



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

## Ontelotilojen paloturvallisuus

| Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen



# **Ontelotilojen paloturvallisuus Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen**

Jukka Hietaniemi, Tuula Hakkarainen, Jaakko Huhta,  
Ulla-Maija Jumppanen, Ilpo Kouhia, Jukka Vaari ja Henry Weckman

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6156-2 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6157-0 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2003

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

Toimitus Leena Ukskoski

Edita Prima Oy, Helsinki 2003

Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Kouhia, Ilpo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen [Fire safety of cavity spaces. Prevention of fire spread in building voids]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2202. 168 s. + liitt. 52 s.

**Avainsanat** fire safety, structural fire prevention, fire spread, cavity spaces, building voids, eaves, attics, façade, air vent slot, suspended ceilings, double skin façades, fire stop, roofs, ceilings, fire simulation

## Tiivistelmä

Julkaisussa käsitellään ontelopalojen leviämisen katkaisemista erilaisten liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Lisäksi esitetään myös joitain muita keinoja rajoittaa ontelopalojen kehittymistä ja leviämistä. Tutkimuksessa käydetään lähestymistapaa, jossa perustana ovat tilaa uhkaava palo ja sen mahdolliset seuraamukset. Tältä osin 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 rakenneratkaisujen perusteita, toiminnallisia edellytyksiä ja periaatteita. Joitain ongelmia koskien tulokset esitetään ehdotuksena suuntaviivoiksi aihetta koskevia keskusteluja ja jatkokehitystyötä varten.

Tutkimuksessa keskitytään viiteen ongelma-alueeseen: yläpohjan ontelon tulipalot ja räystäään vaikutus niihin, palon leviäminen julkisivun tuuletusraoissa, alaslaskettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien ontelotilojen palot, kaksoislasi-julkisivurakenteeseen mahdollisesti liittyvät palovaarat ja teollisuushallien tuuletettujen kattojen ontelopalot. Paloteknistä toimintaa tarkastellaan yhdessä kosteusteknisen toimivuuden kanssa, koska ontelojen paloturvallisen rakentamisen perusongelma on juuri palo- ja kosteusteknisten vaatimusten yhtäaikainen toteuttaminen.

Laajimmin käsitelty aihepiiri on yläpohjan onteloiden ja räystäiden muodostama ongelmakokonaisuus. Sen tutkimuksessa pääpaino on annettu rivitalojen osastoinnin ongelmille sekä niiden ja muiden pientalojen räystäiden kehittämiseksi paloturvallisemmaksi. Yläpohjan ontelon osastointia tutkittiin täyden mittakaavan rakenteilla tehdyllä uunikokeella. Sen tulosten perusteella esitetään johtopäätöksiä ja suosituksia paloteknisesti toimivista rakenteellisista ratkaisuista (osastoiva seinä, sen vesikattoliittymä ja luukku sekä palon mahdollinen kiertäminen räystäään kautta). Yläpohjaan etenevien palojen vähentämiseksi kehitettiin lähinnä rivitaloihin ja muihin pientaloihin tarkoitettu ulkopuolista palon etenemistä tietyn ajan, 10–15 minuuttia, pidättävä räystäästyyppi.

Myös muiden kohteiden yläpohjan ontelopalojen rakenteellista palontorjuntaa käsitellään, esimerkkinä 3–4-kerroksiset P2-luokan rakennukset.

Julkisivujen tuuletusraoissa leviävän tulipalon ongelmaan liittyen tutkittiin kokeellisesti kahden erityyppisen palokatkoratkaisun toimintaa sekä kerättiin yhteen ja analysoitiin aiempien VTT:llä tehtyjen tutkimusten tuloksia. Tutkimus keskittyy tapaukseen, jossa julkisivu on palavaa ainetta. Tulokset luovat perustan sille, miten palokatkoilla suojatun seinän tulee toimia, jotta sitä voidaan pitää riittävän hyvin palon etenemistä estävänä, sekä tuovat esille kaksi ratkaisua perustaksi käytännön toteutuksille.

Alaslaskettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien ontelotilojen palovaaroista keskitytään kaapelipalokuorman muodostamaan uhkaan. Työssä tarkastellaan tätä uhkaa ja sen torjuntaa rakenteellisin keinoin: tuloksena esitetään suositus näiden tilojen osiin jakamiselle sekä joitain rakenteellisia keinoja niiden osiin jakamiseen.

Kaksoislasijulkisivuissa sisemmän ja ulomman lasikuoren väliin syntyvän ontelon oleellisin palovaara on se, että ontelo edistää palon leviämistä palotilasta muihin tiloihin. Tätä vaaraa punnitaan ottaen huomioon se, että kaksoislasijulkisivulla varustetut rakennukset on yleensä suojattu sprinklerilaitteistoilla, mikä voimakkaasti vähentää em. uhkakuvan todennäköisyyttä. Tuloksena esitetään julkisivun ontelon syvyyden mitoitussuhteita, jota noudattaen palon leviämisen vaaraa em. kaltaisessa uhkakuvassa voidaan merkittävästi pienentää, sekä tarkastellaan kaksoislasijulkisivujen osastointiratkaisuja ja niihin liittyviä ongelmia.

Teollisuushallien tuuletetuissa kattorakenteissa leviävien palojen katkaisemista tarkastellaan lähtökohtana pienten alkupalojen aiheuttamien suhteettoman suurten omaisuusvahinkojen välttäminen. Tuloksena esitetään arvio tuuletun peltikattoratkaisun osiin jakamisen taloudellisesta kannattavuudesta ja tarkastellaan osiin jakamiseen käytettäviä rakenteita. Myös bitumikermikaton osiin jakamista tarkastellaan. Lopulta esitetään yleisluonteinen arvio tuulettuvien teollisuushallien osiin jakamisesta ottaen huomioon myös muut paloturvallisuustavoitteet, etenkin palokunnan turvallisen toiminnan takaaminen.

Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Kouhia, Ilpo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen [Fire safety of cavity spaces. Prevention of fire spread in building voids]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2202. 168 p. + app. 52 p.

**Keywords** fire safety, structural fire prevention, fire spread, cavity spaces, building voids, eaves, attics, façade, air vent slot, suspended ceilings, double skin façades, fire stop, roofs, ceilings, fire simulation

## Abstract

This report considers 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 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.

Fire problems associated with roof cavities and eaves are given an extensive examination. The focus of this study is laid on the compartmentation of roof cavities in row houses and design of their eaves to retard fire spread via them. A furnace test was carried out using full-scale constructions modelling a fire in a row house roof cavity and the role of eaves in the potential fire spread. Conclusions and recommendations concerning the compartment barrier, its openings and joints as well as the prevention of fire spread via the eaves are presented on the basis on the results. A specific eaves construction intended mainly for use in row houses and detached or semi-detached houses was developed to delay external fire spread via the eaves to the roof cavity. Also the questions associated with passive fire protection in wood-framed multi-storey houses are considered.

Prevention of fire spread in façade ventilation cavities is studied experimentally and through a summarising analysis of the results of fire experiments on facade fire spread carried out in earlier VTT research. The study deals with the case of combustible cladding materials. The results lay basis for the required performance of the fire stopping in the façade so that it can be regarded to prohibit fire spread "sufficiently effectively" as required in the Finnish National Building Regulations as well as present two design options for practical solutions.

In the case of prevention of fire spread in cavities made up by suspended ceilings and raised floors, the emphasis is on the fire hazards caused by electric cables installed in these void spaces. The results comprise a proposal for dimensions of subdivisions of these cavities and a presentation of constructions suitable for the subdivision.

The principal fire hazard associated with cavities between the inner and outer glass skin in double skin façades (DSF) is the increased danger of fire spread to upper rooms via the façade. This hazard is examined in the light of the fact that in Finland virtually all buildings equipped with DSF systems are sprinklered which considerably reduces the probability of the hazard. The results comprise design guidance enabling to diminish the fire spread hazard considerably as well as presentation of different solutions for compartmentation of the façade with the potential problems associated with these solutions.

The problem of fire spread in ventilation cavities in roofs of industrial halls is considered from the point of view of preventing small initial fires from becoming disproportionately large and devastating. As a result, an assessment of the economic balance between the costs of subdivision of ventilated metal-sheeted roofs with fire stops and the achievable savings is presented. Also the case of bitumen roofing is addressed. The presentation is concluded by general considerations on the aspect effecting the subdivision of ventilation cavities in roofs of industrial halls.



# Alkusanat

Rakennusten ontelotilat muodostavat merkittävän tulipalovaaran, koska niissä palo voi päästä leviämään huomaamatta ja nopeasti laajalle alueelle. Niiden paloturvallisuutta voidaan lisätä muuttamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi ja parantamalla ontelopalojen sammutusmahdollisuuksia. Tässä työssä on selvitetty sitä, miten ontelotiloissa etenevien palojen leviämistä voidaan estää tai hillitä käyttämällä paloa katkovia asennuksia.

Tämä julkaisu on hankkeen *Ontelotilojen paloturvallisuus – Ontelotilojen etenemisen katkaiseminen* loppuraportti. Hanke on toinen osa hankekokonaisuudesta *Ontelotilojen paloturvallisuus*. Sen ensimmäinen osa, *Ontelotilojen paloturvallisuus – Ontelotilojen ominaispiirteet*, tehtiin loppuun vuonna 2001. Ontelotilojen sammuttamista tarkastellaan hankekokonaisuuden kolmannessa hankkeessa *Ontelotilojen paloturvallisuus – Ontelotilojen palojen sammuttaminen*.

Hankkeen ovat rahoittaneet Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati (ml. Palosuojelun edistämissäätien erikoisrahasto sekä Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto), ympäristöministeriö, Wood Focus Oy, If Vahinkovakuutusyhtiö Oy ja VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Hankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet seuraavat rahoittajien sekä pelastustoimen ja rakennusvalvonnan edustajat: 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 Olando (SM), 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 Palokatkomiehiä heidän panoksestaan kokeiden suunnitteluun ja toteutukseen.

Kari Helminen Insinööri-toimisto 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. Suuri kiitos heille 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 kiitämme monista kaksoislasijulkisivuja koskevista kirjallisesti ja suullisesti annetuista tiedoista.

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

Kiitämme myös VTT:n tutkijoita Djebar Baroudi, Simo Hostikka, Timo Korhonen, Tuuli Oksanen, Mikael Salonvaara ja Kati Tillander heidän avustaan työn eri vaiheissa. Tutkimusavustajat Timo Jyry, Risto Rahikainen, Seppo Ruukonen, 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.....	13
2. Työn lähtökohta, tutkimuskohteet, tarkastellut uhat ja niitä koskevat säädökset.....	16
2.1 Lähtökohta ja tutkimuskohteet.....	16
2.2 Ontelopalojen etenemisen estämisen yleiset keinot.....	18
2.2.1 Palon alkaminen ontelossa.....	19
2.2.2 Palon kehittyminen ontelossa.....	20
2.2.3 Palon murtautuminen ulos ontelosta.....	21
3. Räystäät ja yläpohjan ontelot.....	24
3.1 Taustaa.....	26
3.1.1 Yläpohjan onteloiden ja ullakoiden paloihin liittyviä tilastotietoja.....	26
3.1.2 Puukerrostalojen yläpohjan onteloiden palovaaroista.....	28
3.2 Yläpohjan onteloon räystään kautta leviävä palo.....	29
3.2.1 Palon etenemistä hidastavan räystäsmallin kehitystyö: rivitalot ja muut pientalot.....	30
3.2.2 Puukerrostalojen räystäät.....	34
3.3 Yläpohjan ontelon osastoinnin palonkesto.....	38
3.3.1 Osastoinnin toiminnan palokoe VTT:n kuutiouunilla.....	39
3.3.1.1 Koejärjestely.....	39
3.3.1.2 Palokankaalla toteutettu osastointi.....	42
3.3.1.3 Luukku.....	46
3.3.1.4 Osastoivan seinän ja vesikaton liitos.....	54
3.3.1.5 Räystään kautta kiertämällä tapahtuvan palon leviämisen katkaiseminen.....	56
3.3.1.6 Vesikaton toiminta kokeen aikana.....	62
3.3.1.7 Yhteenveto ja johtopäätökset kokeen havainnoista ja tuloksista.....	63
3.3.2 Räystään ja yläpohjan ontelon/ullakon erityisratkaisuihin perustuvia palon katkaisemiskatkaisuja.....	64
3.3.2.1 Räystään harvalaudoitus kattoristikon paarteen päällä.....	64
3.3.2.2 Tuulettumaton yläpohja/ullakko.....	65
3.4 Yläpohjan onteloiden osiin jakamisesta.....	65

4.	Julkisivun tuuletusraot .....	68
4.1	Aiemmissä tutkimuksissa saatuja tuloksia tuuletusraossa leviävän palon katkaisemisesta: ulkoinen syttyminen .....	70
4.1.1	Erityyppisiä palokatkoja ja tuloksia niiden toiminnasta .....	70
4.1.2	Tuuletusraon palokattojen toimintaa koskevia johtopäätöksiä .....	72
4.2	Hankkeen aikana tehdyt kokeet julkisivun tuuletusraossa etenevän palon leviämisen estämisestä .....	74
4.2.1	Koejärjestelyt .....	75
4.2.1.1	Palamaton julkisivu: reiällisen teräspalokaton virtaus- ja lämpötekniinen toiminta.....	76
4.2.1.2	Palava julkisivu: ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviämisen estäminen .....	79
4.2.2	Tulokset.....	81
4.2.2.1	Rei'itetty teräksinen palokatko: esikoe palamattomalla julkisivulla.....	81
4.2.2.2	Palava julkisivu: rei'itetty teräksinen palokatko ja puurimoja käyttäen toteutettu palokatko .....	84
4.2.2.3	Koetulosten yhteenveto ja tulkinta.....	91
4.3	Julkisivun tuuletusraot: yhteenveto ja suositukset .....	94
5.	Alaslasketut katot ja nostetut lattiat .....	98
5.1	Taustaa.....	98
5.1.1	Rakenteista .....	99
5.1.2	Määräyksiä ja ohjeita .....	100
5.1.2.1	Suomen Rakennusmääräyskokoelman osat E1 ja E7 .....	100
5.1.2.2	Sprinklerisäännöt .....	101
5.1.2.3	Muita lähteitä .....	102
5.1.3	Palovaarat.....	102
5.1.3.1	Ontelopalon alkamisen uhkakuvia .....	102
5.1.3.2	Ontelopalon leviäminen .....	104
5.2	Ontelojen pinta-alan osiin jakaminen .....	107
5.2.1	Osiin jakavien rakenteiden palonkesto.....	108
5.2.2	Osiin jakamisen pinta-alat.....	109
5.3	Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamiseen soveltuvia rakenteita .....	111
5.3.1	Alakattojen ontelot.....	112
5.3.1.1	Villaan perustuvia rakenteita .....	112
5.3.1.2	Levyrakenteita.....	115
5.3.2	Nostetut lattiat .....	117
5.4	Läpivientien palokatkot: toiminta ontelokohteissa.....	119
6.	Kaksoislasijulkisivujen ontelot .....	122
6.1	Taustaa.....	122

6.1.1	Nykyinen käytäntö .....	122
6.2	Nykyisen käytännön arviointia.....	123
6.3	Uhkakuvien määrällinen arviointi .....	125
6.3.1	Toimistohuoneen palo, ikkunan särkyminen ja ulostyöntövien liekkien julkisivulle aiheuttama lämpörasitus.....	126
6.3.1.1	Koetuloksia .....	126
6.3.1.2	Eurokoodeissa ulkoisen palon voimakkuuden laskemiseksi esitetty malli.....	129
6.3.2	Ontelon vaikutus kaksoislasijulkisivujärjestelmän lämpenemiseen ja palon leviämiseen julkisivun välityksellä .....	132
6.3.2.1	Laskentamalli ja kelpoisuus .....	132
6.3.2.2	Sisemmän ja ulomman lasin välimatkan vaikutus ontelon kuumenemiseen ja palon leviämiseen.....	135
6.3.3	Ontelon savun hallinnan perusteet .....	139
6.4	Uhkiin varautuminen.....	140
7.	Teollisuushallien kattorakenteiden onteloiden osiin jakaminen .....	143
7.1	Paloturvallisuusnäkökohtia .....	144
7.2	Katto-ontelon osiin jakamisen merkitys tarkastellussa esimerkkikohteessa ..	145
7.2.1	Kattorakenne .....	145
7.2.2	Palovahingot erilaajuisissa paloissa .....	146
7.2.3	Palon leviäminen kattorakenteessa .....	148
7.2.4	Osiin jakavat rakenteet.....	150
7.2.5	Osiin jakamisen vaikutus palon leviämiseen ja palovahinkoihin .....	150
7.2.6	Bitumikermikaton osiin jakamisesta .....	153
7.3	Katto-ontelon osiin jaon merkitys tilastotietojen valossa.....	155
7.3.1	Teollisuushallien tulipalojen todennäköisyys .....	155
7.3.2	Tilastotietoja teollisuushallien kattopaloista .....	156
7.3.3	Kohderakennuksen kaltaisen teollisuushallin keskimääräinen kattovahinko tilastojen perusteella.....	158
7.4	Päätelmät .....	159
8.	Yhteenveto .....	162
	Lähdeluettelo .....	164
	Liitteet	
	Liite A: Räystäiden palokokeet	
	Liite B: Koetuloksia ulkoisesti syttyneen palon leviämisestä puujulkisivulla	
	Liite C: Kirjallisuustietoja kaapelien palo-ominaisuuksista	
	Liite D: Kaksoislasijulkisivujen rakennustekniikkaa	

Liite D: Teollisuushallin tuulettuvassa kattorakenteessa leviävän palon  
laskennallinen tarkastelu

Liite D: Teollisuusrakennusten katon osastointia koskevia vaatimuksia ja ohjeita

Liite D: Kokeissa käytetyn aluskatteen palo-ominaisuuksista

# 1. Johdanto

Tämän raportin aiheena on ontelopalojen etenemisen katkaiseminen. Pääasiassa tutkitaan, miten tämä voidaan toteuttaa erilaisten liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Tämän lisäksi esitellään joitakin muita, lähinnä palokuorman ominaisuuksiin vaikuttamiseen perustuvia keinoja. Perustana ratkaisuille on tilaa uhkaava palo ja sen mahdolliset seuraamukset. Nämä tekijät on selvitetty paloturvallisuustekniikan<sup>1</sup> keinoin käyttäen apuna Ontelopalojen ominaispiirteet -hankkeessa saatuja tietoja, menetelmiä ja osaamista.

Useimmille ratkaisuille esitetään perusteet lähtien niiden toiminnalle asetettavista vaatimuksista, jonka jälkeen nämä toimintaa koskevat ratkaisut on muunnettu rakenteelliseksi ratkaisuksi. Työssä esitetään myös muiden tahojen kehittämiä rakenteita, joita on saatu joko kirjallisuudesta tai suunnittelijoilta. Osa ratkaisuista on yksityiskohtaisia ja osa esitetään periaateratkaisuina.

Koska eräs rakennusten onteloiden päätarkoituksia on kosteusteknisen toimivuuden aikaansaaminen, työssä kiinnitettiin palotekniikan lisäksi erityinen huomio myös kosteustekniikkaan. Vaikeaksi ontelojen rakenteellisen palosuojelun tekeekin juuri se, että paloteknisesti hyvät ratkaisut voivat eliminoida kosteusteknisen toiminnan: hyvä ratkaisu onkin kompromissi, joka toteuttaa riittävän hyvin sekä palo- että kosteustekniikan vaatimukset.

Laajimmin käsitelty aihepiiri on yläpohjan onteloiden ja räystäiden muodostama ongelmakokonaisuus. Pääpaino tässä tutkimuksessa on annettu rivitalojen osastoinnin ongelmille sekä niiden ja muiden pientalojen räystäiden kehittämiseksi paloturvallisemmaksi. Tarkastelun perustaksi on luotu katsaus näitä rakennuksia koskeviin suomalaisiin ja norjalaisiin tilastotietoihin. Työssä on kehitetty rakenteellisesti yksinkertainen ja siksi kustannuksiltaan normaalia räystästä vastaava paloa tietyn ajan, 10–15 minuuttia, pidättävä räystästyppi. Myös muiden kohteiden yläpohjan ontelopalojen rakenteellista palontorjuntaa tutkitaan, esim. 3–4-kerroksiset P2-luokan rakennukset. Yläpohjan osastointiin liittyen tehtiin palokoe, jolla tutkittiin koko rakennekokonaisuuden (osastoiva seinä, sen vesikattoliittymät ja luukku sekä palon mahdollinen kiertäminen räystäään kautta) toimintaa. Tulokset analysoitiin syvällisesti ja niiden perusteella tehtiin johtopäätöksiä ja suosituksia paloteknisesti toimivista rakenteellisista ratkaisuksista.

---

<sup>1</sup> Termi viittaa tulipaloo, sen kehitystä ja seuraamuksia, koskevan tiedon ja insinöörimenetelmien soveltamiseen paloturvallisuussuunnittelussa (Fire Safety Engineering).

Räystäään kautta leviäviin paloihin ja yläpohjan ontelopaloihin liittyy oleellisesti myös julkisivujen ontelot, jotka voivat levittää paloa. Tässä työssä keskityttiin julkisivujen tuuletusrakoihin. Siihen liittyen tutkittiin kokeellisesti kahden erityyppisen palokatko-  
ratkaisun toimintaa. Tärkeä osa työtä oli myös aiempien tutkimustulosten kerääminen ja analysointi palokatkojen toiminnan suhteen. Näin saadut tulokset luovat perustan sille, miten palokatkoilla palosuojatun seinän tulee toimia, jotta sen voidaan katsoa estävän palon etenemistä riittävän hyvin.

Eräs paloturvallisuuden kannalta tärkeä ontelotyyppi on alaslaskettujen kattojen muodostamat ontelotilat. Kun näihin tiloihin asennetaan kaapeleita, voi tuloksena olla potentiaalisesti hyvin vaarallinen asetelma. Vastaavanlainen tilanne vallitsee nostetuissa lattioissa, joita käytetään kaapeliasennuksiin. Monissa kohteissa nämä ongelmat on kuitenkin hoidettu aktiivisin keinoin: sprinklerisääntöjen (CEA 4001: 1998–12) piilotilojen suojausta koskevassa kohdassa 5.4 vaaditaan yli 0,8 m korkeiden tilojen sprinklaamisen lisäksi 0,3–0,8 m korkeiden palavaa materiaalia sisältävien tai palavasta materiaalista rakennettujen tilojen sprinklaamista. Alle 30 cm korkeissa tiloissa sallitaan vain valais-  
tuksen ja pistorasioiden kaapelit. Tämä kattaa suuren joukon mahdollisesti vaarallisia kohteita, mutta ei kaikkia: on paljon sprinklaamattomia rakennuksia, joiden alakattojen onteloissa kulkee kaapeleita. Palokuorman tiheytenä laskettuna kaapelien määrä on yleensä vähäinen, mutta koska palo voi levitä nopeasti kaapelihyllyä pitkin, vaarallisia ontelotiloja lienee suuri määrä. Tässä työssä esitetään suositus näiden tilojen osiin jakamiselle ja esitetään joitain rakenteellisia keinoja osiin jakamiseen.

Kaksoislasijulkisivuissa sisemmän ja ulomman lasikuoren väliin syntyy ontelo. Tässä tilassa ei ole palavaa materiaalia, joten ongelmana ei ole palon leviäminen ontelossa, vaan se, että ontelo kuumenee niin paljon, että se edesauttaa palon leviämistä palotilasta muihin tiloihin. Tärkein uhattu tila on palotilan yläpuolella oleva huone, mutta vaaka-suuntaisin katkoin jaetussa julkisivussa palo voi levitä myös vaakasuuntaisesti. Uhan ydin on se, että rajoitetussa tilassa kaasut lämpenevät sitä voimakkaammin, mitä kaapeampi tila on. Jos rakennuksen jossakin tilassa pääsee kehittymään lieskahtanut palo, joka rikkoo tilan ikkunan ja liekit tunkeutuvat ontelotilaan, ontelon voimakas kuumeneminen nostaa palon leviämiskaavaa yläpuoliseen tilaan selvästi korkeammaksi verrattuna tapaukseen, jossa ulompaa lasia ei ole. Siksi on olemassa vaara, että rakenne ei täytä Suomen rakennusmääräyskokoelman (RakMK) osan E1 kohdassa 7.6.1 esitettyä yleistä vaatimusta, että ”ullakot ja ontelot on tehtävä siten, ettei palon syttymisen eikä palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa olennaisesti kasva niiden johdosta” (Ympäristöministeriö 2002). Toisaalta vaaroja punnittaessa tulee ottaa huomioon se, että kaksoislasijulkisivulla varustetut rakennukset on yleensä varustettu sprinklerilaitteistoilla, mikä voimakkaasti vähentää em. uhkakuvan todennäköisyyttä. Tässä työssä esitetään julkisivun ontelon syvyyden mitoitusohje, jota noudattaen palon leviämisen



vaaraa em. kaltaisessa uhkakuvassa voidaan pienentää. Lisäksi tarkastellaan kaksoislasi-julkisivujen osastointiratkaisuja ja niihin liittyviä ongelmia.

Teollisuusrakennusten kattopalot voivat aiheuttaa suuria omaisuusvahinkoja. Tässä työssä tarkastellaan teollisuushallien tuuletuissa kattorakenteissa etenevien palojen katkaisemista. Näkökulmina ongelmaan ovat toisaalta suhteettoman suurten omaisuusvahinkojen välttäminen ja toisaalta palokunnan turvallisen toiminnan takaaminen.

Julkaisun liitteissä esitetään aineistoa, joka tukee ja syventää varsinaisessa tekstissä esitettyjä asioita.

## 2. Työn lähtökohta, tutkimuskohteet, tarkastellut uhat ja niitä koskevat säädökset

### 2.1 Lähtökohta ja tutkimuskohteet

Tutkimuksen lähtökohtana on Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 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 tarkoitetut 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.

Tässä raportissa 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 räystään kautta leviävän palon estäminen/riittävän pitkä viivästyttäminen
  - osastoivien/osiin jakavien rakennusosien tiiviys kattorakenteen liittymässä
  - luukkujen palonkesto
  - palon leviäminen yläpohjan ontelossa räystään 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.

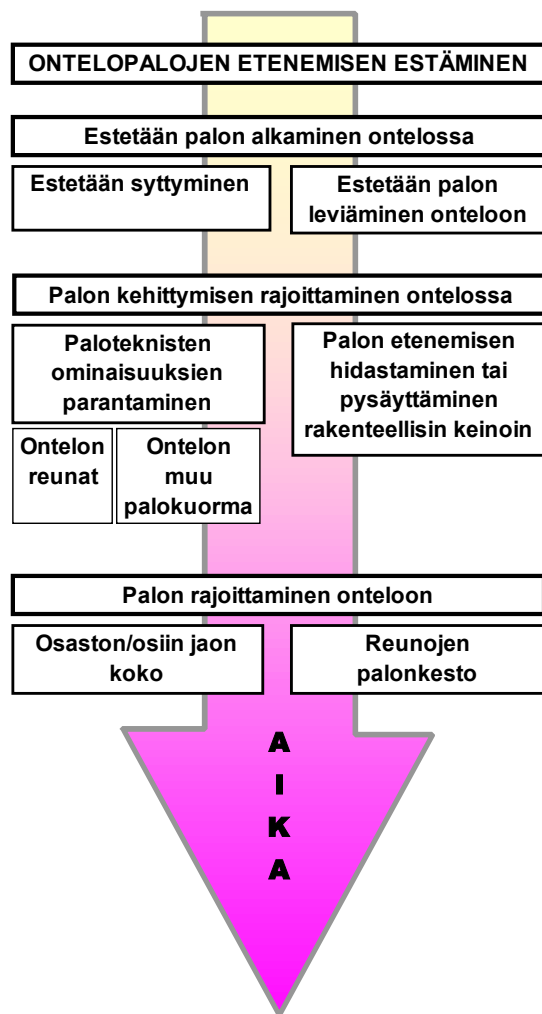
- **Teollisuusrakennusten seinä- ja kattorakenteet:**
  - tuulettuvien kattorakenteiden matalat ontelotilat.

Näiden tilojen paloturvallisuusongelmista keskityttiin tiettyihin ongelma-kohtiin. 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 varjeluun (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 kaksoislasi-julkisivu olisi osallistunut palon leviämiseen, ei Suomessa liene tapahtunut tämän raportin kirjoitusaikaan mennessä (vuoden 2002 loppupuoli). Tätä ei kuitenkaan voida tulkita siten, että kaksoislasi-julkisivuihin 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 kaksoislasi-julkisivullisessa 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 1. Ontelotilojen palojen etenemisen ehkäisemiskeinot.

## 2.2 Ontelopalojen etenemisen estämisen yleiset keinot

Ontelotilojen palovahinkojen rakenteelliset torjuntakeinot tähtäävät ontelossa alkaneessa palossa syntyvien liekkien, kuumien kaasujen ja savun leviämisen rajoittamiseen. Minimitavoitteena voidaan katsoa olevan palon rajoittaminen yhteen palo-osastoon, mutta mitä pienempi palon ulottuma on, sen parempi. Parasta on, jos palon alkaminen ontelossa voidaan estää.

Ontelopalojen etenemisen estämiskeinot ovat palonkehityksen mukaisessa aikajärjestyksessä esitettynä (ks. myös Kuva 1 ja Taulukko 1):

- Estetään palon alkaminen ontelossa
  - syttyminen
  - palon leviäminen onteloon
- Rajoitetaan palon kehittymistä osastossa
  - Paloteknisten ominaisuuksien parantaminen
    - ontelon reunojen palo-ominaisuudet
    - ontelon muun palokuorman palo-ominaisuudet
  - Palon etenemisen hidastaminen tai pysäyttäminen rakenteellisin keinoin
- Estetään palon leviäminen palo-osastosta
  - osaston tai osiin jakamisen koko
  - osaston tai osiin jaetun alueen reunojen palonkesto.

### 2.2.1 Palon alkaminen ontelossa

Ontelopalo voi alkaa joko ontelossa tapahtuvana syttymisenä tai onteloon sen ulkopuolelta leviävän palon vuoksi. Tärkeimmät onteloissa ensimmäisenä syttyvät kohteet ovat yhdysvaltalaisen tilaston mukaan (Hietaniemi ym. 2001a):

- rakenteen osan tai rungon syttyminen,
- ulkokaton päällysteen syttyminen,
- johtimen tai kaapelin syttyminen,
- lämmön tai äänen eristeen syttyminen.

Nämä ovat hankkeen aikana saatujen Suomea koskevien tietojen (palotapaukset, ks. esim. Hietaniemi ym. 2001, lehtiartikkelit, asiantuntijoiden mielipiteet) mukaan merkittävimmät tekijät myös Suomessa. Esimerkiksi yläpohjan ontelopaloissa merkittävin ontelopaloon johtava syy on palon leviäminen onteloon räystäään kautta alapuolisen huoneiston lieskahtaneesta palosta. Tällöin ensimmäinen syttyvä kohde ontelossa on katon aluskate, aluslaudoitus, kattoristikot tai eriste (jos se on palavaa). Teollisuusrakennuksissa katto-onteloiden palot johtavat usein suuriin omaisuusvahinkoihin. Näiden palojen syynä ontelon ulkopuolelta tuleva alkupalo katteen syttyessä tulityön seurauksena on vieläkin merkittävä tekijä, vaikka tulitöiden valvonta on kehittynyt voimakkaasti viimeisten kymmenen vuoden aikana. Tulityöt voivat aiheuttaa myös ontelon sisällä tapahtuvan syttymisen, jos esim. siinä syntyvät kipinät kulkeutuvat onteloon. Myös eristeiden syttyminen katon läpi johdettavien kuumien putkien ja hormien takia on yleinen syy teollisuusrakennusten katto-onteloiden paloihin. Johtimien ja kaapeleiden syttyimi-

nen on merkittävä syttymissyy esim. alaslaskettujen kattojen muodostamien ontelotilojen tulipaloille. Asuinrakennusten julkisivujen tuuletusraoissa etenevät palot saavat alkunsa useimmiten lieskahtaneista huoneistopaloista, mutta ulkoisen sytytyksen mahdollisuus eli lähinnä tuhopoltot tai lasten tulitikkuleikit on otettava huomioon. Teollisuusrakennusten julkisivujen onteloissa levinneissä paloissa tulityöt ovat usein alkusyyinä.

Ontelopalojen paloturvallisuus -hankekokonaisuuden painopiste on alkuun päässeiden ontelopalojen hillitsemis- ja sammutuskeinojen kehittämisessä. Syttymissyiden vähentäminen on rajattu työn ulkopuolelle. Työn aikana kertyneen tiedon ja kokemuksen perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että ontelopalojen syttymisten vähentämisessä olisi kiinnitettävä huomiota erityisesti seuraaviin tekijöihin: Tärkeintä on tehdä selväksi, että ontelotiloissa alkavien tai sinne pääsevien palojen riskit ovat suuret: palot voivat olla moniuhrisia ja omaisuusvahingot korkeita. Nopeimmin tuloksia lienee saatavissa teollisuus- ja muissa toimipaikkarakennuksissa, joissa ontelopalojen syttymisvaaran vähentäminen voidaan integroida osaksi laitoksen riskinhallintaa. Yksittäisistä ontelopalojen syttymisiä vähentävistä tekijöistä tulitöiden turvallinen suorittaminen on alati tärkeä asia. Tärkeää on huolehtia myös katon kuumien läpivientien asianmukaisuudesta. Ontelotiloissa olevien materiaalien palo-ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti palon kehittymisen ja leviämisen lisäksi myös niiden alttiuteen syttyä: esimerkiksi pienikin määrä helposti syttyvää kaapelin eristettä voi tarjota sytytysliekin katastrofille.

## 2.2.2 Palon kehittyminen ontelossa

Ontelossa alkanut tai sinne päässyt palo kehittyy niin kauan, kun palamisen edellytykset ovat olemassa eli kun palolle on saatavilla polttoainetta ja happea sekä tilan kuumuus on riittävän, jotta polttoaine ja happi pääsevät reagoimaan keskenään (polttoaineen pyrolyysi ja pyrolyysituotteiden ja hapen reaktiot).

Ontelopalon kehittymiseen voidaan vaikuttaa tehokkaasti ontelossa olevien materiaalien palo-ominaisuuksilla. Näistä tärkeimmät palon leviämisen kannalta ovat syttymisherkkyys ja materiaalien palaessaan vapauttama paloteho. Ontelopalojen ominaispiirteet -hankkeessa selvitettiin mm. materiaalien syttymislämpötilan ja pinta-alayksikköä kohden vapautuvan palotehon ( $\dot{q}''$ ) vaikutus ontelotilan palon leviämiseen (Hietaniemi ym. 2002). Vaikutus on voimakas: havaittiin, että esim. hyvin palavan kaapelieristeen palaessa ontelotilassa kaapelin syttymislämpötilan kasvaminen vähentää ja sen pinta-alayksikköä kohden luovuttaman palotehon kasvaminen lisää ontelopalon leviämistä verrallisena näiden suureiden neliöön. Esimerkiksi hyvin palavan kaapelimateriaalin ( $\dot{q}''$  noin  $300 \text{ kW/m}^2$ ) korvaaminen kohtalaisen kevyestikin palosuojatulla kaapelilla ( $\dot{q}''$  noin  $150 \text{ kW/m}^2$ ) laskee palon leviämisenopeutta tekijällä neljä. Hietaniemi (2001) on tutkinut puun palosuojauksen (ruoteet/aluslaudoitus & ristikot) mahdollisuuk-

sia yläpohjan onteloiden paloturvallisuuden parantamisessa. Saadut tulokset osoittivat, että tämä menetelmä on tehokas keino hillitä ja jopa estää yläpohjan ontelopalon leviäminen.

