin malleihin ja toisaalta stokastinen mallintaminen on korvaamassa deterministisen mallintamisen.

5.3.1 Palonsimuloinnilla tarkasteltavat asiat

Esimerkkejä asioista, joita paloteknisellä simuloinnilla kuvataan, ovat mm. kaasun tai kiinteiden aineiden lämpötilat, tilan savuisuus, myrkyllisten kaasujen pitoisuudet, rakenteiden kestävyys, ilmaistemien ja sprinklereiden laukeamisajat, ihmisten poistumiseen kuluva aika jne. Kuvassa 2 esitetään esimerkkejä paloteknisestä mallintamisesta.

Käytännössä deterministisen mallintamisen kehitys näkyy selvimmin siinä, että vyöhykemallit, kuten CFAST, ovat väistymässä kenttämallien, kuten FDS, tieltä. Kun 10 vuotta sitten laskettiin tyypillisesti kahta suuretta, palotilan kuumen kerroksen lämpötilaa ja korkeutta, niin tällä hetkellä samassa ajassa saadaan laskettua tilan kaasujen lämpötilat ja vallitseva säteily, savun tiheys ja myrkyllisten kaasujen pitoisuudet ja näiden leviäminen sekä rakenteiden kuumeneminen ja lämmönsiirto ottaen huomioon mm. savunpoiston ja sprinklereiden vaikutukset. Lisäksi uusimmissa ohjelmissa voidaan samassa laskennassa suorittaa ihmisten poistumisen arviointi.

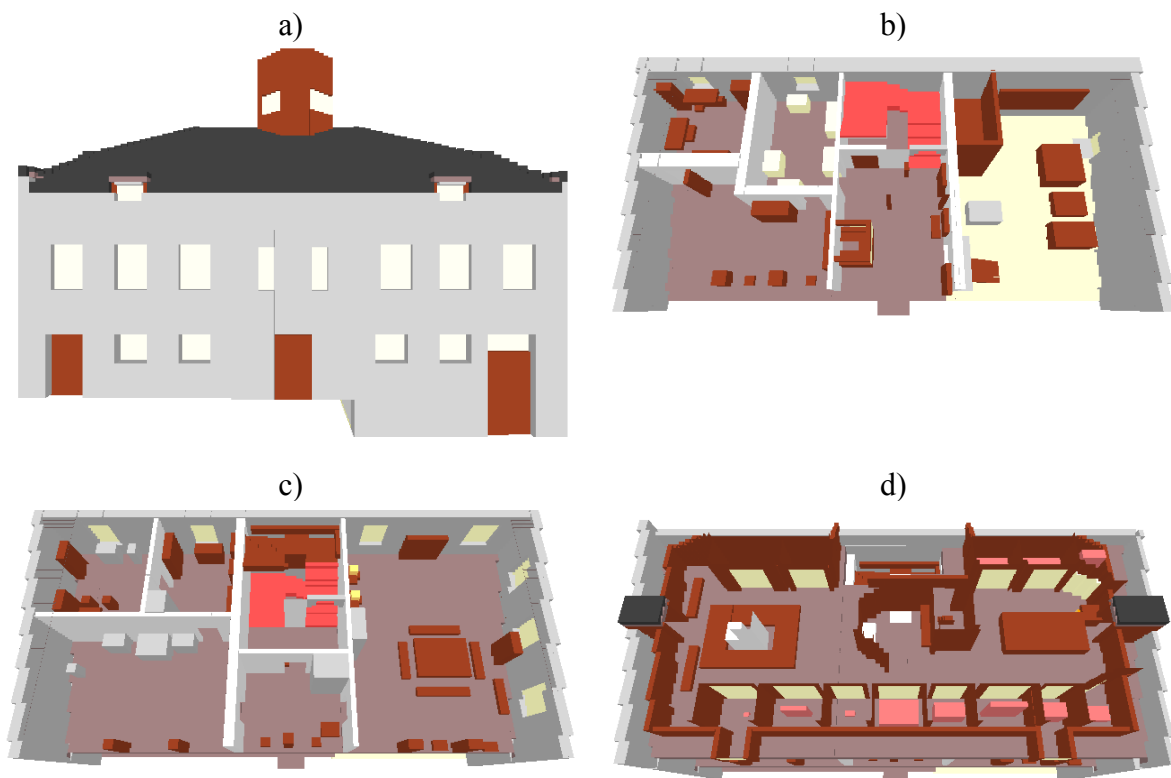
Vaihtelevuus on tulipalon olennainen piirre, ja siksi palotekniikassa käytetyssä mallintamisessa ollaan siirtymässä deterministisistä yksittäisiin piste-estimaatteihin, kuten keskiarvoihin perustuvista malleista stokastisiin malleihin, joissa ainakin olennaisimpien tekijöiden osalta käytetään tietoa myös niiden jakaumista. Mallinnus perustuu useita kertoja toistuviin satunnaisotoksiin malliin sisältyvistä jakaumista, mikä tuottaa todennäköisyysjakauman halutulle tulokselle. Koska laskentatapaan liittyy tietojen arpomista, sitä kutsutaan usein Monte Carlo -laskennaksi. Kun tähän laskentatapaan liitetään tilastotiedoista johdettuja malleja koskien esim. tulipalojen esiintymismistäajuutta, palokunnan toimintaa jne., näitä malleja käyttäen pystytään arvioimaan määrällisesti paloihin liittyviä riskejä.

5.3.2 Palonsimulointi käyttäen FDS-ohjelmaa

National Institute of Standards and Technology (NIST) -tutkimuslaitoksessa (USA) kehitetty Fire Dynamics Simulator (FDS) -ohjelma on tällä hetkellä maailman kehittynein ja käytetyin palonsimulointiohjelma. VTT on osallistunut aktiivisesti FDS:n kehitysohjelmaan tehden mm. lämmönsiirron laskentamalleja. Tällä hetkellä on käytössä FDS-ohjelman versio 4 [McGrattan 2004]. FDS-ohjelmalla voidaan laskea tulipalojen kehittymistä ja leviämistä sekä savun, kuumien kaasujen ja myrkyllisten kaasujen syntymistä ja leviämistä (ks. kuva 3). FDS-ohjelman kelpoisuuden todentamiseksi on tehty paljon laskettujen tulosten ja vastaavien koetulosten vertailuja. Näitä tutkimuksia on tehty VTT:ssä [Hietaniemi ym. 2002b, Hostikka & Axelsson 2003, Hietaniemi ym. 2004, Korhonen & Hietaniemi 2004], NIST:ssä USA:ssa [Friday & Mowrer 2001, Floyd 2002, Hamins ym. 2004a, Hamins ym. 2004b, Hamins & McGrattan 2003, McGrattan

& Hamins 2003] samoin kuin muissa tutkimuslaitoksissa [Floyd ym. 2001, D’Souza ym. 2001, Piergiorgio ym. 2001, Kashef ym. 2002, Xin ym. 2002, Zhang ym. 2002, Cochard 2003, Ma & Quintiere 2003]. FDS-ohjelma on siis erittäin perusteellisesti validoitu ja täyttää Rakennusmääräyskokoelman osassa E1 [Ympäristöministeriö 2002] esitetyt laskentaohjelmille esitetyt vaatimukset (E1, kohta 1.3.2).

FDS-mallissa kuvataan materiaalien kuumenemista ja palamista kullekin materiaalille määritettävien lämpöteknisten suureiden ja palo-ominaisuuksia kuvaavien suureiden avulla. Liitteessä B luetellaan tässä työssä FDS-simuloinneissa käytettyjen materiaalien fysikaaliset ominaisuudet.



Kuva 3. Esimerkki palonsimuloinnin FDS-mallista (Porvoon museon FDS-malli): a) ulkoseinät, b) 1. ja 0. kerros, c) 2. kerros ja d) 3. kerros. Geometria on luotu rakennuksen pohja- ja leikkauspiirustusten sekä kohteessa tehtyjen mittausten mukaan ja tilat on kalustettu kohteen tietojen ja kohteesta otettujen valokuvien mukaisesti.

5.4 Poistumislaskenta

5.4.1 Yleistä poistumislaskentamalleista

Useimmat poistumisen laskentamallit ovat deterministisiä, eli samoilla lähtötiedoilla päädytään aina samaan lopputulokseen. Näissä malleissa poistumassa olevat henkilöt esimerkiksi valitsevat useiden eri kulkureittien välillä aina lyhimmän tien, mikä on usein epärealistinen oletus, koska todellisessa tilanteessa henkilöt eivät välttämättä tunne kohdetta riittävän hyvin tietääkseen, mikä on lyhin reitti. Determinististen mallien lisäksi on kehitetty myös stokastisia malleja, joissa eri muuttujia pidetään satunnaismuuttujina, joita kuvaavat tietyt todennäköisyysjakaumat. Sekä poistumiseen käytettävissä oleva aika (riippuu palon kehittymisestä) että poistumiseen käytettävä aika ovat satunnaismuuttujia. Uusimpia poistumisen laskentamalleja, esim. FDS+Evac, jota käytetään Porvoon museon esimerkkitapauksessa, voidaan käyttää myös sellaisten todellisten paniikkitilanteiden tarkasteluun, joissa on vaarana, että ihmiset puristuvat kuoliaaksi.

5.4.2 Poistumisajan laskenta

Poistumiseen kuluva kokonaisaika t_e muodostuu eri vaiheiden yhteenlasketusta kestoajasta. Poistumisen mitoittaminen voidaan käsitellä rajatilamitoitustehtävänä, jossa poistumiseen käytettyä aikaa verrataan poistumiseen käytettävissä olevaan eli kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluvaan aikaan t_{crit} ($t_{crit} \geq t_e$). Kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika saadaan palonkehittymismalleista yhdistettynä tunnettuihin raja-arvoihin.

Poistumistapahtuma voidaan jakaa kolmeen eri osavaiheeseen:

- palon havainnointivaiheeseen (t_a)
- reagointivaiheeseen (t_r)
- siirtymisvaiheeseen (t_m).

Näin ollen kokonaispoistumisajaksi t_e tulee yhtälön (3) mukaisesti

$$t_e = t_a + t_r + t_m. \quad (3)$$

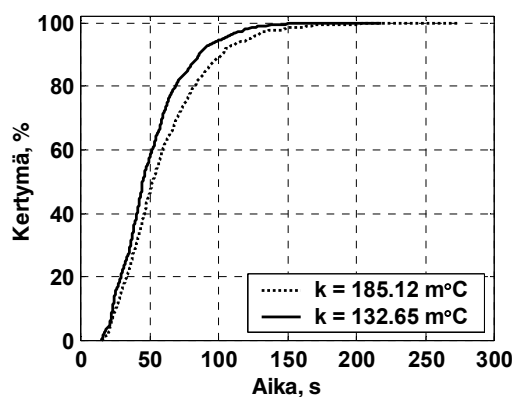
Kuhunkin edellä mainittuun poistumisajan osatekijään liittyy merkittävä epävarmuus: suurin epävarmuus liittyy aikaan, joka kuuluu siihen, että ihminen tulee havainneeksi palon, sekä siihen, miten ihminen käyttäytyy palon havaittuaan, mutta siirtymisvaiheen pituus vaihtelee merkittävästi. Käypä laskennallinen tekniikka merkittäviä epävarmuuksia sisältävien tekijöiden vaikutuksen huomioon ottamiseen on ns. Monte Carlo -menetelmä, jossa laskennan lopputulos muodostetaan todennäköisyys- ja tilastolaskentaa käyttäen suuresta joukosta laskennallisia otoksia. Yksityiskohtaisempi kuvaus Monte Carlo -menetelmästä esitetään liitteessä D. Seuraavissa kohdissa käsitellään tarkemmin poistumisaikalaskelmien osavaiheita sekä niihin liittyvän epävarmuuden kuvaamiseen käytettyjä tilastollisia malleja ja menetelmiä.

5.4.2.1 Palon havaitsemisvaihe

Poistumisaikalaskelmissa on oletettu, että palo havaitaan ensimmäisenä paloilmaisimien avulla eikä esim. ihmisten aistien avulla. Tätä varten tarvitaan tietoa paloilmaisujärjestelmän aktivoitumisajasta.

Tutkimuksen kohteena olevassa rakennuksessa oli käytössä paloilmaisujärjestelmä, jonka toiminta perustui savuilmaisimiin. Savuilmaisimia on perinteisesti sekä optisia että ionisaatioon perustuvia ilmaisimia, joissa ilmaisimen sisään virtaava savu aiheuttaa poikkeaman laitteen normaaliaikaiseen toimintaan ja näin ollen myös hälytyksen.

Liitteessä B esitetään taustoja ja teoriaa lämpötilan nousuun perustuvalle savuilmaisinmallille. Tuloksena mallista esitetään kuvassa 4 kahden hieman erityyppisen paloskeenaarion (tuhopoltto ja hitaampi syttyminen) kaksi erilaista aktivoitumisaikajakaumaa savuilmaisimelle. Nämä jakaumat toimivat samalla havainnointivaiheen aikajakaumina, joita tässä työssä on käytetty poistumisaikalaskelmissa.



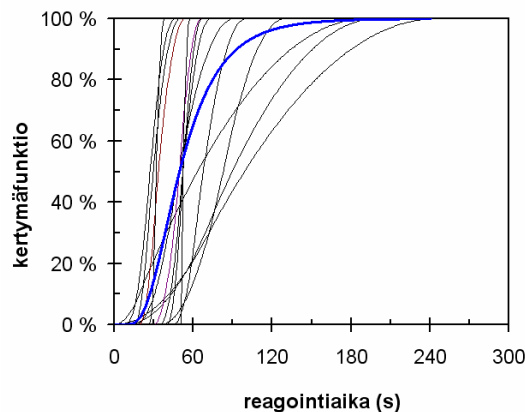
Kuva 4. Savuilmaisimen aktivoitumisaika sekä kertymäfunktio kahdessa eri paloskeenaariotapauksessa.

5.4.2.2 Reagointivaihe

Ihmisen päätöksentekovaihetta ei (vielä) voida mallintaa lähtien kohteen ja siellä olevien henkilöiden määrästä ja ominaisuuksista, ja siksi päätöksentekovaiheen arvioinnissa käytetään joko asiantuntija-arvioita [esim. RIL 2003] tai koeaineistoon perustuvaa mallintamista. Taulukossa 2 ja kuvassa 5 esitetään esimerkki tällaisesta koeaineistoon perustuvasta mallintamisesta. Tämän otoksen mediaaniaika on 50 s ja 99,5 %:n fraktiili on 3 minuuttia.

Taulukko 2. Eri lähteistä esitettyjä reagointivaiheen kestoa kuvaavia tietoja.

Keskiarvo	Min.	Max.	Kuvaus	Lähde
00:19	00:00	03:12	erityyppisistä rakennuksista poistuminen	Purser & Bensilum (2001)
01:10	00:00	04:06	yliopiston henkilökunta	Gwynne ym. (2003)
01:13	00:08	03:20	yliopiston opiskelijat	Gwynne ym. (2003)
00:44	00:16	01:31	sairaalan henkilökunta	Gwynne ym. (2003)
00:51	00:30	01:06	sairaalan potilaat	Gwynne ym. (2003)
00:30	00:19	00:54	Örebro IKEA	Frantzich (2001)
00:50	00:35	01:13	Örebro IKEA	Frantzich (2001)
00:50	00:51	00:57	Örebro IKEA	Frantzich (2001)
00:27	00:09	00:46	Västerås IKEA	Frantzich (2001)
00:51	00:40	01:07	Västerås IKEA	Frantzich (2001)
00:31	00:27	00:38	Västerås IKEA	Frantzich (2001)
00:26	00:15	00:50	Älmhult IKEA	Frantzich (2001)
01:02	00:45	01:40	Älmhult IKEA	Frantzich (2001)
01:23	00:35	02:10	Älmhult IKEA	Frantzich (2001)



Kuva 5. Taulukossa esitettyjen reagointivaiheen ajallista kestoa koskevien tietojen mallintaminen käyttäen yksittäisille havainnoille kolmiojakaumaa ja kaikkien havaintojen yhdistetylle otokselle modifioitua Weibull-jakaumaa.

5.4.2.3 Siirtymisvaihe

Siirtymisvaiheen laskemiseksi tarvitaan poistumismalleja, jos rakennuksen geometria on monimutkainen ja ihmisten lukumäärä on suuri. Tässä julkaisussa tarkastellaan VTT:n kehittämää FDS+Evac-ohjelmaa, jossa kuhunkin ihmiseen liittyi tiettyjä suureita, joilla pyrittiin saamaan hajontaa tuloksiin. Tällaisia suureita olivat

- ihmisten kävelynopeus
- ihmisten dimensio (hartiamitta)
- ihmisten sijoittuminen (eri kerrokset, sijoittuminen kerroksessa)
- ihmisten lukumäärä
- ihmistyyppi (sukupuoli, lapsi/aikuinen).

Kävelynopeutena voidaan käyttää esim. Simulex-ohjelmassa [Thompson & Marchant 1995] esitettyä mallia, jonka mukaan normaalisti liikkumaan pääsevien henkilöiden kävelynopeus noudattaa katkaistua normaalijakaumaa, jossa henkilöiden esteetön liikkumisnopeus vaihtelee välillä 0,8...1,7 m/s. Liikkumisnopeutena portaikossa (alaspäin) voidaan käyttää esteetöntä liikkumisnopeutta vähennettynä tekijällä 0,7. Liikkumiskyvyltään selvästi keskimääräistä hitaammin liikkuvia henkilöitä voidaan mallintaa käyttäen IMO:n [2002] esittämää mallia, jossa hitaasti liikkuvan naishenkilön nopeus vaihtelee välillä 0,43...0,71 m/s ja mieshenkilön nopeus välillä 0,64...1,06 m/s.

Ihmisten dimensioina käytettiin niin ikään Simulex-ohjelmassa käytettyjä arvioita eri ihmistyyppien (sukupuoli, lapsi/aikuinen) mukaan taulukossa 3 esitettävällä tavalla.

Taulukko 3. Henkilöiden hartiamittajakaumat metreinä.

	Muut	Mies	Nainen	Lapsi	Nainen ¹	Mies ¹
Keskiarvo	0,5	0,54	0,48	0,42	0,48	0,54
Minimi	0,46	0,5	0,44	0,38	0,44	0,5
Maksimi	0,54	0,58	0,52	0,46	0,52	0,58

¹ Hitaammin liikkuvan henkilön hartiamitta.

Ihmisten lukumäärä, sijoittuminen ja jakautuminen lapsiin, aikuisiin jne. tehdään pääsääntöisesti kohdekohtaisesti. Kohdekohtaisen tiedon puuttuessa voidaan ihmisten lukumäärää arvioida SRMK:n osassa E1 esitettyjen tietojen mukaisesti, jotka esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Henkilömäärän arviointi kohteen käyttötavan mukaan [Ympäristöministeriö 2002].

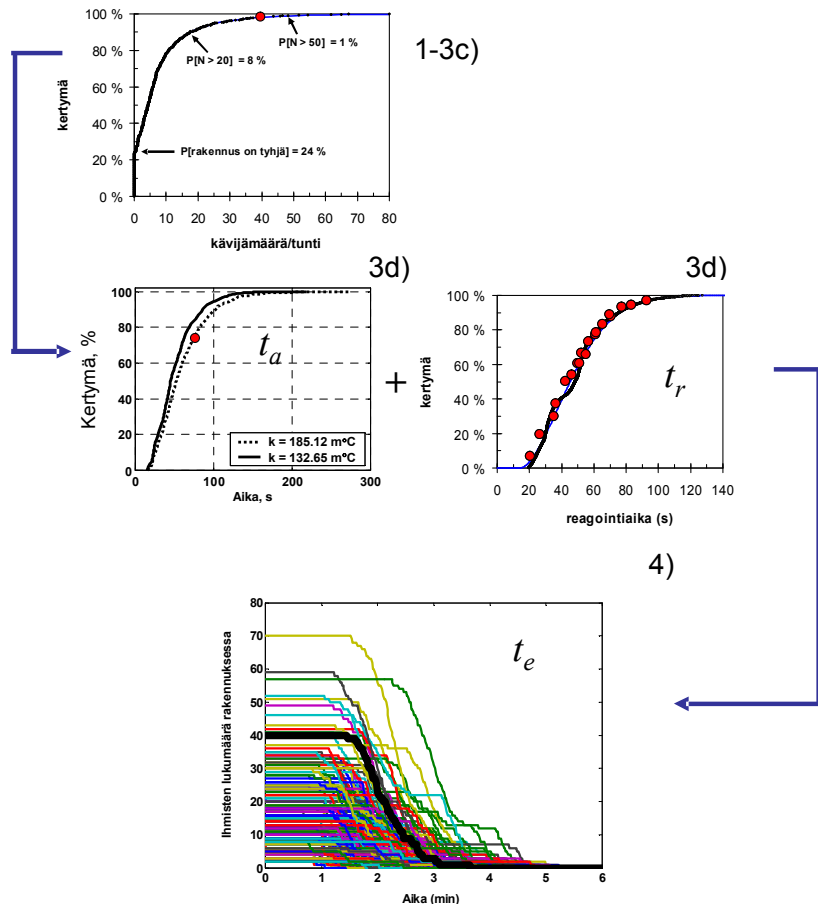
Käyttötapa	m ² per henkilö
Asumnot	10
Majoitustilat	10
Hoitolaitokset	10
Kokoontumis- ja liiketilat	
• yleensä	3
• huvi-, taide- ja vastaavat kokoontumistilat	1
Työpaikkatilat	10
Tuotanto- ja varastotilat	30

5.4.3 Monte Carlo -menetelmän käytöstä poistumisaikalaskelmissa

Monte Carlo -menetelmä on laskentatekninen keino käyttää vaihtelevaa tietoa, joka on ominaista mm. poistumisaikalaskelmille, joissa vaihtelevia suureita ovat

1. ihmisten lukumäärän valinta
2. ihmisten jakaminen satunnaisesti eri kerroksiin
3. yksittäiseen ihmiseen liittyvät ominaisuudet, kuten
 - a. sijainti kerroksessa
 - b. ihmistyyppin (aikuinen/lapsi/muut) mukainen dimensio
 - c. kävelynopeus
 - d. liikkeellelähtöaika (havainnointivaihe + reagointivaihe)
4. poistumisen eli siirtymävaiheen laskenta (FDS+Evac).

Monte Carlo -menetelmässä laskenta toistetaan useita kertoja (tyypillisesti esim. 1000–1 000 000 kertaa) siten, että kullakin laskentakerralla laskennan syötemuuttujat valitaan satunnaisesti niitä kuvaavista jakaumista. Tulokseksi saadaan otos tuloksia, jotka analysoimalla saadaan laskennan tulossuureen tilastollinen malli. Menettelyä havainnollistetaan kuvassa 6 ja sitä käsitellään tarkemmin liitteessä D.



Kuva 6. Kaaviokuva Monte Carlo -menetelmän käytöstä poistumisaikalaskelmissa. Kaaviokuva edustaa tapausta, jossa suoritetaan yksittäinen poistumisaikalaskelma 10 henkilölle. Vaiheissa 1–3c) valitaan satunnaisesti olemassa olevasta jakaumasta henkilömäärä sekä muut ihmistyyppiin liittyvät ominaisuudet kohdan 5.4.3 luettelon mukaisesti. Vaiheessa 3d) valitaan koko henkilöryhmälle satunnainen yhteinen palon havainnointiaika sekä kullekin yksittäiselle henkilölle reagointiaika. Näillä tiedoilla saadaan lasketuksi yhdelle tapaukselle kokonaispoistumisaika (kohta 4, musta viiva). Toistamalla useita kertoja peräkkäin vaiheet 1–3d) saadaan erilaisia tuloksia ja hajontaa kokonaispoistumisajalle.

6. Saatujen tulosten turvallisuuden arviointi

6.1 Deterministiset, todennäköisyysperustaiset ja riskianalyttiset lähestymistavat

Toiminnallisessa paloturvallisuussuunnittelussa saatujen tulosten turvallisuuden arviointi voidaan tehdä

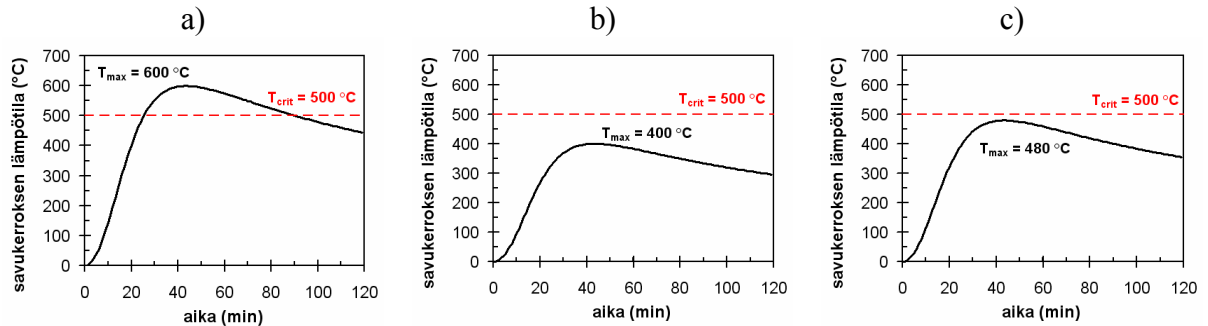
- 1) deterministisesti, jolloin arviointi perustuu tiettyihin yksittäisiin arvoihin
- 2) todennäköisyysperustaisesti, jolloin
 - a) osa arvioinnista perustuu deterministisiin arvoihin ja osa stokastisesti eli todennäköisyysperustaisesti arvioituihin suureisiin
 - b) kaikkia arvioinnissa käytettäviä suureita käsitellään stokastisina suureina
- 3) riskianalyttisesti, joka tapa on todennäköisyysperustaisen lähestymistavan laajennus siten, että tarkastelussa otetaan huomioon (epätoivottavien) tapahtumien todennäköisyyden lisäksi niiden myös vakavuus.

Esimerkkejä deterministisestä toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun tulosten turvallisuuden arvioinnista esitetään kohdassa 6.1.1 ja todennäköisyysperustaisesta lähestymistavasta kohdassa 6.1.2. Henkilöturvallisuuden riskiperustainen arviointi esitetään kohdassa 6.2. Yleinen riskiperustainen paloturvallisuuden arviointimenettely esitetään liitteessä D.

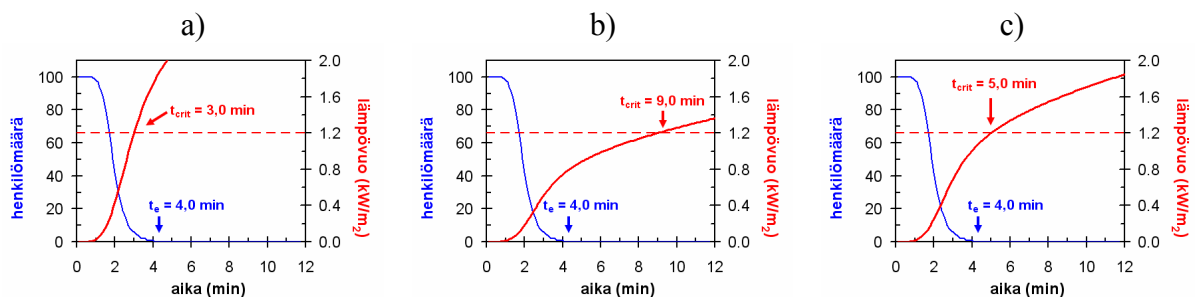
6.1.1 Esimerkkejä deterministisestä lähestymistavasta

Deterministisessä arvioinnissa jonkin paloturvallisuusratkaisun toimintaa kuvaavan suureen arvoa verrataan johonkin järjestelmän turvallista toimintaa kuvaavaan arvoon eli hyväksymisarvoon. Esimerkiksi omaisuuden turvaamisen ja myös esim. palon leviämisen rajoittamisen samoin kuin pelastajien turvallisuuden kannalta eräs toiminnallinen tavoite voi olla lieskahtamisen estäminen, minkä tavoitteen toteutumista voidaan yksinkertaisimmillaan arvioida vertaamalla tilaan muodostuvan savukerroksen lämpötilaa lieskahduksen kannalta kriittiseen lämpötilaan, jona voidaan pitää esim. 500 °C:ta (kuva 7). Henkilöturvallisuutta arvioidaan tyypillisesti vertaamalla sitä aikaa, joka ihmisiltä kuluu tilasta poistumiseen, siihen aikaan, jolloin olosuhteet tilassa muodostuvat esim. kuumuuden vuoksi ihmisille sietämättömiksi (kuva 8). Kuten kuvista käy ilmi, deterministinen paloturvallisuusratkaisun hyväksyttävyyden arviointi on helposti hahmotettavissa ja selkeä lähestymistapa – kunhan paloturvallisuussuunnittelun tulokset ovat riittävän suuren turvamarginaalin päässä vaaralliseksi katsottavasta tilanteesta (kuvien 7 ja 8 c-kohdat). Tämä heikkous on deterministisen lähestymistavan akilleenkantapää, koska

se ei anna mitään määrällistä tukea sille ratkaisevan tärkeälle arvioinnille, miten suuri turvamarginaalin tulee olla. Lopulta voi käydä niin, että tulosten hyväksyttävyyys päätetään pelkän ”tuntuman” perusteella.



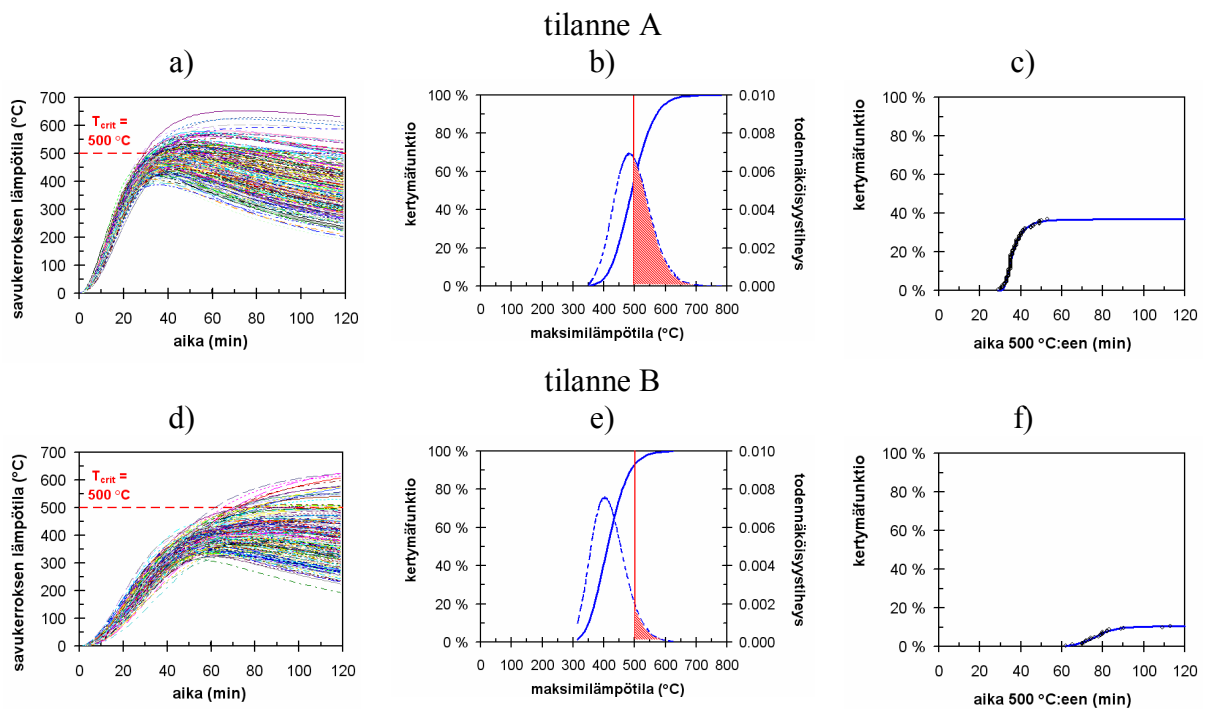
Kuva 7. Esimerkki deterministisestä paloturvallisuusvaatimuksen toteutumisen arvioinnista, jossa huonetilaan muodostuvan savukerroksen lämpötilaa verrataan tilan lieskahtamiseen johtavaan lämpötilaan, jonka arvioidaan olevan 500 °C: a) tilanne, jota ei voida hyväksyä, koska savukerroksen maksimilämpötila ylittää hyväksymiskriteerinä käytetyn lämpötilarajan, b) hyväksyttäväksi katsottava tilanne, jossa savukerroksen maksimilämpötila jää selvästi hyväksymiskriteerinä käyttävän rajan alapuolelle, ja c) vaikeasti tulkittava tilanne, jossa savukerroksen maksimilämpötila jää vain vähän hyväksymiskriteerinä käyttävän rajan alapuolelle.



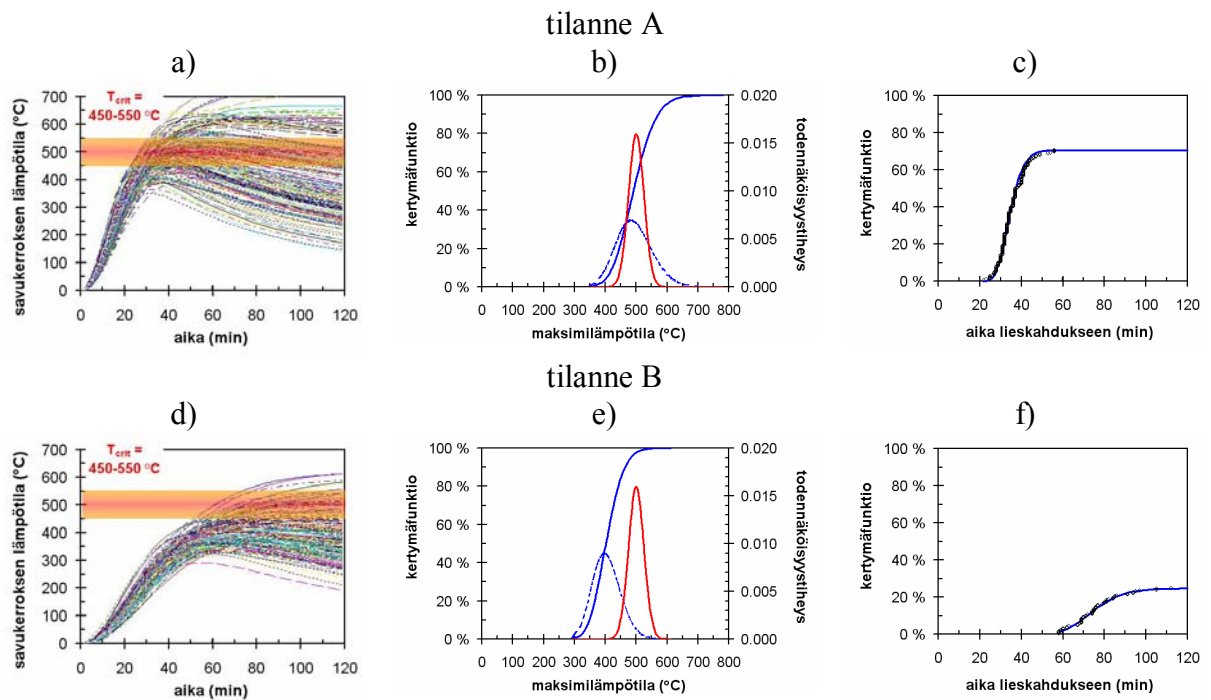
Kuva 8. Esimerkki deterministisestä paloturvallisuusvaatimuksen toteutumisen arvioinnista, jossa henkilöturvallisuutta arvioidaan vertaamalla tilan tyhjenemiseen vaadittavaa aikaa siihen hetkeen, jolloin olosuhteet tilassa muodostuvat kriittisiksi siellä oleville ihmisille: a) tilanne, jota ei voida hyväksyä, koska tilassa on ihmisiä vielä, kun savukerroksen synnyttämä lämpövuoto ylittää sille kriittiseksi arvioidun tason 1,2 kW/m², b) hyväksyttäväksi katsottava tilanne, jossa tila tyhjenee selvästi ennen kuin savukerroksen synnyttämä lämpövuoto ylittää sille kriittiseksi arvioidun tason, ja c) vaikeasti tulkittava tilanne, jossa aikamarginaali tilan tyhjenemisen ja kriittisten olosuhteiden muodostumisen välillä ei ole kovin suuri.

6.1.2 Esimerkkejä todennäköisyysperustaisista lähestymistavoista

Esimerkkeinä todennäköisyysperustaisista lähestymistavoista tarkastellaan lieskahtamisen estämiseen liittyvää esimerkkiä. Kuvassa 9 esitetään osittain determinististä ja osittain todennäköisyysperustaista lähestymistapaa soveltava esimerkki, jossa huonetilaan muodostuvan savukerroksen stokastisesti, Monte Carlo -tekniikkaa käyttäen, laskettua lämpötilaa verrataan tilan lieskahtamiseen johtavaan lämpötilaan, jonka arvioidaan olevan täsmälleen 500 °C. Kuvassa 10 esitetään sama esimerkki käsiteltynä siten, että myös kriteeriä pidetään stokastisena suurena (normaalijakaunut suure, jonka 95 %:n vaihteluväli noin 450–550 °C).



Kuva 9. Esimerkki osittain deterministisestä ja osittain todennäköisyysperustaisesta paloturvallisuusvaatimuksen toteutumisen arvioinnista, jossa huonetilaan muodostuvan savukerroksen stokastisesti Monte Carlo -tekniikkaa käyttäen laskettua lämpötilaa verrataan tilan lieskahtamiseen johtavaan lämpötilaan, jonka arvioidaan olevan täsmälleen 500 °C. Tilanne A, kuvat a–c: tilan lämpötila (esimerkkiotos esitetään kuvassa a) saavuttaa kriittisen lämpötilan noin 45 %:n todennäköisyydellä (kuva b); tarkempi analysointi (kuva c) osoittaa, että tämä tapahtuu 30–50 minuutissa. Tilanne B, kuvat d–f: tilan lämpötila (esimerkkiotos esitetään kuvassa d) saavuttaa kriittisen lämpötilan noin 7 %:n todennäköisyydellä (kuva e); tarkempi analysointi (kuva f) osoittaa, että tämä tapahtuu vasta 60 minuutin jälkeen.



Kuva 10. Esimerkki todennäköisyysperustaisesta paloturvallisuusvaatimuksen toteutumisen arvioinnista, jossa huonetilaan muodostuvan savukerroksen stokastisesti Monte Carlo -tekniikkaa käyttäen laskettua lämpötilaa verrataan tilan lieskahtamiseen johtavaan lämpötilaan, jota kuvataan normaalijakaumalla, jonka keskiarvo on 500 °C ja keskihajonta 25 °C (95 %:n vaihteluväli noin 450–550 °C). Tilanne A, kuvat a–c: tilan lämpötila (esimerkkiotos esitetään kuvassa a) saavuttaa kriittisen lämpötilan noin 70 %:n todennäköisyydellä (kuva b); tarkempi analysointi (kuva c) osoittaa, että tämä tapahtuu noin 20–50 minuutissa. Tilanne B, kuvat d–f: tilan lämpötila (esimerkkiotos esitetään kuvassa d) saavuttaa kriittisen lämpötilan noin 25 %:n todennäköisyydellä (kuva e); tarkempi analysointi (kuva f) osoittaa, että tämä tapahtuu vasta noin 60 minuutin jälkeen.

Näissä tapauksissa laskenta antaa määrällisen arvion turvamarginaalille, joka perimmiltään on vain eräs tapa ilmaista epätoivotun tapahtuman todennäköisyys. Koska laskenta on ajastariippuvana, tulokset antavat arvion myös sille, *milloin* epätoivottuja tapahtumia aikaisintaan tapahtuu. Tällä on suuri merkitys, kun todennäköisyyksien arviointiin otetaan mukaan palokunnan sammutustoimien vaikutus: esimerkiksi kuvien 9 ja 10 esittämässä tilanteissa A lieskahtaminen voi tapahtua 20–30 minuutin kuluttua palon alusta, mutta tilanteissa B vasta noin tunnin kuluttua. Siksi tilannetta B voidaan pitää hyväksyttävänä, koska todennäköisyys, että palokunta ei olisi aloittanut sammuttamista tunninkaan kuluessa palon alusta, on häviävän pieni.

6.2 Henkilöturvallisuuden riskien suuruuden arviointiin perustuva lähestymistapa

Yleinen henkilöriskien jaottelutapa on jako yksilökohtaisiin (individual) ja yhteiskunnallisiin (societal) riskeihin. Yksilökohtainen riski mittaa yhteen henkilöön kohdistuvaa riskiä ja yhteiskunnallinen riski mittaa ihmisjoukkoihin kohdistuvaa riskiä. Kemian prosesseihin liittyviä riskejä käsittelevä ohje CPQRA [1989] havainnollistaa yksilökohtaisen ja yhteiskunnallisen riskin eroa seuraavasti: Tarkastellaan toimistotaloa, joka sijaitsee lähellä tehdasta. Talossa on päiväsaikaan 400 henkeä ja muina aikoina yksi henkilö. Jos onnettomuuden vaara on sama kellonajasta riippumatta, kunkin henkilön yksilökohtainen riski on tietty vakio riippumatta henkilömäärästä. Yhteiskunnallinen riski sen sijaan on selvästi suurempi päivisin, jolloin vaaralle voi altistua 400 henkeä, kuin muina aikoina, jolloin vaaralle altistuu vain yksi henkilö.

Taulukko 5. Esimerkkejä yksilökohtaisen riskin suuruudesta (sveitsiläisen tutkimuksen tuloksia [Schneider 2000]).

Toiminto/onnettomuustyyppi	Vuotuinen kuoleman todennäköisyys miljoonaa henkeä kohden
tupakointi, 20 savuketta päivässä	4000
alkoholin käyttö, pullo viiniä päivässä	3000
moottoriurheilu (moottoripyöräily)	1500
jalankulkijat, kotityö	100
autolla matkustaminen, 10 000 km vuodessa	100
autolla matkustaminen moottoritiellä, 10 000 km vuodessa	30
lentokoneen putoamisen todennäköisyys yhtä lentoa kohden	10
palokuolema	10: Sveitsi; 20: Suomi
junalla matkustaminen, 10 000 km vuodessa	10
salamanisku	1

Taulukossa 5 esitetään joihinkin toimintoihin tai onnettomuustyyppihin liittyvien yksilökohtaisten riskien suuruuksia [Schneider 2000]. Eri riskien suuruuden vaihtelevuuden lisäksi taulukosta voidaan nähdä, että yksilöiden riskinottoon vaikuttavat sellaiset tekijät kuin riskin ottamisen vapaaehtoisuus ja riskin ilmeneminen (heti/viiveellä ja satunnaisesti/toistuvasti). Muita riskien subjektiiviseen arviointiin vaikuttavia tekijöitä ovat vaaran vakavuus samoin kuin sen tutuus (uusi/vanha), kontrolloitavuus, vaaraan liittyvät edut ja tarpeellisuus sekä alkuperä (ihmisen aiheuttama / luonnon aiheuttama) [Litai & Rasmussen 1983].

Vaaran vakavuus on tärkein riskin arviointiin liittyvä tekijä: mitä suurempi vaara on, sitä pienemmäksi sen toteutumisen todennäköisyys halutaan. Matemaattisesti tämä voidaan ilmaista siten, että riski R ilmaistaan vaaran esiintymistäajuuden F ja sen aiheuttamien uhrien lukumäärän N painotettuna tulona

$$R_h = F \cdot N^p, \quad (4)$$

missä indeksi $p \geq 1$ kuvaa moniuhristen onnettomuuksien painottumista. Yhteiskunnallisessa paloriskien arvioinnissa uhrien määrä on olennainen tekijä: moniuhriset palot ovat selvästi vähemmän siedettyjä kuin palot, joissa uhrien lukumäärä rajoittuu yhteen. Yhteiskunnallisen paloriskin määrällisen esittämisen soveltuvin työkalu on F-N-käyrä [Korhonen ym. 2005a, 2005b].

Omaisuusriskit lasketaan yleensä painottamatta riskien suurutta, jolloin laskentakaava on siis

$$R_p = F \cdot C, \quad (5)$$

missä C on seuraamuksen suuruus esim. euroina ilmaistuna. Historiallisissa kohteissa kaikkia omaisuusriskejä ei toki voida arvioida näin yksinkertaisesti, koska esim. korvaamattoman arvokkaille esineille ei voida määrittää hintaa millään objektiivisella tavalla.

6.2.1 F-N-käyrä

F-N-käyrä esittää onnettomuuksien esiintymistaajuuden riippuvuuden uhrien lukumäärästä. Uhrin ovat yleensä kuolonuhreja. Koska moniuhristen onnettomuuksien taajuus on usein monta kertaluokkaa pienempi kuin keskimäärin yhden tai vähemmän uhreja vaativien onnettomuuksien, F-N-käyrä esitetään yleensä logaritmisella asteikolla. Luettaessa F-N-käyräesityksiä on tärkeää ottaa huomioon, miten taajuus on ilmaistu: varsin usein taajuus esitetään vuosittaisena esiintymistaajuutena, mutta se voidaan esittää myös yhtä onnettomuutta kohden laskettuna arvona.

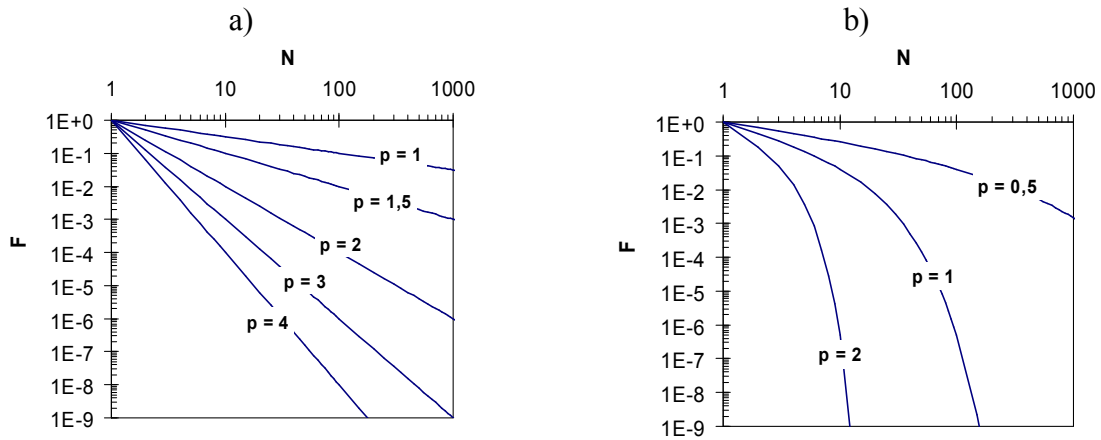
Kun lauseke (1) ratkaistaan taajuuden F suhteen, saadaan tulos

$$F(N) = R \cdot N^{-p}, \quad (6)$$

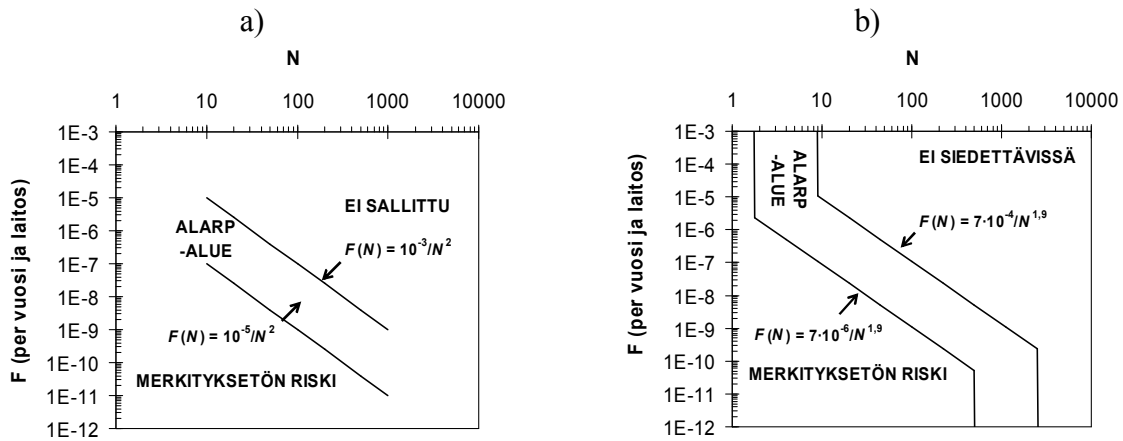
missä merkintä $F(N)$ painottaa, että F riippuu N :stä. Kuva 11a esittää tätä lauseketta käyttäen laskettuja F-N-käyriä indeksin p eri arvoilla, kun riskillä on jokin tietty vakioarvo (tässä $R = 1$). On myös mahdollista, että riskin suuruuden halutaan pienenevän seuraamusten kasvaessa esim. eksponentiaalisesti, $R = R_0 \cdot \exp(-\alpha N)$, missä R_0 ja α ovat parametreja. Taajuus $F(N)$ on tällöin

$$F(N) = R_0 \cdot e^{-\alpha N} \cdot N^{-p}. \quad (7)$$

Kuva 11b esittää tässä tapauksessa saatavia F-N-käyriä.



Kuva 11. a) Vakioista riskiä vastaavia F-N-käyriä (tässä $R = 1$) ja b) eksponentiaalisesti seuraamusten suuruuden mukana pienevää riskiä vastaavia F-N-käyriä (tässä $\alpha = 1$ ja $R_0 = e^1$).



Kuva 12. a) Hollannissa kemian prosessiteollisuudelle asetetut riskin rajakäyrät [VROM 1988] ja b) Sveitsissä ympäristöonnettomuuksia koskevissa ohjeissa asetettu F-N-käyrä [BUWAL 1991] sekä ALARP-periaatteen havainnollistus.

F-N-käyriä käytetään siedettävissä olevien riskien mittana. Yksi tunnetuimpia F-Nesityksiä on Hollannissa kemian prosessiteollisuuden suuronnettomuuksille asetettu suurin sallittu laitoskohtainen uhrien vuotuinen lukumäärä [VROM 1988]:

$$F_{VROM, \max}(N) = 10^{-3} \cdot N^{-2}, N \geq 10. \quad (8)$$

Tämä F-N-käyrä vastaa suurinta sallittua uhrien lukumäärää. Sen lisäksi Hollannissa on määritelty alaraja, jota pienempiä riskejä voidaan pitää merkityksettömän pieninä (*de minimis* -alue):

$$F_{VROM,\min}(N) = 10^{-5} \cdot N^{-2}, N \geq 10. \quad (9)$$

Tämän rajan saavuttamista voidaan pitää riskien hallinnan korkeimpana tavoitteena. Käytännössä siihen ei eri syistä kuitenkaan päästä, vaan joudutaan tyytymään siihen, että riskien taso on niin alhainen kuin se kohtuudella on mahdollista (*As Low As Reasonably Practicable*), eli riskit ovat ns. ALARP-alueella (kuva 12a). Sveitsissä ympäristöönnettomuuksia koskevissa ohjeissa on asetettu kuvassa 12b esitetyt F-N-käyrärajat ei-sallituille ja hyväksyttävissä oleville riskeille [BUWAL 1991]. Niiden lineaaristen osien lausekkeet ovat

$$F_{VROM,\max}(N) = 7 \cdot 10^{-4} \cdot N^{-1,9}, 2500 \geq N \geq 10 \text{ ja} \quad (10)$$

$$F_{VROM,\min}(N) = 7 \cdot 10^{-6} \cdot N^{-1,9}, 500 \geq N \geq 2. \quad (11)$$

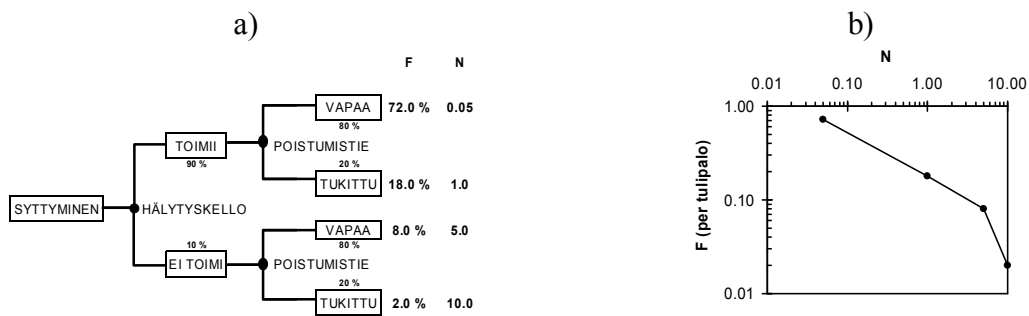
Sveitsin kriteeriot ovat lineaarisilta osilta olennaisesti samat kuin Hollannin F-N-käyrät. Isossa-Britanniassa Health and Safety Executive (HSE) on asettanut kriteerejä teollisuuden onnettomuuksille. Eräs uusimmista HSE:n asettamista kriteereistä on esitetty viitteessä Health and Safety Executive [2001, kohta 136]. Sen mukaan yli 50 uhria aiheuttavien onnettomuuksien ei tulisi ylittää vuotuista taajuutta $2 \cdot 10^{-4}$. Tämä kriteerio koskee työntekijöitä, ja siksi se etunäkökohdan nojalla on suurempi kuin edellä mainitut ”ulkopuolisia” koskevat riskirajat.

6.2.2 F-N-käyrän soveltaminen paloriskeihin

Paloturvallisuutta koskevia F-N-käyriä on esitetty jo parikymmentä vuotta sitten (esim. viite Rasbash [1984/1985] ja taulukko 6).

