



Jukka Hietaniemi, Jukka Vaari, Tuula Hakkarainen,
Jaakko Huhta, Ulla-Maija Jumppanen, Timo
Korhonen, Ilpo Kouhia, Jaakko Siiskonen
& Henry Weckman

Ontelotilojen paloturvallisuus

Ontelopalojen ominaispiirteet sekä palojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen ja sammuttaminen

Ontelotilojen paloturvallisuus Ontelopalojen ominaispiirteet sekä palojen etenemisen rakenteellinen kat- kaiseminen ja sammuttaminen

Jukka Hietaniemi, Jukka Vaari, Tuula Hakkarainen, Jaakko Huhta,
Ulla-Maija Jumppanen, Timo Korhonen, Ilpo Kouhia,
Jaakko Siiskonen & Henry Weckman

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6474-X (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6475-8 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2004

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4815

VTT Bygg och transport, Stenkarlsvägen 4, PB 1803, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4815

VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4815

Hietaniemi, Jukka, Vaari, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Korhonen, Timo, Kouhia, Ilpo, Siiskonen, Jaakko & Weckman, Henry. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen ominaispiirteet sekä palojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen ja sammuttaminen [Fire safety of cavity spaces. Characteristics of fires in building voids, their structural prevention and extinguishing]. Espoo 2004. VTT Tiedotteita – Research Notes 2249. 74 s. + liitt. 24 s.

Avainsanat fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, extinguishing, building voids, fire stop, fire simulation, fire spread

Tiivistelmä

Rakennusten suljetut ja usein piilossa olevat tilat, ontelotilat, muodostavat merkittävän tulipalovaaran. Tässä työssä esitetään yhteenveto kolmiosaisen ontelotilojen palojen tutkimushankekokonaisuuden tuloksista. Hankekokonaisuuden osat ovat *Ontelopalojen ominaispiirteet*, *Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen* ja *Ontelopalojen sammutus*. Ne suoritettiin VTT rakennus- yhdyskuntatekniikassa vuosina 2000–2004.

Hankekokonaisuuden ensimmäisessä osassa, *Ontelopalojen ominaispiirteet*, kartoitettiin ontelopalotapauksia ja -tilastoja sekä aiempia alan tutkimuksia samoin kuin tutkittiin ontelopaloja sekä kokeellisesti että mallinnuksen avulla. Tässä osahankkeessa luotiin perusteet ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiseksi muuttamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi tunnistamalla ja kuvaamalla ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymisen ja leviämisen suhteen. Hankkeen tuloksena saatuja tietoja ja mallinnuskeinoja käytettiin työn jatko-osissa. Tutkimuksessa selvitettyjä asioita ovat mm. miten ontelon eri ominaisuudet, kuten koko, palavan aineen määrä ja laatu, tilaa reunustavat rakenteet sekä tilassa kulkevat virtaukset, vaikuttavat tulipalon kehittymisen ja etenemiseen ontelotiloissa. Tutkitut tapaukset liittyvät pääasiassa seuraaviin ontelotilojen tulipalotapausten kartoituksen perusteella tunnistettuihin tyyppitapauksiin: yläpohjan ontelot, alaslaskettujen kattojen tai nostettujen lattioiden ontelotilat, julkisivujen ja seinärakenteiden ontelot sekä kaksoislasijulkisivujen muodostamat ontelotilat.

Hankkeessa *Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen* tutkittiin ontelopalojen leviämisen katkaisemista erilaisten liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Lisäksi esitetään myös joitain muita keinoja rajoittaa ontelopalojen kehittymistä ja leviämistä. Tutkimuksessa käytetään lähestymistapaa, jossa perustana ovat tilaa uhkaava palo ja mahdolliset seuraamukset. Tutkimus nojaa aiemmassa VTT:n tutkimuksessa, *Ontelopalojen ominaispiirteet*, saatuihin tuloksiin. Useimmat tulokset esitetään konkreettisina rakenteina, osa detaljitasolle asti vietyinä. Alalla toimivien suunnittelijoiden ja tuotekehittäjien tarpeita silmällä pitäen työssä esitetään myös rakenneratkai-

sujen perusteita, toiminnallisia edellytyksiä ja periaatteita. Joitain ongelmia koskien tulokset esitetään ehdotuksena suuntaviivoiksi aiheita koskevia keskusteluja ja jatkokehitystyötä varten. Työssä keskityttiin viiteen ongelma-alueeseen: yläpohjan ontelon tulipalot ja räystään vaikutus niihin, palon leviäminen julkisivun tuuletusraoissa, alaslasketettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien ontelotilojen palot, kaksoislasijulkisivurakenteeseen mahdollisesti liittyvät palovaarat ja teollisuushallien tuuletettujen kattojen ontelopalot. Paloteknistä toimintaa tarkastellaan yhdessä kosteusteknisen toimivuuden kanssa, koska onteloiden paloturvallisen rakentamisen perusongelma on juuri palo- ja kosteusteknisten vaatimusten yhtäaikainen toteuttaminen.

Hankekokonaisuuden kolmas osa, *Ontelopalojen sammuttaminen*, käsittelee aktiivisia toimenpiteitä ontelossa alkaneen tai sinne levinneen palon sammuttamiseksi tai rajaamiseksi. Tutkimus on luonteeltaan laskennallinen, ja se perustuu uhkakuville, jotka hankekokonaisuuden aiemmissa osissa on todettu keskeisen tärkeiksi. Laskennallisena työkaluna on käytetty palonsimulointiin tarkoitettua virtauslaskentaohjelmaa Fire Dynamics Simulator (FDS). Tutkituiksi uhkakuviksi valittiin harjakattoisen rakennuksen ullakkotilaan levinnyt palo ja teollisuushallin tuuletettuun kattorakenteeseen levinnyt palo. Tutkitut sammutusmenetelmät olivat luonnollinen tai koneellinen tuuletus, sammutus sprinklerein tai pistosuihkuin sekä sammutuksen ja koneellisen tuuletuksen yhdistäminen. Tutkimuksen keskeisimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että palavaan onteloon on ensisijaisesti pyrittävä johtamaan sammutusvettä, ja ontelo on vasta toissijaisesti pyrittävä raivaamaan auki. Tulos poikkeaa palokuntien tavanomaisesti noudattamasta taktiikasta, jossa ontelon pyritään ensin avaamaan, jotta sammutusvesi voitaisiin kohdistaa palopesäkkeisiin tehokkaasti.

Hietaniemi, Jukka, Vaari, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla Maija, Korhonen, Timo, Kouhia, Ilpo, Siiskonen, Jaakko & Weckman, Henry. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen ominaispiirteet sekä palojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen ja sammuttaminen [Fire safety of cavity spaces. Characteristics of fires in building voids, their structural prevention and extinguishing]. Espoo 2004. VTT Tiedotteita – Research Notes 2249. 74 p. + app. 24 p.

Keywords fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, extinguishing, building voids, fire stop, fire simulation, fire spread

Abstract

Hidden cavity spaces and voids in buildings constitute a significant fire hazard. This report summarises the results of a 3-part project series addressing fire safety of building cavities. The three parts are the following: *Characteristics of fires in building void spaces*, *Prevention of fire spread in building voids* and *Suppression of fires in building voids*.

In the first part of the project series, *Characteristics of fires in building void spaces*, fires in building void spaces have been investigated experimentally and using fire simulation and modelling. The project also surveyed reports on building-void fire incidents and statistics as well as previous experimental work in the field. The results enabled to identify and quantify the most important features of the cavity spaces with respect to fire growth and spread. They lay the foundation to technical solutions aimed at improving the fire safety of the cavity spaces and to the work in the subsequent projects addressing structural aspects of building void fire safety and suppression of these fires.

The second project, *Prevention of fire spread in building voids*, dealt with prevention of fire spread in building void spaces and cavities using structural means to stop or retard propagation of flames, heat and smoke. Also some other means to prevent or alleviate fire growth and spread in cavities are addressed. The basic approach of the study is that of fire safety engineering with the fire hazard and the potential consequences in focus. With respect the study uses the results obtained in the previous VTT study on the basics of the fires in building voids and cavities. Most of results are presented as structural solutions with some of them presented in details. To facilitate further development by designers and R&D engineers in building industry, also the principles and functional basis of the solutions are presented. Regarding some of the problems, the results are presented as more generic guidelines to lay basis for future discussions, research and development. The research focused on five topics: fires in roof cavities and the role of eaves in the fire spread, fire spread in façade air vent slots, fires in cavities above suspended ceilings and below raised floor, fire hazards associated with double skin glass facades and fires in ventilation cavities in roofs of industrial halls. Fire performance of

the constructions is considered in relation to the building physical performance, especially moisture aspects.

The third project, *Suppression of fires in building voids*, investigated prevention of fire spread in building roof structures using active methods. The methods include both natural and forced smoke ventilation, the use of fire-fighting water, and the combination of ventilation and water suppression. The investigation was carried out using computational fluid dynamics calculations, as implemented in the Fire Dynamics Simulator (FDS) software. The fire scenarios involved in the study were the ventilated roof structure of an industrial facility, and the attic of a residential building. The primary result from the investigation is that it is important first to apply fire fighting water into the void to effectively suppress the fire, and only thereafter create openings for direct access to the burning void.

Alkusanat

Tämä raportti on yhteenveto hankekokonaisuudessa "Ontelotilojen paloturvallisuus" saaduista tuloksista. Hankekokonaisuus käsitti kolme osaa, *Ontelopalojen ominaispiirteet*, *Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen* ja *Ontelopalojen sammutus*. Se suoritettiin VTT rakennus- yhdyskuntatekniikassa vuosina 2000–2004.

Ontelopalojen ominaispiirteet -hankkeessa luotiin perusteet ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiseksi tunnistamalla ja kuvaamalla kvantitatiivisesti ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymisen ja leviämisen suhteen. Hankkeessa *Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen* selvitettiin, miten ontelotiloissa etenevien palojen leviämistä voidaan estää tai hillitä käyttämällä paloa katkovia asennuksia. Hankkeessa *Ontelopalojen sammutus* selvitettiin sitä, miten ontelopalojen eteneminen voidaan estää tehokkaasti ja tarkoituksenmukaisesti käyttäen erityyppisiä aktiivisia palontorjuntamenetelmiä.

Hankekokonaisuuden ovat rahoittaneet Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati (ml. Palosuojelun edistämissäätiön erikoisrahasto sekä Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto), Ympäristöministeriö, Wood Focus Oy, If Vahinkovakuutusyhtiö Oy ja VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Osahankkeiden johtoryhmiin ovat kuuluneet seuraavat rahoittajien sekä pelastustoimen, rakennusvalvonnan ja elinkeinoelämän edustajat: Jyrki Isotalo (YIT Safetytec), Lasse Jaakkola (Espoon aluepelastuslaitos), Pekka Kallioniemi (If Vahinkovakuutusyhtiö Oy), Pirjo Kurki (YM), Antti Lastu (Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK, puheenjohtaja), Pekka Nurro (Wood Focus Oy), Kari Pajanne (Espoon rakennusvalvontakeskus), Hannu Olamo (SM), Ari Santavuori (If Vahinkovakuutusyhtiö Oy), Paavo Tiitta (Pelastusopisto), Tapani Tuominen (SPU-Systems Oy), Yrjö Vorne (Espoon aluepelastuslaitos) ja Esko Mikkola (VTT). Tekijät kiittävät hankkeen rahoittajatahoja ja johtoryhmän jäseniä.

Yläpohjan osastointia koskevat palokokeet tehtiin yhteistyössä Palokatkomiehet Oy:n kanssa. Kiitämme yhtiötä sen panoksesta kokeiden suunnitteluun ja toteutukseen.

Kari Helminen Insinööritoimisto Tasoplan Oy:stä (ent. K & H Oy) antoi hankkeen käyttöön tiedot heidän yläpohjan ja räystään rakenneratkaisustaan. Matti Salmela SPU-Systems Oy:stä teki laskelmat palossa vahingoittuneen teollisuushallin katon korjauskustannuksista. Esitämme heille kiitoksemme avusta ja hyvästä yhteistyöstä. Yliasentaja Mauri Nevalaista ABB:lta kiitetään häneltä saaduista monista tiedoista ja hyvistä neuvoista koskien sähköasennuksien ja läpivientien käytännön toteuttamista rakennustyömailla.

Tutkija Olavi Tenhusta Teknillisen korkeakoulun Teräsrakennelaboratoriosta (nykyisin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka) kiitämme monista kaksoislasijulkisivuja koskevista kirjallisesti ja suullisesti annetuista tiedosta.

Kiitämme Draka NK Cables Oy:tä ja Reka Kaapeli Oy:tä avusta kaapeleiden palominaisuuksien tutkimuksessa sekä Roxtec Finland Oy:tä läpivientien palokatkoja koskevasta aineistosta ja tiedoista.

Kiitämme myös VTT:n tutkijoita Djebar Baroudi, Simo Hostikka, Tuuli Oksanen, Mikael Salonvaara ja Kati Tillander heidän avustaan työn eri vaiheissa. Tutkimusavustajat Timo Jyry, Risto Rahikainen, Seppo Ruokonen, Kimmo Rämö ja Konsta Taimisalo osallistuivat tutkittujen rakenteiden valmistukseen ja palokokeiden järjestämiseen. Tästä heille suuri kiitos.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	5
Alkusanat.....	7
1. Johdanto.....	11
2. Tilastotietoja ontelopaloista.....	12
3. Ontelopalojen ominaispiirteitä.....	18
3.1 Ontelotilojen palovaarallisuuden palotekniset perusteet.....	18
3.2 Ontelopalojen ominaispiirteiden tutkimustyö.....	20
3.2.1 Koejärjestelyt.....	20
3.2.2 Mallinnus.....	21
3.2.3 Tuloksia.....	22
3.2.3.1 Ontelopalon kehittyminen ja siihen vaikuttavia tekijöitä.....	22
3.2.3.2 Täysin kehittyneen ontelopalon lämpötila.....	26
4. Ontelopalojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen.....	28
4.1 Yläpohjan ontelotilojen paloturvallisuuden rakenteellinen parantaminen.....	28
4.1.1 Palon leviämistä hidastava räystäs.....	30
4.1.2 Yläpohjan osastointi.....	34
4.1.3 Räystäään ja yläpohjan ontelon/ullakon erityisratkaisuihin perustuvia palon katkaisemisratkaisuja.....	39
4.1.3.1 Räystäään harvalaudoitus kattoristikon paarteen päällä.....	39
4.1.3.2 Tuulettumaton yläpohja/ullakko.....	40
4.2 Julkisivun tuuletusraon katkaiseminen.....	40
4.3 Alaslasketut katot ja nostetut lattiat.....	43
4.3.1 Palovaarat.....	44
4.3.2 Onteloiden pinta-alan osiin jakamisesta.....	46
4.3.2.1 Osiin jakavien rakenteiden palonkesto.....	46
4.3.2.2 Osiin jakamisen pinta-alat.....	47
4.3.3 Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamiseen soveltuvia rakenteita.....	49
4.3.3.1 Alakattojen ontelot.....	50
4.3.3.2 Nostetut lattiat.....	53
4.3.4 Läpivientien palokatkot: toiminta ontelokohteissa.....	54
4.4 Kaksoislasijulkisivun ontelon rakenteellisesta paloturvallisuudesta.....	56

4.5	Tuuletetun teollisuushallin katon osiinjakamisesta	58
5.	Ontelopalojen sammuttaminen	60
5.1	Tuulettamisen vaikutus ontelopaloon.....	60
5.1.1	Luonnollinen tuuletus.....	60
5.1.2	Pakotettu tuuletus	63
5.2	Palavan ontelon sammuttaminen vedellä	66
5.2.1	Yläpohjan ontelon sprinklaus.....	66
5.2.2	Pistosuihkujen toiminta.....	67
6.	Loppusanat.....	71
	Lähdeluettelo	72

Liitteet

Error! No table of contents entries found.

1. Johdanto

Rakennusten ja rakenteiden piilossa olevat ja usein vaikeapääsyiset tilat - ontelotilat - muodostavat merkittävän tulipaloriskin. Viimeaikaisista ontelotilan kautta tuhoisaksi kehittyneistä tulipaloista on tunnetuimpia Düsseldorfin 17 ihmishenkeä vaatinut lentokenttäpalo 11.4.1996 (Wolf 1996). Tässä tulipalossa tuli levisi nopeasti kauas syttymiskohdasta alaslasketun katon muodostamassa ontelotilassa. Myös muita esimerkkejä tulipaloista, joissa ontelotilassa levinnyt palo on johtanut vakaviin vahinkoihin on lukuisia. Suuria aineellisia vahinkoja aiheuttaneita teollisuuslaitosten kattorakenteiden onteloissa levinneitä paloja on Suomessa tapahtunut useita, esimerkiksi Finnforestin kattopalo Punkaharjulla 1994 (Silmäri 1994, Kallioniemi & Laamanen 1995) ja Wisapakin teollisuusrakennuksen kattopalo Kotkassa 1993 (Kovanen & Heininen 1993). Asuinrakennusten, etenkin rivitalotyyppeiden talojen, välipohjan yläpuolisessa ontelotilassa levinneet palot voivat olla tuhoisia, esim. rivitalopalo Haukiputaalla 1992 (Kärppä 1992) ja Maaningan vanhusten palvelutalon tulipalo 1999. Hietaniemen ym. laatimassa raportissa (Hietaniemi ym. 2000) on esitetty kooste ontelotiloissa tapahtuneista tulipaloista. Liitteessä A esitetään lyhyt kooste ontelopalotapauksista.

Ontelopalotapauksista tulee selvästi esille, että ontelotiloissa tulipalot leviävät usein odottamattoman suurella nopeudella. Ne voivat saavuttaa myös huomattavan korkean lämpötilan. Lisäksi ontelopalot ovat usein hankalia sammuttaa. Kun nämä piirteet yhdistetään siihen, että onteloiden kaltaisissa rakennuksen piilotiloissa kehittyvien palojen havaitseminen tapahtuu usein varsin myöhään, on helppo ymmärtää, miksi ontelotilojen palot ovat usein erityisen vaarallisia.

Ontelotilojen paloturvallisuutta voidaan parantaa vähentämällä tulipalojen syttymisen todennäköisyyttä ja rajoittamalla niiden kehittymistä sekä kohentamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi ja tehostamalla ontelopalojen sammuttamista. Tässä raportissa esitetään yhteenveto hankekokonaisuudesta, jossa on tarkasteltu näitä eri tekijöitä. Hankekokonaisuuden ensimmäisessä osassa, "Ontelopalojen ominaispiirteet" luotiin perusteet ontelotilojen paloteknisten tekijöiden parantamiseen ja ontelopalojen sammuttamiseen tähtäävälle työlle. Hankekokonaisuuden toisessa osassa, "Ontelopalojen etenemisen katkaiseminen", tutkittiin konkreettisia rakenteellisia ratkaisuja ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiseksi ja sen kolmannessa osassa selvitettiin, miten palokunta voi tehokkaasti saada ontelopalon hallintaan ja sammuttaa sen.

2. Tilastotietoja ontelopaloista

Hankkeessa tarkasteltiin ontelopalojen esiintymistä USA:sta saatujen tilastotietojen avulla. Aineisto sisältää tietoja sekä henkilö- että omaisuusvahingoista. Se perustuu tulipalotietojen keräysjärjestelmään National Fire Incident Reporting System (NFIRS), joka kattaa noin ¾ USA:n osavaltioista. Systeemi kattaa yli kolmanneksen USA palolaitoksista. NFIRS:in tiedot on luokiteltu standardin NFPA 901 mukaisesti. Systeemiin kerätään tiedot kaiken kokoisista tulipaloista, ei vain suurista tapauksista. Se sisältää tietoja myös palon alkuperästä, leviämisestä, laajuudesta, savun leviämisestä sekä ilmaisimien ja sprinklereiden toiminnasta.

Tilastot esittävät vuosittaiset keskiarvot USA:ssa ajalla 1980–1997 koskien

- tulipalojen lukumäärää,
- kuolleiden siviilihenkilöiden lukumäärää,
- suorien omaisuusvahinkojen suuruutta.

Näitä tietoja on tarkasteltu seuraavista näkökulmista:

- ensin syttyneen materiaalin käyttötapa (esim. rakenneosia, katon päällyste, kaapeli,...),
- ensin syttyneen materiaalin tyyppi (esim. sahattu puu, vaneri/kovalevy, kumi,...),
- syttymislähde toimintatavan mukaan luokiteltuna (esim. toimiva sähkölaite, tupakka, kipinä,...),
- laite, joka oli mukana palon syttymisessä (esim. sähköjohto, savupiippu, lamppu,...),
- liekkien aiheuttamien vahinkojen laajuus (esim. rajoittunut syttymislähteeseen, rajoittunut syttymisalueeseen, rajoittunut syttymistilaan,...)
- savun aiheuttamien vahinkojen laajuus (esim. ei vahinkoja, rajoittunut syttymisalueeseen, rajoittunut syttymistilaan,...).

Aineisto on luokiteltu seuraavasti:

1. Ullakoiden ja ulko-/sisäkattojen onteloista alkaneet rakenteelliset palot
2. Sisäkattojen ja lattioiden onteloista alkaneet rakenteelliset palot
3. Seinärakenteiden onteloista alkaneet rakenteelliset palot
4. Kanavistoista (utility shafts) alkaneet rakenteelliset palot.

Aineisto ei siis käsitä kaikkia USA:n tulipaloja. Raportissa annetaan ohjeita siitä, miten aineiston tiedot voidaan laajentaa koko USA:n kattaviksi arvioluvuiksi. Laajentaminen voidaan tehdä likimääräisesti skaalaamalla NFIRS-aineiston lukumääriä ylöspäin koko USA:ta koskevien tunnettujen lukumäärien ja NFIRS-lukujen suhteella. Skaalauksen

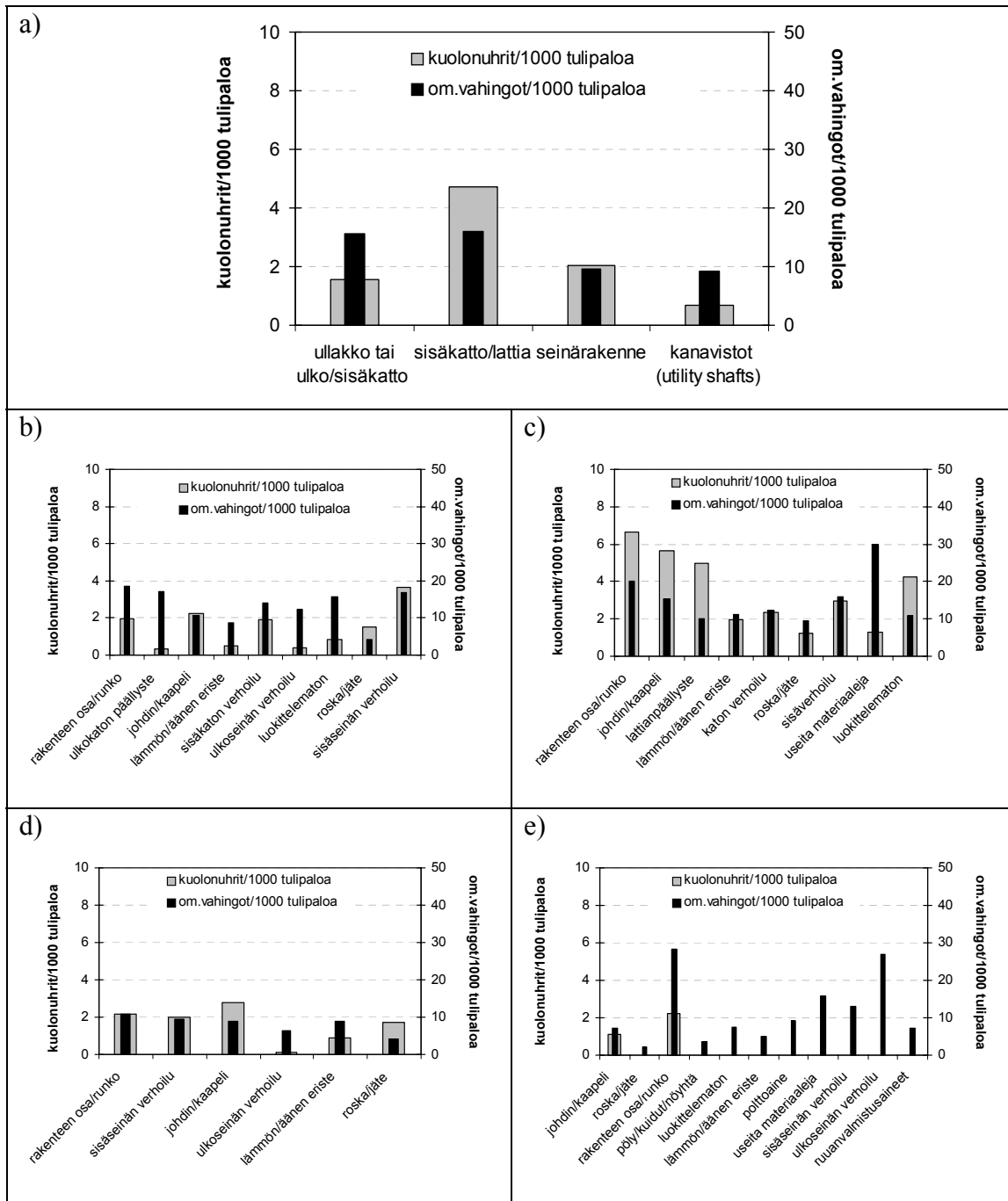
tarvittavia koko USA:ta koskevia tietoja on olemassa koskien seuraavia neljää tulipaloluokkaa: asuinrakennusten palot, muiden kuin asuinrakennuksien palot, ajoneuvot ja luokka "muut". Esimerkkinä skaalaamisesta esitetään vuonna 1984 asuinrakennuksissa kuolleiden siviilihenkilöiden lukumäärä. Koko USA:n kattavan tilastoinnin (NFPA survey) mukaan kuolleiden lukumäärä on 4240 henkilöä, kun NFIRS-systeemiin kirjattiin 1850 kuollutta. Skaalaustekijä, jolla avulla NFIRS-systeemin luvuista saadaan arvio koko USA:ta koskeviksi luvuiksi on siis $4240/1850 = 2,29$.

Ontelopalojen ominaispiirteet -hankkeen kannalta aineistosta saadaan käyttökelpoista tietoa suoraankin, koska sen luvuista voidaan arvioida eri ontelotyyppien palojen suhteellista esiintymistiheyttä sekä vakavuutta. Lisäksi voidaan tarkastella, mitkä syttymiskohteet, -tavat, -materiaalit, jne. ovat merkittävimpiä.

Taulukossa 1 on esitetty neljän raportissa tarkastellun ontelopalotyypin tietoja. Eri ontelotyyppien palojen vakavuuden vertaamisen helpottamiseksi kuvassa 1 on esitetty kullekin tapaukselle 1000 tulipaloa kohden lasketut kuolleiden ja omaisuusvahinkojen määrät.

Taulukko 1. Eri ontelotyyppien rakenteelliset palot: vuotuiset keskiarvot välillä 1980–1997 USA:ssa NFIRS-systeemiin kirjatuista tulipaloista.

Ontelotyyppi	Tulipalojen lkm	Kuolonuhrit	Omaisuusvahingot (milj. US \$)	Uhrit/ 1000 paloa	Milj \$/ 1000 paloa
ullakko tai ulko-/sisäkatto	17746	28,0	278,46	1,6	15,7
sisäkatto/lattia	6658	31,3	106,34	4,7	16,0
seinärakenne	12261	25,0	118,25	2,0	9,6
kanavistot (utility shafts)	865	0,6	7,96	0,7	9,2



Kuva 1. NFPA:n materiaalista johdettuja ontelopalojen vakavuutta kuvaavia lukuja: kuolleiden määrä per 1000 tulipaloo (vasemman puoleinen asteikko) ja omaisuusvahinkojen suuruus miljoonissa dollareissa per 1000 tulipaloo (oikean puoleinen asteikko): Kuvassa a) on esitetty tulokset ontelopalotyyppin mukaan. Syttymiskohteiden osuuksia eri ontelopalotapauksissa on esitetty kuvissa b)-e): b) ullakoiden ja ulko-/sisäkattojen ontelot, c) sisäkattojen ja lattioiden ontelot, d) seinärakenteiden ontelot ja e) kanavistot.

Tilastotiedoista voidaan vetää seuraavia johtopäätöksiä.

- Eniten tulipaloja tapahtuu yläpohjan onteloihin liittyen (n. 17800/vuosi), seuraavaksi eniten seinärakenteiden onteloissa (n. 12300/vuosi) ja kolmanneksi eniten asennusonteloissa (n. 6700/vuosi). Nimellä “utility shafts” tilastoiduissa kanavistoissa tapahtuu tulipaloja selvästi edellä mainittuja kohteita vähemmän (n. 900/vuosi).
- Tarkasteltaessa yksittäisen tulipalojen vakavuutta, joka tässä tarkastellussa käsittää henkilövahingot ja suorat omaisuusvahingot, havaitaan, että henkilövahinkojen suhteen asennusonteloiden palot ovat selvästi vakavimpia, yläpohjan ja seinärakenteiden ontelopalojen henkivahinkovakavuus on suunnilleen samansuuruinen ja kanavistojen palot ovat vakavuusasteeltaan muita oleellisesti pienempiä. Suorien omaisuusvahinkojen suhteen yläpohjan onteloiden ja asennusonteloiden palot ovat suunnilleen yhtä vahingollisia. Seinärakenteiden onteloiden ja kanavistojen palot ovat näitä vähemmän vahingollisia.
- Ullakoiden ja ulko-/sisäkattojen ontelopaloissa tuli on saanut alkunsa selvästi useimmiten rakenteen osista tai runkorakenteista. Seuraavaksi yleisimmät tulen alkuperät ovat ulkokaton päällysteet, johtimet/kaapelit sekä lämmön/ääneneristeet. Henkilövahinkojen suhteen vakavimmat palot ovat ne, jotka alkavat sisäseinän verhoilusta, johtimista/kaapeleista ja rakenteen osista tai runkorakenteista. Ulkokaton päällysteiden paloihin liittyvät paloissa suhteelliset henkilövahingot ovat selvästi pienempiä kuin em. tapauksissa, mikä viittaa siihen, että nämä palot liittyvät ei-asuintilojen paloihin, esim. teollisuuslaitosten katot. Omaisuusvahinkojen suhteen ei luvuissa ole yleensä ottaen ole kovin suuria vaihteluita (roska/jätepaloja lukuun ottamatta).
- Sisäkattojen ja lattioiden onteloista alkaneet rakenteelliset palot liittyvät selvästi useimmiten rakenteen osien tai runkorakenteiden syttymiseen. Seuraavana tulevat johtimet/kaapelit ja lattianpäällysteet noin neljänneksen osuudella sisäkattojen ja lattioiden onteloihin verrattuna. Henkilövahinkojen suhteen kaikki nämä kolme palon alkamispaikkaa ovat yhtä vakavia. Suorien omaisuusvahinkojen suhteen pahimpia ovat tapaukset, joissa syttymiseen on liittynyt useita vahinkoja.
- Seinärakenteiden onteloiden palot liittyvät selvästi eniten rakenteen osan/rungon paloihin. Seuraavaksi yleisimmät palon alkamiskohteet ovat sisäseinän verhoilu, johtimet/kaapelit ja ulkoseinän verhoilu. Sekä henkilö- että omaisuusriskien suhteen pahimmat palot alkavat rakenteen osista/rungosta, sisäseinän verhoilusta tai johtimista/kaapeleista.
- Kanavistojen tulipalotapauksissa tilastomateriaali sisältää merkintöjä kuolemantapauksista vain johdinten/kaapeleiden ja rakenteen osien/rungon suhteen. Jälkimmäi-

nen alkamistapa on myös vakavin suorien omaisuusvahinkojen suhteen. Myös ulkoseinän verhoilun syttymiseen liittyvät kanavistopalot ovat vakavia suorien omaisuusvahinkojen suhteen.

Syttymiseen osallistuvista materiaaleista erilaiset puutuotteet ovat selvästi tärkein yksittäinen tuoteluokka.

Ontelopalojen yleistä merkittävyyttä voidaan arvioida skaalaamalla taulukossa 1 esitetyt luvut vastaamaan koko USA:ta vastaavia lukuja ja vertaamalla niitä USA:n tilastotietoihin kaikista USA:ssa vuosittain tapahtuvista tulipaloista. Käytetään skaalaustekijänä em. lukua 2.29. Vertailulukuina voidaan käyttää seuraavia vuotta 1999 koskevia NFPA:n julkaisemia arvoja: rakenteellisten palojen kokonaismäärä vuonna 1999 oli USA:ssa 523 000, kuolonuhrien määrä (siviilihenkilöt) oli 3570 ja suorat omaisuusvahingot olivat 8490 miljoonaa US-dollaria. Tulokset on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Eri ontelotyyppien rakenteelliset palot: NFIRS-systeemiin kirjatusta luvusta skaalaamalla laskettu arvio USA:n ontelopalojen kokonaishuviiksi ja niiden suhde USA:n vuoden 1999 koskeviin kokonaislukuihin.

Ontelotyyppi	Tulipalot	Kuolonuhrit	Om.vahingot (milj. US \$)	Ontelopalot/rakenteelliset palot	Uhrit/kokonaismäärä¹⁾	Vahingot/kokonaismäärä²⁾
ullakko tai ulko-/sisäkatto	41000	60	650	8 %	2 %	8 %
sisäkatto/lattia	15000	70	250	3 %	2 %	3 %
seinärakenne	28000	60	250	5 %	2 %	3 %
kanavistot (utility shafts)	2000	1	20	0,4 %	0,03 %	0,2 %

1) Kokonaismäärä käsittää kaikki tulipaloissa kuolleet, ei vain rakenteellisissa paloissa kuolleet (tieto ei saatavilla).

2) Kokonaismäärä rakenteellisissa paloissa.

Jos yllälaskettuja arvioita sille, mikä ontelopalojen osuus on kaikista rakenteellisista paloista USA:ssa sovelletaan sellaisenaan Suomeen, niin saadaan seuraavat arviot Suomessa tapahtuville ontelopaloille: yläpohjaontelot, paloja noin $0.08 \times 3000 = 240$ kpl, asennusonteloiden palot 90 kpl ja seinärakenteiden onteloiden palot 150 kpl. Kanavistojen palojen tiheydelle saadaan karkea arvio 10 tapausta/vuosi. Nämä arviot on laskettu käyttäen Suomen rakennuspaloille likimääräistä arvoa noin 3000 per vuosi.

Jos tulipalojen suoriksi kustannuksiksi Suomessa arvioidaan 1,7 promillea bruttokansantuotteesta (BKT), niin käyttämällä esim. vuoden 1998 BKT-lukua, 700 miljardia markkaa eli n. 120 miljardia euroa, saadaan arvio, että suorat tulipalovahingot Suomessa ovat noin 0,2 miljardia euroa. Soveltamalla yllä olevia arvioituja USA:n suhteellisia ontelopalojen vahinko-osuuksia tähän arvioon Suomen tulipalokustannuksista, saadaan eri ontelopalotyyppien suorille omaisuusvahingoille seuraavat arviot: yläpohjaontelot 13 milj. euroa, asennusonteloiden palot 5 milj. euroa ja seinärakenteiden onteloiden palot 5 milj. euroa.

3. Ontelopalojen ominaispiirteitä

On useita syitä, miksi rakennusten ontelotilat ovat palovaarallisia. Osa niistä on ontelotilojen yleisiin ominaisuuksiin liittyviä ja osa syistä on spesifisiä, ontelokohdekohtaisia (Hietaniemi 2000, Hietaniemi 2002, Hietaniemi 2003). Eräs tärkeimpiä ontelopalojen ominaispiirteitä on se, että ne pääsevät usein kehittymään kenenkään havaitsematta, jolloin pienikin kytevä palonalku voi päästä kehittymään suureksi tulipaloksi. Tyypillisiä esimerkkejä tällaisista ontelopaloista ovat tulitöiden aiheuttamat palot seinä- ja kattorakenteiden onteloissa. Kytevät palot saattavat kyteä useita tunteja, ennen kuin ne syystä tai toisesta pääsevät leimahtamaan liekkeihin. Liekehtiväksi kehittynyt palo voi edetä nopeasti, jos ontelossa on sopivat olosuhteet. Perussyynä tähän on tilan pienuus, jonka vuoksi tila lämpenee nopeasti kuumaksi. Pieneen tilaan syntyy lämpöteknisesti kriittinen tilanne, jossa tilaan syötetään nopeammin lämpöenergiaa kuin mitä sieltä pääsee poistumaan. Huonepaloissa tämä johtaa yleissyttymiseen, eli tilan lieskahdukseen, ja onteloissa kriittiseen tilaan edennyt palo voi edetä odottamattoman nopeasti, jopa useita metrejä minuutissa. Ontelokohdekohtaisista vaaroista on korostunein yläpohjan onteloiden syttyminen niiden alapuolella palavien tulipalojen seurauksena: tyypillinen esimerkki tällaisesta palosta on alapuoleisen huonepalon leviäminen yläpohjan onteloon räystäään kautta.