Ontelossa alkaneen palon leviämistä voidaan hidastaa tai leviäminen voidaan pysäyttää sopivin asennuksin jo ennen kuin palo on levinnyt kattamaan koko ontelon. Tyypillinen esimerkki tällaisesta menettelytavasta on julkisivun tuuletusraon kuristaminen siten, että raossa etenevän tulen kulku hidastuu tai pysähtyy. Periaatteessa tässä on kyse samasta asiasta kuin tilan osastoinnissa: pyritään estämään tulen eteneminen tietyn tilan ulkopuolelle tietyn pituiseksi ajaksi.

### **2.2.3 Palon murtautuminen ulos ontelosta**

Jos paloa rajoittavat rakenteelliset keinot eivät pysäytä ontelossa leviävää paloa eikä sitä havaita eikä siten liioin pyritä sammuttamaan, palo voi levitä kattamaan koko ontelon edellyttäen, että palamisen perusedellytykset (happi, polttoaine, kuumuus) ovat voimassa. Tämän jälkeen palo voi edetä edelleen ontelon ulkopuolelle, jos palon aiheuttamat rasitukset ylittävät ontelon reunojen kyvyn kestää niitä.

Ontelon pinta-ala määrää pitkälti sen, miten suuret omaisuusvahingot koko ontelon laajuudelle levinnyt palo aiheuttaa. Tämän lisäksi nopeasti suuressa ontelossa leviävä palo voi aiheuttaa vakavan uhan ihmisille (esim. Düsseldorfin lentoaseman palo). Siksi ontelon koon rajoittaminen on merkittävä paloturvallisuustekijä.

Jos ontelopalo pääsee etenemään palo-osastosta toiseen, on suurten henkilö- ja omaisuusvahinkojen riski korkea. Osastointihan on eräs tärkeimpiä, ellei tärkein, keino poistumisen turvaamiseksi, pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi sekä omaisuusvahinkojen rajoittamiseksi.

Taulukko 1. Ontelotilojen palojen etenemisen hillitsemis- ja estämisstrategiat sekä niihin liittyviä RakMK:n osan E1 vaatimuksia ja ohjeita.

<b>LÄHTÖKOHTA (E1 7.6.1): ”Ullakot ja ontelot on tehtävä siten, ettei palon syttymisen eikä palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa olennaisesti kasva niiden johdosta.”</b>	
<b>PALON KEHITTÄMISEN RAJOITTAMINEN</b>	
<b>Ontelon reunojen (katto, seinät ja lattiat) palotekniset ominaisuudet</b>	<p><u>Yleinen vaatimus (E1, 8.1):</u> ”Rakennuksessa on käytettävä rakennustarvikkeita, jotka eivät myötävaikuta palon kehittymiseen vaaraa aiheuttavalla tavalla”.</p> <p>”Seinien, sisäkattojen ja lattioiden paloteknisiä ominaisuuksia arvioitaessa otetaan huomioon missä määrin tarvikkeet osallistuvat paloon, lieskahduksen alkamiseen kuluva aika, lämmön vapautuminen ja savun sekä palavien pisaroiden muodostuminen.” (E1 8.2.1)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sisäpuolisten pintojen luokkavaatimukset koskien ullakoita ja onteloita: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttöullakon lattiat: P1: A<sub>2FL</sub>-s1, P2 ja P3: D<sub>FL</sub>-s1</li> <li>- Käyttämättömät ullakot sekä matalat ullakkotilat ja ontelot, yläpohjan yläpinta: P1 ja P2: B-s1, d0, P3: –.</li> </ul> </li> <li>• Ulkoseinien tuuletusraot: <ul style="list-style-type: none"> <li>- P1, ulkoseinän ulkopinta sekä tuuletusraon ulko- ja sisäpinta: B-s1, d0<sup>a)</sup></li> <li>- P2, ulkoseinän ulkopinta sekä tuuletusraon ulko- ja sisäpinta: B-s1, d0<sup>b)</sup></li> <li>- P3: ulkoseinän ja tuuletusraon ulkopinta: D-s2, d2; tuuletusraon sisäpinta: ei vaatim.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Ontelossa olevan muun palokuorman palotekniset ominaisuudet (esim. katon kannattimet, kaapelit, pöly,...)</b>	Ei vaatimuksia RakMK E1:ssä.
<b>PALON RAJOITTAMINEN PALO-OSASTOON</b>	
<p><u>Yleinen vaatimus (E1, 5.1):</u> ”Rakennus tulee yleensä jakaa palo-osastoihin palon ja savun leviämisen rajoittamiseksi, poistumisen turvaamiseksi, pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi sekä omaisuusvahinkojen rajoittamiseksi.”</p> <p>Onteloiden tapauksessa kyseeseen tulee pinta-alaosastointi, joka E1:ssä liitetään omaisuusvahinkojen rajoittamiseen: ”<i>Palo-osaston koko</i> tulee rajoittaa siten, että osastossa syttyvä palo ei aiheuta kohtuuttoman suuria omaisuusvahinkoja (pinta-alaosastointi).” (E1, kohta 5.2)</p>	
<b>Osaston koko (myös osiin jakaminen)</b>	<p>E1:n vaatimukset ullakkojen ja onteloiden osastoinnin ja osiin jakamisen suhteen (E1, 5.2.1):</p> <p>P1: 1 600 m<sup>2</sup>   P2: 1 600 m<sup>2</sup> P3: alapuolisten osastojen mukaan tai erityisestä syystä enintään 200 m<sup>2</sup> osastoihin</p> <p>Tiettyissä kohteissa palo-osastot jaetaan lisäksi osiin poistumisen turvaamiseksi tai pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi. Ullakot ja yläpohjan ontelot kuuluvat näihin kohteisiin. Niissä osiin jakaminen tehdään ≤ 400 m<sup>2</sup> osiin.</p>



<b>Osaston reunojen palonkesto</b> (myös osiin jakaminen)	Yleinen vaatimus (E1, 7.1): ”Osastoivat rakennusosat niihin liittyvine laitteineen ja varusteineen tulee tehdä siten, että palon leviäminen osastosta toiseen estyy määrätyn ajan.”
	E1:n vaatimukset <i>ullakkojen</i> osastoinnin ja osiin jakamisen suhteen (E1, 5.2.1), kaikki paloluokat P1, P2 ja P3: <ul style="list-style-type: none"> <li>• osastoivat rakennusosat ullakolla: EI 30</li> <li>• osiin jakavat rakennusosat: EI 15</li> </ul> Tuotanto- ja varistorakennuksen pinta-alaosastointia toteuttavien rakennusosien vaatimukset RakMK E2 mukaan.
	Luukut: ”Osastoivassa rakennusosassa olevan oven, ikkunan ja muuta pienehköä aukkoa suojaavan rakennusosan palonkestävyysajan tulee yleensä olla <i>vähintään</i> puolet osastoivalle rakennusosalle vaaditusta palonkestävyysajasta. Osastoivan oven tulee yleensä olla itsestään sulkeutuva ja salpautuva. Jos ovea pidetään auki normaalikäytössä, se on varustettava laittein, jotka sulkevat oven palon sattuessa.” (E1, 7.3.1 ja 7.3.2)
	Läpiviennit: ”Osastoivan rakennusosan läpi saa johtaa tarpeelliset putket, roilot, kanavat, johdot ja hormit sekä kuljetinlaitteistojen edellyttämät läpiviennit edellyttäen, ettei olennaisesti heikennetä rakennusosan osastoivuutta.” (E1, 7.3.3)

Huomautukset:

- a) P1-rakennukset yleensä: Enintään kahdeksankerroksisessa P1-luokan rakennuksessa ulkoseinän ulkopinnan osa saa olla luokkaa D–s2, d2, mikäli tällaisia osia ympäröivät rakenteet suojaavat seinäpintaa palon leviämiseltä. Julkisivulevyjen kiinnitykseen saa enintään kahdeksankerroksisessa rakennuksessa käyttää vähäisessä määrin D–s2, d2-luokan rakennustarvikkeita. Enintään 4 kerroksiset P1-luokan asuin- ja työpaikkarakennukset: Luokan D–s2, d2 rakennustarvikkeiden käyttö on sallittu, mikäli i) rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla ja ii) seinä on suunniteltu siten, että ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviäminen seinässä on estetty riittävän tehokkaasti.
- b) 3-4 kerroksisessa P2-luokan asuin- tai työpaikkarakennuksessa sekä P2-luokan hoitolaitosrakennuksessa voidaan ulkoseinän ja tuuletusraon ulkopinnoissa käyttää D–s2, d2-luokan rakennustarviketta, mikäli i) rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla ja ii) seinä on suunniteltu siten, että ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviäminen seinässä on estetty riittävän tehokkaasti.

### 3. Räystäät ja yläpohjan ontelot

Yläpohjan ontelopalot on yleinen ontelopalotyyppi. Varsin tavallisia ovat etenkin onnettomuudet, joissa tulipalo alkaa rivitalon jossakin huoneessa, kehittyy lieskahtaneeksi paloksi, rikkoo ikkunan ja leviää räystäään kautta yläpohjan onteloon, jossa palo etenee edelleen. Jos yläpohjan onteloa ei ole osastoitu lainkaan, tai jos osastointi ei toimi riittävästi hyvin (pidätä paloa tarpeeksi), niin talo voi vaurioitua pahasti, jopa niin paljon, että sen korjaaminen ei ole kannattavaa. Tilannetta pahentaa se, että savu leviää herkästi myös alapuolisiin huoneisiin, joka aiheuttaa ainakin lisää omaisuusvahinkoja. Myös alapuoleisiin huoneisiin valuva sammutusvesi voi aiheuttaa merkittäviä vahinkoja. Jos savua pääsee vuotamaan paljon, myös henkilöturvallisuus vaarantuu. Pahimmissa tapauksissa on olemassa vaara, että yläpohjan ontelossa valtoimenaan riehuva palo etenee yläpohjan läpi alapuolisiin huoneisiin yläpohjan palonkeston pettäessä. Toinen merkittävä syy räystään kautta yläpohjan onteloon eteneviin paloihin on parvekkeella tai verannalla huolimattomasti poltetusta kynttilätuotteesta seinään siitä edelleen räystäällä leviävä palo.

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 (kyseeseen tulee lähinnä syttymisen vaatiman alkuenergian antavan objektin aiheuttama sytyttäminen, jollainen voi olla esim. palavasta kohteesta lentävä kipinä). Jos palon leviämistä räystään kautta ei ole estetty mitenkään, viereisen rakennuksen seinällä syttynyt palo voi edetä sen yläpohjaan.

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

Yläpohjan onteloon päässyt palo voi levitä siellä nopeasti ja kestää pitkään. Palokuormaa on yleensä saatavilla runsaasti, esim. muutama tuhat kilogrammaa puuta (ks. Kuva 2). 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. Myös yläpohjan eriste voi osallistua paloon. Palavaa pintaa on tyypillisesti niin paljon, että palon saavuttama suurin voimakkuus määräytyy hapen saannin perusteella. Palosimulointien mukaan virtausnopeudet palon aikana tuuletusraoissa kasvavat muutamaan metriin sekunnissa. Tuuletusraon tyypilliseksi korkeudeksi voidaan olettaa 20–30 mm. Tällöin esim. 10 m pituiseen palo-osastoon voi palon aikana virrata happea muutamia satoja grammoja sekunnissa, mikä pystyy pahimmillaan pitämään yllä megawattien suuruista paloa. Palon jatkuessa paloteho yleensä putoaa, koska palotilan happipitoisuus putoaa ja sinne kertyy palotuotteita. Erityisesti palamattomien hiilivetyjen määrä voi nousta nopeasti.

Palosimulointien perusteella kattorakenteella on merkittävä vaikutus yläpohjan ontelo-palon kehittymiseen. Kattotyypeissä, joissa käytetään tiheää aluslaudoitusta, palo kehittyy nopeasti huippuarvoonsa, mutta tätä vaihetta ei kestä kauaa, vaan palaminen vähenee tyypillisesti noin puoleen huippuarvostaan tai pienemmäksi. Lämpötilat tilassa jäävät palamisen heikennyttyäkin korkeaksi (500–600 °C) ja siksi pyrolyysi jatkuu voimakkaana ja palamattomia hiilivetyjä kehittyy paljon. Harvalla ruodelaudoituksella toteutetuissa katoissa palon kehitys on alussa hitaampaa, palon voimakkuus voi olla esim. 1 MW noin 5–10 minuutin kuluttua palon alusta, kun vastaava aika aluslaudoitetulle tapaukselle on noin 2–3 minuuttia. Palon saavutettua huippuvoimakkuutensa se heikenee, mutta heikkeneminen voi olla vähäistä ja palon voimakkuus tasaantuu oleellisesti korkeammalle tasolle kuin aluslaudoitetussa tapauksessa. Tähän on se luonnollinen syy, että aluslaudoissa on paljon suurempi pyrolyysikaasuja luovuttava pinta-ala kuin ruodelaudoissa ja siten tiiviisti aluslaudoitettu katto luovuttaa niin paljon pyrolyysikaasuja, että ontelotilaan muodostuu liian rikas seos palaakseen voimakkaasti. Ruodelautojen tapauksessa seoksen happi-polttoainesuhde muodostuu helpommin palamisen kannalta

edullisemmaksi. Koska ruodelaudoitettussa tapauksessa palaminen on kiivaampaa, ovat myös lämpötilat korkeampia: palosimuloinnissa niiden havaittiin olevan yli 700 °C.

Yläpohjan ontelossa etenevien palojen katkaisemiseen on olemassa rakenteellisten keinojen lisäksi eräs tehokas keino: ontelossa käytetyn puutavaran palosuojaaminen. Koska palosuojaamalla puun paloluokitus voidaan nostaa jopa B-luokkaan, käyttämällä palosuojattua puuta voidaan tehokkaasti vähentää palon leviämistä yläpohjan ontelossa (Hietaniemi 2001). Palosuojatun puun käyttöön liittyy tiettyjä teknisiä ongelmia, joista oleellisin on niiden pitkäaikaistoimivuus (Östman ym. 2001). Yläpohjan ontelossa pahin pitkäaikaistoimivuutta uhkaava tekijä eli rakennetta huuhtova sade on kuitenkin eliminoitu. Tätä aihetta ei tässä työssä kuitenkaan käsitellä enempää, vaan työn kohteena on rakenteellinen palontorjunta.

Tässä työssä keskitytään rivitalojen ja puukerrostalojen räystäiden ja yläpohjan onteloiden paloturvallisuusongelmiin.

## 3.1 Taustaa

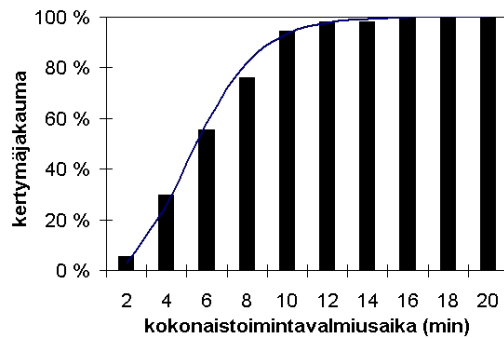
### 3.1.1 Yläpohjan onteloiden ja ullakoiden paloihin liittyviä tilastotietoja

Ylivoimaisesti tärkein syy yläpohjan ontelon tulipaloihin on se, että palo leviää yläpohjan onteloon räystäään kautta. Palot, jotka leviävät räystäään kautta ovat useimmiten ikkunan kautta leviäviä lieskahtaneita huoneistopaloja. Myös seinärakenteessa etenevät palot leviävät usein yläpohjaan.

Vuosina 1996–2001 Pronto-tietokannassa on noin 900 merkintää rivitalopaloista. Näistä hieman yli sadassa oli kyse ullakolle tai yläpohjan onteloon levinneestä palosta. Hieman yli runsas puolet näistä oli yläpohjan ontelopaloja ja ullakkopaloja hieman alle puolet.

Noin viidestäkymmenestä yläpohjan ontelopalosta syttymissyyn ja tapahtumankulun kuvausten perusteella palo on levinnyt ikkunan kautta yläpohjan onteloon kymmenessä tapauksessa. Epäselviä tapauksia, joissa palo on ilmeisesti tai mahdollisesti levinnyt ikkunan kautta on yli 15 kappaletta. Ikkunan kautta levinneitä paloja on siis ollut noin 20–50 %.

Jäljelle jäävistä noin 35:stä palosta liekit levisivät yläpohjan onteloon seinärakenteen kautta noin 10 tapauksessa (20 %). Yleisin syy näihin paloihin oli kynttilätuotteet ja ilotulitteet. Kolme paloa oli sytytetty tahallaan. Tulityöt katolla olivat syy noin 10 % rivitalojen yläpohjan ontelon paloista.



Kuva 3. Tarkastelujen yläpohjan palotapausten kokonaistoimintavalmiusaikojen jakauminen. Havaintojen määrä  $N = 54$ . Yhtenäinen käyrä on sovite Tillanderin ja Keski-Rahkosen (2001) esittämää gammajakaumafunktiota käyttäen.

Palokunnan toimien ajoittuminen muodostaa vähimmäisvaatimuksen paloa osastoivien ja osiin jakavien rakenteiden toiminnalle: näiden rakenteiden tulisi kestää siihen asti, kunnes palokunta ehtii aloittamaan sammutuksen siellä, missä nämä rakenteet ovat. Rivitalojen yläpohjaan liittyvien palotapauksien kokonaistoimintavalmiusaikojen jakauma on esitetty kuvassa 3. Lyhyin kirjattu aika oli 2,5 minuuttia ja pisin 16,5 minuuttia. Kokonaistoimintavalmiusaika oli pitempi kuin 10 minuuttia noin 5 %:ssa ja yli 15 minuuttia 1 %:ssa tapauksista.

Rivitalopaloissa palokunta menee ensimmäiseksi palohuoneistoon pelastamaan ja sammuttamaan. Yläpohja- ja kattorakenteiden sammutus aloitetaan yleensä vasta tämän jälkeen. Siksi yläpohjan ontelon sammuttamisen alkamisajat ovat pidempiä kuin yo. kuvassa esitetyt toimintavalmiusajat. Toisaalta yläpohjan onteloon leviävä palo ei ala samanaikaisesti kuin sen aiheuttanut palo, esim. huoneistopalo. Etenkin, jos huoneistopalo leviää ulkoisesti ikkunan kautta, viive voi olla huomattava. Tämä osittain kompensoi sammutustoimien aloittamisjärjestyksen tuomaa viivettä ontelopalon alun ja palokunnan sammutustoimien välillä.

Räystäs toimii useimmissa yläpohjan ontelopaloissa palon kulkutienä, joten se on ratkaisevassa asemassa palon leviämisen kannalta. Kriittinen hetki räystään toiminnassa on se, jolloin palo pääsee etenemään räystäältä kohti yläpohjaa.

Vanhemmissa rivitaloissa koko yläpohjan ontelo voi olla osastoimaton ja tällöin yläpohjan ontelossa alkanut palo suurella todennäköisyydellä leviää laajalle, jopa koko ontelotilaan. Uusien rivitalojen yläpohjan ontelot pitää määräyksien (RakMK E1 5.2.1) mukaan osastoida alapuolisen osastojaon mukaan eli käytännössä huoneistoittain. Tärkeä tieto olisikin, kuinka usein tämä osastointi pettää, eli millä todennäköisyydellä yläpohjan palo leviää osastosta toiseen. Sen päättelemisen Pronto-tietokannasta löydettävissä

olevien tietojen avulla on kuitenkin hyvin vaikeaa. Norjassa tehdyn rivitalotutkimuksen (Anon. 1997) mukaan palon leviäminen rivitalojen yläpohjan ontelossa tapahtuu pääasiassa ulkoisesti (ulkokautta) leviämällä; yhdessäkään tapauksessa palo ei levinnyt suoraan osastoivan seinän läpi.

### 3.1.2 Puukerrostalojen yläpohjan onteloiden palovaaroista

Puukerrostalot ovat Suomessa varsin uusi rakennustyyppi, eikä niiden määrä vielä ole kovin suuri. Niiden tulipaloja koskevia tilastotietoja ei Suomen tulipalotilastoista löydy.

Suomen ja pohjoismaiden puukerrostalorakentaminen on saanut paljon vaikutteita pohjoisamerikkalaisesta (Yhdysvallat ja Kanada) puukerrostalorakentamisesta. Siksi puukerrostalojen paloturvallisuutta tutkineessa Brandsäkra Trähus -projektissa on kerätty tilastotietoa Yhdysvalloista. Seuraavassa esitetään lyhyesti tämän työn aihepiirin kannalta oleellisia kyseisen projektin loppuraportissa (Östman ym. 2002) vedettyjä johtopäätöksiä:

- Rakenteiden puutteellinen tiiviys muodostaa syyn savun leviämiseen 16 %:ssa kaikista tavoista, joilla savu leviää.
- Palavien rakenteiden tapauksessa palo levisi muihin kerroksiin viisi kertaa useammin kuin palamattomien rakenteiden tapauksessa.
- Sprinklattujen rakennuksien palotapauksissa ei löytynyt yhtäkään merkintää palokuolemista.

Yhdysvaltojen tilanteen ja pohjoismaissa vallitsevan tilanteen vertailusta muistutetaan, että Yhdysvalloissa käytetty rakentamistapa poikkeaa pohjoismaissa 1995 ja sen jälkeen pohjoismaisen puutalohankkeeseen liittyen käytetystä rakennustavasta. Yhdysvalloissa esimerkiksi toisistaan erottamattomat suuret ontelotilat ovat tavallisia, mutta pohjoismaista tällaista rakennustapaa tuskin esiintyy. Pohjoismaissa suositaan esim. sähköasennuksien suhteen keskitetympää asennustapaa, jolloin läpivienteihin liittyviä epätiiviyskohtia on vähemmän kuin Yhdysvalloissa, jossa asennustapa ei ole yhtä keskitetty. Lisäksi Yhdysvalloissa sallitaan pinta-alaltaan pienissä kohteissa hyvin kevyitä rakenteita. Nämä ilmeisesti vaikuttavat voimakkaasti Yhdysvalloissa havaittuun palon leviämiseen.

Suomessa puukerrostaloissa käytetään asuntokohtaisia sprinklereitä. Niiden toimintavarmuudeksi mainitaan em. raportissa (Östman ym. 2002) ainakin 90 %, joskin arvoa 95 % pidetään realistisempänä. Siksi lieskahtaneen palon todennäköisyys suomalaisissa

puukerrostaloissa on varsin pieni. Sprinklaamattomien asuinhuoneistojen lieskahtamistodennäköisyydeksi voidaan karkealla tasolla arvioida n. 10 % eli vain noin joka kymmenes palo lieskahtaa. Sprinklerit pienentävät tätä todennäköisyyttä tekijällä 10–20 eli sprinklatuissa huoneistoissa arviolta vain noin sadas–kahdessadas palo kehittyi lieskahtaneeksi. Puukerrostaloissa yläpohjan onteloon leviävän palon alkusyynä ei siis mitään todennäköisimmin ole lieskahtanut palo suoraan tai välillisesti julkisivun kautta leviä, vaan jokin muu syy. Tärkein syttymissyy on ilmeisesti ulkoinen syttyminen; esimerkiksi sähköiset syttymissyyt eivät ole yhtä tärkeitä kuin ulkoinen syttyminen, koska Suomessa sähköasennusten määrä yläpohjan onteloissa on varsin vähäinen.

Tämän raportin piiriin kuuluvat puukerrostalojen julkisivujen tuuletusraossa leviävän palojen katkaiseminen sekä palon räystään kautta tapahtuvan leviämisen estäminen ja yläpohjan onteloon levinneen palon leviämisen estäminen osastoinnilla ja osiin jaolla. Nämä tekijät muodostavat muiden paloturvallisuustekijöiden kanssa kokonaisuuden, jonka eri osien vaikutusta tulee tarkastella yhdessä muiden tekijöiden kanssa. Kokonaisuutta koskevien tarkastelujen perustaksi tässä työssä näitä asioita käsitellään erillisinä teknisinä ongelmina. Nämä tarkastelut on esitetty kohdissa 3.2.2 (räystään kautta yläpohjan onteloon leviävä palo) ja 3.4 (yläpohjan osiin jakaminen) sekä luvussa 4 (tuuletusraossa leviävän palon katkaisu).

### **3.2 Yläpohjan onteloon räystään kautta leviävä palo**

Paloturvallisuuden kannalta paras ratkaisu räystään kautta yläpohjan onteloon leviävän palon estämiseen olisi sulkea räystäät ja ottaa tuuletusilma muualta, esim. ikkunattomilta seiniltä (talon päädyt) tai katolta. Tällaisissa ratkaisuissa riittävän tuuletuksen aikaansaaminen edellyttää ”normaalista” poikkeavaa rakentamistapaa, kuten katon toimintaa heikentäviä rei’ityksiä, koneellista tuuletusta, tuuletusputkien vetoa jne. Nämä kaikki lisäävät kustannuksia ja niihin liittyy teknisiä ongelmia. Riittävän tuuletuksen saaminen on eräs keskeisimpiä: tulipalojahan sattuu loppujen lopuksi vain varsin harvoin, kun taas toimimaton tuuletus aiheuttaa vahinkoja koko ajan. Homevahinkojen kautta huono tuuletus aiheuttaa haitallisia seuraamuksia myös ihmisten hyvinvoinnille ja terveydelle, ei vain omaisuudelle. Myös räystään ja katon ulkonäkö ovat tärkeitä, koska ne muokkaavat talon piirteitä merkittävästi. Paloturvallisuuden parantamiseksi tehtävissä mahdollisissa räystäsrakenteen muutoksissa tuleekin pitää mielessä myös nämä näkökohdat.

### **3.2.1 Palon etenemistä hidastavan räystäsmallin kehitystyö: rivitalot ja muut pientalot**

Jos palon leviäminen räystäällä estetään tai sitä hidastetaan riittävän paljon, ikkunan ja seinärakenteiden kautta leviävien palojen vaaraa saadaan pudotettua selvästi tai jopa eliminoitua. Myös joihinkin muihin syttymissyihin, esim. yläpohjan onteloon lentäneet kipinät, ilotulitteet, tms., liittyvät palot saadaan estettyä räystäsratkaisuin. Edellä esitettyjen tilastotietojen valossa palon leviämistä riittävästi hidastava tai estävä räystäsrakenne voi puolittaa rivitalojen yläpohjan ontelopalojen lukumäärän. Koska tässä tapauksessa yläpohjaan mahdollisesti etenemään pääsevät palot olisivat suhteellisen pieniä silloin, kun palokunta aloittaa sammutustoimensa, vahinkojen määrä voi vähetä suhteessa vielä enemmän.

Lisääntyvä tiivis pientalorakentaminen vaatii myös niiden paloturvallisuuden arviointia. Räystäiden paloteknisellä toiminnalla on oma osuutensa myös tässä ongelmakentässä.

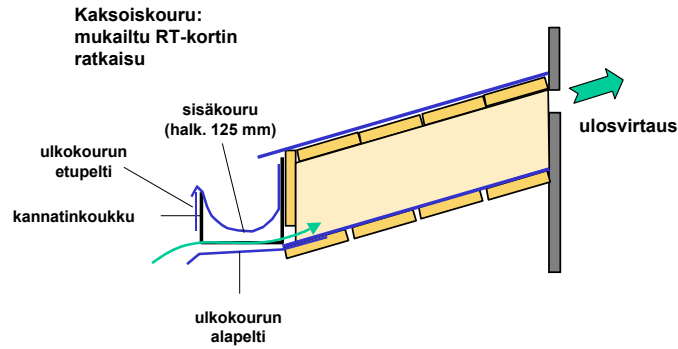
Tässä hankkeessa kehitettiin räystästyppi, joka koetulosten mukaan hidastaa selvästi palon leviämistä räystään kautta yläpohjan onteloon tai ullakolle. Palokunnan kokonaisuus-toimintavalmiusaikojen valossa näyttää, että jo 10–15 minuutin hidastus rivitalojen ja muiden pientalojen palon leviämisessä yläpohjan onteloon on merkittävä tekijä. Tämän ajan räystääs kokeiden mukaan viivästää paloa.

Pääasiallisesti kehitetty räystääs on tarkoitettu rivitaloihin ja muihin pientaloihin. Hoitotalot on yksi kohde, jossa kehitetty räystästyppi tarjoaa erään keinon parantaa paloturvallisuutta.

Hankkeessa tehtiin palokoesarja, jossa tutkittiin erilaisiin ideoihin perustuvia ratkaisuja hidastaa palon etenemistä räystäällä. Koesarjan kokeet ja niiden tulokset esitetään liitteessä A. Tässä luvussa esitetään parhaiten toiminut räystästyppi (Kuva 4). Se perustuu RT-kortissa RT 85–10596 (1996) esitettyyn kaksoiskoururakenteeseen.

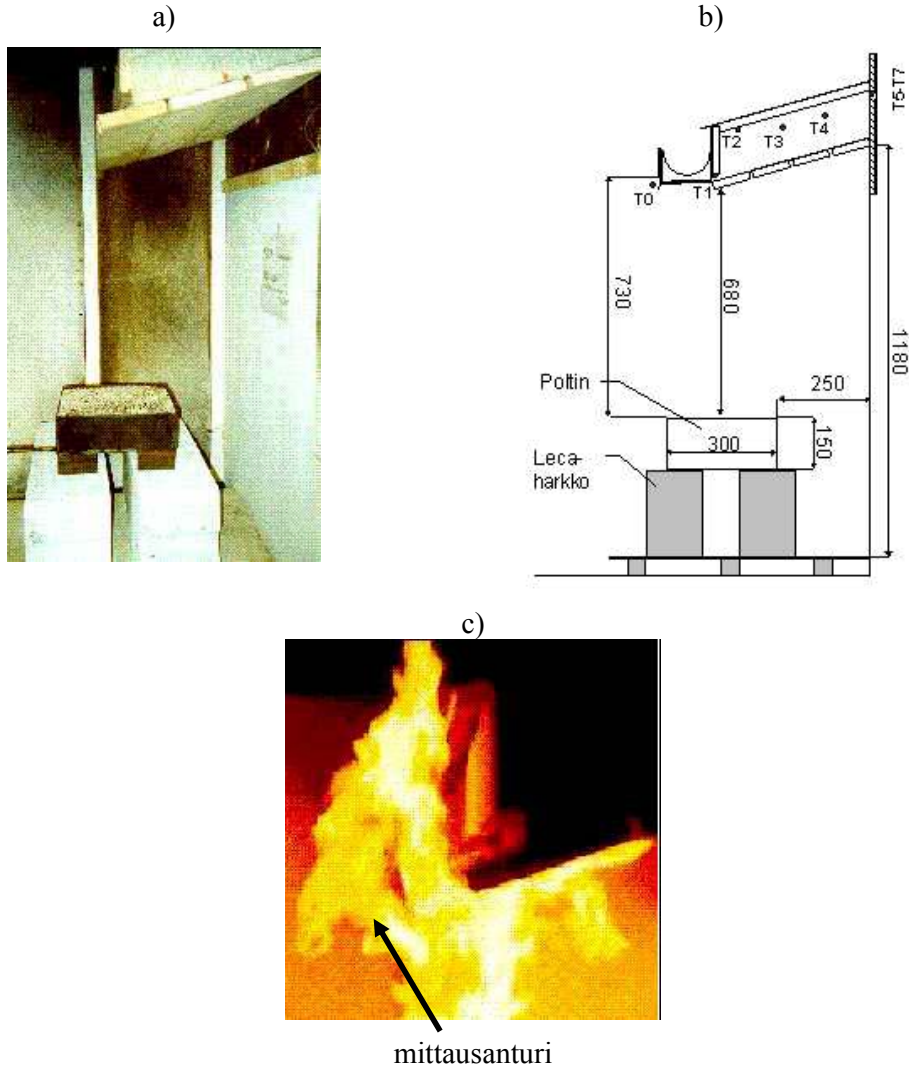
Koejärjestelyjen periaate esitetään kuvassa 5. Yksityiskohtaisemmin koetta kuvataan liitteessä A. Paloskenaariona oli räystään alapuoleisen huoneiston lieskahtaneen palon räystäälle aiheuttama palorasitus.





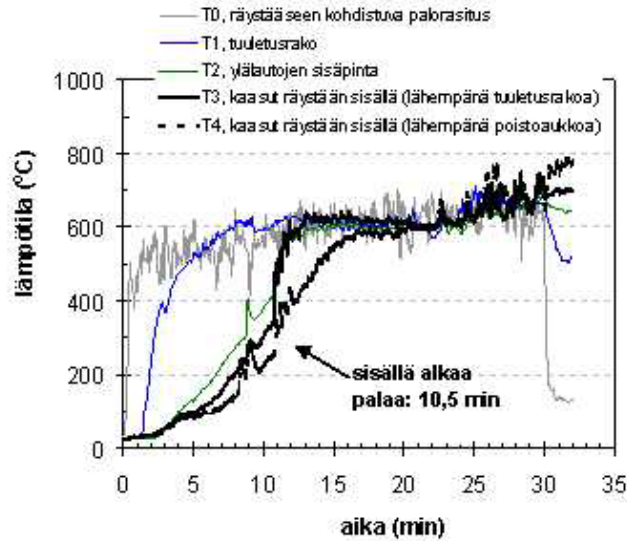
*Kuva 4. Räystäs, jossa tuuletus tapahtuu kaksoiskoururakenteen läpi. Mittapiirroksia rakenteesta esitetään liitteessä A (kuva A25).*

Kehitetty räystästyyppe kesti kohtuullisen hyvin kokeissa käytettyä palorasitusta, jossa liekit peittivät räystäään varsin täydellisesti (ks. Kuva 5). Räystäään ulkopuoli syttyi palamaan noin 50 s kuluttua lämpörasituksen alkamisesta, mutta sen sisäpuolella palaminen alkoi 10 minuuttia myöhemmin (Kuva 6). Silloinkaan, kun räystäään sisäpuoli oli syttynyt, kuumat kaasut eivät kulkeutuneet sen läpi, vaan savu- ja palokaasut kulkeutui-  
vat tuuletusraosta ulospäin virtausjärjestelmän kehittämän ulospäin suuntautuvan imun vuoksi. Puun syttymiseen tarvittavalle noin 300 °C:n tasolle poistoaukon lämpötilat nousivat noin 15–20 minuutin kuluttua palorasituksen alkamisesta.