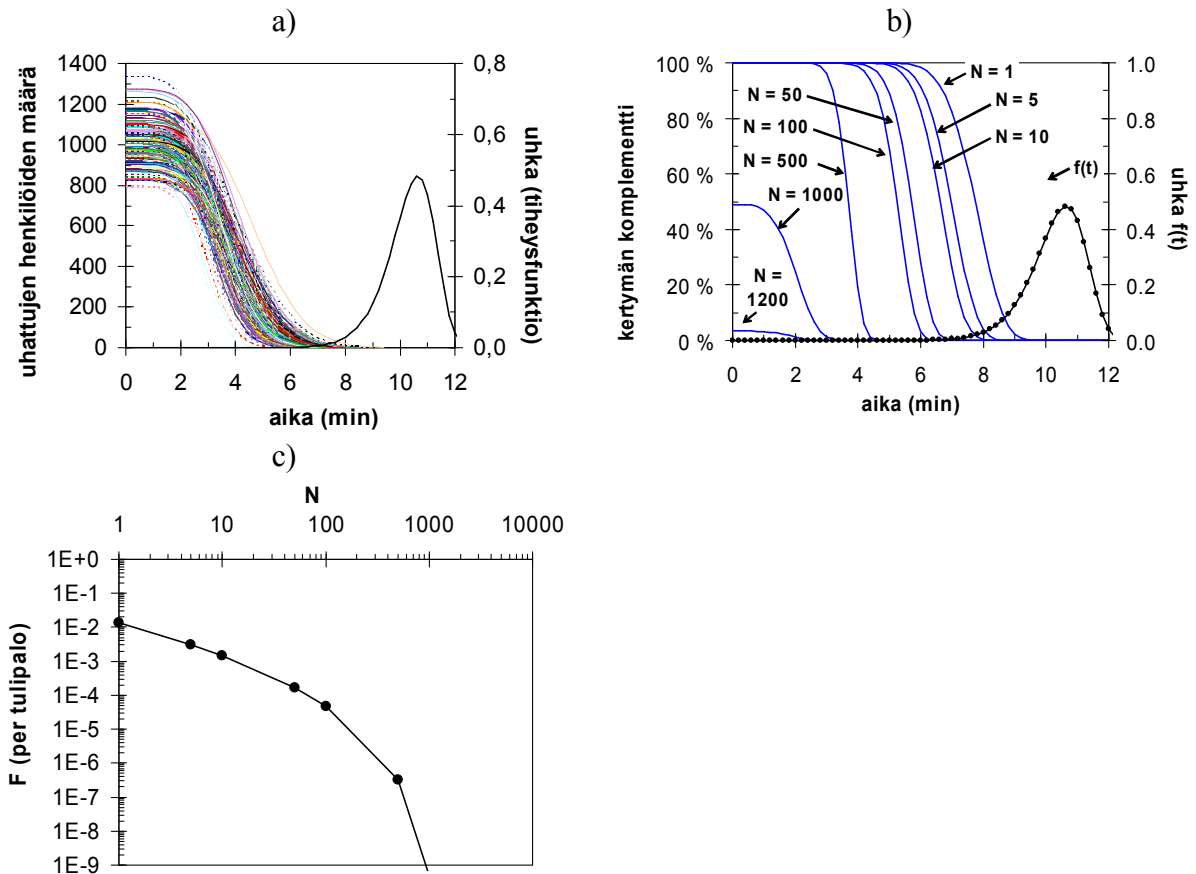
Taulukko 6. Rasbashin vuotuisille palokuolemille esittämiä F-N-kriteerejä [Rasbash 1984/1985, Kokkala 2000].

Uhattuna olevien lukumäärä	N – uhrien lukumäärä			
	>5	>15	>100	>500
< 15	5×10^{-7}	---	---	---
15 - 100	1×10^{-6}	3×10^{-7}	---	---
100 - 500	2×10^{-6}	5×10^{-7}	6×10^{-8}	---
> 500	4×10^{-6}	8×10^{-7}	1×10^{-7}	5×10^{-8}



Kuva 13. Esimerkki F-N-käyrän laskennasta tapahtumapuun avulla: a) yksinkertainen esimerkki poistumisturvallisuuden arviointiin käytetystä tapahtumapuusta [Jönsson & Lundin 1998] ja b) tapahtumapuun perusteella laskettu F-N-käyrä.

Lähinnä Lundin yliopistossa tehtyjä tutkimuksia lukuun ottamatta (esim. viite Jönsson & Lundin [1998] ja kuva 13) F-N-käyriä ei kuitenkaan ole juurikaan sovellettu rakennusten paloturvallisuussuunnittelussa, vaikka palon simulointia käytetäänkin laajalti suurien kohteiden, kuten kauppakeskusten ja teollisuuden kohteiden, suunnittelussa. Pääasiallinen syy tähän on ollut laskennan kalleus, mutta asia on muuttumassa nopeasti. Suurien kohteiden paloturvallisuussuunnittelussa virtauslaskentaan perustuvat kenttämallit ovat jo korvanneet vyöhykemallit, ja kun tähän samaan laskentaympäristöön lisätään poistumisen laskenta, saadaan realistinen kuva ihmisten poistumismahdollisuuksista tulipalo-olosuhteissa, joissa fyysiset ja psyykkiset stressitekijät vaikeuttavat toimintaa. Seuraava askel on tällaisen laskennan toteuttaminen stokastisesti käyttäen Monte Carlo -laskentatekniikkaa (ks. esim. Hietaniemi ym. [2005]), mikä sekin on jo teknisesti mahdollista. Kuva 14 esittää, miten F-N-käyrä voidaan laskea Monte Carlo -laskentatekniikkaa käyttäen.



Kuva 14. Esimerkki F - N -käyrän laskennasta käyttäen stokastista mallintamista ja Monte Carlo -laskentatekniikkaa: a) stokastisen poistumisen mallintamisen tuloksena saatuja, rakennuksessa sisällä olevien henkilöiden määrää kuvaavia käyriä ja todennäköisyysperustaisen palonsimuloinnin tuloksena saatu, heitä uhkaavien tekijöiden kehittymistä kuvaava todennäköisyys (tiheysfunktio), b) eri henkilömääriä vastaavat todennäköisyysjakaumat (todennäköisyys, että uhattuna on vähintään N henkilöä) ja c) näiden tietojen perusteella laskettu F - N -käyrä.

6.2.3 Palotilastoihin perustuva henkilöriskien F - N -käyrä

Kuvassa 15 esitetään F - N -käyrä, joka perustuu useiden maiden moniuhrisia tulipaloja koskeviin palotilastoihin [Keski-Rahkonen 1998]. On huomattava, että taajuudet on laskettu yhtä rakennuspaloa kohden. Tiedot kerättiin ensin kolmesta Pohjoismaasta – Suomi, Norja ja Tanska – ja koska saadut tilastolliset populaatiot olivat pienehköjä, niihin lisättiin Yhdysvaltojen palotilastotietoja, joiden avulla aineistoon saatiin tietoa moniuhrisista paloista aina 12 uhriin saakka. Tämän rajan yläpuolella ei ole käytettävissä suoranaista systemaattisesti kerättyä tietoa, mutta siitä on kuitenkin olemassa Yhdysvaltoja koskevia arvioita, joita hyödynnettiin [WASH-1400 1975].

Tilastotietoihin sovitettiin kaksi vaimennettua Pareto-jakaumaa: uhrien lukumäärävälille $1 \leq N \leq 12$ käytettiin lauseketta

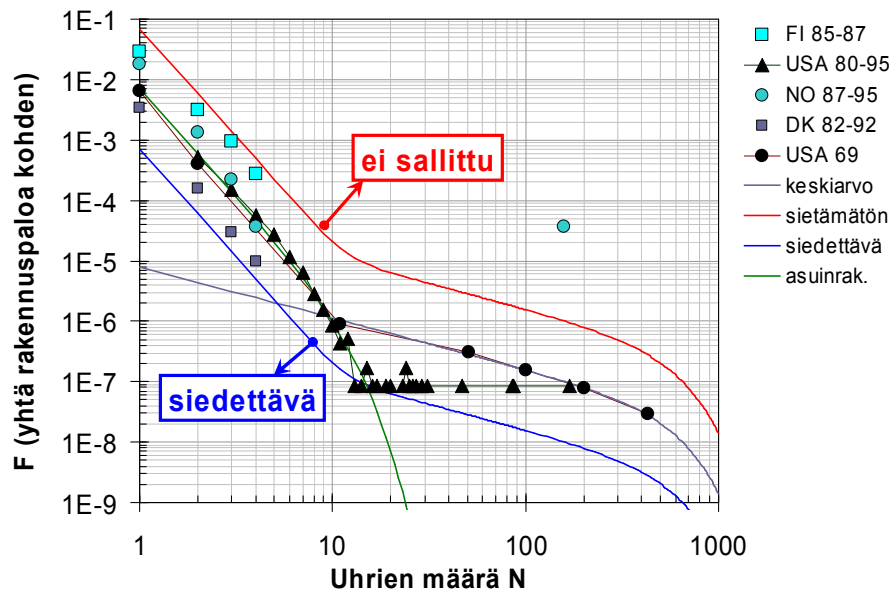
$$F(N) = A \exp\left(-\left(N/N_1\right)^2\right) / \left(N/N_1\right)^{n_1}, \quad 1 \leq N \leq 12 \quad (12)$$

ja yli 12-uhrisille tulipaloille käytettiin lauseketta

$$F(N) = A \exp\left(-\left(N/N_2\right)^2\right) / \left(N/N_2\right)^{n_2}, \quad 12 < N, \quad (13)$$

missä parametrien N_i ja n_i arvot ovat $N_1 = 11$ ja $n_1 = 3,5$ sekä $N_2 = 600$ ja $n_2 = 0,85$. Uhrien lukumäärien ”cut-off”-arvot N_1 ja N_2 liittyvät uhalle altistuvien henkilöiden lukumäärään. Tapahtumille, jotka vastaavat ”asuinrakennuksia” ja ”keskiarvoa”, cut-off-arvot ovat erisuuret, ja jälkimmäisen arvo voi kasvaa vielä edelleen, kun yksikkökoot kasvavat.

Sietämättömien ja siedettävien riskien rajakäyrät saadaan siten, että edellä mainitut sovitejakaumat lasketaan yhteen ja saatu käyrä kerrotaan tai jaetaan tekijällä 10 (sietämättömien riskien rajakäyrä saadaan tuloksena kertomisesta ja siedettävien riskien rajakäyrä tuloksena jakamisesta). Kuvan 15 mukaan havaintojen ääriarvotkin ovat näiden rajakäyrien rajoittaman alueen sisällä.



Kuva 15. Palotilastoihin perustuva ehdotus tulipalojen henkilöriskien siedettävän tason arvioimiseen käytettävästä F-N-käyrästä.

Rajakäyriä käytetään paloturvallisuussuunnittelussa seuraavasti: kun ihmisten poistumisen Monte Carlo -laskennan tuloksena saadaan F-N-käyrä kuvassa 15 esitetyllä

tavalla, jotta suunnitelma voitaisiin hyväksyä, kaikkien lasketun käyrän pisteiden tulee olla sietämättömän riskitason alapuolella. Jos kaikki pisteet ovat jopa alemman, siedettävää riskitasoa kuvaavan käyrän alapuolella, suunnitelma voidaan hyväksyä sellaisenaan ilman jatkotoimenpiteitä. Jos osa tai kaikki lasketuista pisteitä osuvat rajakäyrien väliin (ALAPR-alue), tulee harkita, voidaanko suunnitelmaa parantaa kohtuullisin ponnisteluin, ja jos voidaan, nämä toimenpiteet tulee tehdä.

Huomattakoon, että kuvassa 15 esitetyn F-N-käyräehdotuksen perustana olevat tilastotiedot eivät ole aivan viimeisimpiä ja siksi niiden päivittämiseksi olisi hyvä tehdä uusi kansainvälinen palotilastoseselvitys. Tuolloin ei myöskään olisi pahitteeksi, jos päivitysselvitykseen saataisiin mukaan muitakin maita kuin nuo viisi kuvassa 15 esitettyä maata.

7. Historiallisten kohteiden palosuojelun erityispiirteitä

7.1 Palokuorma

Palokuorma muodostuu rakenteiden, pintamateriaalien ja irtaimiston palavasta materiaalista. Historiallisissa kohteissa palokuorman määrää voi olla hankala rajoittaa, koska

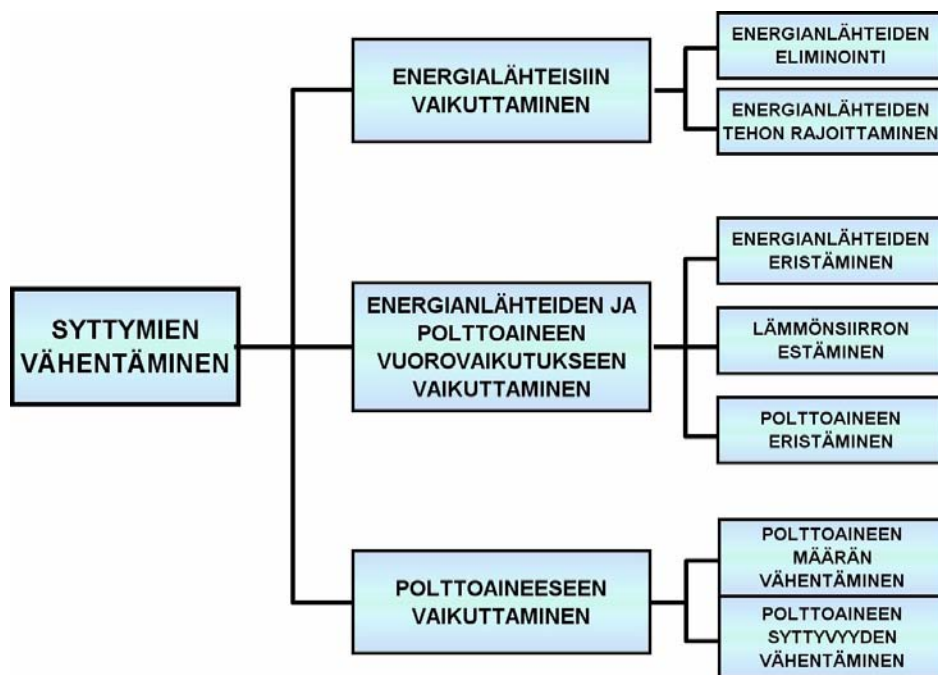
- etenkin Suomessa vanhojen rakennusten rakenteet ja pintamateriaalit ovat usein puuta
- palava irtaimisto on usein tarkoituksellisesti esillä eikä sitä ole tarkoituksenmukaista poistaa.

Yksi varteenotettava keino palokuorman vähentämiseen on puumateriaalien palosuojaus (ks. esim. Hietaniemi [1999]): etenkin sisätiloissa oleva puumateriaali voidaan palosuojata värittömällä siveltävillä tai ruiskutettavilla nesteillä, joilla materiaalin paloluokitus voidaan nostaa euroluokasta D euroluokkaan B, joka vastaa esim. päällystetyn kipsilevyn palokäyttäytymistä. Sama palokäyttäytymisen paraneminen on saavutettavissa myös palosuojamaaleilla ja -lakoilla. Ne kuitenkin peittävät puun pinnan ja voivat siksi olla sopimattomia historiallisissa kohteissa. Ulkona olevien kohteiden palosuojauksessa on otettava huomioon se, että puun palosuoja-aineet voivat huuhtoutua pois ajan kuluessa veden tai kosteuden vaikutuksesta.

Koska tulipaloja ei voi tapahtua ilman palavaa ainetta, ei palokuorman palavuuden ja määrän vähentämistä tule kuitenkaan sivuuttaa historiallisen kohteen paloturvallisuutta parannettaessa. Tässä julkaisussa esitettävä Porvoon museota koskeva paloturvallisuussuunnittelu on hyvä esimerkki tästä, koska tuossa kohteessa palokuorman vähentäminen on eräs tärkeimmistä paloturvallisuusstrategioista.

7.2 Syttymisen estäminen

Syttyminen vaatii, että palavaan materiaaliin kohdistuu riittävän suuri lämpörasitus riittävän pitkän ajan. Syttyminen tapahtuu, kun palavaan materiaaliin on siirtynyt niin suuri määrä lämpöenergiaa, että aine voi syttyä. Syttymisten vähentäminen voikin kohdistua joko energianlähteeseen tai palavaan aineeseen (polttoaineeseen). Syttymien vähentämisen periaatteiden kaavio esitetään kuvassa 16.



Kuva 16. Syttymien vähentämisen kaaviollinen esitys.

Historiallisissa kohteissa tulee ottaa huomioon ainakin seuraavat syttymismahdollisuudet ja niiden torjumiskeinot:

- Tuhopoltot: etenkin kirkkorakennukset ovat toistuvasti tuhopolttojen kohteena. Tuhopolttojen määrää voidaan vähentää alentamalla niiden onnistumisen todennäköisyyttä, mihin voidaan pyrkiä esim. riittävällä valaistuksella, sisäänpääsyreittien lukituksella ja yleensä vartioinnilla. Myös materiaalivalinnoin voidaan vaikuttaa tuhopolttoyriyten epäonnistumisten lisääntymiseen.
- Monet historialliset kohteet käsittävät useita palonarkoja kohteita (esim. vanhat puukaupungit tai -kylät), ja näissä kohteissa tulisi varautua siihen vaaraan, että jonkin kohteen syttyessä palo voi levitä lämpösäteilyn välityksellä muihin kohteisiin.
- Korjaustyöt: korjaustyöt ovat yksi tärkeimpiä historiallisten kohteiden syttymissyitä. Korjausrakentamisen aikaisesta paloturvallisuudesta kerrotaan erikseen luvussa 8.
- Tupakointi on edelleen merkittävä tulipalojen syy, ja siksi sen aiheuttamaan vaaraan on varauduttava. Pääsääntöisesti tupakointi lienee viisainta kieltää kohteiden sisällä. Ulkona tapahtuvalle tupakoinnille on varattava asianmukaiset tilat, ja ne on syytä varustaa tumpit automaattisesti sammuttavilla tuhka-kupeilla.
- Palotilastoissa merkittävin tunnistettu yksittäinen palon syy ovat erilaiset sähköön liittyvät syyt, ukkonen mukaan lukien. Historiallisissa kohteissa sähkölaitteet voivat

olla vanhoja, ja tämän seikan aiheuttama uhka tulisi eliminoida uusimalla sähköasennukset. Sähkölaitteiden kuntoa tulisi seurata ja käytännön suorittaminen tulisi kirjata kohteen pelastussuunnitelmaan, josta kerrotaan lähemmin luvussa 9 ja liitteessä A.

7.3 Palon kehittymisen rajoittaminen

7.3.1 Sisä- ja ulkopinnat

Se, että jokin rakennus on erityisen vanha, ei sinänsä ole ristiriidassa sen periaatteen kanssa, että rakennuksissa olisi käytettävä rakennustarvikkeita, jotka eivät myötävaikuta palon kehittymiseen vaaraa aiheuttavalla tavalla, koska puuta lukuun ottamatta vanhoissa rakennuksissa on usein käytetty palamattomia rakennustarvikkeita. Puun suhteenkin on hyvä muistaa, että esim. suora lautaseinä ei pala herkästi itsestään, mutta jos rakenne on ritilämäinen, yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho voi moninkertaistua ja rakenne voi pitää yllä paloa tai jopa kiihdyttää sitä.

7.3.2 Katteet

Katemateriaalien syttyminen kipinöiden vaikutuksesta oli yksi tärkeimpiä tekijöitä historiallisten kaupunkipalojen leviämisessä laajoiksi aluepaloiksi. Tämä vaara on syytä pitää mielessä etenkin tiiviisti rakennetuissa historiallisissa kohteissa, ja tarvittaessa rakennusten katteiden materiaalit tulisi mahdollisuuksien mukaan vaihtaa palamattomiksi.

7.4 Palo-osastointi

Palo-osastointi on tehokas tapa rajoittaa palon ja savun leviämistä. Historiallisissa kohteissa toimiva palo-osastointi on historiallisten ja kulttuuristen arvojen suojelun peruskiviä, koska osastoimattomassa rakennuksessa pienenkin palon synnyttämä savu ja haitalliset kaasut voivat levitä laajalle ja aiheuttaa suurta vahinkoa. Jo palomääräyksissä sanotaan, että palo-osaston koko tulee rajoittaa siten, että osastossa syttyvä palo ei aiheuta kohtuuttoman suuria omaisuusvahinkoja. Mietittäessä historiallisen kohteen palo-osastointia tämä ohje voi antaa paremman perustan kuin säädösten lukuarvot: osastointi on syytä tehdä niin perusteellisesti kuin se ilman kohteen toimintojen kohtuutonta haittaamista on mahdollista.

Osastoinnin toteuttamista hankaloittaa mm. se historiallisten kohteiden yleisvaatimus, että niihin tehtävien muutos- ja korjaustoimenpiteiden tulisi muuttaa kohteen luonnetta

mahdollisimman vähän. Niinpä esimerkiksi tehokas nykyaikainen palo-ovi voi modernin ulkoasunsa vuoksi olla vaikea sovittaa historiallisen kohteen interiööriin. Useimmiten sopiva kompromissi lienee kuitenkin löydettävissä.

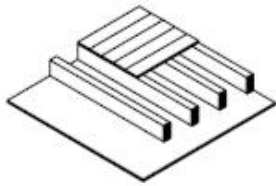
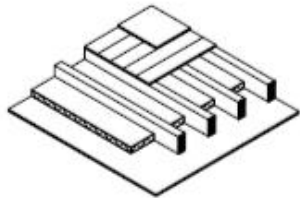
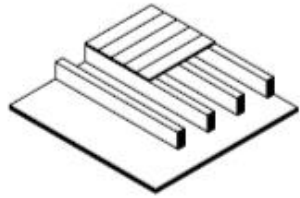
Vanhon puuvien palonkestoa voidaan parantaa paisuvilla puun palonsuojamaaleilla ja -lakoilla, jotka kuumetessaan muodostavat paksun, lämpöä eristävän (ja palamista estävän) kerroksen. Vaikka tällaisen ovirakenteen palonkestoa (eli E- ja I-luokkia) ei voidakaan testaamalla todentaa, voidaan ratkaisun toimivuus useimmiten todentaa laskennallisesti käyttäen toiminnallisen palomitoituksen työkaluja.

Palo-osastoinnin suhteen usein ongelmallisia kohteita ovat sähkön ja talotekniikan vaatimat läpiviennit. Läpivientien palonkesto voidaan toteuttaa luotettavasti, kunhan asian tärkeys ymmärretään ja toteuttaminen tehdään käyttäen luotettavaksi todettuja materiaaleja ja asennustapoja. Myös erilaiset ontelotilat voivat tarjota reitin palon leviämislle, ja niiden palo-osastointi on yhtä tärkeää kuin rakennuksen muidenkin tilojen osastointi. Historiallisissa kohteissa ontelotilojen osastointi on usein jopa helpompaa kuin muiden tilojen, koska ontelot ovat yleensä piilotiloja eikä niissä siksi aina ole tarpeen noudattaa samaa uskollisuutta vanhalle tyyliin kuin näkyvillä olevissa tiloissa.

7.5 Rakenteiden kantavuuden säilyttäminen

Vanhon rakennuksen rakenteet ovat usein varsin massiivisia, ja niissä on kantavuuden suhteen korkea varmuuskerroin. Siksi rakenteellinen kantavuus ei liene keskeisimpiä historiallisten kohteiden paloturvallisuusongelmia.

Puurakenteiden palotilanteen kantokykyä voidaan parantaa levytyksin ja eristemateriaaleja käyttämällä esim. kuvassa 17 esitettyjä ratkaisuja käyttäen. Historiallisissa kohteissa käytetyt metallirakenteet voivat olla valurautaa: valuraudan lujuusominaisuudet alkavat heikentyä 400 °C:n lämpötilassa siten, että lämpötilavälillä 400–600 °C valurauta menettää 70 % lujuudestaan ja 800 °C:n lämpötilassa lujuudesta on jäljellä enää 5 % [Wouters & Mollaert 2002].

Floor Type		Standard ISO Fire Test	EC Calculation
	wooden floor 18 mm girders gypsum plasterboard 12 mm	R 30	22 min
	silicate board 12 mm wooden floor 18 mm rockwool insulation 6 cm gypsum plasterboard 12 mm	R 60	35 min
	wooden floor 18 mm girders silicate board 2 x 15 mm	R 120	40 min

Kuva 17. Tapoja parantaa kantavien puuvälipohjien palonkestoa [Wouters & Mollaert 2002].

7.6 Palon leviämisen estäminen naapurirakennuksiin

Historiallisesti arvokkaat kohteet muodostavat usein osan arvokasta rakennuskokonaisuutta, mikä painottaa tärkeyttä ehkäistä palon leviämisen lähistöllä oleviin rakennuksiin. Pahin vaara on vanhoissa puukaupungeissa ja -kylissä. Kun näissä kohteissa ei useinkaan voida toteuttaa passiivisia palotorjuntatoimenpiteitä, kuten siirtää rakennuksia riittävän etäälle toisistaan tai parantaa ulkoseinien palokäyttäytymistä, tulee turvautua aktiivisen palotorjunnan keinoihin, joita ovat esim.

- nopea ja luotettava palonilmaisu ja ilmoittaminen
- mahdollinen automaattisten sammutusjärjestelmien käyttö
- riittävän alkusammutinkaluston varaaminen
- riittävän sammutusveden saannin takaaminen.

7.7 Poistuminen palon sattuessa

Paloturvallisuuden tärkein yksittäinen vaatimus on, että rakennuksesta tulee voida turvallisesti poistua tulipalossa tai muussa hätätilanteessa. Tätä varten rakennuksessa tulee olla riittävästi sopivasti sijoitettuja, tarpeeksi väljiä ja helppokulkuisia uloskäyviä niin, että poistumisaika rakennuksesta ei ole vaaraa aiheuttavan pitkä. Mikäli mahdollista, myös historiallisissa kohteissa poistumisteiden tulisi täyttää vähintään SRMK:n osassa E1 [Ympäristöministeriö 2002] esitetyt vaatimukset koskien uloskäytävien lukumäärää ja mittoja, etäisyyksiä uloskäytäviin sekä uloskäytävien osastointia ja rakenteita. Poistumisturvallisuutta voidaan usein parantaa käyttämällä palonsimulointiin ja poistumislaskentaan perustuvaa toiminnallista poistumisjärjestelyjen suunnittelua.

Joissain tapauksissa, kuten tässä julkaisussa käsitellyssä Porvoon museon tapauksessa, kohteen historiallisten ja arkkitehtonisten arvojen asettamien reunaehtojen puitteissa täsmälleen SRMK:n osassa E1 esitettyjen vaatimusten toteuttaminen voi olla käytännössä ylivoimaisen vaikeaa. Tällöin toiminnallinen poistumisjärjestelyjen suunnittelu on ainoa keino taata turvallinen poistuminen palon sattuessa.

7.8 Sammutus- ja pelastustehtävien järjestely

Sammutus- ja pelastustehtävien järjestelyn peruslähtökohta, josta etenkin historiallisten kohteiden tapauksessa ei tule tinkiä, on, että palon sammuttamisen ja henkilöiden pelastamisen edellytykset rakennuksessa ja sen läheisyydessä tulee turvata. Mikäli kohteen ominaisuuksien takia ei pystytä järjestämään pelastushenkilökunnan esteetöntä pääsyä kaikkialle kohteeseen, tulee sinne asentaa riittävät palovesipostit sammutuksen onnistumisen turvaamiseksi.

Vaikka säädökset eivät sitä rakennuksen sijainnin, suuren koon tai muun syyn takia vaatisikaan, historialliset kohteet tulisi varustaa automaattisilla paloilmoitinlaitteilla, jotka antavat hälytyksen palokuntaan. Myös riittävän alkusammutuskaluston tulisi kuulua jokaisen historiallisen kohteen vakiovarustukseen.

Automaattisten sammutusjärjestelmien käytössä joudutaan punnitsemaan niiden mahdollisia haittoja (esim. esineistön turmeltuminen kastamalla viallisen toiminnan takia) ja kiistattomia etuja. Selvästi normaalisprinklereitä vähemmän vettä vaativat voimakkaasti kehittyvät vesisumujärjestelmät voivat tarjota ainakin osittaisen ratkaisun tähän ongelmaan.

8. Korjausrakentamisen aikainen paloturvallisuus

8.1 Säädökset ja ohjeet

8.1.1 Valtioneuvoston päätös rakennustöiden turvallisuudesta

Rakennustöiden turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen [Valtioneuvosto 1994] mukaan rakennushankkeessa rakennuttajan, suunnittelijan, työnantajan ja itsenäisen työsuorittajan on yhdessä ja kunkin osaltaan huolehdittava siitä, ettei työstä aiheudu vaaraa työmaalla työskenteleville eikä muillekaan työn vaikutuspiirissä oleville henkilöille (3 § 1 mom).

Työ on järjestettävä siten, että palovaara on mahdollisimman vähäinen. Työmaalla on oltava tarpeelliset palonsammutus- ja hälytysvälineet sekä turvallisuuskilvet, joiden laadun ja määrän osalta on tarvittaessa käännyttävä paloviranomaisen puoleen. Työmaalla on oltava myös tarpeelliset ohjeet tulipalon varalta. Työmaan vastuuhenkilön on huolehdittava, että työmaalla on riittävä määrä alkusammutukseen perehdytettyjä henkilöitä (17 § 1 mom).

Käsiteltäessä ja säilytettäessä sellaisia aineita, joista muodostuu räjähdysnomaisesti syttyvää kaasua tai pölyä, on erityisesti huolehdittava riittävästä suojaustoimenpiteistä, kuten tuuletuksesta ja tulen käsittelyn kieltämisestä, tai muulla tavalla jatkuvasti pidettävä huolta siitä, että tulen ja räjähdysvaara on mahdollisimman vähäinen (17 § 1 mom).

Vaaratilanteissa työntekijöiden on voitava poistua nopeasti ja mahdollisimman turvallisesti kaikista työskentelypaikoista. Poistumistiet on pidettävä esteettöminä, ja niiden on johdettava turvalliselle alueelle mahdollisimman suoraan, jotta niitä voidaan käyttää vaikeuksista milloin tahansa (18 §).

8.1.2 Laki ja asetus palo- ja pelastustoimesta

Laki palo- ja pelastustoimesta (468/2003) määrää, että tulta on käsiteltävä huolellisesti ja siten, ettei siitä aiheudu ilmeistä palovaaraa (PPL 20 §). Asetuksissa annetut säännökset avotulen käyttökiellosta ja palovaaraa lisäävistä korjaustöistä täydentävät lain määräystä.

Valtioneuvoston asetuksessa pelastustoimesta (787/2003) kielletään avotulen käyttö ja tupakoiminen tulenaroilla paikoilla ja helposti syttyvien aineiden läheisyydessä (PPA 16 §). Milloin rakennuksessa tai rakennelmassa ryhdytään suorittamaan sellaista korjaus- tai muuta työtä, jonka johdosta palonvaara tuntuvasti lisääntyy, omistajan tai haltijan on

ryhdyttävä riittäviin varotoimiin. Työtä suoritettaessa on noudatettava erityistä varovaisuutta (PPA 17 §).

8.1.3 Työturvallisuuslaki

Työturvallisuuslain mukaan työ on järjestettävä siten, että palonvaara on mahdollisimman vähäinen (TTL 23§).

Palo- ja räjähdysvaarallisissa töissä tulee erityisesti huolehtia siitä, että kipinöinnistä johtuva vaara on mahdollisimman vähäinen (TTL 25 a §).

Mekaanisten kipinöiden syntymistä voidaan rajoittaa kipinöimättömiä työkaluja käyttämällä ja muilla vastaavilla menetelmillä (TTL 25 a §).

8.1.4 Suojeluohjeet

Erityisesti tulitöitä koskien on annettu suojeluohjeet mm. vakuutusyhtiöiden [SVK 2002] ja Suomen Pelastusalan Keskusjärjestön [SPEK 1994] toimesta. Suojeluohjeita on noudatettava, ja jokaisen tulitöiden kanssa tekemisiin joutuvan on tiedettävä, miten tulityöt tehdään turvallisesti. Yritysten vakuutus sopimukseen liittyvien omaisuus- ja vastuuvakuutusten lajien yleiset yritys vakuutusehdot edellyttävät suojeluohjeen noudattamista.

8.1.5 Yleisohjeet

Rakennustöiden turvallisuusmääräysten mukaan on rakennushankkeessa rakennuttajan, suunnittelijan, työnantajan ja itsenäisen työnsuorittajan yhdessä ja kunkin osaltaan huolehdittava siitä, ettei työstä aiheudu vaaraa työmaalla työskenteleville eikä muillekaan työn vaikutuspiirissä oleville henkilöille.

Palovaaran torjunnan suunnittelu on osa työmaa-alueen käytön suunnittelua. Työmaan turvallisuuden takia sekä paloriskien torjunnan aiheuttamien kustannusten jakamiseksi työmaan eri urakoitsijoiden kesken urakkaohjelmaan tulee sisällyttää myös palontorjuntaohjeet ja veloitteet, kuten päivittäisen palontorjunnan edellyttämät ohjeet.

Yleinen pelisääntö töiden turvallisuusvastuuta käsiteltäessä on, että kukin työnantaja vastaa omien työntekijöidensä käyttämien koneiden asianmukaisuudesta ja työmenetelmien turvallisuudesta. Päätoteuttaja vastaa lisäksi työmaan yleiseen työturvallisuuteen liittyvistä seikoista.

Päätoteuttajan on ennen rakennustyön aloittamista suunniteltava eri töiden ja työvaiheiden tekeminen sekä niiden ajoitus siten, että työt ja työvaiheet voidaan tehdä turvallisesti ja aiheuttamatta vaaraa työmaalla työskenteleville tai muille työn vaikutuspiirissä oleville. Turvallisuus- ja terveysvaaroja sisältävissä töissä, kuten tulitöissä, tulee kiinnittää turvallisuustekijöihin ja -suunnitteluun erityistä huomiota.

Suunnitelmallinen ja hyvä yleisjärjestys ovat myös rakennustyömaan turvallisuuden perusta. Hyvä yleisjärjestys edellyttää mm. tilapäisrakennuksien ja varastointitilojen paloturvallisuutta edistävää sijoittamista. Palava materiaali tulee sijoittaa turvallisen välimatkan päähän työmaarakennuksista ja muista varastoista. Sammutusveden saanti on selvitettävä etukäteen.

Työmaan perustamisvaiheessa on suositeltavaa neuvotella rakennusvalvonta- ja paloviranomaisten kanssa.

8.2 Vartiointi

Päivisin työmaan vartiointiin hoitavat työntekijät, ja muina aikoina Vanhan raatihuoneen työmaan vartiointi tulee antaa vartiointiliikkeen tehtäväksi. Vartijan on tunnettava hälytys- ja toimintaohjeet onnettomuustapauksissa ja työntekijöiden on ilmoitettava hänelle erityistä valvontaa tarvitsevista kohteista, kuten kohteista, joissa on tehty tulitöitä.

8.3 Palavien materiaalien käsittely ja varastointi

Palavien nesteiden ja kaasujen varasto on sijoitettava rakennuksien ja varastojen ulkopuolelle mieluiten erilliselle aidatulle alueelle. Jos aineita on suurempia määriä, niille tarvitaan lupa rakennusvalvontaviranomaisilta. Varastointipaikka on varustettava varoituskilvillä tulen käsittelystä sekä tiedoilla varastoitujen aineiden laadusta ja määrästä. Mahdollisesti tarvittavista suojarakenteista saa tietoja paloviranomaisilta.

8.4 Jätteiden käsittely ja hävittäminen

Jätteiden tuhoaminen polttamalla aiheuttaa aina palovaaran, ja siksi sitä ei tule tehdä Vanhan raatihuoneen kaltaisen erityiskohteen työmaalla. Palonarka jäte tulisi poistaa työmaalta mahdollisimman nopeasti.

8.5 Lämmityslaitteet ja -järjestelmät

Rakennustyömaalla tarvitaan usein erilaisia lämmittämiä, kuten lämminilmakehittämiä, rakennuskuivureita, tilapäisiä lämpökeskuksia, sähköelementtejä ja infrapunalämmittämiä. Kaikkien käytettävien laitteiden tulee olla asianmukaisesti luokiteltuja, hyväksytyjä ja huollettuja. Laitteet on sijoitettava siten, että ne eivät aiheuta palon syttymistä. Myös mahdollisten polttoainesäiliöiden ja hormien asennus tulee suorittaa siten, että ne eivät aiheuta palovaraa. Eristämätöntä hormia ei saa asentaa 50 cm:ä lähemmäksi palavaa materiaalia. Jos käytetään asianmukaista lämmöneristettä, turvaetäisyydeksi riittää 25 cm.

8.6 Sähköasennukset ja -laitteet

Sähköasennuksia saa tehdä vain ammattitaitoinen asentaja. Sähkökeskuksia ei saa peittää, ja niiden ympärille tulee varata riittävästi vapaata tilaa (ainakin 80 cm). Tehtaessä osastoivan rakenteen läpäiseviä sähköasennuksia on huolehdittava siitä, että mahdolliset aukot tukitaan työn keskeytyessä (esim. päivän päätteeksi).

Valaisimet kuumenevat usein varsin voimakkaasti ja voivat aiheuttaa palovaaran palavan materiaalin kanssa kosketuksiin joutuessaan. Tämä on estettävä käyttämällä vain hyväksytyjä laitteita ja asentamalla ne siten, että esim. kaatumisen vaara eliminoiduu. Myös pölyn ja lastujen joutuminen kosketuksiin valaisimien kuumien pintojen kanssa on ehkäistävä.

8.7 Tulityöt [RATU 2006]

Tulityöksi määritellään työ, jossa esiintyy kipinöitä tai jossa käytetään liekkiä tai muuta lämpöä ja josta aiheutuu palovaraa [SVK 2002]. Vanha raatihuone on tulitöiden osalta erityiskohde, koska siihen liittyy suuria historiallisia arvoja. Tällaisessa kohteessa tulitöiden vartioinnin valvoja on tulityöluvan antaja ja vartiointi työn aikana ja sen jälkeen tehdään tulityöluvan mukaisesti.

Rakennustyömailla tulitöitä ovat mm.

- kaasu- ja kaarihitsaus
- poltto- ja kaarileikkaus
- laikkahionta- ja katkaisutyöt

- työt, joissa käytetään avotulta
- työt, joissa käytetään nestekaasua
- työt, joissa käytetään liuottimia yms.
- työt, joissa käytetään kuumailmapuhaltimia.

Tulitöiden tekijöillä, töiden valvojilla ja vartioinnista vastaavilla tulee olla tulitöiden turvallisuuskoulutus, jonka Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto (SVK) ja Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö (SPEK) ovat hyväksyneet. Tulityön tekijällä tulee olla tulityökortti ja kirjallinen tulityölupa.

Tulitöiden turvallisuus ja suojeleluohjeen toimivuus perustuvat kolmen henkilön yhteistyöhön:

1. kirjallisen tulityöluvan antajan, joka vastaa luvassa määritetyistä turvatoimista
2. tulityön suorittajan, joka vastaa turvallisesta ja huolellisesta työn toteutuksesta
3. koulutetun tulityövartijan, joka valvoo, että ympäristö ei syty palamaan työn aikana eikä sen jälkeen.

Vastuut tulitöissä jakaantuvat työn tilaajalle ja toteuttajalle.

8.7.1 Tulityölupa

Rakennustyömaalla tulitöitä tehdään lähes aina tilapäisellä tulityöpaikalla, mikä edellyttää aina kirjallista tulityölupaa.

Tulityöluvan myöntämiseen oikeutetut henkilöt nimetään yritys- ja työmaakohtaisissa tulitöiden valvontasuunnitelmissa. Tulityölupa laaditaan yleensä neljänä kappaleena

- luvan antajalle
- luvan saajalle
- työnaikaisesta tulityövartioinnista vastaavalle
- työnjälkeisestä tulityövartioinnista vastaavalle.

Luvan antajan on tunnettava tulityökohteen tilanne. Työkohte tulee tarkastaa ja pitää varmistua toteuttajien ammattitaidosta sekä kohdekohtaisten riskien huomioimisesta.

8.7.2 Tulityökortti

Tulityöt, töiden valvonta ja vartiointi tilapäisellä tulityöpaikalla edellyttävät tulitöiden turvallisuuskoulutusta, jonka Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto (SVK) ja Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö (SPEK) ovat hyväksyneet. Koulutukseen liittyvän tutkinnon läpäissyt saa tulityökortin. Jokaisella tilapäisellä, tulityöpaikalla tulitöitä tekevällä henkilöllä tulee olla voimassa oleva tulityökortti. Kattotulitöiden tekeminen edellyttää Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliiton hyväksymää katto- ja vedeneristystöiden turvallisuuskoulutusta. Koulutukseen liittyvän tutkinnon läpäiseminen oikeuttaa katto- ja vedeneristystöiden tulityökorttiin.

Tulityökortin omaavan henkilön tulee tietää ja tuntea tulitöiden vaarat sekä tulitöihin liittyvä ohjeistus ja lupakäytäntö. Lisäksi hän osaa asennoitua tulitöiden vaaroihin oikein, tehdä tarvittavat tulitöiden turvatoimenpiteet ja hallitsee alkusammutuksen.

8.7.3 Tulitöiden palosuojavarustus

Työkohteessa tulee olla alkusammutuskalusto, joista käyttökelpoisimpia rakennustyömaalla ovat yhden henkilön käsiteltävät käsisammuttimet ja sammutuspeitteet. Käsisammuttimen tulee olla sisäasiainministeriön hyväksymä. Käsisammuttimien soveltuvuus erityyppisiin paloihin ilmoitetaan kirjaimilla. Sammuttimet jaetaan lisäksi kolmeen eri teholuokkaan: I teholuokka on pienin ja III on suurin. Tavanomaiset käsisammuttimet ovat jauhesammutin, hiilidioksidisammutin (CO₂-sammutin) ja kalvosammutin. Sammuttimien luokitus on seuraava:

- A-ryhmä: kuitumaisten aineiden, kuten puun, paperin, kankaiden ja muiden vastaavalla tavalla kytevien ja palavien kiinteiden aineiden, sammuttamiseen
- B-ryhmä: ensisijaisesti nesteiden, kaasujen ja lämmössä nestemäiseksi muuttuvien aineiden sammutukseen
- lisätunnus E: sammutesuihku johtaa niin vähän sähköä, ettei sammuttajalle aiheudu vaaraa jännitteisiä kohteita sammutettaessa.

8.7.4 Työkohteen toimenpiteet ja tarkastukset

8.7.4.1 Ennen tulitöitä

Ennen tulitöiden aloittamista ja työn edetessä on tarkastettava tulitöiden valvontasuunnitelmassa esitetyt asiat ja niiden toteutuminen. Ennen työn aloittamista on tehtävää seuraavaa:

- Tulityöluvassa edellytetyt turvallisuustoimet on toteutettu.
- On selvitetty, missä lähimmät puhelimet sijaitsevat ja mikä on palokunnan hälytysnumero.
- Automaattinen paloilmoitin ja palonsammutuskalusto on kytketty irti ja asiasta on ilmoitettu paloviranomaisille ja aluehälytyskeskukseen, jos erheellisen hälytyksen mahdollisuus on olemassa.
- Tulityötila on siivottu ja sen ympäristö on siivottu vähintään kymmenen metrin etäisyydeltä.
- Palavat materiaalit on poistettu ja siirretty muualle tai palavat rakenteet on suojattu palamattomalla suojapeitteellä, joka asetetaan tiiviisti suojattavan kohteen päälle.
- On tarkistettu tulityöpaikan ympäristö, kuten viereiset tilat, ja järjestetty niihin tarvittaessa tulityövartiointi.
- On varmistettu, ettei kohteen ympäristössä ole koneita tai laitteita, jotka vaikuttavat turvalliseen työhön.
- Rakenteissa olevat aukot, kuten läpiviennit, on tukittu ja suojattu.
- Vaara-alue on tarvittaessa kostutettu tai vaahdotettu, mikäli tästä ei aiheudu rakenteellista haittaa.
- Kohteeseen on varattu palamattomia suojapeitteitä tai esim. mineraalivillalevyjä, joilla kohde eristetään ympäristöstä ja estetään kipinöiden yms. leviäminen ympäristöön.
- Alkusammutuskalusto on työkohteessa.

8.7.4.2 Tulityön aikana

Tulityön aikana tulee ottaa huomioon, että

- sekä lämpö että kipinät aiheuttavat palovaaran
- hitsauskipinän lämpötila saattaa olla jopa 1000 °C ja se saattaa lentää yli 10 metrin päähän tulityökohteesta
- lämpö voi siirtyä johtumalla sekä säteilyn tai konvektion avulla
- työkohteen palavat rakenteet pysyvät suojattuina
- veto on katkaistu ja putkistot erotettu muusta järjestelmästä
- hioma- ja katkaisulaikkatyö on palon kannalta yhtä vaarallista kuin esimerkiksi hitsaus tai polttoleikkaus
- irtileikatut ja putoavat metallikappaleet aiheuttavat suuren palovaaran
- tulityövartiointi on järjestettävä koko tulityön ajaksi, myös taukojen ajaksi.

8.7.4.3 Tulityön jälkeen

Tulityön päätyttyä vartiointia jatketaan vähintään kaksi tuntia (kattotulitöissä tunti), joten palovaaralliset työt tulee lopettaa ennen töiden päättymistä mahdollisesti kytemään jääneen palon havaitsemiseksi. Tulityövartiointi edellyttää vartijan jatkuvaa läsnäoloa tai paikan jatkuvaa valvontaa. Tulityöluvassa vartiointi voidaan tarvittaessa määrätä myös pidemmäksi ajaksi. On huomattava, että kytevät kipinät voivat sytyttää tulipalon jopa vuorokausien kuluttua työn päättymisestä.

9. Pelastussuunnitelma

Pelastuslaissa määrätään seuraavasti: ”*Rakennuksen omistaja ja haltija, teollisuus- ja liiketoiminnan harjoittaja, virasto, laitos ja muu yhteisö on asianomaisessa kohteessa ja muussa toiminnassaan velvollinen ehkäisemään vaaratilanteiden syntymistä, varautumaan henkilöiden, omaisuuden ja ympäristön suojaamiseen vaaratilanteissa ja varautumaan sellaisiin pelastustoimenpiteisiin, joihin ne omatoimisesti kykenevät.*”

Pelastusasetuksen mukaan pelastussuunnitelmasta on selvittävä

1. ennakoitavat vaaratilanteet ja niiden vaikutukset
2. toimenpiteet vaaratilanteiden ehkäisemiseksi, poistumis- ja suojautumismahdollisuudet sekä sammutus- ja pelastustehtävien järjestelyt
3. turvallisuushenkilöstön varaaminen ja kouluttaminen
4. muun henkilöstön tai asukkaiden perehdyttäminen suunnitelmaan
5. tarvittava suojelumateriaali sen mukaan kuin ennakoitujen vaaratilanteiden perusteella on tarpeen
6. ohjeet ennakoituja onnettomuus-, vaara- ja vahinkotilanteita varten
7. miten suunnitelmaan sisältyvät tiedot saatetaan asianomaisten tietoon
8. miten rakennuksessa tai tilassa olevien heikentynyt toimintakyky otetaan huomioon varautumisessa
9. kohteen tavanomaisesta käytöstä poikkeava käyttö.

Esimerkki historiallisen kohteen pelastussuunnitelman rungoksi esitetään liitteessä A.

**OSA II. TOIMINNALLISEN
PALOTURVALLISUUSSUUNNITTELUN
SOVELTAMINEN PORVOON VANHAAN
RAATIHUONEESEEN**

10. Johdanto

Tässä osassa esitetään Porvoon Vanhan raatihuoneen paloturvallisuuden parantaminen käyttäen oletettuun palon kehitykseen perustuvaa lähestymistapaa.

Käytetty paloteknisen analysoinnin menetelmä on osin deterministinen ja osin todennäköisyyspohjainen siten, että palon simuloinnit suoritetaan käyttäen determinististä lähestymistapaa ja eri tekijöihin ja tapahtumakulkuihin liittyvät epävarmuudet otetaan huomioon käsittelemällä palon aiheuttamia uhkatekijöitä todennäköisyyspohjaisesti. Henkilöturvallisuus arvioidaan henkilöille koituvien riskien kautta käyttäen ns. FN-esitystapaa, joka yhdistää potentiaalisten uhrien lukumäärän ja sitä vastaavan todennäköisyyden. Rakennukselle ja sen esineistölle koituvat vaarat arvioidaan palon voimakkuuden perusteella ottaen huomioon mahdollinen palokunnan vaikutus palon kehittymiseen.

11. Oletettuun palokehitykseen perustuvan tarkastelun soveltamisala

Oletettuun palokehitykseen perustuvan tarkastelun soveltamisala on koko rakennus ja kaikki paloturvallisuuden olennaiseen vaatimukseen kuuluvat osa-alueet [Ympäristöministeriö 2002]:

- Rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan.
- Palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua.
- Palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa.
- Rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin.
- Pelastushenkilöstön turvallisuus on otettava huomioon rakentamisessa.

Näiden lisäksi paloturvallisuustavoitteina ovat

- rakennuksen suojeleminen savun ja kuumuuden aiheuttamilta vahingoilta muuttakin osin kuin pelkästään kantavien rakenteiden palonkeston osalta
- rakennuksen esineistön suojeleminen savun ja kuumuuden aiheuttamilta vahingoilta.

12. Hyväksymiskriteerit

Edellä mainittujen paloturvallisuustavoitteiden toteutumisen todentaminen esitetään yksityiskohtaisesti kunkin uhkakuvan kohdalla. Käsittelyn syvyys riippuu tilanteesta: kun jotkin tilanteet voidaan todeta selvästi turvallisiksi esim. alhaisten syntyvien lämpötilojen perusteella, sellaisten uhkakuvien käsittelyssä, joissa tilanteen turvallisuus ei ole ilmeinen, tarkastelussa mennään riskien arviointiin saakka.

Henkilöturvallisuuden suhteen turvallisena pidetään tilannetta, jossa palon synnyttämä savukerros ei toisaalta laskeudu niin alas, että se haittaisi poistumista, ja toisaalta, että savukerroksen lämpötila pysyy niin alhaisena, että sen aiheuttama säteily ei ylitä ihmisen sietorajaa. Ihmisen sietämä lämpösäteilytaso (\dot{q}''_{exp} , kW/m²) riippuu altistuksen pituudesta (t_{exp} , s). Purserin [2001] mukaan nämä kaksi tekijää riippuvat toisistaan kaavan 14 mukaisesti:

$$t_{\text{exp}} = \frac{A}{(\dot{q}''_{\text{exp}})^{1,33}}, \quad (14)$$

missä vakiolle A kokeellisesti määritetyt arvot ovat n. 90 (kW/m²)^{1,33}s [Hymes ym. 1996] ja 110 (kW/m²)^{1,33}s [Mudan & Croce 1995]. Tämän perusteella tässä työssä käytetään vakiolle A vaihtelevaa arvoa, joka on keskimäärin 90 (kW/m²)^{1,33}s vaihteluvälillä ollessa 70–110 (kW/m²)^{1,33}s (huomaa, että välillä 70–90 (kW/m²)^{1,33}s arvot vastaavat kokeellisesti määritettyä pienempiä kriittisiä säteilyannoksen arvoja ja ovat siksi keskiarvon turvallisella puolella). Viitteissä SFPE [2000] ja Wieczorek ja Dembsey [2001] annetaan kriittiseksi säteilytasoksi 1,7 kW/m², joka vakion A keskimääräisellä arvolla vastaa 45 s:n pituista sieto-aikaa. Tässä työssä lähdetään siitä, että tämä aika edustaa altistumisajan alarajaa (erittäin harvinainen tapaus) ja että yleensä altistumisaika voi olla pitempi, mikä vastaa alemmaa kriittistä säteilyä. Kun suhteellisen usein toistuvaksi altistusajaksi (20 %:n fraktiili normaalijakaumassa) valitaan yhden minuutin pituinen aika, saadaan säteilyn sietorajan mitoitusarvoksi (20 %:n fraktiili) noin 1,2 kW/m², mikä vastaa² savukerroksen lämpötilaa 110 °C. Kun nämä arvot pyöristetään alaspäin, saadaan seuraavat henkilöturvallisuuden hyväksymiskriteerit:

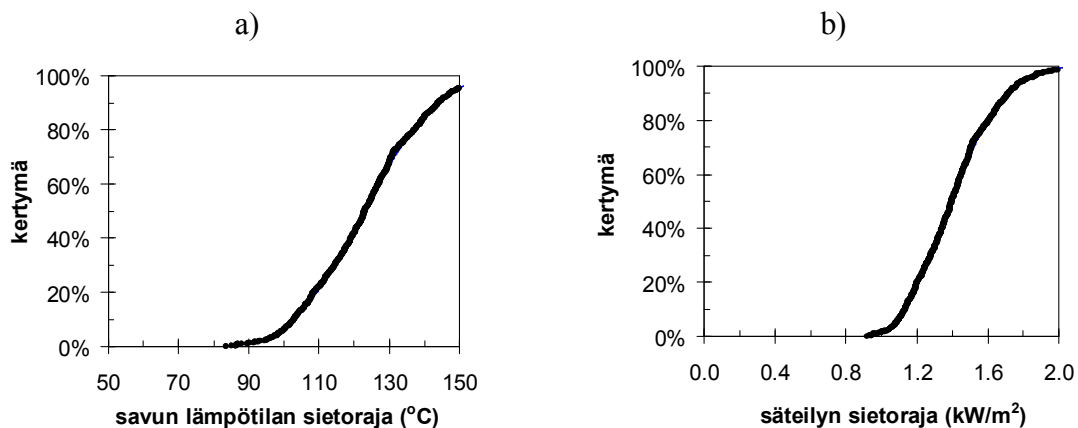
- savukerroksen tuottama säteily alle 1,2 kW/m²
- savukerroksen keskimääräinen lämpötila alle 100 °C.