Osahankkeessa "Ontelopalojen ominaispiirteet" tutkittiin kokeellisesti ja mallinnuksen keinoin, miten ontelon eri ominaisuudet, kuten koko, palavan aineen määrä ja laatu, tilaa reunustavat rakenteet ja tilassa kulkevat virtaukset vaikuttavat tulipalon kehittymisen ja etenemiseen ontelotiloissa. Tutkitut tapaukset liittyvät pääasiallisesti seuraaviin ontelotilojen tulipalotapausten kartoituksen perusteella tunnistettuihin tyyppitapauksiin: yläpohjan ontelot, asennusontelot, julkisivujen ja seinärakenteiden ontelot sekä kaksoislasijulkisivujen ontelotilat. Tuloksia voidaan soveltaa myös muiden rakennuksissa esiintyvien ontelotilojen palotapausten tarkasteluun, kuten rakennuksen kanavistojen paloihin. Tulokset julkaistiin VTT-tiedotteita -raporttisarjassa (Hietaniemi ym. 2002). Osahankkeessa tehdyn ontelopalotapausten kartoituksen tuloksia esitetään liitteessä A.

Seuraavassa tarkastellaan ontelotilojen palovaarojen syitä yleisellä tasolla ja sen jälkeen esitetään tutkimusprojektissa saatuja spesifisiä tietoja.

3.1 Ontelotilojen palovaarallisuuden palotekniset perusteet

Kun tulipalo kehittyy suljetussa tilassa, tilan reunat ja kaasut lämpenevät, mikä puolestaan aiheuttaa eri lämmönsiirtomekanismien ja prosessien kautta palamisen kiihtymisen. Takaisinkytkentä palon aiheuttaman lämpenemisen ja palon voimakkuuden välillä on tulipalojen lämpötekniinen perusongelma. Jos takaisinkytkennän aiheuttama palon itse-

ään kiihdyttävä kehittyminen saa jatkua ilman, että paloa yritetään sammuttaa tai palava aine palaa loppuun ja palamiseen riittää happea, kehitys johtaa tilan lämpökatastrofiin, lieskahdukseen. Lieskahtaneessa palossa kaikki tilassa olevat palavat aineet osallistuvat paloon ja sen voimakkuus kasvaa yleensä niin suureksi kuin palamiseen saatavilla oleva hapen määrä sallii.

Palon kehittyminen normaaleissa huonetiloissa on eräs eniten tutkittuja tulipalotyyppisiä ja sen ominaispiirteet tunnetaan hyvin. Edellä luonnehdinta ”normaali” merkitsee huonetilaa, jonka korkeus on suurempi kuin noin 2.5 m ja jonka pituuden ja leveyden suhteet toisiinsa ja korkeuteen ovat sellaiset, että tila ei ole selvästi pitkänomainen, matalanomainen tai muodoltaan kapea.

Vaakasuuntaiset ontelotilat ovat mitoiltaan selvästi erilaisia kuin em. normaalit huonetilat: ne ovat korkeussuunnassa matalia verrattuna tilan yhteen dimensioon (pitkänomainen ontelo, esimerkiksi alaslaskettu katto käytävässä) tai molempiin muihin dimensioihin (matala, laaja ontelo, esim. teollisuusrakennuksen kattorakenteissa). Näiden ontelotilojen kohonneen palovaarallisuuden tärkein palotekninen syy on niiden mataluus, koska tilan korkeuden pienentyessä palon takaisinkytkentämekanismi voimistuu. Myös tilan kapeus voimistaa takaisinkytkentää, mutta suhteellisesti vähemmän kuin korkeus. On kuitenkin huomattava, että korkeuden tai leveyden pienenemisen paloa voimistava vaikutus ei voi jatkua mielivaltaisen pieniin mittoihin asti, koska riittävän matalassa tai kapeassa tilassa ei liekehtivä palaminen enää ole mahdollista.

Pystysuuntaiset ontelotilat muodostavat toisenlaisen lämpötekniikan systeemin kuin vaakasuuntaiset ontelot: jos niitä ei ole osastoitu, niin niissä tilan katon vaikutus on vähäinen. Joissain pystysuuntaisissa onteloissa yläpää ei ole suljettu, vaan ontelon kaasut pääsevät purkautumaan vapaasti toiseen tilaan. Näissä ontelotiloissa palojen vaarallisuus perustuu kahteen tekijään: hormi-ilmiön tehostamaan liekkien ja kuumien kaasujen ja savun nousuun pitkin onteloa sekä lähellä lämmönlähdettä ja toisiaan lähellä olevien reunojen kyky voimistaa lämpösäteilyä.

Ennen tässä raportissa esitettyä työtä suljetussa tilassa kehittyvää paloa koskevat tiedot ja laskentamenetelmät kuvasivat pääasiassa em. normaaleissa huoneissa tapahtuvaa tulipaloa. Ontelotiloissa koskevaa tietoa oli varsin vähän. Normaalista huonepaloa koskevilla tiedoilla ja malleilla pystytään tarkastelemaan ontelopaloja lähinnä kvalitatiivisesti, eli kuvailemaan, miten eri tekijät voivat periaatteessa vaikuttaa ontelopalon kehittymiseen ja leviämiseen. Kvantitatiiviseen tarkasteluun, eli sen kuvaamiseen kuinka suurilla eri tekijöiden ja niiden vuorovaikutusten vaikutukset ovat, kyseiset tiedot kuitenkin eivät sellaisenaan riitä.

Tässä tutkimuksessa on pyritty tuottamaan ontelopaloja koskevaa systemaattista ja kvantitatiivista tietoa.

3.2 Ontelopalojen ominaispiirteiden tutkimustyö

3.2.1 Koejärjestelyt

Kokeita varten rakennettiin suorakulmaisen särmiön muotoinen ontelo, jonka mitat olivat 60 cm × 120 cm × 600 cm (ks. kuva 2). Rakennuslevymateriaalina käytettiin palonkestävää, 12 mm paksua Luja A-levyä. Kaapelikokeissa ontelon pohjalla oli metalliset tukikehikot (kuva 3a), joiden päällä noin 25 cm korkeudella olivat kaapeleiden kiinnitystä varten asennetut metalliritilät. Kaapelit kiinnitettiin ritilään rautalangoin (kuva 3a). Puuontelokokeissa palokuorma asennettiin seinien verhoiluksi (kuva 3b). Palokuormat sytytettiin propaanikaasupolttimella. Kaapelikokeissa poltin sijaitsi kaapeleiden alla niiden keskikohdalla n. 50 cm päässä ontelon etureunasta (ks. kuva 3a). Puuontelokokeissa poltin sijaitsi ontelon vasemman seinän vieressä kiinni seinässä n. 50 cm päässä ontelon etureunasta (ks. kuva 3b).



Kuva 2. Yleiskuva suuren mittakaavan kokeissa käytetystä ontelosta.

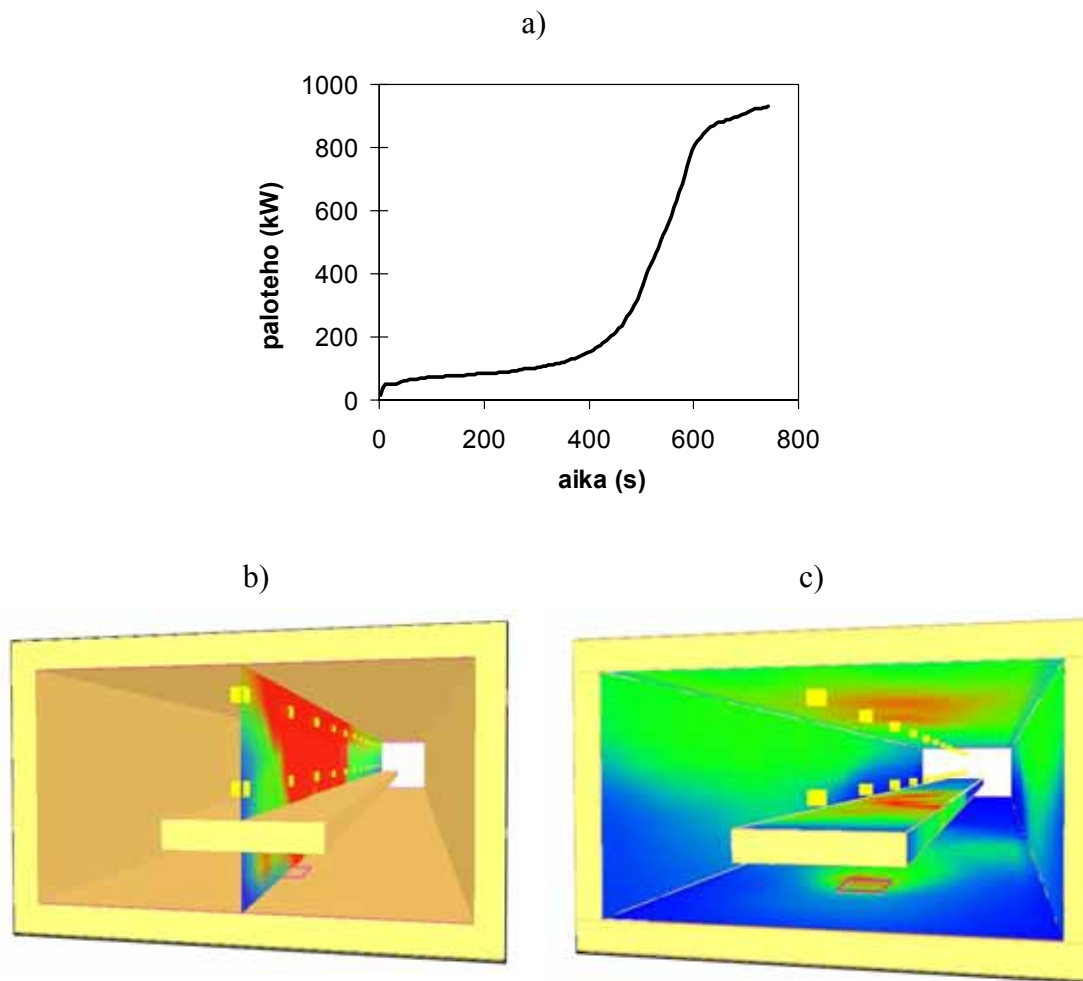


Kuva 3. a) Palokuorman asentaminen ja sytyttämiseen käytetyn polttimen paikka kaapelipalokokeissa. b) Puuontelokokeissa palokuorma oli seinien verhoiluna ja poltin sijaitsi seinän vieressä.

Suuren mittakaavan kokeiden lisäksi tehtiin pienen mittakaavan kokeita, joiden tulokset tukivat ja täydensivät suuressa mittakaavassa saatuja tuloksia.

3.2.2 Mallinnus

Merkittävä osa ontelojen ominaispiirteiden tutkimuksesta tehtiin käyttämällä laskennallista mallintamista. Työkaluna mallinnuksessa käytettiin Fire Dynamics Simulator (FDS) -ohjelman versiota 1 (McGrattan ym. 2000a, 2000b, Hostikka 2001).



Kuva 4. FDS-ohjelmalla laskettujen tulosten esitystapoja: a) aikasarjaesitys (esim. paloteho), b) kenttäsuureiden, kuten virtaukset tai lämpötilat, esittäminen tasojen avulla ja c) pintojen lämpötilan, yms. visualisointi.

FDS-ohjelma kuvaa palon kehittymistä ratkaisemalla systeemiä kuvaavat säilymisyhtälöt kolmiulotteisesti. Sen tulokset voidaan esittää aikasarjoina tai lämpötila, yms. kenttiä kuvaavina tuloksina, ks. kuva 4. Ohjelma edustaa tulipalojen laskennan kehittyneintä joukkoa, joilla on se yhteinen piirre, että ne antavat tuloksena palon leviämisen syttymisen jälkeen (esim. vyöhykemallit eivät tee tätä, vaan niissä käyttäjä määrittää palon kehittymisen lähtötietona). FDS-ohjelman version 1.0 tulokset ovat osoittautuneet varsin luotettaviksi kuvattaessa palon kehittymistä, kun palaminen ei ole merkittävästi hapen määrän rajoittamaa, eli syttymästä lieskahtaneeseen paloon saakka. Sen liekinleviämismalli on riittämätön kuvaamaan tarkasti happirajoitettua paloa. Ohjelman myöhemmät versiot, joita on käytetty tämän hankekokonaisuuden ontelopalojen sammuttamista käsittelevässä osassa kuvaavat myös happirajoitettua paloa.

3.2.3 Tuloksia

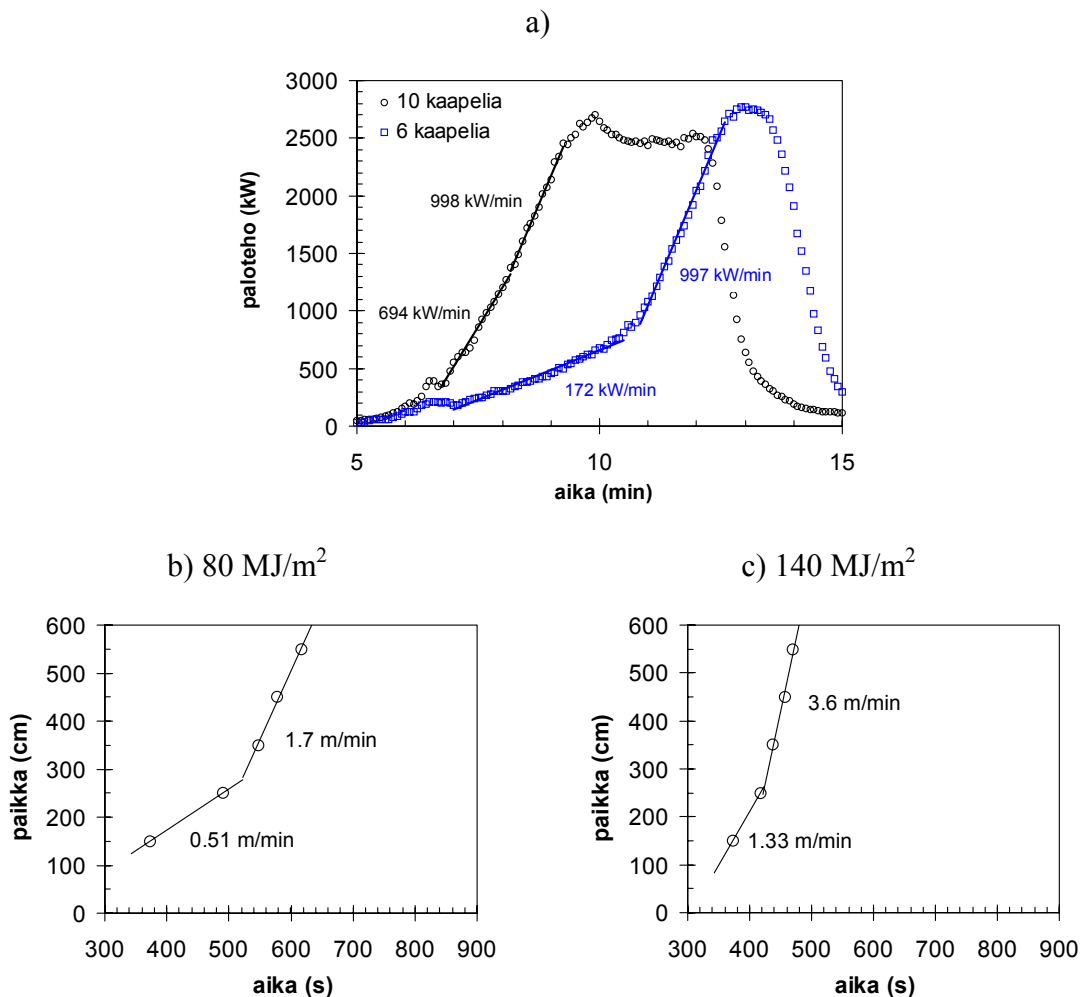
3.2.3.1 Ontelopalon kehittyminen ja siihen vaikuttavia tekijöitä

Ontelotilojen palokuorman määrä vaihtelee kohteen mukaan. Esimerkiksi englantilaisessa tutkimushankkeessa (Fardell ym. 2000) tehdyssä onteloiden kaapelipalokuorman kartoituksessa havaittiin, että onteloissa voi olla kaapeleita hyvin paljon, jopa ”niin paljon kuin tilaan mahtuu”. Toisena esimerkkinä voidaan mainita puurakenteinen yläpohjan ontelo, jossa palo-osastossa palokuormaa on yleensä saatavilla runsaasti, esim. muutama tuhat kilogrammaa puuta (ks. kuva 5). Myös palamiskykyinen pinta-ala on laaja. Tyypillisesti se ylittää yläpohjan lattiapinta-alaa vastaavan määrän. Tämä johtuu mm. siitä, että kattoristikoiden puutavarasta suuri osa on palolle alttiina kaikilta pinnoiltaan.

Rakennuksen pituussuunnassa 10 m mittainen palo-osasto, leveys 8 m						
Kattotuolit k900						
Rakennuksen leveys	8 m		m			
Tukikorkeus	0.35 m		m			
Yläpohjan korkeus	1.0 m		m			
peltikatto, ruoteet 25x100, k350-k400						
11 kattotuolia =>	83	m2	1550	kg	lämpöarvo	17 MJ/kg
ruoteet 25x100, k350-k400 =>	40	m2	750	kg	palokuorman tiheys	489 MJ/lattia-m2
yht.	123	m2	2300	kg	palavaa pintaa	1.5 m2/osasto-m2
huopakatto, aluslaudoitus 25x100						
11 kattotuolia =>	83	m2	1550	kg	lämpöarvo	17 MJ/kg
aluslaudoitus 25x100, tiheä =>	220	m2	2500	kg	palokuorman tiheys	861 MJ/lattia-m2
yht.	303	m2	4050	kg	palavaa pintaa	3.8 m2/osasto-m2

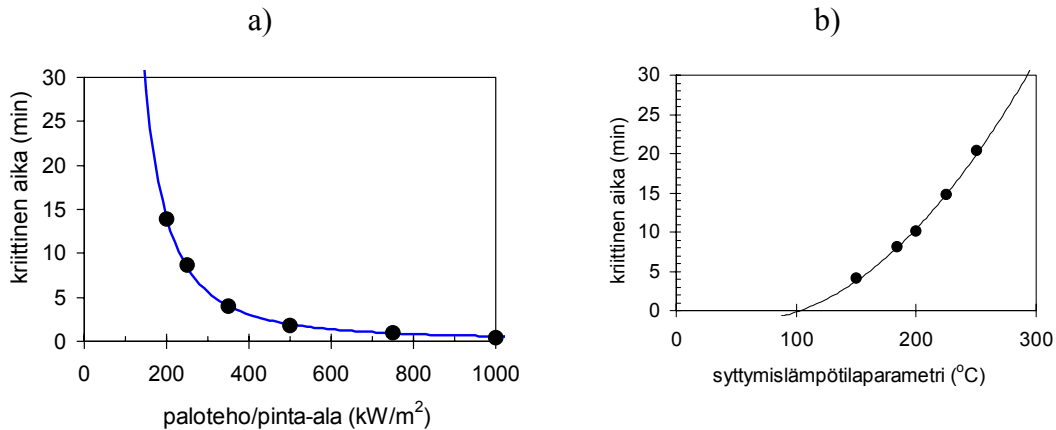
Kuva 5. Esimerkkilaskelma rivitalon yläpohjan ontelon tyypillisestä palokuorman määrästä ja palavan aineen pinta-alasta.

Onteloissa palokuorman tiheydellä on kaksi vaikutusta. Toisaalta se vaikuttaa palon kestoon ja toisaalta tiheä palokuorma edesauttaa palon kehittymistä ja leviämistä. Koska ontelojen tilavuus on paljon pienempi kuin normaalien huonetilojen korkeus, selvästi tavanomaisia palokuorman tiheyksiä pienemmät arvot voivat olla merkityksellisiä palovaarojen kannalta. Nämä vaarat liittyvät lähinnä juuri palon kehittymisen ja leviämisen nopeutumiseen. Ontelopalojen kokeellisessa tutkimuksessa (Hietaniemi ym. 2002) havaittiin, että kun ontelon lattiapintaa kohden lasketun palokuorman tiheys oli noin 80 MJ/m^2 , palo levisi lähes 2 m/s :n nopeudella ja kun palokuorman tiheys oli noin 140 MJ/m^2 , palo levisi lähes 4 m/s :n nopeudella (kuva 6). Myös aikaviive palokuorman syttymisestä kiivaan, nopeasti etenevän palamisen alkaminen lyheni selvästi. Tämä johtuu siitä, että korkeammalla palokuorman tiheydellä palon alkukehityksessä suurempi määrä palavaa ainetta kuumenee, pyrolysoituu ja palaa.



Kuva 6. a) Palokuorman määrän (6 ja 10 PEX-kaapelia vastaten palokuorman tiheyksiä 80 MJ/m^2 ja 140 MJ/m^2) vaikutus palon kehittymiseen (paloteho kilowateissa) sekä b) ja c) $600 \text{ }^\circ\text{C}$ vastaavan lämpötilarintaman etenemisnopeus kuumassa kerroksessa näille palokuorman tiheyksille.

On huomattava, että laajoissa onteloissa olevalle palokuorman tiheydelle saatava arvo voi olla harhaanjohtavan pieni sen palovaarallisuuden suhteen. Tämä johtuu siitä, että se palokuorman ”vaikutusala” eli pinta-ala, johon palo vaikuttaa voi olla paljon ontelon kokonaispintaa pienempi: ontelopalo voi pystyä etenemään tilan pienuudesta johtuvan palamisen voimistumisen vuoksi laajassakin ontelossa, vaikka siellä olisi vain yksi syttynyt kaapelihylly.



Kuva 7. Kriittinen aika a) palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon funktiona ja b) palokuorman pyrolyysilämpötilan funktiona. Kvantitatiivisesti tulos pätee vain tietyn kokoiselle ontelolle (Hietaniemi ym. 2002). Kriittinen aika tarkoittaa tässä viivettä, jonka jälkeen palo muuttuu paikallisesta alkupalosta valtoimenaan leviäväksi paloksi.

Ontelopaloissa palokuorman laatu on yhtä tärkeää kuin sen määrä. Jos palokuorma on herkästi palavaa ainetta eli materiaalia, joka voi syttyä alhaisessa lämpötilassa ja luovuttaa palaessaan paljon lämpöä (tyypillisesti esimerkiksi kaapelit, jossa palavan aineen määrästä merkittävä osa muodostuu eristeissä¹ käytetystä palosuojaamattomasta polyolefiinimuovista, esim. PE tai PP), niin palo kehittyy ja etenee paljon nopeammin kuin tapauksessa, jossa palokuorma muodostuu heikosti paloon osallistuvasta materiaalista (esim. kaapeli, jonka vaippa ja eristeet ovat palosuojattua muovia tai fluoropolymeeriä) (kuva 7). Tällä hetkellä PVC-muovi on tavallisin kaapeleissa käytetty muovi: sitä käytetään etenkin kaapelin vaippana, mutta suuressa osassa kaapeleita myös johtimien eristeet ovat PVC-muovia. Sen palavuus on polyolefiinimuoveja vähäisempää, mutta palosuojattuja tai fluoropolymeerimuoveja (FPE) voimakkaampaa. Ontelon palokuorman syttymisen jälkeen ontelopalon kehityksessä on erotettavissa kaksi vaihetta: ensimmäi-

¹ Kaapeleita, joiden vaippa on polyolefiinimuovia ei juurikaan käytetä sisäasennuksissa.

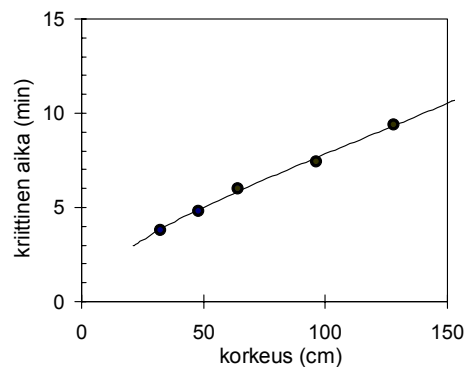
sessä vaiheessa palo kasvaa pysyen pinta-alaltaan rajoitettuna syttymiskohdan läheisyyteen ja toisessa vaiheessa riittävän suureksi kasvanut palo lähtee etenemään. Toinen vaihe alkaa, kun tila kuumentunut tarpeeksi, jotta se voi lieskahtaa. Palokuorman palavuus (syttyvyys ja lämmöntuotto) vaikuttaa voimakkaasti etenevän alkamishetkeen: Hietaniemen ym. tutkimuksen (2002) mukaan voidaan arvioida, että herkästi syttyville materiaaleille (esim. polyolefiinimuovit) se on korkeintaan 5 minuuttia, näitä heikommin paloon osallistuville materiaaleille (esim. PVC) suuruusluokkaa 5–15 minuuttia ja yli 15 minuuttia materiaaleille, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettua. Hyvillä materiaaleilla palo ei välttämättä lähde etenemään lainkaan. Onteloissa, joissa palokuorma muodostuu viimeksi mainituista materiaaleista tai muista yhtä hyvät palominaisuudet omaavista materiaaleista, ontelon osiin jaolla ei palon leviämisen suhteen ole saavutettavissa oleellisia paloturvallisuusetuja. Savun leviämisen estäminen voi toki olla tarpeen.

Onteloissa, joissa pääasiallisena palokuormana on verhouksien ja rakenteiden puuosat, pienen tilan palon suhteellisen korkea lämpötila johtaa hyvin nopeaan puun pyrolysoitumiseen ja siten nopeaan palonkasvuun ja -leviämiseen. Kokeissa havaittiin hetkellisesti jopa lähes 8 m/min suuruinen palon leviämisenopeus. Näin nopeaan palonkasvuun liittyy mahdollisuus siitä, että palo tukahduttaa itse itsensä (näin kävi em. kokeessa): palaava puupinta kuluttaa happitason niin alhaiseksi, että hiiltyneenä puu ei jaksa enää palako. happimäärässä.

Kokeet ja mallinnus ovat osoittaneet puun palosuojauksen erittäin tehokkaaksi keinoksi vähentää tai jopa eliminoida puuta palokuormana sisältävien ontelojen palovaaroja (Hietaniemi 2001, Hietaniemi ym. 2002).

Palo voi edetä ontelossa hyvin nopeasti, jos ilma pääsee liikkumaan ontelossa niin, että paloon pääsee virtaamaan ilmaa sekä savukaasuja poistumaan kohtuullisen hyvin. Tällöin palon etenemisnopeus voi olla useita metrejä minuutissa (Hietaniemi ym. 2002). Näin korkea leviämisenopeus johtuu siitä, että onteloon syntyvä virtaus edesauttaa palon leviämistä. Tällaiseen palamiseen vaadittava ilmavirtausreitti voi syntyä esim. alakaton ontelossa puuttuvien tai palossa särkyvien alakaton verhouksetalojen välille tai ontelossa, jota käytetään ilmanvaihdossa. Erityisen nopeaa palon leviäminen voi olla, jos ontelon savukaasut pääsevät purkautumaan ylöspäin esim. puuttuvan kerrosten välisen läpiviennin palokatkon kautta. Jos ontelon tuuletus on vähäisempää, palorintama etenee hitaammin, mutta ei välttämättä kuitenkaan hitaasti, noin metrin minuutissa tai nopeamminkin. Tällainen palon leviäminen on tyypillistä esimerkiksi tapauksessa, jossa palaminen saa ilmansa huonetilan särkemän tai särkemien alakaton verhouksetalojen kautta ja savukaasut poistuvat pääasiassa rakojen kautta. Tällöin palaminen voi olla hyvin epätydellistä ja palossa syntyy paljon palamattomia palokaasuja, mihin liittyy em. räjähdysmäisesti humahtavan palon tai savukaasuräjähdyksen vaara.

Ontelon koko ja muoto vaikuttaa voimakkaasti palon kehittymiseen. Kuva 8 esittää, miten ontelon korkeus vaikuttaa palon kehittymisessä kriittiseksi ontelossa, jossa palokuorma sijaitsee tilan verhoiluna ja muina reunarakenteina, kuten on tilanne esim. yläpohjan ontelossa. Näitä seikkoja esitellään yksityiskohtaisesti Hietaniemen ym. (2002) raportissa.



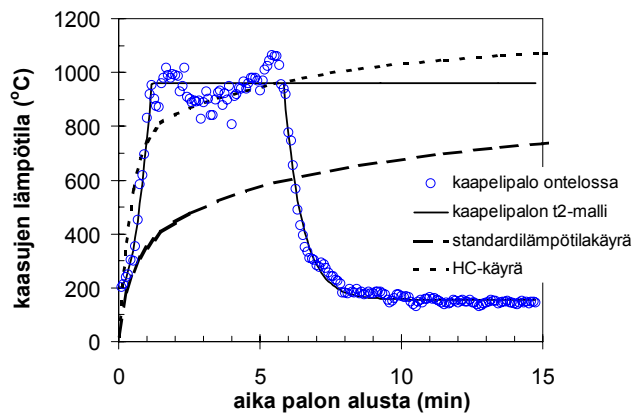
Kuva 8. Kriittinen aika ontelon korkeuden funktiona palokuormalla verhoillussa ontelossa.

3.2.3.2 Täysin kehittyneen ontelopalon lämpötila

Ontelopalo voi kehittyä nopeasti hyvin kuumaksi. Kuvassa 9 verrataan eräessä VTT:n ontelopalokokeessa kaapelipalokuormalle mitattua lämpötilan kehitystä sekä standardipalokäyrään että hiilivetypalokäyrään (HC-käyrä). Nähdään, että hiilivetypalokäyrä kuvaa mitattuja lämpötiloja paljon paremmin kuin standardipalokäyrä. Tämä on itse asiassa varsin luonnollinen tulos: standardipalokäyrä perustuu selluloosapohjaisten materiaalien normaalikokoisessa huoneessa tapahtuvan palon lämpötilakehitykseen, mutta HC-käyrä perustuu hiilivetyjen voimakkaaseen palamiseen, joka oli kyseisten kokeiden palotilanne. Se, miten kuumaksi palo kehittyy, riippuu palavan aineen kyvystä luovuttaa lämpöä. Alla olevassa kuvassa esitetyt lämpötilat vastaavat voimakkaasti paloon osallistuvaa muovia. Siksi se edustaa hyvin paha uhkakuvaa. Vaikka herkästi syttyvällä vai-palla varustettuja kaapeleita ei Suomessa ontelotiloihin asenneta, voi tietyissä PVC-vaippaisissa kaapeleissa olla johtimien eristeinä merkittäviä määriä PE- tai PP-muovia². Siksi tämän pahan uhkakuvan toteutuminen on kuitenkin täysin mahdollista. Palosuoja-

² Tällaiset kaapelit toimivat palotesteissä yleensä aivan hyvin läpäisten esim. yksittäisen kaapelin palokokeen IEC 60331-1. Useimmissa palotesteissä tarkastellaan kaapelin toimintaa kuitenkin ontelopalon lieskahtanutta paloa vastaavaa palorasitusta selvästi pienempää palorasitusta käyttäen.

tuilla tai fluoropolymeereihin perustuvilla kaapeleilla lämpötilat jäisivät kuitenkin ilmeisesti tuntuvasti alemmiksi.



Kuva 9. Ontelopalossa muodostuvan kuuman kerroksen lämpötilan kehitys. Erilliset pisteet ovat mitattuja lämpötiloja (Hietaniemi ym. 2002) ja yhtenäiset ohuemmat käyrät esittävät neliöllisen palonkasvumallin mukaisia kuvauksia mitatuista lämpötiloista (tapaukset, joissa palokuorma loppuu samaan aikaan kuin kokeessa ja tapaus, jossa palokuormaa riittää pitempään paloon). Katkoviiva kuvaa standardipalokäyrää ja pisteviiva hiilivetypalokäyrää.

4. Ontelopalojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen

4.1 Yläpohjan ontelotilojen paloturvallisuuden rakenteellinen parantaminen

Tutkimuksen lähtökohtana on Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 (RakMK E1, Ympäristöministeriö 2002) kohdassa 7.6.1 esitetty vaatimus: ”Ullakot ja ontelot on tehtävä siten, ettei palon syttymisen eikä palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa olennaisesti kasva niiden johdosta.”

On huomattava, että tämä vaatimus kohdistuu vaarojen *olennaisen kasvamisen* estämiseen. Se tuo mukanaan suhteellisuusnäkökulman: rakennuksen muiden rakenne- ja materiaaliratkaisujen sekä paloturvallisuuteen vaikuttavien tekijöiden määräämä turvallisuustaso luo vertailutason ontelotilojen paloturvallisuudelle. Ontelopalojen etenemisen katkaisemiseen tarkoitettavat ratkaisut eivät saa olla huonoja siten, että ne oleellisesti lisäävät vaaroja, mutta toisaalta ontelotilan suojaaminen hyvilläkään menetelmillä ei auta, jos palo pääsee leviämään tuhoisaksi jollain muulla tavalla. Ontelotiloilla on yleensä jokin rakennusfysikaalinen, esim. kosteustekninen tehtävä, jonka toteutuminen on otettava huomioon paloteknisissä ratkaisuissa.

Tarkasteltavat ontelotilat ovat pääasiassa samat kuin aiemmassa Ontelopalojen ominaispiirteet hankkeessa (Hietaniemi ym. 2002). Näistä kohteista tutkimuksen piiriin valittiin seuraavat kysymykset ja ongelmat:

- **Räystäät ja yläpohjan ontelot**
 - yläpohjan onteloon räystäään kautta leviävän palon estäminen/riittävän pitkä viivästyttäminen
 - osastoivien/osiin jakavien rakennusosien tiiviys kattorakenteen liittymässä
 - luukkujen palonkesto
 - palon leviäminen yläpohjan ontelossa räystäään kautta kiertäen.
- **Julkisivun tuuletusraot:**
 - palon leviämisen estäminen/hidastaminen palokatkoilla.
- **Alaslasketut katot/asennuslattiat**
 - pinta-alaosastointitarpeet
 - mahdolliset osiin jakavat rakenneratkaisut.

- **Kaksoislasijulkisivujen ontelot:**

- ontelotilan kuumenemiseen liittyvät vaarat ja niiden vähentäminen sekä ontelotilan savulla täyttymiseen liittyvät kysymykset.

- **Teollisuusrakennusten seinä- ja kattorakenteet:**

- tuulettuvien kattorakenteiden matalat ontelotilat.

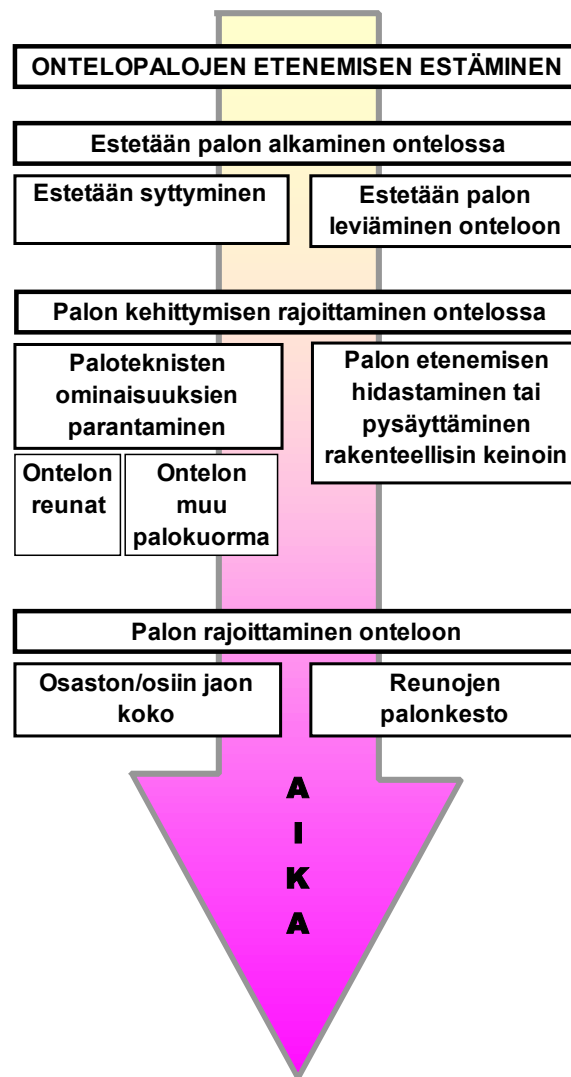
Näiden tilojen paloturvallisuusongelmista keskityttiin tiettyihin ongelmakohtiin. Tärkein valintaperuste tietyn uhkakuvan valinnalle hankkeessa tutkittavaksi oli se, että sitä koskevien säädöksiä ja/tai ohjeistuksen voidaan katsoa vaativan parannusta, esim. lisäyksiä, selkeytyksiä ja tarkentamista/tarkistamista. Toinen painava seikka oli uhkaan liittyvän riskin suuruus ja siitä johtuva tarve löytää tilannetta parantavia ratkaisuja. Uhkakuviin palataan tarkemmin tuonnempana.