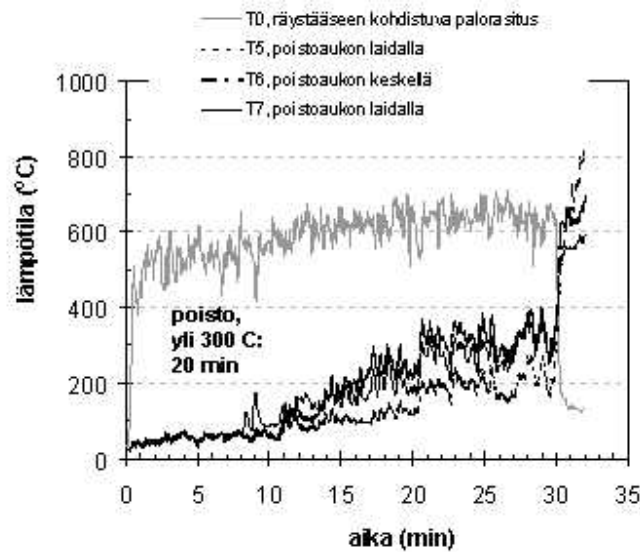


Kuva 5. Räystäskokeen koejärjestely ja palorasitus: a & b) Noin 70 cm räystäään alapuolella poltettiin kaasupoltinta 70 kW:n teholla. Lämpötilamittauksien paikat on merkitty symbolein T0–T7. c) Polttimen liekit osuivat räystäääseen ja löivät sen yli. Räystäääseen kohdistui noin 600–800 °C lämpötila (räystäääseen kohdistuvan lämpötilan mittausarvo T0 vaihteli tällä välillä eri kokeissa riippuen mittausanturin tarkasta sijainnista liekkien suhteen).

a)



b)



Kuva 6. Kokeessa mitatut lämpötiläkäyrät. a) Räystääseen kohdistuva lämpötila ja lämpötilat räystään sisällä. b) Poistoaukon luona mitatut lämpötilat.

Kehitetty räystäsratkaisu mitä todennäköisimmin estää ulkoseinän ulkopinnalla tai tuuletusraossa etenevän palon leviämisen yläpohjan onteloon.

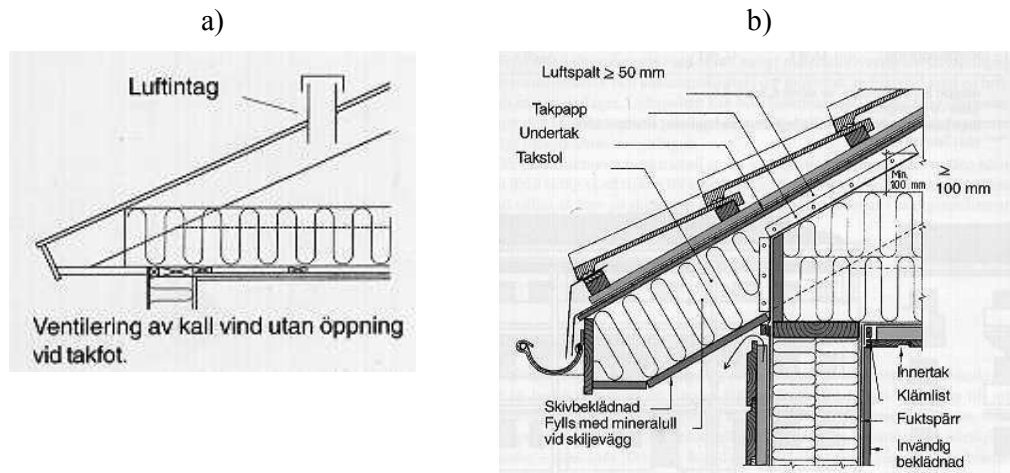
Se hidastaa merkittävästi lieskahtaneen huoneistopalon etenemistä yläpohjan onteloon. Tavallisella räystäillä varustetuissa taloissa lieskahtanut palo leviää yläpohjaan ja sytyttää sen rakenteet muutamassa kymmenessä sekunnissa, jolloin palokunnan saapuessa paikalle (yleensä ennen kuin 10–15 minuuttia on kulunut ilmoituksesta) palo on jo ehtinyt levitä laajalle yläpohjaan. Tässä työssä kehitettyä räystästyyppeä käytettäessä palo ei yleensä olisi levinnyt yläpohjaan palokunnan saapuessa, jolloin monessa tapauksessa

yläpohjan syttyminen voitaisiin estää. Niissä tapauksissa, joissa huoneistopalo leviäisi yläpohjaan, vahingot jäisivät useimmiten selvästi nykytasoa pienemmiksi.

Rivitalojen palotapauksista nousee esille voimakkaasti saunassa syttyvien palojen osuus. Näissäkin tapauksissa palo on toisinaan levinnyt yläpohjan onteloon. Saunan ikkunat ovat monesti selvästi huoneistojen ikkunoita pienempiä, joten niiden särkyessä ulos työntyvät lieskahtaneen palon liekit ovat pienemmät kuin huoneistopaloissa. Tällöin räystääseen kohdistuva palorasitus on huoneistopalon tapauksia pienempi ja tässä työssä kehitetty räystääs mitä ilmeisimmin hidastaisi tehokkaasti saunan ikkunan kautta leviäviä paloja.

### 3.2.2 Puukerrostalojen räystäät

Puukerrostaloissa palotekniseltä kannalta lähtökohtaisesti parhaana ratkaisuna pidetään räystäiden toteuttamista tiiviinä (Brandsäkra Trähus -hankkeen loppuraportti: Östman ym. 2002). Räystäiden sulkeminen on mahdollista toteuttaa esim. kuvassa 7 esitetyjä rakenteita käyttäen. Alla tarkastellaan puukerrostalon paloskenaarioita hieman tarkemmin: tuloksena on, että sprinklatuissa taloissa räystästä uhkaavien palotilanteiden taajuus on selvästi sprinklaamattomia taloja alhaisempi. Siksi suomalaisissa sprinklatuissa puukerrostaloissa saavutetaan täysin tiiviillä räystäsratkaisulla hyvin alhainen todennäköisyys palon leviämislle yläpohjan onteloon. Tämä voidaan yhdistää yläpohjan osastointitarpeisiin (kohta 3.4).



Kuva 7. Brandsäkra Trähus -hankkeen loppuraportissa (Östman ym. 2002) esitetyjä ratkaisuja räystäään sulkemiseen: a) kylmä yläpohja/ullakko ja b) lämmin ullakko.

Muut ominaisuudet ja toiminta voivat usein painaa rakennuksen suunnittelussa enemmän kuin palotekninen toiminta ja siksi esim. tuuletus usein järjestetään räystään kautta. Tässä tapauksessa huomion arvoista on, että lieskahtaneen palon todennäköisyys on huoneistokohtaisten sprinkelereiden vuoksi pieni<sup>2</sup>. Tällä on merkityksellinen seikka punnittaessa sitä, miten lieskahtaneen palon uhkakuvaan sprinklatuissa rakennuksissa tulee suhtautua. Tulee muistaa, että pelkkä todennäköisyys ei määrää riskien suuruutta, siihen vaikuttaa myös mahdollisten vahinkojen suuruus.

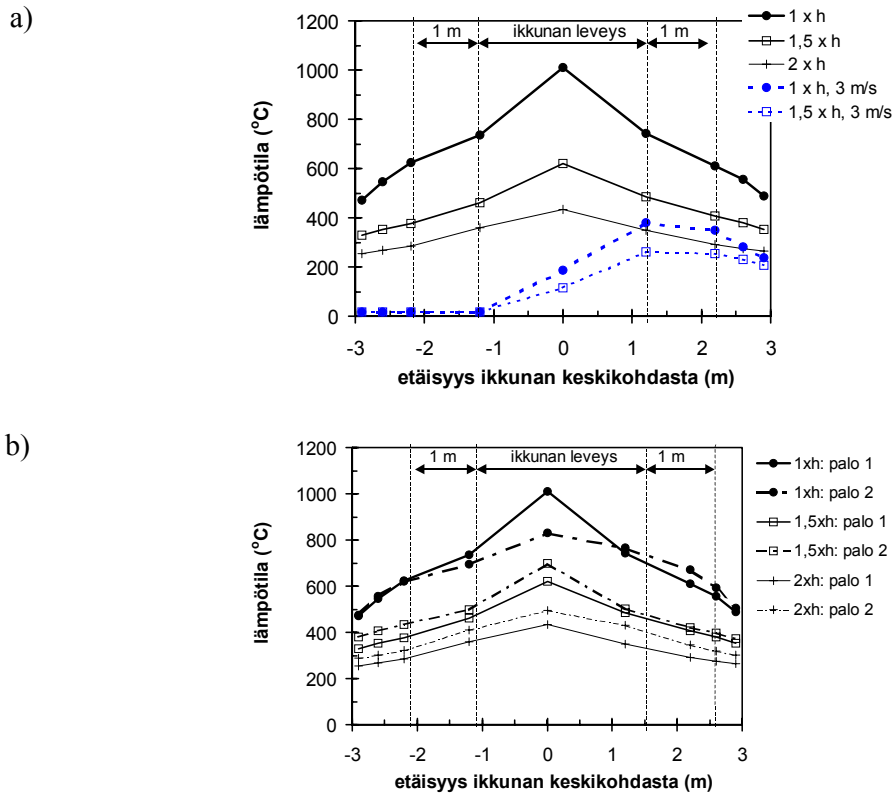
Suomen Rakennusmääräyskokoelman osan E1 kohdassa 7.6.1 annetaan ohje, jonka mukaan ”... tuuletusrako suljetaan räystäällä kerrosten ikkunoiden yläpuolisella osalla ja metrin niiden pielen linjasta ulospäin” (Ympäristöministeriö 2002). Tällä tavoin pyritään turvaamaan yläpohjan onteloa tai ullakkoa mahdollista, joskin epätodennäköistä, ikkunoista ulostulevaa lieskahtanutta paloa vastaa. Kysymystä siitä, onko yhden metrin levennys riittävä estämään palon leviämisen räystään kautta yläpohjan onteloon tai ullakolla, tarkasteltiin palonsimuloinnin avulla<sup>3</sup>. Kuvattu palotilanne on seuraava: huoneistossa palaa voimakas lieskahtanut palo (paloteho noin 7 MW), jonka liekit lyövät ulos ikkunasta julkisivulle. Ikkunan koko on  $1,2 \times 2,4 \text{ m}^2$  (korkeus  $\times$  leveys). Räystään oletettiin olevan yhden, puolentoista tai kahden ikkunan korkeuden päässä ikkunan yläreunan yläpuolella. Tuloksista nähdään (Kuva 8), että kun räystääs on yhden ikkunan korkeuden verran ikkunan yläpuolella (tai lähempänä), lämpötilat räystäällä ovat korkeita: ikkunan keskikohdalla lukema on  $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ , ikkunan reunan kohdalla runsaat  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  ja 1 m ikkunan pielestä runsaat  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kun räystääs ja ikkunan yläosan välimatka on  $1,5 \times$  ikkunan korkeus, lämpötilat ovat selvästi edellistä tapausta pienempiä: keskellä runsaat  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , ikkunan reunan kohdalla hieman alle  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  ja 1 m ikkunan pielestä noin  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kun räystääs ja ikkunan yläosan välimatka on kaksi kertaa ikkunan korkeus, lämpötilat ovat seuraavat: keskellä runsaat  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , ikkunan reunan kohdalla noin  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  ja 1 m ikkunan pielestä noin alle  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kun liekkiin kohdistuu heikko tai kohtalainen sivutuuli (tuulen nopeus 3 m/s), niin liekit taipuvat noin  $45^\circ$  ja korkeimman lämpötila paikka siirtyy sivusuunnassa. Tuuli kuitenkin myös viilentää liekkejä siten,

---

<sup>2</sup> Tillanderin ja Keski-Rahkosen (2001) tutkimustulosten mukaan voidaan  $100\text{--}10\ 000 \text{ m}^2$ :n suuruisten asuinrakennusten syttymistäajuustiheyden arvioida olevan noin  $5 \cdot 10^{-6}$  paloa/ $\text{m}^2$ /vuosi. Tämä vastaa esimerkiksi  $1\ 000 \text{ m}^2$ :n suuruudessa talossa syttymistäajuutta  $5 \cdot 10^{-3}$  paloa/vuosi/rakennus eli tulipalo sattuu noin joka 2 000. rakennuksessa. Karkealla tasolla voidaan arvioida, että ilman sprinklausta lieskahdukseen kehittyy noin 5–20 % paloista. Huoneistosprinklerit vähentävät lieskahduksen mahdollisuutta voimakkaasti: voidaan olettaa, että toimiessaan ne estävät tilan lieskahtamisen. Toimimattomuuden todennäköisyyden voidaan arvioida olevan 10–5 % (Östman ym. 2002). Sprinklatussa rakennuksessa todennäköisyys, että palo kehittyy lieskahtaneeksi on siis varsin pieni,  $2 \cdot 10^{-3} \text{--} 2 \cdot 10^{-2}$ . Esimerkilaskelmamme  $1\ 000 \text{ m}^2$ :n suuruudessa talossa lieskahtaneiden palojen taajuus pienenee sprinkelereiden vuoksi siis noin arvoon  $1 \cdot 10^{-5} \text{--} 1 \cdot 10^{-4}$  lieskahtanutta paloa/vuosi/rakennus eli lieskahtanut palo syntyy noin joka 10 000.–100 000. rakennuksessa per vuosi.

<sup>3</sup> Laskut tehtiin ohjelman Fire Dynamics Simulator versiolla 3.0 (McGrattan ym. 2002).

että lämpötilan korkeimmat arvot putoavat voimakkaasti: kun räystäs on yhden ikkunan korkeuden verran ikkunan yläpuolella, korkein lämpötila räystäällä on hieman alle 400 °C ja kun räystäään ja ikkunan yläosan välimatka on  $1,5 \times$  ikkunan korkeus, korkein lämpötila räystäällä jää runsaaseen 250 °C:seen.



Kuva 8. a) Palorasitus 1, lieskahtaneen palon aiheuttamat lämpötilat räystäällä (10 cm räystäään alapuolella, 20 cm:n etäisyydellä seinästä), kun räystäs on yhden, puolentoista ja kahden ikkunan korkeuden verran ikkunan yläpuolella ja ilma on tyyni. Katkoviivoin merkityillä käyrillä on esitetty, miten heikko tai kohtalainen sivutuuli (tuulen nopeus 3 m/s) vaikuttaa tilanteeseen, kun räystäään ja ikkunan yläreunan välimatka on yhden ja puolentoista ikkunan korkeuden suuruinen. b) Palorasituksen 1 ja 2 vertailu.

Simulointiin valittu huoneistopalo on varsin kuuma, mutta ei epärealistinen. Se noudattaa Eurokoodi 1:ssä esitettyä Law'n ja O'Brienin suuren koeaineiston perusteella päättelemiä lämpötiloja (Eurocode 1-1-2 2001, Law & O'Brien 1981). Kyseiset lämpötila-arvot edustavat paloja, joissa etenkin ikkunan yläpuoliset lämpötilat ovat korkeita. Simuloinnit suoritettiin myös sellaiselle palorasitukselle, jossa ikkunan yläpuoliset lämpötilat jäivät alemmiksi. Palorasituksen muuttaminen toteutettiin siten, että huoneen sisällä olevan palokuorman lämpöarvoa pienennettiin noin puoleen aiemmasta arvostaan. Tilanteessa, jossa ikkunan ylälaidan ja räystäään välimatka on lyhyt (1 ikkunan korkeus)

tämä muutos alensi lämpötiloja räystäään keskellä noin 200 °C, mutta reuna-alueilla lämpötilat eivät muuttuneet oleellisesti. Kahdessa muussa tapauksessa (ikkunan ylä-laidan ja räystäään välimatka 1,5 tai 2 kertaa ikkunan mitta) lämpötilat nousivat 50–80 °C. Alla esitetyt johtopäätökset pätevät siis molemmille palorasituksille.

Tuloksista nähdään selvästi, että jos huoneiston ikkunan ylälaita on lähempänä kuin yhden ikkunan korkeuden mitan päässä räystäältä, metrin etäisyydellä ikkunan piilien linjasta ulospäin palavien materiaalien syttymisvaara on suuri. Jos välimatka on suurempi, puolitoista kertaa ikkunan korkeus, syttymisvaara metrin etäisyydellä ikkunan piilien linjasta ulospäin on pienempi, muttei kuitenkaan pieni (lämpötila on noin 400 °C). Kun välimatka on kaksi ikkunan korkeutta, syttymisvaara ei enää ole kovin merkittävä (lämpötila alle 300 °C). Välimatka ikkunan ylälaidan ja räystäään välillä on yhtä oleellinen tekijä paloturvallisuuden kannalta kuin se, miten leveältä alueelta räystääs on suljettu.

Ulkoisen palon syttyminen on tärkeä puukerrostalon paloskenaario. Tällainen palo syntyy tyypillisesti talon alaosassa ja merkittävä osuus näistä paloista on sytytetty tahallaan. Ulkoinen palo voi syttyä myös esim. parvekkeelta epäasianmukaisesti poltetun kynttilän seurauksena. Ulkoinen palo voi levitä räystäälle asti: todennäköisyys tälle riippuu julkisivun palonlevittämisoimainaisuuksista ja palokunnan toimista. Jos julkisivun rakenteet on suunniteltu siten, että ”ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviäminen seinässä on estetty riittävän tehokkaasti” RakMK:n osan E1 kohdan 8.3.5 vaatimalla tavalla, on myös ulkoisen syttymisen räystäälle ja yläpohjan ontelolle aiheuttama vaara varsin pieni (Ympäristöministeriö 2002). Ulkoista syttymistä vastaan edellä mainittu ikkunan yläpuolelle tehtävä räystäään tuuletusraon katkaisu ei luonnollisestikaan ole riittävä, koska ulkoisesti alkanut palo voi saapua tuuletusraolle kohdissa, joissa rakoa ei ole katkottu. Se, miten tähän vaaraan tulee varautua, riippuu siitä aiheutuvien henkilö- ja omaisuus-riskien sekä palokunnan toimintaan ja turvallisuuteen liittyvien riskien suuruudesta. Tässä tulee esille eri palontorjuntakeinojen vaikutuksen suhteellinen arviointi: voidaan esimerkiksi ajatella, että jos julkisivun palon leviäminen on estetty tehokkaasti (keinoja tähän esitellään jäljempänä), niin tällöin räystäään voisi toteuttaa avoimena, mutta toisaalta tapauksissa, joissa nopea julkisivulla tapahtuva palon leviäminen on mahdollista, räystääs tulisi sulkea kokonaan. Lopulta myös yläpohjan osastoinnin tehokkuus tulisi kytkeä tähän pohditaan. Tällaiseen lähestymistapaan liittyvät määrälliset vaatimukset ja niiden todentamisenmenettelyt vaativat lisäselvityksiä.

Edellä esitettyä rivi- ja pientaloihin kehitettyä räystäästyyppeä voidaan soveltaa antamaan lisäaika myös korkeammassa rakennuksissa. Esimerkiksi ulkoisen syttymisen paloskenaariossa sillä saavutettava palon etenemisviive voisi tuoda mukanaan merkittävän paloturvallisuusedun.

### 3.3 Yläpohjan ontelon osastoinnin palonkesto

Yläpohjan ontelon osastoinnin tavoitteena on estää palon ja savun eteneminen syttymis-osastosta muihin osastoihin lähinnä pelastus- ja sammutustoimien helpottamiseksi sekä omaisuusvahinkojen rajoittamiseksi. Perusajatuksena on, että palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa ei saa olennaisesti kasvaa ontelon johdosta (RakMK E1, kohta 7.6.1).

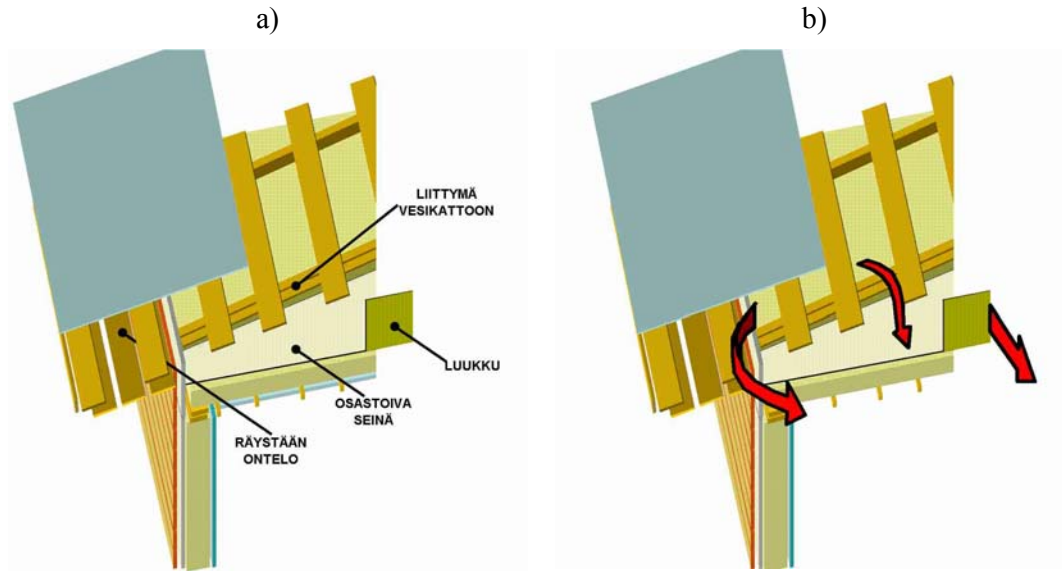
Yläpohjan ontelon osastoinnin peruselementti on riittävän palonkeston omaava osastoiva rakenne, nykyvaatimus on luokka EI30. Tämä seinä itsessään ei ole yläpohjan ontelon osastoinnin heikko kohta (Anon. 1997), vaan palonleviämisen kannalta kriittisiä tekijöitä ovat (ks. Kuva 9):

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

Jos yläpohjassa on läpivientejä esim. sähköasennuksia varten, myös niiden tiiviys on tärkeää.

Eräs mahdollisesti tärkeä tekijä on vesikattorakenteen palonkesto: jos katto pettää, niin osastoivan rakenteen ja vesikaton liittymä voi pettää ja palo leviää osastoivan rakenteen yli. Toisaalta katon romahtaminen voi avata tien savukaasujen tehokkaalle tuulettumiselle pois ontelosta, mikä voi vähentää palovaaroja.





Kuva 9. a) Yläpohjan ontelon osastoinnin kriittiset kohdat ja b) palon leviämisreitit.

### 3.3.1 Osastoinnin toiminnan palokoe VTT:n kuutiouunilla

Hankkeessa tehtiin koe, jossa tutkittiin osastoivan seinän liittymistä vesikattoon, palon leviämistä räystäään kautta sekä seinässä olevan luukun toimintaa. Lisäksi kokeessa saatiin tietoa vesikattorakenteen toiminnasta palon aikana. Kokeet tehtiin VTT:n kuutiouuniksi kutsutulla palokoeuunilla, jonka mitat ovat 1,5 m × 1,5 m × 1,5 m.

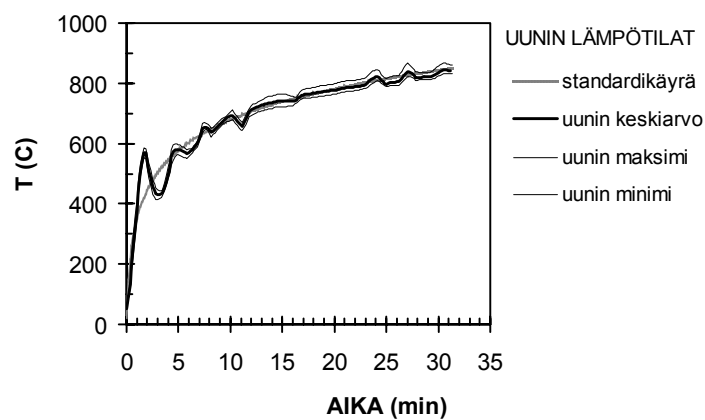
#### 3.3.1.1 Koejärjestely

Koejärjestely ja rakenteiden yleispiirteet esitetään kuvassa 11. Koejärjestely oli pääpiirteissään seuraava:

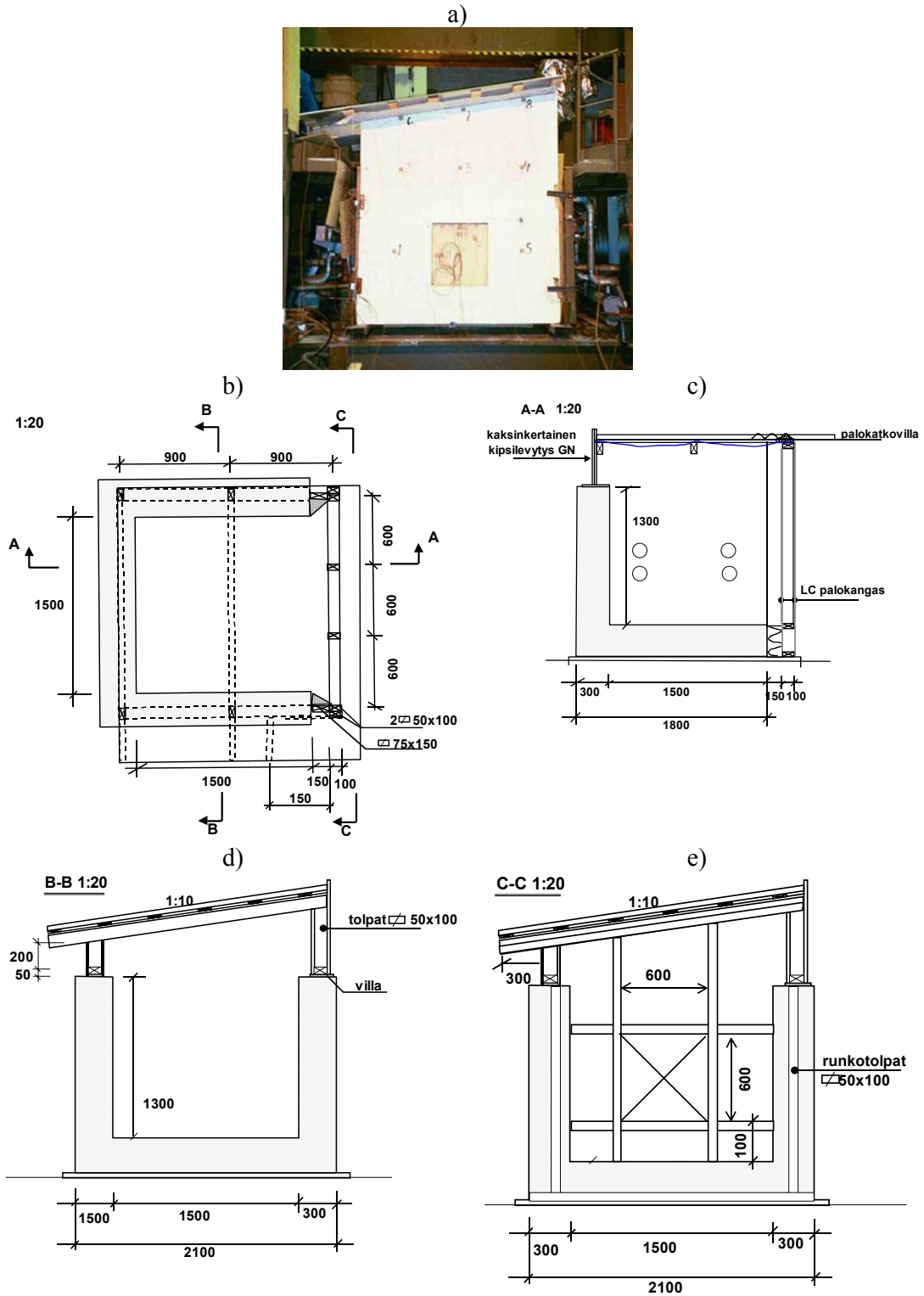
- Rakenne kuvasi lyhyttä osaa rivitalon osastoidusta yläpohjan ontelosta. Talon leveysuunnassa rakenne mallintaa matkaa harjalta toiselle räystäälle.
- Koekappale koostui kahdesta perusosasta: rivitalon kattorakenteita kuvaavasta osasta ja osastoivasta seinästä. Lisäksi rakenteeseen kuului seinärakenteita ja osastoivan seinän luukku.
- Koekappaleen osat asennettiin uunin päälle ja pystyaukkoon siten, että kattorakenteen ja osastoivan seinän yhtymäkohta muodostui normaalia rakennustapaa vastaavaksi. Kattorakenteen alle asennettiin seinärakenteita siten, että katon matalaan reunaan muodostui räystästä kuvaava rakenne.

- Osastoiva seinä toteutettiin normaalista levyrakenteesta poiketen käyttäen palokangasta.
- Uunin lämpötilaa ja painetta ohjattiin ja mitattiin standardin EN1363-1 (ISO 834) mukaisesti (Kuva 10).
- Rakenteen lämpötiloja mitattiin 26 lämpötila-anturilla, jotka kiinnitettiin kuvan 12 esittämiin paikkoihin kuvatekstissä kerrotulla tavalla.

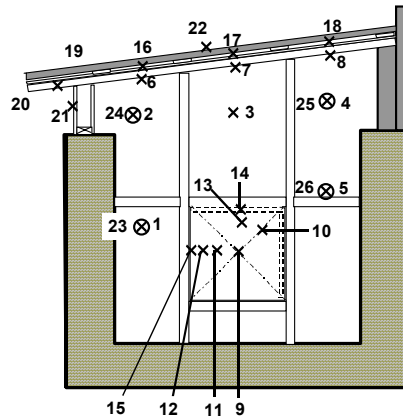
Tarkemmat yksityiskohdat tutkituista rakenteista kerrotaan jäljempänä.



*Kuva 10. Uunin lämpötila kokeen aikana. Lyhytaikainen standardikäyrän ylittävä lämpötilanousu kokeen alussa johtuu puurakenteiden syttymisestä ja niiden palamisen tuottamasta lämmöstä.*



Kuva 11. Koejärjestely ja koekappaleen rakenne: a) valokuva, b) kuva ylhäältä katsottuna, c) leikkaus A-A, d) leikkaus B-B ja e) leikkaus C-C.



LÄMPÖTILA-ANTURI	PAIKKA
1-8	SEINÄSSÄ PALOKANKAAN PÄÄLLÄ
9-14	LUUKUN PINNALLA
15	LUUKUN REUNAN RAOSSA
16-18	KATTEEN ALLA, 50 mm SEINÄSTÄ
19	RÄYSTÄÄN ONTELO: KATTEEN ALLA
20	RÄYSTÄÄN ONTELO: ALAPINNAN SULKEVA LEVY
21	RÄYSTÄÄN ONTELO: SEINÄLEVYN ULKOPUOLI
22	KATTOPELLIN PÄÄLLÄ
23-26	KANKAIDEN VÄLISSÄ

Kuva 12. Lämpötilamittausten paikat. Muut lämpötila-anturit on merkitty rasteilla, paitsi seinän sisä- ja ulkopinnan välissä vallinnutta lämpötilaa mitanneet anturit 23–26, jotka on merkitty ympyröillä.

### 3.3.1.2 Palokankaalla toteutettu osastointi

#### Kangas ja sen asennus

Osastoiva seinä oli muuten tavanomaisen rivitalon osastointivaatimuksen EI 30 täyttävän seinärakenteen kaltainen, paitsi että rakennuslevyjen sijasta käytettiin paloon reagoivalla aineella käsiteltyä kangasta. Kangas oli käsitelty vain toiselta puolelta. Sitä nimitetään jatkossa palokankaaksi.

Kankaan toimitti ja asensi paikalleen Palokatkomiehet Oy, joka maahantuo ja markkinoi tuotetta nimellä LC-palokangas<sup>4</sup>. Seinärakojen molemmille puolille kiinnitettiin yksi kangas siten, että käsitelty pinta oli tulen puolella tulta vastaan ja tulen vastakkaisella

<sup>4</sup> Tuotenimet mainitaan vain materiaalien ja rakenteiden mahdollisimman tarkan kuvaamisen vuoksi, eikä niiden mainitseminen tarkoita erityistä suositusta VTT:n taholta.

puolella ulkoilmaa vastaan. Kangas kiinnitettiin seinän koolauksiin huopanauloilla siten, että naulojen välimatka oli noin 75–100 mm (ks. Kuva 13). Kankaiden saumat limitettiin koolauksen leveydeltä (n. 50 mm, limitys tehtiin myös luukun ympärille).



*Kuva 13. Kankaan kiinnitys. Kuva esittää aluetta, jonka koko on  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ .*

#### **Havainnot kankaasta kokeen aikana**

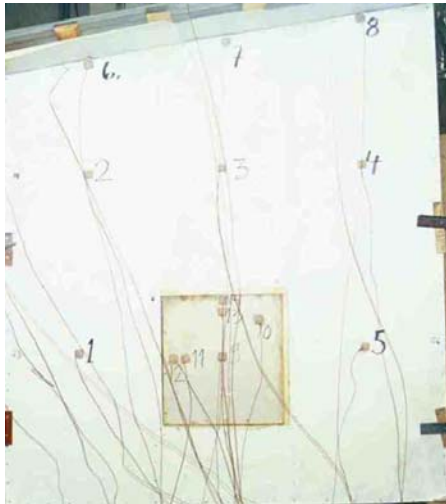
Noin puolen minuutin kuluttua kokeen alkamisesta kankaan tulen puoleinen pinta alkoi tummua. Hetkellä 1 minuuttia 20 sekuntia tulen puoleisen pinnan havaittiin kupruilevan ja 1:30 kokeen alusta tässä pinnassa havaittiin rakkuloita.

Tulen vastakkaisella puolella kankaan pinnan värin muutos oli kokeen alussa niin vähitäistä, että sen alkuhetkeä on vaikea määrittää. Alla olevassa, hetkellä 3:10 otetussa kuvassa 14b, palokangas on kellertynyt lievästi alueilla, missä koolausta ei ole. Kankaan ulkopinnan lämpötila oli tällöin noin  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aikavälillä n. 3–4 minuuttia palokankaan lämpötila ei noussut, joka ilmentää sitä, että tällöin kankaassa tapahtui lämpöä sitovia ilmiöitä; sitä ei voida päätellä, oliko kyseessä fysikaalinen ilmiö, esim. veden höyrystyminen vai kemiallinen reaktio.

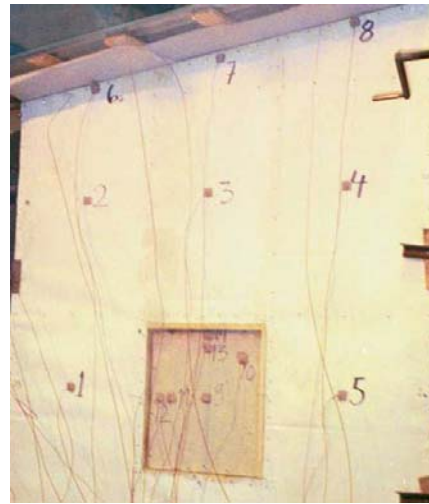
Kankaan ulkopinnan tummeneminen kehittyi hitaasti noin 9 minuuttiin saakka (Kuva 14c), jonka jälkeen se kiihtyi (vrt. kuvaa c kuvaan d, joka on otettu runsaan 19 minuutin kuluttua kokeen alusta). Kankaan lämpötila oli tällöin noin  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kokeen lopussa kangas oli varsin tumma (Kuva 14e).