² Säteilyn ja savukerroksen lämpötilan T_g välillä on yhteys $\dot{q}'' \approx \phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_g^4$, missä $\phi \approx 1$ on savukerroksen näkyvyystekijä ja $\varepsilon \approx 1$ sen emissiviteetti, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴ on Stefan-Boltzmanin vakio. Epävarmuutta arvioitaessa voidaan ϕ :n ja ε :n tulon arvioida vaihtelevan välillä 0,8...1,0.

Riskiperustaisissa tarkasteluissa tarvitaan edellä kuvatulla tavalla arvioituja epävarmuuksia, jolloin saadaan kuvassa 18 esitetyt jakaumat siedettävälle säteilylle ja savun lämpötilalle.

Palon vaikutus rakenteiden kantavuuteen lasketaan teräsrakenteille niiden lämpötilan ja puurakenteille niiden hiiltymisen perusteella käyttäen lämpörasituksen savukerroksen maksimilämpötilaa. Hyväksymiskriteerinä käytetään vaatimusta, että rajatilafunktio $g = R - S > 0$, missä S on paloaikainen kuormitus ja R on rakenteen kantokyky.

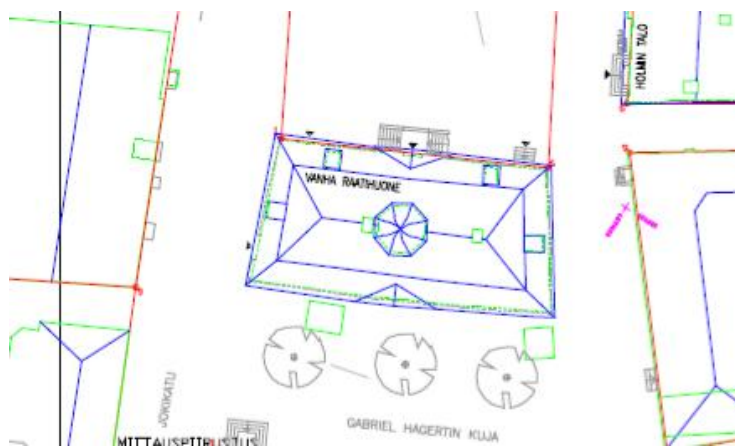
Kohderakennuksen ja sen esineistön suojelun suhteen paloturvallinen tilanne saavutetaan, kun palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua. Tämän vaatimuksen toteutuminen tarkistetaan kullekin uhkakuvalle erikseen. Ehdoton vaatimus palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rajoittamiselle on, että kohteessa ei saa tapahtua lieskahdusta. Tällöin myös palon leviämisen todennäköisyys lähistöllä oleviin rakennuksiin on pieni, ja yhdistettynä rakenteellisen kantavuuden toteutumiseen lieskahduksen välttäminen takaa myös pelastushenkilön turvallisen toiminnan.



Kuva 18. a) Siedettävän savun lämpötilan ja b) säteilytason jakaumat.

13. Kohteen kuvaus

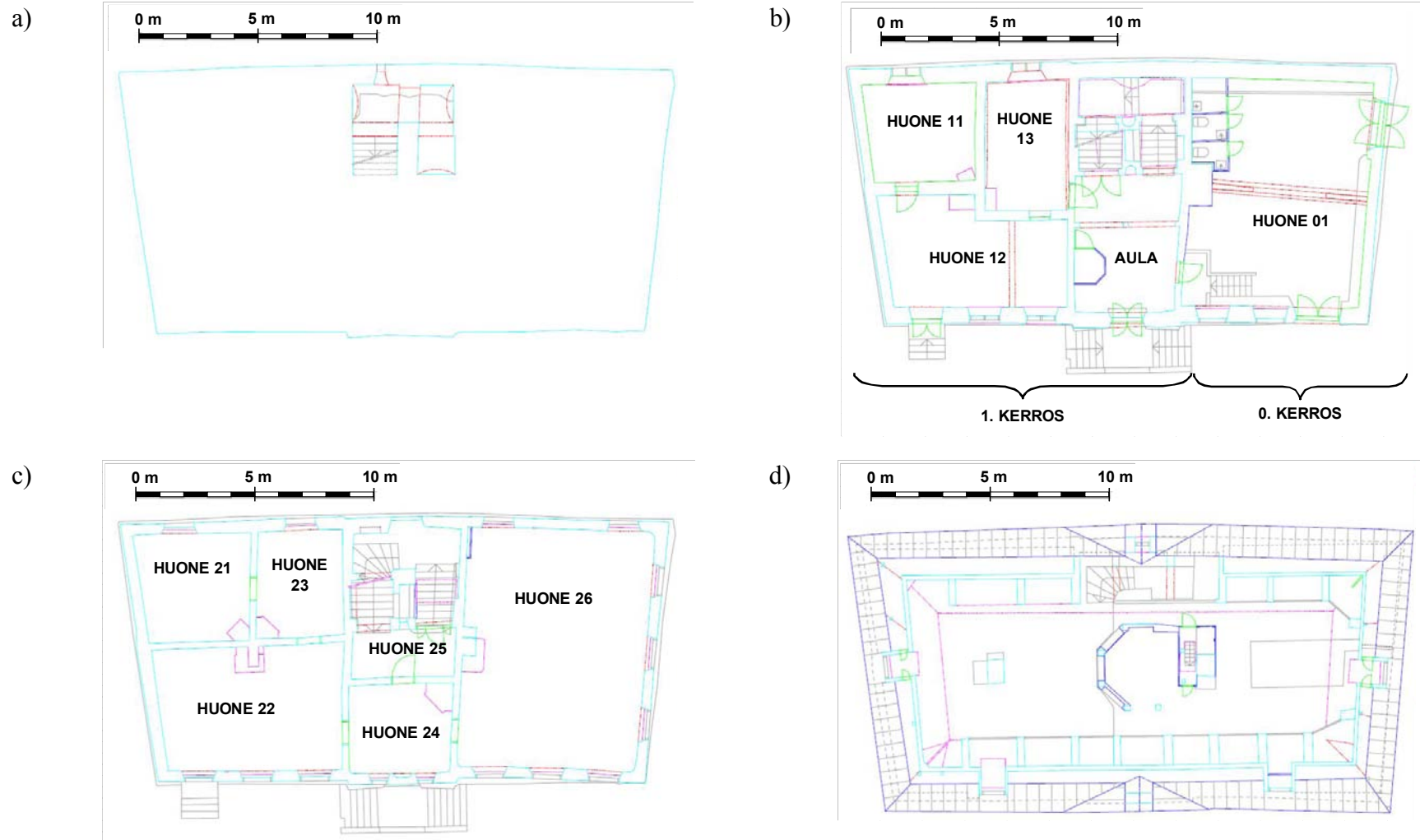
Kohde on vuosina 1762–1764 rakennettu museona toimiva rakennus, joka sijaitsee Vanhassa Porvoossa Vanhan raatihuoneentorin itäpäässä (kuva 19). Rakennus on toiminut museona vuodesta 1897. Rakennuksessa on kolme kerrosta, yläpohjan ontelo ja kellotorni (kuva 20). Ensimmäinen kerros sijaitsee kahdessa tasossa, joista alemmaa nimitetään jatkossa kerrokseksi 0. Rakennuksen nykytilanteen mukaiset rakennuksen eri kerrosten pohjapiirrokset esitetään kuvassa 21 ja peruskorjauksen jälkeistä tilannetta vastaavat pohjapiirrokset kuvassa 22. Kuvista nähdään uloskäytävänä toimiva porrashuone, joka kulkee 1. kerroksen aulatilasta 3. kerrokseen. Kulku 0. kerrokseen voi tapahtua myös maan tasolla olevan oven kautta (kuvat 21b ja 22b). Rakennuksen teknisiä tietoja esitetään taulukossa 7.



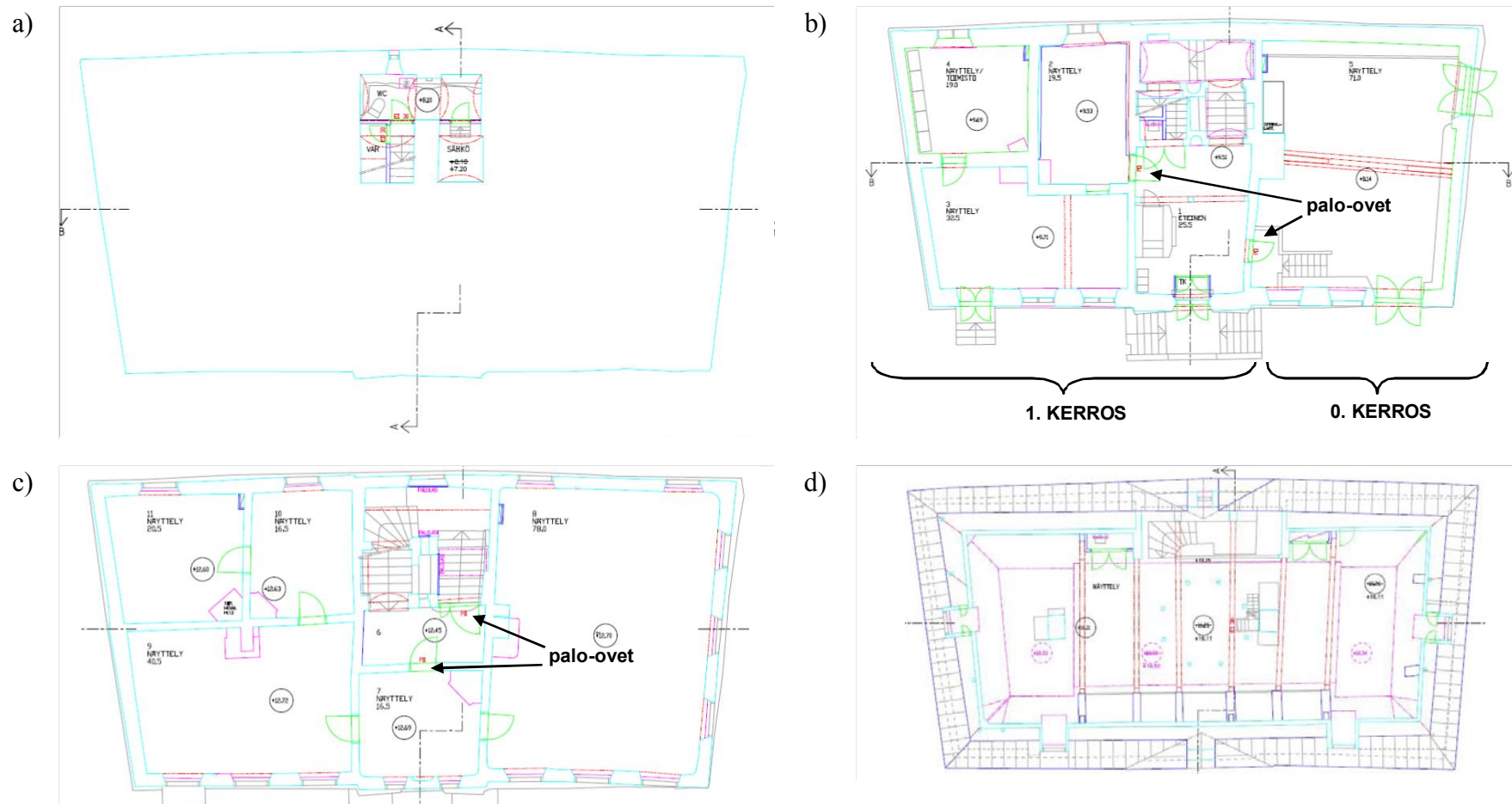
Kuva 19. Rakennuksen asema: se on helposti palokunnan saavutettavissa.



Kuva 20. Rakennuksen julkisivu Vanhan raatihuoneentorin suuntaan.

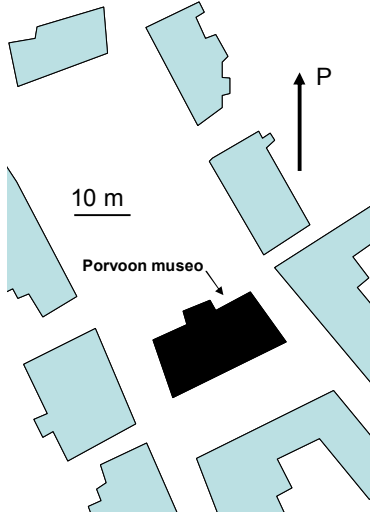


Kuva 21. Nykytilan mukaiset pohjapiirustukset: a) sähkötila 1. krs:n alapuolella, b) 1. ja 0. kerros, c) 2. kerros ja d) 3. kerros.



Kuva 22. Peruskorjattu tilanne, pohjapiirustukset: a) sähkötila 1. krs:n alapuolella, b) 1. ja 0. kerros, c) 2. kerros ja d) 3. kerros.

Taulukko 7. Rakennuksen teknisiä tietoja.

<p>Sijainti suhteessa naapurirakennuksiin</p>	
<p>Etäisyys pelastuslaitokselle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vakinainen palokunta: 2,85 km (linnuntietä) • Sopimuspalokunta PS211: alle 2 km • Sopimuspalokunta PS213: noin 5 km
<p>Rakennuksen koko ja tilojen käyttötarkoitukset</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Korkeus: 19 m, josta tornin osuus noin 5 m • Kerroslukumäärä: 3 kerrosta + yläpohjan ontelo • Huonetilat, niiden pinta-alat ja käyttötarkoitukset: <ul style="list-style-type: none"> – huone 01: 71 m², näyttelytila – huone 11: 19 m², toimistotila – huone 12: 33 m², näyttelytila – huone 13: 20 m², näyttelytila – aula: 26 m² – huone 21: 21 m², näyttelytila – huone 22: 41 m², näyttelytila – huone 23: 17 m², näyttelytila – huone 24: 17 m², näyttelytila – huone 25: porraskäytävää – huone 26: 78 m², näyttelytila/kokoontumistila – 3. kerros: n. 195 m², näyttelytila

Rakenteet	<ul style="list-style-type: none"> • Seinät, ala-, ylä-, ja välipohjat sekä vesikatto: tiilimuuriseinät, porrashuoneessa luonnonkiviholvi, puulattiat, peltinen vesikatto • Yläpohjan ontelo: lattialla sahanpuueriste
Ovien ja ikkunoiden koot	<ul style="list-style-type: none"> • Ikkuna-aukot: <ul style="list-style-type: none"> – huone 01: korkeus 1,10 m, leveys 1,10 m ja aukon ala 1,21 m²; vaunuvaraston oven päällä oleva ikkuna: korkeus 0,75 m, leveys 1,75 m ja aukon ala 1,20 m² – 1. kerros: korkeus 1,10 m, leveys 1,10 m, aukon ala 1,21 m² – 2. kerros huone 24: korkeus 1,60 m, leveys 0,50 m ja aukon ala 0,8 m²; muut: korkeus 1,70 m, leveys 1,10 m ja aukon ala 1,87 m² – 3. kerros: korkeus 0,90 m, leveys 0,80 m ja aukon ala 0,72 m² • Ovi-aukot: <ul style="list-style-type: none"> – ulko-ovi: korkeus 2,10 m, leveys 1,20 m, aukon ala 2,52 m² – muut: korkeus 1,70–1,80 m, leveys 0,90 m, aukon ala 1,50–1,60 m²
Talotekniikkajärjestelmät (LVIS)	<ul style="list-style-type: none"> • Vaakasuuntaiset kanavat, asennuslattiat ja -katot: ei paloturvallisuuden kannalta olennaisia onteloita • Pystysuorat nousut: paloturvallisuuden kannalta olennaisia onteloita

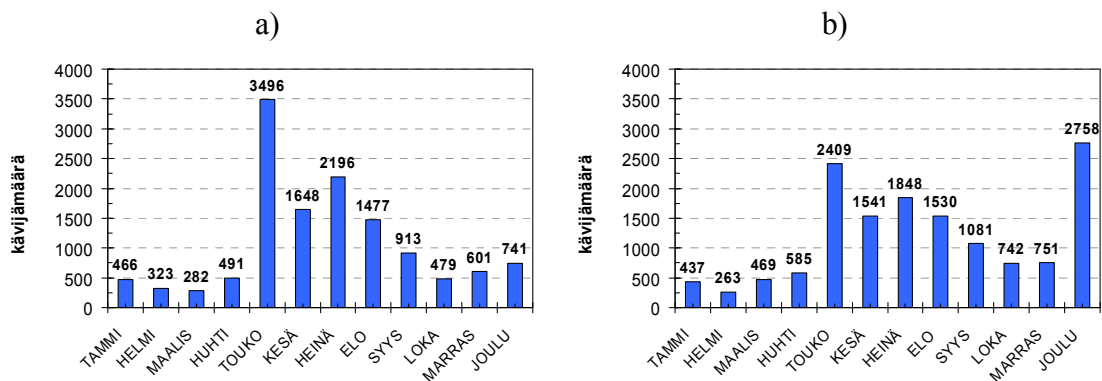
14. Henkilömäärä ja erilaisten henkilöiden suhteellinen osuus

Rakennus on avoinna seuraavasti:

- touko–elokuussa maanantaista lauantaihin kello 10–16 sekä sunnuntaisin kello 11–16
- syys–huhtikuussa keskiviikosta sunnuntaihin kello 12–16.

Museon aukioloaikana rakennuksessa työskentelee 2–3 henkeä, joista yksi henkilö 1. kerroksen lipunmyyntiluukulla. Lisäksi 1. kerroksen toimistotilana toimivassa huoneessa (huone 11) työskennellään ajoittain.

Museovieraiden lukumäärä selvitettiin vuosien 2004 ja 2005 tietojen perusteella (kuva 23). Henkilöturvallisuuden mitoituksessa käyttökelpoinen tieto on tyypillistä vierailuaikaa, joka on noin yksi tunti (Herrala 2005), kohden laskettu henkilömäärä. Tämä suure esitetään suhteellisina osuuksina ilmaistuna kuvassa 24 ja sen jatkotarkasteluissa käytettävä tilastollinen malli³ esitetään kuvassa 25 (kertymäfunktio). Museovieraiden jakautuminen lapsiin ja aikuisiin esitetään kuvassa 26.

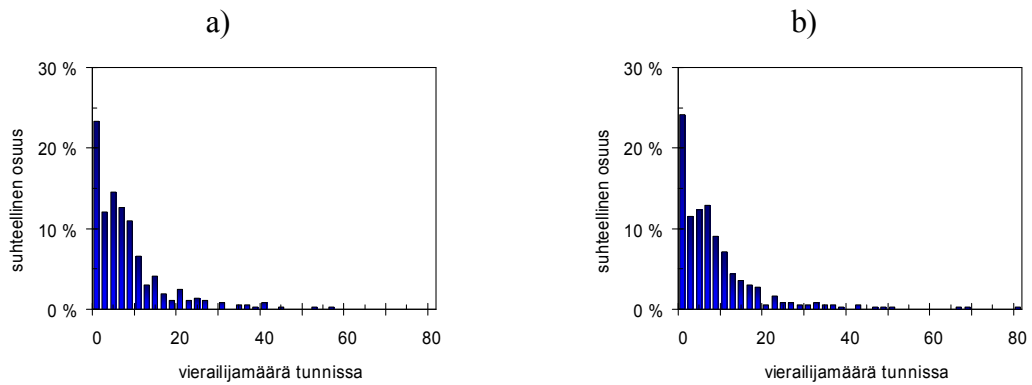


Kuva 23. Museovieraiden lukumäärä vuosina a) 2004 ja b) 2005.

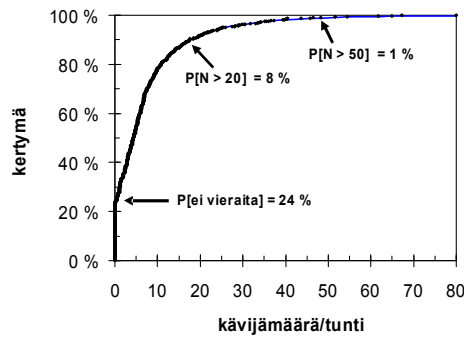
³ Matemaattisesti kertymäfunktion $F(x)$ estimaatti voidaan ilmaista seuraavasti:

$$F(x) = \begin{cases} 23,7\%, & x = 0 \\ F_W(\alpha_1, \beta_1, x_{\min,1}; x), & 0 < x \leq x_A = F^{-1}(65\%) \\ F_W(\alpha_2, \beta_2, x_{\min,2}; x), & x > x_A \end{cases}$$

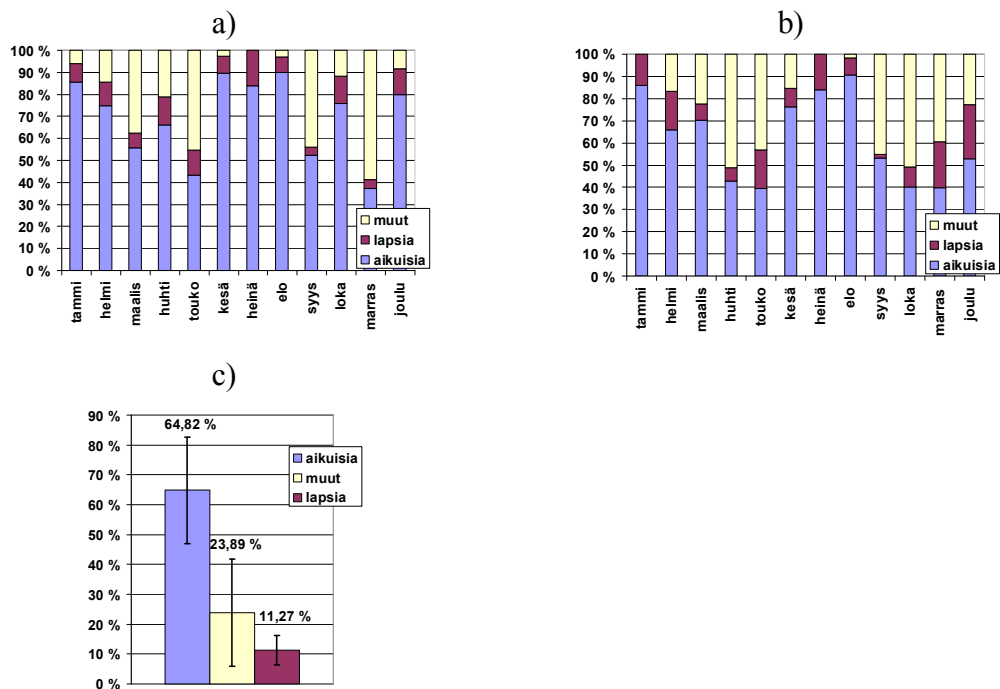
missä $x_A = 0,65$, $\alpha_1 = 2,53$, $\beta_1 = 15,6$, $x_{\min,1} = -9,2$, $\alpha_2 = 0,61$, $\beta_2 = 4,0$ ja $x_{\min,2} = 2,2$.



Kuva 24. Museovieraiden lukumäärä tuntia kohden suhteellisena osuutena esitettynä: a) vuonna 2004 ja b) vuonna 2005.



Kuva 25. Museovieraiden yhtä tuntia kohden lasketun lukumäärän tilastollinen malli.



Kuva 26. Museovieraiden jakautuminen lapsiin ja aikuisiin: a) vuonna 2004, b) vuonna 2005 ja c) poistumisaikalaskelmissa käytetty jakauma.

15. Rakenteellinen paloturvallisuus ja paloturvallisuuslaitteet

Osa seuraavassa esitetyistä toimenpiteistä perustuu luvuissa 16 ja 17 esitettyyn palotekniseen analyysiin.

15.1 Syttymisen ehkäisy ja palon kehittymisen rajoittaminen

Nykytilanne: ei erityisiä toimenpiteitä.

Peruskorjattu tilanne: Aulatilasta poistetaan kaikki irtain palokuorma. Palon leviäminen porrashuoneessa 1. ja 2. kerroksen välissä olevan ikkunan kautta kiertäen estetään lasittamalla ko. ikkuna palonkestävällä lasilla. Sähkölaitteet ja -kytkennät uusitaan.

15.2 Osastointi

Nykytilanne: ei osastointeja.

Peruskorjattu tilanne: Osastoivat itsesulkeutuvat palo-ovet (EI30) näyttelytilojen ja porrashuoneen välille. Kulku 3. kerrokseen tapahtuu palo-oven kautta. Yläpohjan ontelo osastoidaan erilleen 3. kerroksesta palonkestävällä EI30-luokan vaatimukset täyttävällä luukulla.

15.3 Rakenteiden kantavuus

Kun rakennuksen paloturvallisuutta parannetaan luvuissa 16 ja 17 esitetyillä tavoilla, kantavat rakenteet kestävät rakennuksessa esiintyvät palorasitukset.

15.4 Poistumisturvallisuus

Nykytilanne: Poistuminen tapahtuu yhden porrashuoneen kautta, joka on samaa palo-osastoa näyttelytilojen kanssa. Tämän lisäksi hätäpoistumistienä on 2. ja 3. kerroksen ikkuna.

Peruskorjattu tilanne: Poistuminen tapahtuu yhden porrashuoneen kautta, joka on osastoitu omaksi palo-osastokseen itsesulkeutuvilla EI30-luokan palo-ovilla. Lisäksi 0. ja 1. kerroksessa tehdään huoneiden 01 ja 12 pihalle avautuvista ovista hätätilanteessa käytettävät poistumistiet. Tämän ratkaisun turvallisuus osoitetaan luvussa 16, jossa tarkastellaan rakennuksen toimintaa erilaisissa tulipalotilanteissa.

15.5 Paloturvallisuuslaitteet

Nykytilanne: Rakennus on varustettu automaattisilla savuun reagoivilla paloilmaisimilla ja kiinteistökohtaisella paloilmoitinjärjestelmällä sekä kerroksittain ja palo-osastoittain pikapalopostein.

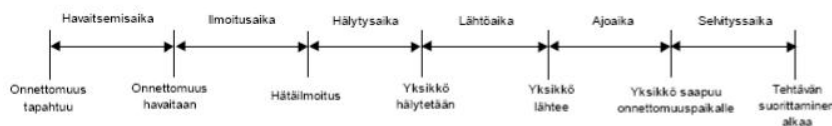
Peruskorjattu tilanne: Rakennus on varustettu automaattisilla savuun reagoivilla paloilmaisimilla ja kiinteistökohtaisella paloilmoitinjärjestelmällä sekä kerroksittain ja palo-osastoittain pikapalopostein. Pohjakerrokseen (huone 01) asennetaan savunpoistoluukku ja savunpoistolle luodaan mahdollisuus myös porrashuoneen yläpäästä. Koska ontelopalojen sammuttaminen on usein hyvin vaikeaa ja voi vaatia rakenteiden rikkomista sekä runsaasti vettä, yläonteloon asennetaan kuivasprinklauslaitteisto, johon palokunta tarvittaessa saa syötettyä vettä.

Savuilmaisimien toimintaa arvioidaan teknisessä lisäyksessä A esitetyllä tavalla.

15.6 Palokunnan toimintamahdollisuudet

Rakennus sijaitsee selvästi erillään muista rakennuksista siten, että paloautoilla on pääsy sen viereen kaikista suunnista.

Itä-Uudenmaan pelastuslaitoksen antaman tiedon mukaan Vanhan raatihuoneen tulipalotapauksessa hälytykseen vastaa kolme yksikköä: vakinaisen palokunnan yksikkö IU 11 ja sopimuspalokuntien yksiköt PS 211 ja PS 213.



Kuva 27. Toimintavalmiusajan osatekijät.

Toimintavalmiusajan eri osatekijöille (kuva 27) ilmoitetaan seuraavat arvot:

- havaitsemisaika: 1 minuutti
- ilmoitusaika ml. ilmoituksen käsittelyaika: 1 minuutti
- lähtöaika:
 - vakinaisen palokunnan yksikkö: 1 minuutti
 - sopimuspalokunnat: 5 minuuttia

- ajoaika: 1 km/ minuutti
 - vakinaisen palokunnan yksikkö: 2 minuuttia
 - sopimuspalokunnat: PS 211: 1 minuutti, PS 213: 5 minuuttia
- selvitysaika: 3 minuuttia.

Toimintavalmiusajat ovat siis

- UP 11: 8 minuuttia
- PS 211: 11 minuuttia
- PS 213: 15 minuuttia.

Riskien arvioinnissa tulee tietää näihin aikoihin liittyvä epävarmuus, joka voidaan arvioida ilmoitus-, lähtö- ja matka-ajan suhteen käyttäen Tillanderin ja Keski-Rahkosen [2000] tuloksia. Havaitsemisaikaa käsitellään savuilmamaisimien toiminta-mallin avulla kohdassa 16.3.2 ja teknisessä liitteessä A esitetyllä tavalla. Selvitysaikaan liittyvän epävarmuuden arvioimiseen ei tällä hetkellä ole kotimaista tietoa, minkä vuoksi turvaudutaan australialaiseen tietoon [Marchant ym. 2001]. Kuvassa 28 esitetyt tilastolliset mallit lähtövalmius-, matka- ja selvitysajoille on johdettu Itä-Uudenmaan pelastuslaitoksen antamia tietoja ja edellä mainittuja tiedonlähteitä käyttäen seuraavasti:

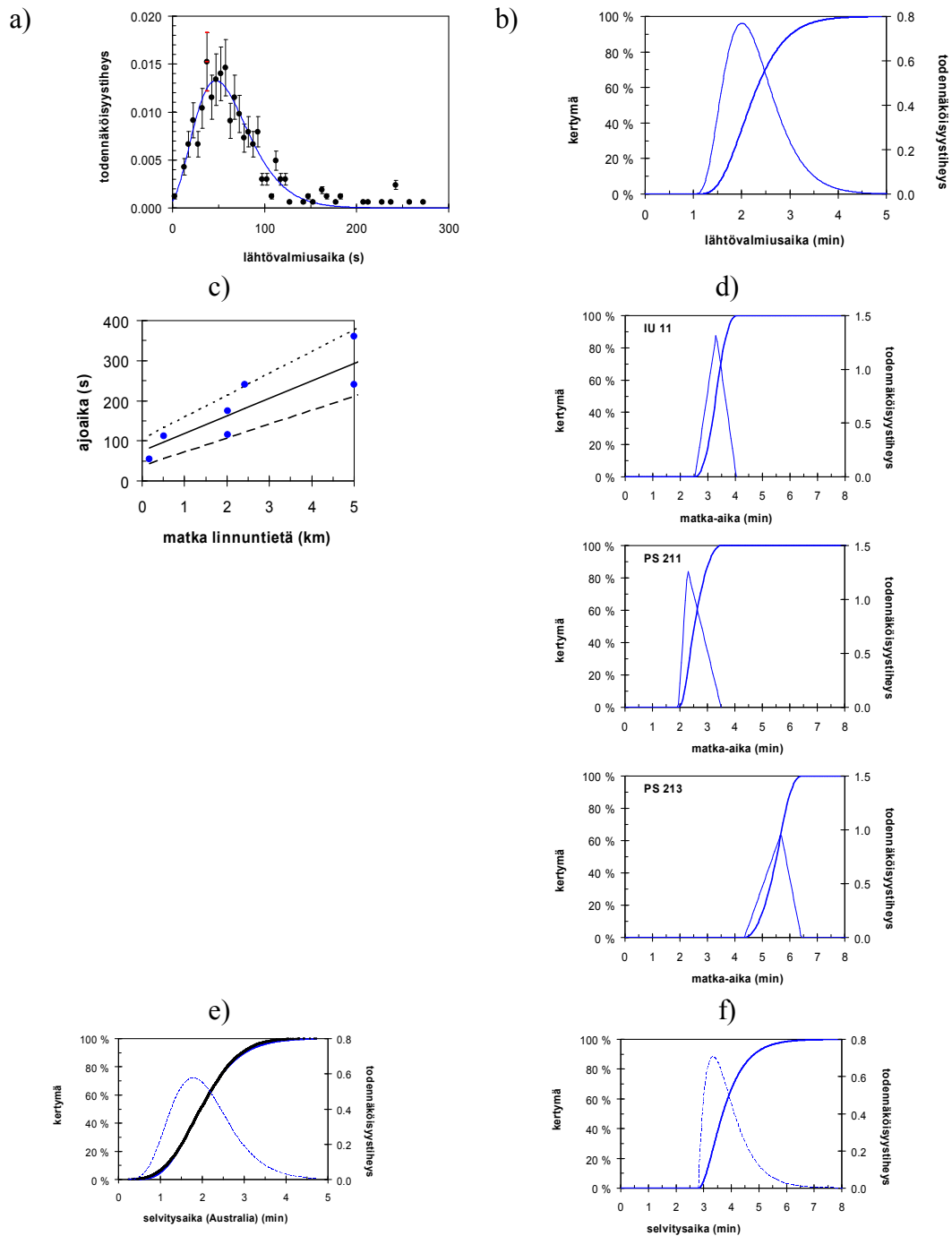
Lähtövalmiusajan tilastollisena mallina käytetään 3-parametrinen gammajakaumaa⁴ (kuva 28b), jonka keskihajonta on sama kuin Tillanderin ja Keski-Rahkosen [2000] määrittämässä jakaumassa (kuva 28a). Koska Itä-Uudenmaan pelastuslaitoksen antamien tietojen mukaan ilmoituksen käsittelyaika on 1 minuutti, jakaumalta vaadittiin, että alle 1,5 minuutin lähtövalmiusaika on hyvin harvinainen, ja lisäksi todennäköisimmäksi arvoksi saatettiin noin 2 minuuttia.

Matka-ajan tilastollisena jakaumana käytettiin kolmiojakaumaa (kuva 28d), jonka parametrit määritettiin Itä-Uudenmaan pelastuslaitoksen antamien matka-aikatietojen ja Tillanderin ja Keski-Rahkosen [2000] määrittämien matka-aikojen hajonnan perusteella (kuva 28c).

⁴ Tiheysfunktio.

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} (x - x_{\min})^{\alpha-1} e^{-\frac{x-x_{\min}}{\beta}}, \quad x \geq x_{\min}$$

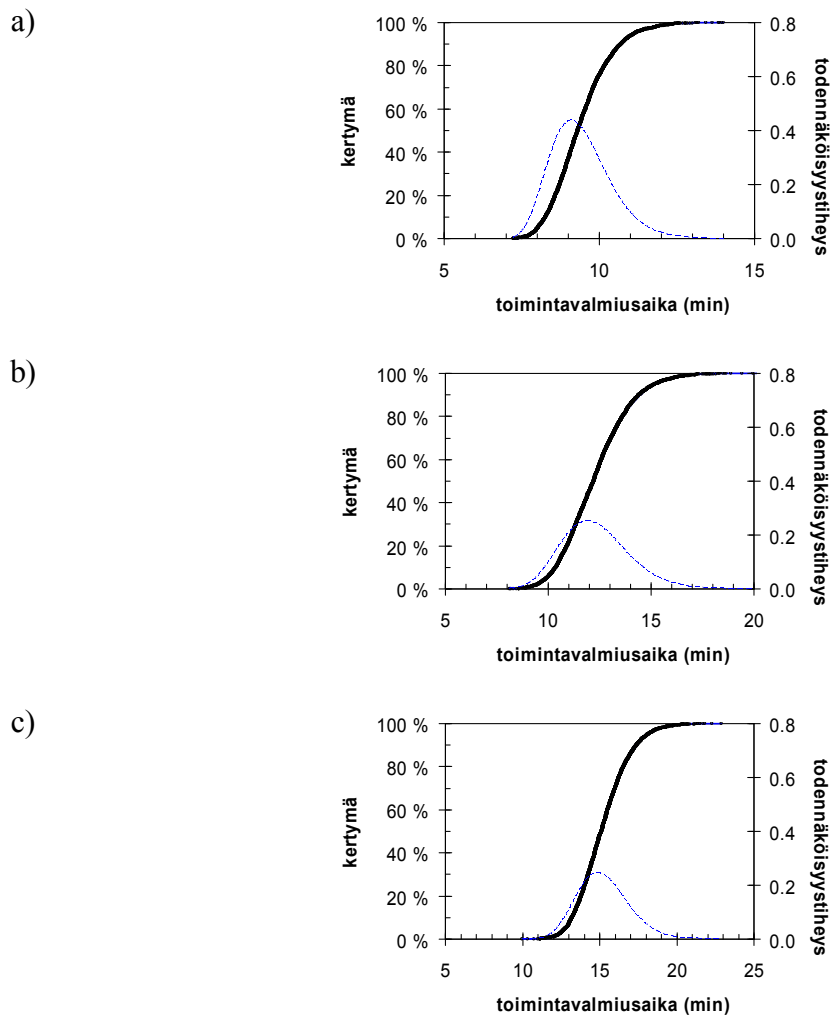
$$f(x) = 0, \quad x < x_{\min}.$$



Kuva 28. Lähtövalmiusaajan, matka-ajan ja selvitysaajan tilastolliset mallit ja niiden perustelut: a) Tillanderin ja Keski-Rahkosen määrittämä lähtövalmiusaajan tilastollinen malli ja b) tuota dataa käyttäen johdettu lähtövalmiusaajan tilastollinen malli; c) Tillanderin ja Keski-Rahkosen määrittämiä matka-aikoja ja d) niiden perusteella määritetyt matka-aikojen tilastolliset mallit eri palokunnan yksiköille; e) Marchantin ym. tietoihin perustuva selvitysaajan tilastollinen malli ja f) sen perusteella määritetty selvitysaajan tilastollinen malli.

Selvitysajan tilastollisena mallina käytetään 3-parametrinen gammajakaumaa (kuva 28f), jonka keskihajonta on sama kuin Marchantin ym. (2001) tietojen perusteella määritetyn jakauman (kuva 28e). Lisäksi jakaumalta vaaditaan, että 3 minuuttia lyhyemmät selvitysajat ovat harvinaisia.

Tuloksena saadut toimintavalmiusaikojen tilastolliset mallit⁵ esitetään kuvassa 29.



Kuva 29. Eri yksiköiden toimintavalmiusaikojen tilastolliset mallit: a) IU 11, b) PS 211 ja c) PS 213. Huomaa erilaiset vaaka-asteikot.

⁵ Mallina käytetyn 3-parametrisen gammajakauman parametriarvot ovat seuraavat: yksikölle IU 11 $\alpha = 9,1$, $\beta = 0,32$ ja $\min = 6,5$; yksikölle PS 211 $\alpha = 15,6$, $\beta = 0,41$ ja $\min = 5,9$ ja yksikölle PS 213 $\alpha = 21,1$, $\beta = 0,36$ ja $\min = 7,7$.

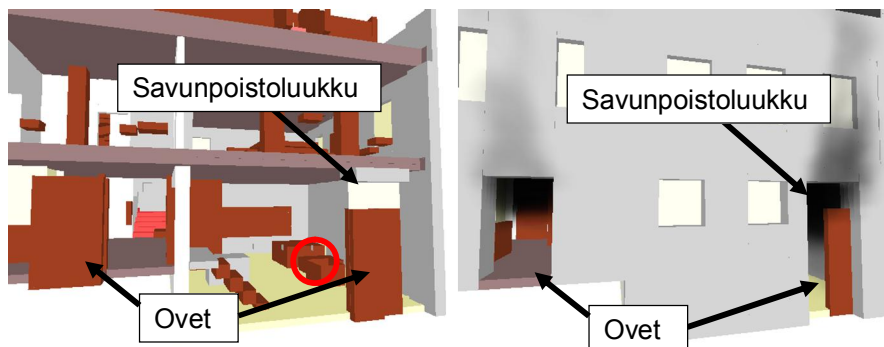
16. Tarkastelun kohteeksi valitut uhkakuvat ja niiden analysointimenetelmien kuvaus

16.1 Palotilanteet

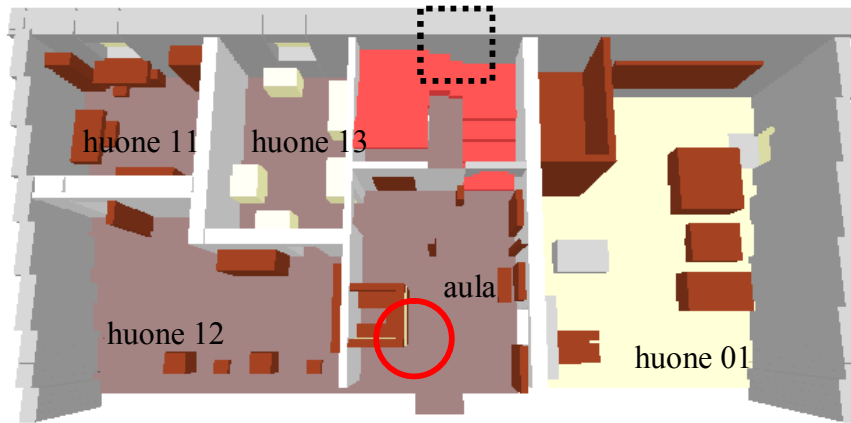
Tulipalon uhkakuvat esitetään taulukossa 8. Palojen sijaintia havainnollistetaan kuvissa 30–37.

Taulukko 8. Tulipalon uhkakuvat.

Tulipalo vanhassa vaunuvarastossa <ul style="list-style-type: none">• Palavalla nesteellä (benssiini) sytytettävä tuhopoltto (huone 01, kuva 30)
Tulipalot 1. kerroksessa <ul style="list-style-type: none">• Informaatiokopin palo sisääntuloaulassa, alkupalona roskakorin syttyminen (aula, kuva 31)• Toimistohuoneen palo, tutkijoiden työhuone, alkupalona pähvilaatikko (huone 11, kuva 32)
Tulipalot 2. kerroksessa <ul style="list-style-type: none">• Tietokonepöydän palo, alkupalona roskakori (huone 26, kuva 33)• Palavalla nesteellä sytytettävä tuhopoltto puuesineistöä sisältävässä huoneessa (huone 21, kuva 34)
Tulipalo 3. kerroksessa <ul style="list-style-type: none">• Sähkölaitepalo, syttymiskohtana yläpohjan onteloon johtava portaikko, alkupalona nauhuri (kuva 35)• Tuhopoltto, jossa Vanhan Porvoon pienoismalli sytytetään palavalla nesteellä (kuva 36)
Tulipalo yläpohjan ontelossa (kuva 37)



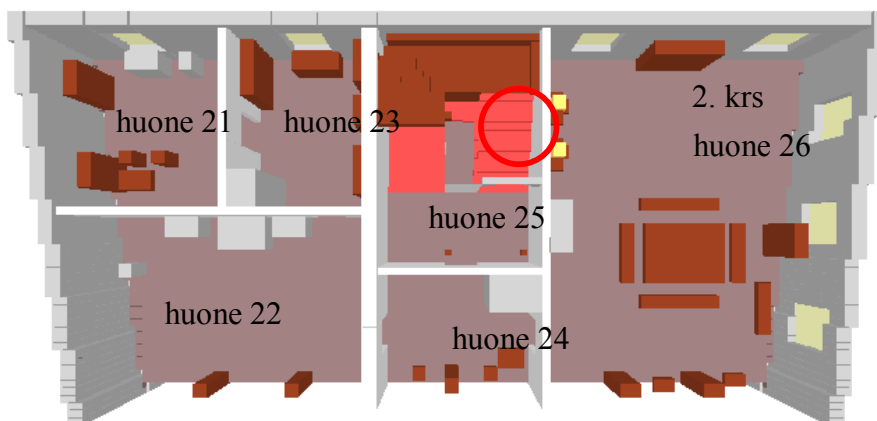
Kuva 30. Vanhan vaunuvaraston tulipalo pohjakerroksessa, syttymispaikka ympyröity.



Kuva 31. Sisäntuloaulan informaatiokopin tulipalo, syttymispaikka ympyröitynä. Katkoviivoin neliöllä kuvataan portaikon (1. ja 2. kerroksen välissä) sen ikkunan sijaintia, jonka rikkoutumislämpötilaa uhkakuvien analysoinnissa varioitiin.



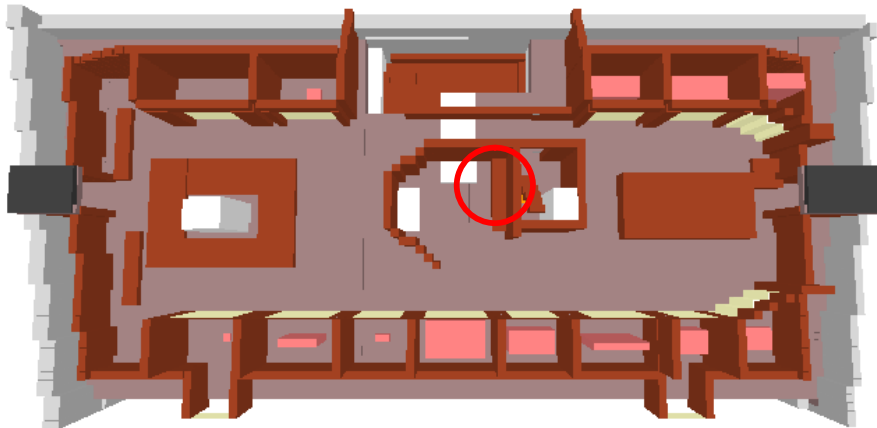
Kuva 32. Toimistohuoneen palo 1. kerroksessa, syttymiskohta ympyröity.



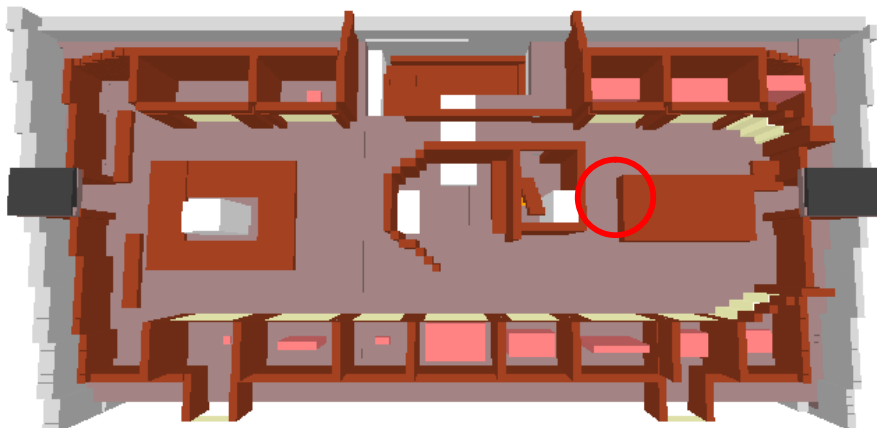
Kuva 33. Tietokonepöydän tulipalo 2. kerroksessa, syttymispaikka ympyröity.



Kuva 34. Palavalla nesteellä sytytettävä tuhopoltto puuesineistöä sisältävässä huoneessa 2. kerroksessa, syttymiskohta ympyröity.

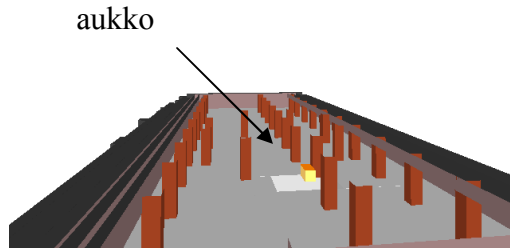


Kuva 35. Sähkölaitteepalo 3. kerroksessa, syttymiskohta ympyröity.

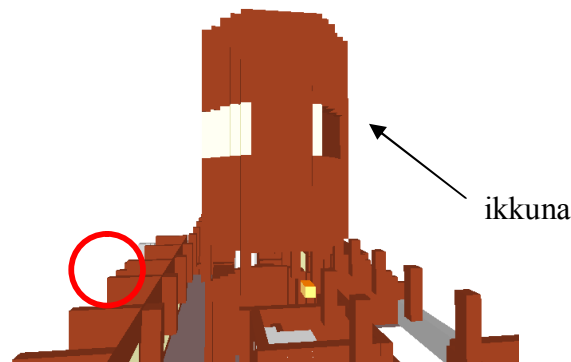


Kuva 36. Rakennuksen 3. kerroksessa olevan Vanhan Porvoon pienoismallin tuhopoltto, syttymiskohta ympyröity.

a)



b)



Kuva 37. Yläpohjan ontelopalo: a) yläpohjan ontelon ja kolmannen kerroksen välinen avoin aukko ja b) avonainen tornin ikkuna. Palon syttymiskohta ympyröity.

16.2 Poistumistilanteet

Tulipalon oletetaan syttyvän sellaiseen museon aukioloaikaan, jolloin rakennuksessa voi olla museovieraita 80 henkeä sekä tyypillisesti muutama henkilökuntaan kuuluva henkilö. Luvussa 14 esitettyjen tulosten mukaisesti museovieraat jakautuvat kolmeen ryhmään: aikuisiin, lapsiin ja ryhmään muut, joka edustaa lähinnä koululaisia ja opiskelijoita, joiden osuudet ovat 65 % aikuisia, 24 % koululaisia/opiskelijoita ja 11 % lapsia. Aikuisista henkilöistä oletettiin olevan vanhuksia noin 7 %, joka vastaa yli 70-vuotiaiden osuutta Suomen väestöstä (vuoden 2004 lopussa, Tilastokeskus).

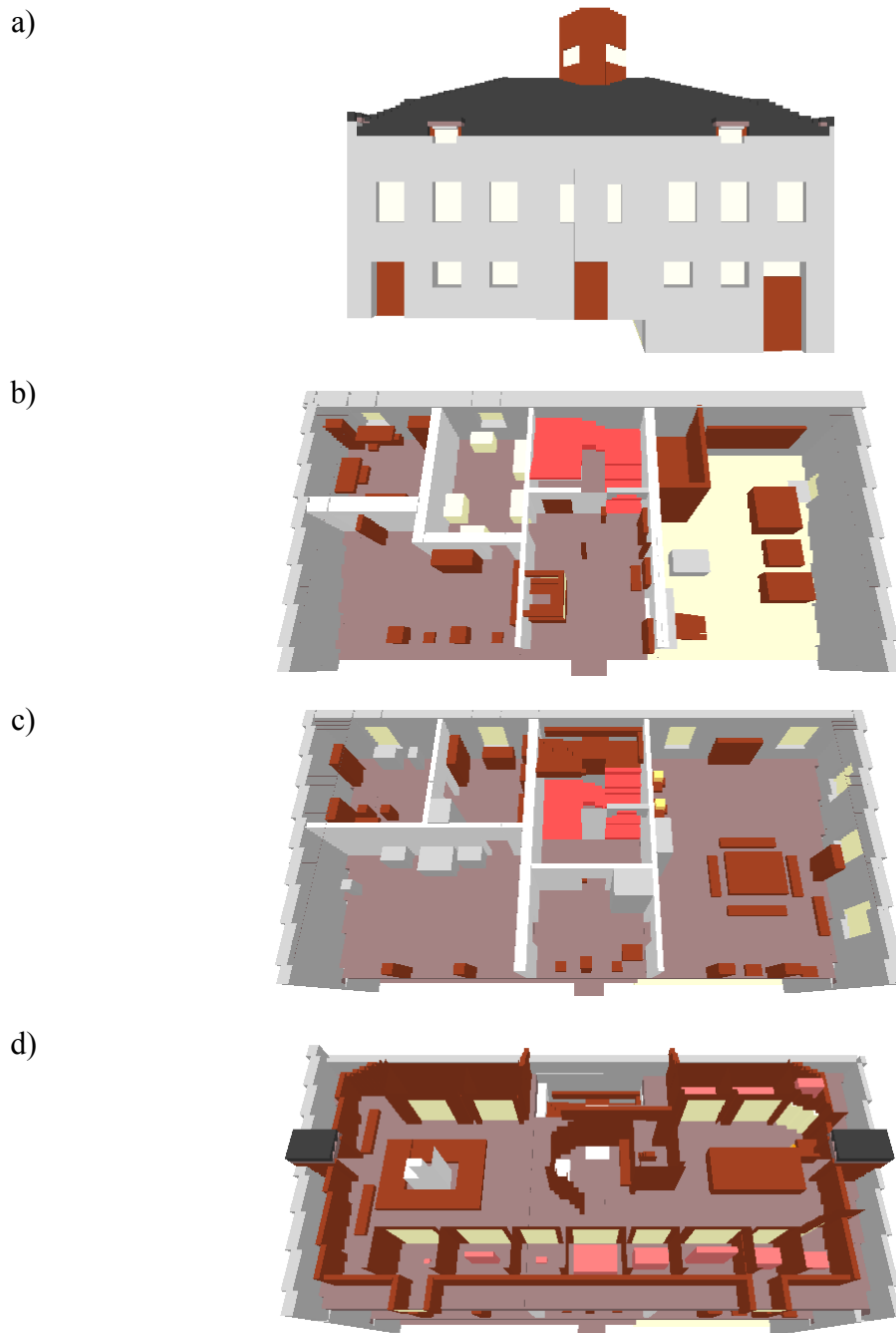
16.3 Menetelmien kuvaus

16.3.1 FDS-palonsimulointiohjelma

Tulipalon kehittymisen ja savun leviämisen arviointi tehtiin käyttäen FDS-palonsimulointiohjelmaa (versio 4). FDS-ohjelman kelpoisuuden todentamiseksi on

tehty paljon laskettujen tulosten ja vastaavien koetulosten vertailuja. Näitä tutkimuksia on tehty VTT:ssä [Hietaniemi ym. 2002b, Hostikka & Axelsson 2003, Hietaniemi ym. 2004, Korhonen & Hietaniemi 2004], NIST:ssä USA:ssa [Friday & Mowrer 2001, Floyd 2002, Hamins ym. 2004a, Hamins ym. 2004b, Hamins & McGrattan 2003, McGrattan & Hamins 2003] samoin kuin muissa tutkimuslaitoksissa [Floyd ym. 2001, D'Souza ym. 2001, Piergiorgio ym. 2001, Kashef ym. 2002, Xin ym. 2002, Zhang ym. 2002, Cochard 2003, Ma & Quintiere 2003]. FDS-ohjelma on siis erittäin perusteellisesti validoitu ja täyttää Rakennusmääräyskokoelman osassa E1 [Ympäristöministeriö 2002] laskentaohjelmille esitetyt vaatimukset (E1, kohta 1.3.2).