Pääasiallinen tarkasteltu paloturvallisuustavoite on ihmishenkien säästäminen. Teollisuuskohteiden osalta tarkastellut ongelmat liittyvät kuitenkin lähinnä omaisuuden varjelemiseen (välittömät ja välilliset menetykset).

Näihin kohteisiin liittyvät yksittäiset uhkakuvat poikkeavat suuresti toisistaan niihin liittyvien paloriskien luonteen perusteella. Esimerkiksi yläpohjan onteloiden palojen suhteellinen osuus tulipaloista on tunnetusti merkittävä, mutta paloja, joissa kaksoislasijulkisivu olisi osallistunut palon leviämiseen, ei Suomessa liene tapahtunut tämän raportin kirjoitusaikaan mennessä (vuoden 2002 loppupuoli). Tätä ei kuitenkaan voida tulkita siten, että kaksoislasijulkisivuihin liittyvät ongelmat olisivat merkityksettömiä: palon syttymistodennäköisyys toimistotaloissa on onneksi pieni (noin $2 \cdot 10^{-6}/a/m^2$ (Tillander & Keski-Rahkonen 2001)) ja siksi paloja ei ole odotettavissa suurta määrää. Kuitenkin, jos kaksoislasijulkisivullisessa rakennuksessa sattuu palo, joka pääsee leviämään lasien välisen ontelotilan kautta, odotettavissa olevat vahingot ovat suuret.

Rakennusten ontelotilat liittyvät useimmiten rakenteiden tuuletustarpeisiin (poikkeuksena mm. akustisista ja esteettisistä syistä asennetut alakatot). Siksi rakennusfysikaaliset tekijät, etenkin kosteustekniset seikat, ovat oleellinen osa ontelotilojen palo-ongelmien tarkastelua. Tämä on otettu huomioon esitetyissä tuloksissa; monet tutkitut ongelmat liittyvätkin juuri palo- ja kosteusteknisen toimivuuden yhtäaikaiseen toteuttamiseen.

Kuva 10 esittää kaaviona ontelotilojen palojen etenemisen ehkäisemiskeinot.



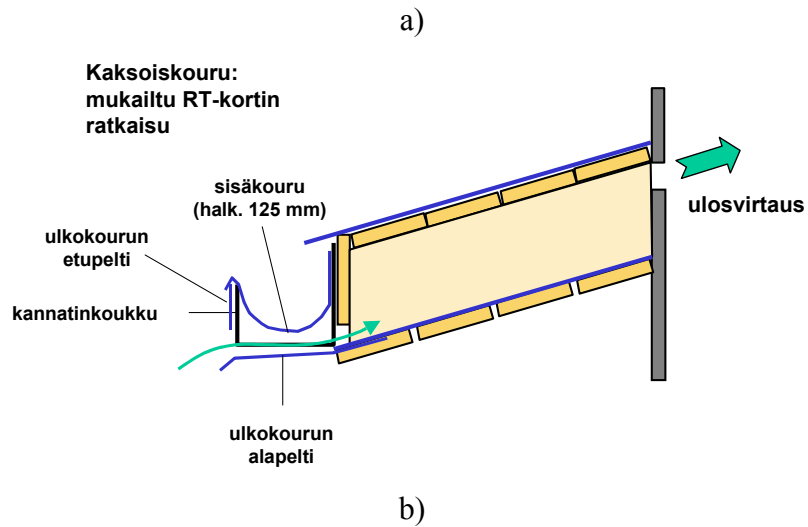
Kuva 10. Ontelotilojen palojen etenemisen ehkäisemiskeinot.

4.1.1 Palon leviämistä hidastava räystäs

Räystäällä on hyvin merkittävä rooli yläpohjan ontelopalojen kehittämisessä. Varsin yleinen yläpohjan ontelopalon kehittymisen tapahtumasarja on sellainen, jossa tulipalo alkaa rivitalon jossakin huoneessa, kehittyy lieskahtaneeksi paloksi, rikkoo ikkunan ja leviää räystäään kautta yläpohjan onteloon, jossa palo etenee edelleen. Toinen merkittävä syy räystäään kautta yläpohjan onteloon eteneviin paloihin on seinän ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviäminen räystäään yläpohjaan.

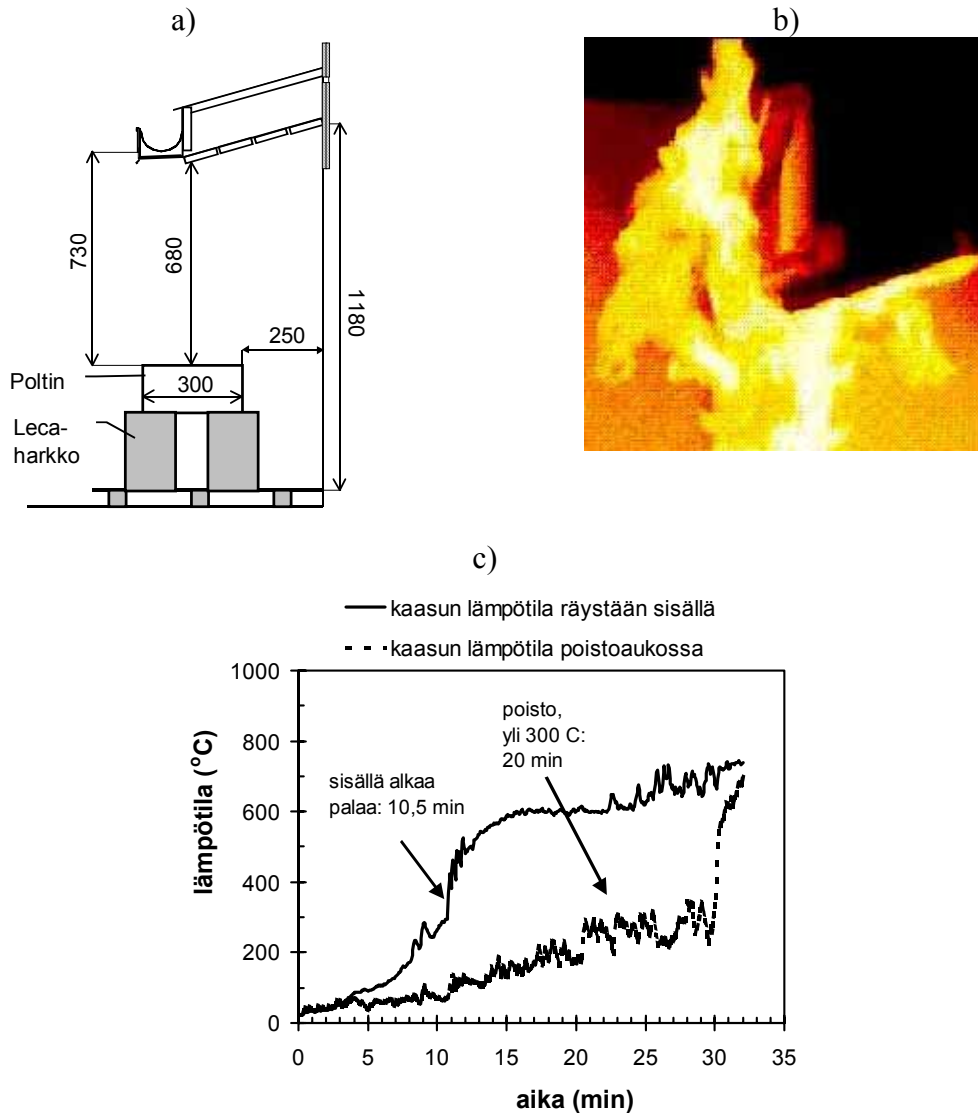
Räystäiden kautta leviävät palot liittyvät myös siihen oleelliseen vaatimukseen, että ”palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa” (RakMK E1 1.2.1). Etenkin pääkaupunkiseudulla suuntaus on kohti yhä tiiviimpää pientalorakentamista, jossa rakennusten välinen etäisyys voi alittaa 8 m. Tällöin rakennusten välisen palonleviämisen rajoittaminen tulee huolehtia ”rakenteellisin tai muin keinoin” (RakMK E1 9.1.2). Rakenteellisia keinoja ovat mm. vesikaterakenteen syttyvyyden rajoittaminen ja määräykset koskien ulkoseinän tiiviyyttä ja eristävyyttä (P3-taloissa vaaditaan, että ulkoseinä toimii EI-M 60 -luokan vaatimukset täyttävänä palomuurina; normaalistihan ulkoseinältä ei vaadita osastoivuutta). Seinän ulkopinta voi olla D-luokan materiaalia, joka mahdollisesti voi syttyä lähellä olevan rakennuksen tulipalosta tulevan lämpösäteilyn vaikutuksesta. Jos palon leviämistä räystään kautta ei ole estetty mitenkään, viereisen rakennuksen seinällä syttynyt palo voi edetä sen yläpohjaan.

Ontelopalojen katkaisemista tutkineessa hankkeessa kehitettiin räystääsratkaisu, jolla voidaan hidastaa lieskahtaneen huonepalon leviämistä räystäälle ja jopa estää seinällä ulkoisesta syystä leviävän palon eteneminen yläpohjan onteloon. Tehtyjen kokeiden mukaan räystääs hidastaa lieskahtaneen palon etenemistä noin 10–15 minuuttia, mikä palokuntien toimintavalmius-aikojen valossa (90 % fraktiili noin 10 minuuttia (Hieta-niemi ym. 2003)) on usein riittävän pitkä aika, jotta palokunta voi ehtiä estämään palon leviämisen yläpohjaan.



Kuva 11. a) Paloa hidastavan räystään kaaviokuva (asennustapa kokeissa) ja b) valokuva.

Palon leviämistä hidastava räystäs esitetään kuvassa 11. Se perustuu RT-kortissa RT 85–10596 esitettyyn kaksoiskoururakenteeseen. Erona RT-kortin ratkaisuun on lähinnä se, että palon leviämistä hidastavassa räystäässä räystään pelti ulottuu harvalautojen alla talon seinään asti sulkien näin liekkien ja kuumien kaasujen suoran etenemistien yläpohjaan. Yläpohjan tuuletusilma otetaan otsalaudan alapuolelta.



Kuva 12. a) Paloa hidastavan räystään toiminnan koejärjestely ja b) esimerkki palorasituksesta (räystääseen kohdistunut lämpötila oli 600–800 °C). c) Kokeen aikana mitattuja lämpötiloja.

Harvalaudoituksen sulkeva rakenneosia on välttämätön edellytys sille, että räystäs voi hidastaa palon leviämistä, mutta se ei välttämättä ole riittävä toimenpide: on pidettävä huolta myös siitä, että räystäs ei ala toimimaan hormina, joka imee kuumat kaasut ja liekit sisälleen. Kuvassa 11 esitetyssä rakenteessa hormi-ilmiö estetään alipaineella, joka syntyy liekkien virratessa koururakenteen ohi. Kuvassa 12 esitetään räystäsraakenteen toiminnan koejärjestely ja mittaustulokset. Nähdään, että palaminen alkaa räystään sisällä runsaan 10 minuutin kuluttua palorasituksen alkamisesta, kun tavallinen räystäs syttyisi vastaavissa olosuhteissa noin puolessa minuutissa. Kun räystäs on syttynyt sisältä, edellä mainittu koururakenteen synnyttämä alipaine hidastaa palamisen ja kuumien kaasujen etenemistä siten, että kokeessa puun syttymiseen tarvittava noin 300 °C:een

lämpötila saavutettiin räystäään poistoaukossa noin 20 minuutin kuluttua sitä, kun palorasitus alkoi. Todellisissa räystäissä ei mitään poistoaukkoja ole, vaan räystääs aukeaa yläpohjan onteloon. Räystääs toimisi tässä tapauksessa siten, että palo etenisi räystäältä yläpohjaan onteloon *liekkirintamana* puurakenteissa ja aluskatteella, mutta ei kuumien kaasujen ja liekkien virtauksen kautta.

4.1.2 Yläpohjan osastointi

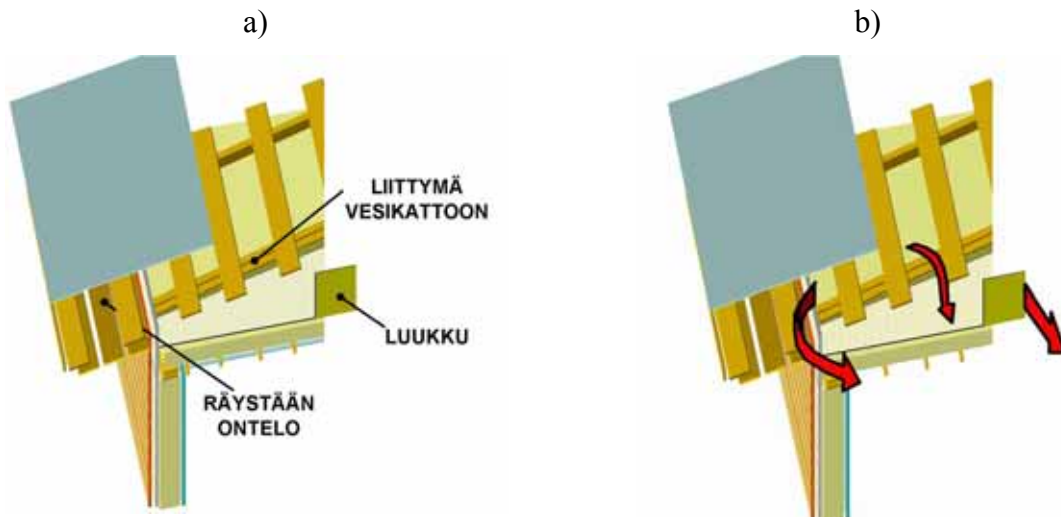
Osastoimattomassa yläpohjan ontelossa palon kehittyminen ja leviäminen on nopeaa (Hietaniemi ym. 2000, Hietaniemi ym. 2002). Nykyään rivitalojen yläpohjan ontelot osastoidaan huoneistoittain luokkavaatimuksen EI 30 toteuttavilla seinärakenteilla. Silti uusissakin kohteissa palo voi levitä koko yläpohjan onteloon. Yläpohjan ontelon osastoinnin heikko kohta ei kuitenkaan yleensä ole osastoiva seinä itsessään [Anon 1997], vaan palon leviämisen kannalta kriittisiä tekijöitä ovat (ks. kuva 13):

- osastoivan seinän liittyminen vesikattoon,
- luukut
- räystäälle avoin seinän osa ja räystäään ontelo.

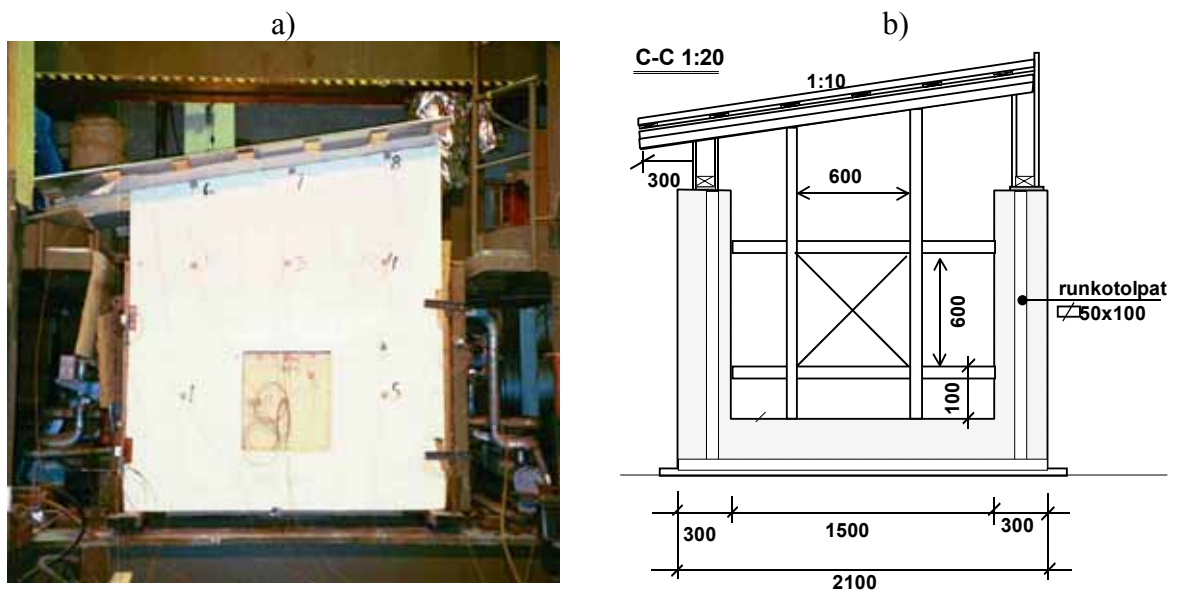
Tutkimuksessa tarkasteltiin myös aluskatteen toimintaa ja mahdollista vaikuttamista palon leviämiseen.

Ontelopalojen katkaisemista tutkineessa hankkeessa selvitettiin kokeellisesti, miten nämä osastoinnin kriittiset kohdat toimivat kokonaisuutena standardipalorasituksessa. Koejärjestely toteutettiin rakentamalla VTT:n dimensioltaan suuruusluokkaa $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ olevan rakenteiden testausuunin yhteyteen yläpohjan onteloa kuvaava rakenne kuvan 14 esittämällä tavalla. Kuva 15 esittää kokeessa tutkitut osastoivan seinän vesikattoliittymän, kuva 16 luukun ja kuva 17 räystäään kautta kiertävän palon estämiseksi tehdyn rakenteen ratkaisut. Kokeen kesto oli 30 minuuttia.

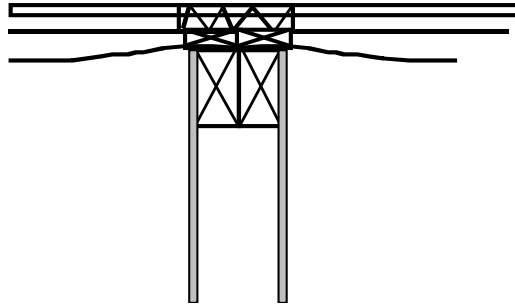
Kokeessa käytetty osastoiva seinä oli muuten tavanomaisen rivitalon osastointivaatimuksen EI 30 täyttävän seinärakenteen kaltainen, paitsi että rakennuslevyjen sijasta käytettiin paloon reagoivalla aineella käsiteltyä kangasta (käsittely vain toisella puolella). Kankaasta tehty osastoiva seinä läpäisi sen tiiviyn määrittämiseksi tehdyt pumpulitukkokokeet kokeen keston ajan, 30 minuuttia, eikä seinään syntynyt kokeen aikana rakoja. Eristävyytensä kankaalla toteutettu osastoiva seinä menetti kuitenkin kokeen alkuvaiheessa.



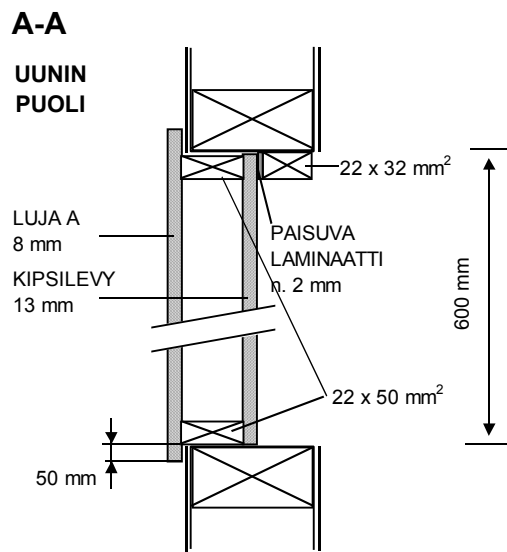
Kuva 13. a) Yläpohjan ontelon osastoinnin kriittiset kohdat ja b) palon leviämisreitit.



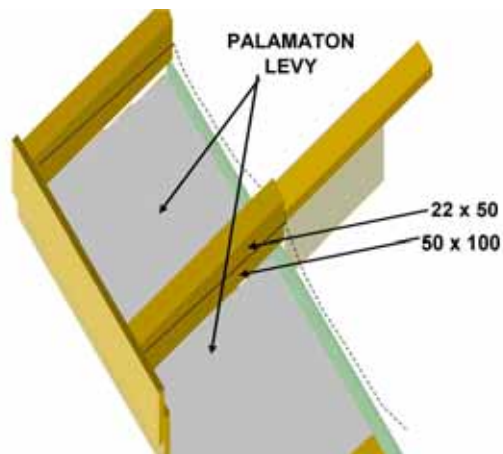
Kuva 14. Yläpohjan osastoinnin koejärjestely: a) valokuva ja b) piirros.



Kuva 15. Osastoivan seinän ja vesikaton liittymä.



Kuva 16. Luukun rakenteen pystyleikkauskuva.



Kuva 17. Räystäään ontelon katkaisurakenne.



Kuva 18. Luukun toiminta.

a)



b)



Kuva 19. a) Osastoivan seinän vesikateliittymän toiminta. b) Liekkien leviäminen räystäään katkorakenteen pettäessä kokeen jatkuttua noin 16 minuuttia.

Eri rakenteiden toiminta kokeen aikana oli seuraava:

Saranoitu luukku ei sulje aukkoa hermeettisesti, vaan luukun ja sen sulkeman aukon reunojen väliin jää pakostikin pieniä välyksiä, joista palon aikana vuotaa kaasuja (kuva 18). Nämä kaasut ovat kuitenkin niin kylmiä, että luukku läpäisi tiiviyskriteerit (samoin kuin eristävyyskriteerit) koko kokeen ajan. Vuotava kaasuseos eivät syty itsestään ilman ulkopuolista sytytyslähdettä, mutta se kuitenkin sisältävät palamiskykyisiä kaasuja, jotka voivat syttyä sytytyslähteen, esim. kipinä tai pistol liekki vaikutuksesta. Kaasujen vuotoa voidaan vähentää vastakappaleen avulla, jota vasten luukku pääsee painumaan (vrt. kuva 18: vasen puoli, jossa ei ole vastakappaletta, vuotaa enemmän kuin oikea puoli, jossa on vastakappaleena puurima). Luukun yläreunassa oli puisen vastakappaleen lisäksi paisuva laminaatti: kokeen aikana kaasujen vuotaminen näytti olevan vähäisintä tällä luukun reunan osalla.

Myös villalla tukittu osastoivan seinän ja vesikatteen liittymä vuoti kaasuja koko kokeen ajan (kuva 19a). Samoin kuin luukusta vuotaneet kaasut, myös nämä kaasut olivat niin kylmiä, että liittymä läpäisi pumpulitukoilla tehdyt tiiviystestit.

Aluskatteen osallistuminen paloon oli vähäistä, eikä aluskatteen toiminta aiheuttanut ongelmia osastoinnin toimivuudelle. On kuitenkin huomattava, että kyseinen aluskatemateriaali vastaa syttyvyydeltään luokan E tuotetta, mutta markkinoilla voi olla tätä helpomminkin syttyviä ja palavia tuotteita (luokka F), joille em. johtopäätös ei välttämättä päde.

Osastoinnin pitävyyden kannalta pahimmaksi ongelmaksi osoittautui räystäään sulkeminen (kuva 19b). Kokeessa tuli selvästi ilmi, että palorasitus räystäällä ei ole itse palotilan olosuhteita vähäisempää, vaan voi olla jopa ankarampi, koska palaminen räystäällä voi olla voimakasta palotilasta kulkeutuvien palamattomien kaasujen kohdatessa happirikkaan ulkoilman. Kokeessa käytetty rakenne ei toiminut riittävän pitkään lähinnä siksi, että se oli kiinnitetty liian heikosti. Lisäksi harvalaudoituksen sulkeva levytys petti. Käyttäen riittävän lujaa kiinnitystä ja kaksinkertaista levytystä rakenne kestäisi selvästi paremmin. Jos osastoiva seinä on kattoristikon kohdalla, ristikon paarre tarjoaa luonnollisen sulun räystäään ontelolle. Tällaisessa tapauksessa edellä mainitut kiinnitysongelmat eivät tuota ongelmia. Tässä tapauksessa paloteknisesti kelpoinen ja asennuksen kannalta luonteva ratkaisu on ulottaa harvalautojen sulkeminen koko kattoristikoiden väliselle matkalla osastoivan seinän molemmin puolin.

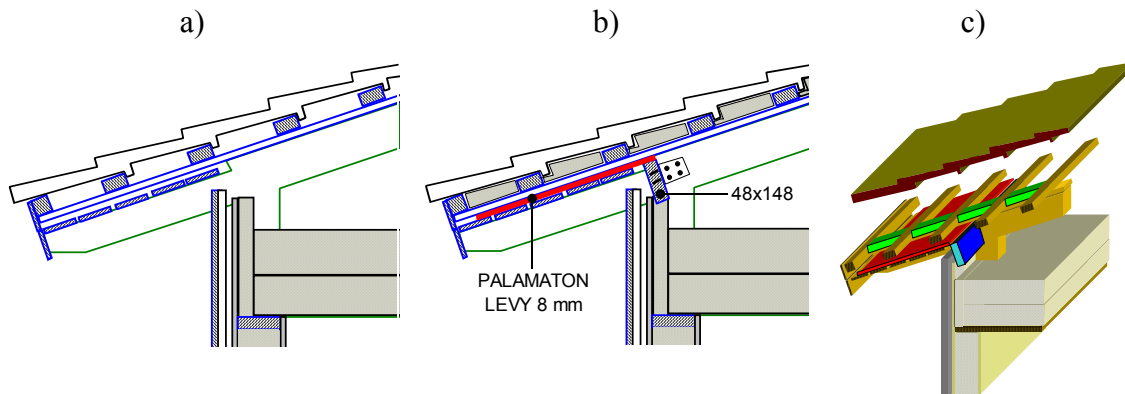
4.1.3 Räystään ja yläpohjan ontelon/ullakon erityisratkaisuihin perustuvia palon katkaisemisratkaisuja

Edellä kuvatussa kuutiouunikoikeessa tutkittiin yleisesti käytetyn rakennustavan mukaisiin räystään, yläpohjan ja vesikaton rakenteisiin tehtävää osastointia. Tutkittu räystään kautta osastoinnin kiertävän palon katkaisu on sovellettavissa myös jo olemassa olevien kohteiden paloturvallisuuden parantamiseen.

Uudisrakentamisessa ongelmaa voidaan lähestyä myös käyttämällä rakenneidealtaan tavanomaisesta rakennustavasta poikkeavia ratkaisuja. Seuraavassa esitetään tällaisia lähestymistapoja. Ensimmäinen esimerkki koskee Suomessa Insinööritoimisto Tasoplan Oy:ssä³ kehitettyä ratkaisua ja toinen norjalaista ratkaisua.

4.1.3.1 Räystään harvalaudoitus kattoristikon paarteen päällä

Jos räystään harvalaudoitus nostetaan katon kannattimen yläpuolelle, saadaan yläpohjan ontelosta ulos aukeava seinän aukko suljettua helpolla ja luotettavalla tavalla aina korokerimoihin asti. Lisäksi harvalautojen yläpuolella olevasta räystään ontelosta tulee pieni, jolloin se on helppo sulkea levytyksellä, mikä on aina esim. villoitusta tiiviimpi ratkaisu. Tähän ajatukseen perustuva räystään katkaisemisratkaisu esitetään kuvassa 20.

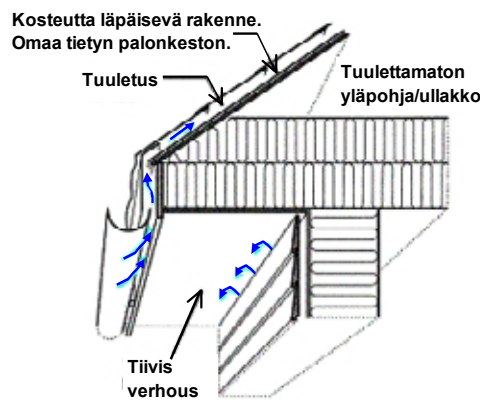


Kuva 20. a) Räystäs, jossa harvalaudoitus on lovetun katonkannattajan yläpuolella. b) Yläpohjan ontelon ja räystään välisen aukon sulkeminen osastoivan seinän kohdalla puutavaran ja palamattoman levyn avulla. c) Aksonometrinen kuva. Myös korokeriman ja katteen väli on tukittava villalla, jotta tuli ei pääse leviämään osastoivan seinän ohi.

³ Uusi nimi 1.2.2003 alkaen. Aiempi nimi oli K & H Oy Insinööritoimisto.

4.1.3.2 Tuulettumaton yläpohja/ullakko

Norjassa Byggforsk-tutkimuslaitos on kehittänyt tuulettumattoman yläpohja/ullakko-rakenteen (Uvsløkk & Lisø 2000, Byggforsk 2002). Rakenteen periaatepiirros esitetään kuvassa 21. Rakenne sulkee räystäään ontelon tiiviisti. Jotta koko järjestelmä toimii paloteknisesti, on myös katteen ja aluskatteen välinen tuuletusrako on suljettava. Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on ratkaisevassa asemassa aluskaterakenteen kyky läpäistä kosteutta. Byggforsk suosittelee, että rakenteen vesihöyrynvastuksen tulee olla korkeintaan $2,5 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ (vastaa vesihöyrynläpäisevyyskerroimen arvoa $0,40 \cdot 10^{-9} \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$). Tämä vaatimus on toteutettavissa useilla tuulensuojalevymateriaaleilla. Sopivaksi aluskatemateriaalin vesihöyrynvastuksen arvoksi mainitaan $1,3 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$.

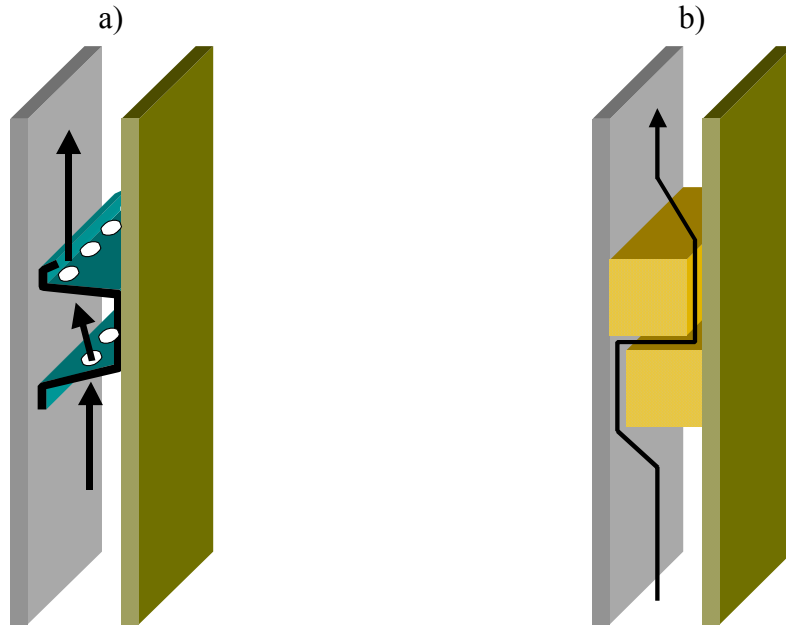


Kuva 21. Tuulettumaton yläpohja/ullakko (Uvsløkk & Lisø 2000, Byggforsk 2002). Ratkaisun kriittisin kohta on katteen alla olevan aluskaterakenteen kosteustekninen toiminta.

4.2 Julkisivun tuuletusraon katkaiseminen

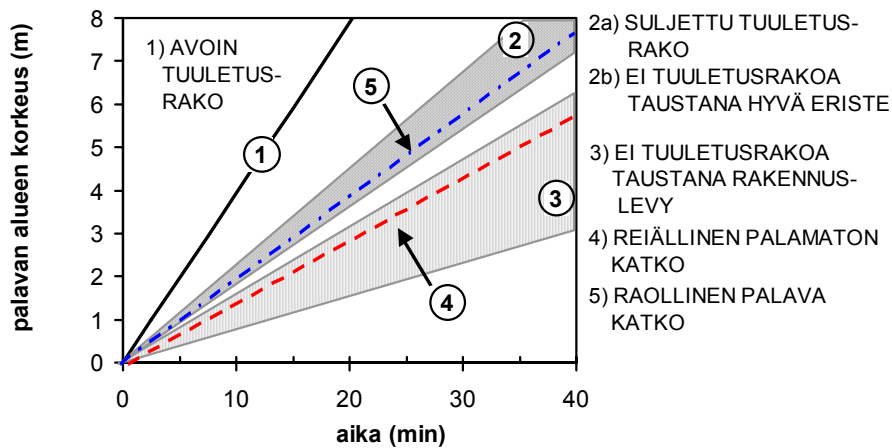
Julkisivun tuuletusraossa etenevän palon pääasiallinen uhka liittyy siihen, että palo voi levitä julkisivulta muihin tiloihin, kuten huoneistoihin tai ullakolle/yläpohjan onteloon. Näistä kahdesta tapahtumasta jälkimmäisen todennäköisyys on korkeampi, ellei sitä räystäsratkaisuin ole estetty. Huoneistoihin palo voi edetä esim. ikkunoiden raoista tai jos ikkuna on auki.

Tässä esityksessä keskitytään julkisivuihin, joissa julkisivun ja tuuletusraon ulkopinta on tehty D-luokan rakennustarvikkeista. Uhkakuvana on ulkoinen syttyminen. Tärkein tekninen ongelma julkisivun tuuletusraon palon etenemisen rakenteellisessa katkaisemisessa on se, että katkaistun rakenteen pitää säilyttää kosteustekninen toimivuutensa.



Kuva 23. a) Palamattomasta ja b) palavasta aineesta tehty katko.

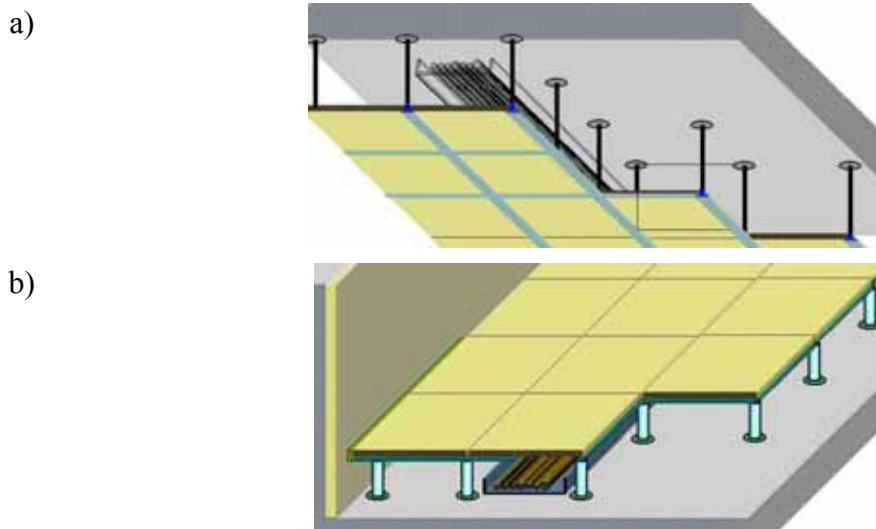
Kokeista saadut tulokset voidaan tiivistää seuraavasti: reiälliselle palamattomalle katkolla liekkirintaman eteneminen viivästyy katkomattomaan tapaukseen verrattuna noin 12–13 minuuttia ja raolliselle palava-aineiselle katkolle noin 7–8 minuuttia. Näiden viiveaikojen merkitystä arvioitiin vertaamalla niitä tuloksiin muista palokokeista (Hakkarainen & Oksanen 2002, Kokkala ym. 1997), joissa on tutkittu palon leviämistä eri tavoin konstruoiduilla ja katkotuilla julkisivuilla (kuva 24). Vertailun mukaan molemmat tutkitut palokatkot katkaisevat tuuletusraossa leviävää paloa varsin tehokkaasti siten, että molemmilla palokatkoilla palon leviäminen vastaisi suunnilleen palon leviämistä suljetun tuuletusraon tapauksessa.



Kuva 24. Kaaviollinen esitys tutkittujen palokatkojen vertailusta muun tyyppisiin seinärakenteisiin.