Kankaan tai sen liitosten ei havaittu vuotavan savukaasuja kokeen aikana.

a) ennen koetta



b) 3:10



c) 9:00



d) 19:00



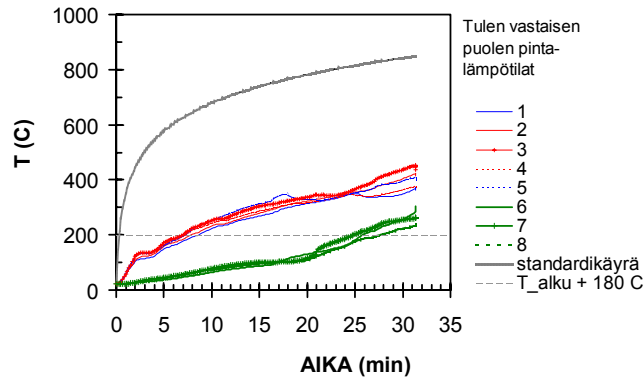
e) kokeen loppuvaiheilla



*Kuva 14. Etuseinä tulen vastakkaisella puolella kokeen eri aikoina.*

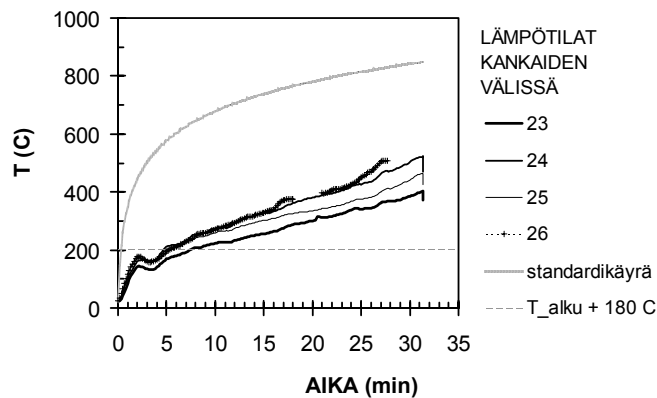
## Kankaalla toteutetun osastoivan rakenteen tiiviys ja eristävyys (EI)

Palokankaasta 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 kokeen alkuvaiheessa: esim. yksittäisen mittauspisteen (piste 3) lämpötila nousi 180 °C kokeen alkuhetken lämpötilaa korkeammaksi 7 minuutin kuluttua kokeen alkamisesta (Kuva 15).



Kuva 15. Palokankaan pinnalla mitatut lämpötilat. Numerointi vastaa kuvassa 11 esitettyä lämpötila-antureiden paikkojen merkintää.

Lämpötiloja mitattiin myös kankaiden välissä mittauspisteissä numero 23, 24, 25 ja 26. Nämä lämpötilat esitetään alla (Kuva 16). Näistä käyristä voidaan lukea, että yksi kokeessa testatun kaltainen palokangas lämpenee tulen vastakkaiselta puolelta yli em. lämpötilarajan alle 5 minuutissa.



Kuva 16. Kankaiden välissä mitatut lämpötilat. Numerointi vastaa kuvassa 12 esitettyä lämpötila-antureiden paikkojen merkintää.

### 3.3.1.3 Luukku

Kokeen tarkoituksena oli tutkia rivitalon yläpohjan ontelon osastoivaan seinään työmaalla tehdyn luukun toimintaa standardilämpötila-aikakäyrän mukaisessa lämpötilarasiuksessa.

Mitään yleiseen käyttöön vakiintunutta ratkaisua tällaisille luukuille ei ole. Joitain sen rakenteeseen, normaalikäytön aikaiseen toimintaan ja paloturvallisuuteen liittyviä luukun toteutusta ohjaavia tekijöitä voidaan kuitenkin yksilöidä.

Paloturvallisuuden kannalta tärkeintä on se, että luukku on mahdollisimman suurella todennäköisyydellä suljettu: hyväkään luukku ei auta palotilanteessa, jos se auki. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että muusta rakenteesta irralliset luukut, jotka aukaisemisen jälkeen suljetaan nostamalla ne paikalleen, eivät ole suositeltavia rakenteita, koska sulkeminen voi helposti jäädä tekemättä inhimillisen erehdyksen tai laiminlyönnin takia. Paras vaihtoehto on saranoitu itsestään sulkeutuva luukku, joka tavallisia saranoita käytettäessä voidaan toteuttaa kiinnittämällä luukku ylälaidasta. Saranointi voidaan tehdä myös luukun sivuille, jos käytetään erityisiä sulkeutuvia saranatyyppejä.

Luukku tulee sulkea mahdollisimman tiiviisti. Tässä mielessä ruuvikiinnitys olisi hyvä, mutta siihen liittyy se ilmeinen vaara, että käytön jälkeisessä sulkemisessa ruuvien uudelleenkiinnitys laiminlyödään. Siksi ruuvikiinnitystä vähemmän tiiviiden sulkemistapojen, kuten salpojen käyttö on ilmeisesti suositeltavampaa.

Luukussa tulee olla levytys molemmin puolin, koska asennettaessa ei voida tietää, kumman puolen osastossa palo mahdollisesti alkaa. Näin luukku koossa pitävät rakenteet eivät altistu suoraan tulelle. Toinen näkökulma tähän on se, että luukku on oleellisen tärkeä osa koko osastorajan toimintaa, koska luukun levyjen pettäessä tulipalo pääsee suurella varmuudella leviämään toiseen osastoon: palonkestokokeen olosuhteethan vastaavat lieskahtanutta paloa ja yläpohjan matalassa ontelotilassa tyypillisestä, esim. 600 mm × 600 mm kokoisesta luukusta lieskahtaneen palon liekit työntyvät palo-osastoon kehittyneen paineen avulla pitkälle toiseen osastoon sytyttäen aluskatteen ja puurakenteet. Siksi, vaikka yksilevyinen ratkaisu voikin periaatteessa toteuttaa sen palonkestoa koskevan vähimmäisvaatimuksen (puolet osastoivan rakenteen palonkestosta, RakMK E1 7.3.1), niin tällaista ratkaisua ei voida pitää paloteknisesti suositeltavana.

Saranoitu luukku ei sulje aukkoa hermeettisesti, vaan luukun ja sen sulkeman aukon reunojen väliin jää pakostikin pieniä välyksiä. Helposti toteutettava tapa sulkea näitä rakoja on tehdä toinen luukun levyistä aukon kokoa suuremmaksi, jolloin luukun tälle puolelle syntyy huullos. Kun luukku suljetaan tiukasti, huullos ja osastoiva seinä painuvat toisiaan vasten muodostaen selvästi tehokkaamman esteen savukaasuille kuin se



rako, joka jää luukun ja aukon reunojen väliin. Luukun tiiviyyttä voidaan parantaa edelleen, jos se luukun huullokseton levy kohtaa luukun ollessa suljettuna vastakappaleen, esim. puuriman.

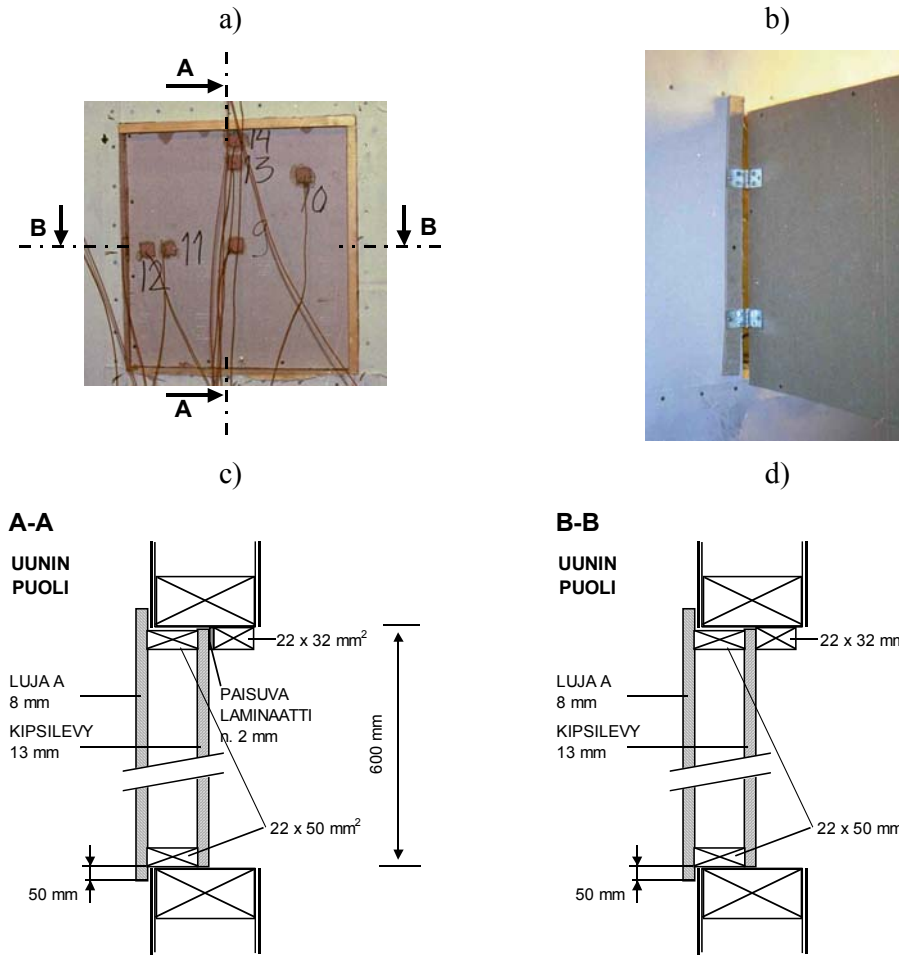
Käytännössä on helpointa, jos luukun materiaalit ovat sellaisia, joita käytetään muissakin rakenteissa, jolloin ne ovat työmaalla helposti saatavilla. Edellä esitetyt vaatimukset voivat kuitenkin osin olla ristiriidassa tämän kanssa, etenkin koskien luukun levyjen materiaalia. Eräs luonteva materiaali olisi kipsilevy, jota usein käytetään osastoivissa seinissä ja jota rakennustyömailla on saatavilla lähes poikkeuksetta. Huullos voi luukua suljettaessa joutua alttiiksi mekaaniselle rasitukselle, joka vähitellen voi murtaa kipsilevyn, mikä huonontaa luukun toimintaa ja voi johtaa varsin lyhyeen käyttöikään. Käyttämällä jotain mekaanisesti lujempaa levyä, tätä ongelmaa voidaan lieventää. Myös kipsilevyn mekaaninen vahvistaminen esim. pellillä on mahdollinen ratkaisu.

### **Luukun rakenne ja asennus**

Kokeessa käytetty luukku esitetään kuvassa 17. Tulen puolella olleessa levyssä oli n. 50 mm huullos. Mekaanisen kestävyuden vuoksi tämä levy tehtiin kuitusementtilevystä (8 mm Luja A -levy<sup>4</sup>). Tämä puoli asetettiin tulen puolelle, koska haluttiin nähdä, miten luukun kiinnityksessä käytetyt tavalliset saranat (Kuva 17b) kestävät kokeen palorasituksen. Tulen vastaisella puolella käytettiin 13 mm paksua kipsilevyä. Levyt kiinnitettiin luukun koolauksiin ( $22 \times 50 \text{ mm}^2$ ) nauloin.

Luukun reunojen tiivistämisessä kokeiltiin kolmea eri tapaa:

- Luukun edestä päin katsottuna oikealla olleeseen reunaan lisättiin vastakappale ( $22 \times 32 \text{ mm}^2$  lauta), jota vastaan luukku suljettuna painui.
- Luukun yläreunaan tehtiin edellä kuvatun kaltainen puinen vastakappale, jota vielä tiivistettiin lisää paisuvalla laminaatilla.
- Luukun alareunaan ja edestä päin katsottuna vasemmalla olleeseen reunaan ei tehty lisätiivistyksiä.



Kuva 17. Luukku ja sen rakenne: a) valokuva edestä, b) luukun kiinnitys uunin puolella, c) leikkaus A-A ja d) leikkaus B-B. Kuvat on tarkoitettu havainnollistamaan rakennetta, ne eivät ole tarkkoja mittakaavapiirustuksia.

### Luukun toiminta kokeessa

Kokeen parin ensimmäisen minuutin aikana savua tuli luukun reunoista ajoittain huomattavan paljon myöhempiin ajanhetkiin verrattuna. Toisaalta ajoittain savua ei tullut ulos juuri lainkaan. Tämä selittyy sillä, että kokeen alussa paine uunin sisällä vaihteli voimakkaasti: ajoittain paine uunin yläosassa oli lähes 30 Pa ja alaosassa 35 Pa<sup>5</sup>. Ulostuleva savu oli vaaleaa. Ensimmäisenä (hetkellä 0:20) savua alkoi tulla ulos luukun vasemmasta reunasta. Aikana 0:40–1:00 vasemmasta reunasta ulostulevan savun määrä

<sup>5</sup> Paineen nousu kokeen alkuhetkinä johtui puuosien syttymisestä.

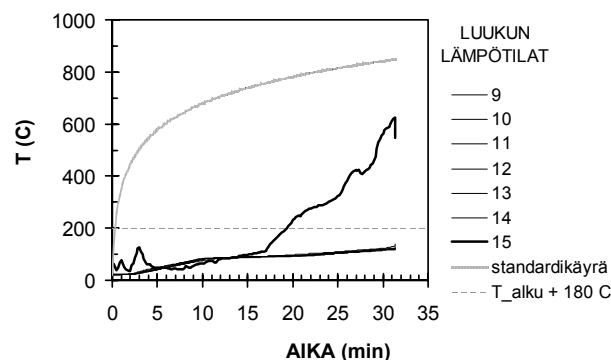
kasvoi ja savua alkaa vuotaa myös oikeasta reunasta: ensin ylhäältä ja sitten myös alareunasta. Aikavälillä 1:00–2:00 savun vuotaminen tasaantui siten, että vasemmasta yläkulmasta tuli vaaleaa savua ohuehko pilvi. Koko vasen reuna vuoti hieman savua sanoin kuin oikea reunakin. Oikeasta alakulmasta alareunan puolelta tuli hieman enemmän savua kuin reunasta, mutta vähemmän kuin vasemmasta yläkulmasta.

Seuraavan puolentoista minuutin ajan (2:00–3:30) savun ulostulo luukusta pysyi samanaikaisena kuin mihin se kahden ensimmäisen minuutin aikana tasaantui. Eniten savua tuli vasemmasta yläkulmasta. Savu oli vaaleaa ja sitä vuoti ohuehko pilvi. Koko vasen reuna vuoti hieman savua sanoin kuin oikea reunakin. Oikeasta alakulmasta alareunan puolelta tuli hieman enemmän savua kuin reunasta, mutta vähemmän kuin vasemmasta yläkulma. Yläreunasta ei juurikaan tullut savua.

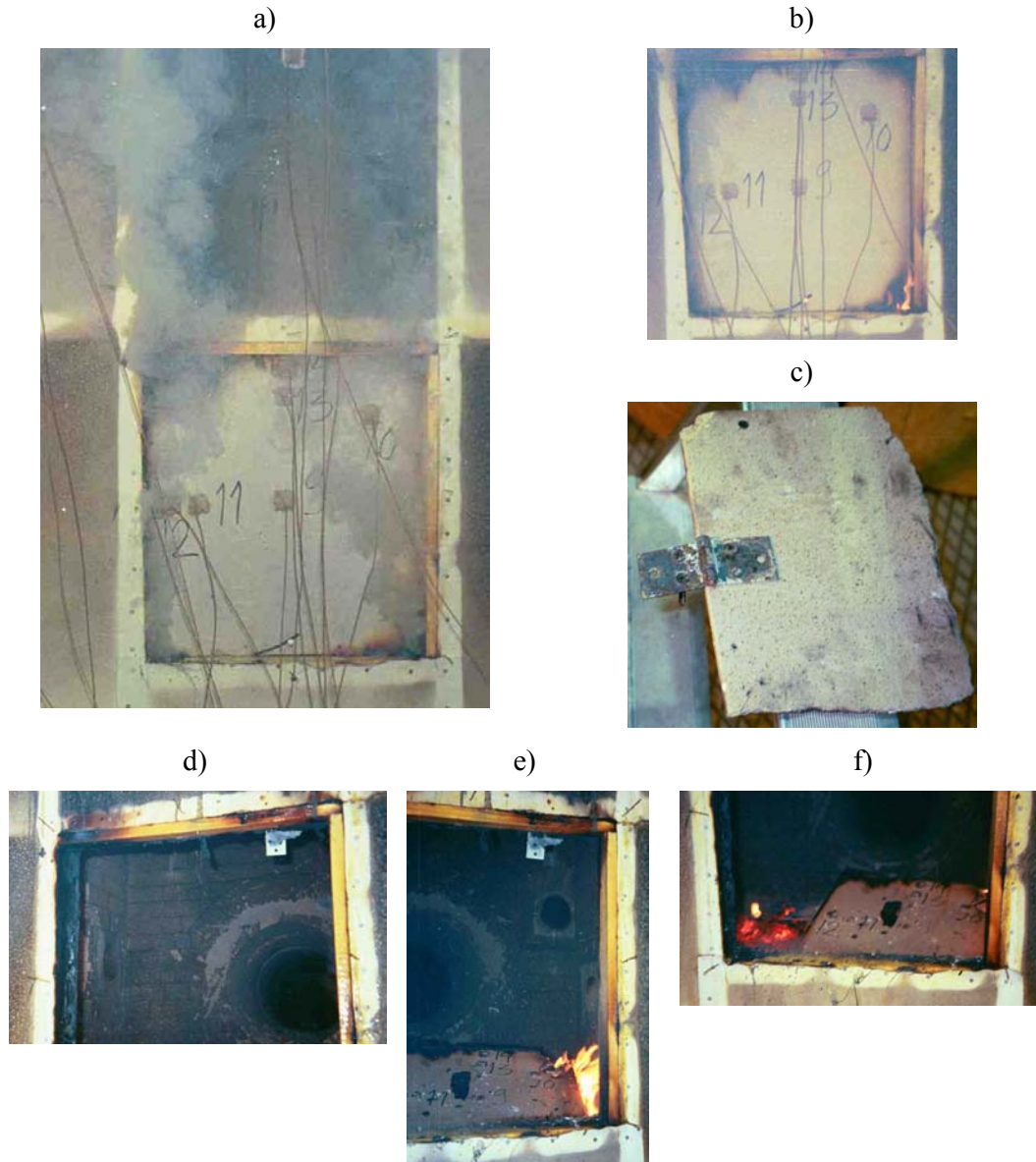
Aikavälillä 3:30–4:00 yläreunasta vuotavan savun määrä lisääntyi selvästi havaittavaksi: savua alkaa tulla kahdesta kohdasta yläreunan vasemmalla puolella. Kohdat sijaitsevat noin 20 cm:n matkalla vasemmasta reunasta lukien. Välillä 4:00–8:00 luukun savuvuoto pysyi ennallaan. 8 minuutin kuluttua kokeen alusta yläreunasta vuotavan savun määrä lisääntyy selvästi havaittavaksi: savua alkaa tulla kahdesta kohdasta yläreunan vasemmalla puolella. Kohdat sijaitsevat noin 20 cm matkalla vasemmasta reunasta lukien. Tämän jälkeen luukun savuvuoto pysyy oleellisesti ennallaan 17 minuuttiin saakka.

17 minuutin kuluttua kokeen alusta lämpötila luukun vasemman reunan raossa alkaa selvästi kasvaa (lämpötila-anturi 15, Kuva 18). Lämpötilan kasvu jatkuu kokeen loppuun asti suhteellisen tasaisella nopeudella, noin 30 °C/min. Hetkellä 17 minuuttia ulostulevan savun lämpötila oli 115 °C ja kokeen lopussa 560 °C.

Saranat kestivät koko kokeen ajan (ks. Kuva 19c).



Kuva 18. Luukun pinnalla mitatut lämpötilat (mittauspaikat, ks. Kuva 12).



Kuva 19. a) Luukun toimintaa havainnollistava kuva (23 minuuttia kokeen alusta). b) Kokeen jälkeen syttynyt liekki oikeassa alakulmassa. c) Sarana kokeen jälkeen. d) Luukun yläreuna ja vasen reuna kokeen jälkeen. e) Luukun ylä- ja alareuna sekä oikea reuna kokeen jälkeen. f) Luukun alareuna kokeen jälkeen.

Kun uunin polttimet sammutettiin kokeen lopussa, luukun oikeasta alanurkasta vuotavat kaasut syttyivät (Kuva 19b). Tämä johtui ilmeisesti siitä, että puu raon vieressä pystyi syttymään, kun polttimet eivät enää kuluttaneet happea. Puuhun syntynyt liekki sytytti ulostulevat kaasut, joissa palamattomien hiilivetyjen osuus oli sopiva palamiselle.

Syttyminen tapahtui juuri tässä kohdassa ilmeisesti siksi, että se oli lähellä uunin oikeassa alalaidassa sijaitsevaa poltinta ja näin puu tällä kohdalla oli varsin kuuma.

Luukun tiiviyttä tutkittiin pumpulitukkokokeiden avulla. Näitä kokeita tehtiin 5 kappaletta. Niiden ajanhetket, tutkitut paikat ja tulokset olivat seuraavat:

- 14:15–14:45: Luukun vasen yläkulma: pumpulin väri muuttui hieman.
- 18:15–18:45: Luukun vasen yläkulma: pumpulin väri muuttui.
- 20:30–21:00: Luukun vasen yläkulma: pumpulin väri muuttui.
- 26:25–26:55: Luukun oikea alakulma: pumpulin väri muuttui.
- 29:15–29:45: Luukun vasen yläkulma: pumpulin väri muuttui.

Kokeen jälkeen luukun vasen reuna, jossa ei ollut lisätiivistysrakenteita, oli hiiltynyt (Kuva 19d). Myös alareunassa ei ollut lisätiivistysrakenteita ja se oli hiiltynyt osin, mutta osin puuainees oli säilyttänyt normaalin ulkonäkönsä. Luukun oikeassa reunassa oli lisätiivisteenä puinen vastakappale. Tässä reunassa puu oli pääosin säilyttänyt normaalin ulkonäkönsä, paitsi ala- ja yläkulmissa, joissa oli mustunutta puuta. Osa mustuneesta alueesta oli hiiltynyt. Luukun yläreunassa oli puisen vastakappaleen lisäksi paisuva laminaatti: yläreuna oli mustunut lähinnä vasemmalta puolelta, jossa mustumiseen ovat osaltaan vaikuttaneet vasemmasta reunasta vuotaneet kuumat kaasut.

### **Luukun toiminnan arviointi**

#### *Tulen vastakkaisen puolen lämpötilan nousu ja vuotavien kaasujen lämpötila*

Osastoivia rakenteita koskevien vaatimusten mukaan luukun eristyskykyä arvioidaan sen ulkopinnan lämpötilan nousun mukaan: ulkopinnan lämpötilan nousun alkulämpötilasta tulee pysyä alle 180 °C:n kussakin mittauspisteessä ja eri mittauspisteiden keskiarvon nousun alkutilanteen keskiarvon yläpuolelle tulee olla alle 140 °C. Tiiviyttä arvioidaan rakenteeseen syntyvien rakojen koon tai pumpulitukkokokeen avulla, jossa riittävän tiiviyden kriteerinä on se, että raon kohdalle asetettu pumpulitukko ei saa syttyä niiden 30 s:n aikana, jonka ajan tukkoa pidetään rakenteen pinnalla.

Rakenteen luukku toimi näiden kriteerien suhteen hyväksyttävällä tavalla koko kokeen keston, 30 minuutin, ajan.

#### *Luukusta vuotavien kaasujen määrän vaikutusten arviointi*

Seuraavaksi tarkastellaan hieman lähemmin palon leviämiskaavaa yläpohjan osastoidussa ontelossa, jos siinä käytettäisiin luukua, joka toimisi kokeessa tutkitun luukun kaltaisesti. Erityisesti keskitytään luukun kautta vuotaneiden palamiskykyisten kaasujen

määrään. Koska kokeessa sovellettu standardipalokäyrä kuvaa lieskahtaneen palon kehitystä ja lämpötiloja, koskee tarkastelu siis tilannetta, jossa yläpohjaan on syntynyt täysin kehittynyt palo.

Luukun oikeassa alakulmassa ollutta vuotokohtaa tutkittiin lähemmin kokeen aikana: se oli keskeltä korkeampi ja se kaventui reunojaan kohti. Sen kooksi arvioitiin hetkellä 28 minuuttia: raon korkeus oli noin 10 mm ja leveyden noin 30 mm. Sen pinta-alan voidaan arvioida olleen noin  $200 \text{ mm}^2$ . Aukkovirtauksen virtausmekaanisten lainalaisuuksien nojalla voidaan arvioida tämän kokoisesta aukosta virranneen kaasuja noin  $5 \text{ m/s}$ :n nopeudella, joka tilavuusvirtausvirtana vastaa noin  $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $3 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ja massavirtana noin  $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$  ( $1 \text{ kg/h}$ ). Kaasujen syttyminen polttimien sammuttamisen jälkeen osoittaa niiden koostumuksen olleen palamiskelpoista polttoaineseosta, jonka syttymiseen riitti pieni sytytyslähde. Mittausten mukaan raosta purkautuneiden kaasujen lämpötila oli 28 minuutin kohdalla lähes  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Havaintojen perusteella vasemman yläkulman vuoto oli selvästi suurempi kuin oikean alakulman vuoto. Hetkellä 28 minuuttia voidaan edellisen vuodon arvioida olleen noin 4-5-kertainen jälkimmäiseen verrattuna. Siten luukun kokonaisvuodon voidaan arvioida olleen  $(4-5) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  eli siitä vuoti muutamia satoja litroja savukaasuja minuutissa.

Ulostulleen liekin korkeuden ( $0,15 \text{ m}$ ) ja raon koon perusteella voidaan liekin palotehon arvioida olleen muutamia satoja watteja. Ulospurkautuvien kaasujen palamiskelpoisten komponenttien lämpöarvon voidaan arvioida olevan  $30-40 \text{ MJ/kg}$ . Jakamalla paloteho lämpöarvolla saadaan kaasujen palamiskykyisen osuuden massavirtaukselle arvio  $0,005-0,015 \text{ kg/s}$ . Tämä on noin  $2-5 \%$  raon läpi tapahtuvasta kokonaisvirtauksesta.

Luukun raosta vuotaneiden savukaasujen väri oli vaalea, mikä usein on merkki merkittävästä palamattomien kaasujen osuudesta.

Matalassa yläpohjan ontelossa osastoidun tilan tilavuus on tyypillisesti muutamia kymmeniä kuutiometrejä<sup>6</sup>. Minuutissa luukusta vuotavien savukaasujen tilavuus on noin  $0,5-1 \%$  tästä tilavuudesta. Palavien kaasukomponenttien osuus tästä on noin  $2-5 \%$  eli niitä vuotaa minuutissa noin  $0,01-0,05 \%$  yläpohjan tilavuudesta.

---

<sup>6</sup> Esimerkiksi  $10 \text{ m}$  pituisen,  $8 \text{ m}$  leveän ja korkeimmalta kohdaltaan  $1 \text{ m}$ :n korkeisen harjakaton alla olevan yläpohjan ontelotilan tilavuus on noin  $40 \text{ m}^3$  eli  $40\,000$  litraa.

Yksinkertaisen täydelliseen sekoittumiseen perustuvan mallin mukaan palamattomien kaasujen pitoisuus  $c(t)$  tilavuudessa  $V_{tila}$ , johon kaasut luukusta vuotavat, kehittyy ajan mukana seuraavasti:

$$c(t) = \frac{c_{vuoto} \cdot \dot{V}_{vuoto} \cdot \tau}{V_{tila}} (1 - e^{-t/\tau}),$$

missä  $c_{vuoto}$  palamattomien kaasujen pitoisuus vuotavissa kaasuissa,  $\dot{V}_{vuoto}$  on vuodon tilavuusvirta ja  $\tau$  on tilan ilmanvaihdon aikavakio,  $\tau = 3600 \text{ s}/N$ , missä  $N$  on yläpohjan ilmanvaihtojen lukumäärä tunnissa. Tyypillinen arvo  $N$ :lle on 3, jolloin  $\tau = 1\,200 \text{ s}$ . Käyttämällä palamiskykyisten kaasujen vuotovirtaukselle arvoa  $c_{vuoto} \dot{V}_{vuoto} = 5\% \times (4-5) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = (0,2-0,25) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , niin  $V_{tila} = 40 \text{ m}^3$ :n suuruudessa tilassa palamattomien kaasujen suurimmaksi pitoisuudeksi saadaan arvo  $(0,2-0,25) \cdot 10^{-3} \times 1\,200/40 = 0,6-0,8\%$ .

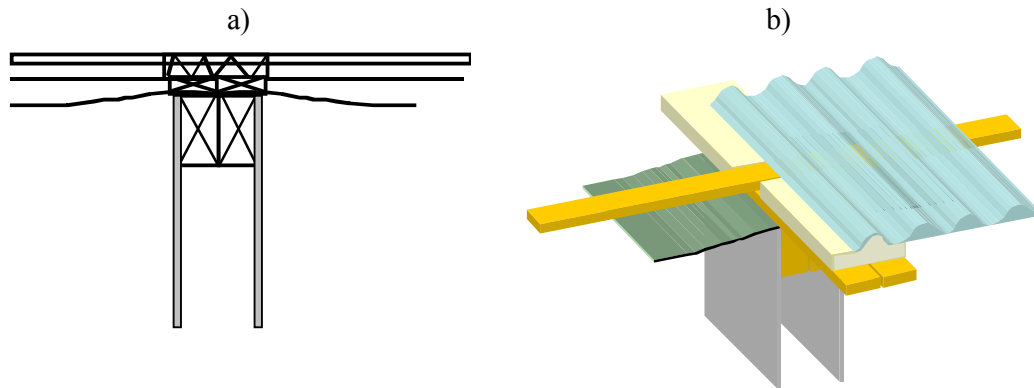
Tämä on selvästi pienempi pitoisuus kuin hiilivetyjen alempi syttymispitoisuus, joka esim. metaanille on 5 % ja propaanille 2,1 %. Kun otetaan huomioon, että esitetyt laskut perustuvat kokeen lopussa havaittuihin vuotoihin, jotka edustavat suurinta vuotoa kokeen aikana, luukusta vuotaneiden kaasujen *määrän* voidaan katsoa paloturvallisuuden vaarantumisen kannalta olleen vähäinen.

Todellisessa yläpohjan ontelon tulipalossa palaminen on todennäköisesti kuitenkin epä-täydellisempää kuin uunin öljypoltinten palaminen. Siksi palamattomien hiilivetyjen osuus todellisen yläpohjan ontelopalon täysin kehittyneessä vaiheessa voi olla korkeampi kuin em. koetietojen perusteella määritetty arvo. Voimakkaasti hapen saannin rajoittamissa tulipaloissa palamattomien hiilivetyjen osuus voi olla yli 20 %. Edellä esitettyjen laskelmien perusteella näin korkea vuotavien hiilivetyjen pitoisuus vastaisi suunnilleen hiilivetyjen alempaa syttymispitoisuutta vastaavan hiilivetypitoisuuden kehittymistä palavan osaston viereiseen osastoon. Näiden kaasujen lämpötila on varsin todennäköisesti pienempi kuin niiden itsesyttymislämpötila (lämpötila, jossa kaasut syttyvät ilman ulkoista sytytyslähdettä pelkästään korkean lämpötilan takia, esim. 450 °C propaanille), eivätkä ne siten useimmiten syty ilman ulkoista sytytyslähdettä. Kaasut voivat leimahtaa kuitenkin heti, kun palavasta osastosta tulee ulos riittävän kuumaa kaasua tai liekkejä. Siksi palokuntien yleisesti käyttämä taktiikka, jossa yläpohjan ontelo avataan esim. katosta savutuuletusta varten on tehokas palon leviämistä vastaan lieventäjä, johon ei sisälly merkittäviä savukaasuräjähdyksivaaroja. On huomattava, että tässä on puhe osastoista, joissa ei pala. Kun tarkastellaan osastoa, jossa palo on, tilanne voi olla toinen: jos palo on voimakkaasti hapen puutteen rajoittama, voi aukon avaaminen tähän tilaan johtaa humahtavaan paloon (englanninkielinen termi ”backdraft”), jossa kaasujen syttymisen aiheuttamat liekit voivat lyödä voimakkaina sammuttajia vastaan. Tätä tilannetta ja siihen varautumista tarkastellaan lähemmin hankkeessa Ontelopalojen sammutus.

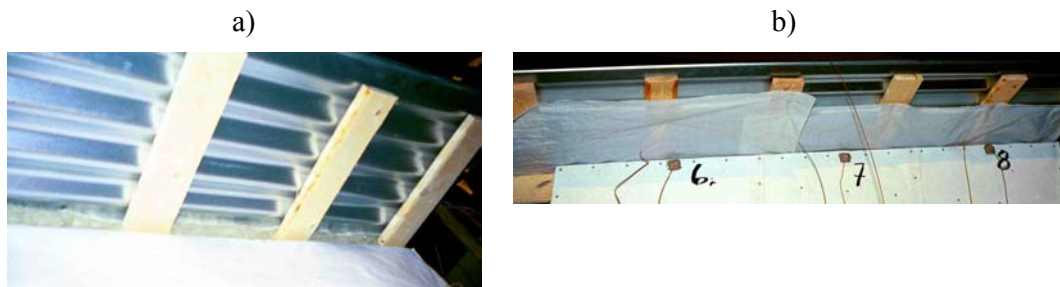
### 3.3.1.4 Osastoivan seinän ja vesikaton liitos

#### Rakenne

Kokeessa käytetty rakenne kuvaa EI 30 -luokitellun osastoivan seinän liittymistä peltikattoon. Liitos tehtiin alla olevassa kuvassa esitetyllä tavalla (Kuva 20). Tässä ratkaisussa osastoiva seinä päättyy ylhäällä aluskatteeseen, joka kiinnitetään katon korokerimojen korkuisilla rimoilla seinän koolauksiin. Jos tähän rakenteeseen kiinnitetään ruoheet ja kate, jää kateen ja em. rimojen väliin rako, josta palokaasut voivat vuotaa toiseen palo-osastoon. Siksi liitos tulee tukkia palamattomalla villalla (lasivilla ei sovellu!) kuvassa esitetyllä tavalla. Kokeessa tukkiminen toteutettiin pehmeällä kivivillalla (tiheys  $25 \text{ kg/m}^3$ ). Kuvassa 21 esitetään valokuvia rakenteesta.



Kuva 20. Osastoivan seinän ja vesikaton liittymä: a) rakennepiirustus ja b) rakenteen havainnollistus.