Palon FDS-mallintaminen luotiin tekemällä rakennuksen virtuaalinen malli (kuva 38). Mallissa käytettiin laskennan hilakoppikokona 20 cm:ä. FDS-mallissa kuvataan materiaalien kuumenemista ja palamista kullekin materiaalille määritettävien lämpöteknisten suureiden ja palo-ominaisuuksia kuvaavien suureiden avulla (ks. liite C).



Kuva 38. Rakennuksen FDS-malli: a) ulkoseinät, b) 1. ja 0. kerros, c) 2. kerros ja d) 3. kerros. Sisätilat kalustettu kohteen tietojen ja kohteesta otettujen valokuvien mukaisesti.

16.3.2 Poistumislaskelmat: ohjelma FDS+Evac ja sen käyttö

Poistumistapahtuma voidaan jakaa kolmeen eri osavaiheeseen:

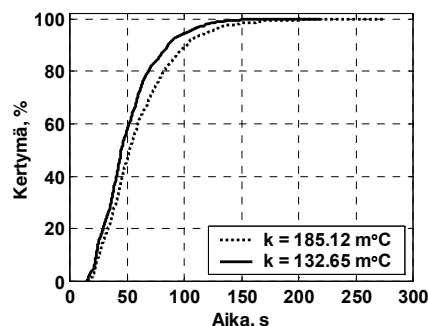
- palon havainnointivaihe (aika t_a)

- reagointivaihe (aika t_r)
- siirtymisvaihe (aika t_m).

Poistumisen viemä aika lasketaan FDS+Evac-ohjelmalla [Korhonen ym. 2005a ja 2005b]. Se on VTT:n kehittämä poistumisen laskentamalli, joka ottaa entistä paremmin huomioon ihmisen ja tulipalon vuorovaikutuksen (esim. ovien avaamisen vaikutuksen tulipalon kehittymiseen, näkyvyyden heikkenemisen vaikutuksen poistumiseen jne.). Ohjelman kelpoisuus on todennettu vertaamalla sillä laskettuja tuloksia vastaaviin, paloturvallisuussuunnittelussa vakiintuneen aseman saavuttaneilla ohjelmilla (esim. Simullex-ohjelma) laskettuihin tuloksiin [Korhonen ym. 2005a ja 2005b]. FDS+Evac-ohjelman kelpoisuutta käsitellään tarkemmin teknisessä liitteessä C. Saadut tulokset osoittavat, että ohjelmaa voidaan pitää hyvin soveltuvana poistumisaikalaskentaan.

Kuhunkin edellä mainittuun poistumisajan osatekijään liittyy merkittävä epävarmuus: suurin epävarmuus liittyy aikaan, joka kuluu siihen, että ihminen tulee havainneeksi palon, sekä siihen, miten ihminen käyttäytyy palon havaittuaan, mutta siirtymisvaiheen pituus vaihtelee merkittävästi. Käypä laskennallinen tekniikka merkittäviä epävarmuuksia sisältävien tekijöiden vaikutuksen huomioon ottamiseen on ns. Monte Carlo -menetelmä, jossa laskennan lopputulos muodostetaan todennäköisyys- ja tilastolaskentaa käyttäen suuresta joukosta laskennallisia otoksia. Yksityiskohtaisempi kuvaus Monte Carlo -menetelmästä esitetään liitteessä D. Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin poistumisaikalaskelmien osavaiheita sekä niihin liittyvän epävarmuuden kuvaamiseen käytettyjä tilastollisia malleja ja menetelmiä.

Havainnointivaihe. Poistumisaikalaskelmissa on pääsääntöisesti oletettu, että palo havaitaan ensimmäisenä paloilmaisimien avulla. Joissain lähinnä tuhopolttoon liittyvissä uhkakuvissa palon havaitsemisessa otetaan huomioon se, että palon alkamishuoneessa olevat henkilöt voivat havaita palon ennen ilmaisimia. Savuilmaisimien toiminta-ajan tilastollinen malli esitetään kuvassa 39. Perustelut esitetään teknisessä liitteessä B.



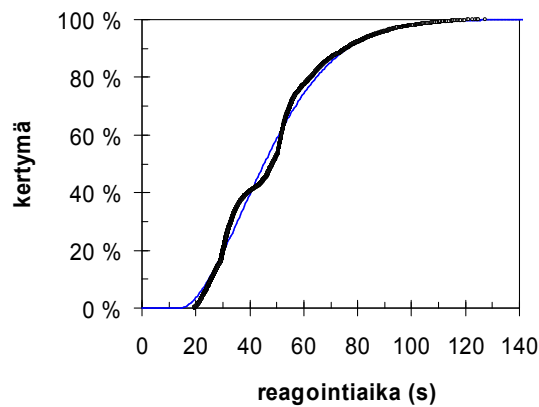
Kuva 39. Savuilmaisimen toiminta-ajan tilastollinen malli (kahden eri palotapauksen analysointi).

Reagointivaihe. Reagointivaiheen pituutta arvioitiin Franzichin [2001] tekemien kokeiden tulosten perusteella (taulukko 9). Franzichin tulosten analysoinnin perusteella saatu reagointivaiheen pituuden tilastollinen malli esitetään kuvassa 40.

Taulukko 9. Franzichin [2001] mitaamia reagointiaikoja.

Keskiarvo	Min.	Max.	Kuvaus
00:30	00:19	00:54	Örebro IKEA ¹
00:50	00:35	01:13	Örebro IKEA ²
00:50	00:51	00:57	Örebro IKEA ³
00:27	00:09	00:46	Västerås IKEA ¹
00:51	00:40	01:07	Västerås IKEA ²
00:31	00:27	00:38	Västerås IKEA ³
00:26	00:15	00:50	Älmhult IKEA ¹
01:02	00:45	01:40	Älmhult IKEA ²
01:23	00:35	02:10	Älmhult IKEA ³

1) myymälän puoli kaupasta
2) ravintolan puoli kaupasta
3) kaupan kassan ympäristö



Kuva 40. Reagointivaiheen ajallisen keston tilastollinen malli (3-parametrinen Weibullin jakauma).

Siirtymisvaihe. Siirtymisvaiheen kestoa arvioidaan käyttäen FDS+Evac-ohjelmaa. Siinä kutakin henkilöä kuvataan yksilönä, jolla voi olla toisista henkilöistä poikkeavia ominaisuuksia, joita ovat

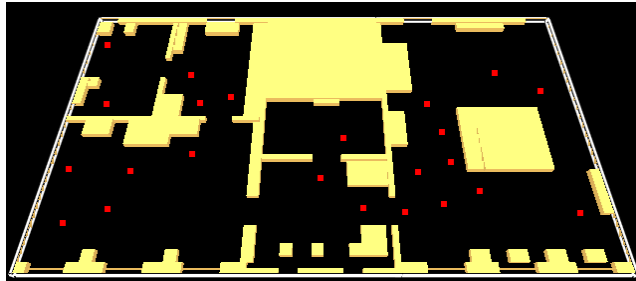
- ihmisten kävelynopeus
- ihmisten dimensio (hartiamitta)

- ihmisten sijoittuminen (eri kerrokset, sijoittuminen kerroksessa)
- ihmisten lukumäärä
- ihmistyyppi (sukupuoli, lapsi/aikuinen).

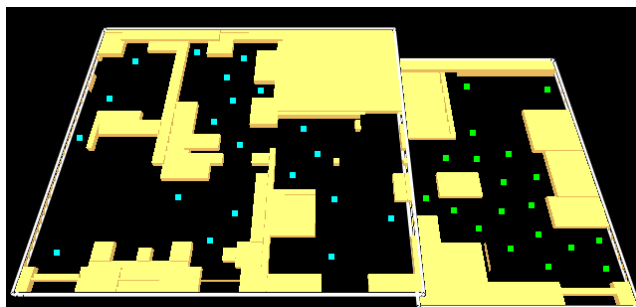
a)



b)



c)



Kuva 41. Yleiskuva FDS+Evac-mallin eri kerroksista: a) 3. kerros, b) 2. kerros ja c) 1. ja 0. kerros. Kuvassa pistemäisinä esitetyt henkilöt on sijoitettu poistumisaikalaskuissa satunnaisesti kohteeseen. Keltaisella värillä esitetään kiinteät objektit, jotka muodostavat fyysisen rakenteellisen esteen poistumiselle.

Kävelynopeutena käytettiin Simulex-ohjelmassa [Thompson & Marchant 1995] käytettävää katkaistua normaalijakaumaa, jossa henkilöiden esteetön liikkumisnopeus voi vaihdella satunnaisesti välillä 0,8...1,7 m/s. Liikkumisnopeutena portaikossa (alaspäin) käytettiin 0,7-kertaista esteetöntä liikkumisnopeutta. Lisäksi kokeiltiin poistumisaikalaskentaa siten, että joukossa oletettiin olevan myös selvästi hitaammin liikkuvia henkilöitä, joiden liikkumisnopeuden jakaumina käytettiin International Maritime Organizationin (IMO) määrittelemiä jakaumia [IMO 2002], joissa hitaammin liikkuvan naishenkilön nopeus saattoi vaihdella satunnaisesti välillä 0,43...0,71 m/s ja hitaammin liikku-

van mieshenkilön nopeus satunnaisesti 0,64...1,06 m/s väliltä. Hitaammin liikkuvien henkilöiden osuuden oletettiin vastaavan em. vanhuksien osuutta eli n. 7 %:a. Ihmisten fyysisinä dimensioina käytettiin niin ikään Simulex-ohjelmassa käytettyjä arvioita eri ihmistyyppien koolle. Kussakin laskussa henkilöt jaettiin satunnaisesti eri kerroksiin (kuva 41).

17. Uhkakuvien analysointi

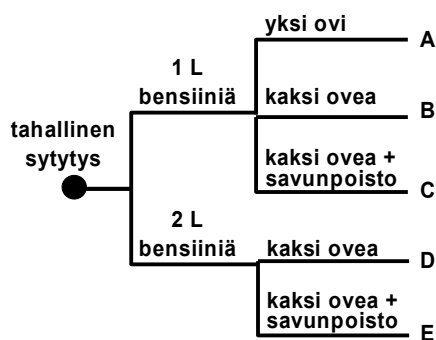
17.1 Tulipalo pohjakerroksen vanhassa vaunuvarastossa

Vanhassa vaunuvarastossa tarkastellaan sytytettävää tuhopolttoa, jossa joku kaataa palavaa nestettä (1–2 litraa bensiiniä) Aleksanterin vaunujen päälle ja sytyttää nesteen.

Syntyvä alkupalo on voimakas (ks. liite B) ja pitää selvästi erottuvaa ääntä. Siksi tässä uhkakuvassa käytetään palon alkamistilassa oleville henkilöille nopeaa palon havaitsemisaikaa (suuruusluokkaa 10 s). Henkilömäärän oletettiin olevan yhden koululuokan suuruusluokkaa eli pari-kolmekymmentä henkilöä.

Tulipalon kehittymisen ja henkilöiden poistumisen suhteen tarkastellaan seuraavia erilaisia vaihtoehtoja:

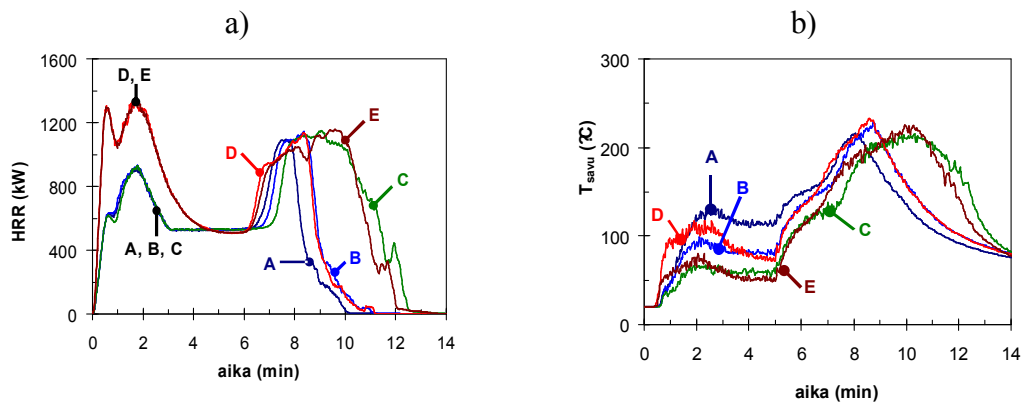
- Alkupalona 1 tai 2 litran suuruinen bensiinimäärä.
- Poistumisreitteinä käytössä joko vain yksi aulatilaan johtava ovi tai kaksi ovea, joista toinen johtaa aulatilaan ja toinen suoraan ulos sisäänkäynnin puoleisella seinustalla. Jälkimmäisessä tapauksessa ovet ovat avoinna 5 minuutin ajan palon syttymishetkestä lähtien, mikä kuvaa ovien aukioloa poistumisen yhteydessä.
- Savunpoiston suhteen tarkastellaan tilannetta, jossa savunpoistoa ei ole käytössä, sekä tilannetta, jossa on käytössä pinta-alaltaan n. 1,35 m²:n suuruinen savunpoistoaukko pohjakerroksen ulosjohtavan oven yläpuolella, joka avautuu automaattisesti savuilmalämpösignaalista.



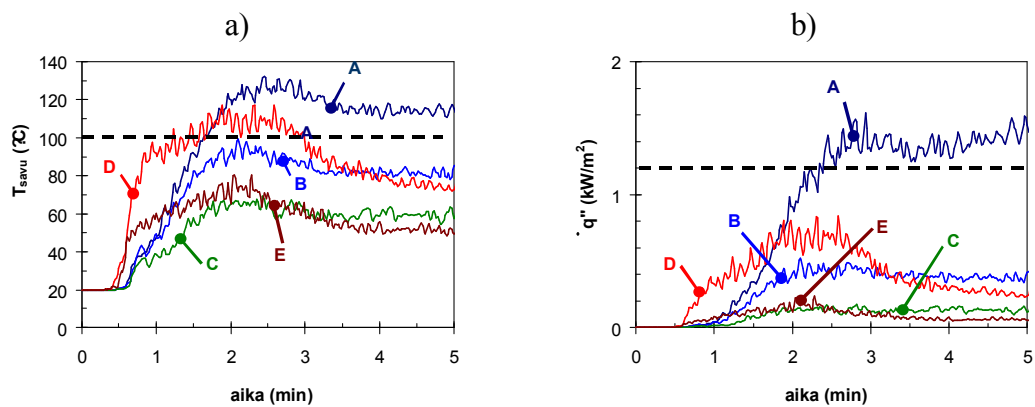
Kuva 42. Tarkastellut vaihtoehdot.

Näitä vaihtoehtoja kombinoimalla saadut vaihtoehdot A–E esitetään kuvassa 42. Palon-simuloinnin ja poistumislaskennan tulokset koskien palon kehittymistä ja riskejä palotilassa esitetään kuvissa 43–47. Palon aiheuttamat vaarat aulatilan kautta tapahtuvalle koko rakennuksen evakuoimiselle ja tulosten tulkinta riskeinä esitetään kuvissa 48–51.

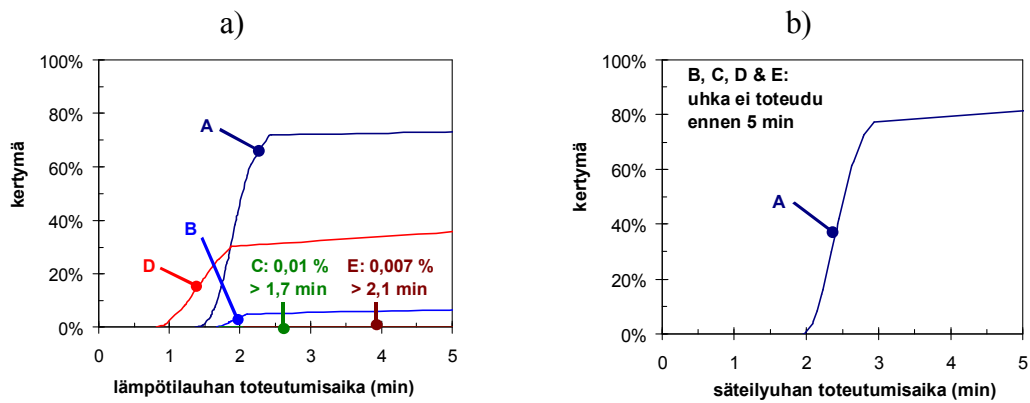
Esitettyjen tulosten merkitys paloturvallisuuden kannalta esitetään taulukossa 10.



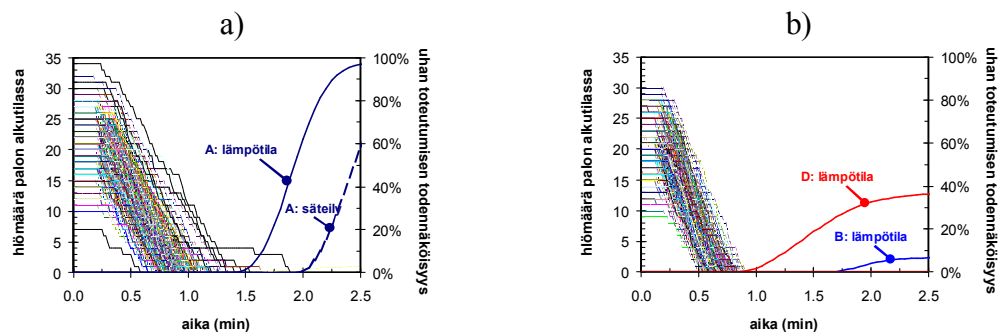
Kuva 43. a) Paloteho ja b) palohuoneen savukerroksen lämpötila eri vaihtoehdoissa.



Kuva 44. Palohuone, a) savukerroksen lämpötila ja b) säteily viiden ensimmäisen minuutin aikana. Savun lämpötila ylittää hyväksymiskriteerin vaihtoehdossa D noin 1,2 minuutin, vaihtoehdossa A noin 1,6 minuutin kuluttua ja vaihtoehdossa B noin 2 minuutin kuluttua palon alkamisesta. Säteilyskriteeri ylittyy vain vaihtoehdossa A runsaan 2 minuutin kuluttua palon alkamisesta.

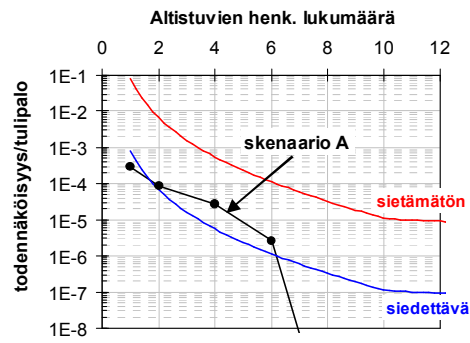


Kuva 45. Palohuone, uhkien toteutumisen todennäköisyysperustainen tarkastelu palon viiden ensimmäisen minuutin aikana: a) savukerroksen lämpötila ja b) säteily.

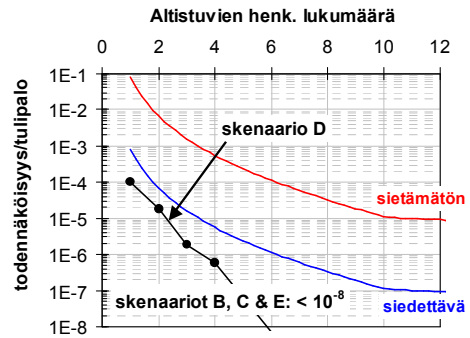


Kuva 46. Palotila: henkilöiden poistuminen ja eri uhkien toteutumisaajat: a) vaihtoehto A (vain yksi ovi käytössä) ja b) vaihtoehdot B, C, D ja E (kaksi ovea käytössä).

a)

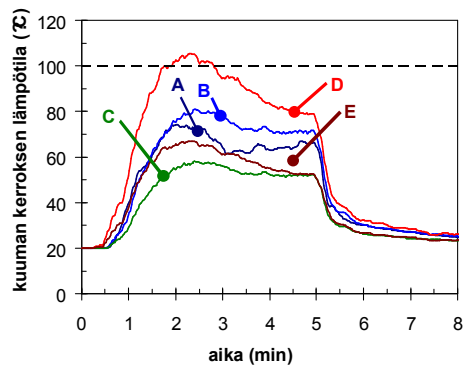


b)

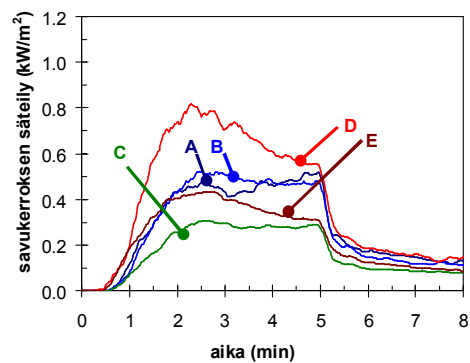


Kuva 47. Palotilan henkilöriskit: a) vaihtoehto A (vain yksi ovi käytössä) ja b) vaihtoehdot B, C, D ja E (kaksi ovea käytössä).

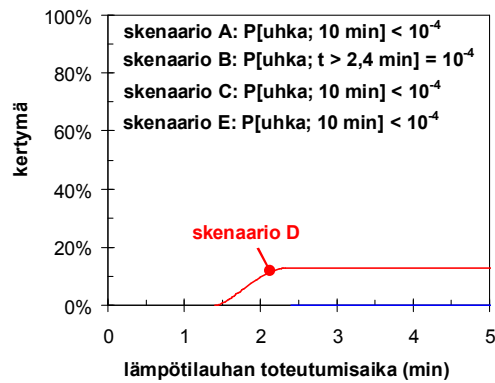
a)



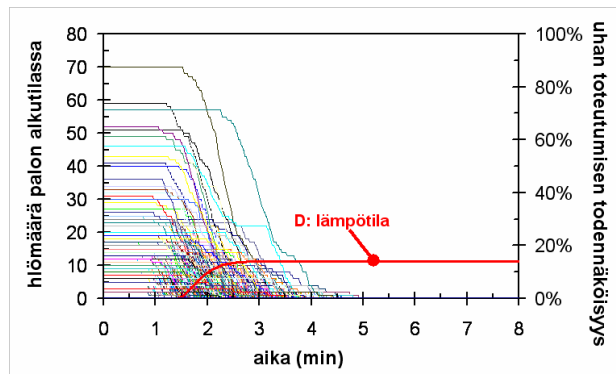
b)



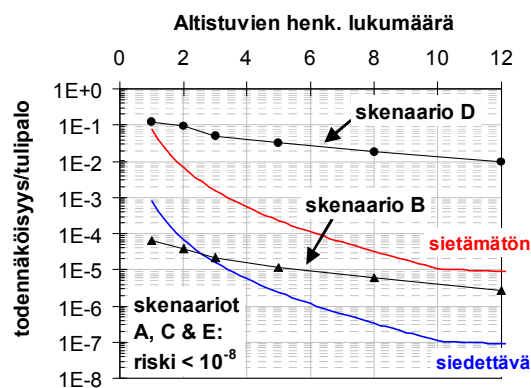
Kuva 48. Aulatila: a) savukerroksen lämpötila ja b) säteily tulipalon 8 ensimmäisen minuutin aikana.



Kuva 49. Aulatila: uhkien toteutumisen todennäköisyysperustainen tarkastelu palon viiden ensimmäisen minuutin aikana.



Kuva 50. Aulatila: kaikkien rakennuksessa olevien henkilöiden poistuminen aulan kautta ja uhan toteutumisen todennäköisyys.



Kuva 51. Aulatilan henkilöriskit.

Taulukko 10. Paloturvallisuus pohjakerroksen vanhassa vaunuvarastossa tulipalon uhkakuvissa.

Henkilöturvallisuus	Esineistön ja rakennuksen turvallisuus
<ul style="list-style-type: none"> Nykytilassa (vaihtoehto A) henkilöturvallisuus ei tämän uhkakuvan suhteen ole täysin kunnossa, koska palon alkamistilasta tapahtuvassa poistumisessa henkilöitä voi altistua heidän poistumistaan uhkaaville korkeille lämpötiloille ja lämpösäteilylle (kuvat 44, 45, 46a ja 47a). Jotta henkilöturvallisuus parantuisi nykytasosta hyväksyttävälle tasolle, on peruskorjauksessa tehtävä hätäpoistumistieksi myös suoraan ulos johtava pohjakerroksen ovi, jonka yläosan ikkunasta tehdään automaattisesti aukeava savutuuletusluukku (vaihtoehdot C ja E): tällöin henkilöturvallisuusriski pienenee niin paljon, että se on nolla laskentatarkkuuden puitteissa. Kun pohjakerroksessa asennetaan automaattisesti aukeava savutuuletusluukku, myös muista tiloista aulan kautta tapahtuvalle poistumiselle ei aiheudu vaaraa: ilman tätä savupoistomahdollisuutta suurikon palavan nesteen määrän polttaminen aiheuttaa merkittävän vaaran aulatilaa kautta poistuville henkilöille (vaihtoehto D, kuvat 50 ja 51), mutta savunpoistoluukku alentaa henkilöturvallisuusriskin laskentatarkkuuden puitteissa nollassa (vaihtoehto E). 	<ul style="list-style-type: none"> Suhteellisen alhaisen palokuorman tiheyden ja korkeutensa vuoksi vanha vaunuhuone ei lieskahda edes tässä käsitellyssä varsin vakavassa tulipalon uhkakuvassa. Siksi palokunnan toiminta on turvattu koko palon noin 15 minuutin pituisen keston ajan. Lisäksi rakennus ja sen esineistö ovat turvassa vakavilta palovahingoilta. Se, että tila ei lieskahda, johtuu sen suurehokosta korkeudesta verrattuna siellä olevan palokuorman määrään ja palavuuteen. Nykytilanteessa, jossa koko rakennus on yhtä palo-osastoa, rakennukseen leviävä savu voi kuitenkin aiheuttaa esineistön nokeentumista. Peruskorjatussa tilanteessa tämä vaara poistuu.

17.2 Informaatiopisteen palo 1. kerroksen sisääntuloaulassa

Koska poistuminen tapahtuu aulatilaa kautta, voi aulatilaa tulipalo aiheuttaa vakavan vaaran poistumiselle. Lisäksi aulatilaa on kooltaan suhteellisen pieni, ja siksi se voi lieskahda, jos siellä on riittävästi riittävän hyvin palavaa palokuormaa.

Aulatilaa tulipalona tarkastellaan informaatiopisteen paloa, joka alkaa roskakorin syttymisestä. Tämän palon kuvauksessa vaihdellaan seuraavia tekijöitä:

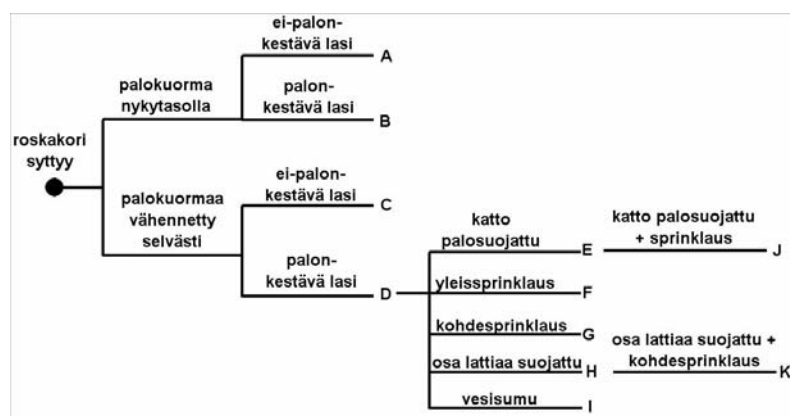
- Informaatiopisteen palokuorman oletetaan olevan nykytasolla tai selvästi sitä pienempi. Kun palokuorma on nykytasolla, alkupalon palotehon oletetaan saavuttavan 100 kW 60 s kuluessa, ja kun palokuorman määrää on olennaisesti pie-

nenetty, alkupalon palotehokäyränä käytetään roskakoripalon palotehokäyrää, jonka huippuarvo on noin 60 kW.

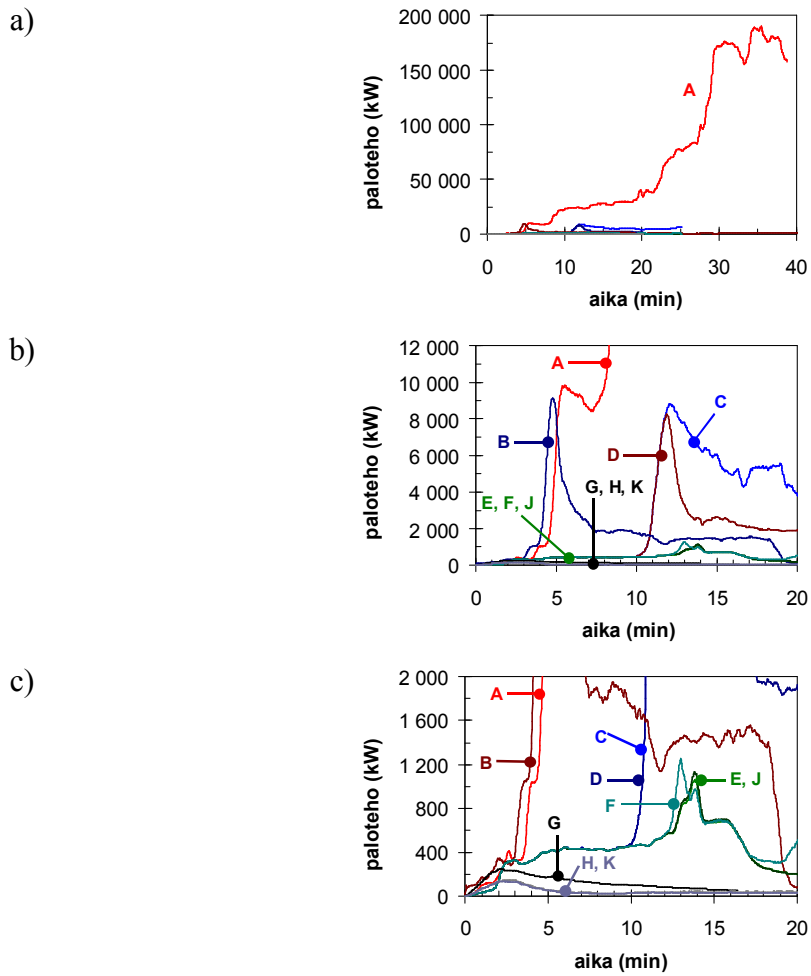
- 1. ja 2. kerroksen välissä olevan portaikon ikkunan (kuva 31) rikkoutumislämpötilana käytetään arvoa 350 °C (jolloin lasitus rikkoutuu kuvaten ei-palonkestävää lasitusta) tai 400 °C (jolloin lasitus ei rikkoudu, mikä kuvaa palonkestävän lasituksen toimintaa).
- Paloturvallisuutta parantavina erityistoimina tarkastellaan seuraavia toimenpiteitä:
 - aulan katon puupinnan käsittely palosuojausmaalilla
 - aulan suojaaminen kahdella koko tilaa suojelevalla sprinklerisuuttimella
 - informaatiopisteen kohdesuojaus sprinklerisuuttimella
 - informaatiopisteen lattian suojaverhoilu palamattomalla tarvikkeella
 - aulan suojaaminen vesisumujärjestelmällä.

Näitä vaihtoehtoja kombinoimalla saadut vaihtoehdot A–K esitetään kuvassa 52. Palon-simulointia sovellettiin muihin tapauksiin, paitsi vesisumulla suojelemiseen, jota varten VTT:lle ei saatu simuloinnissa tarvittavia suuttimien detaljitetietoja. Simulointien ja pois-tumislaskennan tulokset ja niiden tulkinta henkilöriskeinä esitetään kuvissa 53–67.

Esitettyjen tulosten merkitys paloturvallisuuden kannalta esitetään taulukossa 11.

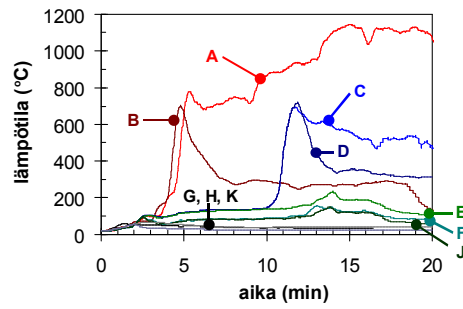


Kuva 52. Tarkastellut vaihtoehdot.

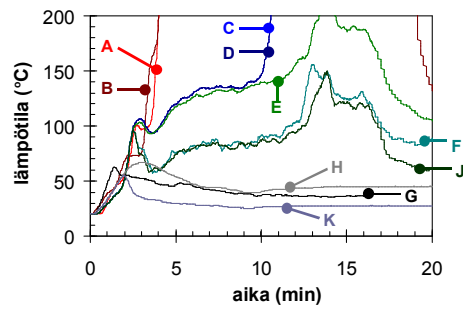


Kuva 53. Paloteho eri uhkakuvissa: a) yleiskuva, joka osoittaa uhkakuvan A palon kehittymisen selvästi muita uhkakuvia voimakkaammaksi, b) tarkempaa pystyasteikkoa käyttäen esitetyt palotehon kuvaajat ja c) tarkin esitys, jossa erottuvat myös uhkakuvien E, F ja H palotehokäyrät.

a)

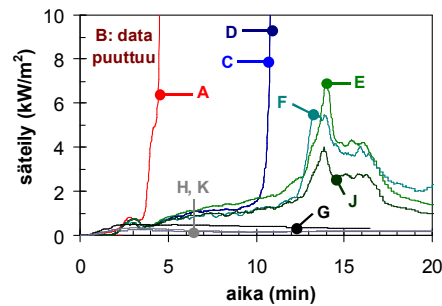


b)

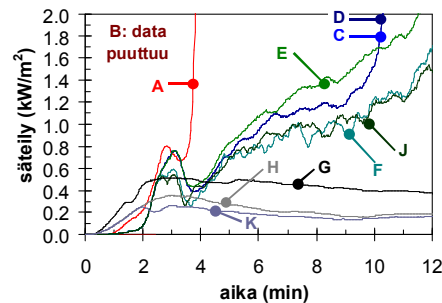


Kuva 54. Savukerroksen lämpötila eri uhkakuvissa: a) yleiskuva ja b) tarkempaa pystyas-
teikkoa käyttäen esitetyt kuvaajat.

a)

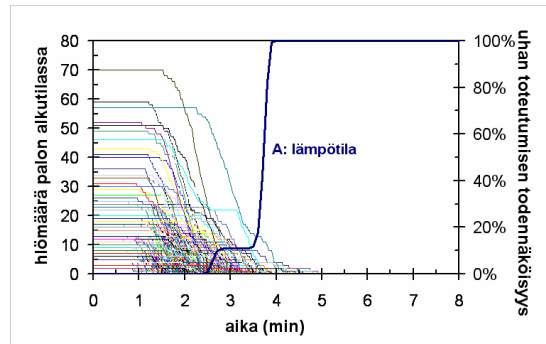


b)

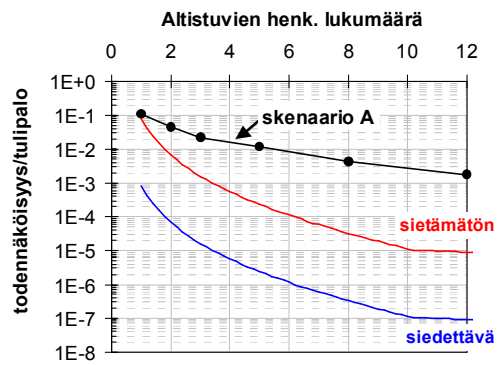


Kuva 55. Savukerroksen säteily eri uhkakuvissa: a) yleiskuva ja b) tarkempaa pystyas-
teikkoa käyttäen esitetyt kuvaajat.

a)

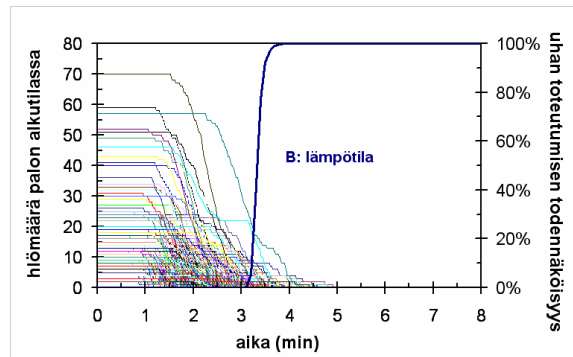


b)

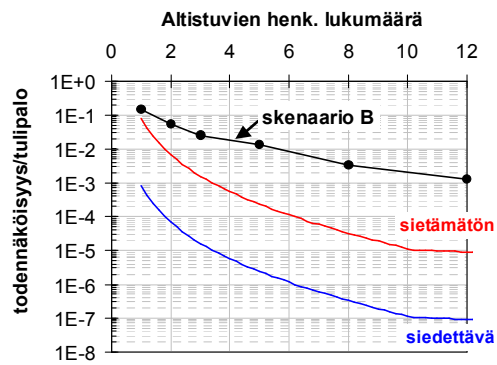


Kuva 56. Uhkakuva A: a) poistuminen ja lämpötilaan liittyvän uhan toteutumisen todennäköisyys (säteilyuhka on oleellisesti samanlainen) ja b) henkilöriski.

a)

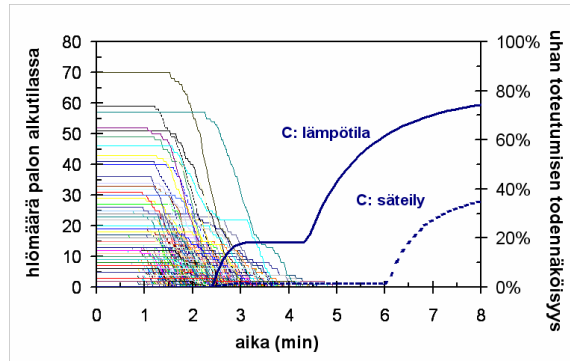


b)

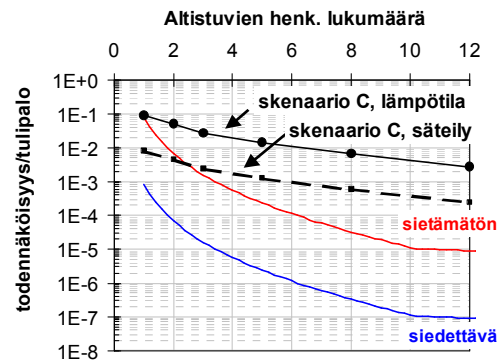


Kuva 57. Uhkakuva B: a) poistuminen ja lämpötilaan liittyvän uhan toteutumisen todennäköisyys (säteilyuhka on oleellisesti samanlainen) ja b) henkilöriski.

a)

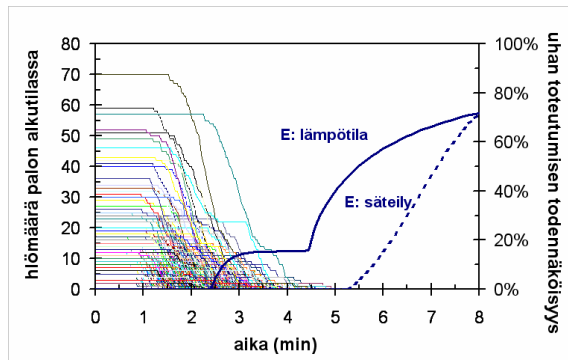


b)

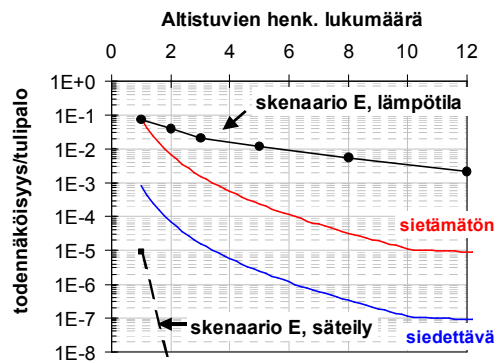


Kuva 58. Uhkakuva C: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski. Uhkakuvaan D liittyvät henkilöriskit ovat olennaisesti samat.

a)

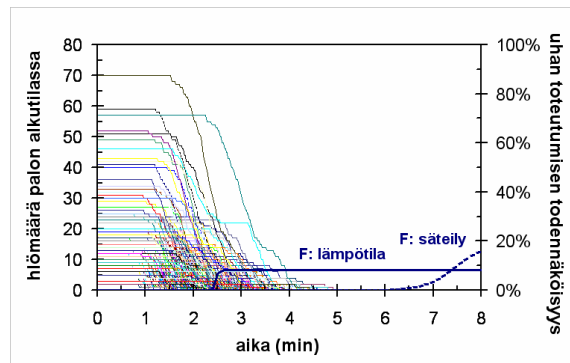


b)

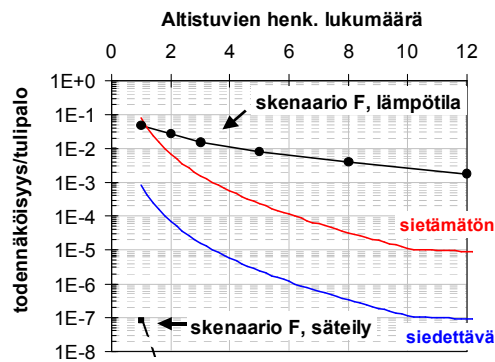


Kuva 59. Uhkakuva E: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski.

a)



b)



Kuva 60. Uhkakuva F: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski.

a)

uhat eivät toteudu

b)

henkilöriskit laskentatarkkuuden puitteissa nolla

Kuva 61. Uhkakuva G: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski.

a)

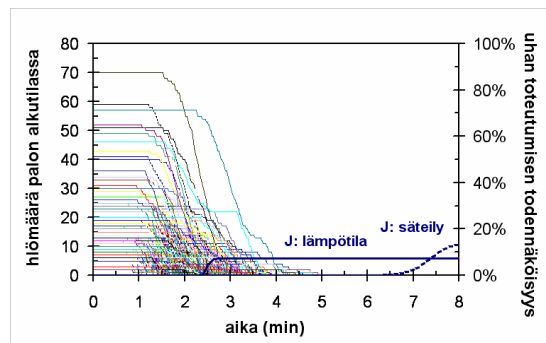
uhat eivät toteudu

b)

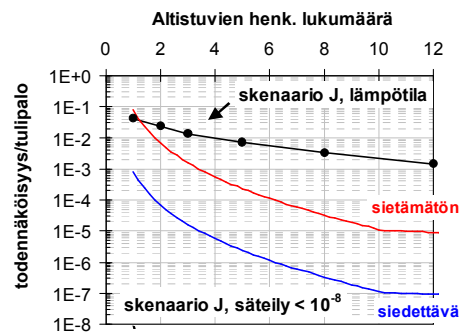
henkilöriskit laskentatarkkuuden puitteissa nolla

Kuva 62. Uhkakuva H: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski.

a)



b)



Kuva 63. Uhkakuva J: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski.

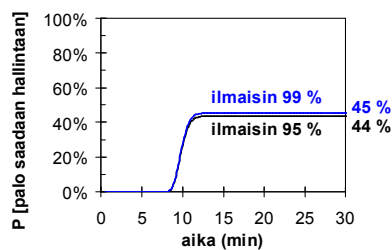
a)

uhat eivät toteudu

b)

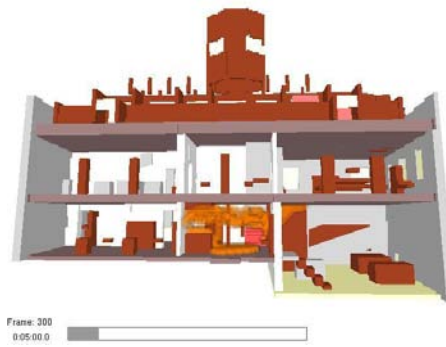
henkilöriskit laskentatarkkuuden puitteissa nolla

Kuva 64. Uhkakuva K: a) poistuminen ja lämpötilaan ja säteilyyn liittyvien uhkien toteutumisen todennäköisyys ja b) henkilöriski.



Kuva 65. Paloskenaario A: ajasta riippuvilla tapahtumapuilla määritetty todennäköisyys sille, että palokunta saa palon hallintaan.

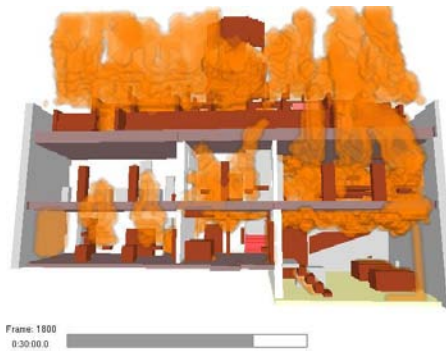
a)



b)

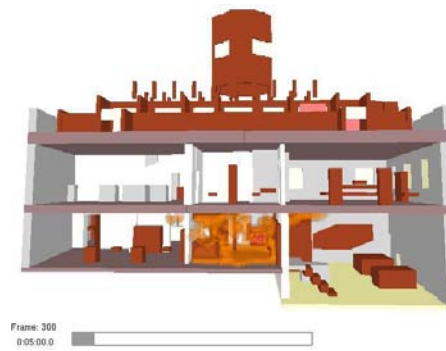


c)

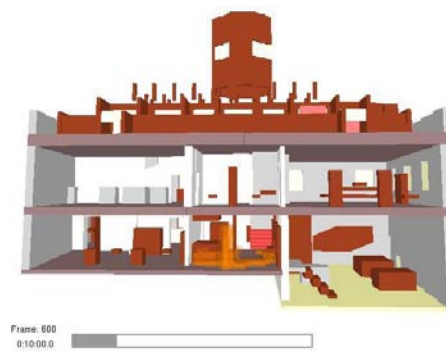


Kuva 66. Palon kehittymisen havainnollistus uhkakuvassa A (nykytilanne): a) 5 minuuttia, b) 10 minuuttia ja c) 30 minuuttia syttymisestä.

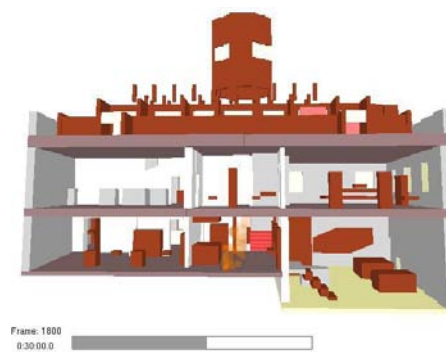
a)



b)



c)



Kuva 67. Palon kehittymisen havainnollistus uhkakuvassa B: a) 5 minuuttia, b) 10 minuuttia ja c) 30 minuuttia syttymisestä.

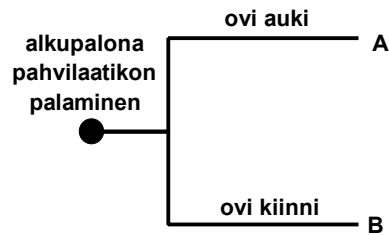
Taulukko 11. Paloturvallisuus aulatilán tulipalon uhkakuivissa.

Henkilöturvallisuus	Esineistön ja rakennuksen turvallisuus
<ul style="list-style-type: none"> • Nykytilassa eli ilman palokuorman vähentämistä ja kun porrashuoneen ikkuna voi rikkoutua sallien läpivedon aulatilán läpi (vaihtoehto A) henkilöriskit ovat selvästi liian korkealla tasolla (kuva 56). • Sama pätee myös skenaariossa B, jossa nykytilaan nähden on tehty se muutos, että porrashuoneen ikkunan rikkoutuminen on estetty (kuva 57). • Kun nykytilaa muutetaan vähentämällä palokuorman määrää (vaihtoehto C), palon voimakkuus alussa pysyy liian suurena henkilöturvallisuudelle (kuva 58). • Kun nykytilaa muutetaan sekä vähentämällä palokuorman määrää että estämällä porrashuoneen ikkunan rikkoutuminen (vaihtoehto D), tilanne on henkilöturvallisuuden suhteen oleellisesti sama kuin vaihtoehto C. • Kun palokuorman määrän vähentämisen ja porrashuoneen ikkunan rikkoutumisen estämisen lisäksi tilán palavuutta vähennetään joko katon palosuojakäsittelyllä (vaihtoehto E) tai tilán yleis-sprinklauksella (vaihtoehto F) tai yhdistämällä nämä kaksi toimenpidettä (vaihtoehto J), vaikutukset näkyvät selvästi pitkään jatkuvassa palossa, mutta palon alussa palaminen on liian voimakasta ja tilanne henkilöturvallisuuden kannalta riittämätön. • Henkilöturvallisuus saadaan parannettua hyvälle tasolle vasta toimenpiteillä, jotka vaikuttavat tehokkaasti palon kehittymiseen sen alkuehkinä. Tässä tarkasteltuja toimenpiteitä ovat syttymiskohdan eli informaationpisteen lattian pinnoitus palamattomalla materiaalilla (vaihtoehto G, kuva 61), informaationpisteen kohdesprinklaus (vaihtoehto H, kuva 62) ja näiden yhdistäminen (vaihtoehto K, kuva 64). Edellytyksenä näille toimenpiteille on kuvassa esitetyn hierarkian mukaisesti aulan palokuorman määrän vähentäminen ja porrashuoneen ikkunan rikkoutumisen estäminen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nykytilassa eli ilman palokuorman vähentämistä ja kun porrashuoneen ikkuna voi rikkoutua sallien läpivedon aulatilán läpi (vaihtoehto A) aulatilá lieskahtaa alle 5 minuutissa palon syttymisestä (kuva 53a), ja koska liekit pääsevät kiertämään särkyneen ikkunan kautta toiseen kerrokseen, palo eskaloituu lopulta koko rakennukseen. Lopputuloksena voi olla esineistön ja rakennuksen tuhoutuminen (palokunnan mahdollisuudet saada palo hallintaan ovat alle 50 %, kuva 65). • Kun nykytilaa muutetaan vähentämällä palokuorman määrää (vaihtoehto B) tai estämällä porrashuoneen ikkunan rikkoutuminen (vaihtoehto C) tai yhdistämällä nämä toimenpiteet (vaihtoehto D), palo ei leviä koko rakennukseen ja palokunta saa palon hallintaansa varsin pian mitä todennäköisimmin (laskennallinen todennäköisyys on 100 %). Palo on hetkellisesti kuitenkin varsin voimakas, mikä aiheuttaa aulatiláan vakavia tulen aiheuttamia vaurioita ja savuvahinkoja muualle rakennukseen. Voimakas lämpörasitus on kuitenkin niin lyhytaikainen, että rakenteiden palonkeston pettäminen ei ole todennäköistä. • Kun rakennuksessa tehdään henkilöturvallisuuden parantamisen vaatimat toimenpiteet eli informaationpisteen lattian pinnoitus palamattomalla materiaalilla (vaihtoehto G), informaationpisteen kohdesprinklaus (vaihtoehto H) tai näiden yhdistäminen (vaihtoehto K), myös esineille ja rakennukselle koituvat vahingot jäävät hyvin pieniksi.

17.3 Toimistohuoneen palo 1. kerroksessa

Ensimmäisen kerroksen suurin palokuorman määrä on henkilökunnan toimistohuoneena toimivassa huoneessa (huone 11). Tämän tilán alkupalo mallinnetaan pahvilaatikon pa-

lona (ks. tekninen liite D) ja palon kehittymisen suhteen tarkastellaan kahta vaihtoehtoa: tilanteita, joissa huoneen ovi on kiinni tai auki (kuva 68).

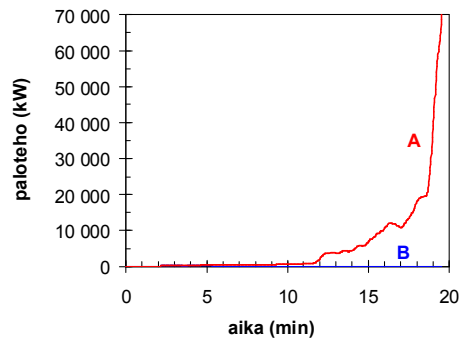


Kuva 68. Tarkastellut vaihtoehdot.