4.3 Alaslasketut katot ja nostetut lattiat

Erään paloturvallisuuden kannalta tärkeän ontelotilaryhmän muodostavat rakennuksen sisällä olevat alaslaskettujen kattojen tai nostettujen lattioiden muodostamat ontelotilat⁴. Näissä tiloissa mahdollisesti syttyviin paloihin liittyy muihin tässä raportissa käsiteltyihin ontelotiloihin verrattuna paljon suurempi henkilövahinkoriski, koska ontelossa etenevä palo voi suoraan uhata henkilöitä. Tyypillisin palokuorma näissä tiloissa on nykyään muovivaippaiset kaapelit, mutta joissain satunnaisissa tapauksissa onteloissa voi olla myös palavasta aineesta tehtyjä rakennustarvikkeita. Onteloiden kaapelipalokuorma on kasvava paloturvallisuushka: sähköisen tiedonkäsittelyn ja tiedonsiirron määrän valtava kasvu viimeisen kymmenen vuoden aikana on lisännyt kaapelimäärää onteloissa merkittävästi ja kasvu jatkuu yhä Ongelmaa pahentaa se, että uusia kaapeleita asennettaessa vanhoja kaapeleita ei läheskään aina poisteta, vaan niiden annetaan jäädä onteloon.



Kuva 25. Kaaviollinen esitys tarkastelluista alakatto- ja korokelattiaonteloista.

Tyypillisimpiä kaapelipalokuormaa sisältäviä kohteita ovat toimistorakennukset, mutta myös esim. sairaaloiden ja muiden hoitolaitosten sekä koulujen onteloissa voi kulkea merkittäviä määriä kaapeleita. Tyypillisiä kohteita on havainnollistettu kuvassa 25. Työssä on selvitty, miten suuriin osiin ontelot tulisi varsinaisen palo-osastojaon lisäksi

⁴ Jatkossa alaslaskettuja kattoja kutsutaan lyhyiden vuoksi alakatoiksi ja nostettuja lattioita kutsutaan korokelattioiksi.

jakaa ja millaisilla rakenteilla. Palo-osastointia käsitellään lyhyesti osastoivien seinien läpivientien tiivistämisen kannalta.

Koska suuriin toimisto- ja liikerakennuksiin on usein asennettu automaattinen sammutusjärjestelmä, on sprinklerisäännöillä (CEA 4001: 1998–12 1998) merkittävä osuus alakattojen ja korotettujen lattioiden paloturvallisuuteen. Sprinklerisääntöjen mukaan (kohta 5.4) piilotilat lattiassa ja katossa on sprinklattava, jos niiden korkeus ylittää 0,8 m. Jos tilan korkeus on pienempi kuin 0,8 m mutta suurempi kuin 0,3 m, ja tila sisältää palavaa materiaalia tai on rakennettu palavasta materiaalista, tulee se sprinklata. Jos piilotilan korkeus on pienempi tai yhtä suuri kuin 0,3 m, sitä ei tarvitse sprinklata. Piilotilassa sallitaan sähkökaapeleita valaistusta ja pistorasioita varten (CEA4001:1998–12). Näitä ohjeita noudatettaessa palon leviämiskaava on ilmeisesti hyvin pieni. Siten tässä luvussa tarkasteltavat ontelotilojen palovaarat ja niiden rakenteelliset torjuntakeinot koskevatkin lähinnä vain sprinklaamattomia kohteita.

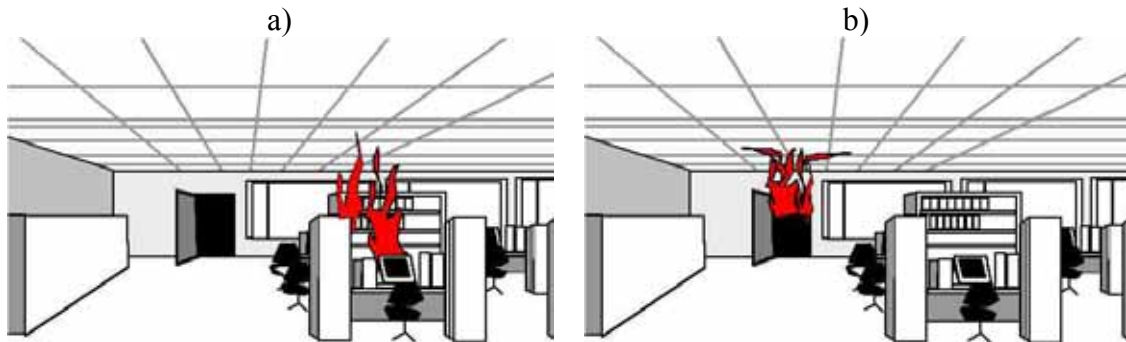
4.3.1 Palovaarat

Pahin alakattojen ja korokelattioiden ontelopaloihin liittyvä vaara on se, että palo pääsee leviämään ontelotilassa niin nopeasti, että kaikki ihmiset eivät ehdi poistua, vaan jäävät palon uhreiksi. Nopeasti leviävä palo muodostuu helposti tuhoisaksi myös omaisuudelle. Myös palokunnan toiminta saattaa olla hankalaa, koska jo palon löytäminen voi olla hankalaa. Lisäksi näihin paloihin liittyy aina palon humahtamisen (englanninkielisessä terminologiassa backdraft) tai savukaasuräjähdyksen vaara.

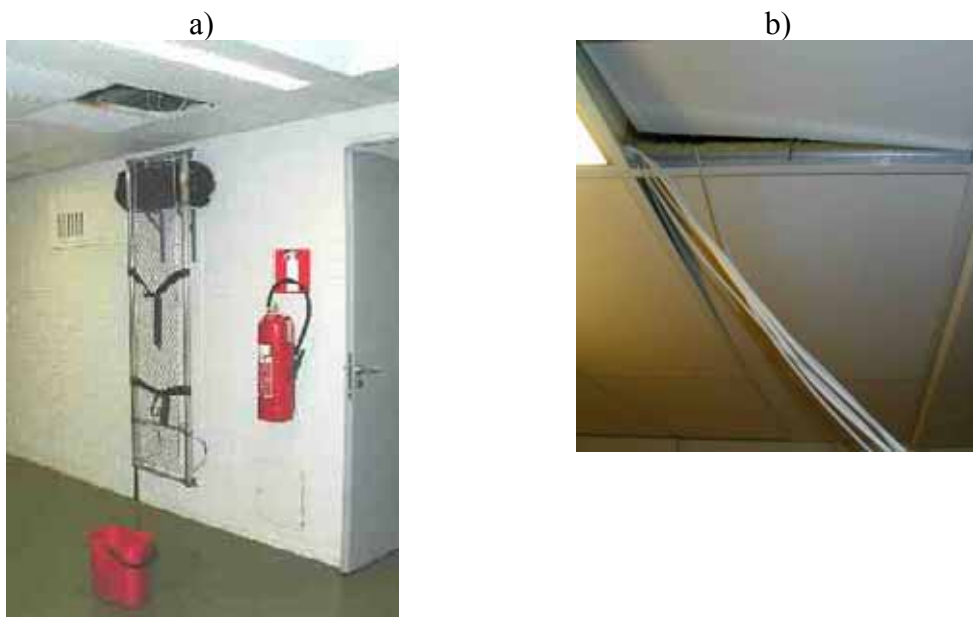
Alakaton ja korokelattian ontelopalo voi alkaa sisäisesti tai ulkoisesti. Pääasiallisena syttymissyynä sisäisesti tapahtuvassa syttymisessä voidaan pitää kaapelin kuumenemistä joko viallisen rakenteen tai löysän liitoksen johdosta. Syttymisriski kasvaa, kun kaapelin tehonsiirtokapasiteetti kasvaa. Ulkoisen syttymisen uhkakuva on alapuolisessa huoneistossa syttyneen palon leviäminen onteloon. Kaapelien palo-ominaisuuksien suhteen tässä uhkakuvassa on kriittistä on se, osallistuvatko ontelossa olevat materiaalit paloon.

Alakaton onteloon leviävä ulkoinen palo voi olla esimerkiksi työaseman paikallinen palo avokonttorissa tai lieskahtanut huonepalo, joka menee ontelotilaan huoneen alakaton läpi tai siten, että huoneesta ulostulevat liekit rikkovat alakaton verhouslaatat (kuva 26). Näissä paloissa tuli pääsee onteloon vasta, kun alakaton verhoiluun käytetyt rakenteet ovat rikkoutuneet. Proe ja Bennets (1994, 1996) ovat tutkineet alakattojen kestävyyttä palon aikana. Heidän tuloksiansa mukaan paikallisen palon palorasituksessa kipsilaastista tehdyt laatat putosivat 8–10 minuutissa ja kuitupohjaiset laatat kestivät 11–14 minuuttia. Lieskahtaneen palon tuottamassa palorasituksessa havaittiin kaupallis-

ten kattojärjestelmien kestävän muutamasta minuutista pariinkymmeneen minuuttiin. Myös puuttuvat tai huonosti suljetut kattolaatat voivat tarjota tulelle kulkutien onteloon (kuva 27). Korokelattioissa ulkoinen syttyminen on alakattoja harvinaisempaa, koska tuli pyrkii leviämään ylöspäin.



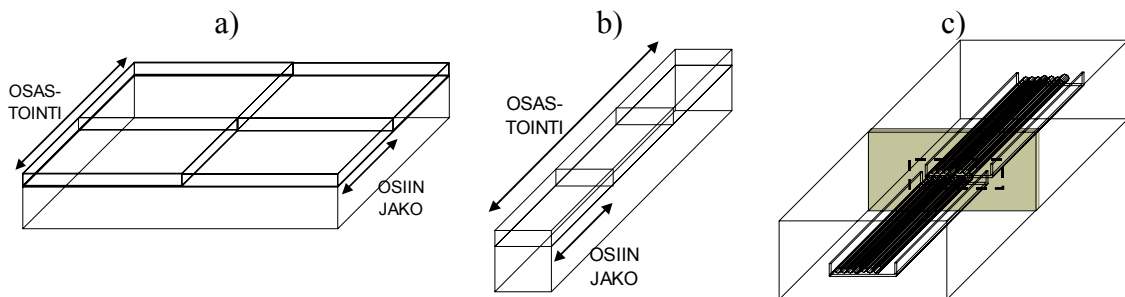
Kuva 26. Kaksi alakaton onteloon ulkoisesti leviävän palon uhkakuvaa: a) työaseman paikallinen palo ja b) huonepalo.



Kuva 27. a) Puuttuvan ja b) huonosti suljetun kattolaatan tarjoama reitti palon leviämiselle alakaton onteloon.

4.3.2 Ontelojen pinta-alan osiin jakamisesta

Tässä luvussa esitetään ehdotus alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamisen pinta-aloille. Laajoissa tiloissa (esim. avokonttorit) alakaton tai korokelattian ontelon osiin jakaminen pilkkoo tilan suorakaiteen muotoisten tilojen verkoksi (kuva 28a). Käytännön toteuttamisen näkökulmasta on ilmeistä, että osiin jako ei saa kovin tiheä, koska läpivientien määrä kasvaa epäkäytännöllisen suureksi. Käytävien alakatoissa ja korokelattioissa läpivientiongelmia on vähäisempi (kuva 28b).



Kuva 28. Kaaviokuva a) laajan kahteen suuntaan ulottuvan tilan alakaton sekä b) käytävän alakaton osastoinnista ja osiin jakamisesta. c) Läpiviennin kaaviokuva.

Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakavien rakenteiden toteuttaminen ei tuota erityisiä teknisiä ongelmia. Markkinoilla onkin saatavilla valmiita useita rakenneratkaisuja, joista esitetään esimerkkejä seuraavassa luvussa (luku 4.3.3). Ongelmallisempaa on läpivientien toteuttaminen (kuva 28c): ne pitää toteuttaa tiiviinä, mutta kuitenkin riittävän yksinkertaisina ja halpoina, jotta kustannustekijät eivät muodostu esteeksi osiin jaolle. Yksittäisten kaapelien läpivienteihin osiin jakavien rakenteiden läpi on markkinoilla olemassa ratkaisuja. Läpivientien pääasiallinen ongelma onkin suurten kaapelimäärien läpiviennit. Tarvittaessa insinööritoimistot epäilemättä pystyvät ideoimaan käteviä ratkaisuja tähänkin ongelmaan. Tässä raportissa keskitytäänkin osiin jaon vaatimusten pohdintaan.

4.3.2.1 Osiin jakavien rakenteiden palonkesto

Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakavissa rakenteissa tärkein palonkestovaatimus on tiiviys. Myös eristävyys on tärkeä, koska rakenteen läpi kulkeutuva kuumuus voi sytyttää palokuorman sen toisella puolella. Lämpötilat, joissa muovit tyypillisesti voivat syttyä ovat ulkoisen syttymislähteen aiheuttamalle syttymiselle suuruusluokkaa 300–400 °C ja ilman ulkoista syttymislähdettä tapahtuvalle syttymiselle tätä korkeampia. Siksi

eristävyyden kriteerinä olevien noin 200 °C pintalämpötilaa vastaavien lämpötilojen ylittyminen ei aiheuta välitöntä palonleviämistä, mutta tiiviiden menetys aiheuttaa. Mitä lievempi eristävyyksivaatimus on, sitä edullisemmin rakenteet voidaan toteuttaa. Tämä pätee myös tiiviiden suhteen, mutta sen suhteen vaikutus ei välttämättä ole niin voimakas kuin eristävyyden kohdalla.

Tiiviiden suhteen voidaan luokituksen E 30 katsoa olevan sopiva alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamisen luokkavaatimukseksi. Edellä esitetyn perusteella eristävyydelle voidaan katsoa riittävän luokkavaatimus I 15. Tällaiset vaatimukset ovat voimassa mm. Iso-Britanniassa alakattojen osiin jakamiselle⁵. Seuraavassa luvussa esitettävien rakenteiden yksinkertaisimmat versiot on suunniteltu täyttävät juuri nämä vaatimukset.

4.3.2.2 Osiin jakamisen pinta-alat

Alakaton ja korokelattian palovaarat riippuvat ontelossa olevan palavan aineen palominaisuuksista. Jos ontelossa ei ole lainkaan paloon osallistuvaa ainetta, sitä ei tarvitse jakaa osiin palon leviämisen rajoittamiseksi. Savun leviämisen rajoittamiseksi osiin jakaminen voi tässäkin tapauksessa tulla kyseeseen. Siinä, onko tämä tarpeen, tulee esille mm. seuraavia näkökohtia:

- Palon välitöntä läheisyyttä lukuun ottamatta ontelossa leviävä savu on suhteellisen kylmää eikä se siten todennäköisesti kykene sytyttämään muita kohteita.
- Kylmä savu ei todennäköisesti riko alakaton tai korokelattian laattoja ja siksi savu ei ilmeisesti pääse murtautumaan ontelosta ulos äkillisesti, vaan savu vuotaa rakenteiden raoista. Siksi uhka henkilöturvallisuudelle voi olla varsin vähäinen. Se, että vuotava savu hälyttää palosta, voi jopa nopeuttaa palon havaitsemista.
- Jos ontelotilassa on savunilmaisimet, niin tilan osiin jakaminen voi viivästyttää palon havaitsemista.
- Pelkästään savusta aiheutuvat vahingot voivat olla suuria etenkin tiloissa, jotka ovat herkkiä savulle.

⁵ Englannissa osiin jakovaatimus ei koske lattian alla olevia tyhjiä tiloja, joita käytetään asennuksiin (underfloor service voids).

Ontelot, joissa on paloon osallistuvaa materiaalia, voi olla tarpeen jakaa osiin, jos palokuorman määrä riittää alentamaan paloturvallisuutta oleellisesti. Edellä (luku 4.3.1) esitettyjen seikkojen valossa tähän voi riittää jo varsin vähäinen palokuorman määrä, esimerkiksi yksi kaapelihylly voi levittää palon koko pituudelleen. Koska ontelo voi palon kohdalla olla huomattavan kuuma, niin palo voi levitä edelleen ontelon rakenteiden piteässä tällä kohdalla.

Osiin jakoon kuluvat resurssit saadaan parhaiten vastaamaan sillä saavutettavia paloturvallisuusetuja, jos osiin jakaminen kytketään palokuorman palavuuteen. Seuraavassa tarkastellaan tilannetta, jossa palokuorma muodostuu pääosin kaapeleista. Alakattojen ja korokelattioiden ontelotilojen paloturvallisuutta silmällä pitäen kaapelien palo-ominaisuudet jaotellaan voidaan jaotella palavuuden mukaan kolmeen luokkaan (Fardell ym. 2000): Parhaat palo-ominaisuudet omaavat kaapelit on erityisesti suunniteltu kestämään paloa esim. palosuojaamalla tai tekemällä ne vain vähän paloon osallistuvista materiaaleista (esim. FPE-muovi): niiden toiminta palossa on oleellisesti esim. pelkäättään IEC 60331-3 -testin läpäiseviä kaapeleita parempi⁶. Seuraavan luokan voidaan katsoa muodostavan kaapeleiden, joiden palo-ominaisuudet vastaavat PVC-vaippaisten ja -eristeisten kaapelien palo-ominaisuuksia: ne tyypillisesti läpäisevät IEC 60331-1 -testin, mutta eivät testiä IEC 60331-3. Kolmannen luokan muodostavat kaapelit, joissa eristeinä on merkittäviä määriä palosuojaamatonta polyolefiinimuovia.

Lähtökohtana voidaan pitää sitä, että tapauksissa, joissa ontelossa on vain materiaaleja, jotka osallistuvat paloon vain hyvin rajoitetusti, niin osiin jakamista ei palon leviämisen estämiseksi tarvitse vaatia, vaan riittävä paloturvallisuus saavutetaan osastojaolla. Kaapelipalokuormassa tällaiset materiaalit vastaavat palosuojattuja tai FPE-muovista käytäen valmistettuja kaapeleita.

Kun palokuorma osallistuu paloon, niin osaston jakaminen osiin lisää paloturvallisuutta oleellisesti. Peruste jakamisen koolle voidaan johtaa vertaamalla tällaisten materiaalien aiheuttamaa uhkaa hyvin rajoitetusti paloon osallistuvien materiaalien aiheuttamaan uhkaan. Jälkimmäisille materiaaleille riittävä pinta-ala on osaston enimmäiskoko, joka esimerkiksi toimistoissa on 2400 m², joka vastaa pituusmittana noin 50 m. Kun tarkastellaan kaapelipalokuormaa, niin PVC-kaapelit ovat lämmönluovuttamisen suhteen noin tekijällä 2–3 palavampia kuin hyvin rajoitetusti paloon osallistuvat materiaalit. Sopivak-

⁶ Myös lämmöntuotto kartiokalorimetrikokeessa erottelee eri kaapeliryhmät: parhaiten palossa käyttäytyville kaapeleille lämmönvapautumisnopeus pinta-alaa kohden on korkeintaan 100 kW/m² ja merkittäviä määriä polyolefiineja sisältäville kaapeleille yli 300 kW/m². PVC-vaippaisille ja -eristeisille kaapeleille lämmöntuottoarvo on näiden ryhmien välillä, tyypillisesti noin 150–250 kW/m² tuotteesta riippuen.

si osiin jaon mitaksi PVC-kaapeleille voidaankin katsoa osaston mitan jakaminen osapuilleen kahtia. Sopiva mitta on 20 m, koska se vastaa erästä Suomessa yleisesti käytössä olevaa osastoinnin ja osiin jakamisen kokoa, 400 m². Kun kaapelissa on merkittäviä määriä PVC-muovia herkemmin palavia muovikomponentteja, niin paloturvallisuuden pitäminen samalla tasolla kuin vähemmän palavien kaapelien tapauksessa edellyttää osiin jakamisen mitan pienentämistä selvästi alle 20 m:n, 10–15 m:iin. Kymmenen metrin jaolla esim. 40 × 60 m²:n kokoinen palo-osasto tulisi jaetuksi 24 osaan, jolloin läpivientien määrä kasvaa varsin suureksi. Siksi 15 m:n jako, jossa osien määrä puolittuu 10 m jakoon nähden, lienee palontorjuntakustannusten ja niillä saavutettavien hyötyjen suhteen parempi ratkaisu.

Kaapelien palotestit eivät välttämättä erottele tuotteita riittävän hyvin voimakkaan palorasituksen suhteen ja siksi edellä hahmoteltu osiinjakojärjestelmä voi olla hankala toteuttaa ilman merkittäviä muutoksia kaapelien palotestauksessa. Koska tällä hetkellä pääosa kaapeleista on sellaisia, joissa on PVC-vaippa ja eristeet ja tulevaisuudessa suuntaus toivottavasti kulkee kohti yhä paloturvallisempia kaapeleita, eli palovaarojen torjumiseen erityisesti suunniteltuja kaapelityyppejä, voidaan kaapelityyppien jako tehdä PVC-kaapeleihin (tai niitä palo-ominaisuuksiltaan vastaaviin tuotteisiin) sekä palo-ominaisuuksiltaan niitä oleellisesti parempiin tuotteisiin. Viimeksi mainittujen kaapeleiden kohdalla ontelo ei tarvitse jakaa osiin palon leviämisen estämiseksi, mahdollinen savun leviämisen estämiseksi tehtävä osiin jakaminen on punnittava erikseen. Jos palokuorma muodostuu PVC-kaapeleista (tai niitä palo-ominaisuuksiltaan vastaavista tuotteista), ontelo suositellaan jaettavaksi 20 × 20 m²:n suuruisiin osiin.

Jos ontelon rakenteet ovat palavaa materiaalia, niin tässäkin tapauksessa osiin jakaminen voidaan kytkeä materiaalin palo-ominaisuuksiin esim. siten, että D-luokan materiaalia vastaa 20 × 20 m²-suuruinen osiin jako ja B-luokan materiaalien /tai parempien) tapauksessa ei osiin jakoa tarvita. Paloturvallisuuden kannalta olisi edullisinta, jos alakattojen ja korokelattioiden onteloissa ei käytettäisi D-luokkaa huonompia materiaaleja. Edellä esitetty 20 m jako vastaa mm. Englannin vaatimuksia.

4.3.3 Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamiseen soveltuvia rakenteita

Tässä luvussa esitellään joitain markkinoilla olevia ratkaisuja alakattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien onteloiden palokatkoiksi. Rakenteet ovat pääasiassa Iso-Britanniasta, jossa onteloiden palovaarojen vähentäminen nähdään hyvin oleelliseksi.

si paloturvallisuustoimenpiteeksi⁷. On huomattava, että toisin kuin Suomessa, Iso-Britanniassa myös alakatolta itseltään vaaditaan palonkestoluokitusta. Tässä luvussa rakenteet esitettäviä rakenteita tarkastellaankin tässä työssä vain onteloon jollain tavalla päässeeseen palon leviämisen katkaisemisen suhteen.

Esitellyt tuotteet edustavat satunnaisesti valittua joukkoa palokatkotuotteita, joiden käyttötarkoitus on alakattojen ja nostettujen lattioiden muodostamien ontelotilojen sulkeminen. Ne esitellään pelkästään tiedonlevitystarkoituksessa tyyppillisten rakenteellisten ratkaisujen esilletuomiseksi.

4.3.3.1 Alakattojen ontelot

Villaan perustuvia rakenteita

Villaan perustuvien ratkaisujen etuna levytuotteisiin nähden on niiden helpompi käsiteltävyys ahtaissa ontelotiloissa. Joustavina villatuotteiden katsotaan kestävänsä myös rakenteiden liikkumista levytuotteita paremmin.

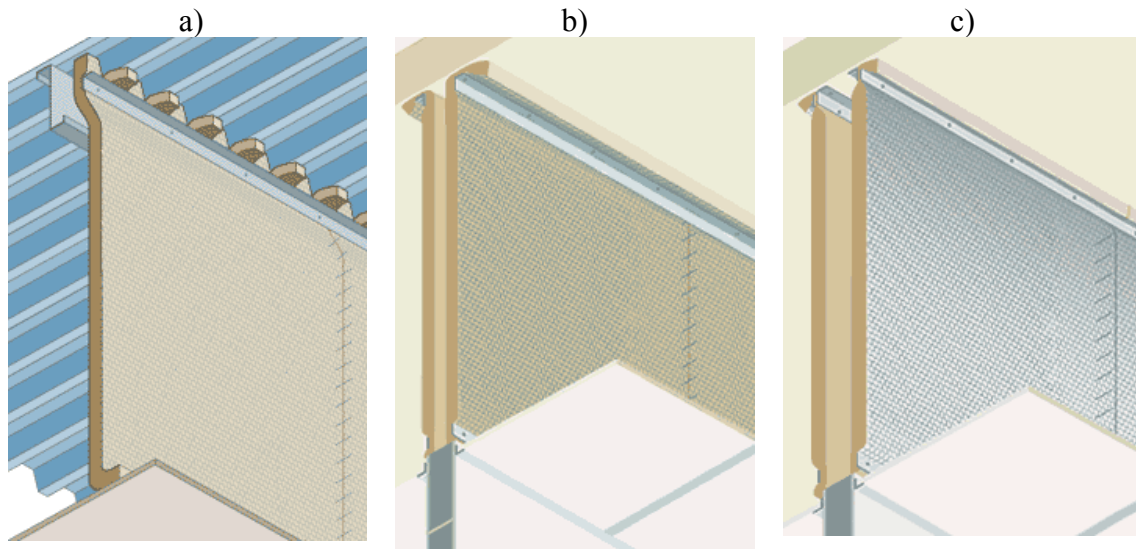
Esimerkkinä villan käyttöön perustuvasta ratkaisusta voidaan esittää kivivillasta valmistettu joustava huopa, jonka yhdellä puolella on galvanoitu lankaverkko (kuva 29). Sen kaupp nimi on Rocksil Smoke and Fire Barrier ja sen valmistaja on englantilainen Knauf Insulation Ltd⁴ (Knauf Insulation 2003). Tuotteessa käytetyn kivivillan tiheys on 100 kg/m³ ja se luokiteltu palamattomaksi standardin BS 476: Part 4: 1970 (1984) mukaan. Huopaa on saatavilla myös yksi- tai kaksipuolisesti foliolla päällystettynä. Sen hinta on päällystämättömänä noin 15 euroa/m² ja kaksipuolisesti päällystettynä hieman yli 20 euroa/m² (Kitsons Insulation Products 2003). Valmistajan esitteen mukaan tuotetta käytetään alla olevassa kuvassa (kuva 29) esitettyinä kolmea eri palonkestoluokitusta vastaavina rakenteina. Tämä palonkestoluokitus vastaa tiiviyyttä (integrity) standardin BS 476: Part 22: 1987 mukaisessa palotestissä⁸.

⁷ Englannin ja Walesin palomääräykset sisältävässä dokumentissa Approved Document B (Department of the Environment, Transport and the Regions.1991) on omistettu yksi laaja luku ontelopaloille.

⁸ Testeissä palorasitus kohdistettiin lankaverkolla varustettuun puoleen, joka valmistajan mukaan on haavoittuvampi palon suhteen.

Puolen tunnin paloluokituksen (E 30⁹) täyttävässä rakenteessa käytetään 50 mm paksua huopaa on yksikerroksisena. Se ripustetaan ontelon katosta ontelon sulkevaksi verhoksi. Myös huovan sivut ja alareuna kiinnitetään ontelon reunoihin. Kiinnitys tehdään käyttämällä jatkuvia rakenneosia, kuten metallilistoja, ei pistemäisesti esim. erillisten ruuvi- en avulla. Alalaita voi valmistajan mukaan jäädä vapaasti alakaton päälle tai sitten se kiinnitetään alakattoon. Valmistaja on laatinut luettelon erilaisten kiinnitystapojen yksityiskohdista; niissä painotetaan liitosten tiiviyyttä.

Tunnin paloluokituksen (EI 60¹⁰) täyttävässä rakenteessa käytetään kahta 50 mm paksua huopaa, joiden välissä on 50 mm ilmakerros. Huovat asennetaan siten, että lankaverkko puoli tulee näkyväksi pinnaksi. Huopien kiinnitys tehdään samaan tapaan kuin puolen tunnin rakenteessa. Ilmaraon aikaansaamiseksi voidaan käyttää esim. puista tai metallista rakenneosaa. Kahden tunnin paloluokituksen (EI 120¹¹) täyttävässä rakenteessa käytetään kahta 60 mm paksua huopaa, joiden välissä on 100 mm ilmakerros.



Kuva 29. Alakaton muodostaman ontelon palokatkorakenne 1: a) puolen tunnin paloluokitus, b) tunnin paloluokitus ja c) kahden tunnin paloluokitus standardin BS 476: Part 22: 1987 mukaisessa palonkestokokeessa. (Knauf Insulation 2003).

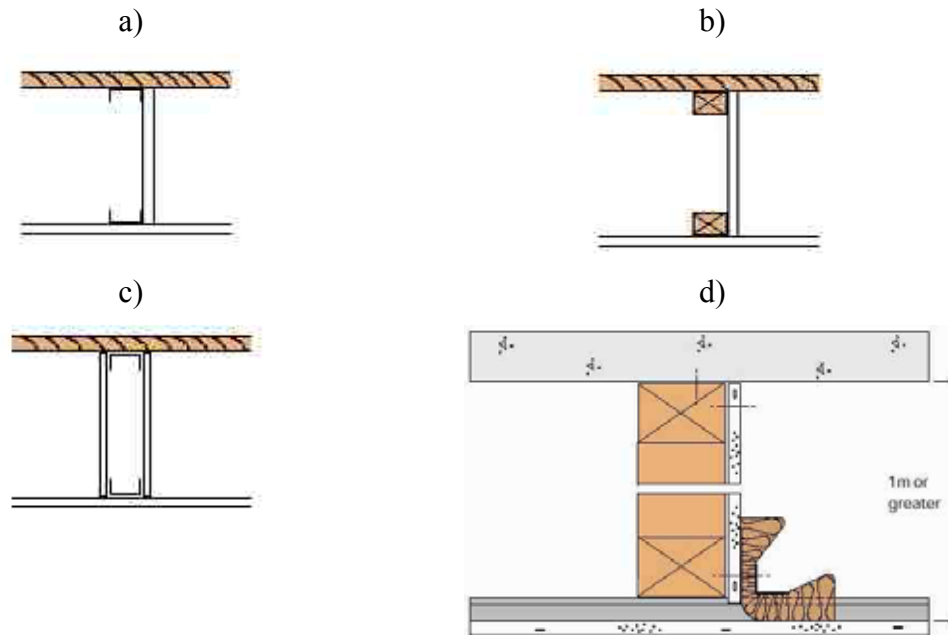
⁹ Eristävyytensä rakenne menetti 19 minuutin kohdalla. Tiiviys säilyi kokeen lopettamiseen asti 35 minuutin kohdalla.

¹⁰ Eristävyys piti 61 minuuttia ja tiiviys kokeen lopettamiseen asti 66 minuutin kohdalla.

¹¹ Eristävyys ja tiiviys pitivät kokeen lopettamiseen asti 157 minuutin kohdalla.

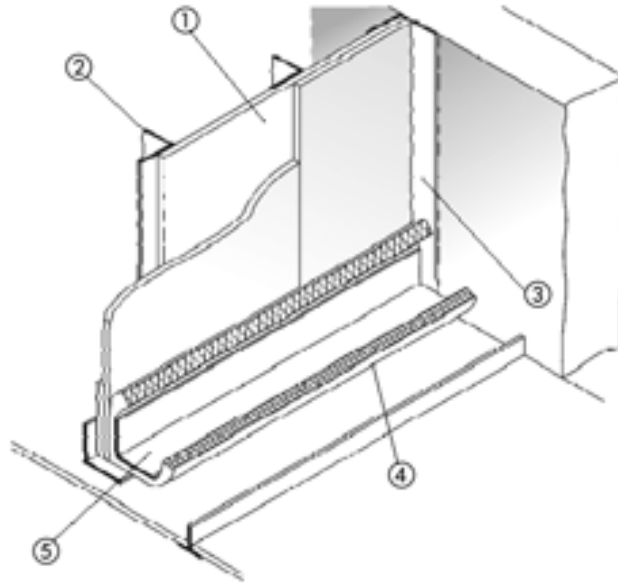
Levyrakenteita

Osiin jakavana rakenneosana voidaan käyttää myös levytuotteita, esim. kipsilevyä tai muita palamattomia levyjä. Kuva 30 esittää kipsilevyn käyttöön perustuvia ratkaisuja. Alla olevat rakenteet on esitetty British Gypsum -yhtiön teknisen avun verkkosivuilla (British Gypsum 2003). Niillä saavutetaan Englannin määräysten mukainen 30 minuutin tiiviys- ja 15 minuutin eristävyys luokitus.



Kuva 30. Erilaisia kipsilevyn käyttöön perustuvia Englannin palomääräysten mukaisia alakaton ontelon palokatkoja. Kaikkien rakenteiden palonkestoluokitus on E 30, I 15. a) yksi 10 mm levy kiinnitettynä kipsilevyruuveilla 48 mm:een metallikehykseen tai b) puukehykseen ($75 \times 50 \text{ mm}^2$). c) kaksi 6 mm paksua levyä kiinnitettynä kipsilevyruuveilla 48 mm:een metallikehykseen. d) Rakenteen eristävyuden parantaminen kivivillalla. (British Gypsum 2003)

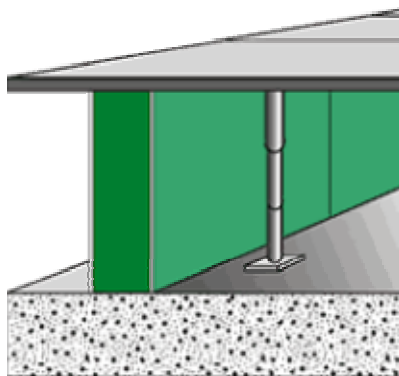
Kuva 31 esittää palamattoman levyn käyttöön perustuvaa ratkaisua (PROMATECT® 100 -levy, Promat Fire Protection 2003). Kyseistä levyä valmistaa englantilainen Promat Fire Protection Ltd, joka on osa Etex Group -konsernia. Kuvassa esitetyllä kahdesta 8 mm paksusta levystä tehdyllä rakenteella voidaan saavuttaa Englannin vaatimusten mukainen puolen tunnin palokesto (tiiviys 30 minuuttia ja eristävyys 15 minuuttia). Sama palonkesto saavutetaan myös, jos kahden 8 mm paksun levyn sijasta käytetään yhtä 10 mm paksua levyä.



Kuva 31. Palamatonta levyä käyttäen toteutettu alakaton ontelon palokatko (E 30, I 15). Rakenteessa on kaksi 8 mm paksua PROMATECT® 100-levyä (1), jotka kiinnitetään pystysuuntaisiin tukiin (2). Nämä tuet voivat olla galvanoituja kulmarautoja (välimatka 300 mm, mitat $50 \times 50 \times 0,8 \text{ mm}^3$) tai rankoja (välimatka 600 mm, mitat $48 \times 33 \times 0,5 \text{ mm}^3$). Ne kiinnitetään ylhäällä olevaan kulmarautaan teräsruuvein tai pop-niiteillä. Rakennetta ympäröi galvanoitu kulmarauta (3), jonka mitat ovat $50 \times 50 \times 0,8 \text{ mm}^3$. Palokatkon kiinnitys alakattoon tehdään käyttämällä 60 mm paksua kivivillaa (4), jonka tiheys on 23 kg/m^3 , ja asennuslistaa (5), joka voi olla kaistale PROMATECT® 100-levyä ($50 \times 8 \text{ mm}^2$) tai kulmarautaa (vähintään $25 \times 25 \times 0,56 \text{ mm}^2$). Rakenteessa, jossa käytetään yhtä 10 mm paksua levyä, kaikki levyn liitokset peitetään PROMATECT® 100-levyllä ($75 \times 10 \text{ mm}^2$). (Promat Fire Protection 2003)

4.3.3.2 Nostetut lattiat

Kuva 32 esittää nostetulle lattioille soveltuvaa palokatkoa (Lamatherm Products 2003b). Rakenteen palonkesto on sekä eristävyys että tiiviys suhteen 60 minuuttia (ontelon suurin mahdollinen korkeus on 400 mm). Valmistaja suosittelee rakenteen kiinnittämistä palo- ja äänitiivistettä käyttäen. Ilmanvaihtokanavissa ja tavoiteltaessa hyvää tiiveyttä savun suhteen liitokset tulee sulkea liimaamalla niiden päälle foliokaistaleet (alumiinipintainen teippi).



Kuva 32. Nostetun lattian palokatko. (Lamatherm Products 2003b)

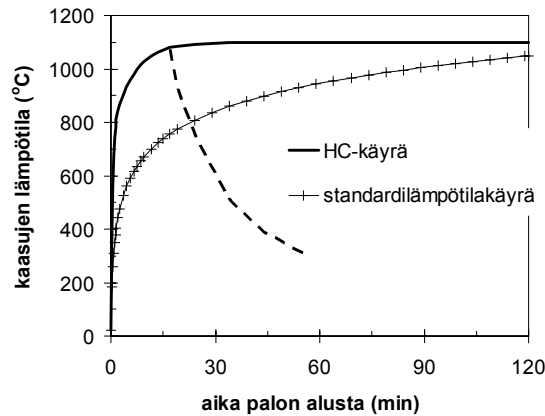
4.3.4 Läpivientien palokatkot: toiminta ontelokohteissa

Ehkä tärkein ontelotilaa reunustavien osastoivien seinien läpi menevien asennusten aukkojen palokatkoihin liittyvä paloturvallisuusongelma on se, että palokatkot puuttuvat tai ne ovat esim. jälkeempään tehdyissä lisäasennuksissa jätetty palauttamatta asianmukaiseen kuntoon. Ontelotiloissa etenkin jälkimmäinen ongelma korostuu, koska toisaalta katkon kanssa työskenteleminen voi olla ahtauden ja muiden seikkojen vuoksi hankalaa ja toisaalta piilossa olevaa katkoa ei välttämättä huomata esim. tarkastuksissa. Myös puutteellisesti toimivia läpivientien palokatkorakenteita on olemassa, mutta ne liittyvät yhä enenevässä määrin vanhempaan rakennuskantaan. Uudisrakennuksissa käytettäväksi on tarjolla useita toimivuudeltaan kelpoisiksi todettuja ratkaisuja¹² ja niiden käyttö lisääntyy.