Kuva 21. a) Osastoivan seinän ja vesikaton liittymä edestä katsottuna, kun aluskatetta ei vielä ole kiinnitetty. b) Koestettu rakenne: aluskate on kiinnitettyä ruoteisiin niiteillä.



## Liitoksen toiminta kokeessa

Liitoksesta alkoi vuotaa savukaasuja noin 10 s polttimien sytyttämisen jälkeen. Niiden väri oli vaaleanharmaa. Aluksi kaasuja tuli ulos varsin paljon, mutta sen jälkeen vuoto tasaantui selvästi pienemmälle tasolla. Vuoto pysyi suunnilleen tällä tasolla kokeen loppuun. Verrattuna luukusta vuotaneiden kaasujen määrään liitoksen vuotomäärä oli selvästi suurempi. Kuva 22a havainnollistaa liittymän vuotamista.

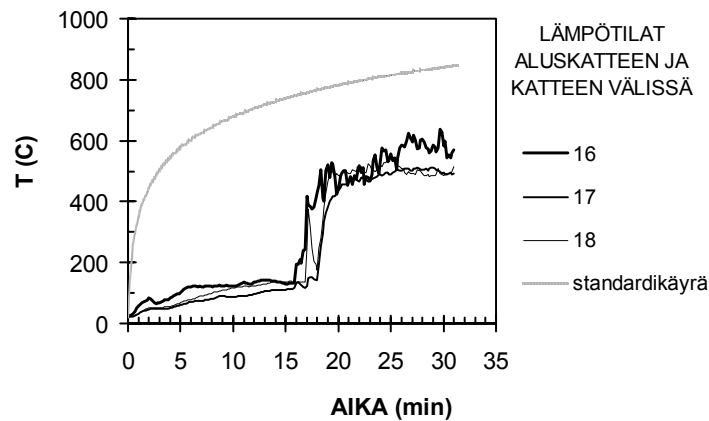
Hetkillä 12:00 ja 14:15 liitoksen lähellä vasemmassa ylänurkassa tehtiin pumpulitukko-kokeet, joista ensimmäisessä pumpuli ei tummunut ja toisessa pumpulin väri muuttui hiukan.



*Kuva 22. Savukaasujen vuotaminen ulos osastoivan seinän ja vesikaton liittymästä: a) hetkellä 8:50 ja b) noin 21 minuuttia kokeen alkamisen jälkeen.*

Liittymästä vuotavien kaasujen lämpötiloja mitanneiden antureiden lukemat esitetään kuvassa 23. Ennen 15 minuuttia lämpötilat tasaantuivat runsaaseen 100 °C:seen. Tämän jälkeen, noin 16–18 minuutin välillä lämpötiloissa tapahtui äkillinen nousu noin 500 °C:seen.

Tämä nousu ei kuitenkaan johtunut muutoksista liitosrakenteessa (villojen siirtymisestä, katon taipumisesta, tms.). Se johtui räystäään ontelon osastoinnin pettämisestä, jota kuvataan seuraavassa kohdassa (3.3.1.5). Samalla tavalla kuin luukusta vuotaneet kaasut koostuivat syttymiskelpoisesta kaasuseoksesta, myös liitoksesta vuotaneet kaasut sisälsivät palamattomia hiilivetyjä syttyvänä pitoisuutena. Ne olivat kuitenkin liian kylmiä syttyäkseen. Kaasujen lämpötilan nousu johtui siitä, että ne syttyivät räystäältä tulleen pistoliekin takia. Näin pääsi tapahtumaan, koska räystäään petettyä liekit pääsivät lyömään osastoivan seinän ohi rakenteen etupuolelle. Kerran sytyttyään kaasut paloivat itsekseen, kun liitoksen läpi vuotaneet kaasut kohtasivat jo ulkopuolelle vuotaneet ja siellä liekillä palavat kaasut (ks. Kuva 22b). Kyse ei siis ollut siitä, että liitoksen läpi olisi päässyt liekkejä.



Kuva 23. Liitoksen lähellä mitatut kaasun lämpötilat. Numerointi vastaa kuvassa 12 esitettyä lämpötila-antureiden paikkojen merkintää.

Kokeen loppuosan liittymästä vuotaneet kaasut paloivat. Visuaalisten havaintojen mukaan vuotavien kaasujen määrä tai palaminen ei oleellisesti lisääntyneet kokeen aikana. Kokeen lopussa villat olivat paikallaan raossa.

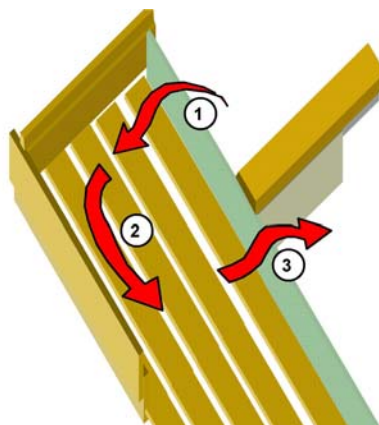
### 3.3.1.5 Räystäään kautta kiertämällä tapahtuvan palon leviämisen katkaiseminen

#### Kokeeseen tehdyn rakennerratkaisun perustelut

RakMK osassa E1 annetussa ohjeessa neuvotaan, että ”räystäään ontelo katkaistaan siten, ettei palo pääse helposti kiertämään ulkokautta: voidaan esimerkiksi käyttää riittävän leveää kaistaa B-s1, d0-luokkaista tarviketta”. Seuraavassa tarkastellaan hieman lähemmin palon ulkokautta tapahtuvaa leviämistä räystäään ontelon katkaisemisen perustaksi.

Palo voi levitä yläpohjan ontelossa osastoivan seinän ohi räystäään kautta kiertämällä. Tämä tapahtuma muodostuu kolmesta vaiheesta (ks. Kuva 24):

1. palon tunkeutuminen seinän raosta räystäälle ontelosta,
2. palon eteneminen räystäään ontelossa, joka muodostuu vesikatosta (ontelon katto), räystäään harvalaudoituksesta (ontelon lattia) ja otsalaudasta (ontelon sivuseinä) ja
3. palon leviäminen räystäään ontelosta osastoivan seinän toiselle puolelle.



*Kuva 24. Räystään kautta yläpohjan ontelossa tapahtuvan palon leviämisen kolme vaihetta. Kuva on kaaviomainen esitys, josta on yksinkertaisuuden vuoksi jätetty pois yksityiskohtia, esim. aluskate.*

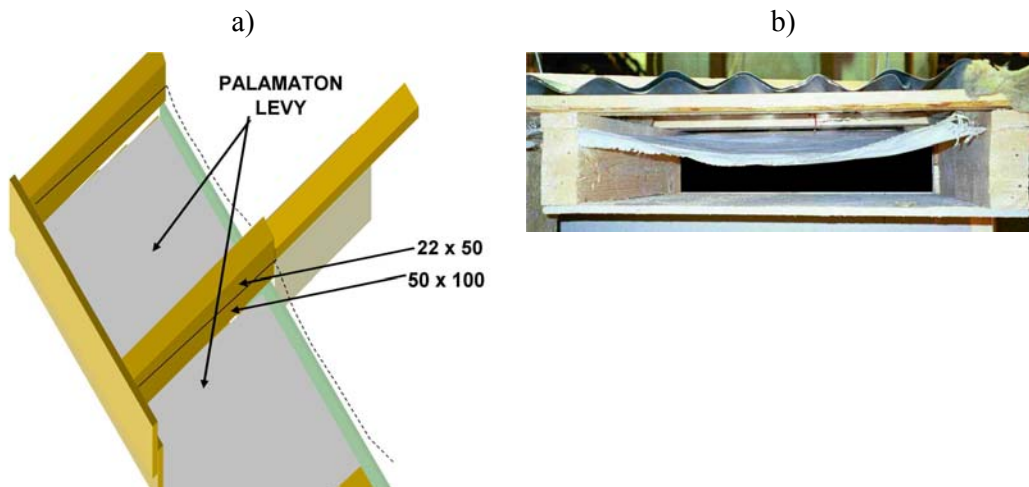
Yllä olevassa kuvassa on oletettu, että tuulensuojalevy ja julkisivu on viety aluskatteeseen asti. Tällöin jää avoimeksi tyypillisesti 22 mm korkea rako aluskatteen ja vesikatteen välissä. Rako voi olla suurempikin, koska monesti tuulensuojalevy ulottuu vain katon kannattajan alapintaan. Näissä molemmissa tapauksissa palon leviämisaika on merkittävä, joskin kapeampi rako voi hidastaa palon leviämistä lyhyen aikaa.

Leviämisen vaihe 1 voidaan estää, jos seinärakennetta jatketaan vesikattoon saakka ja liitetään siihen tiiviisti tai rako muuten tukitaan tiiviillä tavalla. Mahdollisten villalla tehtävien tukkimisten suhteen tulee olla varovainen, koska palon yläpohjaan muodostama ylipaine voi helposti työntää ne paikaltaan, ellei kiinnitystä ole tehty erityisen huolellisesti. Rakenteen aukot tulisikin ensisijaisesti sulkea levyin ja rajoittaa villan käyttö tilkitsemiseen. Huolellisesti tehtynä tällainen ratkaisu kuitenkin katkaisee veden valumisen aluskatteella. Koska paloteknisesti toimiva rakenne ei voi olla seinän suunnassa kovin lyhyt, tämä merkitsisi katon kosteusteknisen toiminnan selvää huonontamista. Siksi kokeeseen ei tehty tällaista rakennetta, vaan päinvastoin, yläpohjasta räystäälle aukeava rako toteutettiin sen vaihtoehdon mukaan, joka antaa korkeamman aukon korkeuden, eli tuulensuoja vedettiin vain kannattimien yläpaarten alapintaan saakka.

Edellä kuvattu palo- ja kosteusteknisen toiminnan yhtäaikaisen toiminnan toteuttamisen ongelma koskee tavanomaisia räystäs- ja yläpohjaratkaisuja. Eräs lähestymistapa ko. ongelman ratkaisuun onkin muuttaa räystäs- ja yläpohjaliittymän perusratkaisuja, ei vain muokata normaaliratkaisua. Tällaisia ratkaisuja on olemassa. Niitä esitellään jäljempänä (kohta 3.3.2).

Kokeessa toteutettu ratkaisu perustui leviämisvaiheen 2 katkaisuun. Tämä rakenne on tarkoitettu katkaisemaan räystäs sinä tapauksessa, että osastoiva seinä ei ole kattoristi-

kon kohdalla. Rästään katkaisu tehtiin ”koteloimalla” räystään ontelo osastoivan seinän kohdalta kuvan Kuva 25 esittämällä tavalla. Osastoivan seinän kohdalla räystääs katkaistiin puutavaralla: pääkatkaisuosa oli katon kannattimen korkuinen lauta, jolle valittiin riittävä paksuus, ettei se pala puhki liian nopeasti ( $50 \times 100 \text{ mm}^2$  lauta). Tämän laudan päälle tuli korokerima (kokeessa  $22 \times 50 \text{ mm}^2$ ) ja aluskate jäi niiden väliin. Jottei palo päässyt leviämään harvalaudoituksen kautta, se suljettiin 8 mm paksulla palamattomalla levyllä (Luja A). Koska kokeessa tutkittiin vain osastoivan seinän yhtä puolta, käytettiin yhtä levyä, jonka pituus seinän suunnassa oli noin 650 mm. Levyn leveys oli noin 300 mm.



*Kuva 25. Kokeessa testattu räystään kautta yläpohjan ontelossa tapahtuvan palon leviämisen katkaisemisratkaisu: a) kaaviokuva ja b) valokuva räystäältä (otsalauta irti).*

## Rakenteen toiminta

Alla esitetty kuvasarja (Kuva 26) havainnollistaa räystäärakenteen toimintaa kokeen aikana. Kuvissa 27a ja 27b esitetään räystäällä mitattujen lämpötilojen ja uunin paineen kuvaajat.

a) ennen koetta



b) 5–6 minuuttia



c) 15:40



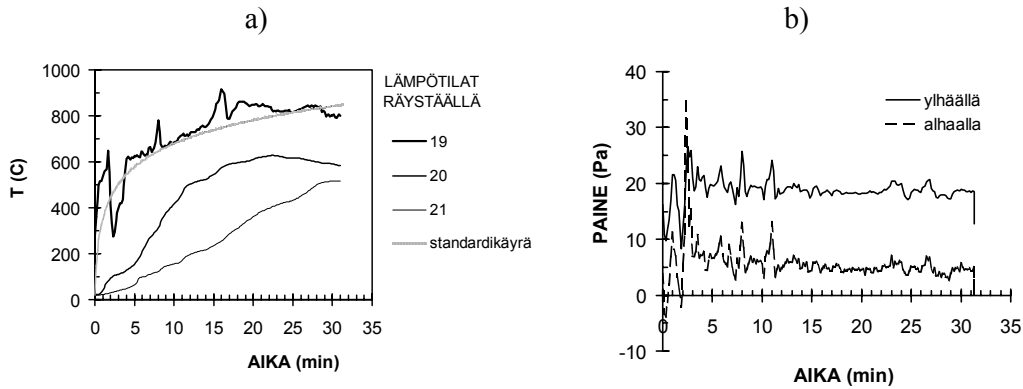
d) 18:00



e)



*Kuva 26. Räystäärakenteen toiminta palon aikana: a) rakenne ennen koetta, b) 5–6 minuuttia kokeen alusta, jolloin seinän takaosasta tuli ulos kuumia kaasuja ja liekkejä, c) räystäärakenteen pettäminen hetkellä 15:40 ja d) aluskatteen palamista hetkellä 18:00. e) Räystääs kokeen lopulla.*



Kuva 27. a) Räystäällä mitatut lämpötilat (mittauspaikat esitetään kuvassa 12). b) Paine uunin sisällä sen ylä- ja alaosassa.

Kokeen neljän ensimmäisen minuutin aikana aluskate pehmeni vähitellen vuotavien kaasujen lämpötilan johdosta (lämpötila 19 hetkellä 4 minuuttia n. 130 °C). Merkittävin vuoto kohta tämän prosessin kannalta oli osastoivan seinän ja uunin seinän välinen vuoto.

Neljän minuutin jälkeen savuisuus räystäällä lisääntyi selvästi ja lämpötilat räystään alla nousivat kiihtyvällä nopeudella. Aluskate irtosi kiinnityksistään räystäällä hetkellä 4:05 ja 5 minuuttiin mennessä räystääseen kiinni jäänyt aluskatteen pala kutistui voimakkaasti ja ruskistui, mutta ei syttynyt palamaan. Palorasituksen voimistuminen, josta nämä ilmiöt aiheutuivat johtui pääosin siitä, että seinän takaosassa suoraan uuniin olleesta raosta kulkeutui kuumia kaasuja eteenpäin lämmittäen aluskatetta ja rakenteita. Takaosassa havaittiin sinertävää tulen kajoa ensimmäisen kerran hetkellä 4:45. Tämän jälkeen, välillä 4:45–5:30, räystään takaosasta kulki kuumia kaasuja, jotka ajoittain paloivat oranssinsävyisinä haamuliekkeinä<sup>7</sup>. Nämä liekit sytyttivät hetkittäin räystään puuta-varaa, mutta palaminen ei vakiintunut. Hetkellä 5:30 seinän takaosasta alkoi työntyä ulos kelta-valkoisia liekkejä (Kuva 26b). Tätä jatkui n. puoli minuuttia, jonka jälkeen liekkejä ei enää näkynyt. Uunin yläosan painekäyrästä nähdään, että tämä liekkien hetkellinen ulostuleminen johtui uunin hetkellisestä paineen noususta (painepeikki alkoi 5:10, saavutti huippuarvonsa 23 Pa hetkellä 5:50 ja loppui 6:10).

<sup>7</sup> Haamuliekit (engl. ghosting flames) ovat liekkejä, jotka eivät ole suorassa yhteydessä polttoaineeseen. Ne liittyvät palamiseen paikoissa, joissa hapen ja palavien kaasujen pitoisuus ja lämpötila riittää palamiseen. Haamuliekkeihin liittyvä palaminen on yleensä voimakkaasti hapen saannin rajoittamaa ja siksi niiden lämpötila on suhteellisen alhainen.

Tämän jälkeen räystäällä ei tapahtunut merkittäviä rakenteellisia muutoksia noin 10 minuuttiin. Uuniin paineen hetkellisiin nousuihin hetkillä 8 ja 11 minuuttia liittyen havaittiin liekkejä tulevan ulos seinän takaosasta, mutta ne eivät sytyttäneet mitään. Hetkellä 10 minuuttia räystään alapuolen lämpötila saavutti lämpötilan 400 °C ja hetkellä 12 minuuttia 500 °C.

Runsaan 13,5 minuutin kuluttua kokeen alusta seinän takaosasta alkoi tulla sinioransseja haamuliekkejä, jotka kulkeutuivat etuosaa kohti. Tämä kuumien kaasujen ja liekkien virta lämmitti räystäsrakenteita ulkopuolelta. Myös lämpötila räystään sisällä nousi voimakkaasti 14:00 lähtien: nousun alussa lämpötila oli 750 °C ja 915 °C sen lopussa hetkellä 16:00.

Räystään katkorakenne petti hetkellä 15:40 ja räystään sisältä ulos päässeet liekit sytytivät myös vesikaton liittymästä ulos purkautuneet palamiskykyiset kaasut (Kuva 26c). Katkorakenteen pettäminen tapahtui kuvassa osoitetulla tavalla siten, että rakenne taipui alaspäin, jolloin tuli pääsi kiertämään rakenteen yläpuolelta. Merkkejä alkavasta pettämisestä oli havaittavissa hetkellä 14:20. Rakenteen pettämisen pääsyy oli sen irtoaminen kiinnityksistään. Tämä puolestaan ilmeisesti johtui siitä, että naulakiinnitykset osastoivaan seinään ja katerakenteeseen eivät jaksaneet kantaa rakenteen painoa. Myös Luja-levy katkesi rakenteen pettäessä. Rakenteen pettämisen kannalta on ilmeisesti merkityksellistä myös se, että räystään otsalauta petti ennen rakenteen romahdusta: palo räystäällä sai lisäilmaa otsalaudan raoista, mikä nosti lämpötiloja selvästi.

Rakenteen palonkestoa olisi parantanut eniten räystään ontelon sulkevan laudan lujempi kiinnitys (esim. kiinnitys seinään käyttäen tukevaa kulmarautaa ja riittävän pitkiä ruuveja). Harvalaudoituksen suojalevyjen toteutus kaksinkertaisella levyllä olisi antanut lisää palonkestoa: esim. Luja-levyä käytettäessä näin saavutettaisiin noin 20 minuutin eristävyys standardipalo-olosuhteissa 180 °C:n lämpötilannousua vastaavan eristävyyskriteerin mukaan. Harvalaudoitus levyjen alla syttyy kuitenkin, kun sen lämpötila nousee korkeammalle kuin em. kriteeriä vastaava noin 200 °C lämpötila. Yleisesti hyväksytty arvio puun syttymiseen vaadittavalle lämpötilalle on yli 300 °C, joten kaksinkertainen levytys suojaisi harvalaudoitusta syttymiseltä yli 20 minuuttia. Kaksinkertaista levytystä käytettäessä palon leviäminen tätä kautta osastoinnin ohi puolen tunnin aikana ei siten ole todennäköistä, koska vaikka harvalaudoitus syttyisi alle puolen tunnin, on viereisen osaston suojana vielä sen kohdalla räystään onteloa sulkeva levytys.

Osastoivan seinän ja vesikaton liitoksesta tunkeutuvien kaasujen palaminen poltti aluskatetta irti liittymästä. Irti revenneet aluskatteen palat jäivät roikkumaan seinällä. Lämmitessään palat putosivat lattialle. Ne eivät syttyneet palamaan paitsi yhdessä kohdassa hetkellä 17:30 (Kuva 26d). Palamista jatkui minuutin ajan ja palamisen aikana lattialle valui palavia pisaroita. Viimeinen aluskatteen pala putosi hetkellä 19:30.

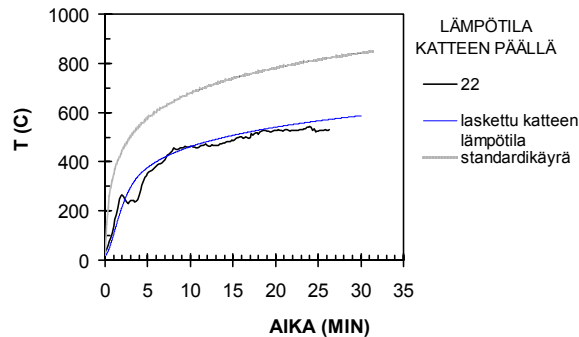
### 3.3.1.6 Vesikaton toiminta kokeen aikana

Kate (Rannila R18<sup>4</sup>) sulki katon koko kokeen ajan siten, että se ei heikentänyt kokonaisuuden toimintaa. Runsaan 20 minuutin jälkeen ruoteiden havaittiin hiiltyneen niin paljon, että niiden kantokyky oli ilmeisen alhainen. Koejärjestelyssä käytetyllä pienehköllä kattoalalla (lapeen jänneväli noin 1,5 m) pelti kantoi oman painonsa kokeen loppuajan.

Katteen ulkopinnalla mitattu lämpötila  $T$  tasaantui kokeen aikana noin arvoon 530 °C (Kuva 28). Mitattu lämpötilan kehitys kokeen aikana voidaan kuvata seuraavalla lämmönsiirtoyhtälöllä:

$$C\rho d \frac{dT}{dt} = h_1(T_{uuni} - T) - h_2(T - T_0) + \varepsilon_{uuni}\varepsilon_1\sigma T_{uuni}^4 - \varepsilon_1\sigma T^4 - \varepsilon_2\sigma T^4,$$

missä  $C$ ,  $\rho$  ja  $d$  ovat katteen ominaislämpö ( $500 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ), tiheys ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ) ja paksuus (1 mm). Lämpötilat  $T_{uuni}$  ja  $T_0$  ovat uunin lämpötila ja ympäristön lämpötila (20 °C) ja  $\sigma$  on Stefan–Boltzmanin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ). Lämmönsiirtokertoimien arvot ovat katteen ulkopinnalla  $h_1 = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  ja uunin puoleisella pinnalla  $h_2 = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Uunin emissiviteetille ( $\varepsilon_{uuni}$ ) sekä katteen ulkopinnan ( $\varepsilon_1$ ) ja sisäpinnan ( $\varepsilon_2$ ) emissiviteeteille on käytetty arvoa 0,7.



Kuva 28. Katon pinnalla mitattu lämpötila. Ohuempi käyrä kuvaa yksinkertaista lämmönsiirtomallia käyttäen laskettuja arvoja.



### 3.3.1.7 Yhteenveto ja johtopäätökset kokeen havainnoista ja tuloksista

Rakenteeseen tehty luukku ja osastoivan seinän liitos vesikattoon eivät rakenteen kuumenemisen tai liekkien läpitukenutumisen kannalta heikentäneet oleellisesti osastointia. Luukun reunoista ja vesikaton liittymän tukkimisessa käytetyn villan läpi pääsi vuotamaan savukaasuja, jotka todellisessa palossa kertyisivät palavan osaston viereiseen osastoon. Kokeessa havaittujen lämpötilojen perusteella näihin vuotoihin sinänsä ei liity suurta palon leviämistä. Ne voivat kuitenkin syttyä rajusti, jos osastointi pettää siten, että kaasut pääsevät kosketuksiin syttymisenergiälähteen kanssa. Tällainen voi olla esim. liekki tai liiaksi kuumentunut pinta. Vesikaton liittymän vuotoa olisi todennäköisesti voitu pienentää käyttämällä tiheämpää vuorivillaa (esim. 50 kg/m<sup>3</sup>).

Osastoinnin pitävyyden kannalta pahimmaksi ongelmaksi osoittautui räystäälle avoin seinän osa ja räystään ontelo. Kokeessa tuli selvästi ilmi, että kaasujen lämpötilojen muodostama 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. Kokeessa käytettiin palamatonta levyä, mutta myös riittävän paksu palavasta aineesta valmistettu rakennustarvike soveltuu harvalaudoituksen sulkemiseen.

Jos osastoiva seinä on kattoristikon kohdalla, ristikon paari tarjoaa luonnollisen sulun räystään ontelolle. Tällaisessa tapauksessa edellä mainitut kiinnitysongelmat eivät tuota ongelmia. Harvalaudoituksen sulkemiseen on syytä käyttää edellä mainittuja rakenteita. Tässä tapauksessa paloteknisesti hyvä ja asennuksen kannalta luonteva ratkaisu on ulottaa harvalautojen sulkeminen koko kattoristikoiden väliselle matkalla osastoivan seinän molemmin puolin.

Tässä kokeessa aluskatteen osallistuminen paloon oli vähäistä. Koejärjestyksessä aluskatteen toiminta palon aikana ei aiheuttanut ongelmia osastoinnin toimivuudelle. Eräs syy tähän on luonnollisesti se, että osastoinnin kohdalla aluskate oli puristettu lautojen ja villan väliin. Aluskatemateriaalille tehtyjen pienen liekin kokeiden mukaan (ks. liite G) se vastaa syttyvyydeltään luokan E tuotetta. Markkinoilla voi olla palo-ominaisuksiltaan tätä helpommin syttyviä aluskatteita (luokka F) ja tällaisille aluskatteille edellä mainitut johtopäätökset eivät välttämättä ole voimassa. Kokeessa vesikattoliitos toteutettiin huolellisesti ja siksi aluskatteen toiminnasta saatuja tulosten ei voida olettaa olevan voimassa myös silloin, jos vesikattoliitos on toteutettu puutteellisella tavalla.

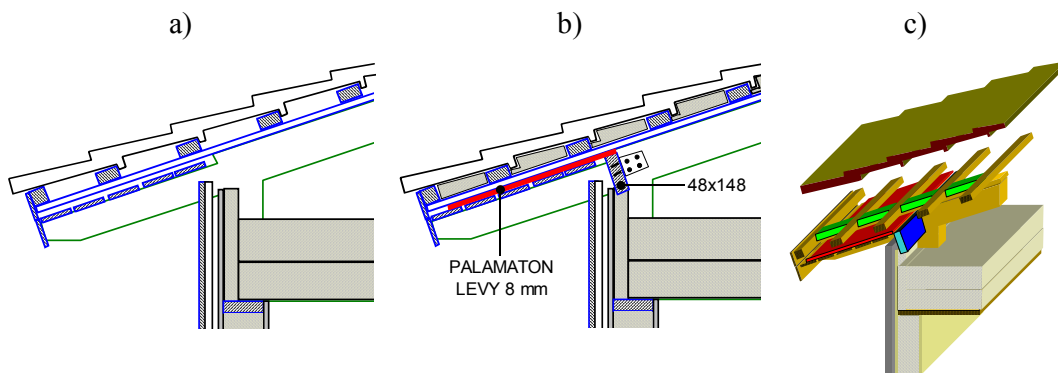
### 3.3.2 Rästään ja yläpohjan ontelon/ullakon erityisratkaisuihin perustuvia palon katkaisemiskäytännöitä

Edellä kuvatussa kuutiouunikoeksessa tutkittiin yleisesti käytetyn rakennustavan mukaisesti 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:ssä<sup>8</sup> kehitettyä ratkaisua ja toinen norjalaista ratkaisua.

#### 3.3.2.1 Rästään 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 katkaisemiskäytäntö esitetään kuvassa Kuva 29.

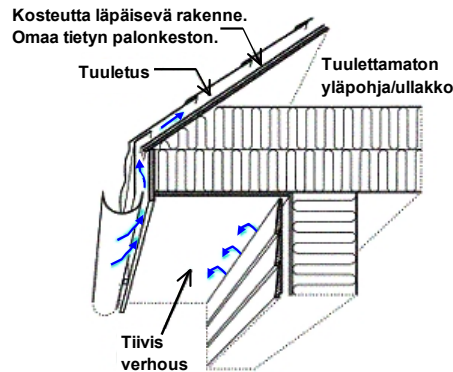


Kuva 29. a) Rästäs, jossa harvalaudoitus on lovetun katonkannattajan yläpuolella. b) Yläpohjan ontelon ja rästään välisen aukon sulkeminen osastoivan seinän kohdalla puutavaran ja palamattoman levyn avulla. c) Aksonometrinen kuva. Myös korokeriman ja katteen väli on tukittava villalla, jotta tuli ei pääse leviämään osastoivan seinän ohi.

<sup>8</sup> Uusi nimi 1.2.2003 alkaen. Aiempi nimi oli K & H Oy Insinööritoimisto.

### 3.3.2.2 Tuulettumaton yläpohja/ullakko

Norjassa Byggforsk-tutkimuslaitos on kehittänyt tuulettumattoman yläpohja/ullakkorakenteen (Uvsløkk & Lisø 2002, Byggforsk 2002). Rakenteen periaatepiirros esitetään kuvassa 30. 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 vesihöyrynläpäisevyyskertoimen 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 30. Tuulettumaton yläpohja/ullakko (Uvsløkk & Lisø 2002, Byggforsk 2002). Ratkaisun kriittisin kohta on katteen alla olevan aluskaterakenteen kosteustekninen toiminta.

## 3.4 Yläpohjan onteloiden osiin jakamisesta

Ullakot ja yläpohjan ontelot tulee osastoida enintään  $1\,600 \text{ m}^2$ :n kokosiin palo-osastoihin ja tämän lisäksi ne tulee poistumisen turvaamiseksi tai pelastus- ja sammutus-toimien helpottamiseksi jakaa enintään  $400 \text{ m}^2$ :n suuruisiin osiin (RakMK E1 2002, kohdat 5.2.1 ja 5.2.2). Osastoinnin palonkeston luokkavaatimus on EI 30 ja osiin jaon EI 15 (RakMK E1 2002, kohta 7.2.1). Seuraavassa tarkastellaan lähemmin jälkimmäisen vaatimuksen riittävyyttä.

Palonkestoluokkaan EI 15 luokituvat seinät ovat varsin kevytrakenteisia: Esimerkiksi kipsilevyllä toteutetuissa tyyppihyväksytyissä rakenteissa käytetään yhtä levyä. Muita palamattomia levyjä käytetään yleensä kaksinkertaisena, jolloin suhteellisen ohuet levyt riittävät. Näiden rakenteiden toiminta on todennettu standardipalokokeissa, mutta ontelopalojen olosuhteissa niiden toiminta voi olla oleellisesti heikompaa.

Syy tähän on se, että ontelopalossa tilan lämpötila voi nousta selvästi nopeammin ja saavuttaa korkeampia arvoja kuin standardipalossa. Nopeasti nouseva lämpötila aiheuttaa ongelmia eristyskyvyn suhteen, mutta erityisen korostunut se voi olla tiiviiden suhteen. Ensiksikin tiiviiden säilyminen riittävän ajan on yläpohjan ontelon osastoinnissa oleellisempaa kuin eristyskyky. Toisaalta kevyehkö rakenne voi menettää tiiviytensä nopeasti voimistuvassa palorasituksessa yllättävänkin nopeasti rakenteeseen syntyvien suurien lämpötilaerojen ja niistä aiheutuvien termomekaanisten rasitusten vuoksi: voi tapahtua vääntymisiä, levyjen halkeilua ja liitosten pettämisiä, jne.

Hietaniemi ym. (2002) ovat tutkineet ontelopalojen olosuhteita. Eräs tärkeimpiä havain- toja oli, että ontelotilan tulipalo voi kehittyä nopeasti kuumaksi, jos palotilassa on saatavilla riittävän hyvä tuuletus (palo saa happea ja palossa syntyvät kaasut pääsevät vir- taamaan pois siten, että ne eivät tukahduta paloa). Tämä ei toki aina ole tilanne koko palon ajan, vaan ontelopalon voimakkuus ja kuumuus voivat pudota suhteellisen al- haisiksikin palon hiipussa hapen korvautuessa palamattomilla palamistuotteille (eten- kin CO<sub>2</sub> ja H<sub>2</sub>O). Puu on yläpohjan onteloiden tavallisin palokuorma ja puun palaessa palon voimakkuuteen vaikuttaa edellä mainittujen ulkoisten paloa hillitsevien tekijöiden lisäksi myös puun hiiltyminen, joka suojaa puupintaa palolta siten hilliten lämmönva- pautumisnopeutta. Hietaniemi ym. (2002) havaitsivatkin ontelopalon olevan erityisen ankara etenkin muilla palokuormilla kuin puulla: muovikaapelit tuottivat hyvin voimak- kaan ja kuuman palon. Puupalokuormankin kyseessä ollen palo voi aluksi olla voima- kas, koska palon alkuvaiheissa happea on kuitenkin saatavilla. Palo voi myös jatkua voimakkaana, koska yläpohjan onteloiden tuuletus riittää helposti pitämään yllä useiden megawattien suuruista paloa. Palosimuloinnit osoittavat, että sopivalla tuuletuksella yläpohjan ontelosta voi muodostua uunia muistuttava lähes 1 000 °C:n lämpötilaan nou- seva tila.

Kokeellisia tuloksia rakenteiden eristävydestä ja tiiviyydestä standardipaloo nopeammin kuumaksi kehittyvissä paloissa on tullut julkisesti saataville parin viime vuoden aikana: Jones (2001) tutki EI 30 ja EI 60 -luokiteltujen puu- ja teräsrankaisten kipsilevyseinien toimintaa ja havaitsi mm., että EI 60 -luokiteltu seinä petti nopeasti kehittyvässä palossa 28 minuutin kohdalla. Joyeux (2002) tutki EI 30 -luokiteltua puuovea ja EI 45 (E 60) -luokiteltua teräsrankaista ovea luonnollisessa palossa. Tulokseksi hän sai, että puuovi menetti tiiviytensä ja eristävyytensä 15 minuutin kuluttua palorasituksen alkamisesta ja teräsovi menetti tiiviytensä 7–8 minuutissa ja eristävyytensä 10 minuutissa. Syynä ovien

nopeaan pettämiseen olivat lämmön aiheuttamat muodonmuutokset. EI 15 -rakennetta koskien vastaavia tutkimuksia ei ole julkaistu. Etenkin Joyeuxin tulosten perusteella voidaan kuitenkin epäillä, että nopean palon aiheuttamat termomekaaniset rasitukset voivat olla voimakkaita tyypillisen EI 15 -luokitellun rakenteen kestävyiden kannalta.

15 minuutin paloluokitusta on kritisoitu myös lähtien siitä, että standardipalokäyrään perustuvia palonkestokokeita ei alunperin suunniteltu lainkaan rakenteille, joiden palonkesto on näin lyhyt, vaan paljon pitempään kestävien tuotteiden testaukseen (McMillan & Buchanan 2000). Näin lyhyttä aikaa koskeva luokitus on hyvin herkkä lämpörasituksen alkuvaiheessa tapahtuvan lämpötilan nousunopeuden suhteen, kun taas esim. kahden tunnin mittaisessa palokokeessa lämpötilan alkukehityksen vaikutus on mitätön.