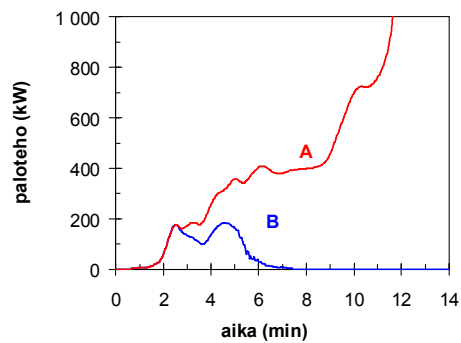
Kuvassa 69 esitetään paloteho ja kuvissa 70 ja 71 palon alkamishuoneen savukerroksen lämpötila ja säteily. Näistä tuloksista nähdään, että palon alkamishuoneessa olosuhteet muodostuvat kriittisiksi runsaan 2 minuutin kuluttua palon alkamisesta. Koska tila on pieni eikä siellä oleskele useita henkilöitä, tämä aika on riittävä palon havaitsemiseen, havaintoon reagointiin ja tilan tyhjentymiseen.

Kuvissa 72 ja 73 esitetään aulatilán savukerroksen lämpötila ja säteily huoneen 11 pallossa. Kun huoneen 11 ovi on suljettu (vaihtoehto B), aulatilaa ei luonnollisestikaan kulkeudu savua eikä kuumia kaasuja, kun taas vaihtoehdossa A palo leviää aulatilaa. Tämä tapahtuu yli 10 minuutin viiveellä palon syttymisestä, ja siksi se ei aiheuta vaaraa poistumiselle. Pelastushenkilöstön toiminnalle palon leviäminen kuitenkin aiheuttaa selvän uhan, mikä puolestaan voi johtaa siihen, että palo pääsee leviämään edelleen. Siksi vaihtoehdossa A toimistohuoneen palo voi pahimmillaan johtaa suhteettomaan vakaviin seurauksiin, eikä sitä voida pitää hyväksyttävänä.

a)

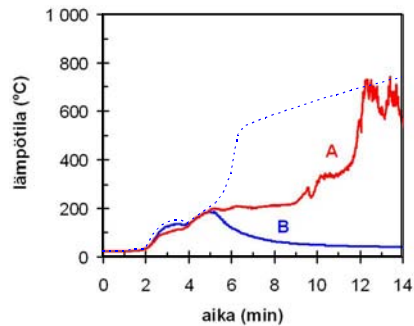


b)

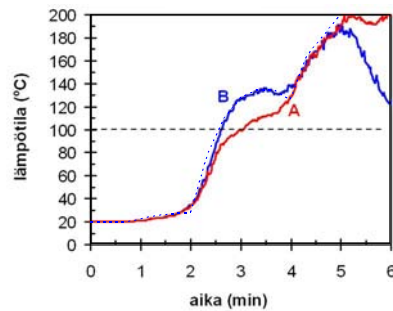


Kuva 69. Paloteho: a) yleiskuva, joka osoittaa uhkakuvan A palon kehittymisen selvästi vaihtoehtoa B voimakkaammaksi, ja b) tarkempaa pystyasteikkoa käyttäen esitetyt kuvaajat.

a)

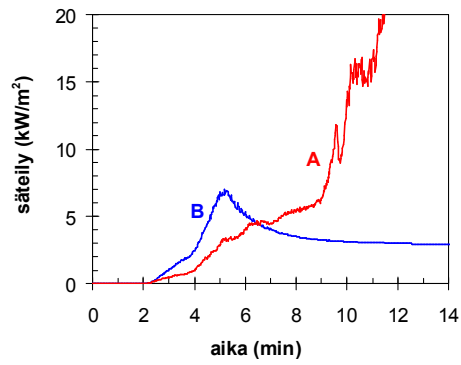


b)

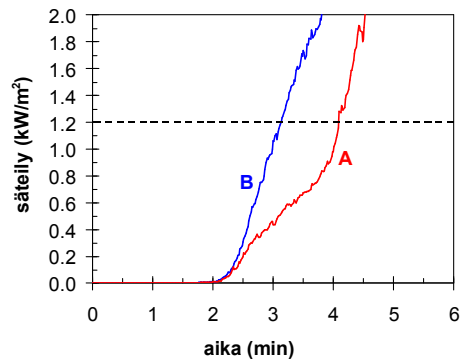


Kuva 70. Palon alkamishuone, savukerroksen lämpötilä: a) yleiskuva ja b) tarkempia asteikkoja käyttäen esitetyt kuvaajat. Katkoviiva esittää sitä epätodennäköistä tilannetta, jossa tilan ikkuna särkyy palossa.

a)

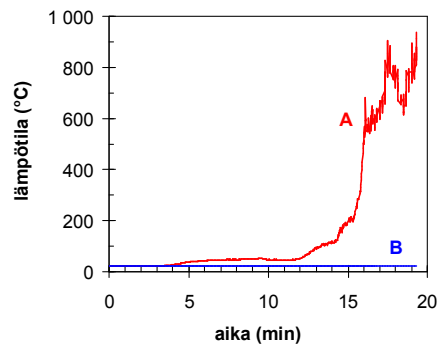


b)

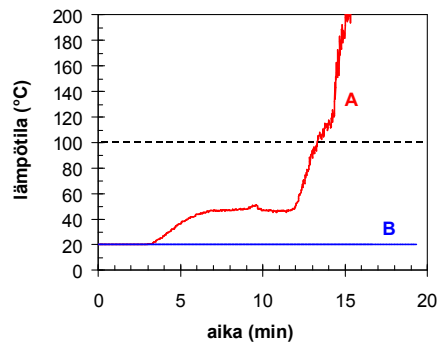


Kuva 71. Palon alkamishuone, savukerroksen säteily: a) yleiskuva ja b) tarkempia asteikkoja käyttäen esitetyt kuvaajat.

a)

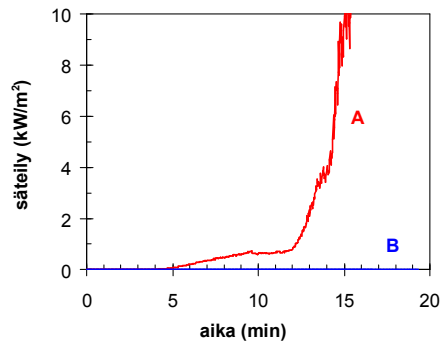


b)

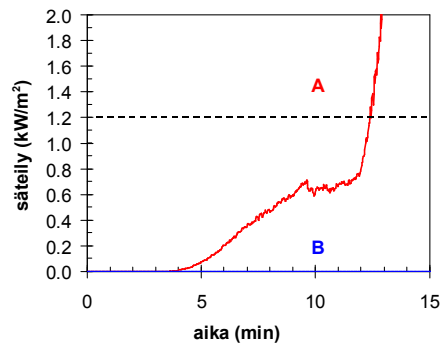


Kuva 72. Aula, savukerroksen lämpötilä: a) yleiskuva ja b) tarkempia asteikkoja käyttäen esitetyt kuvaajat.

a)



b)



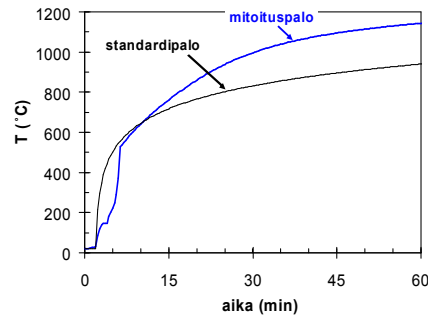
Kuva 73. Aula, savukerroksen säteily: a) yleiskuva ja b) tarkempia asteikkoja käyttäen esitetyt kuvaajat.

Sekä rakennuksen että henkilöturvallisuuden kannalta toimistohuoneen oven tulee olla itsestään sulkeutuva palo-ovi, jolloin mahdollinen tulipalo ei leviä muualle rakennukseen, vaan tukahtuu todennäköisesti hapenpuutteeseen.

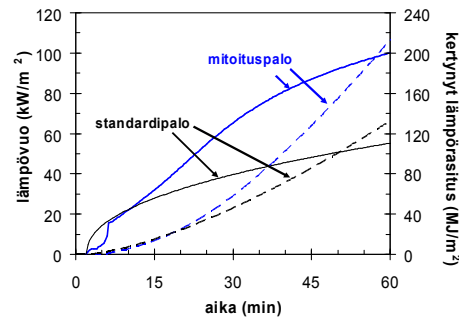
Mitoituspalo voi tuottaa uhan palo-oven palonkestolle tapauksessa, jossa tilan ikkuna rikkoutuu. Tätä tilannetta tarkastellaan kuvassa 74, josta nähdään, että palorasitus⁶ mitoituspalossa on alussa pienempi kuin standardipalossa, mutta ylittää standardipalorasituksen noin 10 minuutin palon jälkeen. Vertaamalla tiettyyn aikaan mennessä kertyneitä lämpömääräarvoja nähdään, että ne ovat likimain samat noin 30 minuuttiin asti. Jos palo-oveksi valitaan EI30-luokiteltu tuote, se siis kestää mitoituspaloa noin puoli tuntia, mikä antaa riittävän turvan henkilöille ja omaisuudelle.

⁶ Lämpörasitusta arvioidaan määrällisesti käyttäen arvoa $25 \cdot (T - T_0) + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (T^4 - T_0^4)$ kW/m².

a)



b)



Kuva 74. Tilanne, jossa ikkuna rikkoutuu, mitoituspalon ja standardipalon vertailu: a) lämpötila sekä b) lämpövuoto (yhtenäinen viiva ja kertynyt lämpömäärä (katkoviiva)).

17.4 Tietokoneiden ja tietokonepöydän palo 2. kerroksessa

Tietokonepöydän paloskenaariossa pöydän oletettiin syttyvän roskakorin palosta suuressa, myös kokoontumistilana käytetyssä huoneessa (huone 26).

Palon mallintaminen tehtiin kahdessa vaiheessa siten, että ensin selvitettiin tietokoneiden ja niiden pöydän palamisen voimakkuus (paloteho) mallintamalla näiden palaminen erillisenä tapahtumana käyttäen tiheää laskentahilaa. Toisessa vaiheessa näin saatua palotehon aikariippuvuutta käytettiin syötetietona varsinaisessa Porvoon museota käsitävässä mallissa. Tarkastellut tapaukset ovat seuraavat:

- Perustapauksena on tilanne, jossa tietokoneiden ja niiden pöydän maksimipaloteho on n. 400 kW.
- Herkkyysanalyysinä tarkastellaan tilannetta, jossa FDS-ohjelman syöttötietona annettu paloteho kaksinkertaistettiin.

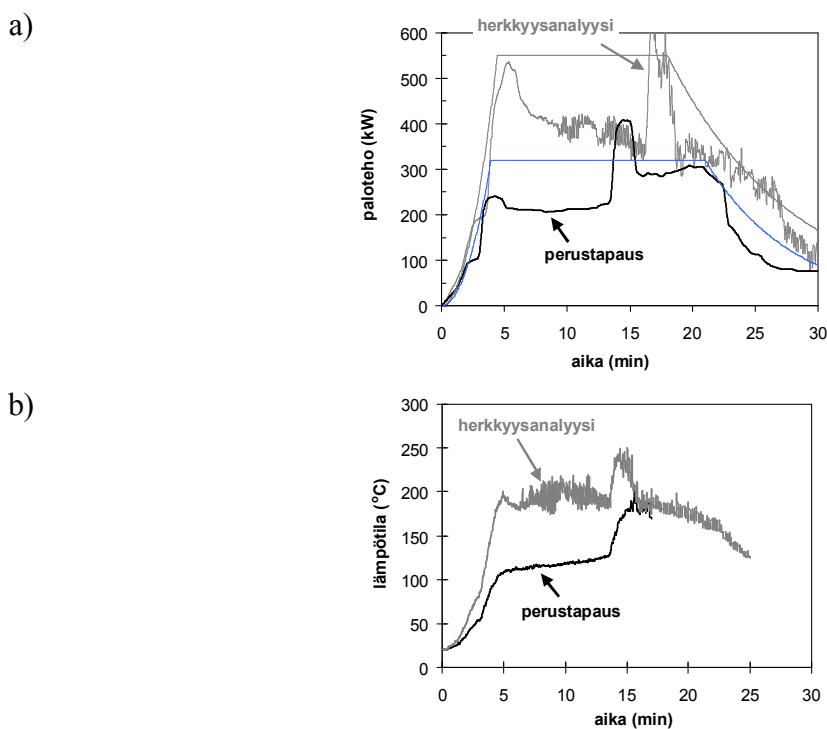
Näiden tapausten palotehokäyrät ja kuumen savukerroksen lämpötilat esitetään kuvassa 75.

Kuvassa 76 esitetään palohuoneen (huone 26) olosuhteet henkilöturvallisuudelle koituvien uhkien kannalta. Näiden uhkien toteutumisaikaa verrataan palohuoneesta poistumiseen tarvittavaan aikaan kuvassa 77.

Kuvassa 78 esitetään palohuoneen viereisen huoneen (huone 24) ja kuvassa 79 portaikkoon johtavan huoneen (huone 25) säteily- ja lämpötila-arvot. Näiden uhkien toteutumisesta verrataan 2. kerroksen poistumisaikalaskelmien tuloksiin kuvassa 80.

Tulokset osoittavat, että tietokoneiden ja niiden pöytien tulipalo 2. kerroksen huoneessa 26 ei muodosta uhkaa henkilöturvallisuudelle:

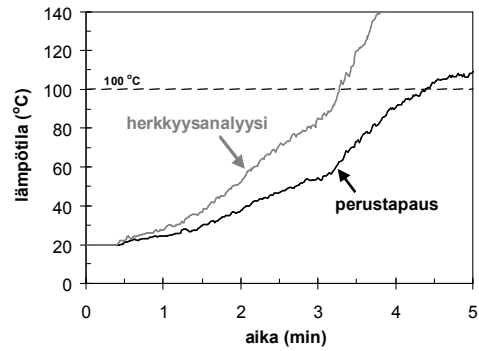
- Poistuminen palohuoneesta tapahtuu selvästi nopeammin kuin palon aiheuttamien uhkien toteutuminen.
- Olosuhteet palon viereisessä huoneessa ja porrashuoneeseen johtavassa tilassa pysyvät siedettävänä selvästi pidempään kuin 2. kerroksessa on henkilöitä poistumisen aikana.



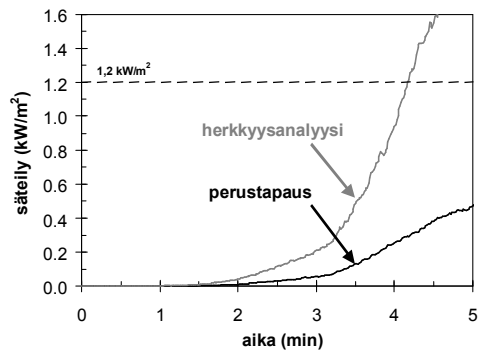
Kuva 75. Tietokonepöydän tulipalo: a) paloteho⁷ ja b) kuuman savukerroksen lämpötila palohuoneessa.

⁷ Ohuella viivalla esitetyt käyrät on laskettu käyttäen ns. palotehon t^2 -mallia, jonka parametrit ovat seuraavat: perustapauksessa kasvuaika $t_g = 720$ s, maksimipaloteho 320 kW, hiipumisvaiheen alku 21 minuuttia ja hiipumisaikavakio 7 min; herkkyytstarkastelussa kasvuaika $t_g = 360$ s, maksimipaloteho 550 kW, hiipumisvaiheen alku 18 minuuttia ja hiipumisaikavakio 10 min.

a)

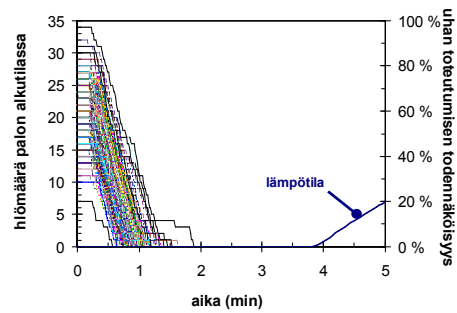


b)

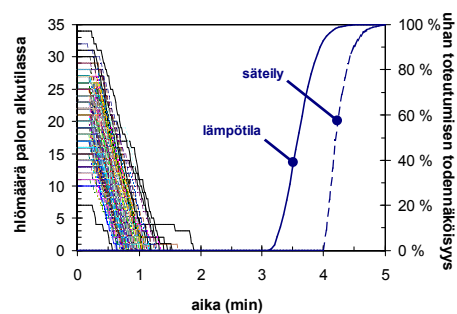


Kuva 76. Palohuoneen (huone 26) olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.

a)

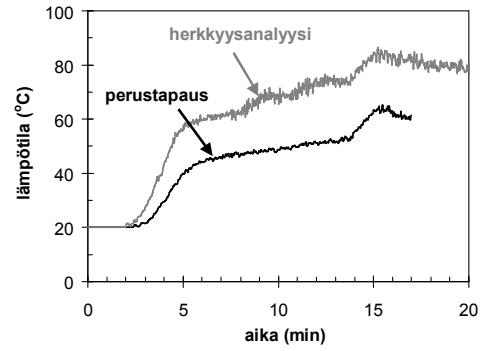


b)

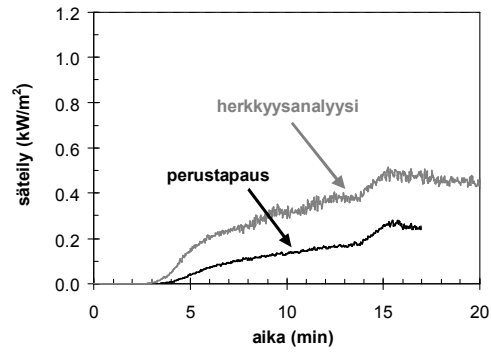


Kuva 77. Palohuoneen henkilövaarojen arviointi vertaamalla poistumiseen tarvittavaa aikaa ja uhkien toteutumisaikoja: a) perustapaus ja b) herkkyysanalyysi.

a)

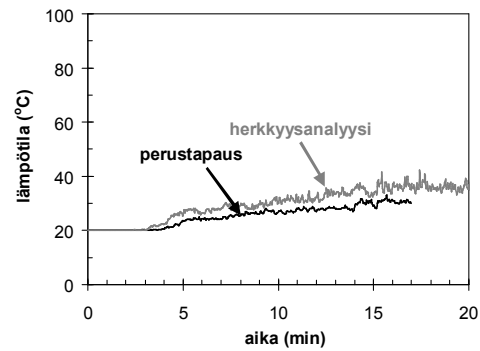


b)

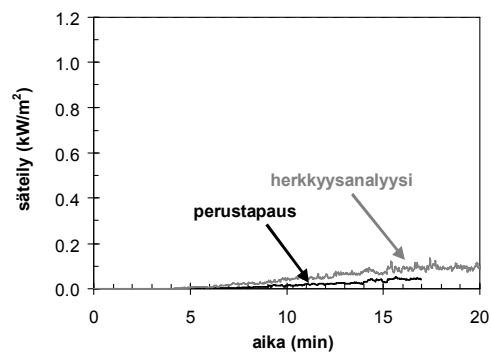


Kuva 78. Palohuoneen viereisen huoneen (huone 24) olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.

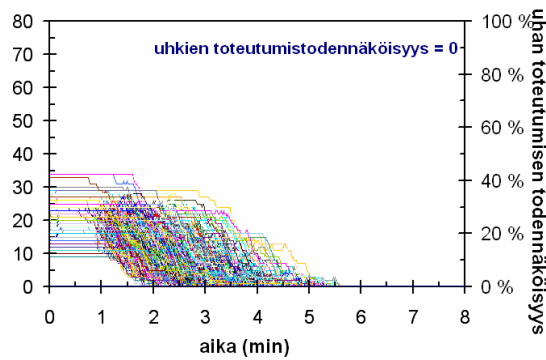
a)



b)



Kuva 79. Palohuoneesta porrashuoneeseen johtavan tilan (huone 25) olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.



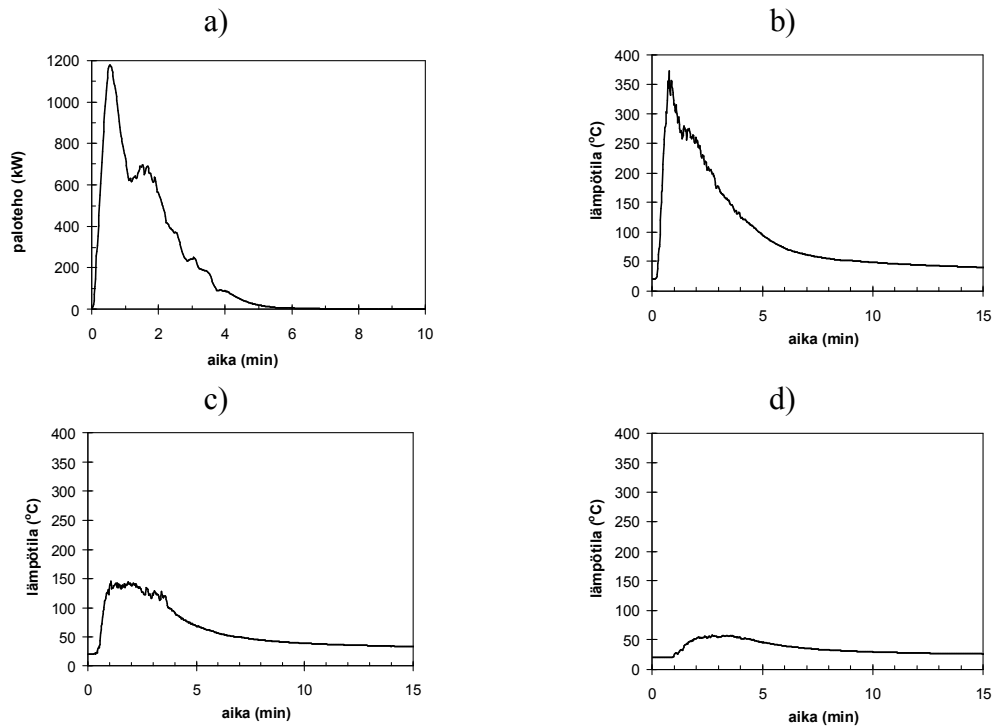
Kuva 80. Poistumisaikalaskelmien tulokset 2. kerroksen osalta.

17.5 Palavalla nesteellä sytytettävä tuhopoltto 2. kerroksen puuesineistöä sisältävässä huoneessa

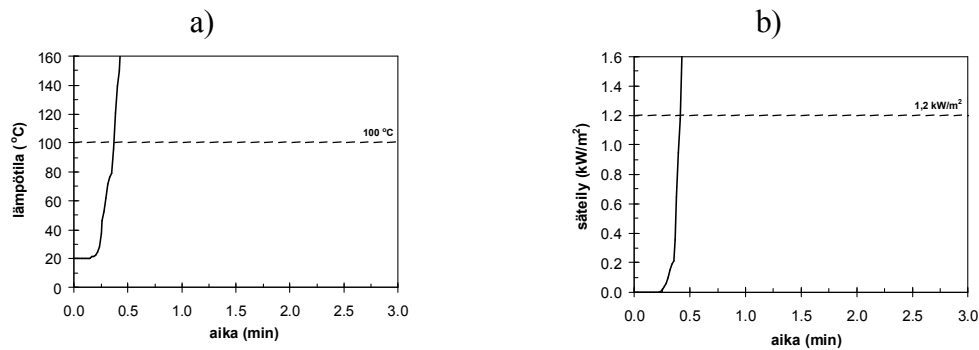
Tuhopolttopaukukseksi valittiin 2. kerroksen huone 21, johon on aseteltu näytteille vanhoja puisia käsityöpenkkejä ja hyllyjä. Uhkakuvana on 2 litran suuruisen bensiinimäärän sytyttäminen lattialla näyttelyesineiden alla.

Mitoituspalon paloteho ja kuuman savukerroksen lämpötila palohuoneessa esitetään kuvassa 81. Lisäksi esitetään palohuoneen viereisen huoneen (huone 23) ja sitä seuraavan huoneen (huone 22) lämpötilat.

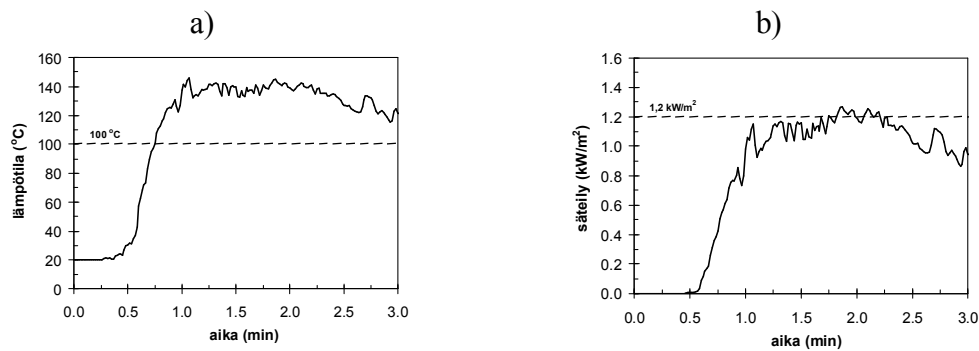
Eri huoneiden olosuhteet eli lämpötila ja lämpösäteily esitetään poistumisturvallisuuden kannalta katsottuna kuvissa 82 (palohuone), 83 (huone 23), 84 (huone 22) ja 85 (huoneen 25 eli porrashuoneeseen johtava huone). Huoneen 23 henkilöturvallisuuden tarkempi arviointi esitetään kuvassa 86.



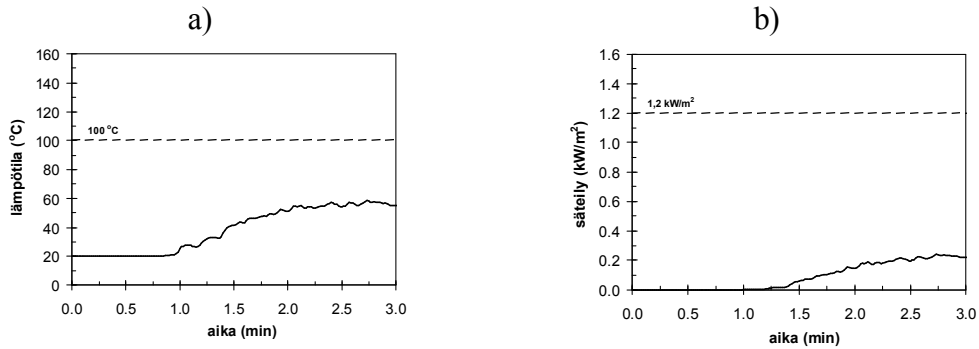
Kuva 81. Huoneen 21 tuhopoltto: a) paloteho, b) savukerroksen lämpötila huoneessa 21, c) savukerroksen lämpötila huoneessa 23 (palohuoneen viereinen huone) ja d) savukerroksen lämpötila huoneessa 22 (huoneen 23 viereinen huone).



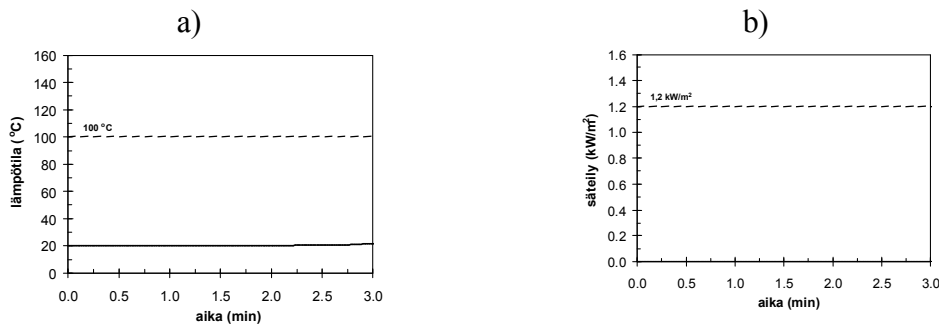
Kuva 82. Palohuoneen (huone 21) olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.



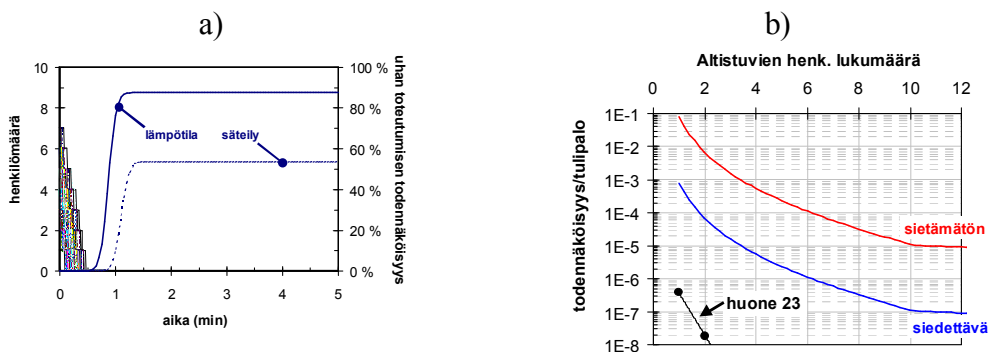
Kuva 83. Palohuoneen viereisen huoneen (huone 23) olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.



Kuva 84. Huone 22 olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.



Kuva 85. Huone 25 olosuhteet: a) lämpötila- ja b) säteilyarvot.



Kuva 86. Palohuoneen viereisen huoneen (huone 23) henkilöturvallisuuden arviointi: a) henkilömäärä ja uhkatekijät ja b) henkilöriski.

Paloturvallisuuden suhteen tulokset voidaan tulkita seuraavasti:

- Palohuoneessa kuumuus nousee hyvin nopeasti henkilöturvallisuuden kannalta sietämättömäksi. Tila on kuitenkin hyvin pieni, ja siksi siellä ei palon syyttäjän ja hänen mahdollisten apureittensa lisäksi ole muita ihmisiä (jos olisi, tuhotyötä ei tehtäisi). Tuhotyön tekijä tai tekijät kyllä ehtivät palon alta pois, ellei kyseessä ole itsetuhoinen teko.

- Alkupallo on voimakas, mutta se hiipuu nopeasti eikä aiheuta puuesineistön itseään ylläpitävää syttymistä: omaisuudelle palon alkamishuoneessa koitua vahinko on syttymiskohdassa pinnallista hiiltymistä ja muualla nokeentumista.
- Palohuoneen viereisessä huoneessa (huone 23) savukerroksen lämpötila nousee hetkellisesti noin 150 °C:seen, mikä ei aiheuta siellä olevan esineistön syttymistä. Omaisuusvahingot jäävät siten nokeentumiseen. Kuvassa 66 esitettävä analyysi osoittaa, että myös henkilöriskit ovat siedettävän alhaiset.
- Huoneessa 22 ja muissa tiloissa savukerroksen lämpötila ja säteily ovat niin alhaiset, että ne eivät aiheuta vaaraa henkilöille tai omaisuudelle.

17.6 Sähkölaitepalo 3. kerroksessa yläpohjan onteloon johtavissa portaissa

Porvoon Vanhan raatihuoneen 3. kerroksessa voi syntyä poistumisen kannalta vaarallinen tilanne, koska tilasta johtaa vain yksi poistumistie – avonainen portaikko alempiin kerroksiin. Tilassa on myös varatieksi merkitty pelastautumisreitti ikkunan ja tikkaiden kautta ulos. Esim. iäkkäiden ihmisten ei kuitenkaan voida olettaa käyttävän tätä reittiä. Peruskorjatussa tilanteessa portaikko on osastoitu omaksi palo-osastoksi, jolloin esimerkiksi alapuolisten kerrosten tulipalon leviäminen portaikon kautta 3. kerrokseen estyy.

Tässä luvussa käsitellään tulipalon uhkakuva, jossa palo syttyy radionauhurista 3. kerroksesta yläpohjan onteloon johtavien portaiden alla. Uhkakuvan eri variaatiot S1–S7 esitetään taulukossa 12:

- Variaatio A vastaa rakennuksen nykytilaa, jossa 3. kerroksessa on käytetty paloon osallistuvia materiaaleja ja osastointi on riittämätön estämään tulipalon aiheuttaman voimakkaan virtauksen 3. kerroksen läpi rakennuksen porraskäytävästä yläpohjaan ja siellä olevien aukkojen (esim. kellotornin ikkunat) kautta edelleen ulos (hormi-ilmio).
- Variaatiossa B osastointia on parannettu siten, että hormi-ilmio on estetty.
- Variaatiossa C 3. kerroksen katto on tehty paloon hyvin rajallisesti osallistuvasta materiaalista (esim. kipsilevystä).
- Variaatiossa D sekä 3. kerroksen katto että seinät on tehty paloon hyvin rajallisesti osallistuvasta materiaalista (esim. kipsilevystä).

Taulukko 12. 3. kerroksen yläpohjan onteloon johtavien portaiden alla sijaitsevan tulipalon eri variaatiot.

Skenaario	Osastointi	Rakennusmateriaalit	Alkupallo
A	avoin: hormi-ilmiö mahdollinen	rakennusmateriaalit nykytilassaan	todennäköinen ^{a)}
A – herkkyyss-tarkastelu	avoin: hormi-ilmiö mahdollinen	rakennusmateriaalit nykytilassaan	voimakas ^{b)}
B	suljettu: hormi-ilmiö estetty	rakennusmateriaalit nykytilassaan	todennäköinen ^{a)}
B – herkkyyss-tarkastelu	suljettu: hormi-ilmiö estetty	palosimuloinnin puumateriaalia muunneltu	todennäköinen ^{a)}
C	suljettu: hormi-ilmiö estetty	3. kerroksen kattona palamaton levy (kipsilevy)	todennäköinen ^{a)}
C – herkkyyss-tarkastelu	suljettu: hormi-ilmiö estetty	3. kerroksen kattona kipsilevyeriste ja palosimuloinnin puumateriaalia muunneltu	todennäköinen ^{a)}
D	suljettu: hormi-ilmiö estetty	3. kerroksen katto sekä seinät palamatonta levyä (kipsilevy)	todennäköinen ^{a)}

a) Alkupalon maksimipaloteho 50 kW ja siihen kuluva aika 120 s.

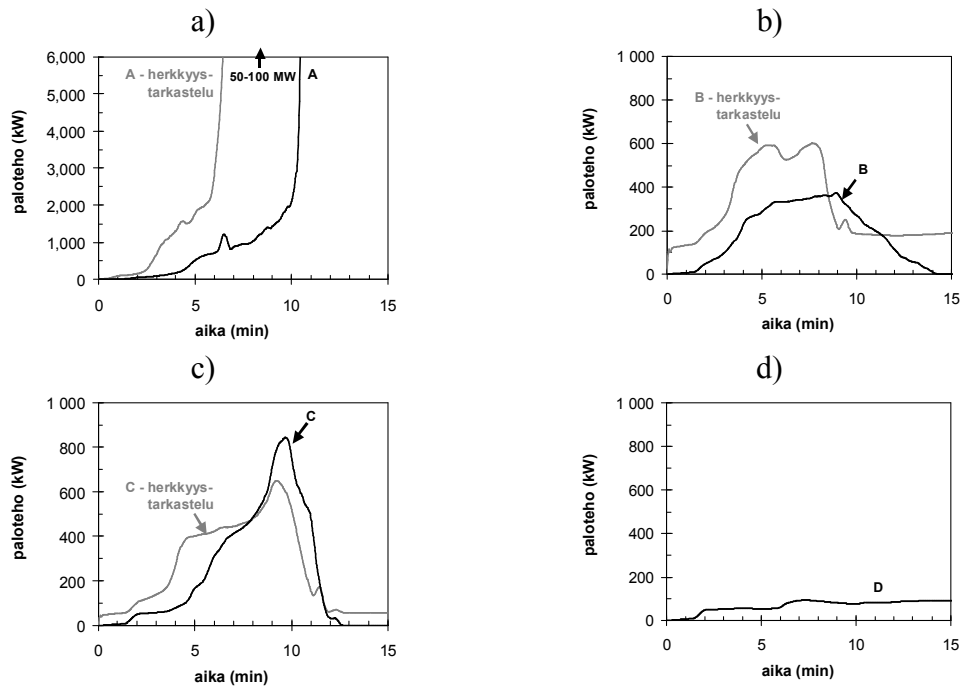
b) Alkupalon maksimipaloteho 100 kW ja siihen kuluva aika 60 s.

Kuvissa 87, 88 ja 89 esitetään näiden eri skenaarioiden paloteho-, säteily- ja lämpötilakuvaajat. Näiden tuloksien perusteella määritetyt lämpötilaan ja lämpösäteilyyn liittyvät uhat henkilöturvallisuudelle esitetään kuvassa 90.

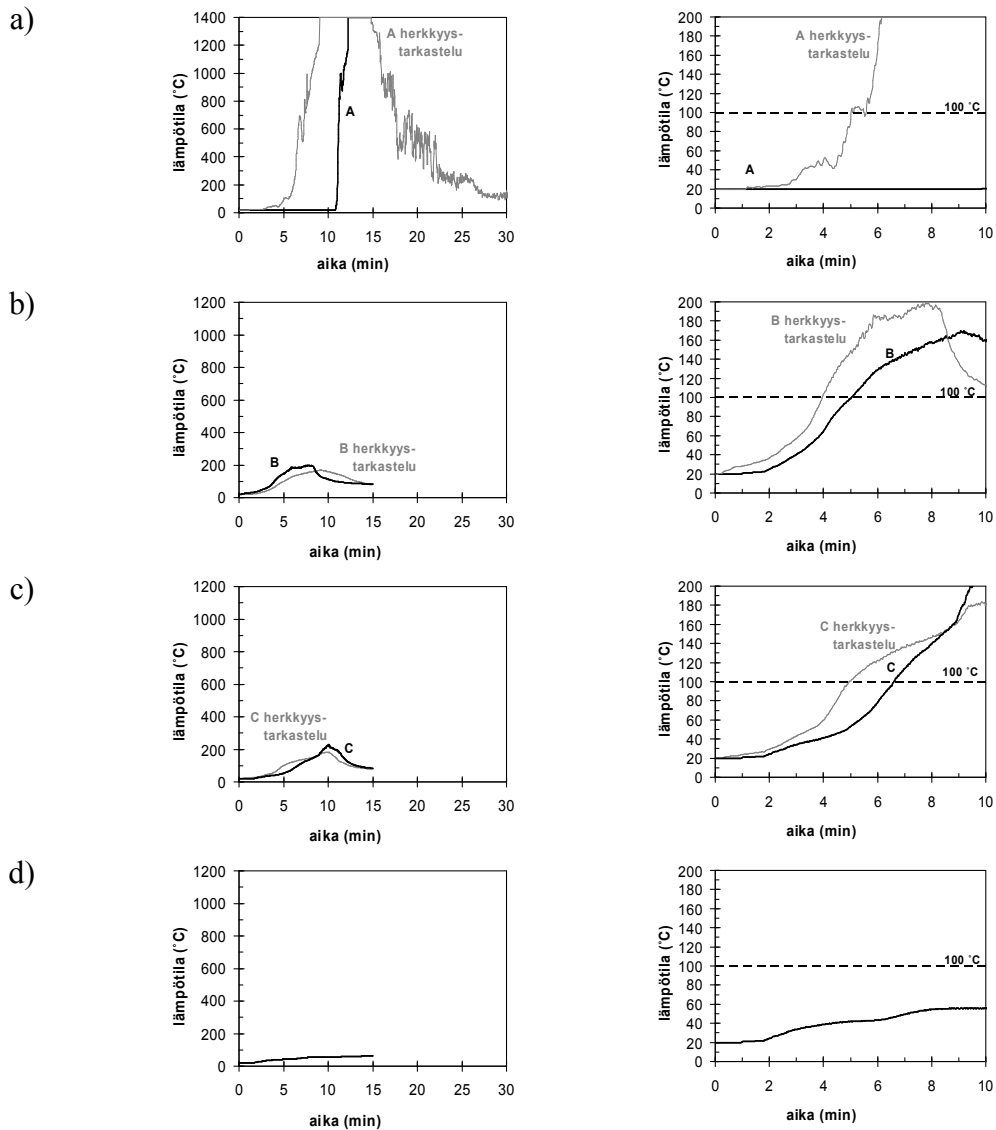
Uhkia koskevista tuloksista nähdään, että lämpötilaan liittyvä uhka on säteilyä vakavampi: se toteutuu aikaisemmin, ja jatkossa tarkastellaan vain tätä uhkaa.

Poistumisaikalaskelmien tulokset ja niiden analysointia esitetään kuvassa 91: kuvissa 91b ja 91c esitetyistä evakuoititodennäköisyyksistä havaitaan, että todennäköisyys, että kerroksessa voi olla ihmisiä, laskee alle yhden miljoonasosan runsaassa 7 minuutissa. Vertaamalla tätä aikaa lämpötilaan liittyvien uhkien toteutumistodennäköisyyksiin nähdään, että henkilöriskit ovat nolasta poikkeavia skenaarioissa B ja C sekä niiden herkkyyss-tarkasteluskenaarioissa samoin kuin skenaarion A herkkyyss-tarkasteluskenaariossa. Skenaariossa D henkilöriskit voidaan suoraan todeta merkityksettömän pieniksi. Kuva 92 osoittaa, että rakennukseen lisätty kierreporras ei olennaisesti vaikuttaisi 3. kerroksen poistumisaikoihin.

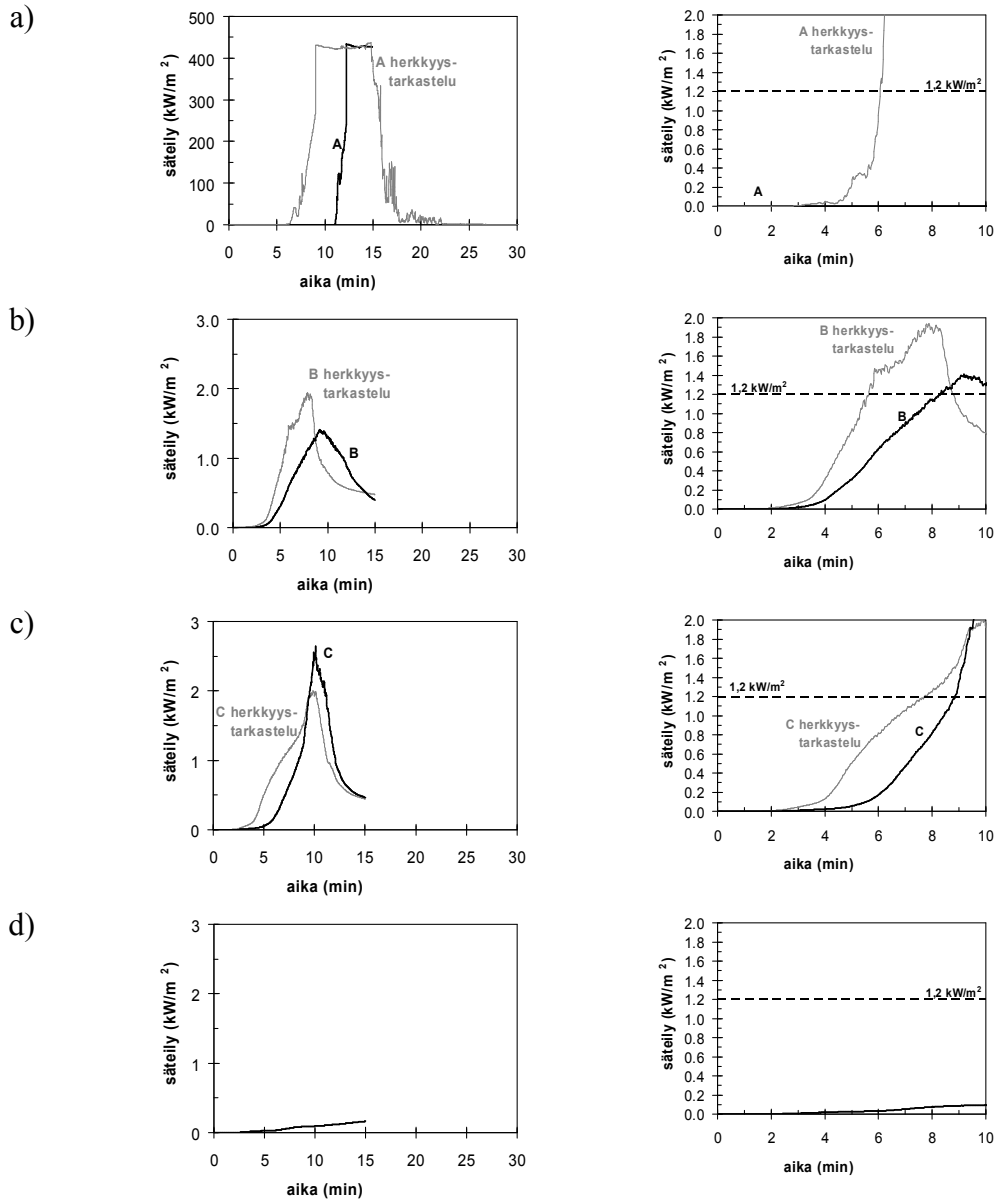
Esitettyjen tulosten merkitys paloturvallisuudelle esitetään taulukossa 13.



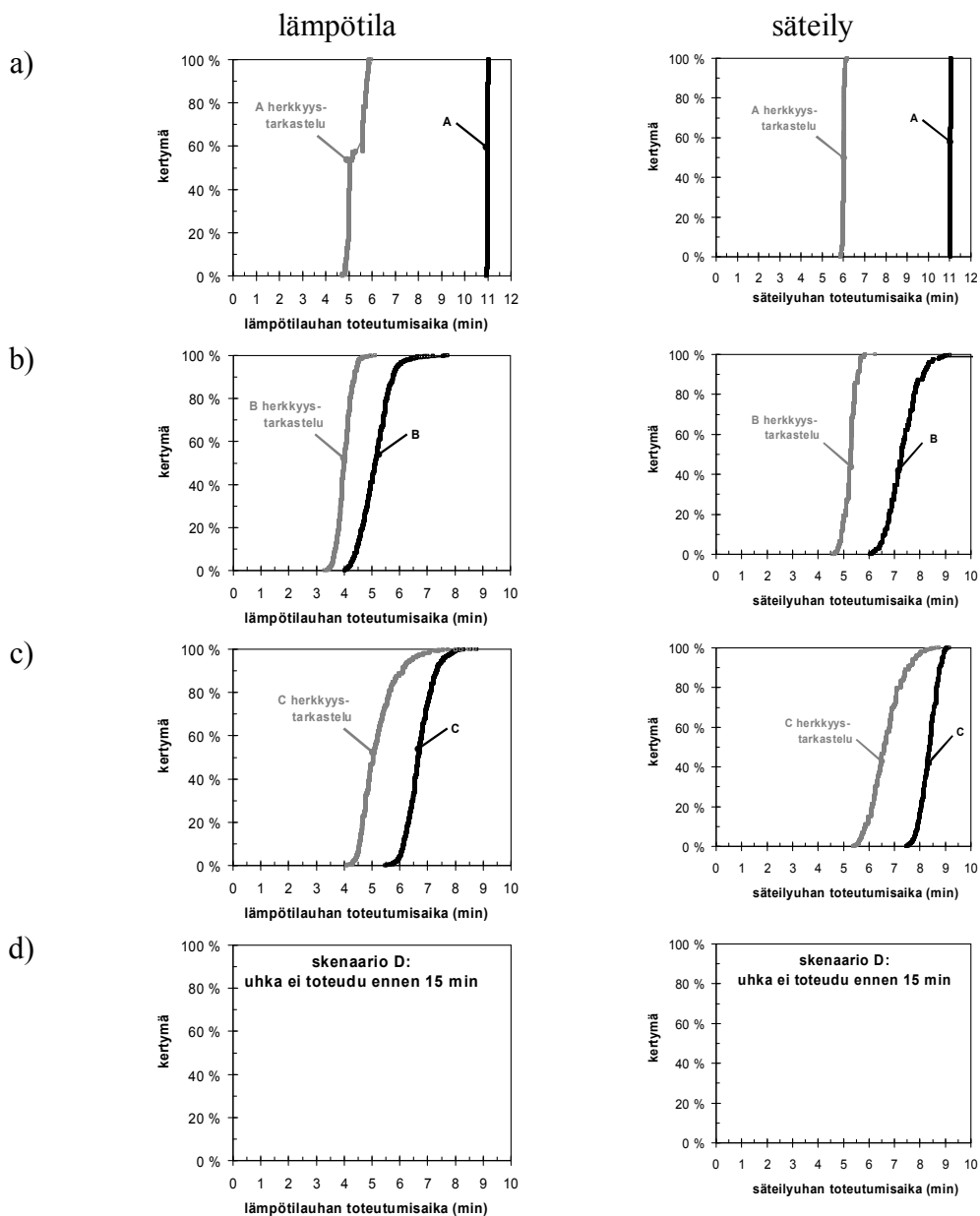
Kuva 87. Paloteho tulipalossa, joka alkaa 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välisten portaiden alla: a) kun 3. kerroksen ja yläpohjan välinen aukko on auki mahdollistaen hormi-ilmiön, b) kun hormi-ilmiö on estetty riittäväällä osastoinnilla, c) kun 3. kerroksen katto on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy) ja d) kun sekä 3. kerroksen katto että seinät on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy). Huomaa, että kuvan a) pystyakseli poikkeaa muiden kuvien pystyakselistä.



Kuva 88. Savukerroksen lämpötila tulipalossa, joka alkaa 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välisten portaiden alla: a) kun 3. kerroksen ja yläpohjan välinen aukko on auki mahdollistaen hormi-ilmiön, b) kun hormi-ilmiö on estetty riittäväällä osastoinnilla, c) kun 3. kerroksen katto on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy) ja d) kun sekä 3. kerroksen katto että seinät on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy). Vasemmalla kuvaajat esitetään laajemmalla asteikolla ja oikealla keskittyen poistumisturvallisuuden kannalta tärkeisiin yksityiskohtiin.

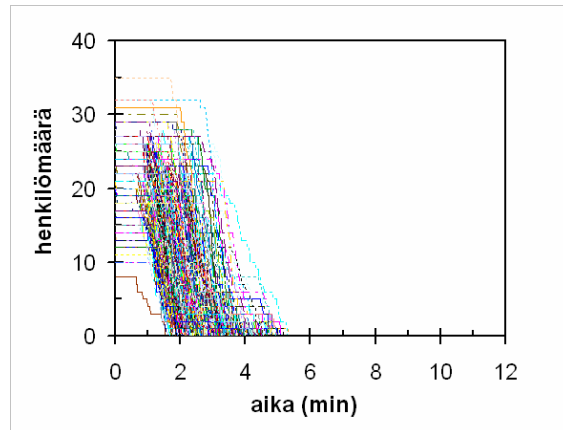


Kuva 89. Savukerroksen säteily tulipalossa, joka alkaa 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välisten portaiden alla: a) kun 3. kerroksen ja yläpohjan välinen aukko on auki mahdollistaen hormi-ilmion, b) kun hormi-ilmio on estetty riittävällä osastoinnilla, c) kun 3. kerroksen katto on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy) ja d) kun sekä 3. kerroksen katto että seinät on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy). Vasemmalla kuvaajat esitetään laajemmalla asteikolla ja oikealla keskityen poistumisturvallisuuden kannalta tärkeisiin yksityiskohtiin.

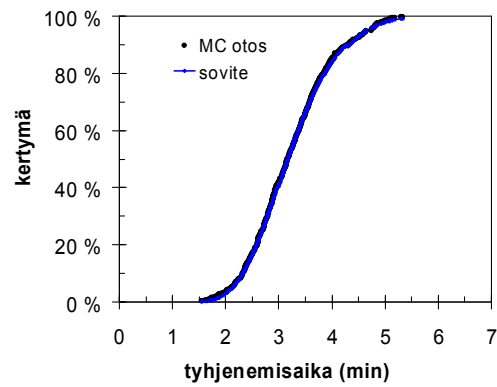


Kuva 90. Uhkien toteutumisen todennäköisyys tulipalossa, joka alkaa 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välisten portaiden alla: a) kun 3. kerroksen ja yläpohjan välinen aukko on auki mahdollistaen hormi-ilmiön, b) kun hormi-ilmiö on estetty riittäväällä osastoinnilla, c) kun 3. kerroksen katto on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy) ja d) kun sekä 3. kerroksen katto että seinät on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy). Vasemmalla esitetään kuuman kerroksen lämpötilaan liittyvä uhka ja oikealla lämpösäteilyyn liittyvä uhka.

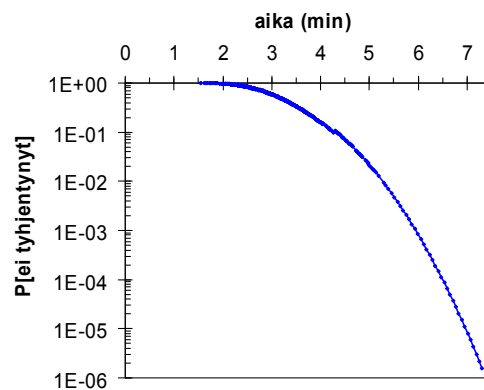
a)



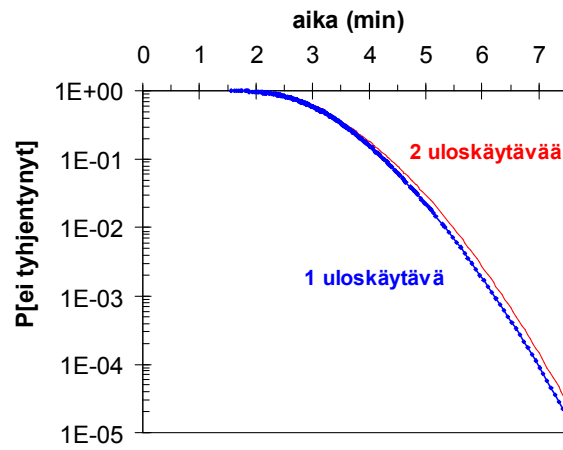
b)



c)



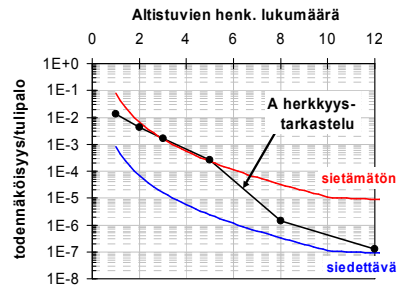
Kuva 91. Henkilöiden poistuminen 3. kerroksesta sähköpalossa: a) henkilömäärän riippuvuus ajasta, b) viimeisen henkilön poistumisaajan todennäköisyyden analysointi ja c) todennäköisyys sille, että 3. kerroksessa voi vielä olla henkilöitä.