Tehokas tie ontelotiloissa olevien läpivientien palokatkoihin liittyvien palovaarojen vähentämiseen onkin niiden asennuksien ja kunnossapidon saaminen entistä kontrollidummaksi siten, että asennuksissa käytetään vain toiminnaltaan kelpoisiksi todettuja rakenteita, rakenteet toteutetaan ammattilaisten toimesta ohjeiden mukaisiksi ja että katkojen toimivuudesta huolehditaan myös niiden asennuksen jälkeen (tekninen varautuminen uusiin asennuksiin jo ennalta sekä määräaikaistarkastukset). Tämä pätee toki yhtäläillä kaikkiin muihinkin palokatkoasennuksiin ja niiden kunnossapitoon. Ontelotiloissa olevien palokattojen osalta asianmukaisen työn toteutuksen ja valvonnan merki-

¹² Nykyään (vuoden 2003 alussa) tällaisia ratkaisuja ovat tyyppihyväksytyt rakenteet ja rakenteet, joiden käyttöselosteet on varmennettu. Näiden rinnalle on parhaillaan syntymässä yhteinen eurooppalainen hyväksyntäjärjestelmä, rakennustuotteiden CE- merkintäjärjestelmä.

tys on korostunut: jos pienessä ontelotilassa palokatko on puutteellinen, tilanne on usein oleellisesti sama, kuin jos osastointi puuttuisi tai olisi toiminnaltaan merkittävästi vaa-
dittua heikompi.



Kuva 33. Standardipalokäyrän ja HC-käyrän vertaaminen ontelotilojen rakenteiden palonkeston testaamisen kannalta. Yhtenäinen käyrä kuvaa HC-palokäyrää. Katkoviivalla merkitty käyrä seuraa HC-käyrää siihen asti, kunnes palokuorma loppuu ja palo alkaa hiipua. Palon hiipuminen esitetty vain kuvan havainnollistamiseksi, sen alkamishetki ja hiipumisnopeus on valittu mielivaltaisesti. Merkeillä korostettu käyrä on standardilämpötilakäyrä.

Eräs ontelopalon ominaisuuksiin liittyvä tekijä, joka on syytä tuoda esille ontelotiloissa olevien läpivientien palokatkoihin liittyen, on ontelopalon mahdollinen nopea kehittyminen kuumaksi (ks. luku 3.2.3.2 ja kuva 9). Tämä ongelma koskee lähinnä palokuormaa, joissa on merkittävä osuus palosuojaamattomia polyolefiinimuoveja.

Ontelopalon nopeasti korkeaksi kehittyvällä kuumuudella on mahdollisesti merkitystä ontelotiloihin asennettavien läpivientien palokatkojen testaamisen suhteen, koska ontelopalon palorasitus voi olla merkittävästi standardipalo-olosuhteita ankarampi (ks. kuva 33). Siihen asti, kunnes palokuorma loppuu, ontelopalo, jonka palorasitusta hiilivetykäyrä varsin hyvin kuvaa, on oleellisesti kuumempi kuin standardipalo-olosuhteet. HC-käyrää noudattavassa palossa nopea lämpötilan nousu aiheuttaa rakenteisiin selvästi standardipalo-olosuhteita voimakkaampia lämpötilaerojen aikaansaamia termomekaanisia rasituksia. Tämä voi aiheuttaa rakenteiden tiiviiden pettämisen jo varsin varhaisessa vaiheessa (Joyeux 2002).

Jos ontelon palokuormaa riittää ja palo voi jatkua pitkään, rakenne voi menettää myös eristävyysominaisuutensa aiemmin kuin standardipalo-olosuhteissa. Ontelossa ei kuitenkaan välttämättä riitä palokuormaa esimerkiksi yhden tunnin ajaksi ja siksi pitkässä

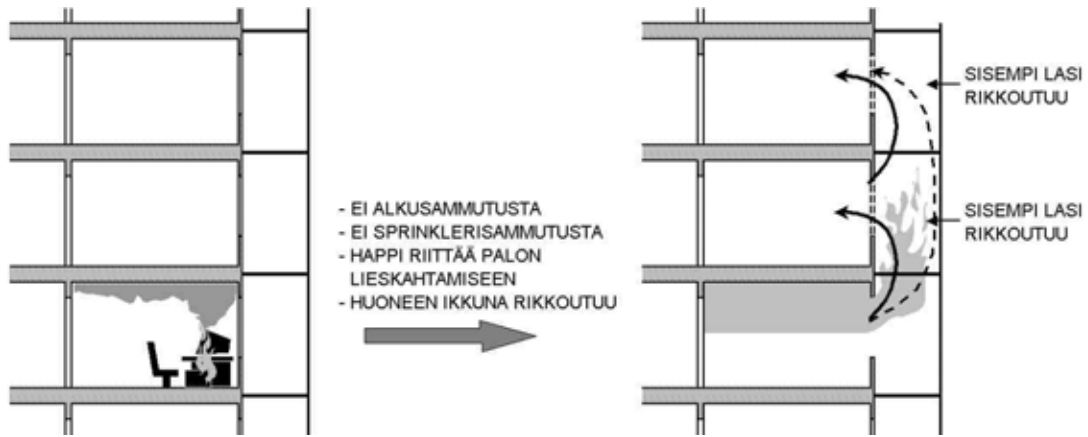
standardipalokokeessa rakenteeseen siirtyvä lämpöenergia voi olla suurempi kuin lyhyempään kestävässä ontelopalossa (kuva 33 pyrkii havainnollistamaan tätä). Tällä on merkitystä erityisesti eristävyiden testaamiseen suhteen: mitä enemmän lämpöenergiaa rakenteeseen tietyssä asennuksessa siirtyy, sitä enemmän sen lämpötila nousee. Siksi ontelopalon keston aikana standardipaloa suuremmaksi nouseva kuumuus ei välttämättä ole eristävyiden suhteen yhtä kriittinen kuin tiiviiden suhteen.

4.4 Kaksoislasijulkisivun ontelon rakenteellisesta paloturvallisuudesta

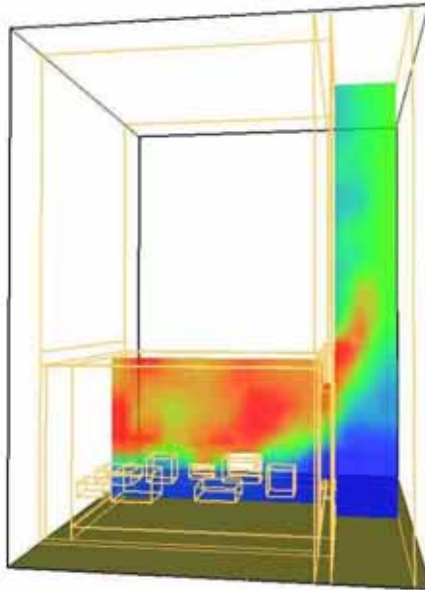
Suomessa kaksoislasijulkisivuilla varustetut rakennukset ovat tyypillisesti suuria esim. toimistorakennuksia, joiden paloturvallisuuden perustana on sprinklaus ja muut aktiiviset toimet. Palo-osastot voivat olla hyvinkin suuria, eikä kaksoislasijulkisivun ontelo ole katkottu, vaan se ulottuu yhtenäisenä rakennuksen alhaalta ylös asti. Sprinklerit ovat tehokas keino pienentää palovaaroja. Jos riskit kuitenkin katsotaan erityisen suuriksi, niin myös sprinklereiden varsin pienellä todennäköisyydellä tapahtuvaan toimimattomuuteen voidaan varautua osastoimalla kaksoislasijulkisivun lasien välinen ontelo pystysuuntaista palonleviämistä vastaan. Näin on tehty mm. erityisen korkeissa kohteissa Saksassa (esim. 162 m korkea RWE Tower -rakennus Essenissä) ja Ruotsissa (31-kerroksinen Kista Science Tower Ruotsissa). Suomessa ei näin korkeita kohteita ole, mutta joidenkin kohteiden kohdalla laajan palon vahingot taloudellisine kerrannaisvaikutuksineen voivat mahdollisesti olla niin suuria, että tapauskohtainen riskianalyysi voisi osoittaa osastointitarkaisujen olevan tarpeen riskien pienentämiseksi.

Nykyaikaiset toimistorakennukset ovat tilasuunnittelultaan avoimia siten, että toimistorakennukset ovat pääosin avoimia maisemakonttoreita. Näiden laajojen yhtenäisten tilojen lisäksi ulkoseinien läheisyyteen tehdään usein pienempiä toimistohuoneita, jotka on erotettu avoimesta toimistotilasta. Pienessä toimistohuoneessa syntyvä palo voi varsin nopeasti kehittyä niin kuumaksi (lieskahtaa), että ulkoseinän ikkunaruuat rikkoutuvat ja palo pääsee kaksoislasijulkisivun lasien väliseen ilmatilaan (kuva 34). Tämä on tässä tutkimuksessa tarkasteltu paloskenaario. Tutkimus tehtiin käyttäen palonsimulointia palorasituksen voimakkuuden arviointiin (kuva 35).

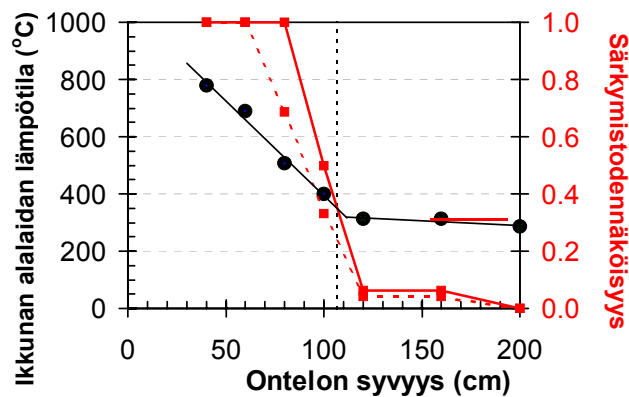
Kaksoislasijulkisivun ontelossa tapahtuvaa savunleviämistä tarkastellaan liitteessä B.



Kuva 34. Uhkakuva: toimistohuoneessa syttynyt palo etenee lieskahtaneeksi paloksi, joka rikkoo palohuoneen ikkunan. Palo leviää palohuonetta ylemmän kerrokseen ikkunasta ulostyöntyvien liekkien aiheuttaman lämpörasituksen vuoksi. Palo voi levitä samalla mekanismilla myös tätä ylemmän kerrokseen. Palohuoneen liekit aiheuttavat lämpörasitusta myös tässä kerroksessa, mutta se ei ole niin voimakasta kuin välittömästi palohuoneen yläpuolella olevan kerroksen tasalla.



Kuva 35. Uhkakuvan mallinnustutkimus: lieskahtaneessa huonepalossa rikkoutuneesta ikkunasta ulos työntyvien liekkien palohuoneen yläpuolelle aiheuttamaa palorasitusta tutkittiin palonsimulointia hyväksi käyttäen.



Kuva 36. Laskennallisella paloturvallisuusanalyysillä saatu tulos: tiettyä vähimmäisarvoa suuremmilla ontelon syvyyksillä yläpuoleisen ikkunan lämpörasitus ei ole oleellisesti suurempi kuin ilman onteloa, mutta tätä pienemmillä ontelon syvyyksillä lämpörasitus lisääntyy ja erityisesti siitä johtuva lasin rikkoutumisen todennäköisyys kasvaa voimakkaasti.

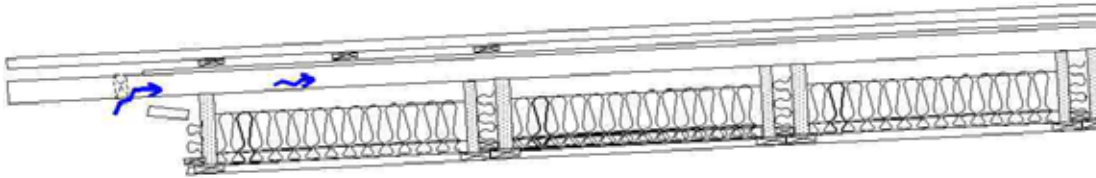
Mallinnustutkimus huonepalon palon leviämisestä kaksoislasijulkisivun ontelossa toi esille myös osastointia kevyemmän tavan pienentää palon leviämiskäyttöä (kuva 36). Se perustuu ontelon mitoittamiseen siten, että sisemmän ja ulomman lasin välinen etäisyys jätetään huonepalosta ulostyöntyvien liekkien luonnollista paksuutta suuremmaksi. Käytännössä tämä minimietäisyys on $\frac{2}{3} \times$ ikkunan korkeus, joka tyypillisesti vastaa runsaan metrin etäisyyttä.

4.5 Tuuletetun teollisuushallin katon osiinjakamisesta

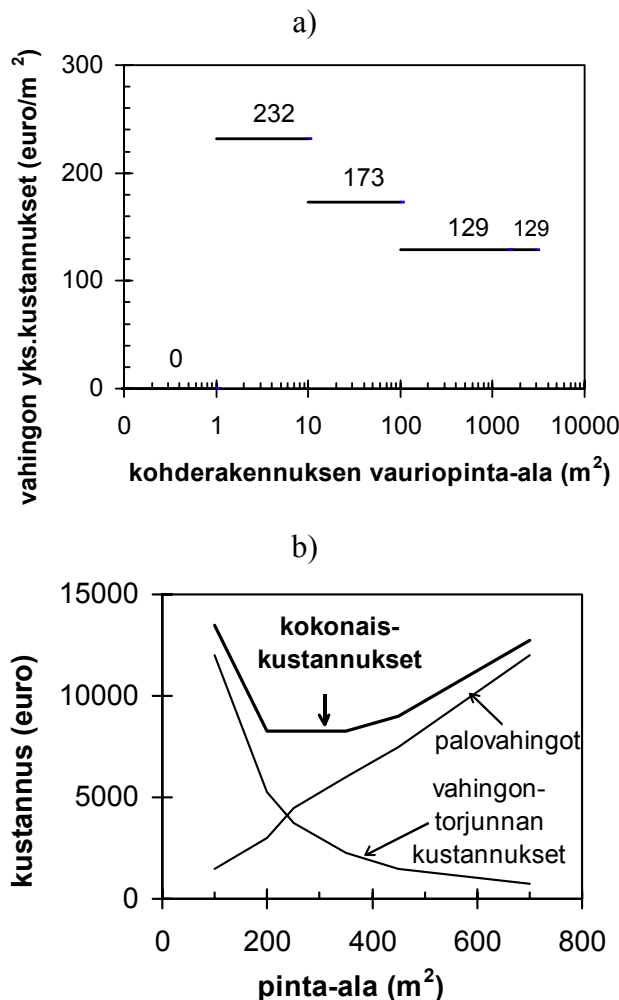
Teollisuushallissa tehtävän työn laatu voi vaatia kattorakenteen toteuttamista tuuletettuna. Tällaisessa kattorakenteessa yhdistyy ontelorakenne usein runsaaseen palavan materiaalin määrään, mikä tekee sen palovaaralliseksi. Paloturvallisuuden parantamiseksi tällaiset katot jaetaan yleensä osiin; yleiseksi käytännöksi on muodostunut katto-onteloiden jako tyypillisesti 400 m²:n suuruisiin osiin EI 30-luokitelluin rakentein. Koska katto-ontelo ei kuitenkaan muodosta erillistä palo-osastoa, palomääräykset eivät osiin jakamista sinänsä vaadi. Ontelotilojen katkomista tutkineessa hankkeessa tarkasteltiin, onko tuulettuvan teollisuushallin katon osiin jakaminen kannattavaa taloudellisista lähtökohdista katsottuna.

Esimerkkilaskelmat on tehty seuraavanlaiselle, varsin tyypilliselle teollisuushallille: pituus 100 m, leveys 30 m ja korkeus 6 m; hallin kantavat rakenteet ovat liimapuupalkkeja; kattorakenne on toteutettu tuulettuvana hallin toimintaan liittyvän suuren kosteus-

kuorman takia; katteena on peltikatto (kuva 37). Kyseiselle katolle palossa koituvien vahinkojen suorat kustannukset esitetään kuvassa 38a. Kun nämä vahinkoarviot yhdistetään tilastotietoihin ja palosimuloinnin antamiin tuloksiin, osoittautuu, että taloudellisessa mielessä optimaalinen osiin jakamisen koko tarkastelussa teollisuushallissa on noin 200–400 neliometriä (kuva 38b).



Kuva 37. Tarkasteltava kattorakenne.



Kuva 38. a) Kattopalon aiheuttamien suorien omaisuusvahinkojen riippuvuus vaurion pinta-alasta tarkastelulle kattorakenteelle. b) EI 30-rakenteilla tehtyyn katon osiin jakamiseen suojauskustannuksien riippuvuus osiin jakamisen pinta-alasta.

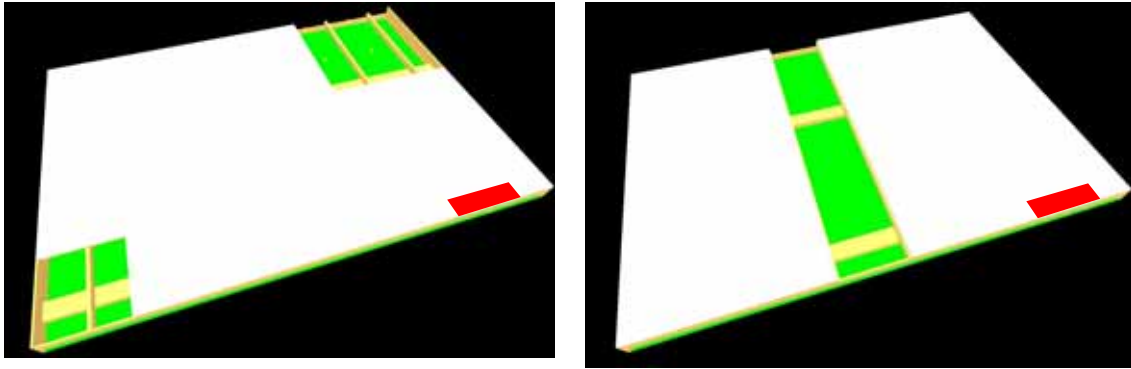
5. Ontelopalojen sammuttaminen

Ontelopalojen paloturvallisuutta selvittäneen hankekokonaisuuden kolmas osa, ontelopalojen sammuttaminen, käsittelee aktiivisia toimenpiteitä ontelossa alkaneen tai sinne levinneen palon sammuttamiseksi tai rajaamiseksi. Tutkimus on luonteeltaan laskennallinen, ja se perustuu uhkakuville, jotka hankekokonaisuuden aiemmissa osissa on todettu keskeisen tärkeiksi. Laskennallisena työkaluna on käytetty palonsimulointiin tarkoitettua virtauslaskentaohjelmaa Fire Dynamics Simulator (FDS). Tutkituiksi uhkakuviksi valittiin harjakattoisen rakennuksen ullakotilaan levinnyt palo ja teollisuushallin tuulettuun kattorakenteeseen levinnyt palo. Tutkitut sammutusmenetelmät olivat luonnollinen tai koneellinen tuuletus, sammutus sprinklerein tai pistosuihkuin sekä sammutuksen ja koneellisen tuuletuksen yhdistäminen. Tutkimuksen keskeisimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että palavaan onteloon on ensisijaisesti pyrittävä johtamaan sammutusvettä, ja ontelo on vasta toissijaisesti pyrittävä raivaamaan auki. Tulos poikkeaa palokuntien tavanomaisesti noudattamasta taktiikasta, jossa ontelon pyritään ensin avaamaan, jotta sammutusvesi voitaisiin kohdistaa palopesäkkeisiin tehokkaasti.

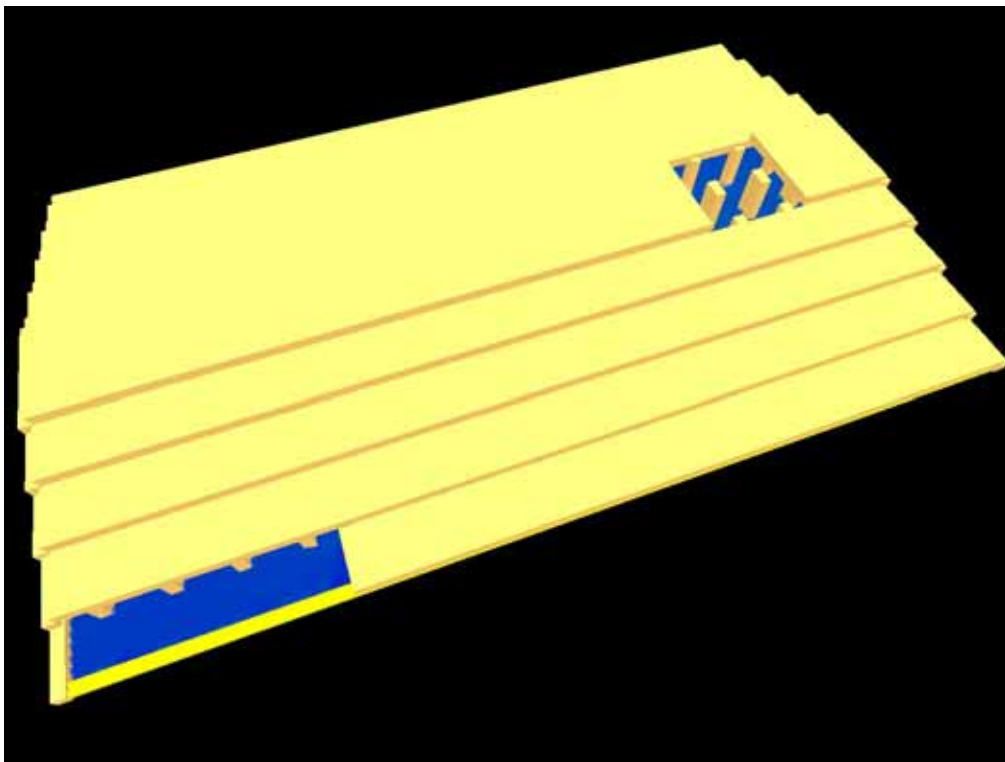
5.1 Tuulettamisen vaikutus ontelopaloon

5.1.1 Luonnollinen tuuletus

Tuuletuksen vaikutusta tarkastelleessa laskennallisessa tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, onko onteloon tehtävien tuuletusaukkojen luominen sammutuksen kannalta hyödyllistä, ja miten aukot olisi sijoitettava. Tutkittuina kohteina oli tuulettu teollisuushallin katto ja asuinrakennuksen yläpohjan ontelo (kuvat 39 ja 40). Suoritetuissa simuloineissa lähtökohtana on se, että palokunta ensi vaiheessa raivaa tyypillisesti maksimissaan halkaisijaltaan 2 m:n aukon katon yläpinnalle. Joissain tapauksissa palokunta voi myös tehdä kattoon rajoituslinjan, joka voi olla esim. metrin levyinen katon reunasta reunaan ulottuva aukko. Myös tällaisen rajoituslinjan toimivuutta tarkastellaan.

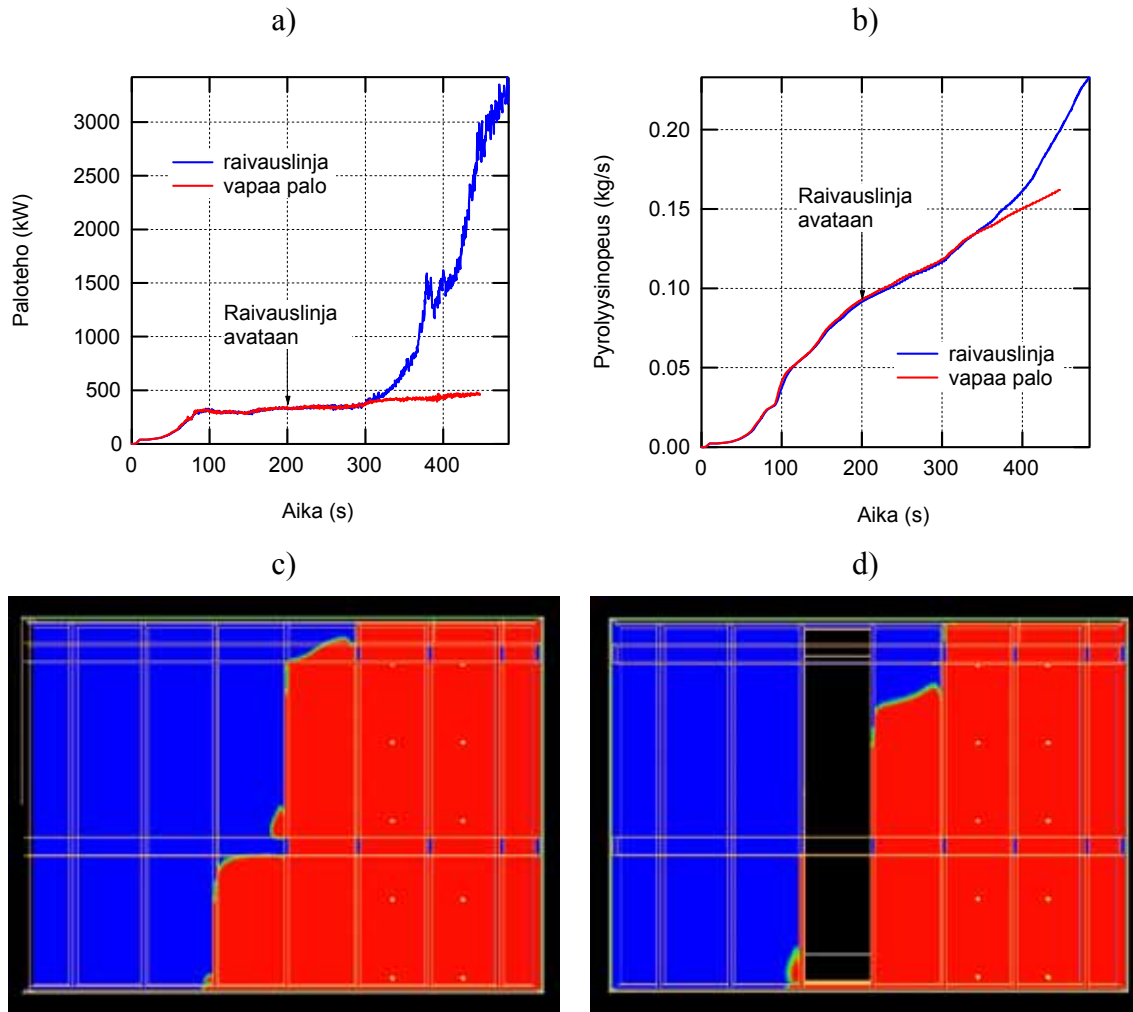


Kuva 39. Esimerkkejä tuulettuvaan teollisuushallin kattoon tehdyistä aukoista ja rajoituslinjoista. Sytytyslähteen paikka on merkitty punaisella.

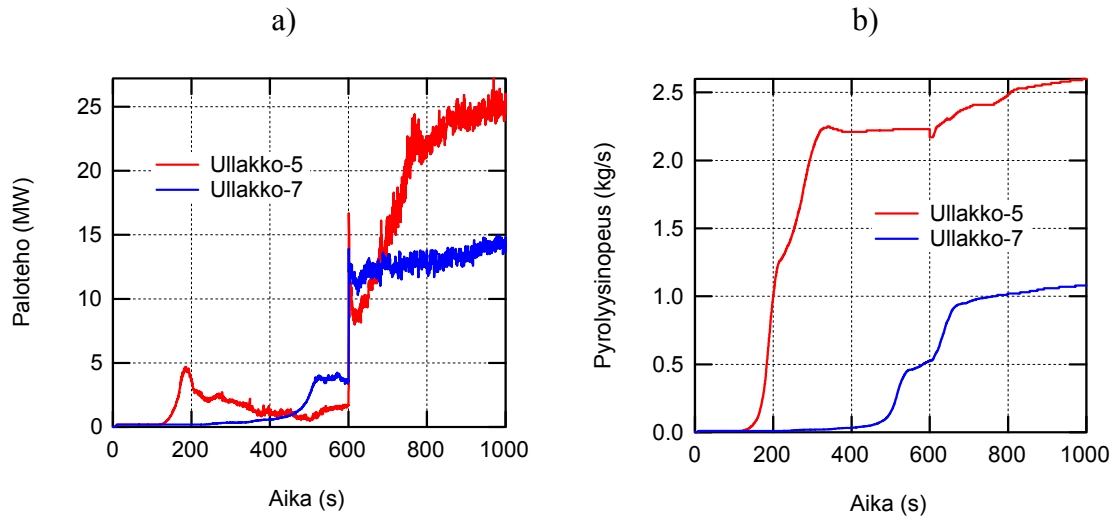


Kuva 40. Ullakotilan tuuletusaukkojen sijainnit (poistoaukon mitat 2 m × 2 m, ottoaukon mitat 1 m × 4 m).

Tutkimuksessa havaittiin, että ontelopalojen luonnollinen tuulettaminen onteloon tehtävillä aukoilla tai rajoituslinjoilla poistaa pyrolyysikaasuja palotilasta, muttei merkittävästi vaikuta palamiseen itse ontelon sisällä (teollisuushallin katto: kuva 41, yläpohjan ontelo: kuva 42) Mahdolliset raivauslinjat on aina pyrittävä kastelemaan vedellä.



Kuva 41. Esimerkki rajoituslinjan tekemisestä teollisuushallin katto-ontelopalon leviämiseen: a) paloteho ja b) pyrolyysinopeus sekä palavan pinnan osuus (punainen alue) c) vapaasti etenevässä palossa (ajanhetkellä 435 s) ja d) rajoituslinjan kanssa (ajanhetkellä 385 s). Kuvasta voidaan nähdä, että raivaamalla tehty rajoituslinja ei siis vähennä palamista, vaan palo etenee rajoituslinjan yli ja jatkaa sivuttaista etenemistään ontelossa. Pyrolyysinopeuden käyristä nähdään, että rajoituslinjan tapauksessa pyrolyysinopeus kasvaa suuremmaksi kuin vapaan palon tapauksessa siitäkin huolimatta, että suuri osa palamiskykyistä pintaa poistetaan laskenta-alueesta. Osittain tämä selittyy sillä, että raivauslinjan yläpuolella liekehtivä palo kykenee sytyttämään bitumikermikaton yläpinnan. Toisena tekijänä on kuitenkin se, että rajoituslinja yläpuolella tapahtuva liekehtivä palaminen edesauttaa palon pääsyä linjan yli.

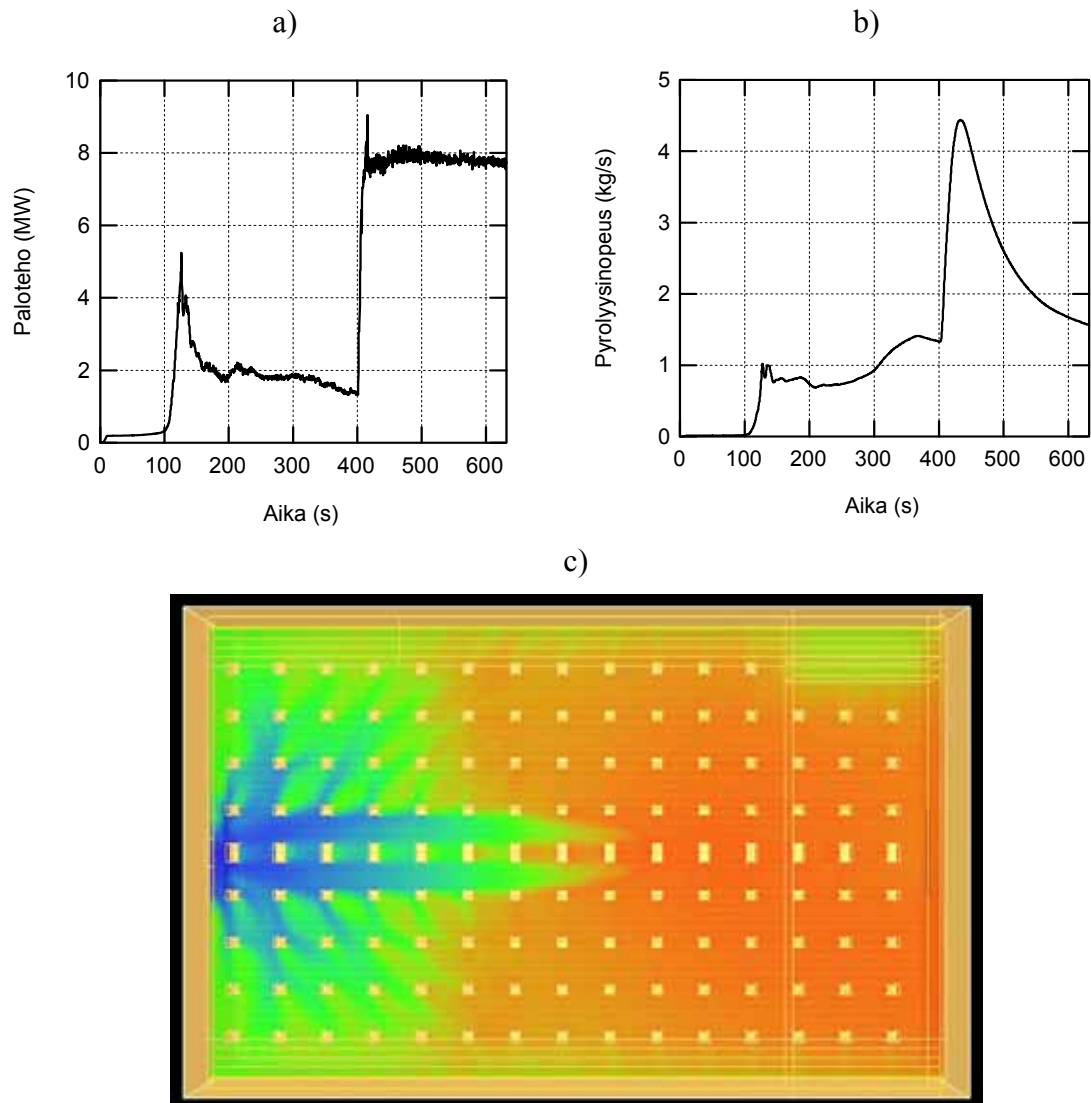


Kuva 42. Esimerkki yläpohjan ontelon luonnollisesta tuuletuksesta. Tuuletusaukko avataan ajanhetkellä 600 s. a) Paloteho ja b) pyrolyysiinopeus. Ajo 5 vastaa tapausta, jossa aluslaudoitus peittää katon 100 %:sti ja ajo 7 tapausta, jossa aluslaudoitus peittää 20 % katon pinta-alasta.