EI 15 -luokitus osiin jakaville rakenteille voi siis olla kevyt verrattuna niihin rasituksiin, joita ne mahdollisesti joutuvat todellisissa ontelopaloissa kestämaan. Tätä ei kuitenkaan ole syytä tulkita kategorisesti siten, että kyseinen luokitus olisi paloturvallisuuden kannalta liian vaatimaton kaikissa kohteissa. Kyse on tässäkin kokonaisuudesta. Esimerkiksi sprinklatussa puukerrostalossa, jonka julkisivun tuuletusraot on katkaistu asianmukaisesti ja räystäs on toteutettu suljettuna, eikä yläpohjassa kulje sähköasennuksia, nyky määräysten mukaisen EI 15 -luokitellun osiin jaon muuttaminen paremmaksi ei liene olennaista kohteen paloturvallisuuden kannalta. Toisaalta, jos räystäs on avoin, jolloin yläpohjan ontelopalon todennäköisyys on korkeampi, ko. muutos voi tuoda mukanaan oleellisen paloturvallisuustason nousun.

## 4. Julkisivun tuuletusraot

Julkisivun tuuletusrako lisää palon leviämiskaavaa. Jos julkisivu voitaisiin rakentaa ilman tuuletusrakoa, palon leviämiskiempo sen pinnalla voisi pudota selvästi vastaavaan tuuletusraolla varustettuun julkisivuun nähden.

Normaali rakennustapa kuitenkin on se, että ulkoseinässä on tuuletusrako, joten sen aiheuttamia paloturvallisuusongelmia pitää lieventää. Lähtökohdaksi tässä tarkastelussa on hyvä ottaa se, ettei tuuletusrako olennaisesti kasvata palon ja savun leviämiseen liittyviä riskejä<sup>9</sup> henkilöille tai omaisuudelle eikä myöskään kasvata palokunnan työskentelyyn liittyviä vaara- tai häirtatekijöitä.

Tuuletusraossa etenevän palon pääasiallinen uhka liittyy siihen, että palo voi leviää 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.

Muissa kuin teollisuusrakennuksissa julkisivun yleisimmät syttymissyöt ovat lieskahtaneen palon aiheuttama sytytys ja ulkoinen sytytys, joka voi aiheutua mm. tahallisesta sytytyksestä tai esim. kynttilätuotteiden huolimattomasta käytöstä. Sähköiset syttymissyöt sekä tulitöiden ja kuumien läpivientien aiheuttamat palot ovat tyypillisiä teollisuusrakennuksille (ks. luku 7).

Jos julkisivun palo aiheutuu lieskahtaneesta palosta, on julkisivun tuuletusraon vaikutus palon leviämiseen vähäinen, etenkin jos julkisivun ulkopinta ja tuuletusraon ulko- ja sisäpinta täyttävät B-luokan vaatimukset. Näin asian tulee tietyn poikkeuksin olla P1- ja P2-luokan rakennuksissa<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Tämä on parempi lähtökohdan asettelu kuin pelkästään tuuletusraon aiheuttamien savun ja palon leviämiskaavojen tarkastelu, koska verrattuna tuuletusraottomaan tapaukseen tuuletusraollinen julkisivu lähes väistämättä kasvattaa leviämiskaavoja.

<sup>10</sup> P3-luokan rakennuksissa ulkoseinän ulkopinnan ja tuuletusraon ulkopinnan luokkavaatimus on D, tuuletusraon sisäpinnalle ei ole asetettu vaatimuksia. Näissä rakennuksissa lieskahtanut palo voi leviää suhteellisen herkästi julkisivulla. Pääasiallinen vaara on palon leviäminen ullakolle tai yläpohjan onteloon, mutta tiheän rakennustavan yleistyessä myös muille rakennuksille koitua vaara voi nousta merkittävän suureksi. Tässä raportissa ei P3-luokan rakennusten julkisivulla leviävän palo vaaran lieventämistä kuitenkaan ole lähdetty ratkaisemaan ulkoseinärakennetta koskevin ratkaisuin, vaan lähtökohdaksi on ollut se, että palon leviämistä räystäältä ullakolle tai yläpohjan onteloon olisi järkevää estää/hidastaa myös pientaloissa. Tähän tarkoitukseen kehitelty räystäsratkaisu esitellään kohdassa 3.2.

Poikkeukset tähän perusvaatimukseen muodostavat:

- enintään 4-kerroksiset P1-luokan asuin- tai työpaikkarakennukset,
- 3–4-kerroksiset P2-luokan asuin- tai työpaikkarakennukset sekä
- P2-luokan hoitolaitosrakennukset,

joissa voidaan ulkoseinän ja tuuletusraon ulkopinnoissa käyttää D-luokan rakennustarviketta, mikäli

- rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla **ja**
- seinä on suunniteltu siten, että ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviäminen seinässä on estetty riittävän tehokkaasti.

Koska sprinklaus vähentää tehokkaasti lieskahtaneiden palojen määrää, ovat palotapa-ukset, joissa D-luokan rakennusaineista tehty julkisivu altistuu lieskahtaneen palon rasi-tukselle, harvinaisia.

B-luokan rakennustarvikkeet osallistuvat paloon hyvin rajoitetusti. Siksi niihin liittyvä ulkoisen palon aiheuttamasta rasi-tuksesta johtuva palon leviämisen uhka on vähäinen. Tätä tapausta ei ole tässä työssä tutkittu.

Tämän työn tutkimuksessa on keskitytty julkisivuihin, joissa julkisivun ja tuuletusraon ulkopinta on tehty D-luokan rakennustarvikkeista ulkoiseen syttymiseen liittyvässä uh-kakuvassa. Tärkein tekninen ongelma julkisivun tuuletusraon palon etenemisen raken-teellisessä katkaisemisessa on se, että katkaistun rakenteen pitää säilyttää kosteustekni-nen toimivuutensa. Toimivan tuuletusraon palokatkoratkaisun aikaansaamiseksi on löy-dettävä toimiva kompromissi palo- ja kosteusteknisten vaatimusten väliltä<sup>11</sup>. Tämä on työn tavoite.

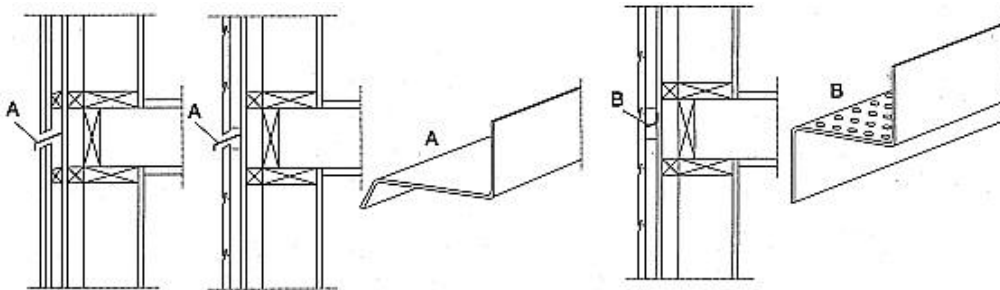
---

<sup>11</sup> Julkisivuissa käytettävät D-luokan rakennustarvikkeet ovat käytännössä usein puuta. Puun käyttöön liittyvien julkisivupalovaarojen torjuntaan on olemassa myös muita mahdollisuuksia kuin rakenteelliset ratkaisut. Eräs näistä on välttää materiaalin palavuuteen liittyvä ongelma nostamalla sen luokitusta palon-suojausaineilla. Tässä menetelmässä pienennetään puun lämmöntuottoa siten, että sen palo-ominaisuudet (ja siten myös luokitus) paranevat. Menetelmään liittyy kuitenkin tiettyjä teknisiä ongelmia, joista hanka-limmat liittyvät palonsuojauksen pitkäaikaistoimivuuteen. Etenkin pitkäaikaistoimivuuden luotettava arviointi vaatisi panostusta menetelmäkehitykseen.

## 4.1 Aiemmissa tutkimuksissa saatuja tuloksia tuuletusraossa leviävän palon katkaisemisesta: ulkoinen syttyminen

### 4.1.1 Erityyppisiä palokatkoja ja tuloksia niiden toiminnasta

Brandsäkra Trähus -hankkeen loppuraportissa (Östman ym. 2002) esitetään kaksi tapaa katkaista julkisivun tuuletusrako (Kuva 31). Näiden palo- ja kosteusteknistä toimintaa ei ko. raportissa kuvata tarkemmin.



Kuva 31. Brandsäkra Trähus -raportissa esitetyt julkisivun tuuletusraon palokatkoja. A: ulospäin näkyvä, B: piilotettu (Östman ym. 2002).

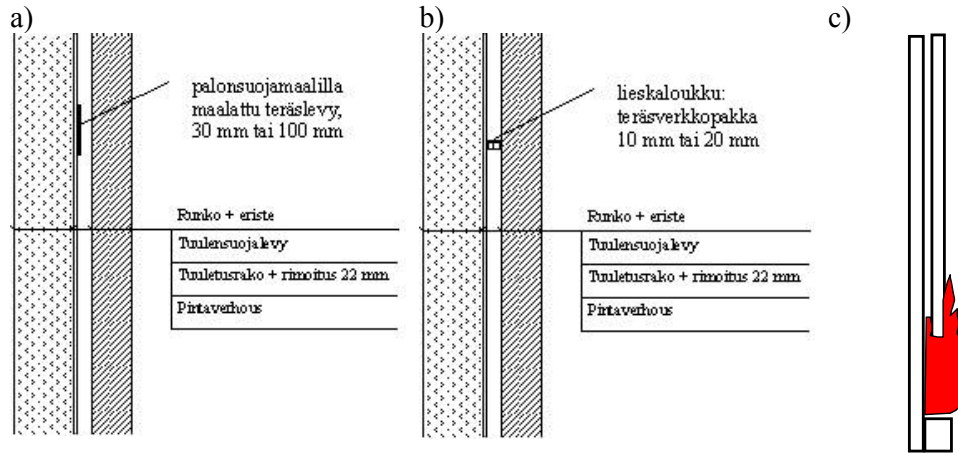
Hakkarainen ja Oksanen (2002) ovat tutkineet palokokein toista näistä vaihtoehdoista, ulospäin näkyvää taivutetulla pellillä toteutettua vaihtoehtoa A. Sen vaikutus julkisivulla etenevän palon nopeuteen havaittiin vähäiseksi (ks. Taulukko 2): tuli eteni sekä julkisivun pinnalla että tuuletusraossa.

On ilmeistä, että vaihtoehto B:n reiällinen teräslevy katkaisee palon etenemisen tuuletusraossa, kunhan reiät ovat riittävän pieniä. Ongelma onkin se, miten pieniä reiät saavat olla, jotta raon tuuletus vielä toimii. Seuraavassa luvussa esitetyissä, tässä hankkeessa tehdyissä kokeissa saatiin vastaus tähän tuuletusraon palokatkoja koskevaan perusongelmaan eräälle rei'itetylle palokatkolle. Tutkittu ratkaisu on kuitenkin oleellisesti erilainen, joten sitä koskevien tulosten valossa ei voida sanoa mitään varmaa palokatko-vaihtoehdon B toiminnasta.

Taivutetulla pellillä toteutetun palokatkovaihtoehdon A lisäksi Hakkarainen ja Oksanen (2002) tutkivat myös kahta muuta palokatkoratkaisua, paisuvalla palonsuojamaalilla maalattua teräslevyä ja useasta päällekkäisestä teräsverkosta koostuvaa lieskaloukkua. Näistä molemmista tutkittiin kahta toisistaan poikkeavaa variaatiota. Paloskenaariona näissä kokeissa oli ulkoinen syttyminen, joka toteutettiin asettamalla 100 kW:n kaasupoltin kuvassa 32c esitetyllä tavalla näytekappaleen alle. Palokatkot asennettiin tuulensuojalevyyn vaakasuoraan koko koekappaleen leveydeltä. Asennusta havainnollistetaan



kuvissa 32a ja b. Pintaverhousmateriaalina kokeissa oli maalattu kuusipaneeli ja tuulensuojalevynä käytettiin kipsilevyä. Koekappaleen korkeus oli 2,9 m, josta pintaverhousta oli 2,4 m.



Kuva 32. Tuuletusraon palokatkoja puujulkisivututkimuksessa: a) paisuvalla palonsuojamaalilla maalattu teräslevy ja b) teräsverkkopakasta muodostuva lieskaloukku. c) Ulkoista sytytystä kuvaava lämpörasitus. Palokatkojen etäisyys koekappaleen yläreunaan oli 400 mm, paitsi taivutetun pellin tapauksessa (vaihtoehto A), jossa katko asennettiin 250 mm:n etäisyydelle koekappaleen yläreunasta.

Taulukko 2. Liekinleviämisaajat maalatun 22 mm paksun kuusipaneelin etupinnalla käytettäessä erilaisia tuuletusraon palokatkoja. vertailun vuoksi on esitetty myös tuuletusraottoman julkisivun tulokset. Korkeudet on mitattu pintaverhousmateriaalin alareunasta (50 cm lattiatason yläpuolella). 240 cm vastaa koekappaleen yläreunaa.

Tuuletusraon palokatko	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	240 cm
Ei tuuletusrakoa	1:45	3:10	22:30	–	–
Avoin tuuletusrako	4:20	5:50	7:30	8:30	8:50
Taivutettu pelti	4:30	6:10	7:00	10:00	10:20
Palonsuojamaalattu teräslevy, 30 mm	5:20	7:50	9:30	11:10	16:00
Palonsuojamaalattu teräslevy, 100 mm	5:10	7:00	9:40	10:50	13:40
Lieskaloukku, 10 mm	6:00	7:40	15:40	26:50	32:10
Lieskaloukku, 20 mm	6:30	7:50	15:50	16:40	29:00

Kokeissa havaitut liekinleviämisaajat julkisivun etupinnalla esitetään taulukossa 2. Kun tuuletusrako oli avoin, liekkirintama eteni koekappaleen yläreunaan n. 9 minuutissa. Taivutetun peltilevyn (vaihtoehto A) vaikutus liekinleviämisaikaan oli vähäinen.

Palonsuojamaalattulla teräslevyllä liekinleviämisaika oli n. 15 minuuttia ja lieskaloukulla n. 30 minuuttia.

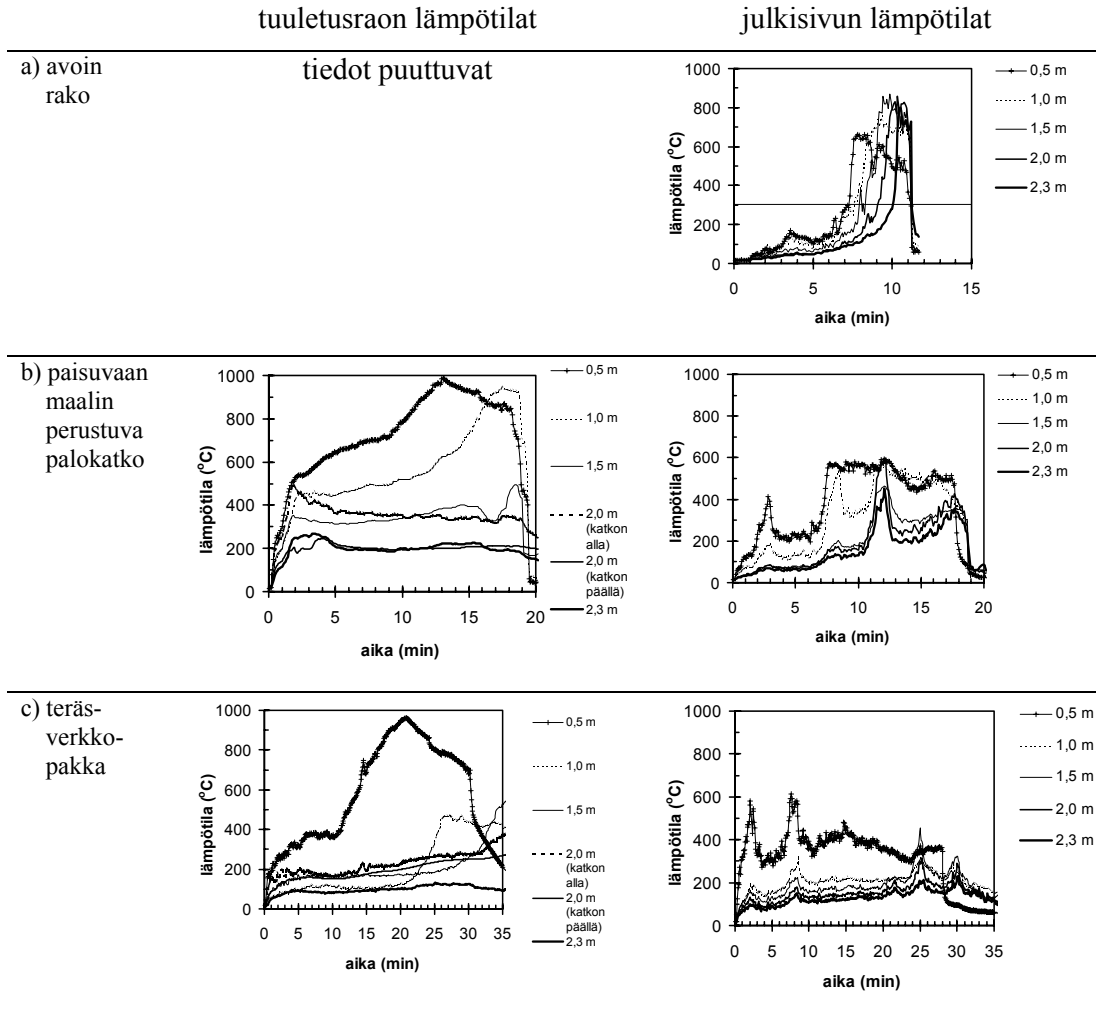
Palonsuojamaalattujen teräslevyjen toiminta perustuu palonsuojamaalin paisumiseen, kun se altistuu riittävän korkealle kuumuudelle. Katko toimi havaintojen mukaan siten, että aluksi se paisui täyttämällä koko raon (silmämääräinen arvio), mutta vähitellen ilmeisesti katkon alle muodostuneen paineen johdosta sen toiminta heikkeni ja lopulta se irtosi paikaltaan. Tämä ratkaisu hidastaa palon leviämistä siten, että palo leviäisi yhden kerroksen matkan eli noin 3 m noin 15 minuutissa. Se, että onko tämä palon leviämisviive riittävä, jotta seinän voitaisiin katsoa olevan ”...suunniteltu siten, että ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviäminen seinässä on estetty riittävän tehokkaasti (RakMK E1, 8.3.5)” ei ole aivan selvää. Toimintavalmiusaikojen perusteella palokunta ehtii tässä ajassa useimmissa tapauksissa saapua palopaikalle edellyttäen, että se saa hälytyksen samoihin aikoihin kuin ulkoinen syttyminen tapahtuu. Öiseen aikaan julkisvulla kehittyvää paloa ei kuitenkaan välttämättä huomata ennen kuin se on kasvanut sellaiseen kokoon, että se aiheuttaa selvää loimotusta, palon ääniä tai savua, mikä usein vaatii, että palo on ehtinyt kehittyä selvästi alkupaloa suuremmaksi.

Paisuviin systeemeihin perustuvista ratkaisuista em. palonsuojamaalin käyttöön perustuva ratkaisu ei liene parasta mahdollinen ratkaisu. Markkinoilla on olemassa rakojen palokatkoihin tarkoitettuja paisuvia systeemejä, jotka oletettavasti toimisivat paremmin.

Teräsverkkopakasta tehdyn palokatkon toiminta oli varsin hyvä: kokeen perusteella sen voidaan arvioida pidättelevän palon leviämistä kerroksen verran noin puoli tuntia. On kuitenkin huomattava, että teräsverkkopakan verkot olivat varsin tiheitä ja niistä päällekkäin ladatun rakenteen virtausvastus on oletettavasti varsin korkea. Siksi tällaista ratkaisua ei tulisi käyttää ilman, että sen läpi virtaamaan pääsevä ilmamäärä on luotettavasti todettu riittäväksi raon tuuletukseen. Tässä selvityksessä tulee mitata systeemin virtausvastus ja tulkita saadut tulokset sovellutuskohteen kosteusteknisten olosuhteiden valossa. Myös muunnellun ratkaisun palotekninen toiminta on todennettava luotettavalla tavalla.

#### **4.1.2 Tuuletusraon palokatkojen toimintaa koskevia johtopäätöksiä**

Hakkaraisen ja Oksasen (2002) tekemien kokeiden lämpötilamittausten tulokset (ks. Kuva 33) valottavat tuuletusraon palokatkojen toimintaa.



Kuva 33. Puujulkisivututkimuksessa tehdyissä tuuletusraon palokatkojen kokeissa mitattuja lämpötiloja. a) Avoin rako, b) paisuvalla palonsuojamaalilla maalattu teräslevy (korkeus 100 mm) ja c) teräsverkkopakasta muodostuva lieskaloukku (korkeus 20 mm). Tuuletusraon lämpötilat vasemmalla ja julkisivun pinnan lämpötilat oikealla. Käyrien piirteiden esille tuomiseksi ne esitetty erilaisia aika-akseleita käyttäen. Jyrkästi putoavat lämpötilat kokeiden lopussa johtuvat polttimen sammuttamisesta.

Kun tuuletusrako on avoin, liekit ja kuumat kaasut kohtaavat raossa sen dimensioista riippuvan virtausvastuksen: esimerkiksi Hakkaraisen ja Oksasen (2002) tutkimassa tapauksessa pelkän raon aiheuttama virtausvastus oli niin pieni, että kuumat kaasut ja myös liekit työntyivät tuuletusrakoon. Tällöin julkisivulaudoitukseen kohdistui lämpörasitus molemmilta puolilta, jolloin se lämpeni nopeasti. Tämä johti nopeaan palon leviämiseen. Esimerkiksi 300 °C:n lämpötilarintama eteni 2,8 minuutissa 1,8 m:n matkan (50 cm:n korkeudelta julkisivun alareunasta 10 cm:n päähän sen yläreunasta), mikä vas-

taa etenemisnopeutta 0,65 m/min. Tuuletusraon lämpötilojen pystyjakaumaa ei tässä kokeessa mitattu.

Paisuvalla palonsuojamaalilla toteutetun palokatkon kokeessa tuuletusraon lämpötilat katkon alapuolella nousivat aluksi nopeasti, mutta tämän jälkeen lämpötilat julkisivun keskivaiheilla katkoon saakka tasaantuivat välille 300–400 °C. Myös katkon yläpuolella on alussa nähtävissä lämpötilan nousu. Tämä johtuu siitä, että aivan alussa paisuva maali ei ehtinyt reagoida ja siten rako oli alussa oleellisesti kokonaan avoin. Kun maali reagoi ja paisui, se muodosti virtausvastuksen, joka pienensi tuntuvasti kuumien kaasujen virtausta katkon läpi laskien lämpötiloja katkon yläpuolella sekä vaikeutti liekkien ja kuumien kaasujen virtaamista rakoon kuristetun katkokohdan alapuolelle syntyneen ylipaineen kautta. Kokeen aikana paisuneen palosuojausmaalikerroksen mekaaninen lujuus pieneni ilmeisesti huokoisuuden lisääntyessä ja lopulta kerros irtosi ja kuumat kaasut pääsivät virtaamaan tuuletusraossa. Tällöin julkisivu lämpeni myös tuuletusraon puolelta ja liekit pääsivät leviämään julkisivun yläosaan asti (koska leviäminen ei tapahtunut aivan lämpötila-antureiden kohdalla, niiden lukemat eivät täysin osoita tätä tapahtumaa).

Teräsverkkopakalla toteutettu palokatko toimi havaintojen perusteella palotekniseltä kannalta hyvin: palo eteni julkisivulla hitaasti. Se on luettavissa myös lämpötilamittauskäyristä. Kokeen alussa lämpötila julkisivun alaosassa pysyi jonkin aikaa alempana kuin palonsuojamaalilla toteutetun katkon kokeessa. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että teräsverkkopakan muodostama korkea virtausvastus muodosti katkon alapuolelle painetta, joka ehkäisi kuumien kaasujen virtaamista rakoon. Julkisivun pinnalla lämpötila oli puun syttymislämpötilaa korkeampi, joten se syttyi ja paloi. Julkisivun läpipalaminen tapahtui sen alaosassa noin 10 minuutin kohdalla, mikä voidaan päätellä siitä, että tuuletusraon lämpötila alhaalla alkoi nousta voimakkaasti tällä hetkellä. Julkisivun puhkipalaminen oli ilmeisesti syynä myös tuuletusraossa 1 m:n korkeudella mitatun lämpötilan nousuun noin 25 minuutin kohdalla ja 1,5 m:n korkeudella mitatun lämpötilan nousuun hieman 30 minuutin jälkeen. Katkoon saakka läpipalaminen ei kokeen aikana ehtinyt. Tässä kokeessa tuuletusrako pysyi siis suhteellisen viileänä, eikä julkisivu lämminnyt paljoakaan raon puolelta, mikä johti hitaaseen palon etenemiseen julkisivun pinnalla.

## **4.2 Hankkeen aikana tehdyt kokeet julkisivun tuuletusraossa etenevän palon leviämisen estämisestä**

Hankkeessa tehtiin kolme koetta, joissa tutkittiin julkisivun tuuletusraossa etenevän palon katkaisemista. Kokeiden päätavoitteena oli tutkia kahden kosteusteknisesti toimivaksi todetun palokatkoratkaisun paloteknistä toimintaa. Kosteusteknisen toimivuuden

arvioinnissa käytettiin apuna virtaus- ja kosteusteknisiä laskuja. Erityistä huomiota kiinnitettiin viistosateen aiheuttamaan kosteuskuormaan.

Ensimmäinen palokoe tehtiin, jotta saatiin selville erään kosteusteknisesti todennäköisesti toimivan palokatkoratkaisun kyky rajoittaa kuumien kaasujen ja liekkien etenemistä tuuletusraossa. Tässä mahdollisen ratkaisun periaatteellisen toiminnan kokeessa käytettiin palamattomia tarvikkeita muiden tekijöiden kuin palokatkon virtaus- ja lämpötekniikan toiminnan vaikutuksen eliminoimiseksi.

Seuraavat kaksi koetta tehtiin käyttämällä julkisivua kuvaavana rakenteena D-luokan materiaalia. Tuulensuojalevyä kuvaavana materiaalina käytettiin palamatonta rakennuslevyä. Näissä kokeissa tutkittiin kahden erilaisen palokatkoratkaisun toimintaa. Toinen oli sama kuin ensimmäisessä kokeessa tutkittu palokatko, joka oli tehty palamattomasta materiaalista (teräs) ja toinen oli tehty D-luokan materiaalista (puu). Teräspalokatkon aiheuttama virtausvastus toteutettiin erillisten reikien avulla ja puisessa palokatossa virtauskuristus toteutettiin yhtenäisten pitkien rakojen avulla.

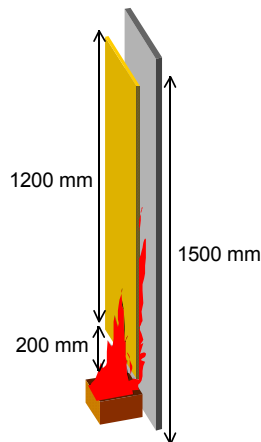
Kokeissa tutkittiin

- liekkien tunkeutumista tuuletusrakoon,
- palokaasujen ja liekkien kulkeutumista tuuletusraossa,
- tuuletusraon kuumenemista,
- palon leviämistä D-luokan rakennustarvikkeesta tehdyn julkisivun pinnalla ja tämän palamisen suhdetta tuuletusraossa leviävään paloon.

#### **4.2.1 Koejärjestelyt**

Julkisivurakennetta kuvattiin kahdella pystysuuntaisella rakennuslevyllä, joiden väliin jätettiin 32 mm:n väli kuvaamaan tuuletusrakoa (Kuva 34). Raon mitta määräytyi käytetyn toisen palokatkon dimensioista. Ulkoista sytytystä mallinnettiin kaasupolttimella. Tuulensuojalevyä kuvaamaan käytettiin kaikissa kokeissa palamatonta kalsiumsilikaattilevyä, jonka leveys oli 1 000 mm, korkeus 1 500 mm ja paksuus 12 mm.

Kokeet suoritettiin ulkoisilta virtauksilta suojatussa tilassa lämmöntuoton mittaamiseen soveltuvan keräilykuvun alla<sup>12</sup>. Anemometrillä tehdyillä mittauksilla todettiin, että tilan yläosasta toteutettu savukaasujen poistoimu (0,6 m<sup>3</sup>/s) ei aiheuttanut tuuletusrakoon koetta häiritseviä virtauksia.



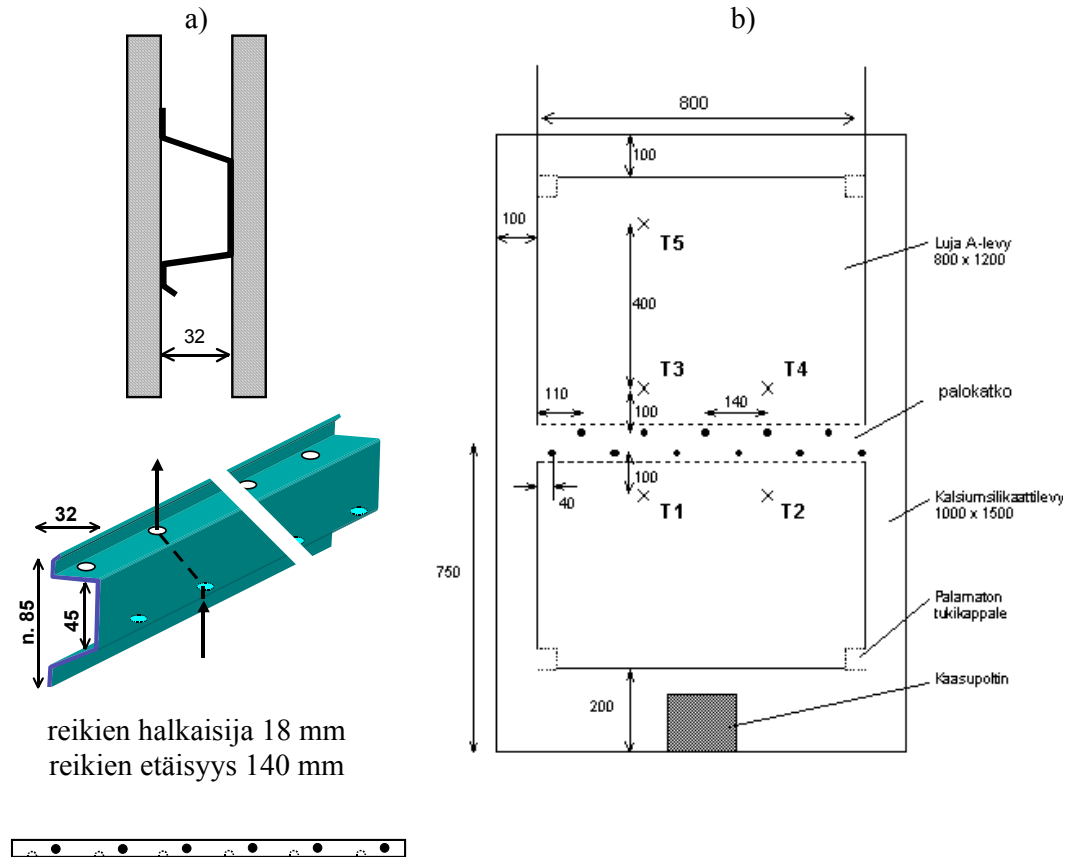
*Kuva 34. Koejärjestelyjen pääpiirteet.*

#### 4.2.1.1 Palamaton julkisivu: reiällisen teräspalokatkon virtaus- ja lämpötekkinen toiminta

Palamatonta julkisivua kuvattiin palamattomalla levyllä, jonka leveys oli 800 mm, korkeus 1 200 mm ja paksuus 10 mm. Kokeen häiriöttömän suorittamisen varmistamiseksi asennettiin julkisivulevyn alaosaan (70 cm:n korkeudelle saakka) kaksinkertaista levytystä.

---

<sup>12</sup> Kokeet tehtiin käyttäen VTT:n SBI-testilaitteistoa (standardi EN 13823). Laitteistoa käytettiin siksi, että se tarjoaa virtauksilta suojatun paikan, jossa on mahdollista mitata palotehoa.



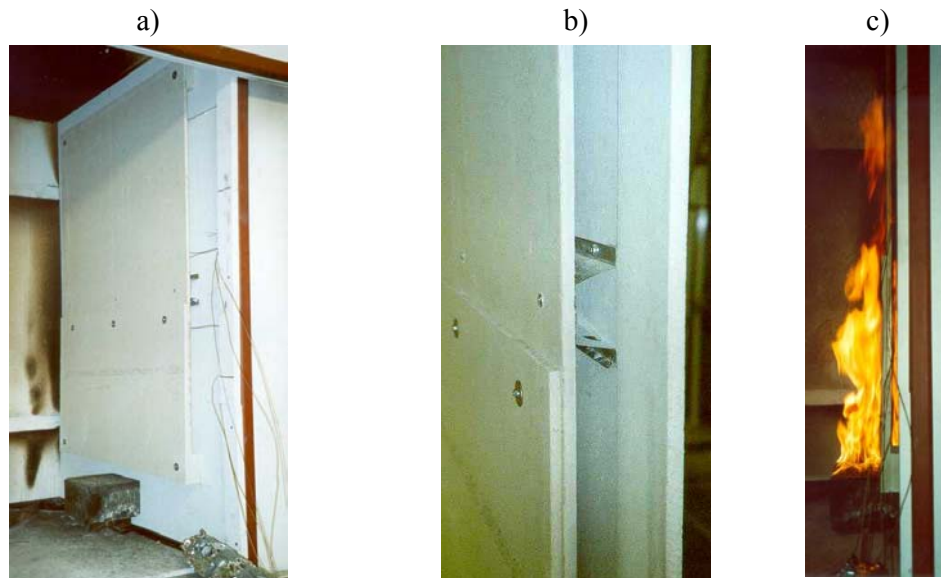
Kuva 35. a) Kaaviokuvia rei'itetystä palamattomasta materiaalista tehdystä palokatkoista: asennus, rakenteen havainnollistus ja rei'itys. Rei'ityksen tuottamaa virtausvastusta tehostaa se, että reiät ovat eri kohdilla. b) Koekappaleen mitat (mm) ja lämpötilamittauksen paikat (T1–T5).

Palokatkoksi asennettiin rei'itetty teräksestä tehty profiili<sup>13</sup> (Kuva 35a). Katko ulottui koko raon yli. Palokatkon reikärivit oli sijoiteltu lomittain siten, että ala- ja yläpinnan reiät eivät sijainneet samalla pystylinjalla. Reikien halkaisija oli 18 mm ja niiden välimatka oli 140 mm. Palokatkon yhdellä puolella oli 6 reikää, joiden yhteispinta-ala oli 15 cm<sup>2</sup>. Tämä vastaa 5 % katkaistun raon poikkipinta-alasta. Palokatkon sijainti esitetään kuvassa 35b. Valokuvia koejärjestelystä esitetään kuvissa 36a ja 36b.