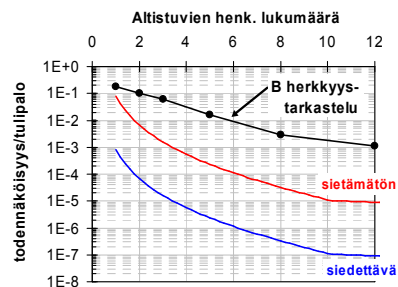
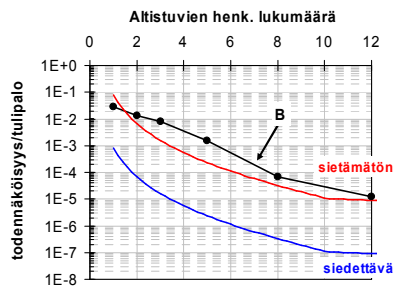
Kuva 92. Tarkastelu koskien ylimääräisen uloskäytävän vaikutusta henkilöiden poistumisnopeuteen 3. kerroksesta sähköpalossa.

a)

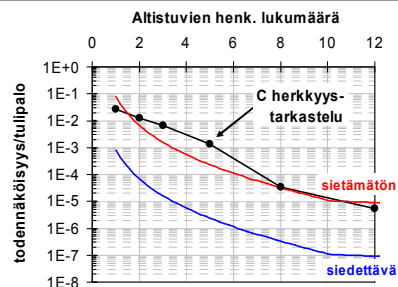
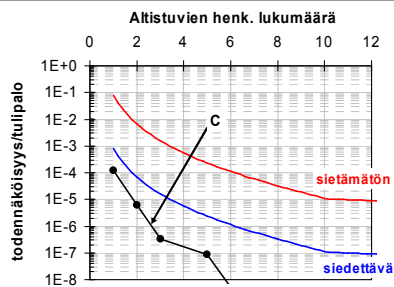
A: henkilöriskit ovat laskentatarkkuuden puitteissa nolla



b)



c)



d)

henkilöriskit ovat laskentatarkkuuden puitteissa nolla

henkilöriskit ovat laskentatarkkuuden puitteissa nolla

Kuva 93. Henkilöriskit tulipalossa, joka alkaa 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välisten portaiden alla: a) kun 3. kerroksen ja yläpohjan välinen aukko on auki mahdollistamassa hormi-ilmiön, b) kun hormi-ilmiö on estetty riittävällä osastoinnilla, c) kun 3. kerroksen katto on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy) ja d) kun sekä 3. kerroksen katto että seinät on tehty palamattomasta rakennustarvikkeesta (kipsilevy). Vasemmalla esitetään kuuman kerroksen lämpötilaan liittyvä uhka ja oikealla lämpösäteilyyn liittyvä uhka.

Taulukko 13. Paloturvallisuus 3. kerroksen sähköpalon uhkakuvissa.

Henkilöturvallisuus	Esineistön ja rakennuksen turvallisuus
<ul style="list-style-type: none"> Nykytilassa (vaihtoehto A) 3. kerroksessa olevat palavat materiaalit yhdistettynä tilan mataluuteen voivat aiheuttaa niin palon nopean kehittymisen, että se haittaa selvästi henkilöturvallisuutta (kuva 93a, herkkyystarkastelutapaus) Esineistön ja rakennuksen suojaaminen vaatii osastointia 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välille (vaihtoehto B). Koska tämä estää palokaasujen kulkeutumista 3. kerroksesta yläpohjaan, 3. kerros kuumenee nopeammin ja siksi henkilöturvallisuus on vaihtoehdossa B huonompi kuin vaihtoehdossa A (kuva 93b). Kun 3. kerroksen pintamateriaalit vaihdetaan vain hyvin rajoitetusti paloon osallistuviksi (Euroluokka B, esim. kipsilevy) (vaihtoehdot C ja D), palon kehittyminen heikkenee voimakkaasti ja henkilöturvallisuus paranee hyväksyttävälle tasolle (kuvat 93c ja 93d). Suositeltavinta on tehdä sekä seinät että katto Euroluokan B rakennustarvikkeesta (vaihtoehto D). 	<ul style="list-style-type: none"> Nykytilassa (vaihtoehto A) 3. kerroksen palavat materiaalit ja osastoinnin puuttuminen 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon väliltä edesauttavat vauhtiin päässeen palon kasvua, ja tuloksena voi olla hormi-ilmiön voimistama erittäin voimakas palo (50–100 MW) (kuva 87a). Palokunnan mahdollisuudet saada tämä palo hallintaan ovat vähäiset, ja siksi odotettavissa olevat vahingot esineistölle ja rakennukselle ovat erittäin vakavia. Osastoinnin rakentaminen 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välille (vaihtoehto B) vähentää tehokkaasti erittäin vakavien omaisuusvahinkojen todennäköisyyttä. Paloteho ja lämpötilat (kuvat 87b ja 88b) nousevat kuitenkin niin korkeiksi, että 3. kerros ja esineistö kärsisivät merkittäviä vahinkoja ja palossa syntyvä runsas savu voisi levitä muualle rakennukseen. Kun 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon osastoinnin lisäksi 3. kerroksen katon ja seinien pintamateriaalit vaihdetaan vain hyvin rajoitetusti paloon osallistuviksi, palon voimakkuus on rajoitettu eikä lämpötila nouse paljoakaan, ja siksi vauriot jäävät vähäisiksi ja paikallisiksi.

17.7 Tuhopoltto, jossa 3. kerroksen Vanhan Porvoon pienoismalli sytytetään palavalla nesteellä

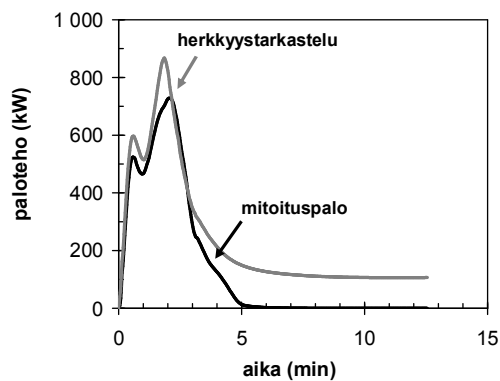
Voimakkaampana alkupaloskenaariona 3. kerroksessa käsitellään tilannetta, jossa Vanhan Porvoon pienoismallin päälle on kaadettu ja sytytetty 1 litra palavaa nestettä (bensiniä). Tuhopolttopausten poistumisaikalaskelmissa on oletettu lisäksi, että palon havaitseminen tapahtuu noin 10 s kuluessa sytyttämisestä. Herkkyyssanalyysitarkastelussa on tutkittu, miten palokehitys muuttuu, kun palavan nesteen palolle altistuvien materiaalien palavuutta lisätään. Tarkasteluissa oletetaan osastoinnin olevan parannettu siten, että hormi-ilmiön syntyminen 3. kerroksen ja yläpohjan läpi on estetty.

Kuvassa 94 esitetään em. paloskenaariorien palotehokäyrät ja kuvassa 95 esitetään tulipaloista aiheutuneet säteily- ja lämpötilakuvaajat. Näiden tuloksien perusteella määritetyt lämpötilaan ja lämpösäteilyyn liittyvät uhat henkilöturvallisuudelle esitetään kuvassa 96.

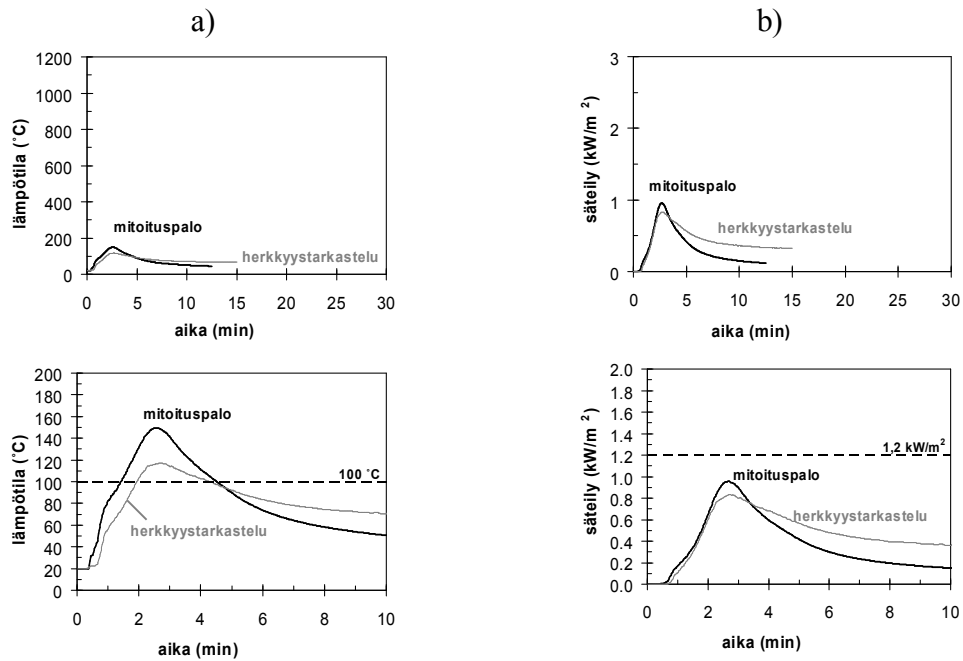
Uhkia koskevista tuloksista nähdään, että lämpötilaan liittyvä uhka on säteilyä vakavampi: se toteutuu aikaisemmin, ja jatkossa tarkastellaan vain tätä uhkaa.

Poistumisaikalaskujen tulokset esitetään kuvassa 97: kuvissa 78c ja 78d esitetyistä evakointitodennäköisyyksistä havaitaan, että todennäköisyys, että kerroksessa voi olla ihmisiä, laskee alle yhden miljoonasosan noin 1,5 minuutissa. Vertaamalla tätä aikaa lämpötilaan liittyvien uhkien toteutumistodennäköisyyksiin nähdään, että henkilöriskit ovat nollassa poikkeavia vain lämpötilaan liittyvälle uhalle. Nämä henkilöriskit esitetään kuvassa 98.

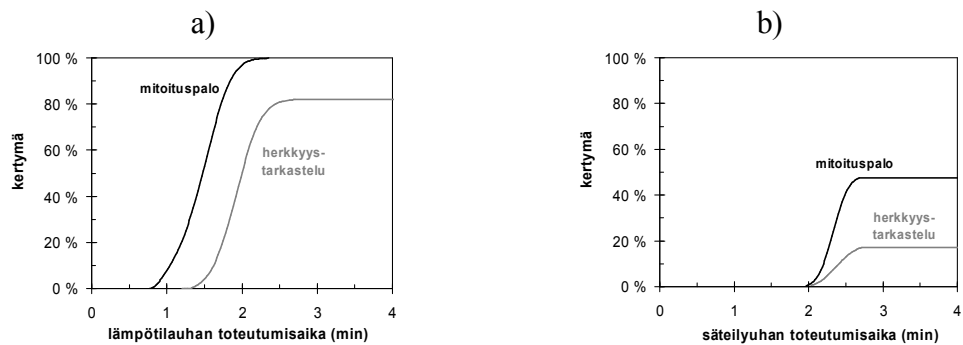
Tulosten perusteella voidaan todeta 3. kerroksen henkilö- ja omaisuusturvallisuuden olevan riittävän hyvä myös tuhopolttohakuvassa, kunhan siellä toteutetaan edellisessä kohdassa suositellut paloturvallisuutta lisäävät toimenpiteet eli 3. kerroksen ja yläpohjan ontelo osastoidaan erilleen ja 3. kerroksen katon ja seinien pintamateriaalit vaihdetaan hyvin rajallisesti paloon osallistuviksi.



Kuva 94. Paloteho 3. kerroksen tuhopolttotapauksessa.

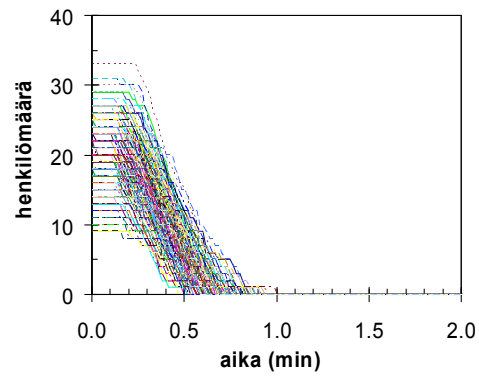


Kuva 95. 3. a) Lämpötila ja b) säteily 3. kerroksen tuhopolttopauksessa. Ylempi kuva esittää tulokset laajemmalla asteikolla ja alempi keskittyen poistumisturvallisuuden kannalta tärkeisiin yksityiskohtiin.

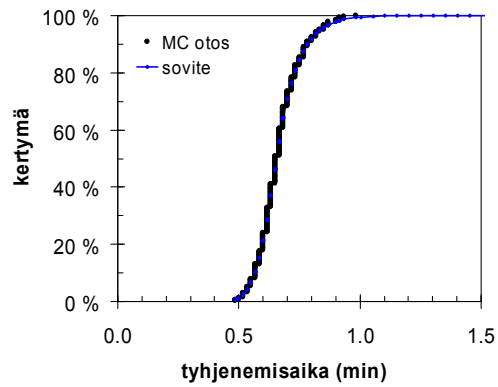


Kuva 96. 3. a) Lämpötilaan ja b) säteilyyn liittyvät uhat 3. kerroksen tuhopolttopauksessa.

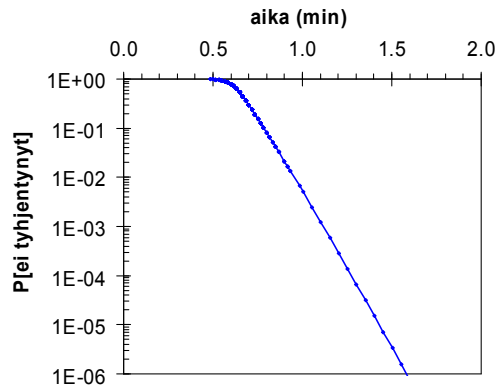
a)



b)

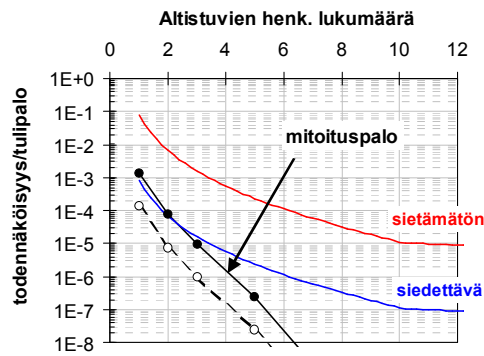


c)

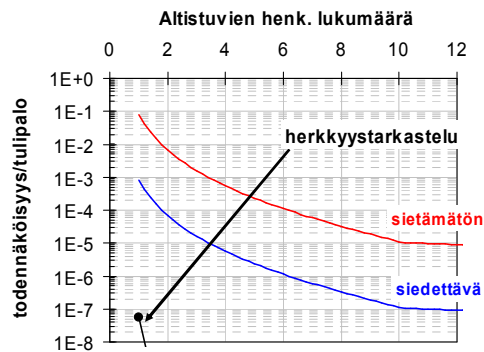


Kuva 97. Henkilöiden poistuminen 3. kerroksesta tuhopolttopaloskenaariossa: a) henkilömäärän riippuvuus ajasta, b) viimeisen henkilön poistumisajan todennäköisyyden analysointi ja c) todennäköisyys sille, että 3. kerroksessa voi vielä olla henkilöitä.

a)



b)



Kuva 98. Henkilöriskit 3. kerroksen tuhopolttopaloksenkaariossa: a) mitoituspalo ja b) herkkyysanalyysitarkastelu. Katkoviivoitettu käyrä kuvassa a) osoittaa, miten käsitellyn skenaarion erityisluonteen (alhainen todennäköisyys, tässä esimerkissä käytetty arvoa yksi kymmenestä palosta) huomioon ottaminen alentaa riskin siedettävän pieneksi.

17.8 Tulipalo yläpohjan ontelossa

Rakennuksen yläpohjan ontelon tulipalon oletetaan alkavan sähköisestä syystä (esim. kytkentöjen vikaantumisen seurauksena) yläpohjan ontelossa. Alkupalon maksimipalotehon oletetaan olevan 200 kW ja sen kehittymisen oletetaan noudattavan nopeaa t^2 -mallin palonkehitystä⁸ tapauksena, jossa alkupalona käytettiin 50 kW palotehon antavaa sähkölaitetta. Yläpohjan ontelon purueristeen mallintamiseksi puun tiheyttä muutettiin 150 kg/m^3 . Paloskenaarioissa varioitiin yläpohjan ontelon sekä 3. kerroksen välillä olevan kulkuluukun osastointia sekä yläpohjan ilmanvaihtoa taulukon 14 mukaisesti.

Paloteho ja kuumen kaasukerroksen lämpötila esitetään kuvassa 99. Palon kehittymistä havainnollistetaan kuvissa 100 ja 101.

Havaitaan, että jos yläpohja olisi tiivis, siellä alkanut palo todennäköisesti hiipuisi hapenpuutteeseen (vaihtoehto B3), vaikka 3. kerroksen ja yläpohjan välille ei olisi osas-

⁸ Paloteho \dot{Q} kasvaa verrannollisena syttymisestä kuluneen ajan t neliöön, $\dot{Q} = 1000 \cdot (t/t_g)^2$ kW, missä nopeaa palonkehitystä kuvataan kasvuaikatekijän t_g arvolla 150 s.

tointia. Vanha raatihuone on kuitenkin iäkäs rakennus, eikä sen yläpohja suinkaan ole tiivis, ja siksi todennäköisin palon kehittyminen on vaihtoehtojen B1 ja B2 mukainen, joissa palo kehittyy lieskahtaneeksi paloksi.

Ilman 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välistä osastointia liekahdus tapahtuu heti palon alkukehittymisen jälkeen ja paloteho sekä lämpötilat nousevat erittäin korkeiksi (n. 40–50 MW ja yli 1000 °C). Vaikka yläpohjan ontelo olisi yhdistetty kohteen automaattiseen paloilmajärjestelmään, palokunta ei aina ehtisi riittävän ajoissa paikalle saadakseen palon hallintaan; ajasta riippuvilla tapahtumapuilla tehdyn analysoinnin mukaan palo kehittyisi hallitsemattomaksi ilmaisimen luotettavuudesta riippuen noin 12–16 %:ssa tapauksista (kuva 102a)

Kun 3. kerros ja yläpohjan ontelo on osastoitu erilleen, palon kehittyminen liekahdukseen vie paljon pitemmän ajan (noin puoli tuntia). Jos palo saisi kehittyä vapaasti, paloteho sekä lämpötilat nousisivat korkeiksi (n. 10–15 MW ja lähes 1000 °C). Näin ei todennäköisesti kuitenkaan käy, vaan todennäköisyys, että palokunta saa palon hallintaan, on korkea, vastaten yläpohjan ontelossa olevan ilmaisimen luotettavuutta (kuva 102b).

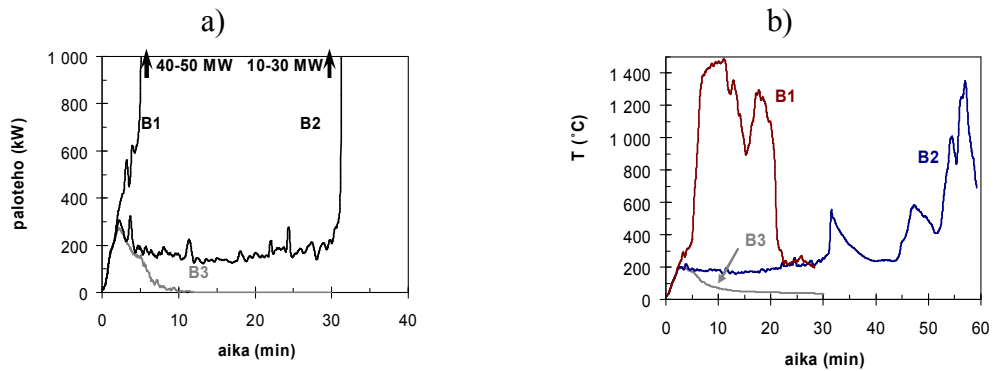
Tilannetta voidaan edelleen parantaa, jos syttymisen todennäköisyyden pienentämiseksi yläpohjan eristemateriaali (sahanpuru) vaihdetaan palamattomaksi tuotteeksi (lasi- tai mineraalivilla) ja yläpohja jaetaan osiin siten, että palon leviäminen torniin estetään rakenteellisesti. Jälkimmäinen toimenpide suojaa arvokasta tornirakennelmaa sekä estää tehokkaasti palon kehittymistä yläpohjan ontelossa vähentämällä ontelon ilmanvaihtoa.

Lopuksi: koska ontelopalojen sammuttaminen on usein hyvin vaikeaa ja voi vaatia rakenteiden rikkomista sekä runsaasti vettä, yläonteloon tulee asentaa kuivasprinklauslaitteisto, johon palokunta tarvittaessa saa syötettyä vettä.

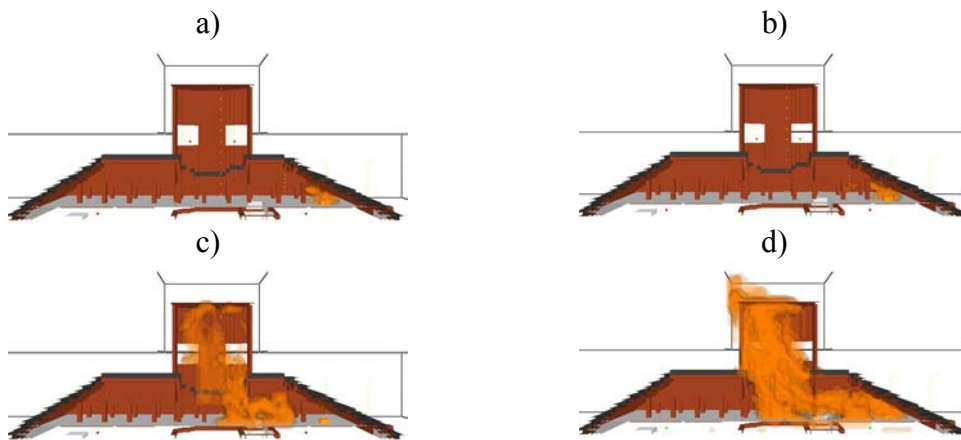
Taulukko 14. Yläpohjan ontelossa alkavien tulipalojen eri variaatiot.

B1	avoin: hormi-ilmiö mahdollinen	tornin ikkunat rikkoutuvat 200 °C:ssa, yhden ikkuna-aukon suuruisen vuotoaukko yläpohjassa	max. 200 kW ^{a)}
B2	suljettu: hormi-ilmiö estetty	tornin ikkunat rikkoutuvat 200 °C:ssa, yhden ikkuna-aukon suuruisen vuotoaukko yläpohjassa	max. 200 kW ^{a)}
B3	avoin: hormi-ilmiö mahdollinen	tornin ikkunat rikkoutuvat 200 °C:ssa, ei muita aukkoja yläpohjassa	max. 200 kW ^{a)}

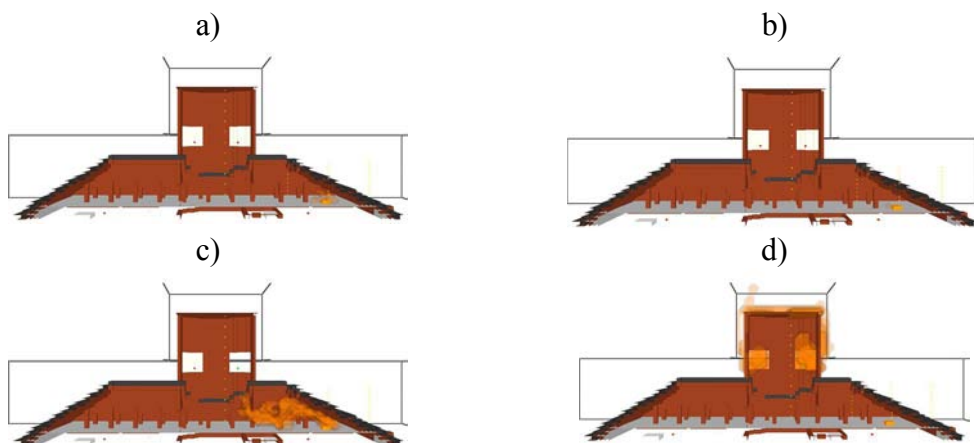
a) Alkupalon maksimipaloteho 200 kW, palon kehitys nopeasti kasvavan t^2 -mallin mukainen.



Kuva 99. Yläpohjan ontelossa syttyneiden tulipalojen a) paloteho ja b) kuuman kaasukerroksen lämpötila.

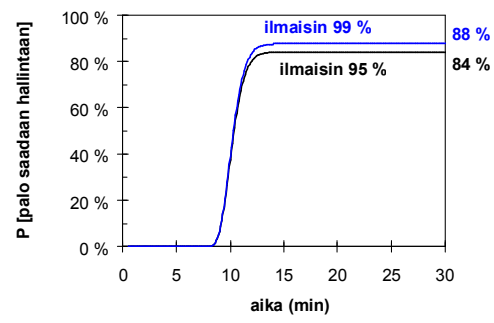


Kuva 100. Yläpohjan ontelossa syttyvän palon kehittyminen tapauksessa, jossa yläpohja oletetaan harvaksi ja hormi-ilmiön syntyminen 3. kerroksesta yläpohjan läpi on mahdollinen (puutteellinen osastointi): a) 3 minuuttia, b) 6 minuuttia, c) 6,5 minuuttia ja d) runsaat 17 minuuttia syttymisestä.

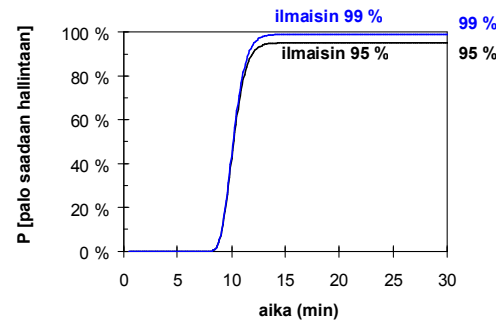


Kuva 101. Yläpohjan ontelossa syttyvän palon kehittyminen tapauksessa, jossa yläpohja oletetaan harvaksi ja hormi-ilmiön syntyminen 3. kerroksesta yläpohjan läpi on estetty (riittävä osastointi): a) 5 minuuttia, b) 10 minuuttia, c) 30 minuuttia ja d) noin 35 minuuttia syttymisestä.

a)



b)



Kuva 102. Todennäköisyys, että yläpohjan ontelossa syttynyt tulipalo saadaan hallintaan kahdella erilaisella yläpohjaan asennetun paloilmaisimen luotettavuuden arvolla: a) skenaario B1 ja b) skenaario B2.

18. Yhteenveto

Säädösten esittämät paloturvallisuusvaatimukset eivät kata historiallisten rakennusten paloturvallisuustarpeita, koska näissä kohteissa pyritään suojelemaan ja pelastamaan myös rakennus ja siellä oleva esineistö sekä usein myös koko interiööri ml. mahdolliset seinä- ja kattomaalaukset. Lisäksi historiallisten rakennusten paloturvallisuuden toteuttaminen on tehtävä siten, että rakennusten alkuperäinen arkkitehtuuri, rakenteet, pintamateriaalien ja yleensä ottaen kohteen luonne säilytetään mahdollisimman hyvin, mikä asettaa erityisvaatimuksia esim. paloilmaisimien, sammutuslaitteiden ja osastoivien rakenteiden asennuksille. Käytännössä historiallisten rakennusten kulttuuriarvojen säilyttäminen ja paloturvallisuusvaatimusten toteuttaminen noudattaen määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Siksi toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on erittäin hyvä ja joskus jopa ainut mahdollinen tapa historiallisten rakennusten paloturvallisuuden toteuttamiseen.

Tässä julkaisussa esitettiin historiallisten kohteiden toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun perusteet ja esimerkki menettelytavan soveltamisesta Porvoon museon paloturvallisuussuunnittelussa. Sovelluksen tulosten yhteenveto esitetään taulukossa 15.

Taulukko 15. Porvoon Vanhan raatihuoneen paloturvallisuuden parannuskeinot ja niiden vaikutus.

Henkilöturvallisuus:	Rakennuksen ja esineistön turvallisuus:
<ul style="list-style-type: none"> • Pohjakerroksen vaunuvarastoon järjestetään automaattinen savunpoisto (esim. ovien yläikkunoiden kautta), sekä palon alkutilassa että aulan kautta poistuvat henkilöt pääsevät poistumaan turvallisesti. • Aulatilassa syttyvässä palossa henkilöturvallisuus saadaan parannettua hyvälle tasolle toimenpiteillä, jotka vähentävät tehokkaasti palon kehittymistä sen alkuhetkinä: aulan palokuorman määrän vähentäminen (poistuminen muualta paitsi informaatiopisteestä) ja porrashuoneen ikkunan rikkoutumisen estäminen sekä syttymiskohdan eli informaationpisteen lattian pinnoitus palamattomalla materiaalilla ja kohdesprinklaus. • 1. kerroksen toimistohuoneessa syttyvän palon vaarat voidaan torjua itsesulkeutuvalla EI30-luokan palo-ovella. • 3. kerroksessa tulipalossa henkilöturvallisuus saadaan hyvälle tasolle, kun seinien ja katon pintamateriaalit vaihdetaan vain hyvin rajoitetusti paloon osallistuviksi (Euroluokka B, esim. kipsilevy). • Yleisen poistumisturvallisuuden parantamiseksi tulee porrashuoneen yläpään asentaa savunpoistomahdollisuus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Osastoinnin toteuttaminen koko rakennukseen itsesulkeutuvilla EI30-luokan palo-ovilla vähentää tehokkaasti sekä palokaasujen että savun leviämiseen liittyviä riskejä. • Kun aulatilan paloturvallisuus henkilöiden suojelun suhteen parannetaan edellä esitetyllä tavalla, myös riskit esineistölle ja rakennukselle tulevat hyvin pieniksi. • Kun 1. kerroksen toimistohuoneen paloturvallisuus henkilöiden suojelun suhteen parannetaan edellä esitetyllä tavalla, myös riskit esineistölle ja rakennukselle tulevat hyvin pieniksi. • 3. kerroksen ja yläpohjan ontelon välinen kulkutie tulee osastoida, mikä estää mahdollisen hormi-ilmiön ajaman erittäin voimakkaan palon kehittymisen. • Yläpohjan palon syttymisen todennäköisyyden pienentämiseksi yläpohjan eristemateriaali tulee korvata erittäin rajoitetusti paloon osallistuvalla materiaalilla (Euroluokka A). Palon lieskahtamisen ja hallitsemattoman leviämisen estämiseksi rakennuksen torni ja yläpohja tulee jakaa erillisiin paloosiin. • Koska ontelopalon sammuttaminen voi rakenteellisesta suojauksesta huolimatta olla vaikeaa ja vaatia rakenteiden rikkomista sekä runsaan veden käyttöä, yläonteloon tulee asentaa kuivasprinklauslaitteisto, johon palokunta tarvittaessa saa syötettyä vettä.

Lähdeluettelo

Babrauskas, V. 2002. Heat Release Rates. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3. painos. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-1–3-37. ISBN 087765-451-4.

BUWAL 1991. (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.) Handbuch I zur Störfallverordnung StfV. Richtlinien für Betriebe mit Stoffen, Erzeugnissen und Sonderabfällen. Bern.

Cadorin, J.-F. & Franssen, J.-M. 2003. A tool to design steel elements submitted to compartment fires – OZone V2. Part 1: pre- and post-flashover compartment fire model. Fire Safety Journal, Vol. 38, s. 395–427.

CEN 2002. Eurocode 1 – Rakenteiden kuormat. Osa 1–2: Yleiset kuormat – palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. (SFS-EN 1991-1-2.)

Cochard, S. 2003. Validation of Fire Dynamics Simulator (Version 2.0) Freeware. Tunnel Management International Journal, 6(4), December 2003.

Cox, G. & Kumar, S. 1987. Field modelling of fire in forced ventilation enclosures. Combustion Science and Technology, Vol. 52, s. 7–23.

CPQRA 1989. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. New York: Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers.

D'Souza, V., Sutula, J. A., Olenick, S. M., Zhang, W. & Roby, R. J. 2001. Use of Fire Dynamics Simulator to Predict Smoke Detector Activation. Proceedings of the 2001 Fall Technical Meeting, Eastern States Section. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania.

Floyd, J. 2002. Comparison of CFAST and FDS for Fire Simulation with the HDR T51 and T52 Tests. NIST GCR 01-810. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.

Floyd, J. E., Wieczorek, C. & Vandsburger, U. 2001. Simulations of the Virginia Tech Fire Research Laboratory Using Large Eddy Simulation with Mixture Fraction Chemistry and Finite Volume Radiative Heat Transfer. Proceedings of the Ninth International Interflam Conference. Interscience Communications.

Frantzich, H. 2001. Tid för utrymning vid brand. Lund, SE: Brandteknik, Lunds tekniska högskola. 122 s. ISBN 91 7253-092-8.

Friday, P. & Mowrer, F. W. 2001. Comparison of FDS Model Predictions with FM/SNL Fire Test Data. NIST GCR 01-810. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.

Friedman, R. 1992. International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineers*, Vol. 4, No. 3, s. 81–92.

Gwynne, S., Galea, E., Parke, J. & Hickson, J. 2003. The collection of pre-evacuation times from evacuation trials involving a Hospital Outpatient area and a University Library facility. *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*. International Association for Fire Safety Science. Worcester, MA. S. 877–888.

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. *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*. International Association for Fire Safety Science. S. 457–468.

Hamins, A., Maranghides, A., McGrattan, K. B., Johnsson, E., Ohlemiller, T. J., Donnelly, M., Yang, J., Mulholland, G., Prasad, K., Kukuck, S., Anleitner, R. & McAllister, T. 2004a. Report on Experiments to Validate Fire Dynamic and Thermal-Structural Models for Use in the World Trade Center Investigation. NIST Special Publication in preparation. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.

Hamins, A., Maranghides, A., McGrattan, K. B., Ohlemiller, T. J. & Anleitner, R. 2004b. Experiments to Validate Models of Fire Growth and Spread for use in the World Trade Center Investigation. NIST Special Publication in preparation. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.

Health and Safety Executive 2001. Reducing risks, protecting people. Suffolk, Sudbury: HSE Books. ISBN 0 7176 2151 0.

Hietaniemi, J. 1999. Puutuotteiden palosuojaus. *Palontorjuntateknikka*, Vol. 29, No. 4, s. 13–15. ISSN 0031-0476.

Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M. & Lappi, E. 2002a. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. VTT Tiedot-

teita – Meddelanden – Research Notes 2123. Espoo: VTT. 95 s. + liitt. 51 s. ISBN 951-38-5935-5.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Korhonen, T., Siiskonen, J. & Vaari, J. 2002b. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2128. Espoo: VTT. 125 s. + liitt. 63 s.

Hietaniemi, J., Hostikka, S. & Vaari, J. 2004. FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data. VTT Working Papers 4. Espoo: VTT. 45 s. + liitt. 6 s. ISBN 951-38-6556-8.

Hietaniemi, J., Cajot, L.-G., Pierre, M., Fraser-Mitchell, J. Joyeux, D. & Papaioanou, K. 2005. Risk-Based Fire Resistance Requirements. Final Report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 528 s. ISBN 92-894-9871-4 (EUR 21443 EN).

Hostikka, S. & Axelsson, J. 2003. Modelling of the radiative feedback from flames in cone calorimeter. NORDTEST technical report 540. Espoo: NORDTEST. 41 s.

Hymes, I., Boydell, W. & Prescott, B. 1996. Thermal Radiation: Physiological and Pathological Effects. Chapters 5, 6 and 7. Rugby, Warwickshire, UK: Institution of Chemical Engineers.

IMO 2002. Interim guidelines for evacuation analyses for new and existing passenger ships. MSC/Circ. 1033. International Maritime Organisation. 44 s.

Jokinen, M., Laurila, A., Linnanmäki, S., Karlsen, E., Sørmoen, O., Alexandersson, K., Erenmalm, T. & Lindkvist, S. 2004. Can we learn from the heritage lost in a fire? Experiences and practises on the fire protection of historic buildings in Finland, Norway and Sweden. Publication no 26. National Board of Antiquities, Department of Monuments and Sites. 82 s. ISBN 951-616-115-4 (vol.), ISBN 951-616-117-0 (pdf). (Suom.: Historiallisten rakennusten paloturvallisuus – näkökohtia ja esimerkkejä. Helsinki: Museovirasto, rakennushistorian osasto. 20 s.)

Jönsson, R. & Lundin, J. 1998. The Swedish case study – different fire safety design methods applied on a high rise building. Report 3099. Lund: Lund Institute of Technology, Department of Fire Safety Engineering. 81 s.

Karlsson, B. & Quintiere, J. G. 2000. Enclosure Fire Dynamics. Boca Raton: CRC Press LLC. 315 s. ISBN 0.8493-1300-7.

Kashef, A., Benichou, N., Lougheed, G. D. & McCartney, C. 2002. A Computational and Experimental Study of Fire Growth and Smoke Movement in Large Spaces. Technical Report NRCC-45201. National Research Council Canada.

Keski-Rahkonen, O. 1998. Probability of multiple deaths in building fires according to an international fire statistics study. Human behavior in fire – Proceedings of the First International Symposium. Belfast, Northern Ireland: University of Ulster. S. 381–391.

Kokkala, M. 2000. Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu – toiminnallinen lähestymistapa. VTT Tiedotteita 2028. Espoo: VTT. 63 s. + liitt. 15 s.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2028.pdf>

Korhonen, T., Hietaniemi, J., Baroudi, D. & Kokkala, M. 2002. Time-Dependent Event-Tree Method for Fire Risk Analysis: Tentative Results. 7th International Symposium of Fire Safety Science. Boston, 16–21 June 2002. S. 321–332.

Korhonen, T. & Hietaniemi, J. 2004. Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa. VTT Tiedotteita – Research Notes: 2253. Espoo: VTT. 58 s. + liitt. 36 s.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2253.pdf>

Korhonen, T., Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. 2005a. A Proposal for the Goals and New Techniques of Modelling Pedestrian Evacuation in Fires. Fire Safety Science – Proceedings of the 8th International Symposium, Beijing, China. International Association for Fire Safety Science. 11 s.

Korhonen, T., Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. 2005b. Poistumisaikalaskelmat palotilanteissa. Palontorjuntateknikka 2005 (Erikoisnumero), s. 106–110.

Litai, D. & Rasmussen, N. 1983. The public perception of risk. The analysis of actual versus perceived risks. Oxford: Plenum Press. S. 213–224.

Ma, T. & Quintiere, J. 2003. Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations. Fire Safety Journal, Vol. 38, s. 467–492.

Marchant, R., Kurban, N. & Wise, S. 2001. Development and Application of the Fire Brigade Intervention Model. Fire Technology, Vol. 37, s. 263–278.

McCaffrey, B. J., Quintiere, J. G. & Harkleroad, M. F. 1981. Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations. Fire Technology, Vol. 17, No. 2, s. 98–119.

McGrattan, K. B., Baum, H. R., Walton, W. D. & Trelles, J. 1997. Smoke plume trajectory from in situ burning of crude oil in Alaska – field experiments and modeling of complex terrain. NISTIR 5958. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 83 s. + liitt. 44 s.

McGrattan, K. B. & Hamins, A. 2003. Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001. NISTIR 6902. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology. Joint Publication of NIST and the US Nuclear Regulatory Commission (NUREG/CR-6793).

McGrattan, K. (toim.). 2004. Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical Reference Guide. Special Publication 1018. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 94 s.

Moss, J. B. & Rubini, P. A. 1997. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures. Teoksessa: Fire Safety Science. Toim. Hasemi, Y. Proceedings, Fifth (5th) International Symposium. Melbourne, Australia, March 3–7, 1997. Boston: International Association for Fire Safety Science. S. 1326–1326.

Mudan, K. S. & Croce, P. A. 1995. Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2. painos. Quincy, MA, USA: National Fire Protection Association. Chapters 3–11.

Peacock, R. D., Forney, G. P., Reneke, P. A., Portier, R. W. & Jones, W. W. 1993. CFAST, The Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport. NIST Technical Note 1299. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology. 246 s.

Petterson, O., Magnusson, S. E. & Thor, J. 1976. Fire Engineering Design of Steel Structures. Publication no. 50. Stockholm: Swedish Institute of Steel Construction.

Piergiorgio, A, Giuseppe, D., Dino, F., Zappellini, G. & Ferrari, A. 2001. CFD Simulations of a Truck Fire in the Underground Gran Sasso National Laboratory. Proceedings of the 5th Italian Conference on Chemical and Process Engineering. Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica (AIDIC).

Purser, D. 2001. Human Tenability. Technical Basis for Performance Based Fire Regulation, United Engineering Foundation Conference, San Francisco. S. 88–126.

Purser, D. & Bensilum, M. 2001. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations. Safety Science, Vol. 38, s. 157–182.

Rasbash, D. J. 1984/1985. Criteria for Acceptability for Use with Quantitative Approaches to Fire Safety. *Fire Safety Journal*, Vol. 8, s. 141–158.

RATU 2006. Tulitöiden turvallisuus. Ratu 1186-S.
<http://ratu-hanke.fi/turvanet/tulityo.html>. Viitattu syyskuussa 2006.

RIL 2003. Paloturvallisuussuunnittelu – Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. RIL 221-2003. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 138 s. ISBN 951-758-433-3.

Schneider, J. 2000. Safety – A Matter of Risk, Cost, and Consensus. *Structural Engineering International*, No. 4, s. 266–269.

SFPE 2000. Engineering Guide for Predicting 1st and 2nd Degree Skin Burns from Thermal Radiation. Bethesda, MD, USA: Society of Fire Protection Engineers.

SPEK 1994. Tulitöiden turvallisuus 1994. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö.

SVK 2002. Tulityöt, suojeleohje 2002. Helsinki: Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto.

Thompson, P. A. & Marchant, E. W. 1995. A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire Safety Journal*, Vol. 24, s. 131–148.

Tillander, K. & Keski-Rahkonen, O. 2000. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa. VTT Tiedotteita 2013. Espoo: VTT. 213 s. + liitt. 55 s. ISBN 951-38-5634-8; 951-38-5635-6.

Valtioneuvosto 1994. Valtioneuvoston päätös rakennustyön turvallisuudesta. Suomen säädöskokoelma 629/94.

WASH-1400. 1975. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. Washington, D.C.: WASH-1400 NUREG-75/014.

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. 2, s. 88–111.

VROM 1988. (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.) Dutch National Environmental Plan. The Hague.

Wouters, I. & Mollaert, M. 2002. Evaluation of the Fire Resistance of 19th Century Iron Framed Buildings. *Fire Technology*, Vol. 38, s. 383–390.

Xin, Y., Gore, J. P., McGrattan, K. B., Rehm, R. G. & Baum, H. R. 2002. Large Eddy Simulation of Buoyant Turbulent Pool Fires. *Proceedings of the 2002 Spring Technical Meeting, Central States Section*. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania.

Ympäristöministeriö 2002. Suomen Rakennusmääräyskokoelman osa E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Annettu Helsingissä 12 päivänä maaliskuuta 2002. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Zhang, W., Hamer, A., Klassen, M., Carpenter, D. & Roby, R. 2002. Turbulence Statistics in a Fire Room Model by Large Eddy Simulation. *Fire Safety Journal*, Vol. 37, No. 8, s. 721–752.

Liite A: Pelastussuunnitelma Porvoon museolle

Perusteet

Pelastuslaissa määrätään seuraavasti: ”*Rakennuksen omistaja ja haltija, teollisuus- ja liiketoiminnan harjoittaja, virasto, laitos ja muu yhteisö on asianomaisessa kohteessa ja muussa toiminnassaan velvollinen ehkäisemään vaaratilanteiden syntymistä, varautumaan henkilöiden, omaisuuden ja ympäristön suojaamiseen vaaratilanteissa ja varautumaan sellaisiin pelastustoimenpiteisiin, joihin ne omatoimisesti kykenevät.*”

Pelastusasetuksen mukaan pelastussuunnitelmasta on selvittävä

1. ennakoitavat vaaratilanteet ja niiden vaikutukset
2. toimenpiteet vaaratilanteiden ehkäisemiseksi, poistumis- ja suojautumismahdollisuudet sekä sammutus ja pelastustehtävien järjestelyt
3. turvallisuushenkilöstön varaaminen ja kouluttaminen
4. muun henkilöstön tai asukkaiden perehdyttäminen suunnitelmaan
5. tarvittava suojelumateriaali sen mukaan kuin ennakoitujen vaaratilanteiden perusteella on tarpeen
6. ohjeet ennakoituja onnettomuus-, vaara- ja vahinkotilanteita varten
7. miten suunnitelmaan sisältyvät tiedot saatetaan asianomaisten tietoon
8. miten rakennuksessa tai tilassa olevien heikentynyt toimintakyky otetaan huomioon varautumisessa
9. kohteen tavanomaisesta käytöstä poikkeava käyttö.

Porvoon museolle laaditun pelastussuunnitelman jaottelu

Yleistä

- Pelastussuunnitelmalle laissa ja asetuksissa esitetyt vaatimukset ja tavoite
- Pelastushallinto Porvoossa

Kohteen yleistiedot

- Museomakasiini

- Historiallinen museo Vanhassa raatihuoneessa
- Holmin talo ja piharakennukset

Henkilömäärä

Vaaratilanteet ja niiden ehkäisy

- Yleiset ohjeet
- Tulipalo rakennuksessa
- Tulipalo rakennuksen ulkopuolella
- Paloarat ja vaaralliset kemikaalit
 - Museomakasiini
 - Holmin talo ja piharakennukset
- Kaasuvaara
- Säteiluvaara
- Tulityöt
- Muut vaaratilanteet
 - Pommiuhka
 - Rikos

Rakenteellinen suojele

- Rakenteellinen palontorjunta
- Väestönsuojat

Hälytys- ja sammutusjärjestelyt

- Ulkoiset hälyttimet

- Sisäiset hälyttimet
- Automaattinen sammutuslaitteisto
- Automaattinen paloilmoin
- Savunpoisto
- Alkusammutuskalusto

Toimenpiteet onnettomuus- ja uhkatilanteissa

- Tulipalo
- Kaasuvaara
- Säteiluvaara
- Ryöstö, murto, varkaus
- Pommiuhka
- Vesivahinko
- Ensiaputoimintaohje

Vahingosta toipuminen

- Yleistä
- Jälkivahinkojen torjunta

Kokoelmaturvallisuus ja vastualueet

- Vastuut
- Ohjeita
- Tietoturvallisuus

Toimenpide-ehdotukset

- Henkilökunnan koulutus
- Muita toimenpiteitä
- Kustannukset

Suunnitelman tarkistaminen mahdollisten muutosten jälkeen

Suunnitelman jakelu

Liite B: Paloteknisen mallintamisen yksityiskohtia

Mitoituspalon t^2 -malli

Yleisin tapa kvantifioida paloa sen kasvuvaiheessa on kuvata palon kehittymistä ns. t^2 -mallilla. Tässä lähestymistavassa palotehon \dot{Q}_{fire} oletetaan kasvavan neliöllisesti ajan mukana. Malli voidaan esittää kahdessa muodossa:

$$\dot{Q}_{\text{fire}}(t) = \alpha(t - t_0)^2 = \dot{Q}_0 \left(\frac{t - t_0}{t_g} \right)^2, \text{ kun } t_0 \leq t \leq t_1 \quad (\text{B1})$$

missä edellinen muoto on vanhempi ja jälkimmäinen muoto on otettu laajemmin käyttöön 1990-luvulla. Vanhemmassa muodossa käytetään yleensä parametria t_0 , joka ottaa huomioon sen, että hyvin usein palo alkaa pienellä paloteholla ja vasta hetken t_0 jälkeen se alkaa kasvaa voimakkaasti mallin (B1) mukaisesti. Uudemmassa muodossa tämä parametri jätetään usein pois. Koska t_0 voidaan halutessa määritellä nolllaksi, sen jättäminen pois jo kaavan kirjoitusvaiheessa ei ole mitenkään välttämätöntä. Hetkellä t_1 palon kasvuvaihe loppuu.

Vakion \dot{Q}_0 arvoksi on sovittu 1 MW. Kasvukertoimen α ja kasvuajan t_g välillä on siis relaatio $\alpha = 1000 \text{ kW}/t_g^2$. Palot jaotellaan kasvukertoimen tai kasvuajan mukaan neljään luokkaan. Kasvuajan mukaan jaoteltuna luokat ovat seuraavat: hidas $t_g = 600$ s, normaalisti kasvava $t_g = 300$ s, nopea $t_g = 150$ s ja erittäin nopeasti kasvava palo $t_g = 75$ s. Kasvukertoimen mukaisessa jaottelussa palonkasvunopeuksia luonnehditaan seuraavasti: hidas $\alpha = 0,003 \text{ kW/s}^2$, normaalisti kasvava $\alpha = 0,01 \text{ kW/s}^2$, nopea $\alpha = 0,05 \text{ kW/s}^2$ ja erittäin nopea $\alpha = 0,1 \text{ kW/s}^2$. Nämä jaottelut vastaavat toisiaan yhteyden $\alpha = 1000 \text{ kW}/t_g^2$ mukaisesti, paitsi erittäin nopean palon tapauksessa, jossa tämän yhteyden mukaan kasvuaikaa 75 s vastaisi kasvukertoimen arvo $0,18 \text{ kW/m}^2$.

Palon kasvaminen loppuu, kun joko polttoaineen tai hapen syöttönopeus paloon saavuttaa olosuhteiden määräämän suurimman mahdollisen arvonsa \dot{Q}_{max} . Tulipalossa nämä molemmat rajoittavat tekijät voivat vaikuttaa myös samanaikaisesti. Esimerkkinä tästä on nestemäisen polttoaineen palaminen altaassa: vaikka pääasiallinen rajoittava tekijä on altaan koosta johtuva palamisreaktioihin osallistuvan polttoaineen määrän rajoittaminen, rajoittaa palotehoa osittain myös riittämätön hapen saanti etenkin suurien altaiden keskellä. Tulipaloissa rajoittavana tekijänä voi luonnollisesti olla myös ulkopuolinen sammutus (sprinklerit tai palokunnan sammutustoimet).

Jos polttoaineen ja hapen saanti ovat riittäviä, suljetussa tilassa palava tulipalo voi äkillisesti kasvaa rajusti rajatulla alueella tapahtuvasta paikallisesta palosta koko tilan katta-

vaksi paloksi: tilan sanotaan lieskahtavan. Lieskahtaminen johtuu siitä, että tulipalon ja tilan muodostamassa systeemissä lämpötuotot ovat suuremmat kuin lämpöhäviöt, minkä vuoksi systeemi ei päädy tasapainotilaan, vaan ajautuu termisesti epästabiliin tilaan, jossa katastrofaalinen käyttäytyminen, eli tilan lieskahtaminen, voi tulla mahdolliseksi.

Polttoaineen saannin rajoittamassa palossa täysin kehittyneen vaiheen palotehoa voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{Q}_{\text{fire}}(t) = \dot{Q}_{\text{max}} = \dot{Q}'' \cdot A_f \quad , \quad \text{kun } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (\text{B2})$$

missä \dot{Q}_{max} on maksimipaloteho, \dot{Q}'' on palavan kohteen tuottama paloteho pinta-alayksikköä kohti, A_f on palavan kohteen pinta-ala ja t_2 on hetki, jolloin palon hiipuminen alkaa. Yksittäisille tuotteille ja materiaaleille pinta-alayksikköä kohti syntyvää palotehoa \dot{Q}'' voidaan arvioida esim. kartiokalorimetrikokeiden tuloksista. Tyypillisiä arvoja ovat esimerkiksi seuraavat: puun tasainen palaminen 100–150 kW/m², PVC-muovi 150–300 kW/m² (vaihtelee muovin klooripitoisuudesta riippuen), polyeteeni tai polypropeeni 1000–2000 kW/m², öljyaltaan palaminen⁹ 2000 kW/m² [McGrattan ym. 1997]. Useita materiaaleja sisältävissä kohteissa suuretta \dot{Q}'' voidaan arvioida sopivalla painotetulla keskiarvolla eri materiaalien osuuksista tai käyttämällä kirjallisuudesta mahdollisesti löytyviä arvoja, kuten seuraavia tietoja: myymälöissä ja kokoontumistiloissa, joissa \dot{Q}'' -arvon voidaan Eurocode 1:n mukaan olettaa olevan 500 kW/m², ja 250 kW/m² asunnoissa, majoitustiloissa ja hoitolaitoksissa sekä työpaikatiloissa. Nämä arvot ovat kuitenkin vain asiantuntija-arvioita, ja niihin tulee suhtautua sellaisina.