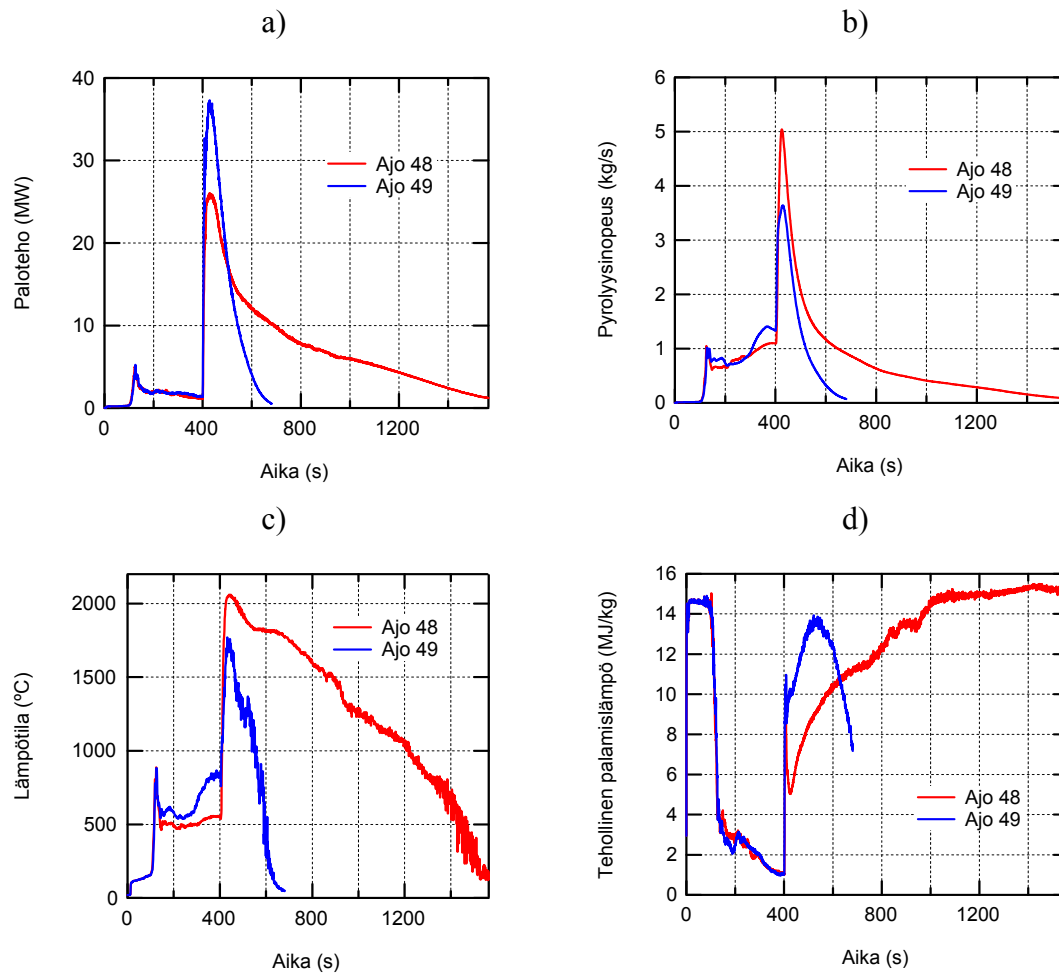
5.1.2 Pakotettu tuuletus

Ontelopalojen koneellinen tuulettaminen voi olla tehokas tapa ontelopalon leviämisen estämiseksi, mikäli tuuletus on riittävän tehokasta. Palokunnan käytössä olevat pienet liikuteltavat tuulettimet (tyypillisesti 11000 m³/h) eivät välttämättä ole riittävän tehokkaita ja pakotettu tuuletus voi lisätä palamista, ks. kuva 43. Tilavuusvirran tulisi olla luokkaa 50000 m³/h (kuva 44).

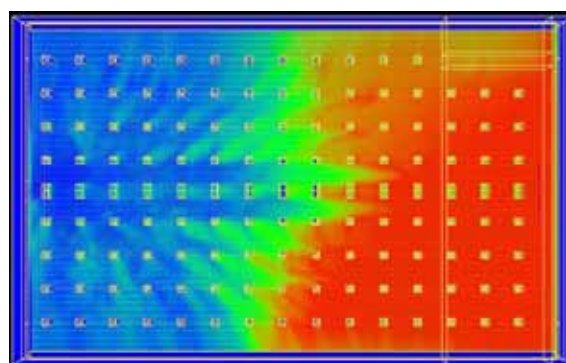
Mikäli tilavuusvirta on liian pieni, sammutusveden käyttö tuuletuksen ohella ei välttämättä johda sammutustehon lisääntymiseen. Sekä ilmavirtauksen (ks. kuva 44) että vesisuihkujen (kuva 45) tunkeutumiskyvyllä kuumiin palokaasuihin on ratkaiseva merkitys sammutusteholle.



Kuva 43. Esimerkki riittämättömän tuuletuksen (esitettyssä tarkastelussa ilman tilavuusvirta oli $12960 \text{ m}^3/\text{h}$ ja puhallus aloitettiin hetkellä 400 s) vaikutus yläpohjan ontelopa-loon: a) paloteho, b) pyrolyysinopeus ja c) kaasulämpötilan jakauma ajanhetkellä 630 s.



Kuva 44. Esimerkki riittävän suuren pakotetun tuuletuksen vaikutuksesta yläpohjan ontelopaloon: a) paloteho, b) pyrolyysinopeus, c) kaasun lämpötila ontelon keskellä korkeudella 1.0 m ja d) tehollinen palamislämpö. Ajossa 48 tilavuusvirta on $43200 \text{ m}^3/\text{h}$ ja ajossa 49 $64800 \text{ m}^3/\text{h}$.



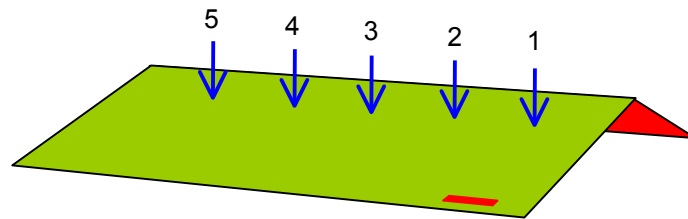
Kuva 45. Esimerkki pakotetun tuuletuksen ja vesisuihkutuksen yhdistämisestä tapauksessa, jossa tuuletuksen tilavuusvirta on $12960 \text{ m}^3/\text{h}$ ja vesisuihkuna palokunnan sammutussuihku: lämpötilan jakauma tasossa $z = 0,1 \text{ m}$ ajanhetkellä 600 s.

5.2 Palavan ontelon sammuttaminen vedellä

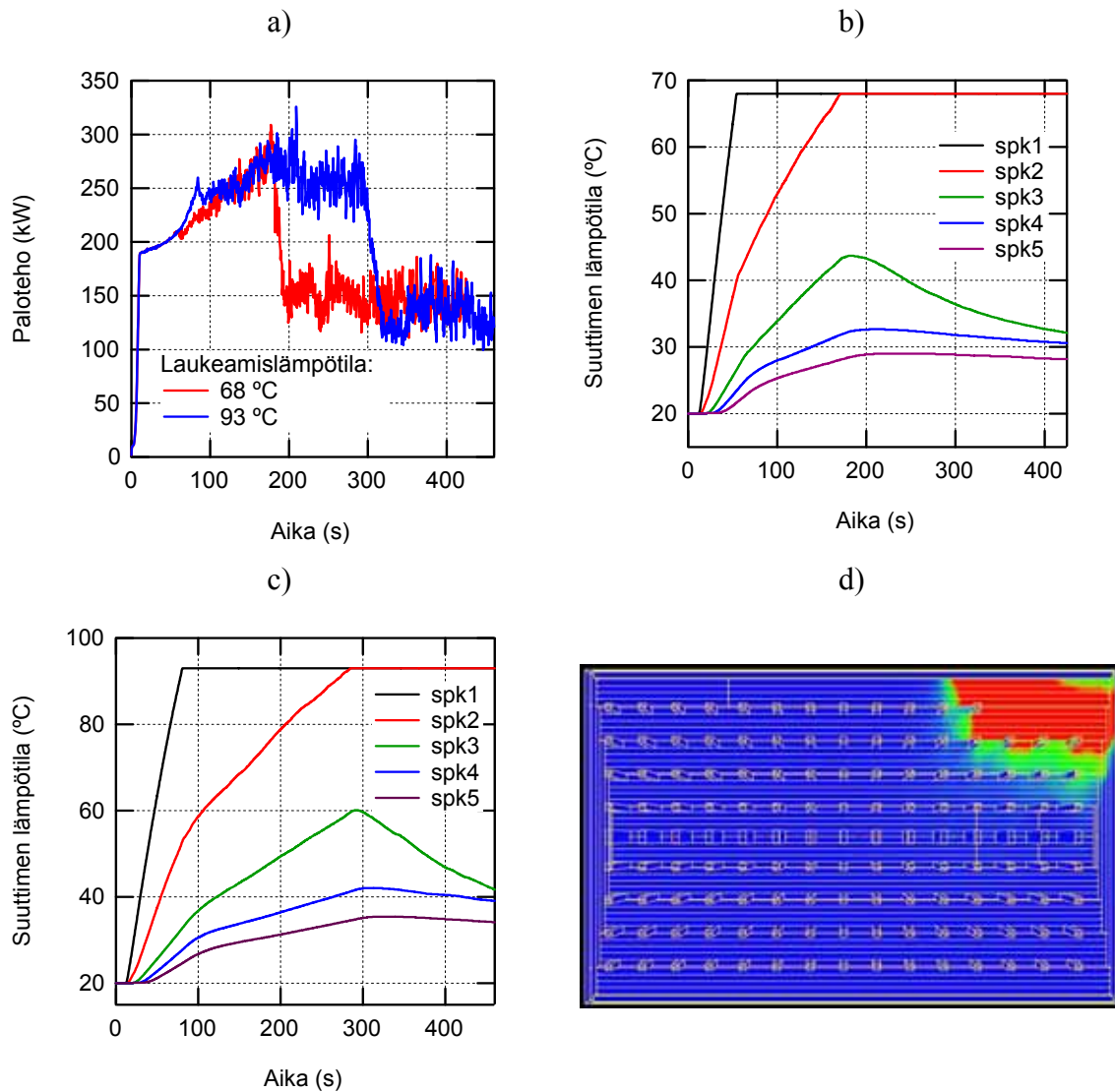
Työssä tarkasteltiin ontelopalon sammuttamista sprinklereillä, FogNail-pistosuihkuilla ja Espoon pelastuslaitoksen pistosuihkulla, joka on FogNail-pistosuihkua vankkaraken-
teisempi laite.

5.2.1 Yläpohjan ontelon sprinklaus

Sprinklauksen suhteen selvitettiin sellaisen 'kevennetyn' asennuksen toimivuutta, jossa suuttimia on asennettu ainoastaan ontelon harjalle kuvassa 46 esitetyllä tavalla. Työssä tarkasteltiin kahta suutinten laukeamislämpötilan osalta erilaista tapausta: käytetyt laukeamislämpötilat olivat 68 °C ja 93 °C. Ajojen päätulokset on esitetty kuvassa 47. Tuloksista nähdään, että katon harjalle sijoitettu sprinkleririvi rajoittaa paloa tehokkaasti siten, että vain kaksi suutinta laukeaa. Paloteho kohoaa vain vähän korkeammaksi kuin alkupalon paloteho, ja palava alue rajoittuu polttimeen välittömään läheisyyteen.



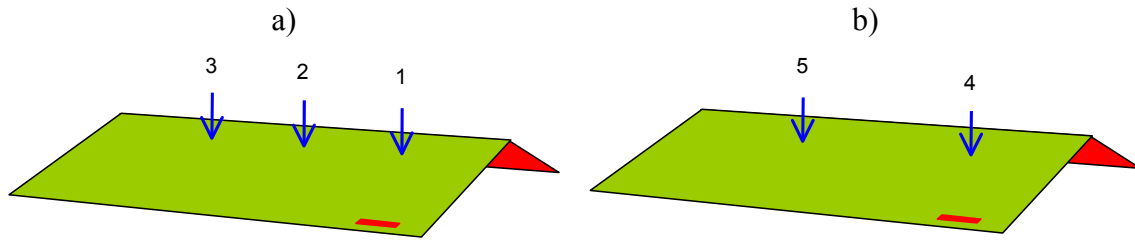
Kuva 46. Yläpohjan ontelon sprinklauksen tutkimisessa käytetyt suutinten sijoituspaikat: suuttimien välimatka on 3 m ja ne sijaitsevat 0.1 m ontelon kattopinnan alapuolella (0.9 m yläpohjan yläpuolella).



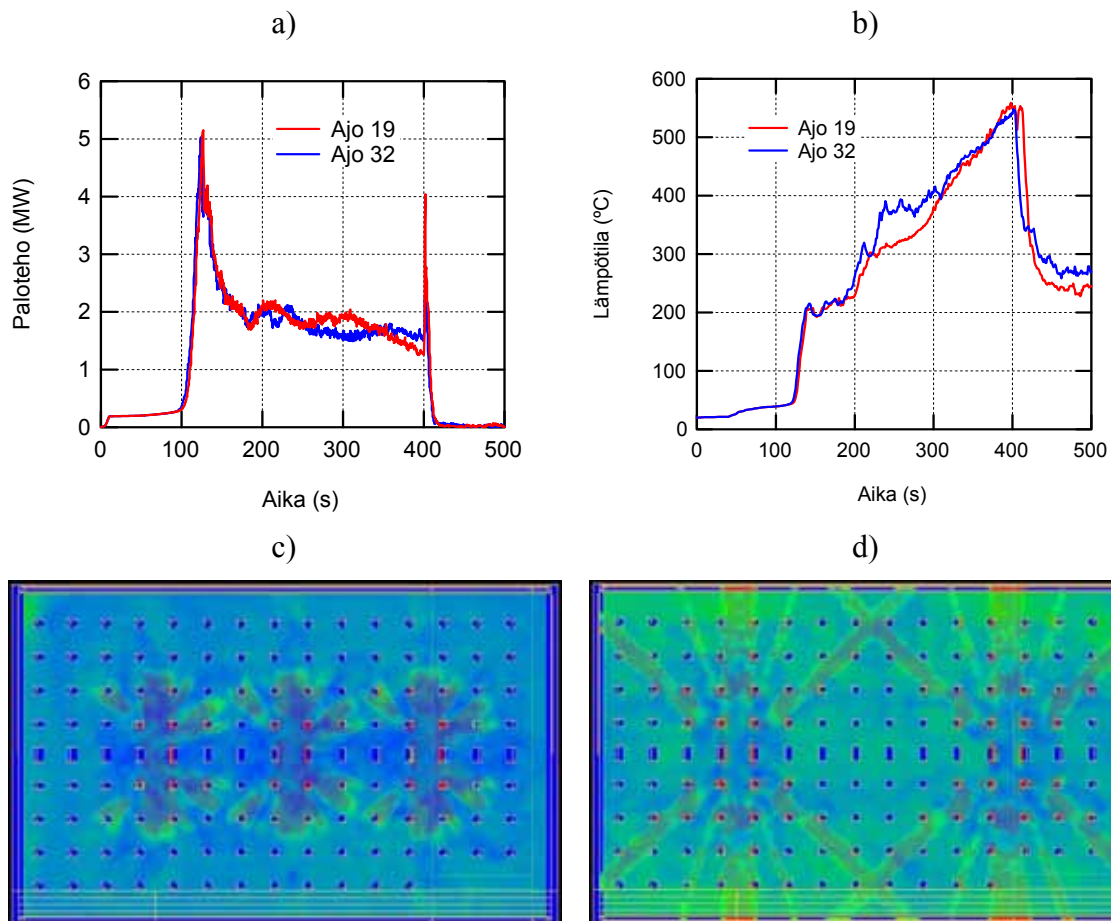
Kuva 47. Esimerkki ullakon harjalle asennetun sprinkleririvin toiminnasta ontelopalossa: a) paloteho, b) 68 °C:een lämpötilassa laukeavien sprinklerisuutinten lämpötilat, c) 93 °C:een lämpötilassa laukeavien sprinklerisuutinten lämpötilat ja d) pinnan palamisnopeuden jakauma 93 °C:n suuttimilla tehdyssä ajossa juuri ennen toisen suuttimen laukeamista.

5.2.2 Pistosuihkujen toiminta

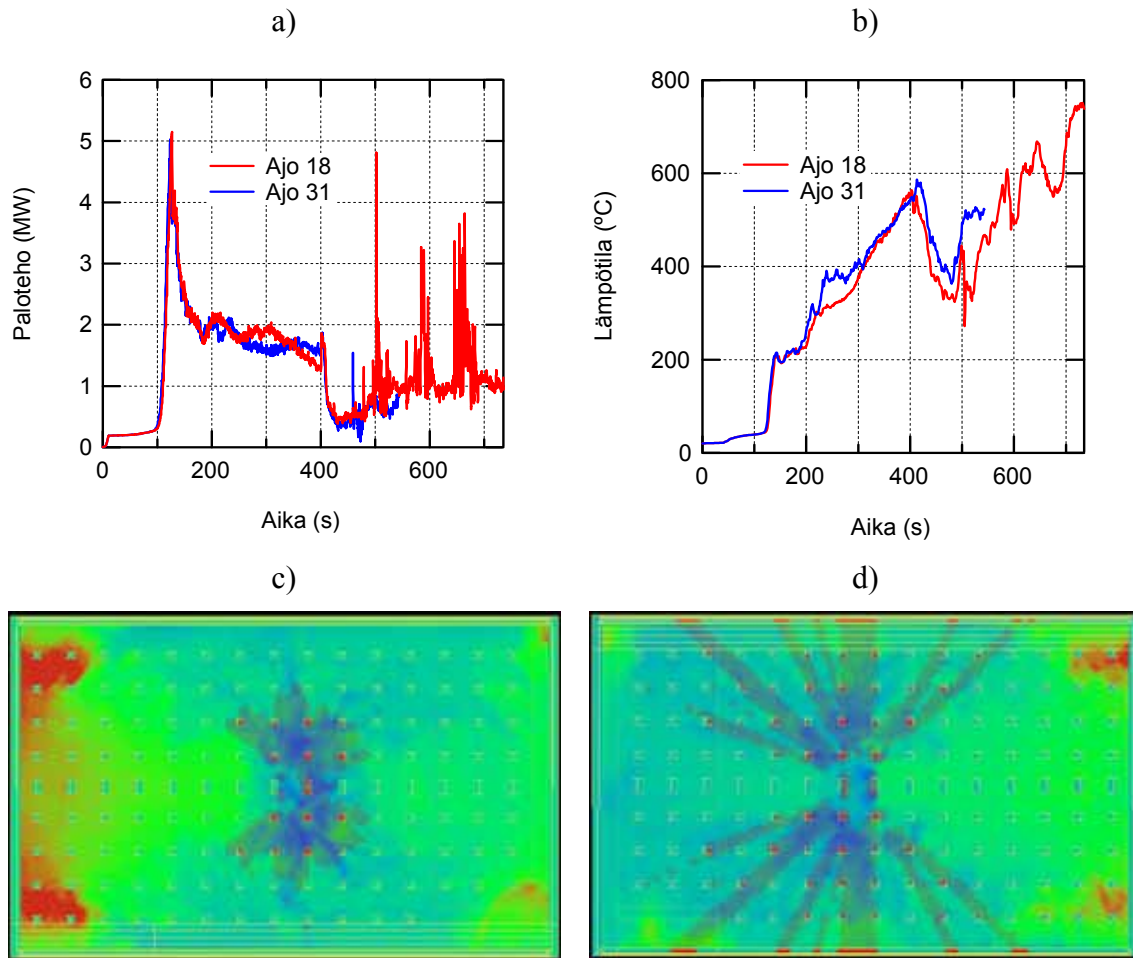
Pistosuihkuilla tehtävän ontelopalon sammutuksen suhteen selvitettiin suihkujen sijoitustiheyden, pisarakoon ja sammutuksen aloitusajan vaikutusta sammutustehoon. Tarkastellut suihkujen sijoituskohdat on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Pistosuihkujen sijoituspaikat yläpohjan ontelossa: a) kolmen pistosuihkun yhtäaikaista käyttöä tutkittaessa käytetty sijoittelu ja b) sijoittelu, jota käytettiin tutkittaessa kahden pistosuihkun yhtäaikaista käyttöä tai yhden pistosuihkun käyttöä peräkkäin kahdessa eri kohdassa. Tutkittaessa yksittäisen pistosuihkun tehoa käytettiin sijoituskohtaa nro. 2.



Kuva 49. Esimerkki siitä, miten harjalle sijoitettu pistosuihkurivi sammuttaa yläpohjan ontelopalon: a) palotehokäyrät, b) keskimääräiset kaasulämpötilat sekä c) ja d) yhdistelmät kaasun lämpötilan jakaumasta 10 cm ontelon alapinnan yläpuolella ja veden jakaumasta ontelon alapinnalla (c) vastaa ajoa 19 ja d) ajoa 32). Ajossa nro. 19 käytettiin FogNail-pistosuihkuja ja ajossa 32 Espoon pelastuslaitoksen pistosuihkuja.



Kuva 50. Esimerkki siitä, miten harjalle sijoitettu yksittäinen pistosuihku ei kykene sammuttamaan yläpohjan ontelopaloa: a) palotehokäyrät, b) keskimääräiset kaasulämpötilat sekä c) ja d) yhdistelmät kaasun lämpötilan jakaumasta 10 cm ontelon alapinnan yläpuolella ja veden jakaumasta ontelon alapinnalla (c) vastaa ajoa 19 ja d) ajoa 32). Ajossa nro. 18 käytettiin FogNail-pistosuihkuja ja ajossa 31 Espoon pelastuslaitoksen pistosuihkuja.

Tutkimuksessa havaittiin, että pistosuihkujen sijoittaminen harjakaton harjalle linjaksi ja suihkujen yhtäaikainen käyttö on tehokas tapa ontelopalon sammuttamiseksi. Suihkujen keskinäinen välimatka voi olla 4–8 m (kuva 49).

Yksittäinen pistosuihku tulisi sijoittaa mahdollisimman keskelle onteloa suurimman sammutusvaikutuksen varmistamiseksi. Yksittäinen pistosuihku ei todennäköisesti riitä sammuttamaan ontelopaltoa, mutta se rajoittaa palamista (kuva 50). Pistosuihkun sulke-

minen lyhyen suihkutuksen jälkeen voi aiheuttaa hetkellisen alipaineen ja siitä seurauksena hapen sisäänvirtauksen onteloon, mikä voi kiihdyttää palamista.

Vesisuihkujen sammutusteho ei ole kovinkaan herkkä suihkujen pisarakoolle alueella 200 μm – 1000 μm . Tulokset pätevät myös onteloon valmiiksi asennetuille kuivaputkille, mikäli putkiin liitetyt suuttimet ovat suihkukuvioltaan tässä tutkimuksessa tarkasteltujen pistosuihkujen kaltaisia.

6. Loppusanat

Jokaisessa ontelopalossa piilee vaara, että pieni syttymä eskaloituu kokoonsa nähden suhteettoman suuret vahingot tuottavaksi onnettomuudeksi. Düsseldorfin lentokentällä 1997 tapahtunut tulipalo edustaa tällä hetkellä pahinta tapahtunutta ontelopalona alkanutta katastrofia. Tuossa onnettomuudessa ontelossa ollut palava materiaali levitti palon nopeasti laajalle alalle. Katastrofi olisi ollut estettävissä, jos ontelossa ei olisi ollut palavaa eristettä. Mahdollisimman vähän palavien materiaalien käyttö ontelotiloissa olisi suuri askel eteenpäin: tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että palosuojattuja tai muuten palo-ominaisuuksiltaan hyviä materiaaleja käytettäessä ontelossa tapahtunut syttymä tai sinne levinnyt palon alku ei lähde kasvamaan, vaan pysyy pienenä sammuen lopulta itsestään, kun palon alkupaikan välittämän lähiympäristön materiaali on palanut loppuun. Jos muut rakennustekniset tekijät antavat sijaa, onteloiden suunnittelussa olisi hyvä ottaa myös muut *Ontelopalojen ominaispiirteet* -hankkeessa löydettyt ontelopalon kasvua lieventävät tekijät.

Materiaalit, joilla on hyvät palo-ominaisuudet, ovat hankittaessa kalliimpia kuin sellaiset materiaalit, joiden palo-ominaisuuksia ei ole erikseen tuotekehityksen keinoin parannettu, vaikka pahan ontelopalon sattuessa kokonaiskustannuksien suhteen tilanne voi toki olla täysin päinvastainen. Siksi lähitulevaisuudessa ei ole nähtävissä sellaista tilannetta, että rakennusten onteloissa ei olisi helposti paloa levittäviä materiaaleja. Siksi ontelopalojen mahdollisuutta levitä ja kasvaa suuriksi on tarpeen rajoittaa rakenteellisin keinoin: ontelot tulee tilanteesta riippuen osastoida tai jakaa osiin. Mitä pienempi palo on, kun sitä aletaan sammuttaa, sitä korkeampi sammutuksen onnistumisen todennäköisyys on. Siksi pääperiaatteena on, että sovelias osastointi/osiin jako luo perustan ontelopalon onnistuneelle sammuttamiselle. Käytännössä ontelossa olevat rakenteet voivat joskus estää sammutusaineen kulkeutumista tarkoituksenmukaisella tavalla. Tämä on kuitenkin poikkeustapaus, johon voidaan varautua merkitsemällä esim. katto-onteloissa kulkevat rakenteelliset rajalinjat niin selkeästi, että palokunnan ei tarvitse perustaa sammutushyökkäystään arvauksien varaan.

Ontelopalojen sammuttaminen on usein työlästä ja vaikeaa: hankaluuksia aiheutuu palon paikantamisen vaikeudesta, katto-onteloiden kohdalla yleisistä korkealla paikalla tapahtuvan työskentelyn, moninkertaisen katteiden läpipääsemisestä, jne. Listaa voitaisiin jatkaa paljon pidemmäksi. Ontelosammutushankkeen kannalta ongelmien moninaisuus suhteessa tutkimusresurssien määrään vaati ongelmakentän tiukkaa rajaamista. Laskennallisen tutkimustyön tuloksena saatiin käytännön toimenpiteisiin liittyviä tuloksia katto-ontelopalojen sammuttamisen suuntaviivoiksi: mikä tehoaa ja mikä ei. Luontevana jatkotutkimuksen aiheena nouseekin esille näiden sammuttamista koskevien tulosten todentaminen kokeellisesti.

Lähdeluettelo

Anon. 1997. Brann i rekkehus [verkkodokumentti]. Oslo, NO: Statens bygningstekniske etat. (Melding HO-3/97). [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: <http://www.be.no/beweb/regler/meldinger/973rekkehus/rekkehus.html>.

British Gypsum. 2003. Cavity barriers [verkkodokumentti]. Loughborough, GB: British Gypsum Limited. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: http://www.british-gypsum.bpb.com/PDF/f10_072.pdf.

Byggforsk. 2002. Brannsikring av bygninger med kaldt loft – Konstruktive løsninger. Byggforskserien Byggdetaljer. Oslo, NO: Norges byggforskningsinstitutt. (Byggdetaljer 525.108.)

CEA 4001: 1998-12. 1998. Sprinklerilaitteistot. Suunnittelu ja asentaminen. Comité Européen des Assurances. 138 s. ISBN 951-9180-47-8.

Department of the Environment, Transport and the Regions. 1991. The Building Regulations 1991. Approved Document 'B': Fire Safety. London: HMSO. 108 p. + liitt. 42 p. ISBN 1 85112 3512

Fardell, P.J., Colwell, R. & Chitty, R. 2000. Study of Cable Insulation Fires in Hidden Voids. Garston, GB: Building Research Establishment. S. 207.

Hakkarainen, T. & Oksanen, T. 2002. Fire safety assessment of wooden facades. Fire and Materials, Vol. 26, s. 7-27.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Vaari, J. & Weckman, H. 2000. Ontelotilojen paloturvallisuus: Ontelopalotapauksia ja - tutkimuksia. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö, 2000. 68 s. + liitt. 11 s. (Palotutkimusraadin projektin nro. 68 julkaisu)

Hietaniemi, J. 2001. Puun palosuojausten vaikutus suljetussa tilassa kehittyvään paloon – kokeellinen todennus ja koetulosten soveltamisesimerkki. Palontorjunta-tekniikka, Nro. 3-4/2001, s. 109-114.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Korhonen, T., Siiskonen, J. & Vaari, J. 2002. Ontelotilojen paloturvallisuus: Ontelopalosten tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 125 s. + liitt. 63 s. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 2128. ISBN 951-38-5953-3.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Jumppanen, U.-M., Kouhia, I., Vaari, J. & Weckman, H. 2003. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen leviämisen katkaisu-
minen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 168 s. + liitt. 52 s. (VTT Tiedotteita
- Research Notes 2202) ISBN 951-38-6156-2.

Hostikka, S. 2001. Tulipalon simulointi FDS-ohjelmalla. Palotutkimuksen päivät 2001.
Espoo, Hanasaari, 22.–23.8.2001.

Joyeux, D. 2002. Experimental Investigation of Fire Door Behavior During a Natural
Fire. Fire Safety Journal, Vol. 37, No. 6, s. 605–614.

Kallioniemi, P. ja Laamanen, R. 1995. Tuhoisasta ylipaineekaton palosta selvittiin ke-
säseisokin aikana. Teollisuusvakuutus, 1/95, s. 18–23.

Kitsons Insulation Products. 2003. Owens Corning Products [verkkodokumentti].
Leicester, GB: Kitsons Insulation Products Ltd. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa:
http://www.kitsonsinsulation.co.uk/Pricelist_pdfs/fire_protection/pdfs/page22.pdf.

Knauf Insulation. 2003. Cavity barrier – Half hour fire protection [verkkodokumentti].
St. Helens, GB: Knauf Insulation Ltd. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa:
<http://www.knaufinsulation.co.uk/application/applica.asp?AppID=53>.

Kokkala, M., Mikkola, E., Immonen, M., Juutilainen, H., Manner, P. & Parker, W.
1997. Large scale upward flame spread tests on wood products. Espoo: Valtion tekni-
linen tutkimuskeskus. 29 s. liitt. + 116 s. VTT Tiedotteita 1834. ISBN 951-38-5114-1.

Kovanen M. & Heininen, V.-M. 1993. Poikkeuksellisen hankalan kattopalon syynä tuli-
töistä singonnut kipinä. Pelastustieto 2/93, s. 13–15.

Kärppä, A. 1992. Rajusti levinnyt palo surmasi neljä lasta rivitaloturmassa. Palontor-
junta 7/92, s. 10–12.

Lamatherm Products. 2003b. 1 Stop Universal Slab Application [verkkodokumentti].
Measteg, GB: Lamatherm Products Limited. [Viitattu 21.2.2003]. Saatavissa:
<http://www.lamatherm.co.uk/1stop/1stop10.htm>.

McGrattan, K. B., Baum, H. R., Rehm, R. G., Hamins, A. & Forney, G. P. 2000a. Fire
Dynamics Simulator - Technical Reference Guide. Gaithersburg: National Institute of
Standards and Technology. (NISTIR 6467)

McGrattan, K.B. & Forney, G.P. 2000b. Fire Dynamics Simulator - Users Guide. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. (NISTIR 6469)

Proe, D.J. & Bennetts, I.D. 1996. Fire Tests on Commercial Ceiling Systems. Melbourne, Australia: BHP Melbourne Research Laboratory. (BHP Research Report No. BHPR/SM/R//018)

Promat Fire Protection. 2003. Promatect 100 – Cavity barriers [verkkodokumentti]. Nr. Royston, GB: Promat Fire Protection Ltd. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: <http://www.promat.co.uk/p100h.htm>.

Silmäri, J. 1994. Punkaharjun Finnforestilla 15 miljoonan tulityövahinko. Pelastustieto, 7/94, s. 10–11.

Tillander, K. & Keski-Rahkonen, O. 2001. Rakennusten syttymistäajuudet PRONTO-tietokannasta 1996–1999. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 66 s. + liitt. 16 s. VTT Tiedotteita 2119. ISBN 951–38–5929–0.

Uvsløkk, S. & Lisø, K.R. 2002. Skrå tretak med dampåpent undertak over uluftede kalde loft – Fuktteknisk vurdering, Notat. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.

Wolf, A. 1996. Seventeen Die in Dusseldorf Airport Terminal Fire. NFPA Journal, Vol. 90, No. 4, pp. 43–46. (July/August 1996)

Ympäristöministeriö 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E1: Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. 40 s. (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 12.3.2002)

Liite A: Ontelopalotapauksia

Kattorakenteiden ja yläpohjan ontelopaloja

Kattorakenteiden ja yläpohjan ontelopalot ovat selvästi yleisin ontelopalotyyppi. Niihin liittyvät suorat omaisuusvahingot ovat usein suuria. Jos palot tapahtuvat teollisuuslaitoksissa tai muissa vastaavissa kohteissa, kuolemantapausten suhteellinen määrä on alhainen, mutta jos palo tapahtuu esim. rivitalon ullakolla, voi uhrien määrä olla korkea.

Katto-onteloihin liittyvien tulipalojen korkea lukumäärä heijastuu luonnollisesti myös niitä käsittelevien artikkeleiden määrää. Seuraavassa esitellään näitä palotapauksia. Aluksi käydään muutama tapaus varsin yksityiskohtaisesti ja sen jälkeen käytetään lyhyempää esitystapaa. Mukaan on liitetty myös hankkeen esitutkimuksen aikana kerätty materiaali.

Tapauksista tulee ilmi useita ontelopaloille ominaisia piirteitä. Eräs piirre on se, että palo voi kehittyä pitkään näkymättömissä katseilta ja roihahtaa suureksi tulipaloksi kyttemisrintaman murtauduttua ulos ontelosta. Katto-onteloiden alkusyynä on usein tulityö. Alkuun päästyään tuli leviää kattorakenteessa usein odottamattoman nopeasti, minkä vuoksi esim. rajoituslinjojen paikka voidaan valita liian lähelle palon alkupaikkaa. Monesti jopa piilossa olevan palon paikallistaminen on vaikeaa. Palon jatkuttua tietyn aikaa sen sortumisriski alkaa kasvaa, mikä voi vaarantaa pelastushenkilökuntaa. Kattorakenteet aiheuttavat usein ongelmia palokunnille. Sepelillä päällystetyn paksun bitumi-huopakaton läpi on vaikea päästä. Usein katteita voi samalla katolla olla useampia kerroksia, joka tekee niiden rikkomisen erityisen hankalaksi ja katekerrosten väliset ontelot voivat levittää tulta ja savua.

Seuraavassa on aluksi esitetty kaksi varsin perusteellisesti tutkittua ontelopalotapausta: ensin hyvin yksityiskohtainen analyysi eräästä Yhdysvalloissa tapahtuneesta kaupparakennuksen katto-onteloissa tapahtuneesta tulipalosta ja sen jälkeen Punkaharjulla tapahtuneen vanerintehtaan katonpalon tarkastelu. Näiden tapauskuvausten jälkeen on käyty läpi vaihtelevalla perusteellisuudella lukuisia muita ontelopalotapauksia. Ne on esitetty käänteisessä aikajärjestyksessä, eli viimeisimmät tapaukset on esitetty ensin.

Waldbaumin kaupan tulipalo New Yorkissa 1978

Tämä tapahtumakuvaus perustuu prof. J. G. Quintieren lehdessä *Fire Science and Technology* (Quintiere 1998) esittämään kyseisen tulipalon kulun analyysiin.

Tulipalo tapahtui kattorakenteiden ontelotilassa. Palo syttyi kaupparakennuksen vanhan ja uuden osan välissä, ks. A1. Syttymistila oli pieni väliaikaisrakenteeseen liittyvä ontelo, josta tuli levisi suurempaan ontelotilaan, eli rakennuksen ullakkotilaan. Syttymistila oli muodoltaan kolmiomainen (kuvat A1 ja A2), sen korkeus oli n. 32 tuumaa (80 cm) ja kanta 132 tuumaa (330 cm). Kulma $\theta \approx 14^\circ$. Katossa EPS-eriste (noin 100 mm) ja lattian muodosti alumiinipaneelikatto, jonka alla oli mineraalivillaa.

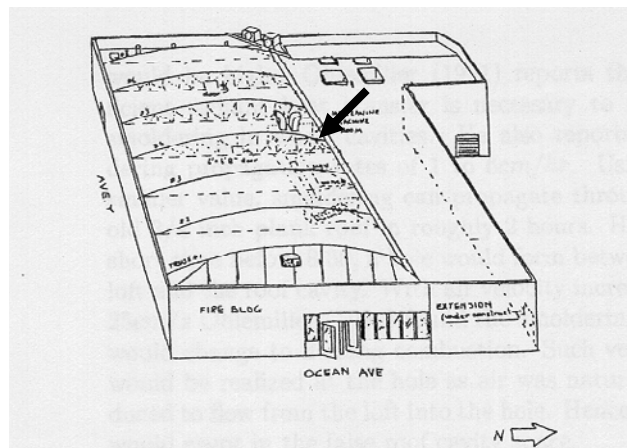


Figure 1: Overview of store with the extension under construction.

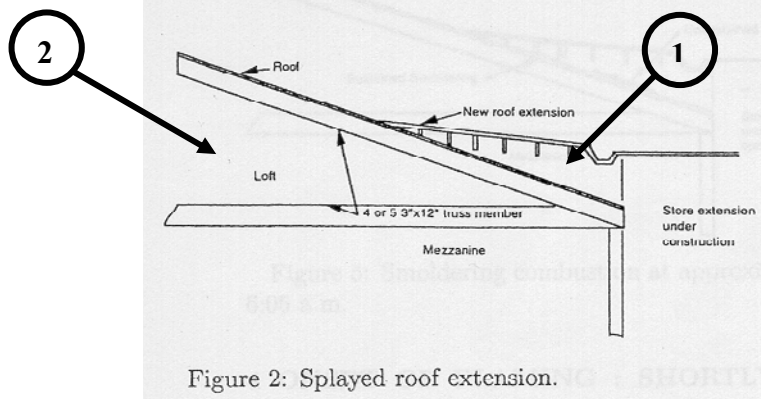


Figure 2: Splayed roof extension.