<sup>13</sup> Kokeissa käytettiin Rannila Steel Oy:n valmistamaa tuulettavaa kattoruodetta<sup>4</sup>, joita käytetään yleensä peltikasettien alusrakenteena tai katteen alla.

Palokatkon toimintaa tutkittiin vertaamalla sen toimintaa täysin suljetulla raolla tehtyihin kokeisiin. Näissä kokeissa rako suljettiin laittamalla palokatkon päälle teräslevy, joka esti täysin kaasujen virtaamisen.

Kaasun lämpötilaa ilmvälissä mitattiin viidellä K-tyyppin termoelementillä (luokka 1, langan paksuus 0,5 mm), ks. Kuva 35b.



*Kuva 36. Valokuvia koejärjestelystä: a) yleiskuva, b) palokatko ja c) sivukuva polttimen palaessa. Oikea reuna on auki kuvauksen vuoksi. Kokeiden aikana se oli suljettu.*

Palon voimakkuuden ja raon lämpenemisen riippuvuuden tutkimiseksi polttimen paloteholle käytettiin useita eri tasoja, jotka esitetään taulukossa 3.

*Taulukko 3. Polttimen paloteho palamattomalla julkisivulla tehtyjen kokeiden aikana.*

Aika (min)	Paloteho (kW)
0–5	10
5–10	30
10–15	50
15–20	70

Koekappaleen oikeanpuoleinen reuna oli kokeen aikana suljettu mineraalivillalla n. 80 cm:n korkeuteen asti etulevyn alareunasta. Tämä kuvaa julkisivurakenteen koolausta. Reunan



sulkeminen vaikeutti visuaalista havainnointia, joten päätelmät liekin etenemisestä katkon läpi tehtiin pääasiassa lämpötilamittausten perusteella.

#### 4.2.1.2 Palava julkisivu: ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviämisen esittäminen

Palavasta aineesta tehdyn julkisivun tuuletusraossa leviävää paloa tutkittiin kahdessa kokeessa. Kokeiden erona oli palokatkoratkaisu: toisessa kokeessa käytettiin edellisessä luvussa kuvattua rei'itettyä teräsprofilipalokatkoa (Kuva 37b) ja toisessa kokeessa palokatko toteutettiin kahdella vaakasuoralla puurimalla, jolloin virtauskuristus oli pitkänomainen yhtenäinen rako (Kuva 37c). Molemmissa kokeissa käytettiin palokatkoa, joista toinen asennettiin rakenteen keskivaiheille siten, että sen alareuna oli noin puolen metrin etäisyydellä polttimen pinnasta ja toinen rakenteen yläosaan, ks. Kuva 37a.

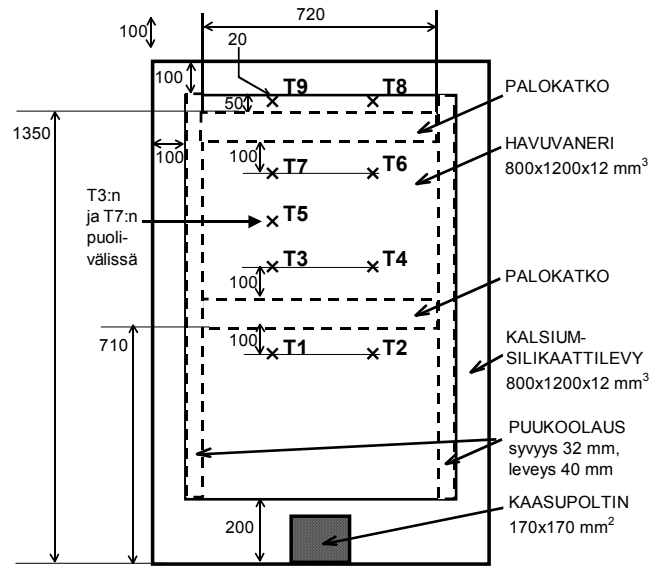
Puurimoista tehdyn palokatkon kuristettu väli oli 7 mm leveä ja 720 mm pitkä. Kuristuksen pinta-ala vastaa noin 20 % tuuletusraon leveydestä. Tämä on nelinkertainen verrattuna reiällisen palokatkon pinta-alasuhteeseen (5 %). Käytännön toteutuksessa puurimakatkon rakoa ei kuitenkaan voi tehdä juurikaan kapeammaksi, koska tällöin ei jäisi paljonkaan toleranssia rakenteen mittatarkkuuden, kosteuselämisen, roskaantumisen/pölyntymisen, yms. seikkojen suhteen.

Tuulensuojalevyä kuvattiin kalsiumsilikaattilevyllä ja D-luokan materiaalista tehtyä julkisivua 12 mm paksulla havuvanerilla. Koejärjestely esitetään kuvassa 37a.

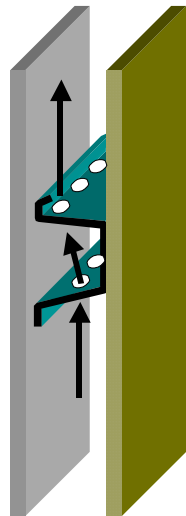
Kokeet tehtiin samaa laitteistoa käyttäen kuin edellisessä luvussa kuvatut kokeet. Myös poltin oli sama. Näissä kokeissa sitä ajettiin 30 kW:n teholla. Propanikaasun massavirtaussäätimen epäluotettavan toiminnan takia lopullinen säätö toteutui reiällisen katkon kokeessa 3 minuutin kuluttua polttimen sytyttämisestä ja rimoilla toteutetun palokatkon kokeessa 2 minuutin kuluttua polttimen sytyttämisestä. Savukaasujen poistovirtaus koetilän yläosassa oli 0,6 m<sup>3</sup>/s. Kokeen alussa virtausnopeus koekappaleen raossa oli anemometrin mittaustarkkuuden puitteissa nolla.

Kokeen aikana raon kaasun lämpötiloja mitattiin 9 lämpötila-anturilla, joiden paikat esitetään kuvassa 37a. Kaksi lämpötila-anturia (1 ja 2) oli sijoitettu 100 mm alemman palokatkon alapuolelle. Alemman ja ylemmän katkon välisessä tilassa oli 5 anturia, joista kaksi (3 ja 4) sijaitsi 100 mm alemman palokatkon yläpuolella ja kaksi (6 ja 7) 100 mm ylemmän palokatkon alapuolella sekä yksi (5) näiden keskivaiheilla ao. kuvan esittämällä tavalla. Kaksi lämpötila-anturia sijaitsi välittömästi ylemmän palokatkon yläpuolella.

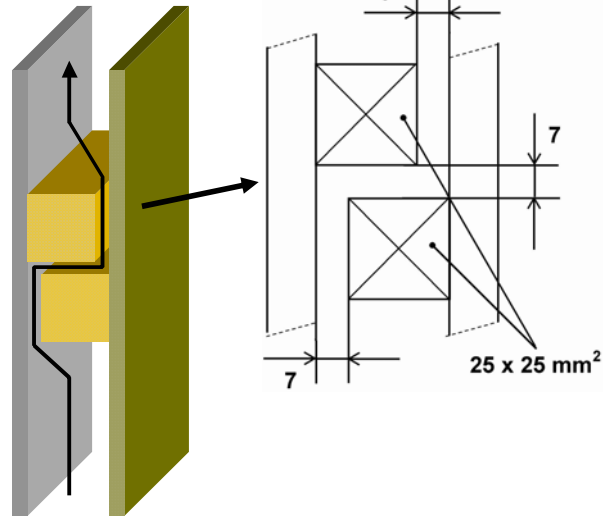
a)



b)



c)

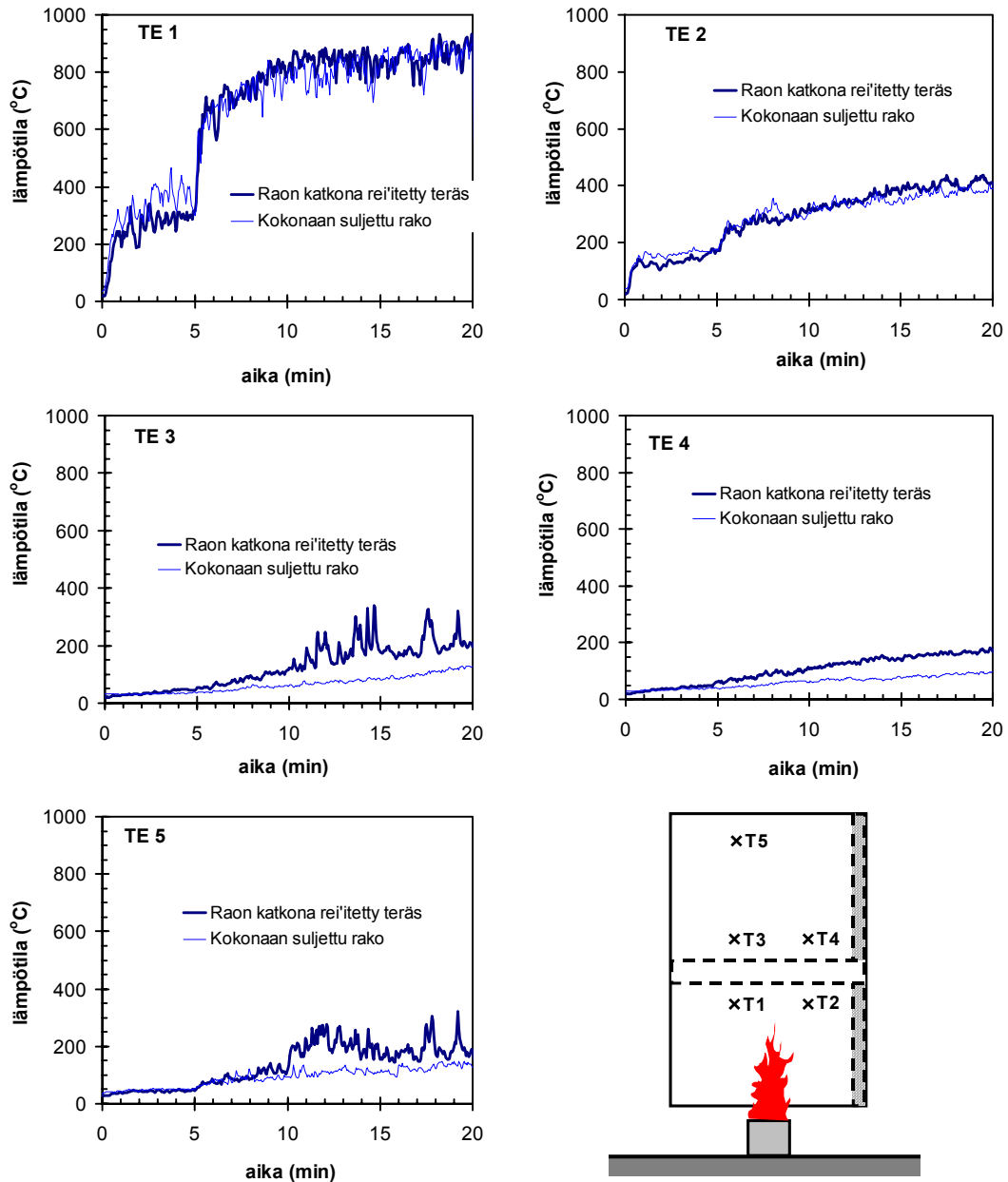


Kuva 37. a) Koejärjestely. Tuuletusrakoa kuvaavan tilan molemmat reunat suljettiin puukoolauksin. b) Rei'itetty palamattomasta materiaalista tehty rakenne (mitat, ks. Kuva 35). c) Palavasta materiaalista tehty katko, jossa virtauskuristukset muodostuvat pitkänomaisista kapeista raoista.

## 4.2.2 Tulokset

### 4.2.2.1 Rei'itetty teräksinen palokatko: esikoe palamattomalla julkisivulla

Kokeiden aikana ilmaraossa mitatut lämpötilat esitetään kuvassa 38.

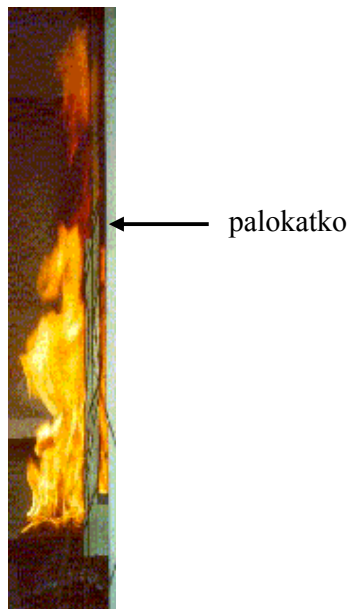


Kuva 38. Ilmaraossa mitatut lämpötilat: T1 ja T2 100 mm katkon alapuolella, T3 ja T4 100 mm katkon yläpuolella ja T5 500 mm katkon yläpuolella.

Seuraavassa tarkastellaan vain koejärjestelyn vasemman puoleisten lämpötilamittausten tuloksia (T1, T3 ja T5). Oikealla puolella, villalla suljetun reunan läheisyydessä vallinneisiin lämpötiloihin vaikutti alentavasti se, että kuumat kaasut ja liekit eivät kulkeutuneet tähän osin suljettuun tilaan. Tarkastelussa keskitytään ajanjaksoihin, jolloin polttimen paloteho 50 tai 70 kW, joiden aiheuttamat lämpötilat olivat oleellisesti samat.

Lämpötilat palokatkon alapuolella olivat yhtä korkeita riippumatta siitä, pääsikö ilma virtaamaan ruoteen läpi. Tämä johtuu siitä, että koekappaleen vasen reuna oli avoin eikä katkon alapuoliseen tilaan siten päässyt muodostumaan vastapainetta, joka olisi voinut estää liekkien ja kuumuuden tunkeutumisen rakoon. Ilman oikean reunan sulkevaa villaa tehdyn esikokeen aikana otettu valokuva (Kuva 39) osoittaa, että katkon alapuolinen tila oli liekkien täyttämä.

Palavalla julkisivulla tehdyt kokeet ja palonsimulointilaskelmat osoittavat, että jos raon molemmat puolet ovat suljettuja, raon pystysuuntaisen virtauksen kuristaminen aiheuttaa paineen nousua kuristuksen alapuolella, joka voi estää liekkien ja kuumien kaasujen tunkeutumista rakoon sen alareunasta. Se, miten täydellisesti tämä estyy, riippuu kuristuksen virtausvastuksesta. Koska tässä kokeessa toteutetussa järjestelyssä liekit ja palo-kaasut pääsivät virtaamaan palokatkon luo, on koestustapa tältä osin varsin ankara verrattuna todellisessa tuuletusraossa vallitseviin olosuhteisiin, jolloin tuuletusrako on suljettu vaakasuunnassa pystykoolauksin tietyin välein.



*Kuva 39. Ilman oikean reunan sulkevaa villaa tehdyn esikokeen aikana otettu valokuva.*

Palokatkon ala- ja yläpuolella mitatuissa lämpötiloissa on suuri ero: palokatkon alapuolella vallitsi keskimäärin noin 800–900 °C:n lämpötila, mutta sen yläpuolella keskimääräinen lämpötila rei'itetyn katkon tapauksessa oli noin 200 °C ja raon kokonaan sulkevan katkon tapauksessa noin 80–100 °C tätä arvoa alempi.

Reiällisen katkon tapauksessa lämpötiloissa nähdään ajoittain noin 350 °C:seen nousevia arvoja. Nämä johtuvat siitä, että ajoittain liekkiä pääsi katkon reikien läpi. Tässä kokeessa toteutetussa järjestelyssä rei'itetty teräksinen palokatko ei siis pystynyt täysin estämään liekkien etenemistä ilmaraossa, mutta on huomattava, että jos koejärjestelyssä raon molemmat reunat olisivat olleet suljetut, niin tällöin katkon aiheuttaman virtausvastuksen katkon alapuolelle synnyttämä paine olisi estänyt liekkien työntymistä katkon lähellä ja siten vähentänyt liekkien kulkeutumista sen läpi.

Rei'itetyn palokatkon yläpuolella mitatut lämpötilat eivät tässä kokeessa olleet kuitenkaan niin korkeita, että ne todennäköisesti voisivat sytyttää esimerkiksi julkisivurakenteen puumateriaaleja. Ilman palokatkoa nämä lämpötilat olisivat olleet heti lämpörasituksen alusta lukien oleellisesti yhtä korkeita kuin mitä katkon alapuolella mitattiin. Rei'itetty palokatko rajoitti siis palon varsin hyvin alapuolelleen.

Kokeen lopussa heti rei'itetyn palokatkon yläpuolella mitatussa lämpötilassa T3 on nähtävissä nouseva trendi. Tästä voidaan päätellä, että jos palorasitusta olisi jatkettu, esim. puun syttymiseen vaaditut lämpötilat olisi saavutettu jollain hetkellä. On kuitenkin huomattava, että sama nouseva trendi vallitsee myös kokonaan suljetun raon tapauksessa. Tästä voidaan päätellä, että nouseva lämpötila ei heijastele niinkään palokatkon toimintaa kuin systeemin yleistä lämpenemistä: julkisivua koko korkeudeltaan nuolevat liekit lämmittivät sen etupintaa, josta lämpö johtui levyn läpi levyn sisempään pintaan, joka konvektion ja säteilyn välityksellä lämmitti lämpötila-antureita. Voimakkaammalla palorasituksella koko järjestelyn kuumeneminen olisi ollut voimakkaampaa, mutta sinänsä katkon toiminnan suhteen sillä ei olisi ollut oleellista vaikutusta: lämpötilakäyristä nähdään, että palotehon kasvattaminen 50:stä ja 70 kW:iin ei muuttanut lämpötiloja. Palotehon kasvattaminen ei myöskään olisi kasvattanut raossa kulkevien virtausten nopeutta, koska nostevoima johtuu kuumien kaasujen lämpötilasta, joka jo tässä kokeessa oli hyvin korkea, 800–900 °C. Palotehon kasvattaminen olisi aiheuttanut julkisivun pintaan kohdistuvan lämpörasituksen kasvamisen.

Kokeen tulokset osoittavat rei'itetyn teräsprofiilipalokatkon olevan varsin tehokas. Ajoittain liekkien havaittiin kuitenkin lyövän palokatkon reikien läpi. Vaikka kokeen järjestelyn osuus tähän oli ilmeisesti merkittävä, ei koestettua palokatkoa voida pitää täydellisenä tuuletusraossa etenevän palon pysäyttäjänä, vaan sen toimivana hidastajana. Sen toimintaa voidaan parantaa sijoittamalla tuuletusrakoon useampia palokatkoja päällekkäin esimerkiksi 60 cm:n välein.

Tässä tutkitun reiällisen palokatkon toimintaa ei juurikaan voida parantaa lisäämällä sen virtausvastusta reikien kokoa pienentämällä, koska tällöin tuuletusraon tuulettuminen estyisi liikaa. Virtausteknisten tarkastelujen mukaan esim. reikien halkaisijan pienentäminen 10 mm:iin estäisi riittävän tuulettumisen aikaansaamisen (jos samaan aikaan reikien pinta-alaosuus pidettäisiin vakiona).

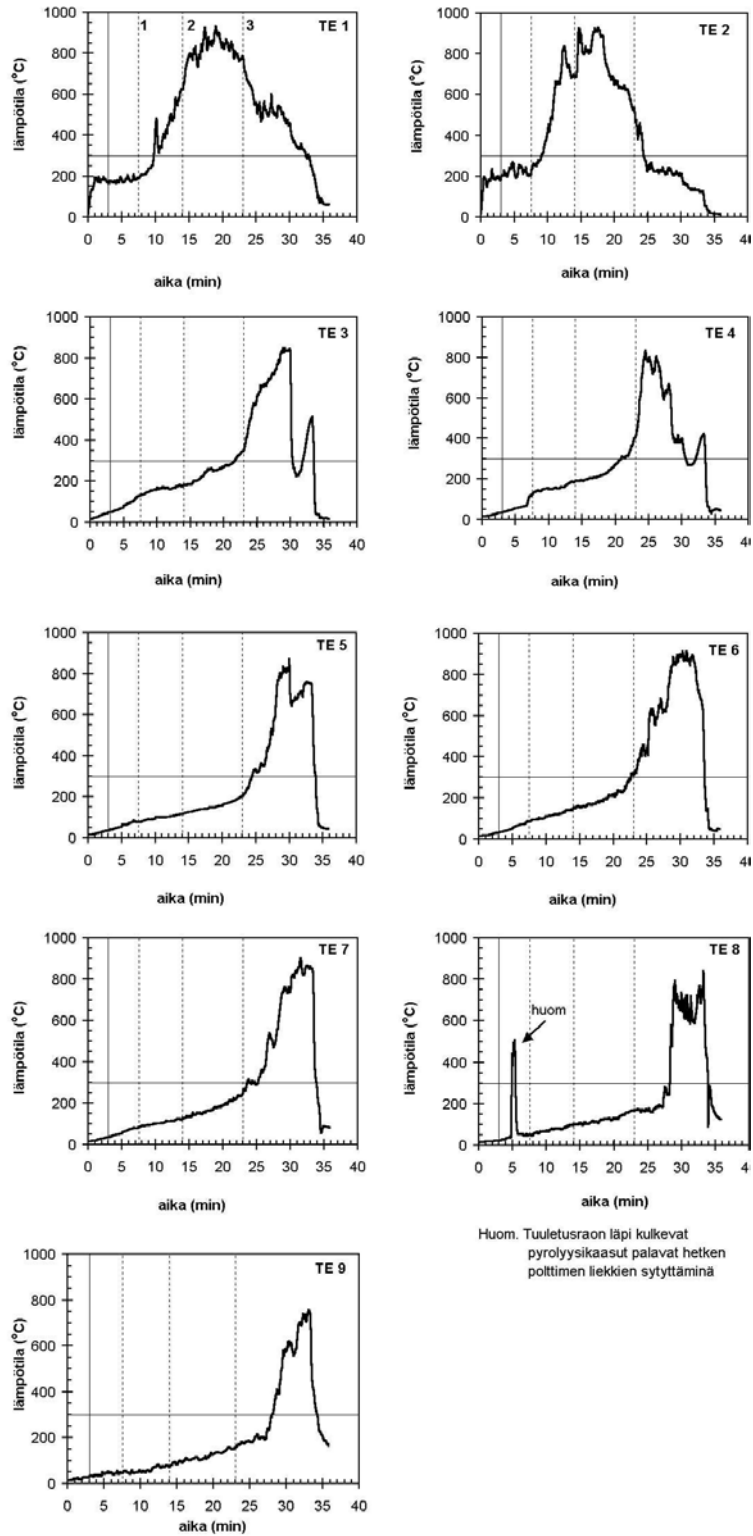
#### 4.2.2.2 Palava julkisivu: rei'itetty teräksinen palokatko ja puurimoja käyttäen toteutettu palokatko

Kokeiden aikana ilma- ja pinta-olosuhteissa mitatut lämpötilat esitetään seuraavissa kuvissa: Kuva 40, reiällinen palamattomasta materiaalista tehty palokatko ja Kuva 41, palavasta materiaalista valmistettuja rimoja käyttäen toteutettu palokatko.

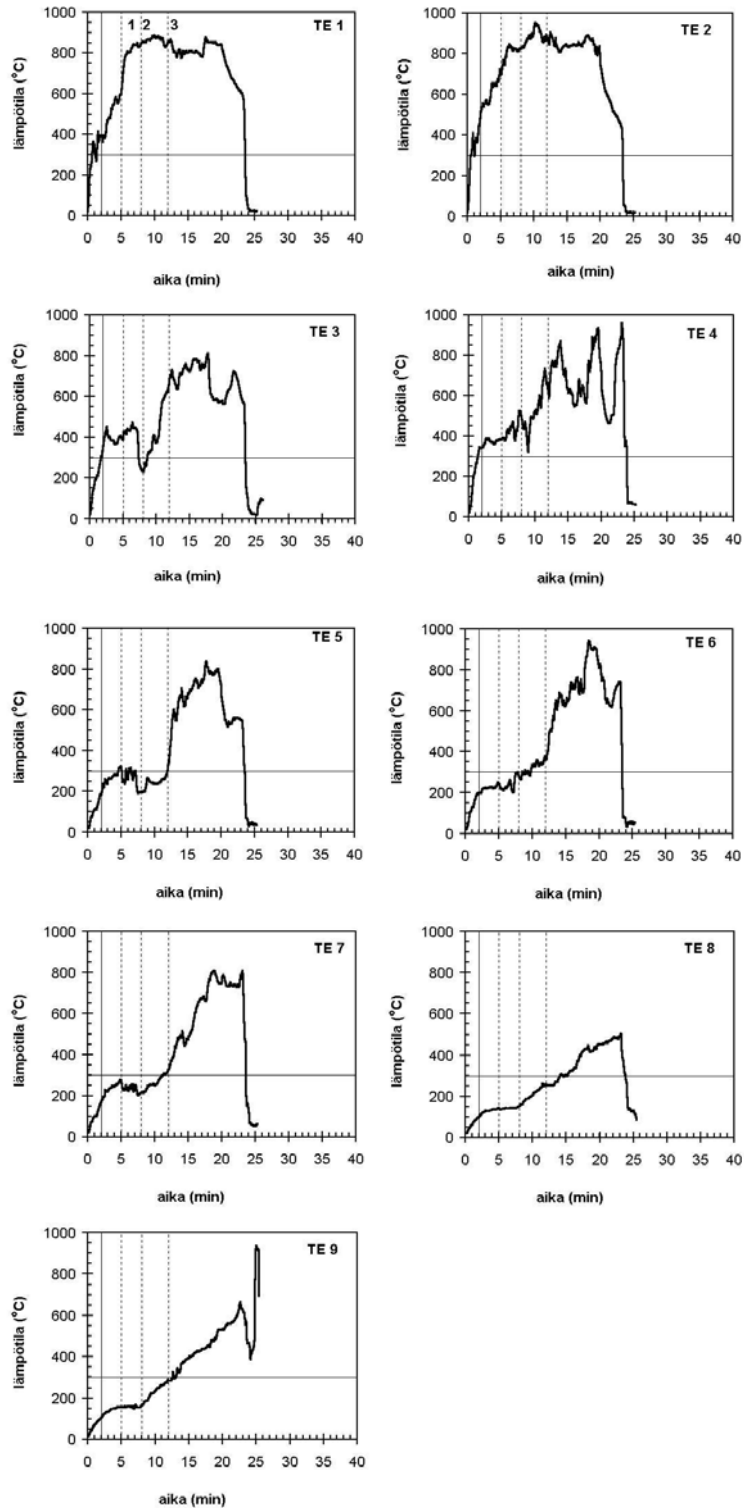
Kuviin on merkitty vaakasuoralla viivalla tyypillinen puun syttymistä kuvaava lämpötila 300 °C. Pystysuorilla viivoilla on merkitty eri tapahtumia kokeen aikana. Yhtenäinen pystyviiva osoittaa, milloin paloteho saavutti asetusarvonsa ja pystykatkoviivat ilmaisevat palon leviämisen kannalta oleellisiä hetkiä. Niiden merkitykset poikkeavat hieman toisistaan eri kokeissa, ks. Taulukko 4.

*Taulukko 4. Kuviin pystykatkoviivoilla merkityt tapahtumat.*

<b>Viiva</b>	<b>Reiällinen palamattomasta materiaalista tehty palokatko</b>	<b>Palavasta materiaalista valmistettuja rimoja käyttäen toteutettu palokatko</b>
1	levy palaa puhki alemman palokatkon alapuolelta	levy palaa puhki alemman palokatkon alapuolelta
2	levy palaa puhki alemman palokatkon yläpuolelta	levy palaa puhki alemman palokatkon yläpuolelta
3	levyn pinnalla etenevä palamisrintama saavuttaa ylemmän palokatkon	selvä rako julkisivussa yltää ylempään katkoon asti



Kuva 40. Lämpötilat kokeessa, jossa tutkittiin reiällistä palamattomasta materiaalista tehtyä palokatkoa. Viivojen merkitys selitetään tekstissä.



Kuva 41. Lämpötilat kokeessa, jossa tutkittiin palavasta materiaalista valmistettuja riimoja käyttäen toteutettua palokatkoa. Viivojen merkitys selitetään tekstissä.



## Reiällinen palamattomasta materiaalista tehty palokatko

Alemman palokatkon alapuolelta mitatut lämpötilat pysyivät hieman alle 200 °C:ssa siihen asti, kunnes julkisivua kuvaava levy paloi puhki. Tämän suuruinen lämpötilaluku voidaan pääosin selittää polttimeen liekkien lähettämän lämpösäteilyn aiheuttamana lämpenemisenä. Ennen kuin julkisivu paloi puhki kuumien kaasujen virtaaminen rakoon oli ilmeisesti suhteellisen vähäistä. Tätä päättelyä tukee se havainto, että tänä aikana savua ja palavia kaasuja työntyi ulos raon alareunasta. Kaasun lämpötilat alemman palokatkon alapuolella saavuttivat puun syttymislämpötilaa vastaavan 300 °C:n rajan pari minuuttia sen jälkeen, kun levyn oli havaittu palaneen puhki, noin 9,5 minuuttia polttimeen sytytyksen jälkeen (6,5 minuuttia siitä, kun polttimeen teho saavutti asetusarvonsa).

Tänä aikana, ennen julkisivulevyn puhkipalamista, ylemmän palokatkon yläpuolella sijainnut lämpötila-anturi TE8 näytti hetkellisesti korkeaa lämpötilaa. Tämä johtuu siitä, että alhaalta ylös kulkeutuneet kaasut paloivat ylhäällä hetkellisesti polttimeen liekkien sytyttäminä.

Kun levy paloi puhki, kuumia kaasuja pääsi virtaamaan rakoon aiempaa enemmän. Lisäksi säteily lämpötila-antureiden kohdalla lisääntyi. Siksi levyn puhki palaminen näkyy alemman palokatkon alapuolella mitatuissa lämpötiloissa selvänä taitekohtana, jonka jälkeen niiden lukemat nousevat selvästi. Myös alemman palokatkon yläpuolella mitatuissa lämpötiloissa on havaittavissa nousu, mutta ne pysyivät kuitenkin alhaisina, selvästi alle 200 °C.

Kun julkisivulevy alkoi palaa puhki alemman palokatkon yläpuoliselta osalta, raon lämpötilat tällä alueella alkoivat kasvaa hieman nopeammin. Lämpötilojen nousu nopeus kiihtyi sitä mukaa, kun palamisrintama levyn pinnalla eteni ylöspäin. Lämpötilat eivät kuitenkaan olleet kovin korkeita: 100 mm alemman katkon yläpuolella lukemat olivat alle 200 °C 15 minuuttia polttimeen sytytyksen jälkeen (12 minuuttia siitä, kun polttimeen teho saavutti asetusarvonsa) ja alle 250 °C 20 minuuttia polttimeen sytytyksen jälkeen (17 minuuttia siitä, kun polttimeen teho saavutti asetusarvonsa). Ylempänä, 100 mm ylemmän palokatkon alapuolella, lämpötilat olivat noin 50 °C näitä arvoja alempia.

Hieman ennen kuin liekkirintaman havaittiin saavuttavan ylemmän palokatkon, palokatkojen välisen rakotilan kaasun lämpötilat saavuttivat 300 °C. Tilan alaosassa, 100 mm alemman palokatkon yläpuolella tämä tapahtui 21 minuutin kuluttua polttimeen sytytyksestä (18 minuuttia siitä, kun polttimeen teho saavutti asetusarvonsa) ja tilan yläosassa kaksi minuuttia myöhemmin. Ylemmän palokatkon yläpuolisten lämpötila-antureiden lukemat pysyivät tässä vaiheessa alle 200 °C:n.

Ylemmän palokatkon yläpuolella mitatut lämpötilat alkoivat nousta jyrkästi 27 minuutin 15 sekunnin kuluttua polttimen sytytyksestä (24 min 15 s siitä, kun polttimen teho saavutti asetusarvonsa). Tänä aikana voimakkain palaminen oli keskittynyt juuri tähän alueeseen ja on ilmeistä, että tämä jyrkkä lämpötilojen nousunopeuden kasvaminen johtuu siitä, että julkisivulevy ylemmän palokatkon yläpuolella paloi puhki tuolla hetkellä.

Tällä palokatkotyyppillä mitattujen lämpötilojen kehittyminen seurasi pääasiallisesti palon leviämistä julkisivulevyn pinnassa. Tämä oli määräävä palon leviämistapa, palon leviäminen tuuletusraossa oli selvästi vähäisempää. Palokatko toimi siis varsin hyvin.

### **Palavasta materiaalista valmistettuja rimoja käyttäen toteutettu palokatko**

Lämpötilat alemman palokatkon alapuolella nousivat nopeasti korkeiksi. Samalla, kun polttimen paloteho nousi asetusarvoonsa, lämpötilalukemat olivat nousseet noin 400 °C:seen ja kasvoivat nopeasti. Julkisivua kuvaava levy paloi puhki noin 3 minuutin kuluttua tästä hetkestä. Se, että levy kuumentui molemmilta puoliltaan nopeutti selvästi sen puhki palamista. Levyn palaessa puhki lämpötilat alemman palokatkon alapuolella olivat lähes 800 °C. Havaintojen mukaan koko alemman palokatkon alapuoleinen tila oli liekkien täyttämä. Raon alareunasta ei juurikaan tullut savua tai kaasuja. Tämän voidaan tulkita merkitsevän sitä, että tilan paine ei nousut paljoakaan, vaan palokatkon läpi tapahtui riittävän voimakasta virtausta paineen nousun estämiseksi.

Myös se, että alemman palokatkon yläpuolella mitatut lämpötilat (T3 ja T4) olivat ennen julkisivun puhkipalamista tällä alueella saavuttaneet noin 400 °C:n lämpötilan, osoittaa, että palokatko ei pidättänyt virtausta kovinkaan hyvin. Puun syttymistä vastaava 300 °C:n lämpötila saavutettiin alemman palokatkon yläpuolella jo silloin, kun poltin saavutti asetuspalotehonsa.