Hapen saannin rajoittamassa palossa paloteho riippuu tilan aukkojen koosta. Suurin mahdollinen aukkojen koon sallima paloteho on [Karlsson & Quintiere 2000]

$$\frac{\dot{Q}_{\text{max}}}{\text{kW}} = 1500 \cdot \left(\frac{A_o}{\text{m}^2} \right) \sqrt{\frac{h_o}{\text{m}}} \quad (\text{B3})$$

missä A_o on tilassa olevien aukkojen pinta-ala ja h_o on aukkojen keskimääräinen korkeus. Mikäli tilassa on useita aukkoja, yhdistetään niiden korkeudet ja pinta-ala laskennallisesti Eurocode 1:ssä [CEN 2002] esitetyllä tavalla. Tämän laskutavan mukaan usean aukon tapauksessa korkeudelle käytetään arvoa, joka saadaan aukkojen pinta-alalla painotettuna keskiarvona eri aukkojen korkeuksista, ja aukkopinta-ala on aukkojen pinta-alan summa.

Kun polttoaine käy vähiin, paloteho alkaa laskea maksimiarvostaan: alkaa hiipuvan palon vaihe. Hiipumisen oletetaan yleensä alkavan, kun 60–80 % palokuormasta on pala-

⁹ Palavien nesteiden palotehoa voidaan arvioida tarkemmin esim. Babrauskasin [2002] esittämällä menetelytavalla.

nut. Hiipuvan palon palotehon aikariippuvuutta voidaan kuvata eksponentiaalisesti aikavakiolla τ vaimenevana funktiona

$$\dot{Q}_{\text{fire}}(t) = \dot{Q}_{\text{max}} \exp(-(t-t_2)/\tau), \text{ kun } t_2 \leq t, \quad (\text{B4})$$

tai lineaarisesti vähenevänä funktiona

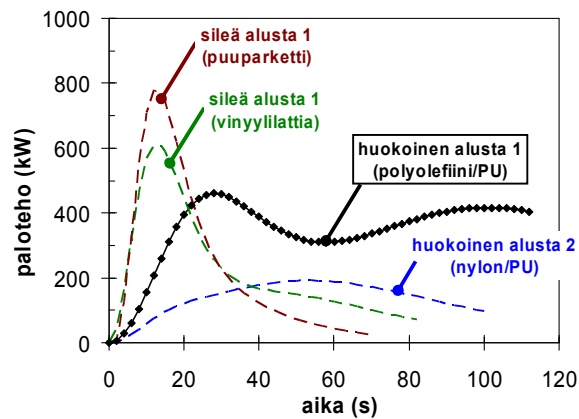
$$\dot{Q}_{\text{fire}}(t) = \dot{Q}_{\text{max}} \left(1 - \frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right), \text{ kun } t_2 \leq t \leq t_3, \quad (\text{B5})$$

missä t_2 on hetki, jolloin hiipuminen alkaa, ja t_3 on palon loppumishetki. On mahdollista, että paloteho ei kehity arvoon \dot{Q}_{max} saakka. Tällöin hiipuminen alkaa ennen aikaa t_1 eli $t_2 < t_1$.

Eri paloskenaarioiden mitoituspalojen mallintamisen yksityiskohtia

Bensiinillä sytytettävien tuhopolttojen alkupalo

Putorti (2001) on tutkinut, millainen palo syntyy, kun vaakasuoralle alustalle kaadettu bensiini syttyy. Hän tutki eri alustojen (kaksi sileäpintaista alustaa: puuparketti ja vinyylilattia; sekä kaksi huokoista alustaa: polyolefiini/PU-matto ja nylon/PU-matto) ja kaadettun bensiinimäärän vaikutusta. Kokeissa käytetyt alustat olivat kaksi sileäpintaista alustaa, puuparketti ja vinyylilattia, sekä kaksi huokoista alustaa, polyolefiini/PU-matto ja nylon/PU-matto. Kaadettu bensiinimäärä oli 0,25 litraa, 0,5 litraa tai 1,0 litraa. Kuvassa B1 esitetään yhden bensiinilitran palamisessa vapautuvan palotehon ajallinen kehitys.



Kuva B1. Paloteho erilaisille alustoille kaadetun palavan yhden litran suuruisen bensiniäärän palaessa (käyrät perustuvat Putortin [2001] mittaamiin palotehokäyriin [Figs. A1–A12]).

Kuvan B1 palotehokäyrät osoittavat, että sileäpintaiselle alustalle kaadettu bensiini palaa hyvin nopeasti siten, että bensiinin palaminen ei ehdi sytyttää alustaa. Huokoiseen materiaaliin kaadettu bensiini palaa selvästi pitempään, jolloin myös alustamateriaali ehtii syttymään. Huokoiseen materiaaliin kaadettuna bensiini aiheuttaa siis vakavamman palon alun, ja siksi tässä työssä käytetään bensiinillä sytytettävien tuhopolttojen alkupalon palamisen kuvaamiseen Putortin [2001] huokoista polyolefiini/PU-mattoa käyttämällä saamia tuloksia. Käytettävät koetulokset esitetään taulukossa B1. Koska määritysten perustana on epävarmuuksia sisältävä koetulosaineisto, määritykset tehdään käyttäen stokastista¹⁰ analysointitapaa. Tarkastelun kohteena ovat palonsimuloinnin kannalta olennaiset tiedot eli palotehon maksimiarvo, palavan alueen maksimikoko, suurin yksikköpinta-alaa kohden vapautuva palotehoarvo sekä palotehon ajallisen kehittymisen arviointi (so. palotehokäyrän muodon määrittäminen).

¹⁰ Stokastinen tarkoittaa lähtötietojen vaihtelevuuden ja mallien epävarmuuden huomioon ottavaa lähestymistapaa.

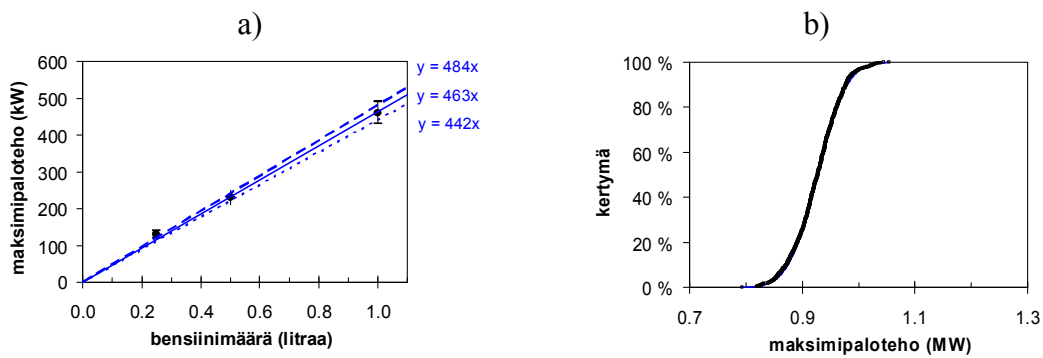
Taulukko B1. Putortin [2001] koetuloksia.

Maksimipaloteho (Putorti [2001], Table 8)		
<i>Spill Volume, mL (gal.)</i>	<i>Peak HRR (kW)</i>	
	<i>Carpet 1</i>	<i>Carpet 2</i>
1000 (0.26)	460 ± 30	180 ± 30
500 (0.13)	230 ± 20	110 ± 0
250 (0.066)	130 ± 10	60 ± 10

Palavan alueen maksimipinta-ala (Putorti [2001], Table 5)		
<i>Carpet Type</i>	<i>Spill Quantity mL (gal.)</i>	<i>Spill Area, m² (sq. ft.)</i>
1	250 (0.066)	8.51 x 10 ⁻² ± 0.00 (0.916 ± 0.00)*
1	500 (0.13)	1.63 x 10 ⁻¹ ± 3.33 x 10 ⁻² (1.76 ± 0.359)
1	1000 (0.26)	2.89 x 10 ⁻¹ ± 1.49 x 10 ⁻² (3.11 ± 0.161)

Palotehon maksimiarvo

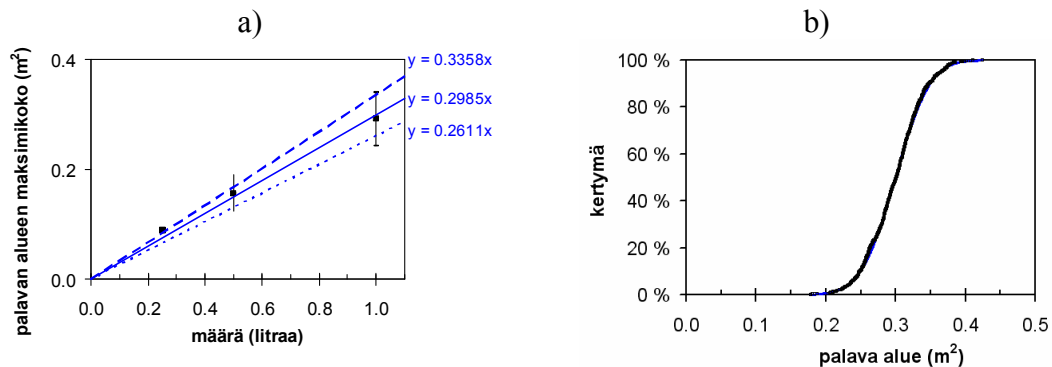
Kuvassa B2 esitetään graafisesti taulukon B1 tiedot koskien maksimipalotehoa. Kuvassa B2a esitetyt suorat ovat koetuloksiin sovitetut lineaariset mallit: yhtenäinen viiva kuvaa keskimääräistä maksimipalotehon ja bensiinimäärän yhteyttä sekä piste- ja katkoviiva kuvaavat virherajojen puitteissa suurimpia eroavuuksia keskimääräisestä tuloksesta. Kuvassa B2b esitetään näiden sovitteiden perusteella saatava tulos 2 litran bensiinimäärän palaessa vapautuvan maksimipalotehon suuruudelle. Tulos on ilmaistu suureen tilastollisena jakaumana käyttäen tilastollisena mallina normaalijakaumaa, jonka keskiarvo on 0,93 MW ja keskihajonta 0,04 MW; jakauman 95 % varmuusväli on 0,85–1,0 MW (2,5 %:n ja 97,5 %:n fraktiilien väli). Yhden litran suuruisen bensiinimäärän maksimipaloteho on puolet tästä arvosta.



Kuva B2. a) Kokeellisesti määritetty palotehon maksimiarvon riippuvuus bensiinin määrästä ja b) arvio 2 litran suuruisen bensiinimäärän palamisen maksimipaloteholle.

Palavan pinta-alan maksimikoko

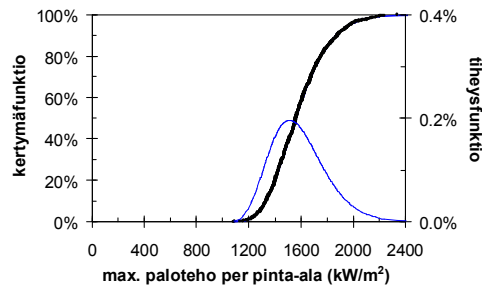
Taulukon B1 tietojen analysointi koskien palavan alueen maksimikokoa esitetään kuvassa B3. Kuvassa B3a esitetään koetulokset ja niihin sovitetut suorat ja kuvassa B3b esitetään näiden sovitteiden perusteella tehty arvio 1 litran bensiinimäärän palon alueen maksimikoolle. Tulos on ilmaistu suureen tilastollisena jakaumana käyttäen tilastollisena mallina normaalijakaumaa, jonka keskiarvo on $0,59 \text{ m}^2$ ja keskihajonta $0,07 \text{ m}^2$; jakauman 95 % varmuusväli on $0,45\text{--}0,74 \text{ m}^2$. Yhden litran suuruisen bensiinimäärän palava pinta-ala on puolet tästä.



Kuva B3. a) Kokeellisesti määritetty palavan alueen maksimikoon riippuvuus bensiinin määrästä ja b) arvio palavan alueen maksimikoolle 1 litran suuruisen bensiinimäärän palaessa.

Pinta-alayksikköä kohden suurimmillaan vapautuva paloteho

Pinta-alayksikköä kohden suurimmillaan vapautuva paloteho voidaan määrittää maksimipalotehon ja palavan alueen maksimikoon perusteella. Tulos esitetään kuvassa B4. Sille soveltuva tilastollinen malli on 3-parametrinen gammajakauma¹¹, jonka mediaani on 1560 kW/m², 95 % fraktiili on 1970 kW/m² ja 95 % varmuusväli on 1230–2060 kW/m².



Kuva B4. Pinta-alayksikköä kohden suurimmillaan vapautuva paloteho.

Palotehon ajallinen kehittyminen

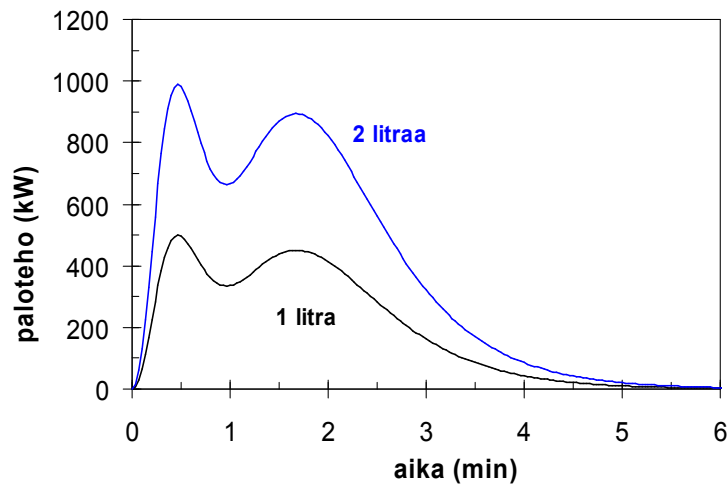
Palotehon ajallinen kehittyminen $\dot{Q}(t)$ voidaan määrittää palotehon suurimman arvon ja 20 litran suuruisen bensiinimäärän sisältämän palamisessa vapautuvan energiamäärän avulla. Käyttäen bensiinin tiheydelle arvoa on 740 kg/m³ [Babrauskas 2002] saadaan 20 bensiinilitran massaksi 14,8 kg ja edelleen käyttäen bensiinin lämpöarvolle arvoa 44 MJ/kg [Tewarson 2002] ja palamisen tehokkuudelle yläraja-arviota 90 % [Tewarson 2002] saadaan 2 bensiinilitran sisältämäksi energiamääräksi $Q_2 = 59$ MJ ja 1 bensiinilitran sisältämäksi energiamääräksi $Q_1 = 29$ MJ. Kuvassa B2 esitetyn jakauman mukaan vastaavien palotehon maksimiarvojen mitoitusarvoksi soveltuvat 95 %:n fraktiiliarvot ovat $\dot{Q}_{\max,2}(t) = 1$ MW ja $\dot{Q}_{\max,1}(t) = 0,5$ MW. Kun palotehon ajallisen kehittymisen perusmuotona käytetään kuvassa B1 esitettyä yhden bensiinilitran palamista vastaavaa käyrää, ovat ehdot

$$\max(\dot{Q}(t)) = \dot{Q}_{\max,1} \text{ tai } \dot{Q}_{\max,2}$$

$$\int_0^{\infty} \dot{Q}(t) dt = Q_1 \text{ tai } Q_2$$

¹¹ Tämän jakauman tiheysfunktio on $f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} (x - x_{\min})^{\alpha-1} e^{-\frac{x-x_{\min}}{\beta}}$, missä α , β ja x_{\min} ovat jakauman parametrit.

täyttävien funktioiden $\dot{Q}(t)$ kuvaajat kuvassa B5 esitetyn kaltaiset.



Kuva B5. Tuhopolttoskenaarioiden alkupalojen palotehokäyrät, kun bensiinin määränä on 1 litra tai 2 litraa.

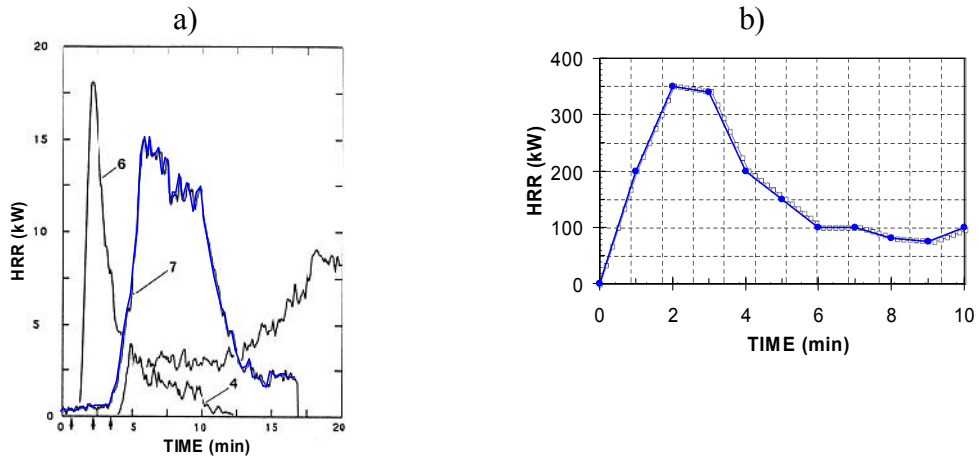
Roskakorin palaminen

Porvoon museon aulatilán tulipalon uhkakuvassa tutkittiin herkkyyssanalyysinä alkupalon suuruuden vaikutusta informaatiokopin syttymiseen ja palon kehittymiseen. Alkupalona käytetään roskakorin palamista. Kuvassa B6 esitetään kahdessa tutkimuksessa [Ahonen ym. 1984 ja Lee 1985] mitattuja roskakorin palotehokäyriä. Nämä tulokset muunnettiin FDS-mallin alkupalon syötetiedoiksi seuraavasti:

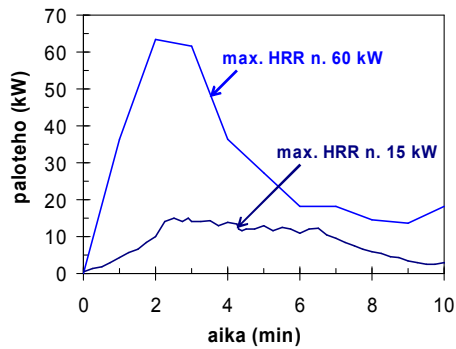
- Ahosen ym. [1984] mitaamaa palotehokäyriä käytettiin siten, että sen alkuvaiheen noin 3,5 minuutin mittainen palon hyvin hidas kehitysvaihe jätettiin pois (turvallisella puolella oleva oletus).
- Leen [1985] mitaamaa palotehoa skaalattiin alaspäin tyypillisen kokoisten (ve-toisuus noin 20 litraa) roskakorien tilavuuksien suhteella (so. tekijällä 21/121).

Tuloksena saatavat palotehokäyrät esitetään kuvassa B7.

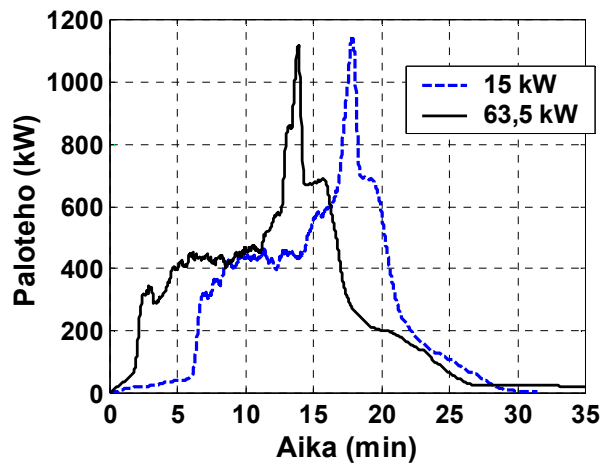
Erisuuruisten alkupalojen vaikutusta koko informaatiokopin palotehoon tutkittiin simuloimalla 10 cm hilakoppikoolla pelkästään rakennuksen aulatilaa. Kuvassa B8 esitetään kuvassa B7 esitettyjen roskakoripalaa kuvaavien alkupalojen vaikutus informaatiokopin syttymiseen ja palotehoon.



Kuva B6. Roskakorin polttokokeissa mitattuja palotehoja: a) Ahosen ym. [1984] mitaama, paperia täynnä olevan roskakorin paloteho (käyrä 7) ja b) Leen [1985] mitaama hyvin suuren roskakorin (vetoisuus 32 galloniaa eli 121 litraa) paloteho (tieto saatu Deyn raportista [Dey 2002]).



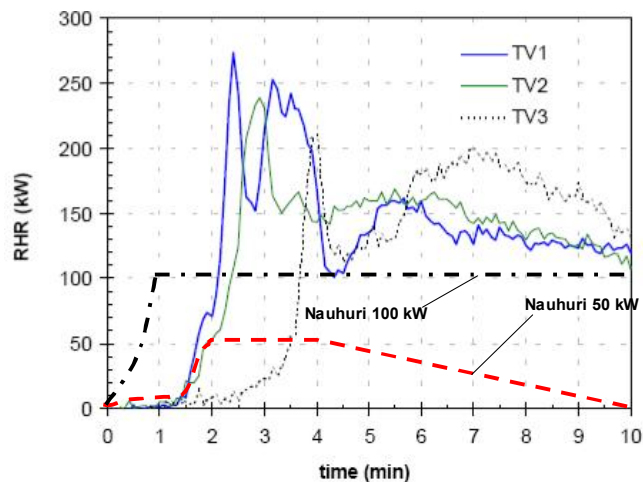
Kuva B7. Kaksi roskakoripalon palotehokäyrää.



Kuva B8. Informaatiokopin palon kehittyminen, kun alkupalona ovat erisuuruiset roska-
koripalot.

Sähkölaitepalossa käytetyt palotehokäyrät

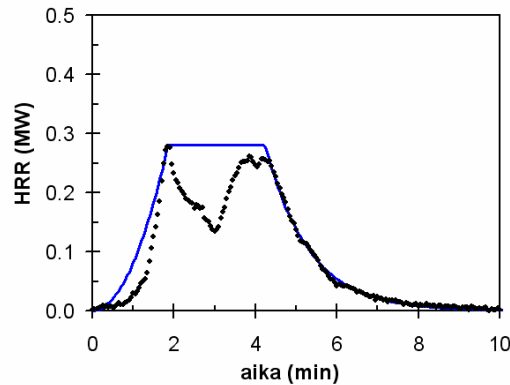
Rakennuksen 3. kerroksen tulipalon oletettiin saavan alkunsa radionauhurin syttymisestä. Herkkyystarkastelussa FDS-simuloinneissa käytettiin kahta nauhurin palotehoa (kuva B9) kuvaavaa palotehokäyrää, joista suuremman paloteho oli 100 kW (kasvunopeus 60 s) ja pienemmän 50 kW (kasvunopeus n. 120 s). Pienemmän nauhurin palotehokäyrä on laskettu vastaamaan samaa maksimipalotehoa pinta-alayksikköä kohden (n. 860 kW/m^2), joka saatiin Hietaniemen ym. [2001] tekemien televisioiden polttokokeiden tulosten perusteella.



Kuva B9. Rakennuksen kolmannen kerroksen tulipaloissa alkupaloina olleiden radionauhureiden palotehokäyrät.

Toimistopalossa käytetty alkupalon palotehokäyrä

Toimistotilan tulipaloon ensimmäisessä kerroksessa käytettiin VTT:ssä mitattua pahvilaatikon (koko n. 60 cm × 60 cm) palotehokäyrää [Hietaniemi & Mangs 2000], joka esitetään kuvassa B10.



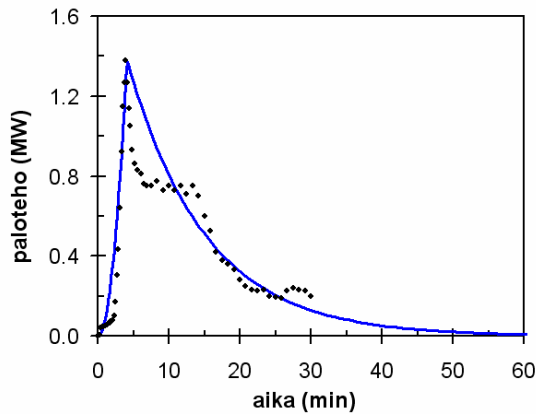
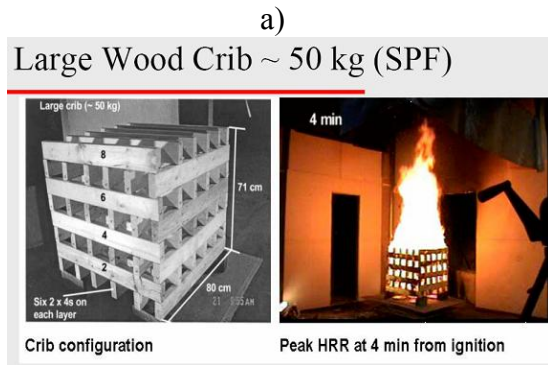
Kuva B10. Pahvilaatikon luovuttaman palotehon ajallinen kehittyminen.

Puumateriaalin palamisen palotehon arvioinnista

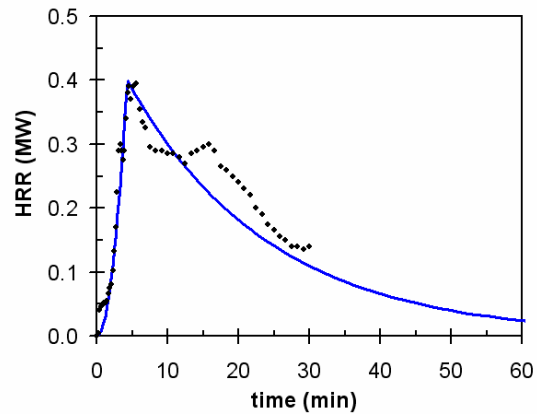
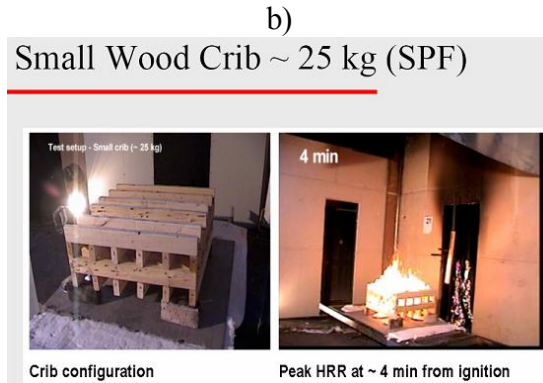
Tässä jaksossa kuvataan alkupaloon osallistuvan puumateriaalin palamisen mallintaminen seuraavasti:

1. Määritetään alkupaloon osallistuvan puumateriaalin määrä.
2. Käytetään koetuloksia tyypillisen, hyvin palavaan muotoon eli suhteellisen ohuen puutavaran muodostamaksi puutapuliksi kootun puutavaran luovuttaman palotehon mallintamiseen.
3. Sovelletaan koetulosten perusteella laadittua mallia kuvaamaan alkupaloon osallistuvan suuruisen puumäärän palamista.

Palon voimakkuuden mallintamisen lähtökohtana ovat puutapulien palotehomittauksissa saadut tulokset [Bwalya & Bounagui 2005], jotka mallinnetaan käyttäen mallia, jossa paloteho kasvaa ajan mukana neliöllisesti, kunnes se saavuttaa huippuarvonsa, minkä jälkeen palo hiipuu eksponentiaalisesti (kuva B11).



- kasvuaikekatelijä $t_g = 210$ s
- max. paloteho = 1,4 MW
- vapautuva lämpö = 1000 MJ
- hiipumisen aikavakio $\tau = 11$ min



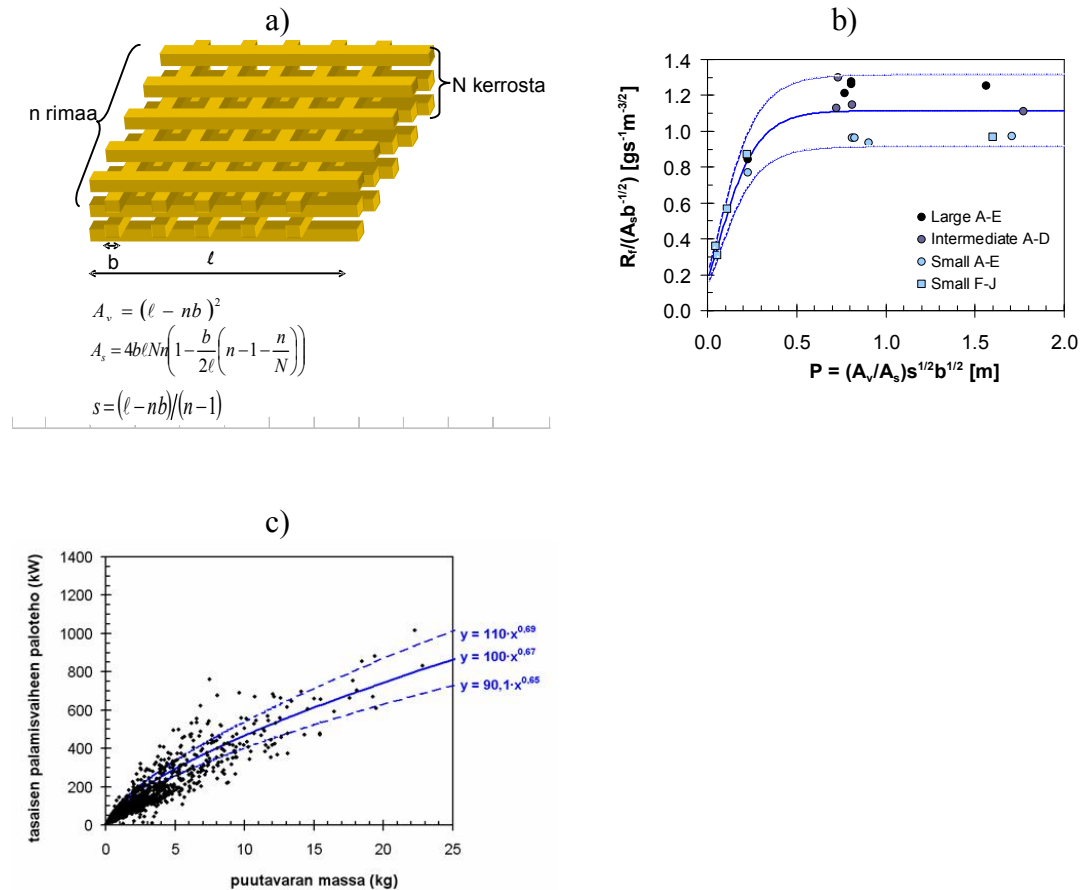
- kasvuaikekatelijä $t_g = 400$ s
- max. paloteho = 0,4 MW
- vapautuva lämpö = 500 MJ
- hiipumisen aikavakio $\tau = 20$ min

Kuva B11. Puutavaran palon voimakkuuden arviointi kuvaamalla NRC:ssä tehdyissä kokeissa [Bwalya & Bounagui 2005] saadut palotehon mittaustulokset t^2 -muotoisella funktiolla: a) 50 kg painava puutapuli ja b) 25 kg painava puutapuli.

Palon voimakkuus on luontevaa sitoa palavan materiaalin massaan, koska se on helposti ymmärrettävissä oleva konkreettinen suure, jonka suuruutta voidaan arvioida asiantuntija-arvioinnin avulla. Tämä voidaan tehdä käyttäen Crocen ja Xinin [2005] esittämää puutapulin palamisen mallia. Tässä mallissa kuvataan puutapulin palamisnopeutta R_f (kg/s) tapulin ominaisuuksien avulla kuvissa B12a ja B12b esitetyllä tavalla.

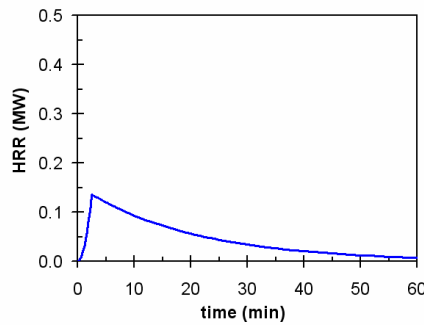
Palamisnopeus R_f voidaan muuntaa palamisen voimakkuudeksi eli palotehoksi käyttämällä tehollista lämpöarvoa $\Delta H_{c,eff}$ (materiaalin lämpöarvo kerrottuna palamisen epätäydellisyyttä kuvaavalla tekijällä). Tässä käytetään puulle ominaista vaihteluväliä $\Delta H_{c,eff} = 12 \dots 18$ MJ/kg. Kun otetaan huomioon myös Crocen ja Xinin [2005] mallin vaihteluväli ja annetaan puutavaran mittojen vaihdella tyypillisissä rajoissa (pituus 200...1200 m, paksuus 10...30 mm ja leveys 10...25 mm, rimojen määrä $n = 2 \dots 10$ ja

kerrosten määrä $N = 2 \dots 10$ ¹², saadaan tuloksena kuvassa B12c esitetty tapulin muotoon asetellun puutavaran palotehon riippuvuus tapulissa olevan puutavan massasta. Tätä riippuvuutta hyväksikäyttäen voidaan esittää kuvan B13 arvio 5 kg:n suuruisen puutavaran palamisen paloteholle. Kuvassa B13 esitetyn käyrän ja aika-akselin väliin jäävä pinta-ala vastaa 130 MJ:n energiamäärää, mikä on noin tekijällä 1,7 suurempi kuin 5 kg:n suuruisen puumäärän palamisessa todennäköisesti vapautuva lämpöenergia.



Kuva B12. Crocen ja Xinin [2005] malli puutapulin palamisnopeudelle: a) tapulin kuvaus, b) palamisnopeuden malli ja c) Monte Carlo -otokseen perustuen määritetty puutapulin palotehon riippuvuus puutavaran massasta (välillä 0–25 kg).

¹² Arvot on valittu siten, että puutapulin suurimmaksi massaksi tulee noin 25 kg, joka vastaa pienemmän mitatun [Bwalya & Bounagui 2005] puutapulin massaa.



Kuva B13. Puutapulin palo-ominaisuuksiin perustuva arvio palotehon ajalliselle kehitymiselle, kun puun massa on 5 kg.

Lämpötilan nousuun perustuva todennäköisyyspohjainen savuilmaisimalli

Savuilmaisimen toiminnan kuvaaminen lämpötilan nousuun perustuen

Paloalan kirjallisuudessa paloilmaisuuden mallintamisessa on useasti käytetty lämpöilmaisuimen toimintaan perustuvaa matemaattista mallia, jossa termien osa lämpenee kuumassa ilmapirtauksessa aktivoitumislämpötilaansa. Varsinaiset epäkohdat mallissa tulevat esiin silloin, jos palosta syntyvä lämpötila ei riitä nostamaan savua kohti kattoa. Tällaisia tilanteita voi aiheutua esim. silloin, kun palo on pieni suhteessa huonekorkeuteen. Myös savuilmaisimen tukkeutuminen esim. pölystä heikentää luonnollisesti ilmaisuuden toimintakykyä.

Termisen elementin lämpenemistä voidaan kuvata lämmönsiirtoyhtälöllä, jonka differentiaalimuotoinen esitystapa esitetään yhtälössä (B6) [Schifiliti ym. 2002]:

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{\tau} (T_g(t) - T_d), \quad (\text{B6})$$

missä T_d on ilmaisuuden lämpötila [$^{\circ}\text{C}$], T_g on palon synnyttämän kuumen kaason lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] ja τ aikavakio [s].

Aikavakio τ ilmaistaan ilmaisuuden vasteaikaindeksin RTI [$\text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$] ja kaasun virtausnopeuden u [m/s] avulla seuraavasti:

$$\tau = \frac{RTI}{\sqrt{u(t)}}. \quad (\text{B7})$$

Vasteaikaindeksi RTI kuvaa elementin lämpenemisen hitautta, silloin kun elementti on kuuman kaasukerroksen sisällä. Usein RTI määritetään kokeellisesti.

Palopatsasmalleista mm. Alpertin korrelaatioita [Alpert 2002] käyttämällä saadaan laskeksi kuuman kaasukerroksen lämpötila T_g

$$T_g(t) = 5.38 \frac{\dot{Q}(t)^{2/3} / H^{5/3}}{(r/H)^{2/3}}, \text{ kun } r/H > 0.18, \quad (\text{B8})$$

sekä kaasukerroksen virtausnopeus u

$$u(t) = 0.195 \frac{(\dot{Q}(t)/H)^{1/3}}{(r/H)^{5/6}}, \text{ kun } r/H > 0.15, \quad (\text{B9})$$

jossa \dot{Q} on paloteho [kW], H huoneen korkeus [m], r katossa sijaitsevan termisen elementin säteensuuntainen etäisyys palopatsaan keskijonjalta [m].

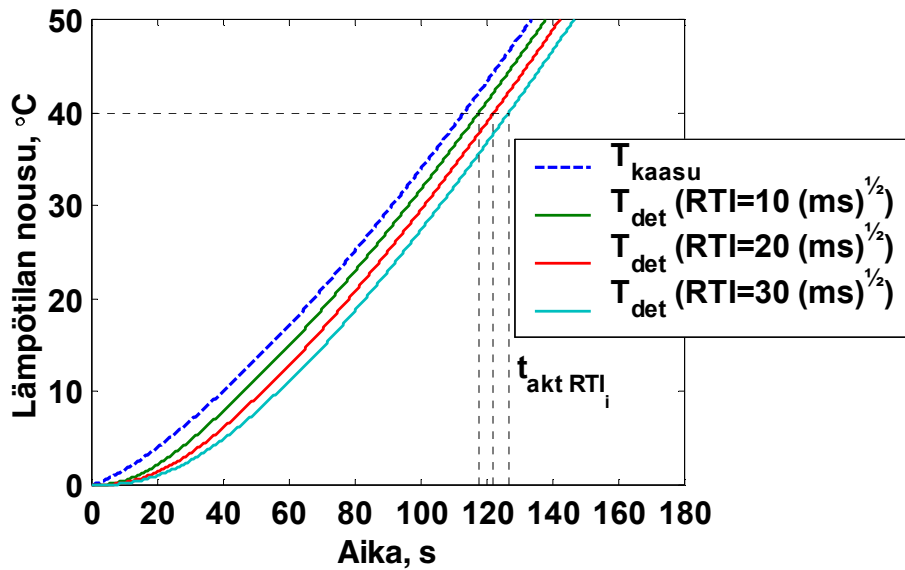
Paloteho \dot{Q} on ilmaistu palon neliöllisen kasvunopeuden mukaan seuraavasti:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{ref} \left(\frac{t}{t_g} \right)^2, \quad (\text{B10})$$

missä t_g on palon kasvunopeus [s] ja \dot{Q}_{ref} referenssipaloteho (1000 kW), johon paloteho \dot{Q} kasvaa ajan t kuluessa.

Sijoittamalla yhtälöön (B6) kuuman kaasukerroksen lämpötilan yhtälö (B8) eri ajan hetkinä sekä kuuman kaasukerroksen virtausnopeuden yhtälö (B9) voidaan yhtälö (B6) nyt ratkaista numeerisesti (kuva B14) esim. Forward Euler -integrointimenetelmällä:

$$T_d(t_k + t_{k+1}) = T_d(t_k) + \frac{\sqrt{u(t_k)}}{RTI} (T_g(t_k) - T_d(t_k))(t_{k+1} - t_k). \quad (\text{B11})$$



Kuva B14. Esimerkki yhtälön (B11) ratkaisemiseksi, jossa ilmaisimen aktivoitumislämpötilaksi asetettu $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ympäristön lämpötilaa korkeampi). Esimerkissä palon kasvunopeus $t_g = 60\text{ s}$.

Savuilmaisimen toimintaa kuvaava RTI-arvo ja laukeamislämpötila

Puuttuva informaatio yhtälössä (B11) liittyy ilmaisimen vasteaikaindeksiin RTI sekä ilmaisimen laukeamislämpötilaan, jotta voitaisiin laskea ilmaisimen laukeamisajankohki t_{act} . Bukowskin ja Averillin tutkimuksessa [1998] havaittiin savuilmaisimien reagoivan n. $4\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilan nousuun, joten vasteaikaindeksin voidaan olettaa olevan tämän perusteella varsin pieni. Brittiläisessä paloturvallisuussuunnitteluoppaassa [FSE 1997a] annetaan yksinkertainen malli savuilmaisimen mallintamiselle käyttämällä RTI-arvoa $0,5\text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ ja lämpötilan nousulle arvoa $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tämän kuitenkin todetaan olevan ”konservatiivinen lähestymistapa” [FSE 1997b]. Vertailun vuoksi esim. *Quick response* -tyyppisten sprinklereiden RTI-arvo on tyypillisesti alle $50\text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$. Amerikkalaisen vakuutusyhtiön FM-Globalin sprinklerihyväksynnöissä¹³ mainitaan *Quick response* -sprinklereiden RTI-arvona myös $30\text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$.

Savuilmaisimen laukeamislämpötilaa voidaan approksimoida [Schifiliti ym. 2002] tulipalosta syntyvien partikkeleiden avulla siten, että oletetaan optisen tiheyden D olevan verrannollinen palosta syntyvien partikkeleiden massakonsentraatioon C , jolloin

¹³ Standardi nro 2000. Automatic Sprinklers for Fire Protection. Lähde: www.fmglobal.com.

$$D \propto C. \quad (\text{B12})$$

Konsentraation C voidaan edelleen olettaa olevan verrannollinen palosta syntyvän lämpötilan muutokseen ΔT eli

$$C \propto \Delta T, \quad (\text{B13})$$

josta päästään lopulliseen relaatioon lämpötilan muutoksen ja savun optisen tiheyden välillä yhdistämällä yhtälöt (B12) ja (B13), joista saadaan tulokseksi

$$\frac{\Delta T}{D} = \text{vakio}, \quad (\text{B14})$$

eli savun optisella tiheydellä ja lämpötilan muutoksella on lineaarinen yhteys.

Optinen savutiheys D [1/m] voidaan ilmoittaa seuraavasti:

$$D = \frac{1}{L} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right), \quad (\text{B15})$$

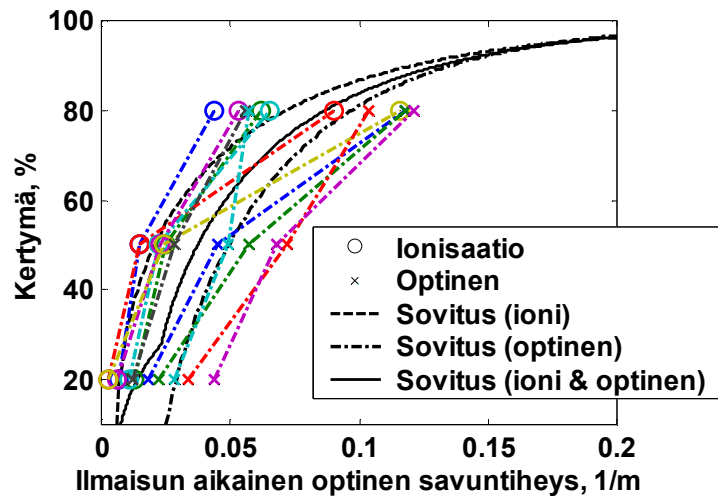
jossa I on savukerroksen L [m] läpi kulkeneen valon säteen intensiteetti ja I_0 vastaavasti savuttoman matkan kulkeneen valon säteen intensiteetti. Sama asia voidaan ilmoittaa myös ns. vaimennuskertoimen K [1/m] avulla seuraavasti:

$$K = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right), \quad (\text{B16})$$

jolloin vaimennuskertoimen k ja savun optisen tiheyden D välillä on yhteys:

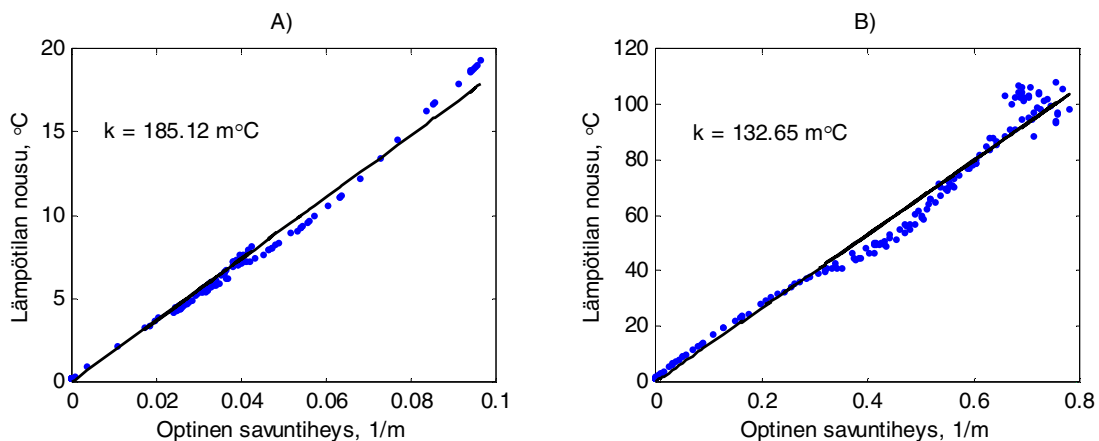
$$D = \frac{K}{\ln(10)} \approx \frac{K}{2.3}. \quad (\text{B17})$$

Geiman ja Gottuk (2003) keräsivät tutkimukseensa tietoa erityyppisten savuilmamaisimien toiminnasta. Tulokset ilmoitettiin toimintavarmuutta kuvaavien 20 %, 50 % ja 80 %:n fraktiilien avulla erisuuruista savuilmamaisinjoukoista. Kuvassa B15 esitetään kyseiset fraktiilit savuilmamaisimen ulkopuolisen savutiheyden funktiona sekä tätä tutkimusta varten tehdyt gammajakaumasovituksot pistejoukkoon.



Kuva B15. Pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettu gammajakauma pistejoukkoon, jossa on sekä ionisaatioon että optiseen savunilmaisuun perustuvien savuilmatisimien eri fraktiilit ilmaisuun vaaditun savuntiheysarvon funktiona. Datapisteet otettu lähteestä Geiman ja Gottuk [2002].

Poistumislaskentoja varten simuloituista paloskenaarioista analysoitiin paikallista lämpötilaa ja vaimennuskertoimen k arvoa samasta pistemäisestä kohdasta, jotta saataisiin arvio siitä, mikä on yhtälössä (B14) mainitun vakion suuruus. Kuvassa B16 esitetään paloilmatisimien paikoilla olevien paloilmatisimien paikalliset lämpötilan muutokset sekä optiset savuntiheysarvot (jälkimmäinen suure on saatu FDS:n tulossuureen vaimennuskertoimen K ja yhtälön (B17) avulla) informaatiokopin palokuormaltaan suuremmasta palosta ja sähkölaitteesta syttyneestä palosta.



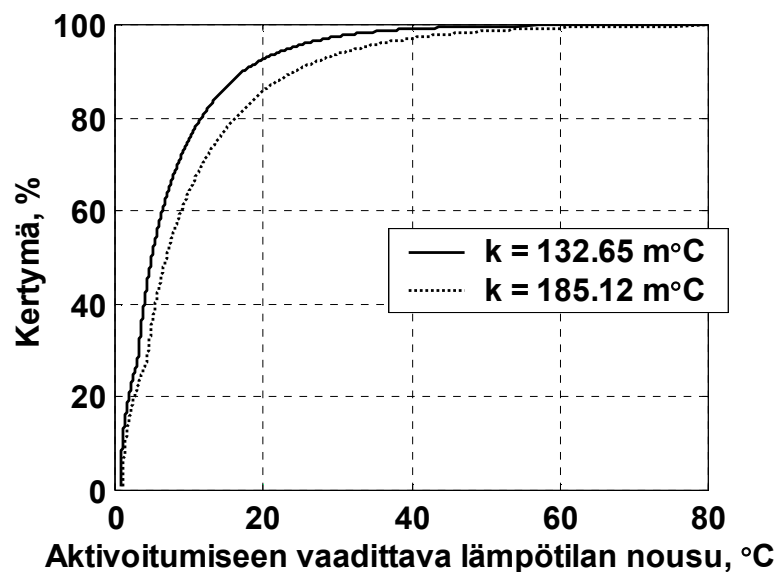
Kuva B16. Lämpötilan nousun ja optisen savuntiheyden välinen relaatio kahdessa eri paloskenaariossa, a) sähkölaitteesta 3. kerroksessa alkaneessa tulipalossa ja b) aulatilin tulipalossa. Lämpötila- ja savuntiheysarvot on määritetty paloilmatisimien sijaintipaikoista (katon läheisyydessä ja noin 3,5 m etäisyydellä palopatsaan keskilinjasta) ensimmäisen 3 minuutin ajalta.

Kuvan B16 kulmakertoimen arvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin Björkmanin ym. [2002] työssä, jossa lämpötilan ja optisen savuntiheyden välillä kulmakertoimen arvot olivat heptaanipalossa $500 \text{ m}^\circ\text{C}$ ja polyuretaanipalossa $90 \text{ m}^\circ\text{C}$:n luokkaa. Tietokonepöydän palossa ja informaatiokoppipalossa 2 ilmaisimen sijaintipaikan lämpötilan ja optisen savuntiheyden välinen kulmakerroin oli samaa suuruusluokkaa kuin tapauksessa A (kuva B16). Tuhopolttoskenaariossa kulmakerroin oli tapauksen B kaltainen (kuva B16).

Kuvista B15 ja B16 saatu informaatio voidaan nyt yhdistää ja muodostaa lämpötilan nousuun perustuva todennäköisyypohjainen savuilmaisinmalli

$$F(OD) = k \cdot OD, \quad (\text{B18})$$

jossa F on kuvan B15 kertymäfunktion arvo kussakin ilmaisun aiheuttaneen optisen savuntiheyden OD pisteessä kuvan B15 mukaisesti. Lämpötilamuunnos tapahtuu yksinkertaisesti kuvasta B16 saatujen kulmakertoimen k [m°C] arvojen kautta. Yhtälöä (B18) havainnollistetaan kuvassa B17.



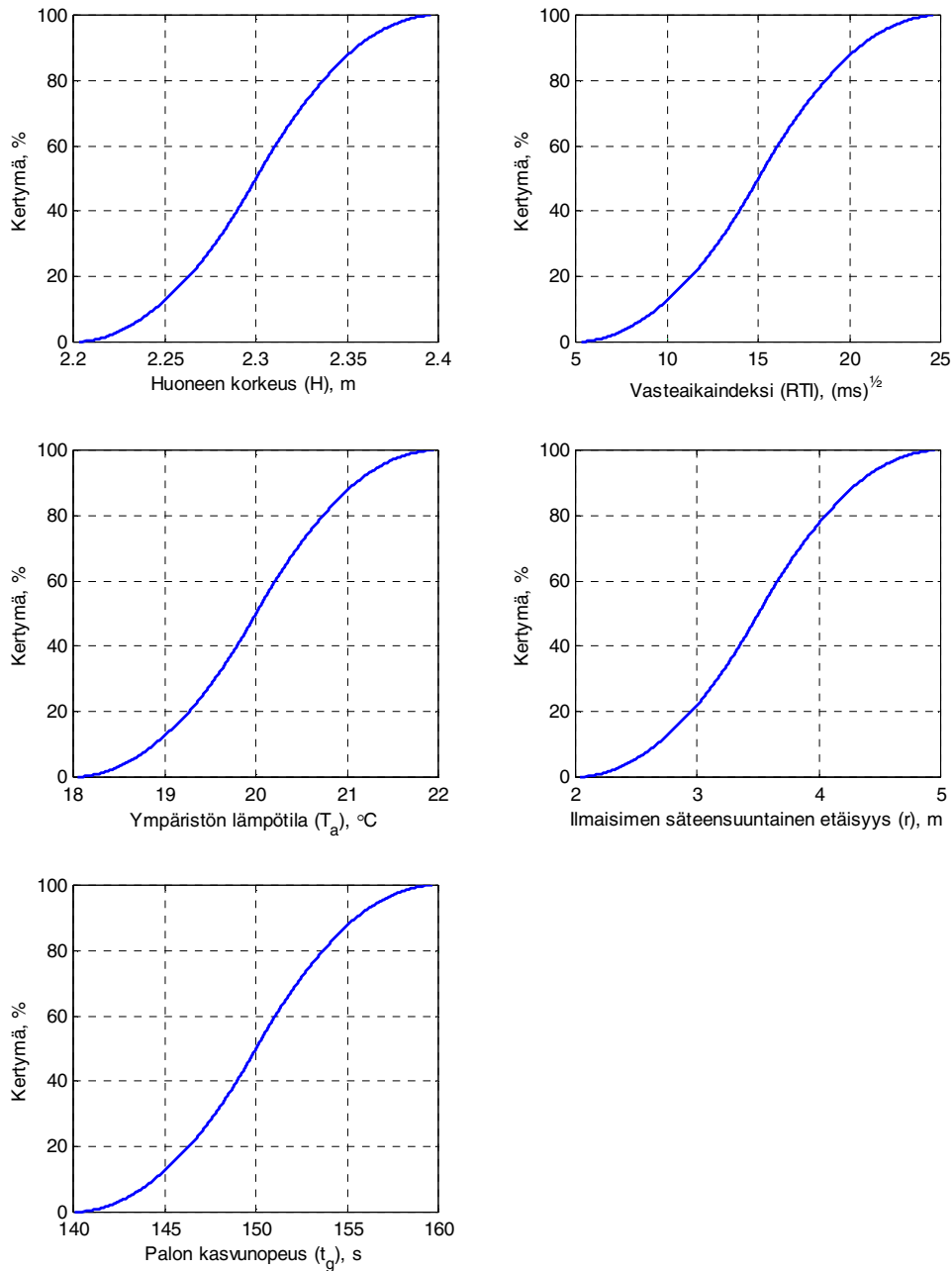
Kuva B17. Savuilmaisinimen lämpötilan nousuun perustuva todennäköisyypohjainen paloilmaisinmalli.