Kuva A1. Ylempi kuva: Waldbaum- supermarketin yleiskuva, jossa nuoli osoittaa palon syttymispaikan. Alempi kuva: tarkempi kuva palon alkamispaikasta. Paloon osallistui kaksi ontelotilaa, pienempi ontelo, josta palo sai alkunsa (1) ja suurempi rakennuksen ullakkotilan ontelo (2). (Quintiere 1998)

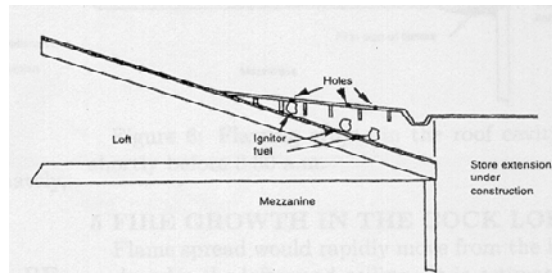


Figure 3: Flammable liquids soaked newspapers inserted into roof holes.

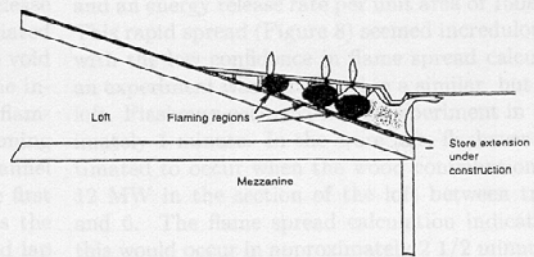


Figure 4: Ignition at approximately 6 a.m.

Kuva A2. Palon alkuvaiheet. (Quintiere 1998)

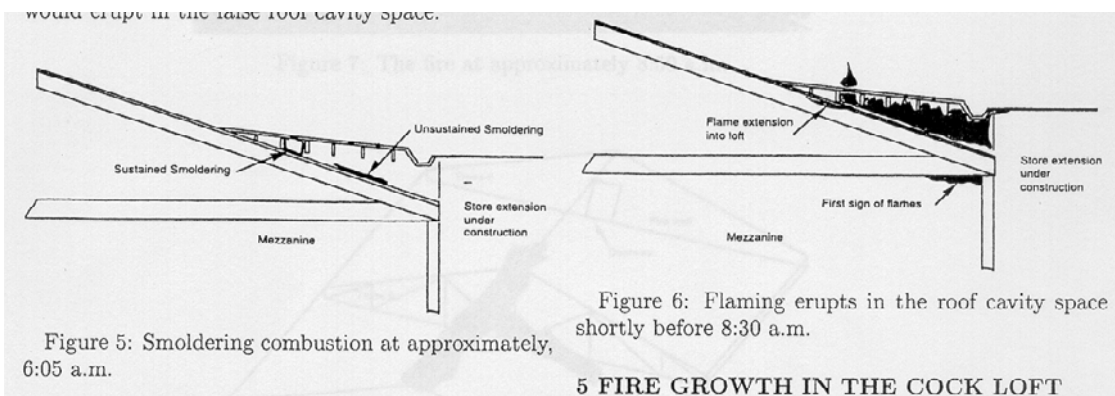


Figure 5: Smoldering combustion at approximately, 6:05 a.m.

Figure 6: Flaming erupts in the roof cavity space shortly before 8:30 a.m.

5 FIRE GROWTH IN THE COCK LOFT

Kuva A3. Palon kehittyminen. (Quintiere 1998)

Tulen alkunsa tuhopolttajän toimesta: alkupalo oli sytytetty tahallaan tekemällä reikiä kattoon ja työntämällä sen läpi palavalla nesteellä kasteltuja papereja (ks. kuva A2). Sytytysaika oli noin klo 6 aamulla.

Sytyttämisen jälkeen palo kehittyi ontelossa seuraavasti. Heti palon alkuvaiheessa paperit tuottivat noin 100–500 kW palotehon, palava pinta-ala oli kooltaan suuruusluokkaa

1 m². Palosta aiheutui n. 40–50 kW/m² säteilyrasitus rakenteen puuosille, puu syttyi noin 30 s:ssa ja paloteho nousi noin 500 kW:iin. Palava neste paloi loppuun n. 2 minuutissa. Paloteho nousi n. 1000 kW:iin, mutta liekehtivä palo loppui noin 1–2 min puun syttymisen jälkeen, koska palotilan happimäärä väheni alle liekehtivän palamisen tarvittaman määrän

Liekehtivän palamisen jälkeen palo jatkui kyteväenä, koska vaikka tilan happi kävi vähiin, oli tila riittävän pieni, jotta säteilevä lämmönsiirto pystyi pitämään kytemistä yllä. Tämä oli mahdollista etenkin ontelon pienissä osissa (ks. kuva A3).

Lämmönsiirtomekanismi oli seuraava: Hehkuva puu lattiassa tai katossa tuottaa säteilylämpörasituksen vastakkaiseen pintaan. Jos säteilytaso on riittävä, hehkuminen pysyy yllä itsestään, mutta loppuu, jos säteilytaso on liian pieni (Ohnemiller 1991). Pienessä tilassa säteilyn vaikutus voimistuu näkyvyystekijän kautta: kun pinnat ovat lähekkäin, niin suuri osa säteilevän pinnan lähettämästä energiasta kulkeutuu vastaanottavalle pinnalle (näkyvyystekijä lähellä arvoa 1); jos välimatka on pitkä, niin näkyvyystekijä pienenee, ja vastaanottavalle pinnalle tuleva energiamäärä vähenee. Kahden tason muodostaman kulman θ (ks. kuva A3) tapauksessa näkyvyystekijän kasvuun liittyvää säteilyn voimistumismekanismia voidaan lähestyä kvantitatiivisesti lausekkeen avulla $\phi = 1 - \sin\theta/2$ (Howell 1982). Nähdään, että kun kulma θ on pieni, näkyvyystekijä on lähes 1, mutta pienenee kulman kasvaessa.

Ohnemillerin (1991) mukaan puun kytevä palaminen etenee nopeudella 1–6 cm/tunti ($3 \cdot 10^{-6}$ m/s). Alempaa arvoa käyttäen voidaan arvioida, että kyteminen etenee 3/4 tuumaa (n. 19 mm) paksun puun läpi noin 2 tunnissa.

Kun kytevä palo pääsi puun läpi, palo leimahti uudelleen liekkeihin, mistä seurasi tuhoisa tulipalo. Palo alkoi varsin hyvin edellä annetun aika-arvion puitteissa, kello 8 jälkeen, eli kestätyään runsaat 2 tuntia. Tällöin kytevä palo hiillytti puun puhki ja pääsi kosketuksiin ulkopuolisen happirikkaan ilman kanssa, mistä seurasi palon leimahtaminen liekehtiväksi. Syntyneiden liekkien vaikutuksesta ullakkotilan ontelossa tapahtui lieskahdus. Tämä nosti ontelotilan painetta niin, että liekit tunkeutuivat rakojen läpi, mikä ko. rakojen suurenemisen kautta puolestaan lisäsi ontelon ilmansaantia. Ullakkotilan ontelon ulkopuolelle tunkeutuneet liekit havaittiin n. kello 8.30. Tuli pääsi myös katon läpi, ks. kuva A3.

Päästyään ontelosta yläpohjan puiselle alapinnalle tuli eteni katon harjan tasalle noin 2–3 minuutissa. Etenemisnopeuden arvioinnissa käytettiin seuraavia arvoja: syttymisaika 30 s ja lämmönvapautumisnopeus 150 kW/m². Ennuste tarkistettiin kokeellisesti: kokeessa lieskahdus tapahtui, kun puuta paloi n. 6–12 MW:n teholla, koko tila oli tulossa n. 5 minuutissa.

Ullakolle kehittyi siis piilossa suuruusluokkaa 10 MW:n palo, josta katolla ollut palokunta ei ollut tietoinen. Tämä palo poltti kattoristikot poikki noin 35 minuutissa, josta seurasi katon romahtaminen noin kello 9.10. Tämän seurauksena 12 palomiestä putosi liekkeihin, joista 6 menehtyi.

Vaneritehtaan kattopalo Punkaharjulla 1994

Finnforestin vaneritehtaan kattopalo Punkaharjulla on tunnetuimpia Suomen viimeaikaisista ontelopaloista. Tässä esitettävä tapahtumien kuvaus perustuu Kallioniemen ja Laamasen (1995) esittämään palon analyysiin ja Silmärin artikkeliin (1994). Näissä lähteissä annetuista tiedoista tehdään joitain lisäarviointeja; niiden kohdalla huomauteetaan, että ko. tiedot eivät ole em. viitteistä, vaan ovat tässä raportissa tehtyjä tarkasteluja.

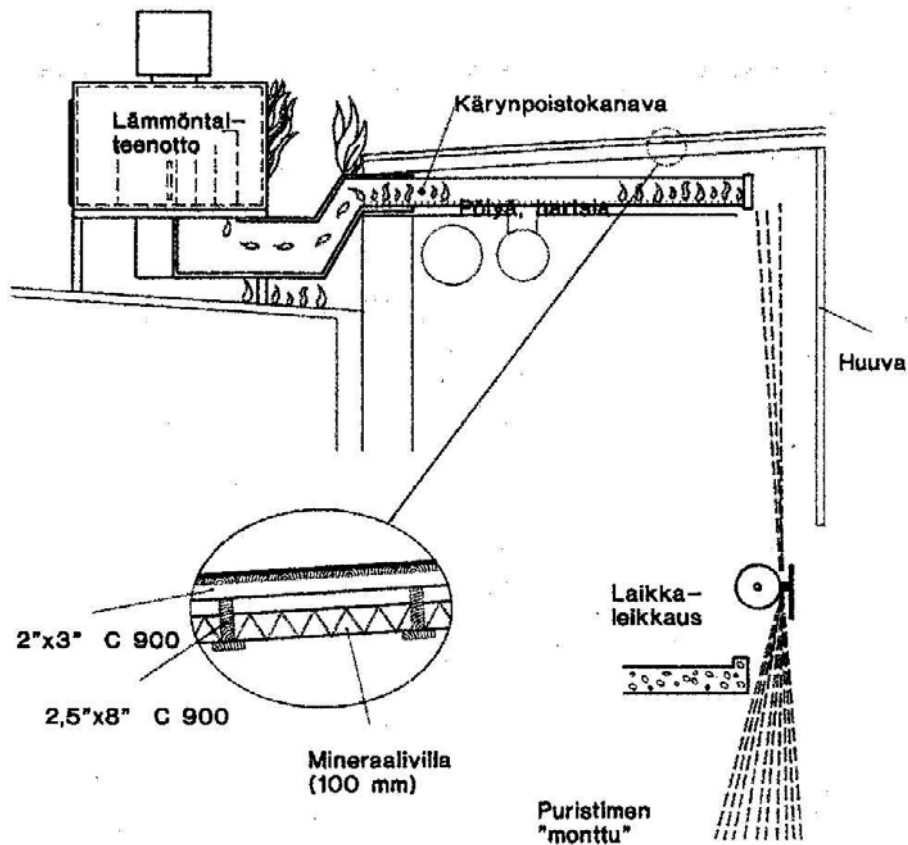
Yleiskuvaus

Tulipalo tapahtui 9.–10.7.1994. Tässäkin palossa tuli katsoa levisi kahdessa ontelotilassa, ensin kärynpoistokanavassa ja sitten ylipainekaton ontelossa. Palossa ei syntynyt henkilövahinkoja, mutta omaisuusvahingot nousivat noin 20 miljoonaan markkaan.

Koko tehtaan pinta-ala oli noin 15 000 m², josta palon kohteena olleen hallin pinta-ala oli jonkin verran alla puolet. Karkeasti arvioiden hallin katto oli noin 50 m leveä ja 120 m pitkä (eli noin 6000 m²).

Kärynpoistokanavan korkeudeksi voidaan kuvasta A4 katsoen arvioida noin 30 cm.

Ylipainekaton rakenne käy ilmi kuvan A4 detaljikuvasta. Ontelon korkeus oli noin 150 mm. Katto oli päällystetty bitumikermillä, jonka alla oli noin 25 mm paksusta puusta tehty laudoitus. Paksimpien puusoirojen (korkeus 8 tuumaa eli n. 20 cm ja leveys 2.5 tuumaa eli n. 6.3 cm) väli oli 900 mm ja ohuempien (korkeus 3 tuumaa eli n. 7.5 cm ja leveys 2 tuumaa eli n. 5 cm) väli oli 600 mm.



Kuva A4. Kaaviokuva palon syttymisestä ja leviämisestä. (Kallioniemi & Laamanen 1995)

Tapahtumien kulku

Kuva A4 havainnollistaa palon syttymistä ja leviämistä. Palo alkoi laikkaleikkurilla tehdyn työn yhteydessä (kesäseisokin aikainen kuumapuristimen täyttö- ja purkauslaitteiden korjaustyö). Syttyminen tapahtui kärjen keräämiseen tarkoitetussa huuvassa kuumapuristimen yläpuolella johtuen laikkaleikkurista lentäneestä kipinästä, joka sytytti kanavassa ollutta pölyä ja hartsikertymiä. Tuli kulki alussa kärynpoistokanavassa lämmöntalteenottolaitteelle. Tästä palo pääsi kulkeutumaan ylipainekaton onteloon, jossa palo eteni tuhoten katon.

Hälytys palosta annettiin kello 15.40. Palo oli alkanut ennen tätä ja tulityön tekijät olivat sammuttaneet näkemänsä palon. Kanavan sisällä näkymättömissä palaminen oli kuitenkin päässyt jatkumaan.

Palomiehet tekivät ensimmäisen rajoituslinjan siten, että palo olisi rajoittunut noin viidesosaan katosta (1200 m²:iin). Palo ei kuitenkaan pysähtynyt tähän linjaan, vaan noin kolme tuntia palon alkamisen jälkeen sen havaittiin edenneen katto-ontelon sisällä myös konttorin puoleiseen päähän, eli arviolta noin 50–60 m matkan. Jakamalla tämä matka tasaisesti kolmen tunnin ajalle, saadaan arvio, että tässä palon vaiheessa palon keskimääräinen katon suuntainen leviämisenopeus on ollut noin 30 cm/min.

Palo saatiin hallintaan kello 3 sunnuntaiaamuna, eli tulipalo kesti noin 12 tuntia.

Rivitalon palo Nuutajärvellä 2001

Lähteenä alla olevassa tekstissä on käytetty Saaren artikkelia (2001).

Palo tapahtui 7. elokuuta 2001 keveistä puuelementeistä tehdyssä rivitalossa, joka oli rakennettu 1973. Talon ullakko oli osastoimaton ja tuli levisi sinne päästyään hyvin nopeasti.

Yläpohja muodostui 10 mm paksusta puolikovasta kuitulevystä, 22 mm × 100 mm harvalaudoituksesta, muovitiivistyspaperista. Lattia oli 200 mm:stä mineraalivillaa. Katonkannattajat levittivät paloa, joten ne todennäköisesti oli tehty puusta.

Tuli pääsi irti erään huoneiston olohuoneesta.. Hälytys palosta saatiin kello 23.24 ja palokunta saapui paikalle kello 23.31 (1. yksikkö) ja 23.42 (2. yksikkö). Kun toinen yksikkö saapui paikalle, palo oli jo levinnyt ullakolle. Koska palopaikalla olleet sivulliset esittivät arvion, että huoneistossa olisi ollut kolme henkilöä, sammutusvoimat keskitettiin aluksi pyrkimyksiin pelastaa nämä ihmiset. Tämä hidasti sammutustoimien keskittämistä ullakkotilaan.

Palohuoneistossa ollut henkilö menehtyi.

Mineraalivillan mainitaan hidastaneen kohtalaisesti palon leviämistä ullakkotilasta huoneistoihin. Palon leviäminen tapahtuikin pääasiassa väliseinän ja katon yhtymäkohdista.

Talossa oli kolminkertainen huopakate, joka vaikeutti ullakon sammuttamista. Kate putosi yläpohjan eristeiden päälle, kun ohuet katonkannattajat sortuivat. Katto ei kestänyt sortumatta säädöksissä vaadittua 30 minuutin aikaa. Palo saatiin sammumaan vasta, kun katto nostettiin nosturilla pois talon päältä.

Artikkelissa mainitaan Urjalassa olevan useita samantyyppisiä rakennuksia, joissa ullakkoa ei ole osastoitu mm. Vanhustenkotiyhdistyksen käytössä.

Artikkelin lopuksi esitetään seuraavia toimenpiteitä rivitalojen paloturvallisuuden parantamiseksi:

- On tärkeää, että huoneistoittainen osastointi ulottuu vesikattoon.
- Jokainen ullakon osasto pitäisi varustaa kattoluukulla.
- Rivitaloasuntojen sisäpuoleiset seinä- ja kattopinnat tulee olla syttymättömistä materiaaleista.
- Eristeiden pitää olla palamattomia.

Kerrostalon palo, Washington 1997

Tässä kappaleessa tarkasteltu tulipalo on kuvattu NPFA:n Internet-sivuilta ilmaiseksi saatavilla olevassa palon analysoinnin koosteessa (NFPA 1997).

Palanut talo oli pohjaltaan U-kirjaimen muotoinen 4-kerroksinen asuintalo, jonka kantavien puurakenteiden päällä oli palokipsilevy. Alin kerros ei ollut asuinkäytössä. Seinät oli pinnoitettu palavalla aineella, vaneria. Palo levisi tuhoisaksi katto-ontelossa, jossa oli puiset kattotuolit. Ontelon yläpinta, rakennuksen katon laudoitus oli tehty vanerista.

Palossa kuoli 4 ihmistä ja loukkaantui 12.

Palo alkoi 3 kerroksen huoneiston makuuhuoneessa, jossa palo oli havaitsemishetkeen mennessä ehtinyt kehittyä lieskahdukseen asti. Kolmannesta kerroksesta palo levisi 4. kerrokseen ja katto-onteloon. Katto-ontelossa raportti luonnehtii palon edenneen hyvin nopeasti. Kun palo saatiin hallintaan noin 1 tunti 45 minuuttia sen alkamisen jälkeen, se oli ehtinyt vaurioittaa 117 asuntoa rakennuksen 142 asunnosta.

Raportissa ei ole mainittu rakennuksen mittoja, mutta edellä mainituista NFPA-raportin kuvista voidaan arvioida rakennuksen pituuden olleen noin 160–200 m. Koska lähes koko rakennus tuhoutui, on palon levinnyt lähes koko taloon, joten palon noin 100 minuutissa leviämä matka on ollut noin 100–200 m. Palon keskimääräiseksi nopeudeksi muunnettuna tämä vastaa noin 1–2 m/min etenemisnopeutta. Ontelossa palo lie-nee edennyt vielä suuremmalla nopeudella.

Vaikka palaneen rakennuksen paloturvallisuus ei vastaa Suomen vaatimustasoa, on sen antama tieto palavaa materiaalia sisältävässä ontelossa leviävän palon etenemisnopeudesta käyttökelpoinen tieto myös meillä.

Vastaavanlaisia palavaa ainetta sisältäneissä katto-onteloissa levinneitä vakavia tulipaloja on USA:ssa tapahtunut paljon muitakin kuin tässä esitettäväksi valittu esimerkki (ks. esim. NFPA-järjestön Internet-sivut). Näissä tapauksissa on toistuvana piirteenä, että palo on levinnyt ontelossa palokunnan tietämättä sen todellista leviämisenopeutta tai katto-ontelopalon voimakkuutta. Kun katon rakenteet ovat usein olleet varsin heppoisia, rakennuksen sisälle menneet palomiehet ovat menehtyneet jäätyään sortuneen katon alle.

Hoitokodin palo Kanadassa 1996

Alla esitetty, 7 kuolonuhria vaatineen tulipalon kuvaus, perustuu USA:n National Fire Protection Association (NFPA) Internet-sivuilla esitettyyn kuvaukseen.

Palo tapahtui St. Genevieve-nimisessä hoitokodissa, Quebecissa, joka oli kolmikerroksinen puurakenteinen rakennus. Tuhoisaksi palo kehittyi katto-ontelon levittämänä. Palokuormana ontelossa oli kevytrakenteisia puisia kattoristikkoita. Rakennuksessa ei ollut sprinklereitä.

Palo alkoi lauantaiyönä 31. elokuuta 1996, noin kello 00:30, kun rakennuksen toisen kerroksen huoneistossa pääsi tuli. Palo eteni alkuhuoneesta toisessa kerroksessa kolmanteen kerrokseen ikkunan kautta. Jossain vaiheessa myös katto syttyi ulostulevista liekeistä. Tuli myös poltti tiensä alkuperähuoneen katon läpi ja levisi 2. ja 3. kerroksen välipohjarakenteessa. Sieltä se levisi välipohjan yläpuoliseen onteloon väliseinien kautta. Paitsi ontelossa, palo levisi myös muualla, mm. auki kiilattujen palo-ovien kautta porraskäytävään. Asuinhuoneiden väliseinät eivät sulkeneet kokonaan katon yläpuolista onteloa.

Palon seurauksena yläkerrassa kuoli seitsemän asukasta.

Tikkurilan ammattioppilaitoksen kattopalo 1995

Lähteenä alla olevassa tekstissä on käytetty Latvalan (1995) artikkelia.

Palo tapahtui Tikkurilan ammattioppilaitoksessa 1995. Vesikattoon oli tehty peruskorjaus 1988, jolloin vanhan huopakatteen päälle oli liimattu kumibitumikermikate, joka oli 5-kerroksinen ja paikoitellen 20–50 mm paksu. Yläpohjan ontelossa ei ollut ilmaisimia.

Ensimmäisten yksiköiden saapuessa paikalle savua tulvi itäpäädyistä noin 20 m matkalta rakennuksen kattorakenteiden reunoista. Palon leviäminen yläpohjassa yritettiin ensimmäiseksi katkaista läpilyöntisuihkuputkia käyttäen noin 40 m kohdalta leviämissuuntaan

päin, joka tuntui tässä vaiheessa jopa ylimitoitettulta. Kuitenkin ensimmäisten putkien ollessa paikallaan huomattiin, että syttyvät palokaasut olivat levinneet jo lähes rakennuksen puoleen väliin ja liekit tulivat esiin rajoituslinjan ohi. Samalla palokaasujen väri oli muuttunut erittäin tummaksi, joka oli merkki siitä, että ne syttyisivät koko rakennuksen yläpohjan alueella. Rajoituslinjaa läpilyöntiputkin tehtäessä aloitettiin myös katon aukaiseminen raivaus- ja moottorisahojä käyttäen. Toimenpide osoittautui erittäin hankalaksi, sillä katon monikerroksinen bitumi-huopa-piki -yhdistelmä tukki hetkessä kaikki käytettävissä olevat työkalut ja kesti aikansa ennen kuin saatiin ensimmäiset kunnolliset aukot katteeseen, joista aloitettiin vaahdon syöttö yläpohjan onteloon.

Yli kolmen tunnin sammutustöiden jälkeen palo oli saatu hallintaan ja rajoitettua itäsiipeen, kunnes tuuli voimistui 12–15 m/s:ksi ja kytämällä palavat rakenteet, sekä huopakate ja bitumi syttyivät palamaan uudestaan avopalona koko katon alueella. Katon 20–50 mm paksu monikerroksinen kate oli erittäin vaikea raivata käsityönä ja katteen palosta syntyi sankka myrkyllinen savu, joka vaikeutti töitä. Artikkelissa esitetään, että riittävän järeälle laitteelle, jolla ko. tyyppisen katonpintakerros saataisiin nopeasti aukaistua, olisi tarvetta.

Kuorimon palo Raumalla 1995

Alla esitetty tapahtumakuvaus perustuu Joelssonin artikkeliin Pelastustieto-lehdessä (Joelsson 1995).

Palo tapahtui Raumalla Yhtyneiden Paperitehtaiden kuorimolla 16.8.1995. Kuorimolla oli suoritettu korjaustöitä, joissa oli jouduttu tekemään tulitöitä. Tulityöt oli lopetettu 18:50. Korjausmiehet olivat poistuneet paikalta klo. 21:15.

Korjauspaikalla havaittiin tulipalo muutama minuutti ennen puoltayötä. Laitoksen henkilökunta yritti alkusammutusta pikapalopostista, mutta ei onnistunut. Noin tunti myöhemmin kattorakenteita oli tulossa pieneltä alueelta. Paloa ryhdyttiin sammuttamaan raivaamalla läpilyöntisuihkuputkin. Sammutustyö eteni ja kattoa avattiin järjestelmällisesti. Kello 1:55 alkoi katon (katto A) alta purkautua enenevässä määrin palokaasuja. Kello 1:58 palokaasut syttyivät rakennuksen länsipäädyssä ja sammuttajien oli peräännyttävä pari metriä ylemmälle katolle (katto B) ja sähkötilan alemmalle katolle (katto C). Tuhannen neliön pikikatto (A) alkoi syttyä kiihtyvällä tahdilla. Rakennuksen suuret vahingot johtuivat katon hankalasta rakenteesta. Katkokset oli päällystetty mineriitillä, mutta sisuksen onttous mahdollisti palon leviämisen katkoksen läpi.

Rivitalopalo Tampereella 1993

Lähteenä tässä esityksessä on käytetty Männikön ja Ojasen tapahtumakuvausta (Männikkö & Ojanen 1993).

Palo tapahtui Tampereella rivitalossa 19.11.1993. Palo oli alkanut rivitalon kylmästä autosuojasta. Palokunnan saapuessa paikalla oli läheinen rivitalo syttynyt pädystään ja kattorakenteistaan, samoin kuin toisella puolella sijaitseva lämpökeskustalourakennuskin. Rivitalon yläpohjan ontelossa paloivat kattotuolit sekä ruodelaudoitus ja palo saatiin rajattua yhden asunnon ullakon alueelle.

Palon rajoittamiseen ratkaisevasti vaikutti se, että jo vuonna 1980 oli yläpohjan ontelo osastoitu asunnoittain. Mikäli rivitalon yläpohjan ontelo olisi toteutettu ajankohdalle tyypilliseen tapaan avonaiseksi, olisi varmuudella ontelo syttynyt koko rakennuksen pituudelta ja rakennus olisi tuhoutunut.

Rakenteellisena ratkaisuna oikein suoritettu rakennuksen yläpohjan ontelon osastointi säästi yksin tässä tapauksessa noin miljoona markkaa.

Kertopuutehtaan kattopalo Lohjalla 1993

Alla esitetty tulipalon kuvaus Jurvasen artikkeliin (Jurvanen 1993).

Palo tapahtui Lohjalla kertopuuta valmistavassa tehtaassa 8.8.1993. Viilun kuivatukseen käytetyssä koneessa, jonka käyttölämpötila on noin 200 °C, oli ilmeisesti syttynyt palo jo huomattavasti aikaisemmin. Palo pääsi leviämään kattorakenteisiin höyrynpöistoputkistosta. Syytä palon leviämiseen putkistosta katolle ei ole täysin saatu selvitettyä. Toisaalta mahdollisuutta palon leviämiseen putken kautta ei pitänyt olla, sillä samainen katto palo edellisen kerran samasta syystä toukokuussa 1987. Palon jälkeen kattorakennus uusittiin siten, että katto jaettiin määräysten mukaisesti 200 m²/B15-osiin. Höyryputket eristettiin villalla, sekä vesikaton läpivienti vastaavalla B15-osastoinnilla.

Katon aukaisu suoritettiin välittömästi höyryputkien ympärillä noin viiden metrin etäisyydeltä. Tällöin todettiin, että palamiskelpoiset savukaasut olivat levinneet laajemmalle alueella ja sytyttäneet kattorakenteita etäämmältä. Uusi rajauslinja päätettiin avata noin 20 m etäisyydelle edellisestä. Samanaikaisesti sammutusvoimien ja veden vähyydestä johtuen päätettiin vaahdotuksen aloittamisesta. Tällä saatiin hidastettua palon leviämistä erittäin pitkien rajoituslinjojen tekemisen ajaksi. Kun toinen rajoituslinja oli lähes valmis, alkoi katto sortua. Tällöin sammutusvoimat käskettiin kolmannelle rajoituslinjalle, jossa katto pääosin rajoittui vesikatteen läpi menevään palomuriin.

Teollisuusrakennuksen kattopalo Kotkassa 1993

Tämä palotapaus on kuvattu Kovasen ja Heinisen (1993) artikkelissa.

Palo tapahtui Kotkassa Wisapak Oy:n teollisuusrakennuksessa 16.2.1993. Polttoleikkauksesta aiheutunut kipinä oli lentänyt rikkoutuneen ikkunan peitteenä olleeseen insuliittilevyyn, missä palo oli alkanut kyteä. Noin 12 tunnin kuluttua palo eteni konekorjaamon seinää pitkin korjaamon 60 cm korkeaan yläpohjaan täyttäen pinta-alaltaan noin 400 m² suuruisen korjaamon savulla. Katon rajassa havaittiin pieni tulenloimitus sprinklerisuuttimen yläpuolella.

Palomiehet määrättiin tekemään rajoituslinjaa 20 m oletetusta palokohteesta etelään. Pian selvisi, että palo oli kattorakenteissa ja katolla olleet palomiehet alkoivat tehdä toista rajoituslinjaa 20 m palopesäkkeestä pohjoiseen. Konekorjaamon katon avaaminen osoittautui erittäin vaikeaksi ja aikaa vieväksi tehtäväksi. Katossa oli jopa 12 kerrosta kattohuopaa päällekkäin. Kattohuovan alla oli kaksi kerrosta insuliittilevyä ja sen alla 40 mm paksu lauta. Moottorileikkurit hyytyivät yksi toisensa jälkeen ja katon avaus oli tehtävä paljolti vain kirvestä käyttäen. Ensimmäinen pohjoinen rajoituslinja ei koskaan valmistunut, kun huomattiin, että on tehtävä toinen rajoituslinja 20 m päähän ensimmäisestä.

Konekorjaamon katon palaessa puhki palo uhkasi levitä 3 m ylempänä olevaan kuitulevytehdashallin kattoon. Kuitulevytehdashallin katto oli uusi yllätys palokunnalle. Katto oli korjattu noin kymmenen vuotta sitten, eikä rakenneratkaisusta ollut informoitu palonehkäisyosastoa. Kattohuovan alta paljastui 100 mm polyuretaanieriste ja sen alta 70 mm aaltopeltiprofiili ja sen alla oli 40 mm lauta teräskannakkeiden varassa. Katto oli paljon helpompi avata kuin konekorjaamon katto, mutta polyuretaani muodosti palaessaan myrkyllistä syaanivetyä. Pelastusmiehistöt joutuivat tekemään savutuuletusaukko kattoon. Kun ensimmäinen aukko valmistui, palokaasut syttyivät palamaan aukon kohdalla purkautuessaan siitä ulos.

Vanhoissa tehdasrakennuksissa kattorakenteet voivat aiheuttaa yllätyksiä, joten usein vaaditaan rohkeita päätöksiä rajoituslinjojen tekoon riittävän kauaksi. Molempien kattojen rakenteet oli toteutettu paloturvallisuuden kannalta vältettävällä tavalla.

Forssan urheilutalon palo 1992

Lähteenä alla olevassa tekstissä on käytetty Jokisen (1992) artikkelia.

Palo tapahtui Forssan urheilutalossa 23.7.1992. Palo sai alkunsa urheilutalon paljeoven lyhentämisestä. Työssä käytettiin sahaa, ja ovesa ei oletettu olevan kipinöiviä aineosia.

Paljeovella, joka ulottui lattiasta kattoon (7 m), oli hormimainen vaikutus palon kulkuun, minkä lisäksi oven sisällä oli runsaasti samaan aikaan suoritetusta lattian hionnasta syntynyttä hiontapölyä. Tämä ratkaisevasti edesauttoi palon leviämistä oven yläosaan, josta tulella oli vapaa pääsy palkin sivusta tyhjiin, mutta pölyiseen tilaan, jonka pinta-ala oli 1420 m².

Urheilusalin yläpohjan lämmöneristeet putosivat nopeasti alas, jolloin tuli pääsi puurakenteisen vesikaton pölyisiin onteloihin ja niistä vesikattoon. Palon sammuttamista vaikeutti oleellisesti vesikaton alkuperäisen kolminkertaisen huovan lisäksi myöhemmässä vaiheessa lisäksi asennettu kaksinkertainen kumibitumihoipa. Palon eteneminen oli räjähdysmäisen rajua. Tätä kuvanee parhaiten katon sortuminen noin 20 min kuluttua palon alkamisesta. Tapauksen perusteella on ilmeistä, että vesikaton ontelot olisi myös osastoitava riittävän pieniin osastoihin (artikkelin mukaan 200 m²).

Rivitalopalo Haukiputaalla 1992

Esitys perustuu Kärppän esittämään tapauskuvaukseen (Kärppä 1992).

Palo tapahtui Haukiputaalla rivitalossa 5.7.1992. Palon syttymistä ja leviämistä ei kirjoituksessa juurikaan kuvata, vaan viitataan palosta silloin tekeillä olevaan Oulun lääninhallituksen selvitykseen. Todetaan kuitenkin, että ensimmäisen yksikön tullessa paikalle purkautui rivitalon väli- ja yläpohjan ontelotilasta savua ja palokaasuja koko rakennuksen pituudelta ja myös liekkejä oli näkyvissä ontelotilasta. Seuraavan yksikön saapuessa paikalle 2 minuuttia myöhemmin oli väli- ja yläpohjan ontelotilassa näkyvissä liekkejä koko rakennuksen pituudelta ja palokaasuja sekä liekkejä näkyvissä useasta huoneistosta.

Palossa menehtyi 4 lasta.

Tiilitehtaan palo Ylivieskassa 1990

Lähteenä Vähäkankaan artikkeli Vähäkangas (1990).

Palo tapahtui Ylivieskassa Ylivieskan Tiili Oy:n tiilitehtaalla 18.8.1990. Alkuna palo sai – mitä ilmeisemmin – henkilökunnan ruokalan keittiössä kodinkoneesta. Palo eteni sokkeloisessa ja useaan kertaan peruskorjatussa rakennuksessa katon ja sähköjohtojen kautta melkoista vauhtia, kolme kertaa suuntaa vaihtaneen tuulen siivittämänä. Profiloitu pelti katossa toimi palotilanteessa hormin tavoin.

Tulipalo konepajan konttorirakennuksessa 1988

Lähde: Viljakainen & Gillberg 1989.

"Kattohuopatyöt aiheuttivat suuren palovahingon. Vahinko nro 88-300239." Palo tapahtui Savonlinnassa A. Ahlström Osakeyhtiön konepajan konttorirakennuksessa 7.7.1988. Tutkimuksissa selvisi, että palon syttymisen aikana konttorirakennuksen siipiosan katolla työskenteli katon vesieristystä korjaava liike. Työntekijä oli kiinnittämässä uutta päällystettä vanhan huopakaton päälle niin, että hän nestekaasuliekillä lämmitti vanhaa kattoa ja kateainetta. Katolla olevan sadevesikaivon kohdalta tuli pääsi todennäköisesti ullakon puolella oleviin purueristeisiin ja levisi räjähdyksenomaisesti koko rakennuksen alueella ullakkotiloissa.

Alaslasketun katon muodostamassa ontelotilassa levinnyt palo

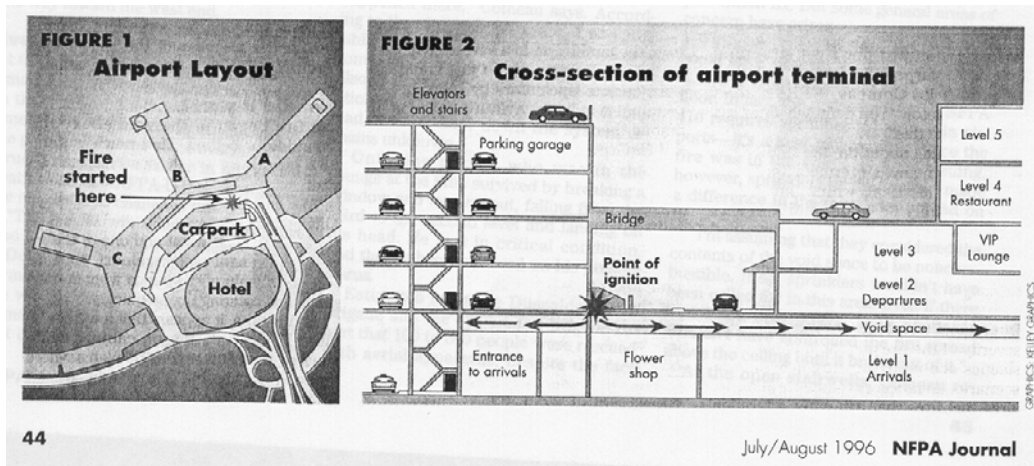
Hyvin dramaattinen esimerkki alaslasketun katon muodostamassa ontelotilassa levinneestä palosta on Düsseldorfin lentokenttäpalo. Tämä onnettomuus käsittää useita asennusonteloille tyypillisiä piirteitä, kuten palon alun pienuus, palon pitkään kestävä kehittyminen piilossa, tietyn kehitysvaiheen jälkeen tapahtuva tulen nopea leviäminen ja lopulta syntyneen tulipalon tuhoisuus. Tapaus osoittaa myös hyvin onteloon sijoitettujen palavien materiaalien potentiaalisen vaarallisuuden.