Savuilmaisinimen aktivoitumisajan laskemista varten tarvitaan yhtälön (B11) ja kuvan B17 mukaan seuraavat syöteparametrit:

- huoneen korkeus H

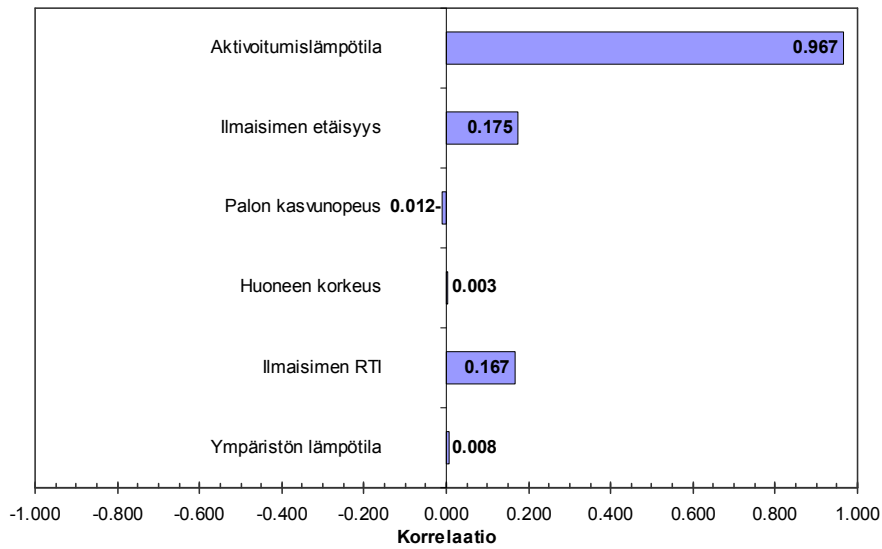
- ilmaisimen säteensuuntainen etäisyys palopatsaasta r
- ilmaisimen vasteaikaindeksi RTI
- palon kasvunopeus t_g
- ympäristön lämpötila T_a
- ilmaisimen aktivoitumislämpötila T .

Kirjallisuuden ollessa niukkaa liittyen savuilmalaisimien RTI-arvojen mallinnukseen on tässä tutkimuksessa päädytty käyttämään RTI-arvoille kolmiojakaumaa. Vasteaikaindeksin sekä muiden syöteparametrien kolmiojakaumien kertymäfunktioit esitetään kuvassa B18.



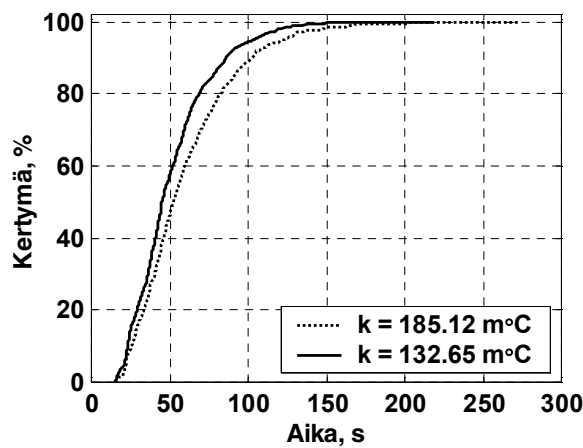
Kuva B18. Savuilmaisimen laukeamisajan laskemiseen tarvittavien syöteparametrien kolmiojakaumien kertymäfunctiot. Kussakin kuvassa on arvottuna 1000 satunnaislukua vaaka-akselin kuvaamalta väliltä min–max keskiarvon ollessa kolmiojakauman huippuarvo.

Syöteparametrien herkkyyttä kuvaavalla korrelaatiolla voidaan tarkastella, mikä syötteistä vaikuttaa eniten tulossuureeseen. Kuvasta B19 nähdään, että kaikkein suurin vaikutus aktivoitumisaikaan on (luonnollisesti) aktivoitumislämpötilalla, jonka jälkeen seuraavaksi merkittävin syötteistä on ilmaisimen etäisyys palopatsaan keskilinjalta. Vasta kolmantena tulee vasteaikaindeksin osuus.



Kuva B19. Korrelaatiokertoimet kuvan B18 parametreille. Suuren positiivisen korrelaation omaavalla parametrilla on lopullista tulosta kasvattava vaikutus, kun taas pienillä negatiivisilla arvoilla on lopullista tulosta pienentävä vaikutus.

Kuvassa B20 esitetään edellä olevan yhtälön (B11) ja kuvan B17 mukaan tässä työssä käytetyn todennäköisyyspohjaisen savuilmaisinmallin kertymäkuvaaja ilmaisimen laukeamisajan funktiona.



Kuva B20. Lämpötilan nousuun perustuvan todennäköisyyspohjaisen savuilmaisinmallin kertymäkuvaaja ilmaisimen laukeamisen keston kuluva ajan funktiona.

FDS-mallissa käytetyt materiaalien ominaisuudet

Palosimuloinneissa käytettiin muokattua puun palamisreaktiota, jossa hiilimonoksidin (CO) tuotoksi oletettiin 1 % taulukon B2 mukaisesti.

Taulukko B2. Palosimuloinneissa käytetyn puun palamisreaktion tiedot FDS-mallia varten.

Ominaisuus	FDS-avainsana	Arvo	Yksikkö
Noen tuotto	SOOT_YIELD	1	%
Hiilimonoksidin tuotto	CO_YIELD	1	%
Hapen stoikiometrinen kerroin	NU_O2	3,7	–
Hiilidioksidin stoikiometrinen kerroin	NU_CO2	3,4	–
Veden stoikiometrinen kerroin	NU_H2O	3,1	–
Puun molekyyli­massa	MW_FUEL	87	g/mol
Yhtä hapen massayksikköä kohden vapautuva energia	EPUMO2	11020	kJ/kg

Taulukossa B3 esitetään FDS-simuloinneissa käytettyjen materiaalien fysikaaliset ominaisuudet.

Taulukko B3. FDS-mallissa käytetyt materiaalien ominaisuudet.

	Ominaisuus	FDS-avainsana	Arvo	Yksikkö
Huonekalut ja näyttelyesineet	Paksuus	DELTA	0,015	m
	Syttymislämpötila	TMPIGN	320	°C
	Höyrystyslämpö	HEAT_OF_VAPORIZATION	400	kJ/kg
	Palamislämpö	HEAT_OF_COMBUSTION	15000	kJ/kg
	Tiheys	DENSITY	650	kg/m ³
	Lämmönjohtavuus	KS	0,15	W/(m K)
	Maksimipalamisnopeus	BURNING_RATE_MAX	0,0080	kg/(m ² s)
	Kosteuspitoisuus (m _w /m _{tot})	MOISTURE_FRACTION	0,05	–
Kivilattiat ja kiviseinät	Paksuus	DELTA	0,1	m
	Tiheys	DENSITY	2100	kg/m ³
	Lämmönjohtavuus	KS	1,0	W/(m K)
	Ominaislämpökapasiteetti	C_P	0,88	kJ/(kg K)
Ikkunat *	Paksuus	DELTA	0,005	m
	Tiheys	DENSITY	2700	kg/m ³
	Lämmönjohtavuus	KS	0,76	W/(m K)
	Ominaislämpökapasiteetti	C_P	0,84	kJ/(kg K)
Lautalattiat ja -katot	Paksuus	DELTA	0,015	m
	Syttymislämpötila	TMPIGN	400	°C
	Höyrystyslämpö	HEAT_OF_VAPORIZATION	400	kJ/kg
	Palamislämpö	HEAT_OF_COMBUSTION	15000	kJ/kg
	Tiheys	DENSITY	650	kg/m ³
	Lämmönjohtavuus	KS	0,15	W/(m K)
	Maksimipalamisnopeus	BURNING_RATE_MAX	0,0080	kg/(m ² s)
	Kosteuspitoisuus (m _w /m _{tot})	MOISTURE_FRACTION	0,1	–
Palosuojattu puu	Paksuus	DELTA	0,03	m
	Syttymislämpötila	TMPIGN	350	°C
	Höyrystyslämpö	HEAT_OF_VAPORIZATION	500	kJ/kg
	Palamislämpö	HEAT_OF_COMBUSTION	15000	kJ/kg
	Tiheys	DENSITY	500	kg/m ³
	Lämmönjohtavuus	KS	0,9	W/(m K)
	Ominaislämpökapasiteetti	C_P	4,0	kJ/(kg K)
	Maksimipalamisnopeus	BURNING_RATE_MAX	0,0036	kg/(m ² s)
Kosteuspitoisuus (m _w /m _{tot})	MOISTURE_FRACTION	0,35	–	

* Ikkunoiden oletettu särkyvän 400 °C:ssa, paitsi simulointitapauksessa A (3. ja 2. kerroksen välinen ikkuna portaikossa).

Liitteen B lähdeluettelo

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

Alpert, R. 2002. Ceiling Jet Flows. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3. painos. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-18–2-31. ISBN 087765-451-4.

Babrauskas, V. 2002. Heat Release Rates. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-1–3-37. ISBN 087765-451-4.

Björkman, J., Baroudi, D., Latva, R., Tuomisaari, M. & Kokkala, M. 2002. Determination of dynamic model parameters of smoke detectors. Fire Safety Journal, Vol. 37, No. 4, s. 395–407.

Bukowski, R. & Averill, J. 1998. Methods for Predicting Smoke Detector Activation. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. S. 64–72.

Bwalya, A. & Bounagui, A. 2005. A Case Study: Developing a Design Fire for an Experimental Study of Residential Basement Fires. Workshop on Design Fires, 10 May 2005. Ottawa, Ontario: National Research Council Canada. 30 s.

CEN 2002. Eurocode 1 – Rakenteiden kuormat. Osa 1–2: Yleiset kuormat – palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. (SFS-EN 1991-1-2.)

Croce, P. A. & Xin, Y. 2005. Scale modeling of quasi-steady wood crib fires in enclosures. Fire Safety Journal, Vol. 40, s. 245–266.

Dey, M. 2002. Evaluation of Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Cable Tray Fires. International Panel Report. NISTIR 6872. 333 s.

FSE 1997a. Fire Safety Engineering in Buildings. Part 1: Guide to the application of fire safety engineering principles. Lontoo: BSI. 102 s.

FSE 1997b. Fire Safety Engineering in Buildings. Part 2: Commentary on the equations given in part 1. Lontoo: BSI. 12 s.

Geiman, J. & Gottuk, D. 2003. Alarm Thresholds for Smoke Detector Modeling. Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium. Worcester, MA: International Association for Fire Safety Science. S. 197–208.

Hietaniemi, J. & Mangs, J. 2000. Pahvilaatikon palotehon mittaus. VTT: Julkaisematon tutkimus.

Hietaniemi, J., Mangs, J. & Hakkarainen, T. 2001. Burning of Electrical Household Appliances. An Experimental Study. VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2084. Espoo: VTT. 60 s. + liitt. 23 s. ISBN 951-38-5802-2. Saatavilla osoitteesta: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2084.pdf>.

Karlsson, B. & Quintiere, J. G. 2000. Enclosure Fire Dynamics. Boca Raton: CRC Press LLC. 315 s. ISBN 0.8493-1300-7.

Lee, B. T. 1985. Heat Release Rate Characteristics of Some Combustible Fuel Sources in Nuclear Power Plants. NBSIR 85-3195. National Bureau of Standards.

McGrattan, K. B., Baum, H. R., Walton, W. D. & Trelles, J. 1997. Smoke plume trajectory from in situ burning of crude oil in Alaska – field experiments and modeling of complex terrain. NISTIR 5958. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 83 s. + liitt. 44 s.

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

Schifiliti, R., Meacham, B. & Custer, R. 2002. Design of Detection Systems. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3. painos. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 4-1–4-43. ISBN 087765-451-4.

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. S. 3-82–3-161. ISBN 087765-451-4.

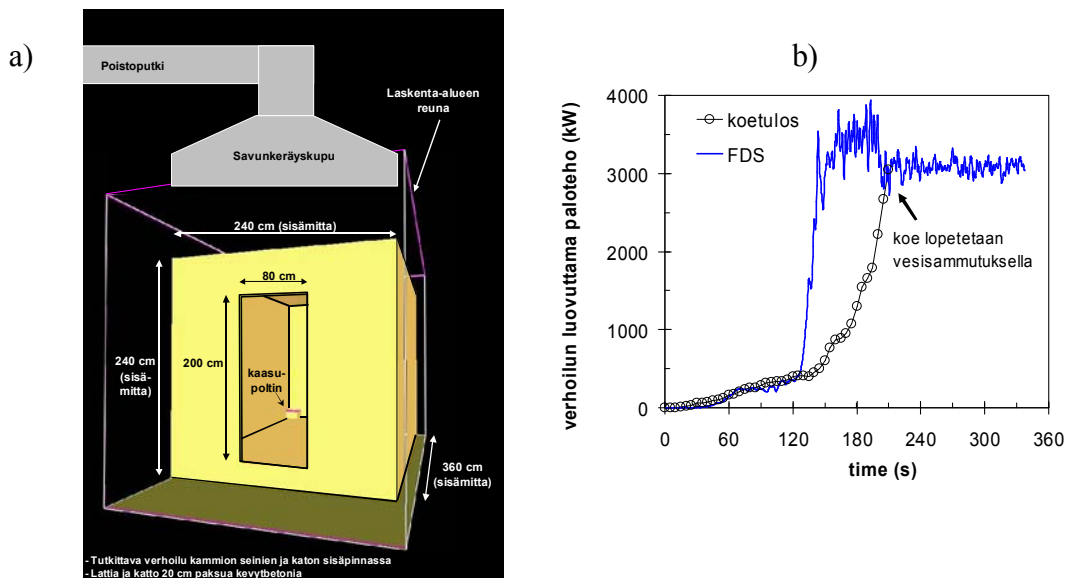
Liite C: Mallien kelpoisuudesta

FDS-mallin materiaaliominaisuudet

FDS-ohjelman kelpoisuuden todentamiseksi on tehty paljon laskettujen tulosten ja vastaavien koetulosten vertailuja (kirjallisuusviitteitä näihin tutkimuksiin on esitetty luvussa 16). Ohjelman kelpoisuudessa on erotettavissa kaksi tekijää:

- laskentaohjelman lämmönsiirto-, virtaus- ym. mallien toimivuus, joka ohjelmia oikein (so. mallien rajojen puitteissa) käytettynä on suurelta osin käyttäjästä riippumatonta
- eri materiaalien ja tuotteiden palamisen mallintaminen, joka puolestaan on täysin ohjelman käyttäjän vastuulla, koska hän valitsee arvot niille lukuisille parametreille, jotka ohjaavat sitä, miten ohjelma kunkin materiaalin tai tuotteen palamisen laskee.

Tässä liitteessä esitetään esimerkki Porvoon museon FDS-mallinnuksessa käytetyn puupohjaisten materiaalien palamisen kuvaamisen kelpoisuudesta. Kuvassa C1 verrataan VTT:n palokammiokoelaitteesta (ISO 9705) puulle (mäntypaneeli) mitattua palotehoa FDS-ohjelmalla laskettuun tulokseen, jossa puumateriaalille on käytetty samaa mallia kuin Porvoon museon palonsimuloinneissa. Porvoon museon palonsimuloinneissa käytetyn palamismallin voidaan todeta tuottavan hieman herkemmin palavan tuloksen, mikä nähdään lieskahduksen jyrkemmästä kehitymisestä.



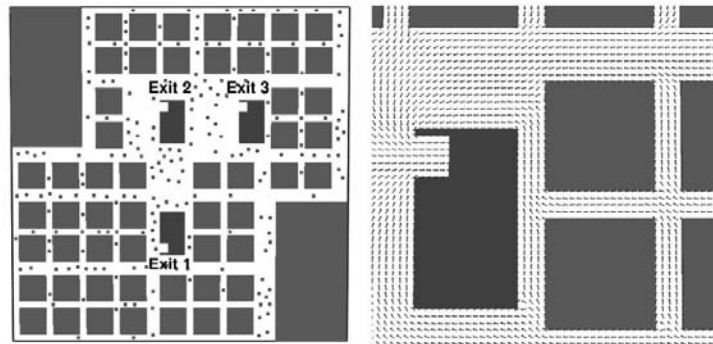
Kuva C1. a) Palokammiokoelaitte (ISO 9705) ja b) puun palokammiokokeen palotehon mittaustuloksen vertaaminen FDS-ohjelmalla laskettuun tulokseen, jossa puumateriaalille on käytetty samaa mallia kuin Porvoon museon palonsimuloinneissa.

FDS+Evac-poistumislaskentamalli

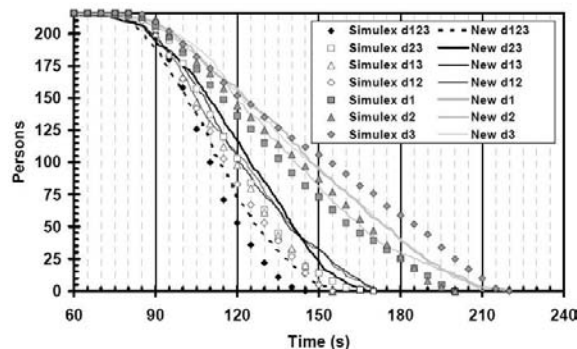
FDS+Evac-ohjelman kelpoisuutta on todennettu vertaamalla sillä laskettuja tuloksia vastaaviin, paloturvallisuussuunnittelussa vakiintuneen aseman saavuttaneilla ohjelmilla (esim. Simulex-ohjelma) laskettuihin tuloksiin, joita tässä yhteydessä tarkastellaan perustuen viitteisiin Korhonen ym. [2005a ja 2005b] ja Thompson ja Marchant [1995].

Tapaus A: Avokonttori. A koostuu monikerroksisen toimistotalon yhdestä kerroksesta, jonka pohjapiirros on kuvassa C2. Kerros on $40 \times 40 \text{ m}^2$ suuruinen. Kerroksen henkilömäärä on 216. Henkilöiden ominaisuudet on valittu vastaamaan Simulex-ohjelman toimistohenkilöstön ryhmää.

Poistumisaikalaskelmien tulokset tapauksesta A esitetään kuvassa C3. Ne osoittavat, että FDS+Evac- ja Simulex-ohjelmat antavat varsin yhteneväiset tulokset.



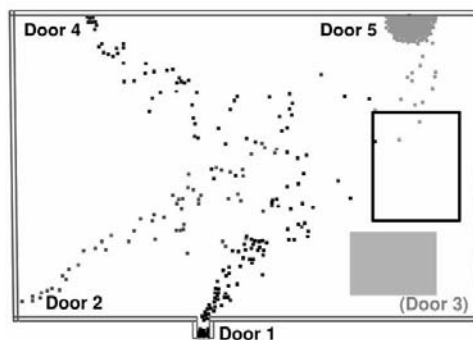
Kuva C2. Vasemmalla tilanteen A pohjapiirros sekä poistuvien ihmisten satunnaiset alkupaikat. Oikealla yksityiskohta käytetystä ihmisistä ohjaavasta virtauskentästä.



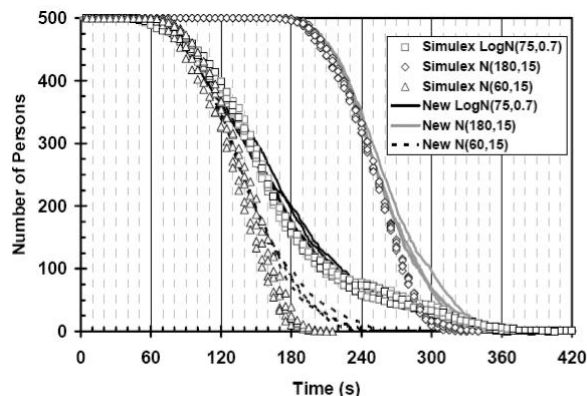
Kuva C3. FDS+Evac- ja Simulex-ohjelmilla laskettujen poistumisaikojen jakauma tilanteessa A. Merkinnät viittaavat käytettyihin avoimien ovien yhdistelmiin.

Tapaus B: Urheiluhalli. Urheiluhallia käytetään jalkapallon ja yleisurheilun harjoitte- luun. Hallissa ei ole katsomoita eikä sosiaalitiloja. Tulipalon oletetaan syttyvän kuvaan C4 merkityllä harmaalla alueella. Lisäksi oletetaan, että 235 henkilöä käyttää ovea 5, 130 henkilöä käyttää ovea 1, 60 henkilöä käyttää ovea 2 ja 75 henkilöä käyttää ovea 4.

Poistumisaikalaskelmien tulokset (kuva C5) tapauksesta B osoittavat, että tulokset ovat sopusoinnussa Simulex-ohjelman antamiin tuloksiin. Eroja muodostuu silloin, kun rea- gointivaiheen jakaumat ovat kapeita, jolloin syntyy ruuhkatilanteita. Näissäkin tapauk- sissa FDS+Evac antaa pidemmän poistumisajan.



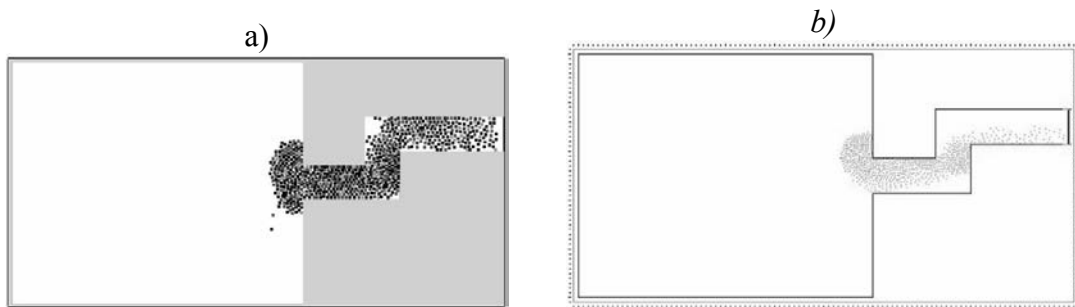
Kuva C4. Hetkellinen kuva poistumisesta FDS+Evac-simuloinnilla tapauksessa B. Ovien leveydet: ovi 1 = 1,8 m, ovet 2 ja 3 = 4,0 m sekä ovet 4 ja 5 = 0,9 m. Harmaalla merkitty tulipalon sijainti (oven 3 läheisyydessä). Neliöllä kuvattu aluetta, jossa ihmiset sijaitsevat palon syttymishetkellä.



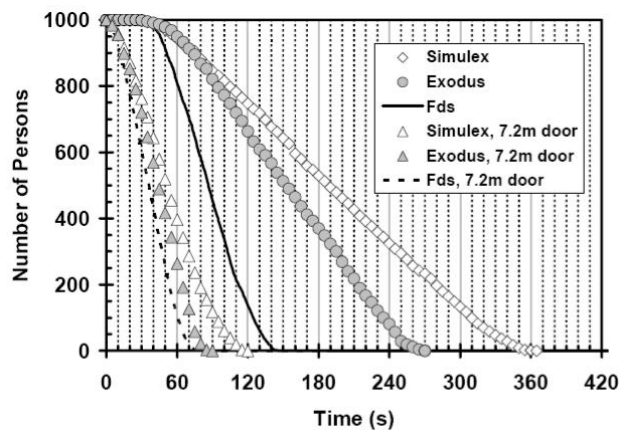
Kuva C5. Tilanteen B simulointi FDS+Evac- ja Simulex-ohjelmilla. Selitteen teksti viittaaavasti käytettyihin reagointivaiheen jakaumiin (keskiarvo/hajonta).

Tapaus C: Kuvitteellinen kokoontumistila. Tila on $50 \times 60 \text{ m}^2$ kokoinen kuvitteellinen kokoontumistila. Tilasta johtaa ulos vain yksi 7,2 m leveä käytävä. Palon syttymishet- kellä tilassa on 1000 henkilöä jakautuneena satunnaisesti läpi tilan. Kuvassa C6 esite- tään kohteen geometria sekä tuokiokuvat FDS+Evac- ja Simulex-poistumisohjelmista.

Kuvassa C7 esitetään poistumisaikalaskelmien tulokset, joissa FDS+Evac-ohjelmaa verrataan Simulex-ohjelman lisäksi toiseen buildingExodus-poistumisohjelmaan. Tuloksista nähdään (kuva C7), että poistumisajoissa on suuria eroja ohjelmien kesken. Erot johtuvat tavasta, jolla henkilöt hyödyntävät poistumisreitintilaa (kuva C6). Kun käytävää on poistettu ja korvattu 7,2 m leveällä ovella, tulokset ovat huomattavasti lähempänä toisiaan.



Kuva C6. Tuokiokuvia tilanteen C laskennan ajalta a) FDS+Evac- ja b) Simulex-ohjelmalla.



Kuva C7. Vertailu FDS+Evac-, buildingExodus- ja Simulex-ohjelmilla lasketuista poistumisajoista tilanteessa C.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tilanteissa A ja B yhteensopivuus FDS+Evac- ja Simulex-ohjelmalla on hyvä. Ohjelmien tekniset eroavaisuudet ilmenivät parhaiten tapauksessa C.

Liitteen C lähdeluettelo

Korhonen, T., Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. 2005a. A Proposal for the Goals and New Techniques of Modelling Pedestrian Evacuation in Fires. Fire Safety Science—Proceedings of the 8th International Symposium, Beijing, China. International Association for Fire Safety Science. 11 s.

Korhonen, T., Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. 2005b. Poistumisaikalaskelmat palotilanteissa. Palontorjuntatekniikka 2005 (Erikoisnumero), s. 106–110.

Thompson, P. A. & Marchant, E. W. 1995. A computer model for the evacuation of large building populations. Fire Safety Journal, Vol. 24, s. 131–148.

Liite D: Riskianalyttisten menetelmien kuvauksia

Monte Carlo -simulointi

Monte Carlo -simulointi¹⁴ on suoraviivainen tekniikka laskea tarkastelun kohteena olevien suureiden epävarmuuksia. Sitä käyttäen saadaan laskettua myös approksimaatio tarkastelusuureen arvojen todennäköisyyden kertymäfunktiolle.

Menetelmää voidaan pitää suoraviivaisena siksi, että sen lähestymistapa on klassisen todennäköisyyskäsitteen mukainen. Klassisen todennäköisyyden määritelmän mukaan tietyn tapahtuman A todennäköisyys p_A on pitkässä havaintosarjassa esiin tulleiden tapahtumien A osuus kaikista tapahtumista. Matemaattisesti tämä voidaan ilmaista seuraavasti: Tarkastellaan N kpl havaintoja. Näistä havainnoista tapahtumia A on N_A kpl. Tällöin tapahtuman A todennäköisyys on

$$p_A^{\text{true}} = \frac{N_A}{N}, \text{ kun } N \rightarrow \infty \quad (\text{klassinen todennäköisyys}). \quad (\text{D1})$$

Empiirisesti tietyn tapahtuman todennäköisyyttä voidaan arvioida tekemällä suuri määrä havaintoja ja laskemalla, montako kertaa tarkasteltava tapahtuma esiintyy havaintojoukossa (esim. arpanopan eri silmälukujen esiintymistodennäköisyyttä voidaan tutkia heittämällä noppaa useita kertoja; jos noppa on ideaalisen symmetrinen, eri silmälukujen osuudet lähestyvät heittokertojen määrän kasvaessa arvoa $1/6$).

Kun Monte Carlo -menetelmää käytetään todennäköisyyden arviointiin, toimitaan samalla tavoin kuin klassisen todennäköisyyden empiirisessä määrittämisessä: siinä tehdään suuri määrä kokeita laskennallisesti ja tietyn tapahtuman todennäköisyys saadaan niiden laskentatulosten osuutena, joissa laskettu arvo vastaa kyseistä tapahtumaa. Esimerkiksi jos tarkastellaan kuormitetun palkin pettämistä sen vuoksi, että kuorma ylittää palkin kantokyvyn, pettämisen (tapahtuma A) todennäköisyyden Monte Carlo -estimaatti p_A^{MC} on niiden laskentatulosten osuus (lukumäärä N_A) kaikista tehdyistä laskentakerroista, N :

$$p_A^{\text{MC}} \approx \frac{N_A}{N} \quad (\text{Monte - Carlo - likiarvo}). \quad (\text{D2})$$

¹⁴ Nimityksellä Monte Carlo ei sinänsä ole mitään erityistarkoitusta. Se on saanut alkunsa ydinaseiden kehitystyön koodinimityksestä Los Alamosin laboratoriosta toisen maailmansodan aikana ja viittaa toisaalta myös tunnettuun pelikasinoon, jossa käsitellään riskejä [Haldar & Mahakevan 2000, s. 251]. Sana simulointi tarkoittaa menetelmää, jolla tutkimustarkoituksessa jäljitellään jotakin tapahtumaa. Tässä on kyse nimenomaan laskennallisesta menetelmästä.

Monte Carlo -laskennan antama likiarvo paranee laskentatulosten (eli numeeristen koe-tulosten) lukumäärän N kasvaessa. Todennäköisyysestimaatin p_A^{MC} suhteellinen epävarmuus riippuu lukumäärästä N ja tarkasteltavan tapahtuman todellisesta todennäköisyydestä p_A^{true} (jonka eksakti arvo yleensä on tuntematon) seuraavasti [Haldar & Mahakevan 2000, s. 259]:

$$\varepsilon(N, p_A^{\text{true}}) = \frac{p_A - p_A^{\text{true}}}{p_A^{\text{true}}} = 200\% \times \sqrt{\frac{(1 - p_A^{\text{true}})}{N \cdot p_A^{\text{true}}}}. \quad (\text{D3})$$

Jos tarkasteltavan tapahtuman todennäköisyys on 1 %, $p_A^{\text{true}} = 0.01$, tarvitaan $N = 150\,000$ laskentatulosta, jotta Monte Carlo -likiarvon suhteellinen epävarmuus olisi 5 %. Jos tarkasteltavan tapahtuman todennäköisyys on 10 %, $p_A^{\text{true}} = 0.1$, saavutetaan sama epävarmuustaso $N = 15\,000$ laskentatuloksella.

Riittävän tarkkojen tulosten saavuttamiseksi Monte Carlo -simulointi vaatii siis varsin suuria määriä laskentakertoja. Nykyaikaisilla mikrotietokoneilla tämä ei kuitenkaan enää ole Monte Carlo -laskennan este, vaan joissakin tapauksissa vain laskennan hidaste. Yhä nopeampien koneiden kehittyessä tämän takavuosina varsin merkittävän tekijän merkitys vähenee entisestään.

Tietyn satunnaismuuttujan Monte Carlo -käsittely tehdään teknisesti kyseisen muuttujan jakauman käänteisfunktioita käyttäen. Satunnaismuuttujan X kertymäfunktio $F_X(x)$ kuvaa satunnaismuuttujan arvot x niitä vastaaviksi todennäköisyyksiksi; se saa arvoja väliltä $0 \dots 1$. Myös tietokoneilla muodostettavat satunnaisluvut u_i saavat arvoja välillä $0 \dots 1$. Ne ovat tasajakautuneita. Jos nämä satunnaisluvut kuvataan kertymäfunktion käänteisfunktioilla F_X^{-1} , saadaan kutakin arvottua satunnaislukua vastaamaan tietty satunnaismuuttujan X arvo $x_i = F_X^{-1}(u_i)$. Satunnaismuuttujan ominaisuudet saadaan siis liitettyä tietokoneen tuottamiin satunnaisesti valittuihin lukuihin kuvauksella F_X^{-1} . Kuva D1 havainnollistaa tätä Monte Carlo -simuloinnin peruskonseptia.

Tarkasteltavan ilmiön kertymäfunktio saadaan laskettua Monte Carlo -menetelmällä suoraan kertymäfunktion (eli itse asiassa todennäköisyyden) määritelmästä lähtien. Satunnaismuuttujan X kertymäfunktion arvo argumentilla x , $F_X(x)$, on todennäköisyys, että satunnaismuuttujan X arvo on pienempi tai yhtä suuri kuin x eli

$$F_X(x) = P(X \leq x). \quad (\text{D4})$$

Esimerkiksi (0,1)-normaalijakautuneelle satunnaismuuttujalle X kertymäfunktio on

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \varphi(s) ds = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}s^2\right) ds \equiv \Phi(x). \quad (\text{D5})$$

Monte Carlo -simuloinnissa kertymäfunktion estimaatti $F_X^{\text{MC}}(x)$ muodostetaan laskennan antamista tuloksista, lukuarvot x_i ($i = 1 \dots N$), määritelmän (D4) ja käytännön laskutapaa esittävän esimerkin (D5) mukaisesti seuraavasti:

$$F_X^{\text{MC}}(x_i) = P(X \leq x_i) \approx \frac{\sum_{y \leq x_i} N_y}{N}, \quad (\text{D6})$$

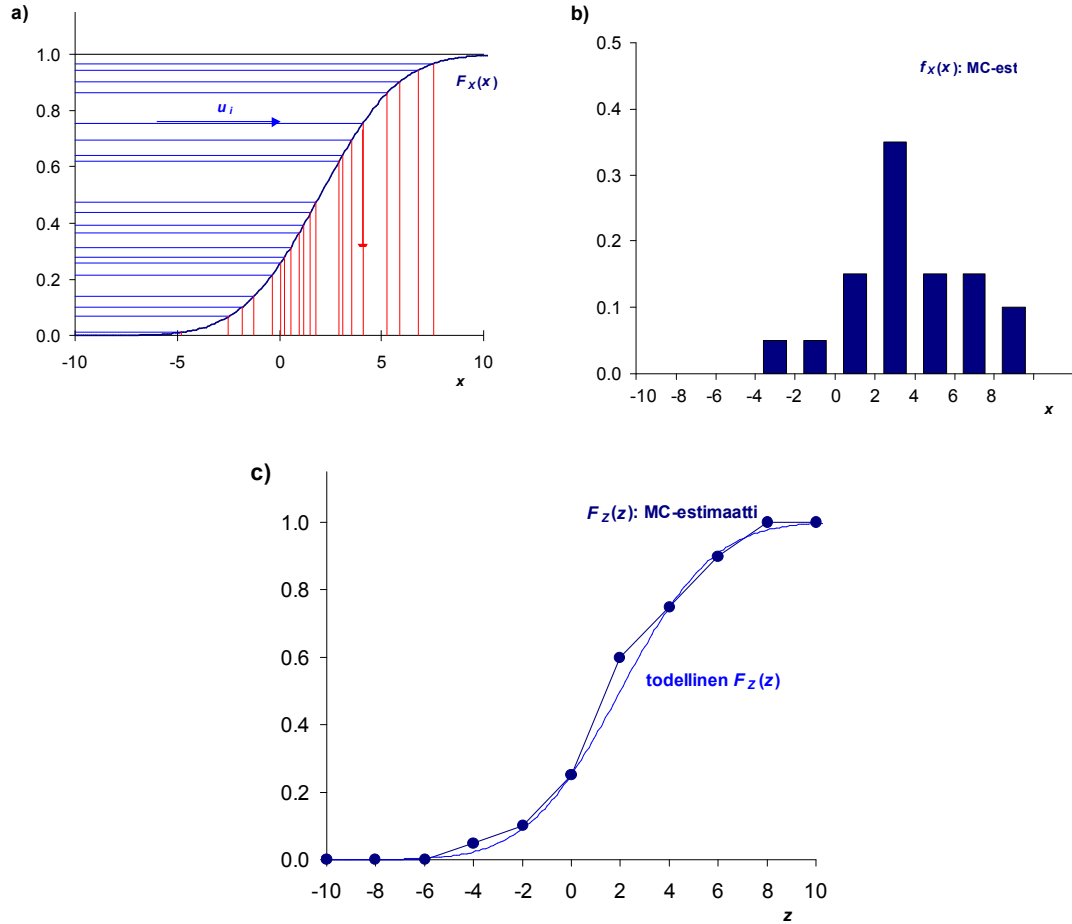
missä merkintä $\sum_{y \leq x_i} N_y$ tarkoittaa summaa yli niiden laskentatulosten y , joiden lukuarvo on pienempi tai yhtä suuri kuin x_i , eli niiden tulosten suhteellista osuutta, joiden lukuarvo on pienempi tai yhtä suuri kuin x_i .

Jos käytettävissä on automaattinen työkalu histogrammien tekemiseen, kertymäfunktion muodostaminen käy helposti myös laskemalla kumuloitu summa todennäköisyystiheysfunktioista. Monte Carlo -estimaatti tiheysfunktiolle, $f_X^{\text{MC}}(x)$, saadaan muodostamalla suhteellisia osuuksia esittävä histogrammi laskentakertojen tuloksista. Tätä menettelyä havainnollistetaan kuvassa D1. Kuvaa laskettaessa on käytetty 20 laskentakertaa, ja siksi kertymäfunktion Monte Carlo -estimaatti paikoin poikkeaa todellisesta (alkuperäisestä) todennäköisyysjakaumasta.

Monte Carlo -simuloinnissa muuttujien jakaumien ei tarvitse olla normaalijakaumia, vaan käyttäjä voi valita ne vapaasti käsiteltävään ongelmaan parhaiten soveltuvalla tavalla. Itse asiassa Monte Carlo -simulointi on eräs parhaita keinoja laskea ei-normaalisesti jakautuneiden satunnaismuuttujien yhteisjakaumien muotoja. Käytännössä on joskus kuitenkin järkevää käyttää jakaumia, joiden käänteisfunktio tunnetaan analyttisesti (tai se on muuten ”helposti” laskettavissa), koska Monte Carlo -simuloinnissa muuttujien vaihtelevuus esitetään niiden jakaumien käänteisfunktioiden avulla.

Monte Carlo -simuloinnissa lasketaan useiden yksittäisten satunnaismuuttujien X_j ($j = 1 \dots P$) yhteisvaikutuksesta muodostuvan satunnaismuuttujan Y arvoja y_i . Tässä indeksinä i käytetään erottamaan eri laskentakerroilla ($i = 1 \dots N$) saatuja arvoja, ja simuloinnissa käytettävät satunnaismuuttujan arvot x_j ja niiden määrä P riippuvat käyttäjän valitsemasta lähestymistavasta. Simuloinnissa saadusta N kpl:n joukosta y :n arvoja voidaan laskea satunnaismuuttujaan Y liittyviä tilastollisia arvoja edellä mainituilla keinoilla. Satunnaismuuttujien X_j arvot x_j vaikuttavat tarkasteltavaan suureeseen jonkin tunnetun funktion G määräämällä tavalla:

$$y_i = G(x_1, x_2, \dots, x_p). \text{ (indeksi } i \text{ kuvaa laskentakertaa, } i = 1 \dots N) \quad (D7)$$



Kuva D1. a) Satunnaismuuttujan arvojen x_i tuottaminen tasajakautuneista satunnaisluvuista u_i käyttäen satunnaismuuttujan X kertymäfunktion $F_X(x)$ käänteiskuvausta F_X^{-1} . b) Todennäköisyystiheysfunktion estimaatin $f_X^{\text{MC}}(x)$ muodostaminen histogrammina laskentakertojen tuloksista. c) Kertymäfunktion Monte Carlo -estimaatti $F_X^{\text{MC}}(x)$ muodostettuna tiheysfunktion $f_X^{\text{MC}}(x)$ kumuloituna summana.

Riskien määrällisestä arvioinnista

Yleistä

Riskien määrällistä arviointimenettelyä voidaan lähestyä seuraavan konkreettisen, helposti ymmärrettävän rakenteellista turvallisuutta koskevan esimerkin avulla. Tarkastellaan järjestelmää kuormittavaa tekijää S ja järjestelmän kapasiteettia R . Rakenteiden luotettavuuden piirissä ne voivat olla esim. palkkia kuormittava voima (S) ja palkin kantokyky (R). Tilanne on turvallinen, kun R on suurempi S : $R > S$.

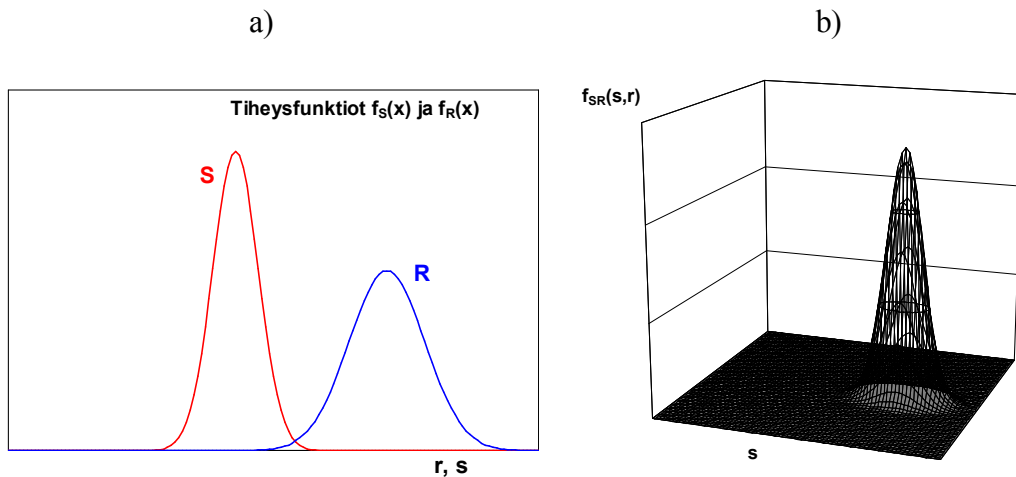
Käytännössä kuormitus ja kapasiteetti riippuvat useista tekijöistä (geometria, ulkoiset voimat, materiaaliominaisuudet, valmistus, rakenteen liitokset jne.). Nämä kaikki ovat tekijöitä, joiden arvo voi vaihdella. Matemaattisesti tämä voidaan ottaa huomioon kuvaamalla näitä suureita todennäköisyysjakaumalla. Se voidaan määrittää kullekin suurelle esim. kokeellisesti. Koska S ja R muodostuvat vaihtelevien suureiden yhteisvaikutuksesta, myös ne ovat luonnollisesti vaihtelevia suureita. Jos ”taustasuureiden” yhteisvaikutus on luonteeltaan summautuvaa, järjestelmän kuvaamisessa voidaan usein tehdä se merkittävä yksinkertaistus, että S :n ja R :n jakaumiksi voidaan olettaa normaalijakauma¹⁵. Tällöin riskien suuruutta voidaan arvioida käyttäen erilaisia, suhteellisen yksinkertaisesti laskettavissa olevia luotettavuuslukumenetelmiä (ks. esim. Paloposki ym. [2002]). Kun jakaumat eivät ole normaaleja, kuten palotekniikassa useimmiten on kyse, yksinkertaisten menetelmien käyttö ei anna riittävän tarkkaa kuvaa riskistä, vaan on käytettävä edellä kuvattua Monte Carlo -menetelmää.

Tässä työssä menetelmää voidaan soveltaa esimerkiksi poistumisturvallisuuden arviointiin. Tällöin kuormittava tekijä on se, että tila kuumenee ja siihen kertyy savua ja myrkyllisiä kaasuja, ja turvallisuutta luova tekijä on se, että ihmiset poistuvat tilasta. Käytännössä merkityksellistä on aika: ajan t_{crit} , jossa tilan olosuhteet muuttuvat ihmisten kannalta kriittiseksi, tulee olla selvästi pitempi kuin aika t_{evac} , joka kuluu henkilöiden poistumiseen tilasta. Turvallisuusvaatimus on, että todennäköisyys sille, että henkilöitä on tilassa, kun sen olosuhteet tulevat kriittiseksi, on pieni (pienempi kuin jokin ennalta asetettu raja-arvo P_{acc}). Matemaattisesti ilmaistuna tämä vaatimus on $P(t_{crit} < t_{evac}) \leq P_{acc}$.

¹⁵ Jos yhteisvaikutus on tulomuotoinen, se saadaan summamuotoiseksi ottamalla logaritmi. Tällöin luotettava tilastollinen kuvaus on logaritminen normaalijakauma.

Ei-toivotun tapahtuman todennäköisyys

Kuvatkoon satunnaissuuretta S tiheysfunktio $f_S(s)$ ja satunnaissuuretta R tiheysfunktio $f_R(r)$, ks. kuva D2a. Vastaavat kertymäfunktiot olkoot $F_S(s)$ ja $F_R(r)$.¹⁶



Kuva D2. a) S :n ja R :n jakaumat (tiheysfunktiot) ja b) niiden yhteisjakauma.

Olkoot S ja R tilastollisesti riippumattomia. Tällöin niiden yhteisjakauman tiheysfunktio on

$$f_{SR}(s,r) = f_S(s)f_R(r). \quad (\text{D8})$$

Kuvassa D2a esitettyjen jakaumien yhteisjakauman tiheysfunktio esitetään kuvassa D2b.

Kuvan D2a tapauksessa turvallista tilannetta vastaa se, kun satunnaismuuttujan R saamat arvot r ovat suurempia kuin satunnaismuuttujan S saamat arvot s . Tämä on voimassa lähes aina, muttei kuitenkaan ehdottomalla varmuudella: vaikka pääosa R :n arvojen todennäköisyysmassasta on selvästi S :n arvojen todennäköisyysmassan pääosan oikealla puolella, on osa r :n arvoista pienempiä kuin s -arvot.

Ei-toivottujen, turvattomien tilanteiden todennäköisyys $P_{failure}$ on se yhteisjakauman alue, jolla $r - s < 0$. Se voidaan laskea muuttujien yhteisjakaumasta seuraavasti:

¹⁶ Kertymäfunktion $F(x)$ määritelmä on $F(x) = P(X \leq x)$. Se on siis todennäköisyys, että satunnaismuuttuja X on arvoltaan pienempi kuin luku x . Kertymäfunktio saadaan tiheysfunktioista integroimalla: $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$.

$$P_{failure} = P(R - S < 0) = \int_{-\infty}^{\infty} dr \int_r^{\infty} ds f_{SR}(s, r) = \int_{-\infty}^{\infty} ds \int_{-\infty}^s dr f_{SR}(s, r). \quad (D9)$$

Tämä on yleinen lauseke, jota voidaan soveltaa aina. Tilastollisesti riippumattomille satunnaismuuttujille tähän voidaan sijoittaa lauseke (D8), jolloin saadaan tulos¹⁷

$$P_{failure} = P(R - S < 0) = \iint_{r \leq s} dr ds f_{SR}(s, r) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} dr \int_r^{\infty} ds f_S(s) f_R(r) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} dx f_R(x) F_S(x) \\ \int_{-\infty}^{\infty} ds \int_{-\infty}^s dr f_S(s) f_R(r) = \int_{-\infty}^{\infty} dx F_R(x) f_S(x) \end{cases} \quad (D10)$$

Huomaa, että käytännössä integrointirajat määrittyvät tilanteen mukaisista tilastojakauksista: usein esim. negatiiviset arvot ”leikkautuvat” pois, koska näillä arvoilla jakaumien arvot = 0.

Tässä työssä esitetyt poistumisturvallisuuden ”riskiprofiilit” eli FN-käyräesitykset on laskettu edellä esitetyillä kaavoilla käyttäen Monte Carlo -menetelmää.

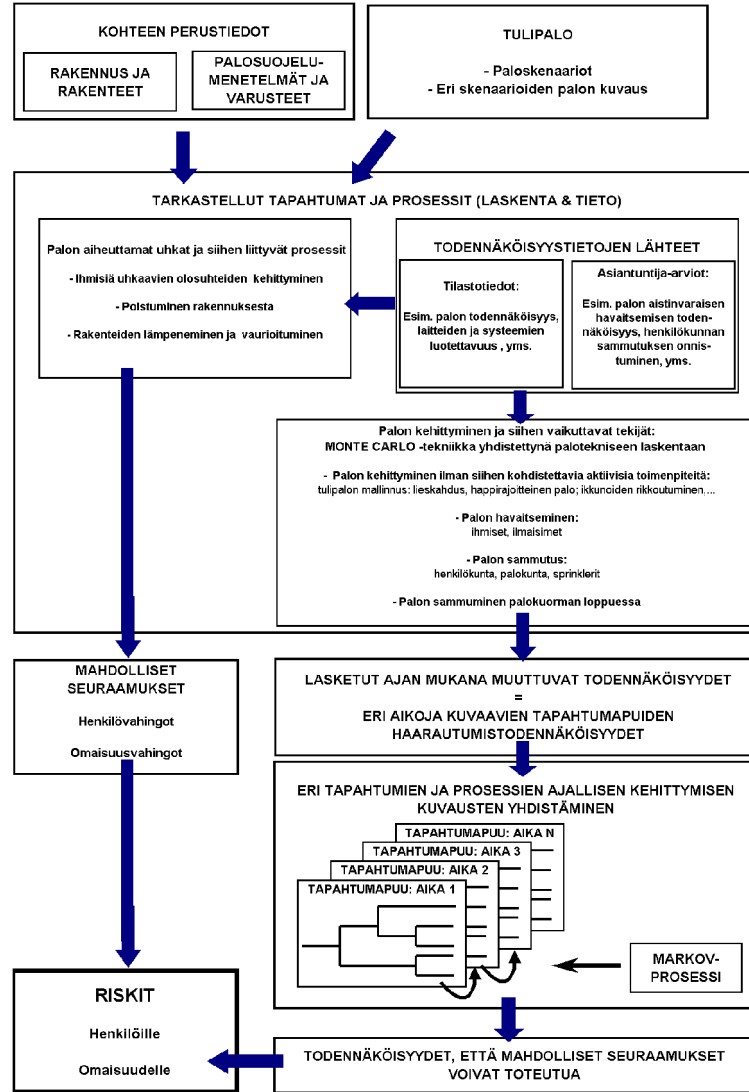
Yleinen paloriskien arvioinnin menettelytapa

Kun joudutaan tarkastelemaan monia toisiinsa kytkeytyneitä ajan mukana kehittyviä tapahtumia, mikä on tulipalolle tyypillinen piirre, voidaan käyttää kuvassa D3 esitettyä yleistä paloriskien määrällisen arvioinnin menettelytapaa, joka perustuu Hietaniemen ja Korhosen kehittämään ajasta riippuvien tapahtumapuiden menetelmään [Hietaniemi ym. 2002, Korhonen ym. 2002, Hietaniemi ym. 2005]. Tässä tarkastelussa valitun uhkaku- van riskianalyysi tehdään neljässä vaiheessa seuraavasti:

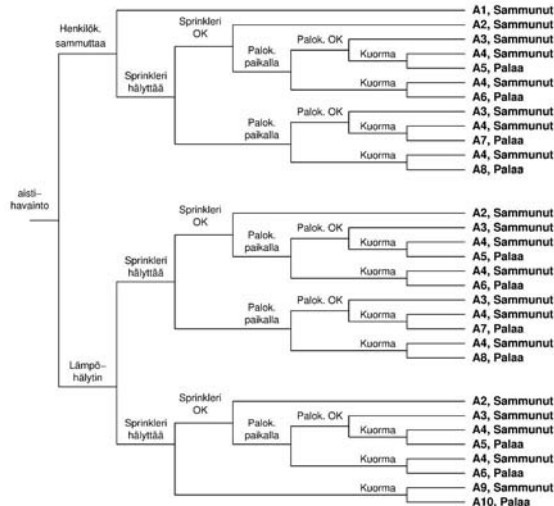
1. mallissa valittujen ajanhetkien analysointi tapahtumapuiden avulla
2. näiden eri hetkien kuvausten kytkeminen toisiinsa koko palon aikakehityksen todennäköisyyden kuvaukseksi
3. palon aiheuttamien seuraamusten laskennallinen arviointi
4. lopulta todennäköisyyksien ja seuraamusten yhdistäminen riskiarvioiksi.

¹⁷ Seuraavan kaavan viimeisessä muodossa käytetään integrointimuuttujalle merkintää x , koska se on yleinen käytäntö.

a)



b)



Kuva D3. a) Yleinen määrällisen paloriskianalyysin kulun kaaviokuva ja b) esimerkki yksittäisestä tapahtumapuusta.

Liitteen D lähdeluettelo

Haldar, A. & Mahakevan, S. 2000. Probability, reliability and statistical methods in engineering design. New York: John Wiley & Sons, Inc. 304 s. ISBN 0-471-33119-8.

Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M. & Lappi, E. 2002. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2123. Espoo: VTT. 95 s. + liitt. 51 s. ISBN 951-38-5935-5. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2123.pdf>

Hietaniemi, J., Cajot, L.-G., Pierre, M., Fraser-Mitchell, J., Joyeux, D. & Papaioannou, K. 2005. Risk-Based Fire Resistance Requirements. Final Report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 528 s. ISBN 92-894-9871-4 (EUR 21443 EN).

Korhonen, T., Hietaniemi, J., Baroudi, D. & Kokkala, M. 2002. Time-Dependent Event-Tree Method for Fire Risk Analysis: Tentative Results. 7th International Symposium of Fire Safety Science. Boston, 16–21 June 2002. S. 321–332.

Paloposki, T., Myllymäki, J. & Weckman, H. 2002. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan. VTT Tiedotteita – Research Notes 2181. Espoo: VTT. 53 s. + liitt. 13 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2181.pdf>