Düsseldorfin lentokentällä vuonna 1996 tapahtunut tulipalo on eräs viimeisten vuosikymmenien pahimpia ontelopaloja ja siksi sitä on käsitelty useissa artikkelissa. Tässä esityksessä on käytetty lähteenä Wolfen (1996) ja Müggen (1998) esityksiä.

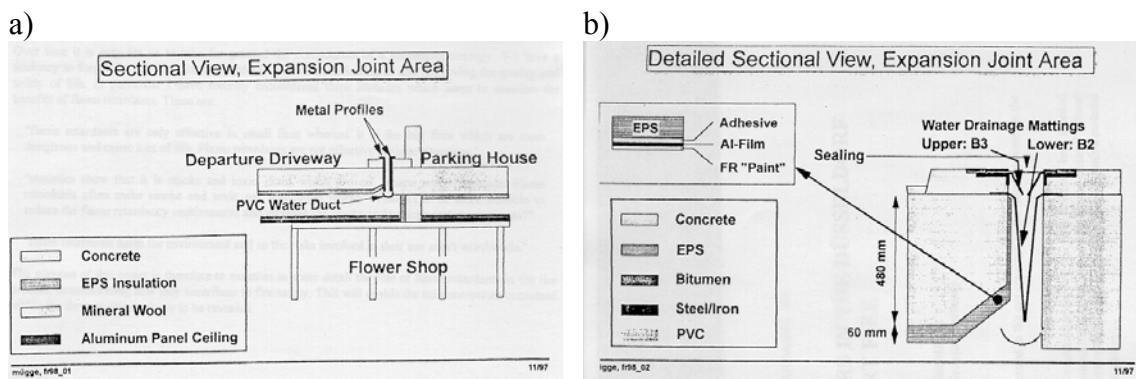
Palo tapahtui Düsseldorfin lentoasemalla 11.4.1996. Palo alkoi lentoaseman autojen paikoitusrakennuksesta, josta se levisi lentoaseman päärakennukseen tason 1 alaslasketun katon muodostamassa ontelossa (ks. kuva A5).

Lentoaseman päärakennus (Central Building) käsittää kolme lähtöterminaalisiipeä A, B ja C. Päärakennuksen pituus on 465 m ja leveys n. 50 m. Kuvasta A5 voidaan arvioida paikoitustalon ja lentoaseman päärakennuksen välisen matkan olleen noin 30 m.

Paloa levittäneen ontelotilan korkeus oli noin 500 mm. Sen katossa oli EPS-eriste ja sen lattiana oli alumiinipaneelikatto (ks. kuva A6).



Kuva A5. Vasemmalla yleiskuva Düsseldorfin lentoasemasta ja oikealla tarkempi esitys palon alkamispaikasta autojen paikoitusrakennuksessa. (Wolf 1996)



Kuva A6. a) Syttymiskohta ja siihen liittyvät materiaalit ja b) yksityiskohtaisempi kuva syttymiskohdasta. (Wolf 1996)

Tulen syttyminen sekä palon alkaminen ontelossa

Palon alkaminen johtui hitsauksen synnyttämistä kipinöistä ja sulaneen metallin pisaroista, jotka putosivat liikuntasauaman (expansion joint) kautta vedenpoistomatoille (water drainage matting) sytyttäen ne tuleen. Vedenpoistomattojen materiaalin paloluokitus DIN 4102-testissä oli B2; aine kumimaista, Müggen (1998) mukaan ehkä PP:a tai polybutyleeniä.

Ontelon yläpuolisissa rakenteissa syntynyt lämpö sulatti ensin EPS-eristeet ja sulanut EPS muodosti lammikon alumiinin päälle. Liima edesauttoi tulen leviämistä. Palaessaan sulava EPS alkoi putoilla ontelotilan lattialle. Aika ajoin palavia muovin riekaleita pääsi putoamaan mineraalivillan läpi kukkakaupan viereen lattialle: ensimmäinen havainto palosta saatiin juuri näistä palavista pisaroista (paikalla ollut taksinkuljettaja luuli niitä kipinöiksi). Savua ei näkynyt.

Alaslasketun katon muodostamassa ontelotilassa pääsi syntymään suuria määriä savua ja palokaasuja ilman, että sitä havaittiin. Onteloa ei oltu sprinklattu, koska se ei ollut kierto-/paluuilmanava.

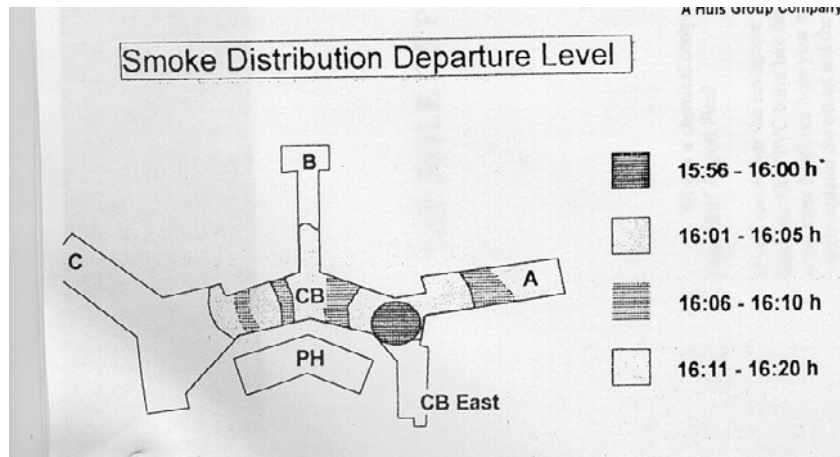
Palon kehittyminen ontelossa ja leviäminen muihin tiloihin

Ontelosta pudonneet palavat pisarat havaittiin kello 15.31. Havainto ilmoitettiin lentoaseman palokunnalle. Kello 15.45 havaittiin asiaa tutkimaan saapuneen palomiehen toimesta pistävää palavan kumin käryä. Pari minuuttia tämän jälkeen, kello 15.47, havaittiin ontelon lattian muodostaneessa alumiinisessa paneelikatossa noin 1 m²:n suuruinen, nopeasti kasvava hehkua alue.

Hehkuvan alueen havaitsemisen jälkeen osa katosta hehkuvasta alueesta putosi alas kello 15.47, minkä jälkeen halli pimenei mustasta savusta. Kello 15.50 ulkona hitsauspaikalla näkyi musta pilvi. Välillä 15.52–15.55 annettiin hälytys lentoaseman palokunnalle ja tieto kaupungin palokunnalle. Samaan aikaan, eli kello 15.52–15.55, havaittiin savua lentoaseman sisällä, A-terminaalin alkuosassa lentoaseman ulkoseinän ja Air Francen loungen¹³ välisellä alueella. Air Francen loungen ilmastointiaukoista alkoi tulla savua ja lopulta 8 asiakasta 9:stä kuoli tässä tilassa. Kello 15.56 annettiin käsikäyttöinen hälytys keskirakennuksesta (Central Building) ja automaattinen hälytys kellarin teknisten välineiden tiloista. Kello 15.58 tehtiin hälytys kaupungin palokunnalle ja henkilökunta sanoi alakerroksen (ontelokattoinen tila) "lieskahtaneen" (Wolfen artikkelin mukaan). Aikavälillä 16.01–16.20 savu levisi lentoaseman päärakennuksessa kuvassa A7 esitetyllä tavalla. Terminaalin C suunnalla savun eteneminen estyi, koska automaattinen palonsulkuportti sulkeutui. Kello 16.05 annettiin ensimmäinen tiedotus, että rakennuksesta pitää poistua. Samaan aikaan kaksi hissiä laskeutui palon alkamistasolle (level 1), ovet avautuivat, mutta eivät menneet kiinni, koska paksu savu esti suljinmekanismin toiminnan. Tällöin 7 ihmistä menehtyi. Kello 16.06 keskusrakennus ulkoa savun peitossa ja

¹³ Lounget olivat tehty house-in-house -periaatteella, eli niiden ulkoseinien ja lentoaseman ulkoseinän välillä oli tilaa, eli ontelo.

16.21 terminaalin A koko katto oli mustan savun peittämä samoin kuin puolet terminaalin B katosta. Kuva A7 esittää kaaviona palon leviämisen ajallista kulkua.



Kuva A7. Palon leviäminen. (Wolf 1996)

Palokunta teki ensimmäinen sammutushyökkäyksen (yhden ryhmän "squad" vahvuudella) n. kello 15.55. Kello 16.06–16.06 saatiin lisää lentoaseman palokunnan henkilöitä sekä kaupungin palokunta paikalle. Kello 16.28 hälytettiin paikalle lisää voimia. Lentoliikenne keskeytettiin ja lennonjohtotorni evakuoitiin kello 16.36. Palo saatiin hallintaan kello 19.20 ja se sammui kello 22.00.

Palossa kuoli yhteensä 17 henkilöä.

Ontelopalon leviämisen nopeudesta

Ontelopalon voidaan arvioida kasvaneen paikallisena palona noin kello 15.45:een saakka. Tämän jälkeen kello 15.47 havaittu ontelon pohjan hehkuminen viittaa ontelon lämpötilan saavuttaneen sellaisen lämpötilan, että suljetussa tilassa kehittyvä palo muuttuu paikallisesta lieskahtaneeksi, joka ontelotilassa vastaa palon nopean etenemisen alkamista (Hietaniemi 2002).

Savu havaittiin kulkeutuneen lentoasemarakennukseen välillä 15.52–15.55, joten savu oli kulkenut noin 30 m matkan 5–7 minuutissa, eli nopeudella 4–6 m/min. Koska henkilökunta ilmoitti ontelokatkoisen tilan tasolla 1 lieskahtaneen kello 15.58, voidaan ontelopalon liekkien arvioida levinneen lentoasemarakennukseen tähän aikaan, eli n. 11 min palon leviämisen alkamisen jälkeen. Liekit voidaan arvioida edenneen siis noin nopeudella 3 m/s.

Liitteen A lähdeluettelo

- Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Korhonen, T., Siiskonen, J. & Vaari, J. 2002. Ontelotilojen paloturvallisuus: Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 125 s. + liitt. 63 s. VTT Tiedotteita - Meddelanden -Research Notes 2128. ISBN 951-38-5953-3.
- Howell, J.R. 1982. A Catalog of Radiation Configuration Factors. USA: McGraw-Hill, Inc. 243 s. ISBN 0-07-030606-0.
- Joelsson, A. 1995. Tulityöt aiheuttivat 6 miljoonan vahingot kuorimossa Raumalla. Pelastustieto, 7/95, s. 8–9.
- Jokinen, E. 1992. Paljeoven lyhentäminen maksoi 15 miljoonaa. Palontorjunta 7/92, s. 8–9.
- Jurvanen, P. 1993. Kertopuutehtaan raju kattopalo. Pelastustieto, 7/93, s. 14–16.
- Kallioniemi, P. & Laamanen, R. 1995. Tuhoisasta ylipainekaton palosta selvittiin kesäseisokin aikana. Teollisuusvakuutus, 1/95, s. 18–23.
- Kovanen M. & Heininen, V.-M. 1993. Poikkeuksellisen hankalan kattopalon syynä tulitöistä singonnut kipinä. Pelastustieto, 2/93, s. 13–15.
- Kärppä, A. 1992. Rajusti levinnyt palo surmasi neljä lasta rivitaloturmassa. Palontorjunta, 7/92, s. 10–12.
- Latvala, A. 1995. Hankala ullakkopalo työllisti tuntikausia. Pelastustieto, 5/95, s. 8–12.
- Mügge, J. 1998. Role of Polymers in the Düsseldorf Airport Fire. Flame Retardants '98. 8th Conference Proceedings. February 3–4, 1998, London, England, Interscience Communications Ltd., London, England. Pp. 33–44.
- Männikkö, S. & Ojanen, O.-P. 1993. Aluepalo uhkasi Tampereella. Pelastustieto, 10/93, s. 10–11.
- NFPA. 1997. Apartment building fire: Bremerton, Washington; November 13, 1997. NFPA Fire Investigation Summary.
- Ohnemiller, T.J. 1991. Smoldering Combustion Propagation of Solid Wood. Teoksessa Fire Safety Science, Proceedings of the Third International Symposium. S. 565–574.

Quintiere, J.G. 1998. Fire Investigation: An Analysis of the Waldbaum Fire, Brooklyn, New York, August 3, 1978. Maryland Univ., College Park Fire Science and Technology, Vol. 17, No. Special Issue, 10–14, 1997.

Saari, R. 2001. Puinen rivitalo paloi korjauskelvottomaksi. Pelastustieto, 7/2001, s. 12–13.

Silmäri, J. 1994. Punkaharjun Finnforestilla 15 miljoonan tulityövahinko. Pelastustieto, 7/94, s. 10–11.

Viljakainen, S. & Gillberg, J. 1989. Omaisuusvahinkokatsaus. Teollisuusvakuutus 2/89, s. 20.

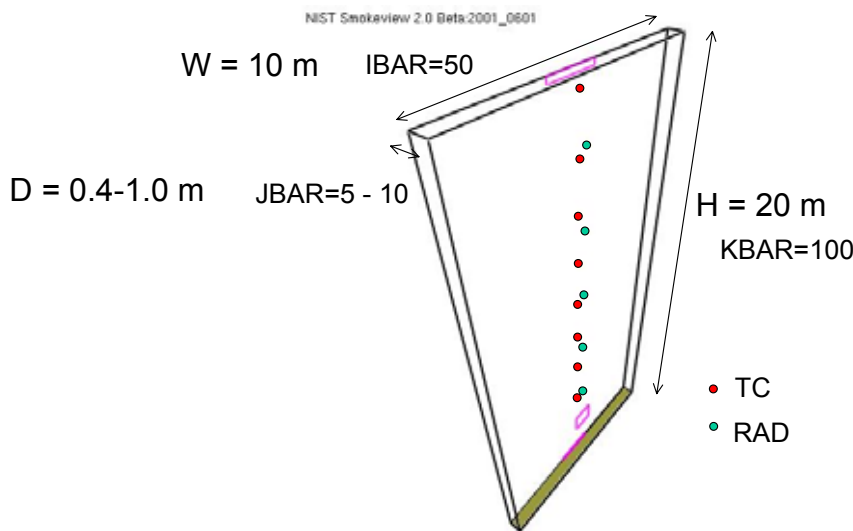
Vähäkangas, T. 1990. Miljoonavahingot tiilitehtaan palosta Ylivieskan Raudaskylällä. Palontorjunta, 7/90, s. 8–9.

Wolf, A. 1996. Seventeen Die in Dusseldorf Airport Terminal Fire. NFPA Journal, Vol. 90, No. 4, pp. 43–46. (July/August 1996)

Liite B: Laskennallinen tarkastelu savun leviämisestä kaksoislasijulkisivun ontelossa

Savun leviämisen tarkastelun paloskenaario

Savun leviämisen tarkastelussa paloskenaarioksi valittiin 2 MW:n palo onteloon johtavasta ikkunasta, jonka pinta-ala oli 1 m^2 . Valittu paloteho vastaa suunnilleen sitä osaa lieskahtaneen huoneistopalon palotehosta, joka vapautuu huoneeseen johtavan tuuletusaukon ulkopuolella. Laskenta-ajan säästämiseksi itse palohuonetta ei mallinnettu, vaan ikkunaa edusti laskuissa kaasupoltin. Tämän valinnan seurauksena liekki asetui hyvin lähelle sisemmän julkisivun pintaa, kun taas todellisessa tilanteessa palokaasuilla on vaakasuuntainen nopeuskomponentti tullessaan ikkunasta ulos. Savun leviämisen tutkimisen kannalta tällä ei arvioitu olevan merkitystä. Ikkunan paikan vaikutusta tutkittiin korkeuden funktiona (ylhäällä, keskellä ja alhaalla).



Kuva B1. Savun leviämisen mallintamisessa tarkasteltu kaksoislasijulkisivu. Sen korkeudeksi on oletettu $H = 20 \text{ m}$, leveydeksi $W = 10 \text{ m}$ ja syvyydeksi $D = 0.4 - 1.0 \text{ m}$. Suureet IBAR, JBAR ja KBAR ovat laskennassa käytetyn hilan ulottuvuudet, TC tarkoittaa julkisivun ilmatilassa olevaa lämpötilan mittausta ja RAD julkisivun pinnassa olevaa säteilyvuomittausta. Vaaleanpunaisella kehystetyt aukot ontelon ylä- ja alareunassa ovat tuuletusaukkoja, ja julkisivussa oleva aukko edustaa palohuoneeseen johtavaa (rikkoutunutta) ikkunaa.

Tutkittavaksi onteloksi valittiin kaksoislasijulkisivu, jonka leveys on 10 m ja korkeus 20 m (ks. kuva B1). Ontelon syvyydelle käytettiin arvoa 0,5 m. Ontelotilan reunojen

oletettiin olevan 10 mm paksua lasia, jonka lämmönjohtavuudelle κ_l ja lämpötilanjohtavuudelle α_l käytettiin lasille tyypillisiä arvoja $0.8 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

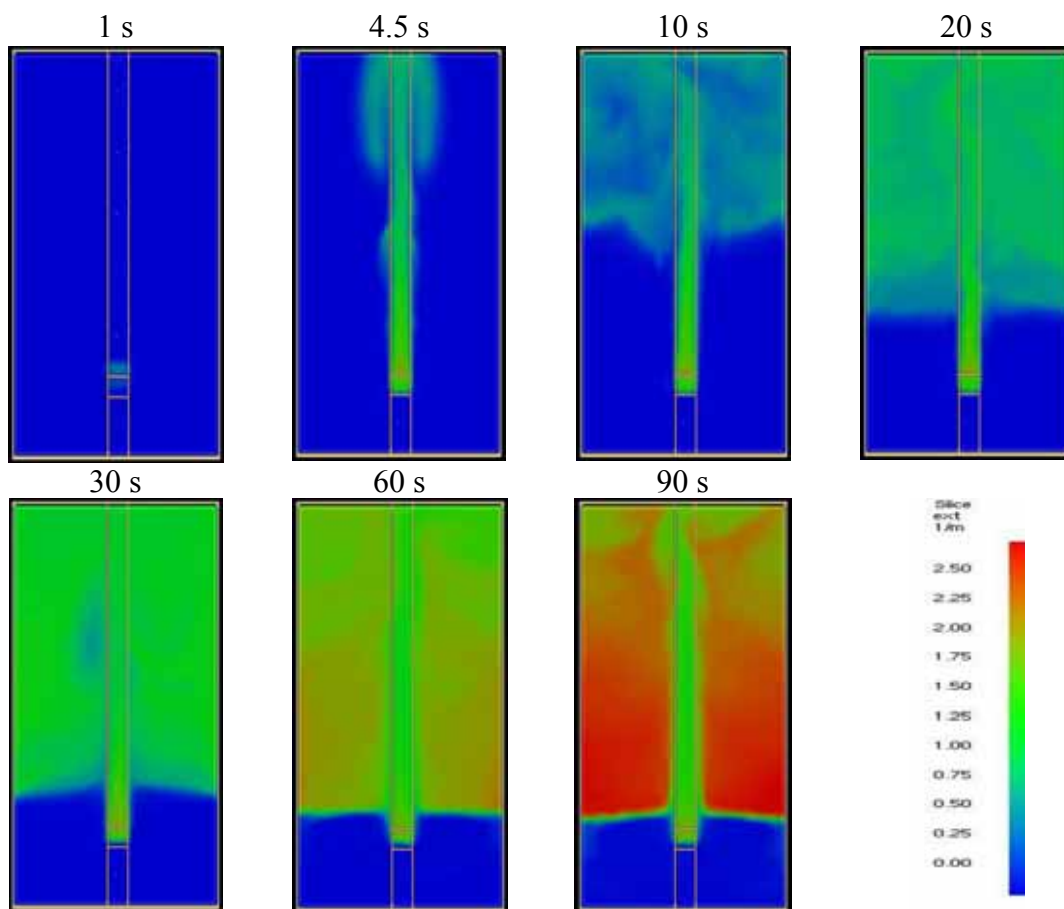
Mallinnuksessa tutkittiin ontelon ylä- ja alaosassa olevien tuuletusaukkojen vaikutusta, pyrkien löytämään riippuvuus tuuletusaukkojen pinta-alojen sekä savun leviämisen välille. Simuloinnissa käytetyt eri tekijöiden variaatiot on esitetty taulukossa B1. Savun leviämistä tutkittaessa ei mallissa otettu huomioon kaksoislasijulkisivuissa yleensä olevia huolto- yms. tarkoituksiin käytettyjä tasoja. Syy tähän on se, että nämä tasot ovat tavallisesti metalliritilöitä, joissa aukkojen pinta-alan suhde koko pinta-alaan on merkittävä, selvästi yli 50 %. Tanskalaisen tutkimuksen (Avlund 1994) näin suuren aukkopinta-alan omaava elin ei juurikaan vaikuta savun leviämiseen.

Taulukko B1. Savun leviämisen tutkimiseksi suoritettujen laskujen ja niissä muutellut parametrit. Oikeanpuoleisin sarake ilmaisee laskennan tuloksena saadun savupatjan alareunan korkeuden.

Laskenta- ajo	Ilma- tila (m)	Ikkunan paikka korkeus- suunnassa (m)	Ala-aukko (lev × kork, m)	Yläaukko (lev × kork, m)	Savupatjan alareunan korkeus (m)
1	0,5	3,5	10 × 0,2	10 × 0,2	n. 19,7 m
2	0,5	3,5	2 × 0,2	2 × 0,2	7 m
3	0,5	3,5	0,8 × 0,2	0,8 × 0,2	5 m
4	0,5	3,5	10 × 0,2	0,8 × 0,2	5 m
5	0,5	3,5	10 × 0,2	kiinni	0 m
6	0,5	10,0	0,8 × 0,2	0,8 × 0,2	0 m
7	0,5	16,5	0,8 × 0,2	0,8 × 0,2	16 m
8	0,5	10,0	2 × 0,2	2 × 0,2	13 m
9	0,8	3,5	0,8 × 0,2	0,8 × 0,2	5 m

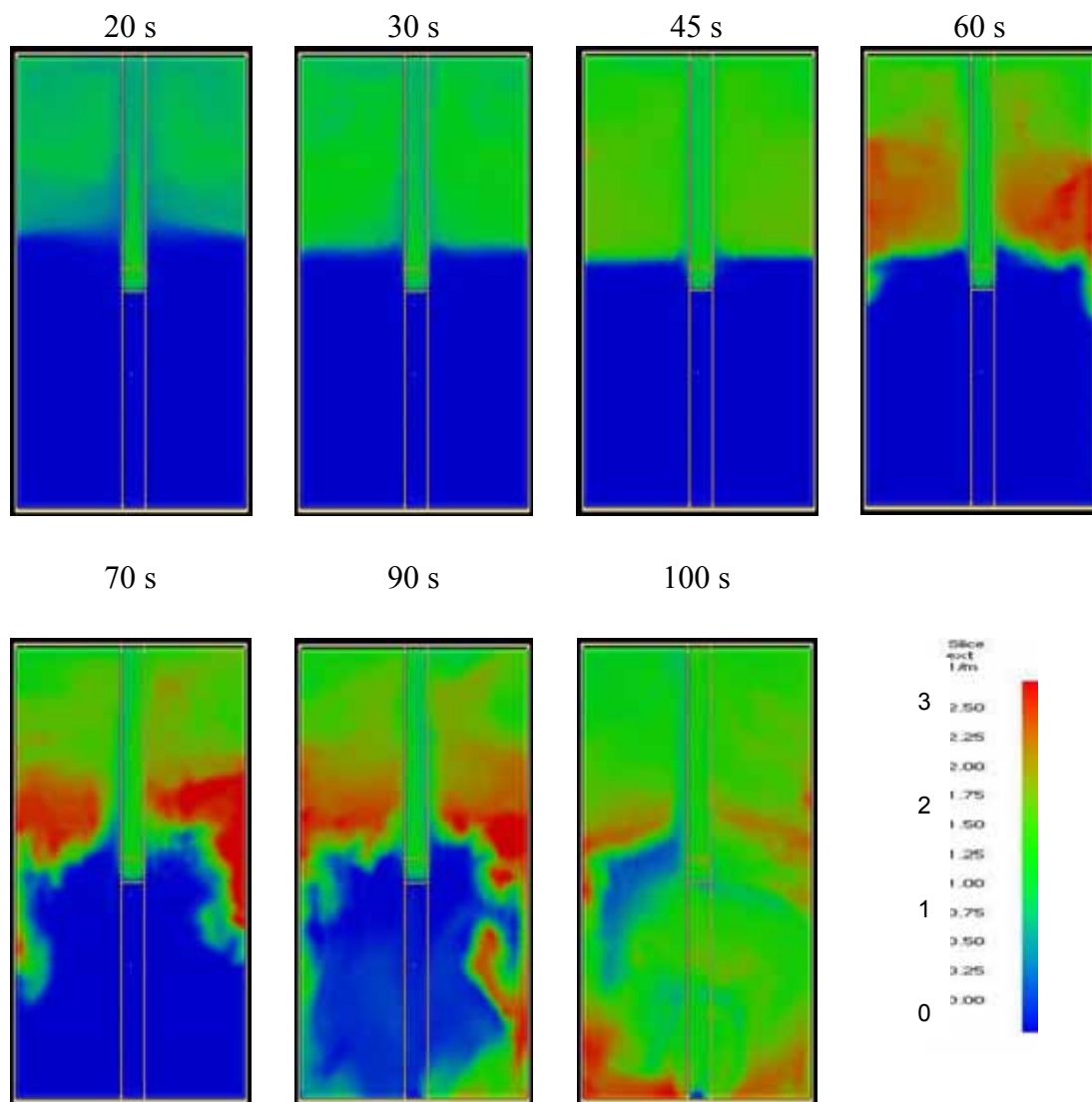
Savun leviämisen mallinnuksen tulokset

Kuvassa B2 esitetty kuvasarja havainnollistaa savupatjan muodostumista, kun palohuoneen ikkuna on onteloin alaosassa. Tarkastelussa tapauksessa savunpoisto ei ole riittävän tehokas pitääkseen tilan savuttomana ja tila täyttyy savulla. Täyttymistapahtuma on varsin nopea, kuten kuvasarja osoittaa. Nouseva savupatsas saavuttaa ontelon katon n. 4.5 s sen jälkeen, kun palo pääsee ryöstäytymään ontelotilaan. Nousunopeus on siis noin 4 m/s. Katon saavutettuaan savu kiertyy reunoja myöten alas. Yhtenäinen savupatja muodostuu noin hetkellä 20 s. Puoli minuuttia palon pääsemisestä ontelotilaan savukerros on saavuttanut lähes lopullisen korkeutensa (alareuna hieman ikkunan yläpuolella). Tämän jälkeen savu paksunee siten, että tila on suurelta osin läpinäkymätön noin 1 minuutin kohdalla (keskimääräinen näkyvyys pienempi kuin ontelon syvyys). Tämän jälkeen savun tiheys lisääntyy vähitellen edelleen. Ikkunan alapuoleinen tila säilyy kuitenkin täysin kirkkaana.



Kuva B2. Esimerkki savupatjan muodostumisesta kaksoislasijulkisivun palossa tilanteessa, jossa palohuoneen ikkuna sijaitsee alhaalla ontelossa korkeudella 3.5 m (ontelon korkeus on 20 m) ja ontelon yläosasta tapahtuva Savunpoisto ei ole riittävän tehokas pitääkseen tilan savuttomana ja savukerros tasaantuu lopulta hieman ikkunan yläpuolelle. Ajat on ilmaistu kuvien päällä ja oikealla alhaalla oleva värikoodi ilmaisee savun optisen tiheyden arvon.

Kuvassa B3 on esitetty kuvan B2 tarkastelua vastaava simulointi, jossa ainoana erona on se, että nyt palohuoneen ikkuna sijaitsee ylempänä (10 m tasolla) kuin kuvan B2 tapauksessa. Savun käyttäytyminen on kuitenkin selvästi erilaista: vaikka ontelon yläreunassa on samanlainen savunpoistoaukko kuin edellä tarkastelussa tilanteessa, täyttyy ontelo nyt kokonaan savulla: Noin 45 s asti tilanne kehittyy samaan tapaan kuin kuvan B2 esittämässä tapauksessa: savukerroksen alareuna näyttää tasaantuvan hieman ikkunan yläpuolelle. Tämä tilanne ei kuitenkaan ole stabiili, vaan savua alkaa vähitellen siirtyä alaspäin ontelon reunoilla (ks. 60 s hetki). Alettuaan tämä savun valuminen jatkuu kohtalaisen nopeasti siten, että jo 120 s kohdalla ontelo on käytännöllisesti katsoen täytynyt kokonaan savulla.



*Kuva B3. Esimerkki savupatjan muodostumisesta kaksoislasijulkisivun palossa: las-
kenta-ajossa 6 (ikkunan korkeus 10 m) tapahtuva savukerroksen kehittyminen (ajat
ilmaistu kuvien päällä; oikealla alhaalla oleva värikoodi ilmaisee savun optinen ar-
von). Savupatja laskeutuu palohuoneen tason alapuolelle täyttäen lopulta koko onte-
lon.*

Tarkastelemalla ontelon kaasun lämpötiloja havaitaan, että ilmiö johtuu kaasujen kyl-
menemisestä ontelon reunalla, jolloin ne painavampina lähtevät valumaan alaspäin. Il-
miö näyttää olevan herkkä palohuoneen korkeudelle: myös kun ikkunan korkeus oli
16.5 m, niin savukerros laskeutui ikkunan alapuolella, mutta vain vähän jääden tasolle
16 m, eli koko ontelo ei täytynyt savulla.

Edellä kuvattu ilmiö muistuttaa Lahdessa tapahtuneen kerrostalopalon tilannetta, jossa eräs ongelmista oli rappukäytävän täytyminen kokonaan savulla, vaikka palohuoneisto ei ollutkaan talon alakerroksissa.

Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka, Vaari, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Korhonen, Timo, Kouhia, Ilpo, Siiskonen, Jaakko & Weckman, Henry			
Nimeke Ontelotilojen paloturvallisuus Ontelopalojen ominaispiirteet sekä palojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen ja sammuttaminen			
Tiivistelmä Rakennusten suljetut ja usein piilossa olevat tilat, ontelotilat, muodostavat merkittävän tulipalovaaran. Tässä hankkeessa on tutkittu ontelotilojen paloja sekä niiden torjuntaa rakenteellisin keinoin ja sammuttamista. Hanke toteutettiin kolmessa osassa. Ensimmäisessä osassa luotiin perusteet ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiselle tunnistamalla ja kuvaamalla ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymisen ja leviämisen suhteen. Tutkimuksessa tehtiin kirjallisuus- ja tilastotutkimus sekä tutkittiin ontelopalvoja kokeellisesti sekä mallinnuksen keinoin. Hankkeen toisessa osassa tutkittiin ontelopalojen leviämisen katkaisemista liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Osa tuloksista esitetään konkreettisina rakenteina ja osa suunnittelijoiden ja tuotekehittelijöiden tarpeita varten laadittuina rakenneratkaisujen perusteina, toiminnallisina edellytyksinä ja periaatteina sekä muina suuntaviivoina. Tutkimus käsitti viisi ongelma-aluetta: yläpohjan ontelon tulipalot ja räystäään vaikutus niihin, palon leviäminen julkisivun tuuletusraoissa, alaslaskettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden ontelotilojen palot, kaksoislasijulkisivurakenteeseen liittyvät palovaarat ja teollisuushallien tuuletettujen kattojen ontelopalot. Paloteknistä toimintaa tarkastellaan yhdessä kosteusteknisen toimivuuden kanssa. Hankekokonaisuuden kolmas osa käsittelee aktiivisia toimenpiteitä ontelopalon sammuttamiseksi tai rajaamiseksi. Se toteutettiin laskennallisena tutkimuksena, jossa työkaluna käytettiin FDS-palonsimulointiohjelmaa. Tarkastelukohteet ovat palo harjakattoisen rakennuksen ullakotilassa ja teollisuushallin tuuletetussa kattorakenteessa. Tutkitut sammutusmenetelmät ovat luonnollinen tai koneellinen tuuletus, sammutus sprinklerein tai pistosuihkuin sekä sammutuksen ja koneellisen tuuletuksen yhdistäminen. Keskeisin tulos on, että palavaan onteloon on ensisijaisesti pyrittävä johtamaan sammutusvettä ja ontelo on vasta toissijaisesti pyrittävä raivaamaan auki, mikä poikkeaa palokuntien tavanomaisesti noudattamasta taktiikasta, jossa ontelon pyritään ensin avaamaan sammutusveden kohdistamiseksi palopesäkkeisiin.			
Avainsanat fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, extinguishing, building voids, fire stop, fire simulation, fire spread			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6474-X (nid.) 951-38-6475-8 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinumero	
Julkaisuaika Kesäkuu 2004	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 74 s. + liitt. 24 s.	Hinta B
Projektin nimi Ontelotilojen paloturvallisuus		Toimeksiantaja(t) If Vahinkovakuutusyhtiö Oy, Palosuojelurahasto, Palosuojelun edistämissäätiön erikoisrahasto, Palotutkimusraati ry, Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto, Wood Focus Oy, ympäristöministeriö	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Hietaniemi, Jukka, Vaari, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Korhonen, Timo, Kouhia, Ilpo, Siiskonen, Jaakko & Weckman, Henry			
Title Fire safety of cavity spaces Characteristics of fires in building voids, their structural prevention and extinguishing			
Abstract Hidden cavity spaces and voids in buildings constitute a significant fire hazard. In this work, we have investigated characteristics of fires in such spaces as well as their structural containment and extinguishing. The project was carried out in three parts. The first project laid basis to cavity fire protection and fire fighting by identifying and quantifying the critical characteristics of fires in building void spaces with respect to fire development and spread. The research work comprised of literature and statistics review as well as an experimental and modelling study of fires in cavity spaces. The second project considered prevention of fire spread in building void spaces and cavities using structural means to stop or retard propagation of flames, heat and smoke. Some results are presented as practical structural solutions and some are presented as principles, functional basis and guidelines for use in further development by designers and R&D engineers in building industry. The research focuses on five topics: fires in roof cavities and the role of eaves in the fire spread, fire spread in façade air vent slots, fires in cavities above suspended ceilings and below raised floor, fire hazards associated with double skin glass facades and fires in ventilation cavities in roofs of industrial halls. Fire performance of the constructions is considered in relation to the building physical performance, especially moisture aspects. The third project studied the use of active fire fighting methods to control or extinguish fires in building roof structures. The methods investigated include natural and forced smoke ventilation, the use of fire-fighting water, and the combination of ventilation and water suppression. The work was carried out as a computational study using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software. The fire scenarios studied were a ventilated roof structure of an industrial facility and an attic of a residential building. The primary result is that it is important first to apply fire fighting water into the void to effectively suppress the fire, and only thereafter create openings for direct access to the burning void.			
Keywords fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, extinguishing, building voids, fire stop, fire simulation, fire spread			
Activity unit VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6474-X (soft back ed.) 951-38-6475-8 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)			Project number
Date June 2004	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 74 p. + app. 24 p.	Price B
Name of project Fire safety of cavity spaces		Commissioned by If Vahinkovakuutusyhtiö Oy, Palosuojelurahasto, Palosuojelun edistämissektiön erikoisrahasto, Palotutkimusraati ry, Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto, Wood Focus Oy, ympäristöministeriö	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Julkaisussa esitetään yhteenveto VTT:n tekemän kolmiosaisen ontelotilojen paloturvallisuuden tutkimuksen tuloksista. Tutkimuksessa selvitettiin ontelotilojen palojen ominaispiirteitä sekä niiden torjuntaa rakenteellisin keinoin ja sammuttamista. Ensimmäisen osan tulokset käsittävät perusteellisen kirjallisuuteen, tilastoihin, palokokeisiin ja mallinnustutkimukseen perustuvan selvityksen siitä, mikä tekee ontelotilat palovaarallisiksi ja miten ontelopalot kehittyvät ja leviävät. Toisessa osassa tutkittiin ontelopalojen leviämisen katkaisemista liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Työssä kehitettiin käytännön rakenneratkaisuja sekä laadittiin rakenneratkaisujen perusteita, toiminnallisia edellytyksiä, periaatteita ja suuntaviivoja suunnittelijoiden ja tuotekehittäjien tarpeita varten. Kolmas osa on laskennallinen tutkimus aktiivisista toimenpiteistä ontelopalon sammuttamiseksi tai rajaamiseksi harjakattoisen rakennuksen ullakkotilassa ja teollisuushallin tuuletetussa kattorakenteessa. Tutkitut sammutusmenetelmät ovat luonnollinen tai koneellinen tuuletus, sammutus sprinklerein tai pistosuihkuin sekä sammutuksen ja koneellisen tuuletuksen yhdistäminen.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374