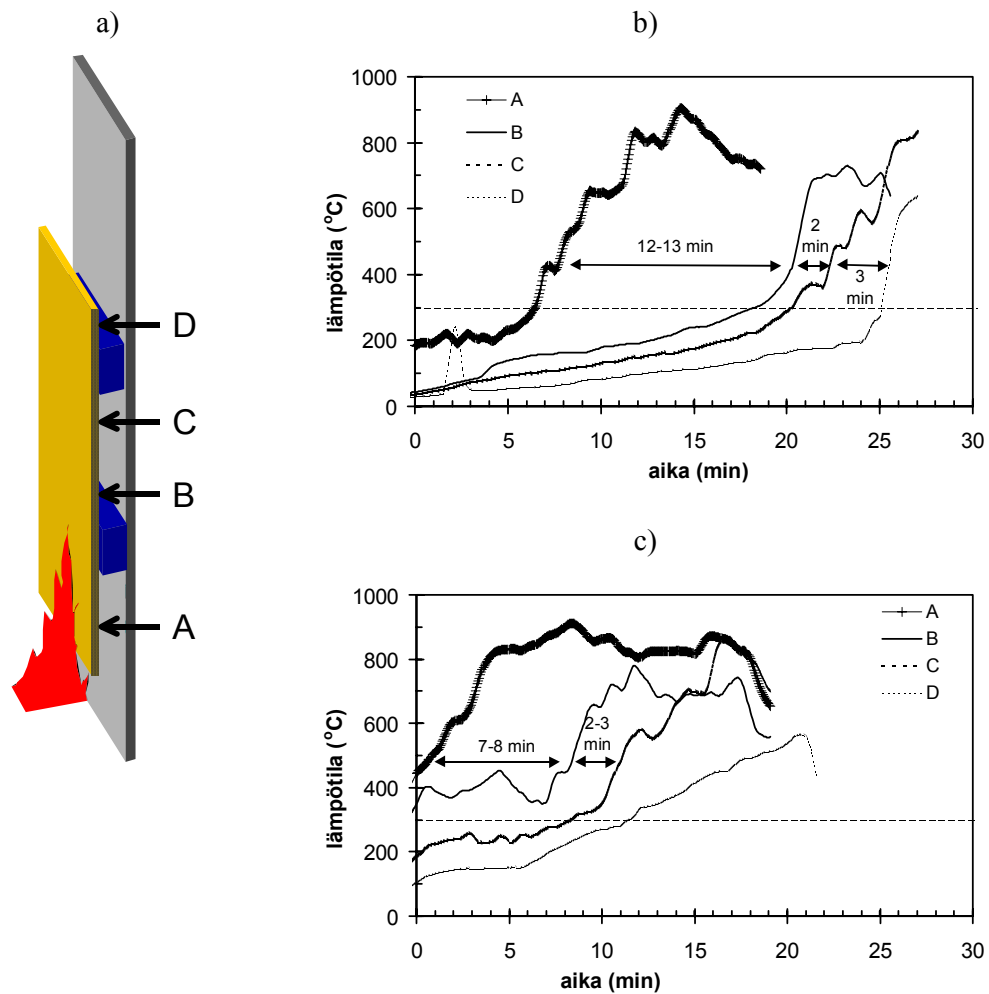
Julkisivulevyn havaittiin palavan puhki alemman palokatkon yläpuoliselta osalta noin 5 minuuttia polttimen sytytyksen jälkeen (eli 3 minuuttia siitä lukien, kun polttimen teho saavutti asetusarvonsa). Tällä ei ollut havaittavaa vaikutusta lämpötilojen kehitykseen.

Kolme minuuttia sen jälkeen, kun julkisivu oli palanut puhki alemman palokatkon alapuolelta, se paloi puhki myös raon katkon yläpuolelta. Tämä kiihdytti palamista ja lämpötilan nousua palokattojen välisessä tilassa. Myös ylemmän palokatkon yläpuolella mitatut lämpötilat alkoivat kasvaa nopeammin. Tämä on ilmeisesti eräs osoitus siitä, että palokatkorakenne ei kuristanut virtausta kovin tehokkaasti, vaan sen läpi tapahtui merkittävää kuumien kaasujen virtausta.

Kun levy oli palanut puhki, alemman palokatkon yläpuolelta palaminen eteni ylöspäin varsin voimakkaana siten, että läpipalanut alue laajeni ylöspäin varsin joutuisasti. Tämä alue saavutti ylemmän palokatkon 12 minuuttia polttimen sytytyksen jälkeen (10 minuuttia siitä, kun polttimen teho saavutti asetusarvonsa). Palokatkojen välisen tilan lämpötila-antureiden TE5 ja TE6 lukemat reagoivat selvästi tähän tapahtumaan; anturin TE7 mittaama lämpötila oli alkanut kasvaa jo silloin, kun levy paloi puhki palokatkojen välisen tilan alaosassa. Ylemmän palokatkon yläpuolella mitattujen lämpötilojen kasvussa ei ole havaittavissa merkittävää muutosta.

Puun syttymistä vastaava 300 °C:n lämpötila saavutettiin palokatkojen välisen tilan yläosassa noin 11 minuutin kuluttua polttimen sytyttämisestä (9 minuuttia siitä, kun polttimen teho saavutti asetusarvonsa) ja ylemmän palokatkon yläpuolella noin 13,5 minuutissa polttimen sytyttämisen jälkeen (11,5 minuuttia siitä, kun polttimen teho saavutti asetusarvonsa).

Tässä kokeessa tuuletusrako osallistui palon leviämiseen merkittävästi. Palo eteni myös julkisivun pinnalla. Palokatko hiiltyi kokeessa läpi.



Kuva 42. Eri palokatkoilla tehdyissä mitattujen lämpötilojen vertailu: a) mittauspaikat (A – alemman palokatkon alapuolella, B – 100 mm alemman palokatkon yläpuolella, C – 100 mm ylempään palokatkon alapuolella, D – 20 mm ylempään palokatkon yläpuolella), b) reiällistä palamatonta palokatkoa ja c) raollista palava-aineista katkoa käyttäen tehdyissä kokeissa mitatut lämpötilat. Aika-akselin nollakohta vastaa hetkeä, jolloin polttimen paloteho saavutti säätöarvonsa. Vaakasuora katkoviiva vastaa 300 °C:n lämpötilaa.

### 4.2.2.3 Koetulosten yhteenveto ja tulkinta

#### **Yhteenveto**

Yllä olevassa kuvassa 42 on esitetty mitatut lämpötilat siten, että niiden ajan nollakohdaksi on se hetki, kun polttimen paloteho saavutti asetusarvonsa. Näin esitettynä tulokset ovat parhaiten vertailukelpoisia.

Katkojen toimintaa voidaan arvioida esimerkiksi sen perusteella, missä ajassa puun syttymislämpötila, noin 300 °C, saavutetaan katkon yläpuolella. Aika, jolloin tämä lämpötila saavutetaan vastaa hetkeä, että katkon yläpuolella olevan puuaineksen syttyminen tulee mahdolliseksi. Toinen tapa arvioida katkojen toimintaa on tarkastella viiveitä, jotka ne tuottaa palamisen etenemiseen.

Kuvista nähdään, että 5 %:iin rei'illä kuristettu palamattoman palokatkon tapauksessa 300 °C:n raja saavutetaan alemman katkon yläpuolella noin 20 minuutissa. Katkojen välisessä tilassa palo etenee siten, että se saavuttaa ylemmän katkon pari minuuttia myöhemmin. Ylemmän katkon yläpuolelle 300 °C:n lämpötilarintama etenee 3 minuuttia tämän jälkeen eli noin 25 minuutissa. 20 %:iin pitkänomaisella raolla kuristetun palavan palokatkon tapauksessa katkon alapuolella ja 100 mm sen yläpuolella vallitsee koko tarkasteluajan yli 300 °C:n lämpötila. Ylemmän katkon alapuolelle 300 °C:n lämpötilarintama etenee 8 minuutin kohdalla ja sen yläpuolelle 3 minuuttia myöhemmin.

Kun tarkastellaan lämpötiläkäyrissä näkyviä selviä nousuja, havaitaan, että alempi rei'illä kuristettu palamaton palokatko pidättää tulen leviämistä noin 12–13 minuuttia. Pitkänomaisella raolla kuristetulle palavasta aineesta tehdylle palokatkolle vastaava aika on 7–8 minuuttia. Molemmissa tapauksissa palo eteni katkojen välisen matkan 2–3 minuutissa.

Ylemmän katkon yli tuli levisi rei'illä kuristetun palamattoman palokatkon tapauksessa noin 3 minuutissa. Tämä aika ei kuitenkaan kuvaa ylemmän palokatkon toimintaa kuin pieneltä osin, koska siihen vaikutti voimakkaasti palon leviäminen katkon ohi julkisivun pinnalla. Tätä puolestaan edesauttoi se, että kokeessa polttimet liekit ulottuivat ylemmän katkoon saakka. Pitkänomaisella raolla kuristetulle palavasta aineesta tehdylle palokatkolle vastaavaa aikaa on vaikea arvioida.

#### **Tulkinta**

Tutkituista palokatkoratkaisuista rei'itetty palamaton palokatko esti tehokkaammin palon leviämistä. Tätä suhteellisen vertailun tulosta oleellisempaa on kuitenkin katkojen toiminnan arviointi sen suhteen, onko niiden toiminta riittävää, jotta niiden voitaisiin

katsoa täyttävän RakMK:n osan E1 kohdan 8.3.5 esittämän vaatimuksen ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviämisen riittävän tehokkaasta estämisestä.

Seuraavassa pyritään arvioimaan tätä käyttäen lähtökohtana vertailua muihin rakenteisiin. Ne ovat seuraavat:

- Julkisivu, jossa ei ole tuuletusrakoa ja puupinnan alla on yhtenäinen taustamateriaali. Tällaisen rakenteen palonlevitysominaisuudet riippuvat puupinnan takana olevasta materiaalista. Jos taustamateriaali on hyvä eriste, tämä rakenne edustaa toimintaa, johon palokatkoilla voidaan parhaimmillaan päästä. Jos taustamateriaalina on jokin huonompi eriste, tällainen seinä toimii palonleviämisen suhteen paremmin kuin palokatkoilla suojattu seinä.
- Julkisivu, jonka tuuletusrako on suljettu tiiviisti esim. vaakasuuntaisin koolauksin. Tämä rakenne vastaa edellistä rakennetta siten, että tässä ”taustamateriaalina” on ilma, joka on hyvä eriste.
- Julkisivu, jonka takana on avoin, katkomaton tuuletusrako. Palokatkolla varustetun rakenteen tulee toimia selvästi tämä rakennetta paremmin.

Vertailussa tarkastellaan vain ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviämistä, ei lieskahtaneen palon leviämistä. Ulkoisesti syttyvistä paloista rajataan tarkastelun ulkopuolelle suuret, suuruusluokaltaan megawatin palotehon omaavat palot<sup>14</sup>. Syy tähän on se, että tällaisten palojen tuottaman palorasituksen synnyttämä julkisivupalo leviää nopeasti laajaksi oleellisesti tuuletusraon palonlevitysominaisuuksista riippumatta samaan tapaan kuin lieskahtaneen huoneistopalon synnyttämä julkisivupalo.

Vertailussa käytetyt tiedot puujulkisivun pinnalla leviävän palon etenemisestä on saatu Hakkaraisen ym. (1996) ja Kokkalan ym. (1997) raporteista. Yhteenveto näistä raporteista saaduista tiedoista esitetään liitteessä B. Alla esitetään ko. liitteen yhteenvetokaavio siten, että siihen on lisätty edellä esitettyihin koetuloksiin perustuvat palon leviämisarviot kahdelle tutkitulle palokatkotyypille, reiällinen palamaton katko (avoin osuus 5 %) ja raollinen palavasta aineesta tehty katko (avoin osuus 20 %).

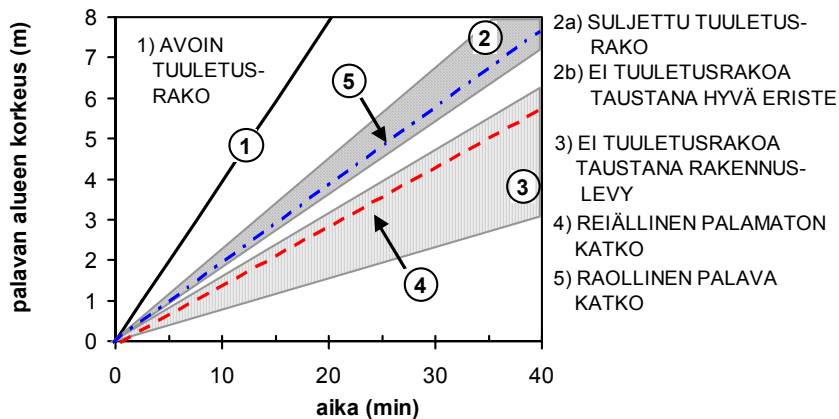
Katkojen palon etenemistä viivästyttävä vaikutus on arvioitu pelkästään sinä viiveenä, jonka katko pidättää palon etenemistä sen ohi. Koska palokatko hidastaa tuuletusraon

---

<sup>14</sup> Esimerkkinä tällaisista suurista ulkoisesti syttymisen alkupaloista voidaan mainita mm. talon seinustalla palamaan syttyvä auto.

lämpenemistä ja virtausnopeuksia, se vähentää palon leviämisenopeutta myös muuallakin kuin katkon kohdalla. Tästä vaikutuksesta ei kokeista saatu riittävän kvantitatiivista tietoa ja siksi se jätetään tässä huomiotta ja muualla kuin katkon kohdalla palo oletetaan leviävän samalla nopeudella kuin katkomattomassa raossa. Palokatkon kohdalla liekki-rintaman etenemisen viiveenä käytetään edellä mainittuja arvoja: 12–13 minuuttia reiälliselle palamattomalle katkolla ja 7–8 minuuttia raolliselle palava-aineiselle katkolle.

Nämä arviot on esitetty katkoviivoin alla olevassa kuvassa 43. Nähdään, nämä laskennalliset arviot asettuvat molemmille katkoille samalle alueelle kuin suljetulle tuuletusrakolle tai tuuletusraottomalle rakenteelle saadut leviämisenopeudet. Se, että ko. viivat osoittavat täysin suljettua tuuletusrakoa hitaampaa palon leviämistä johtuu pinnalla leviävästä palosta, jota em. arviointi ei ota huomioon. Pinnalla leviävä palo nopeuttasi palon leviämistä suunnilleen siten, että molemmilla palokatkoilla palon leviäminen vastasi suunnilleen suljetun tuuletusraon toimintaa. Näyttää siis siltä, että molemmat tutkitut katkot täyttävät RakMK:n osan E1 kohdan 8.3.5 esittämän vaatimuksen ulkoisen syttymisen aiheuttaman palon leviämisen riittävän tehokkaasta estämisestä.



Kuva 43. Kaaviollinen esitys tutkittujen palokatkojen vertailusta muun tyyppiisiin seinärakenteisiin. Kuvan tulkinta on esitetty tekstissä.

Se, miten julkisivu kokonaisuutena toimii ja miten nopeasti palo leviää, riippuu myös julkisivun paksuudesta. Tässä voidaan erottaa kaksi tekijää: toinen on paksuuden vaikutus ainekerroksen syttymisaikaan ja toinen on kerroksen läpihiiltymisen. Näistä jälkimmäinen on merkittävämpi tekijä. Edellinen tekijä, paksuuden vaikutus syttymisaikaan, on merkittäväksi vain ohuilla puutavaroilla: esim. kuusipuulle, jonka tiheys on  $\rho = 440 \text{ kg/m}^3$ , ominaislämpö  $C = 1800 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$  ja lämmönjohtavuus  $k = 0,16 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ , paksuuden syttymistä hidastava vaikutus ei ole juurikaan havait-

tavissa alle 20–30 mm:n paksuudella<sup>15</sup>. Tätä paksummilla ainekerroksilla vaikutus voimistuu. Läpi hiiltymiseen ainekerroksen paksuus vaikuttaa osapuilleen suoraan verrannollisena paksuuteen: 9–12 mm tuote hiiltyy läpi noin 10 minuutissa, mutta 22–25 mm:n tuotteen läpihiiltymiseen menee yli 20 minuuttia.

Alkupalon paloteho ei vaikuta suoraan tuuletusraossa leviävään paloon kuin varsin pienillä alkupaloilla, koska kapeaan rakoon pääsee virtaamaan vain pieni osa alkupalossa vapautuvasta lämmöstä. Jos tuuletusraon syvyys on esimerkiksi 22 mm, noin lämpötilassa 700 °C olevat liekeistä rakoon pystyy kuljettamaan noin 20 kW teho<sup>16</sup>. Siihen, miten palo kokonaisuudessaan leviää, pintaleviäminen mukaan lukien, alkupalon koolla on vaikutusta etenkin palon alussa aina siihen asti, kunnes julkisivulla leviävä palorintama on edennyt alkupalon liekkien lämmittämän alueen ulkopuolelle<sup>17</sup>.

### 4.3 Julkisivun tuuletusraot: yhteenveto ja suositukset

Julkisivun tuuletusraossa etenevän palon vaikutus paloturvallisuuteen riippuu monista eri tekijöistä. Palon etenemiseen julkisivulla vaikuttavat palorasitus, tuuletusraon dimensiot, sen reunapintojen ja julkisivun materiaali ja muut ominaisuudet sekä raon palokatkot. Lisäksi palamisen edellytysten pitää olla voimassa, jotta palo voi edetä: polttoaineen lisäksi tarvitaan riittävä kuuminen ja happea. Raon virtaustekniset ominaisuudet säätelevät voimakkaasti kahta viimeksi mainittua tekijää.<sup>18</sup>

---

<sup>15</sup> Tulokset saatu FEM-menetelmää käyttäen. Lukuarvo 20–30 mm vastaa lämmönsiirron karakteristista pituusmittaa  $k/h \sim 5 \cdot 0,16/25 \text{ m} \sim 30 \text{ mm}$ , kun lämmönsiirtokerroin on  $25 \text{ WK}^{-2}\text{m}^{-2}$ .

<sup>16</sup> Kaasujen virtausnopeus katkomattomassa tuuletusraossa on noin 4–5 m/s. Konvektiivisen lämmönsiirron osuudeksi on oletettu tyypillinen arvo 70 %.

<sup>17</sup> Esimerkiksi lämpövirrantiheyden  $15 \text{ kW/m}^2$  suhteen tämä alue noin 1–1,5 m korkea 50–150 kW:n palotehoille ja 1,5–2,5 m korkea 150–400 kW:n palotehoille.

<sup>18</sup> Nämä kaikki tekijät on otettava huomioon, kun verrataan eri tilanteita. Esimerkiksi lieskahtaneen palon aiheuttamaa palorasitusta käyttäen tehtyjen kokeiden tuloksien vertaamisessa pienellä ulkoisella sytytyksellä tehtyjen kokeiden tuloksiin tulee olla varovainen. Lieskahtaneessa palossa esim. tuuletusraon hapensaanti on paljon huonompaa kuin silloin, kun pieni palorasitus kohdistuu vain johonkin kohtaan koolaus-ten rajoittamaa tuuletustilaa.



Julkisivulla etenevän palon hidastaminen on tärkeää, mutta ratkaiseva kysymys on kuitenkin se, milloin palon eteneminen on riittävän hidasta. Lopulta julkisivulla etenevän palon merkitys henkilövahinkojen ja omaisuusvahinkojen syntymiseen riippuu

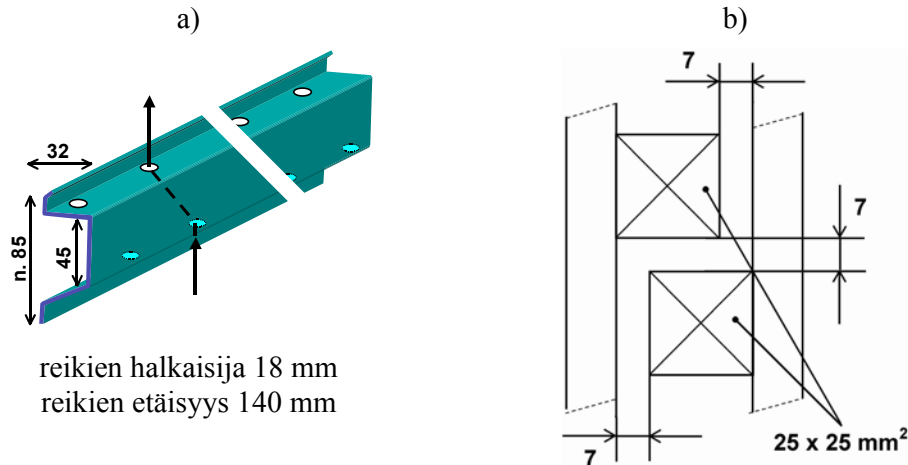
Tuuletusraon tehtävä on rakenteen riittävän tuuletuksen järjestäminen: siellä pitää päästä virtaamaan riittävästi ilmaa, jotta rakenne pysyy niin kuivana, ettei synny kosteusongelmia. Siksi rakoa ei voi katkaista siten, että ilmavirtaus estyy kokonaan.

Julkisivun tuuletusraon palokatkojen suunnittelussa perusongelma on palo- ja kosteusteknisen toimivuuden yhtäaikainen toteuttaminen. Koska väärän toimivuuden arvioinnin seurauksena voi mahdollisten kosteusvaurioiden osalta olla mittavat kustannukset vaativa julkisivukorjaus ja palotekniikan osalta suuret omaisuusvahingot ja jopa ihmishenki- en menettäminen, tämä arviointi tulisi perustaa määrälliseen tekniseen tietoon.

Tässä työssä on luotu määrällistä teknistä tietoa koskien julkisivuja, joissa julkisivun ja tuuletusraon ulkopinta on D-luokan rakennustarviketta ja tuuletusraon sisäpinta B-luokan tarviketta. Uhkakuvana on ulkoisen syttymisen aiheuttama palon leviäminen julkisivulla.

Työssä tutkittiin kahta erilaista palokatkoa. Toinen oli teräsprofiili (Kuva 44a), jossa oli  $\phi 18$  mm reikiä 140 mm:n välein. Pystysuunnassa reiät olivat kahdessa rivissä siten, että ne eivät olleet kohdakkain. Yhdessä rivissä olevien reikien koon perusteella laskettuna katko kuristi raon vapaan pinta-alan 5 %:iin koko pinta-alasta (pinta-alasta suljettiin siis 95 %). Tämän katkon virtausvastuksen perusteella tehdyissä kosteusteknisissä laskuissa ja arvioinneissa havaittiin, että katko toimii kosteusteknisesti (reikien sallima virtaus on sopivan toleranssin päässä minimivaatimuksesta). Edellytyksenä toimivuudelle on kuitenkin se, että sadevesiä ei pääse merkittävästi tuuletusrakoon. Esimerkiksi pontattu puuseinä on tähän nähden riittävän tiivis rakenne.

Toinen palokatko tehtiin asentamalla kaksi puurimaa kuvan 44b mukaisesti. Tässä palokatkossa virtauskuristus muodostui rimojen sekä rimojen ja tuuletusraon reunojen välisistä vaakasuorista raoista. Katkon yhden raon koon perusteella laskettuna katko kuristi tuuletusraon vapaan pinta-alan 20 %:iin koko pinta-alasta. Tämä arvo on nelinkertainen edelliseen katkoon verrattuna. Koska 5 %:iin kuristettu ratkaisu toimii kosteusteknisesti ja rimoilla toteutetussa katkoratkaisuissa vapaa pinta-ala on moninkertainen, myös sen pääteltiin toimivan kosteusteknisesti.



Kuva 44. Tutkitut palokatkot: a) rei'itetty palamattomasta materiaalista tehty palokatko ja b) puurimoista tehty palokatko. Tehdyissä kokeissa palokatkojen väli pystysuunnassa oli k/k 360 mm.

Näistä kahdesta palokatkoratkaisusta rei'itetty teräsprofiilikatko toimi paloteknisesti paremmin, mutta paloturvallisuuden kannalta molempien katkoratkaisujen toimivuuden arvioitiin olevan riittävää. Tämä arvio perustuu vertailuun muihin seinäratkaisuihin: koetulosten perusteella voitiin arvioida, että julkisivu, joka on katkottu tutkituilla palokatkoilla levittää paloa oleellisesti samalla nopeudella kuin kokonaan julkisivu, jossa tuuletusrako on katkottu vaakakoolauksin.

Tässä työssä saadut tulokset tukevat pääosin uudessa RT-kortissa (RT 99–10779 2002) esitettyjä puutalon julkisivun palokatkoja koskevia tietoja. Etenkin pääperiaate ja -viesti on sama: julkisivupaloa voidaan hidastaa ja rajoittaa pystykoolauksin kaistoittamalla ja vaakasuuntaisia kuristuksia käyttäen. Merkittävin eroavuus koskee RT-kortissa mainittua teräsreikäpeltipalokatkoa, jonka reikäosuus on 30 % ja reikien halkaisija 3 mm. Tämä reikäosuus on kuusinkertainen tässä työssä hyväksi havaittuun ratkaisuun verrattuna. Vaikka pienempien reikien tuoma lisävastus otetaan huomioon, ero on varsin suuri ja siksi tässä työssä suositellaan pienempää kuin 30 % reikäosuutta. puurimoilla toteutetun ratkaisun perusteella reikäosuuden on syytä olla korkeintaan 20 %.

Aiemmin on havaittu, että esim. teräsverkkopakoilla saadaan aikaan tehokas tuuletusrakon palokatko. Tämän työn tulosten perusteella on ilmeistä, että tällaisilla hyvin tiheillä systeemeillä huononnetaan vakavasti seinän kosteusteknistä toimintaa.

Palon aikana paisuvat materiaalit tarjoavat periaatteessa oivallisen ratkaisun tuuletusrakon palokatkoksi, koska ne sulkevat tuuletusrakoa vasta tulipalon aikana. Koska paisunut kerros voi olla paksuudeltaan 10–20-kertainen paisumattomaan kerrokseen nähden, kos-

teustekninen toimivuus on helppo toteuttaa. Voimakkaasti paisuneessa kerroksessa aineen tiheys ei kuitenkaan ole kovin suuri ja ongelmana on toisaalta, että tämän kerroksen läpi voi päästä vuotamaan liikaa savukaasuja ja toisaalta se, miten hyvin kevyt ja huokoinen paisunut kerros pysyy paikallaan. VTT:llä aiemmin tehdyissä kokeissa havaittiin nämä molemmat ongelmat, joskin palokatkon toiminta oli kohtuullinen. Paisuvi-  
en systeemien (maalit, laminaatit, yms.) käyttöön liittyy muitakin ongelmia, esim. se, alkaako paisuminen riittävän nopeasti, jotta palo ei pääse leviämään ennen tätä sekä se, toimiiko materiaali halutulla tavalla vielä pitkän ajan kuluttua, vai menettääkö se ominaisuutensa kokonaan tai osittain. Nämä ovat teknisiä ongelmia, joihin on löydettävissä tekniset ratkaisut ja luotettavat tavat osoittaa, että ratkaisut toimivat halutulla tavalla. Nimenomaan luotettavuuteen liittyvät kysymykset ovat ehkä ne, jotka vaativat eniten lisätyötä.

## 5. Alaslasketut katot ja nostetut lattiat

### 5.1 Taustaa

Erään paloturvallisuuden kannalta tärkeän ontelotilaryhmän muodostavat rakennuksen sisällä olevat alaslasketujen kattojen tai nostettujen lattioiden muodostamat ontelotilat<sup>19</sup>. Näissä tiloissa mahdollisesti syttyviin paloihin liittyy muihin tässä raportissa käsitelyihin ontelotiloihin verrattuna paljon suurempi henkilövahinkoriski, koska ontelossa etenevä palo voi suoraan uhata henkilöitä. Tyypillisin palokuorma näissä tiloissa on nykyään muovivaipaiset kaapelit, mutta joissain satunnaisissa tapauksissa onteloissa voi olla myös palavasta aineesta tehtyjä rakennustarvikkeita. Onteloiden kaapelipalokuorma on kasvava paloturvallisuusuhka: 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.

Tyypillisimpiä kaapelipalokuormaa sisältäviä kohteita ovat toimistorakennukset, mutta myös esim. sairaaloiden ja muiden hoitolaitosten sekä koulujen onteloissa voi kulkea merkittäviä määriä kaapeleita. Näissä kohteissa alakatot ovat tyypillisesti suljettuja siten, että palo voi kehittyä niiden suojissa piilossa katseilta ja lisäksi kuumuus ja savu eivät pääse vuotamaan alakaton läpi niin kauan, kun se on ehjä. Myymälöissä palokuorman määrä on tyypillisesti em. kohteita pienempi, mutta niissä voi olla paljon uhattuja henkilöitä. Myymälöissä käytetään varsin usein avoimia alakattorakenteita (esim. ristikkoja).

Tässä työssä tarkastellaan edellä mainitussa mielessä suljettuja alakattoja, ks. Kuva 45. Työssä on selvitty, miten suuriin osiin ontelot tulisi varsinaisen palo-osastojaon lisäksi jakaa ja millaisilla rakenteilla. Palo-osastointia käsitellään lyhyesti osastoivien seinien läpivientien tiivistämisen kannalta.

---

<sup>19</sup> Jatkossa alaslasketuja kattoja kutsutaan lyhyiden vuoksi alakatoiksi ja nostettuja lattioita kutsutaan korokelattioiksi.

### 5.1.1 Rakenteista

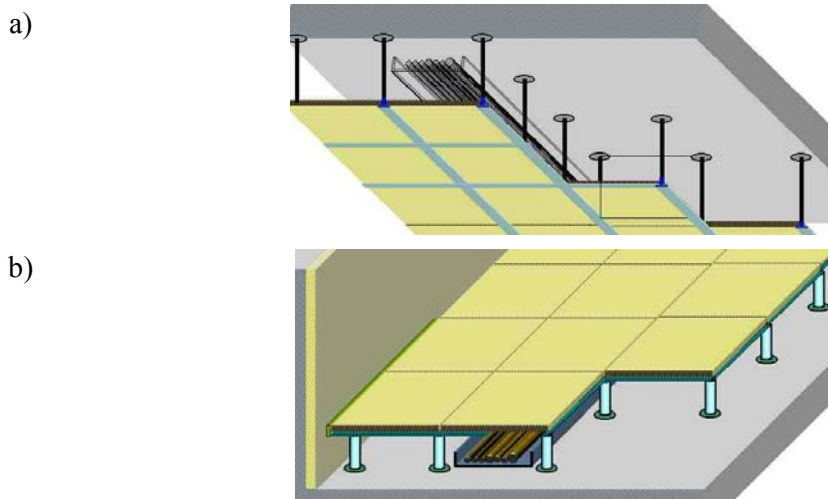
Alakatto on kantavan rakenteellisen väli- tai yläpohjan alapuolelle ripustettu sisäkatto. Sen yläpuolelle jää alakaton ontelo, jota käytetään pääosin ilmanvaihtokanavien, sähköasennusten tai muiden teknisten verkostojen asennustilana. Alakaton osat ovat: alakaton verhoukset (tässä työssä tarkastellaan levy-, paneeli- tai kasettiverhouksia), äänenvaimennusstarvikkeet, otsapinta, alakaton runko, alakaton kannatusrakenne, alakaton ontelo, LVIS-asennusten liittämistarvikkeet ja yhteiskannatusjärjestelmä.

Alakattoja ja sisäkattoverhouksia käsittelevän RT-kortin 84–10489 (1992) kohdassa 6.1 on esitetty alakatossa tai sen ontelossa olevia LVI-asennuksia ja kohdassa 6.2 sähköasennuksia. Alakaton on kestävä a.o. asennusten kuormittamana tulipaloo siten, että asennukset toimivat asianmukaisella tavalla. Tämä on erityisen tärkeää, kun alakattoon on asennettu paloilmalaitteita tai sprinklereitä. Alakatossa on myös oltava riittävästi huoltoluukkuja, joiden kautta asennuksia päästään huoltamaan. Asennustilan tarvetta alakaton ontelossa voivat LVI-laitteiden osalta kasvattaa lämmöneristykset, kosteuseristykset, paloeristykset sekä ilmastointilaitteiden äänenvaimentimet.

Alakaton ontelossa olevia LVI-laitteistoja ovat vesikiertoiset kattolämmityslaitteistot, sprinklerilaitteistot, sekä ilmastointilaitteistot asennuksineen. Sähkölaitteistoja ovat johtotiet, sähköjakelujärjestelmät (jakelu- ja kosketinkiskot sekä pistorasiakanavat), upotettavat valaisimet, puhelinjärjestelmien liittämispistokkeet sekä sisäantennit (antenni, lähetin ja verkkolaite), antenni- ja televisiojärjestelmät (raskaat monitorit ripustetaan suoraan yläpohjaan), äänentoistojärjestelmät (tehokaiuttimet ripustetaan suoraan yläpohjaan), aikakello-, kulunvalvonta-, paloilmoin-, murtohälytys- ja ATK-järjestelmät sekä sähköllä toimivat kattolämmitysjärjestelmät. Johtotiet ovat yleensä 100–500 mm leveitä kaapeliarinoita, jotka asennetaan alakaton onteloon omiin tai yhteisiin katto- tai seinäkannatusosiin tai suoraan alakattoon. Johtoteihin kiinnitetään suurvirtakaapelijärjestelmiä, jakorasioita, liittämälaitteita yms. Johtoteiden kohdalta (vähintään risteys-, mutka- ja rasiointikohdalta) alakaton tulee olla helposti avattava.

Korokelattia on yleisnimitys kantavan lattian päälle tehtäville käyttölattioille. Niiden käytöllä on saavutettavissa monia etuja (Möttönen & Hirviniemi 2000), esim. muuntojoustavuus, mahdollisuus sijoittaa talotekniikkaa lattiarakenteisiin, välipohjarakenteen ääneneristävyyssominaisuuksien parantaminen ja kuiva rakentaminen. Korokelattioita ovat asennus- ja ontelolattia sekä kerroksellinen lattia. Asennuslattia on yleisin korokelattia; ontelo- ja kerroskattolattiat suunnitellaan tapauskohtaisesti. Korokelattian osia ovat pintamateriaali, lattialevyt, alusrakenne (asennusjalat, välituet, palkit), IV-säleiköt, sähköasennusvarusteet (pistorasiat, kojerasiat), reunatiivisteet, jalkalistat ja päätylevyt.

Korokelattiarakenne suunnitellaan kestäväksi kuormitettuna alapuolista tulipaloa viranomaisten määräysten mukaan. Pintakerrosten paloluokkavaatimukset tarkistetaan tapauskohtaisesti rakennuksen paloluokan sekä tilan käyttötarkoituksen mukaan.



Kuva 45. Kaaviollinen esitys tarkastelluista alakatto- ja korokelattiaonteloista.

## 5.1.2 Määräyksiä ja ohjeita

### 5.1.2.1 Suomen Rakennusmääräyskokoelman osat E1 ja E7

Alakattojen ja korokelattioiden onteloiden osastoinnissa noudatetaan varsinaisen huone-tilan osastoinnista annettuja määräyksiä (RakMK E1, kohta 5.2.1). Esimerkiksi P1- ja P2-luokan toimistorakennuksissa osastokoko saa olla enintään 2 400 m<sup>2</sup> ja P3-luokan toimistorakennuksissa 400 m<sup>2</sup> ja P1- ja P2-luokan hoitolaitoksissa 800 m<sup>2</sup> ja P3-luokan hoitolaitoksissa 400 m<sup>2</sup>. Palo-osastoa voidaan suurentaa varustamalla osasto automaattisella paloilmioittimella, automaattisella savunpoistolaitteistolla tai automaattisella sammutuslaitteistolla (RakMK E1, kohta 5.2.3). Palonkestovaatimus on em. kohteille luokka EI 60. Ontelot osastoidaan siten, että palo-osastojen väliset seinät ulotetaan ala- tai välipohjaan saakka. Osastoivan rakennusosan läpi saa johtaa tarpeelliset putket, roilot, kanavat, johdot ja hormit sekä kuljetinlaitteistojen edellyttämät läpiviennit edellyttäen, ettei olennaisesti heikennetä rakennusosan osastoivuutta (RakMK E1, kohta 7.4.1).

RakMK osan E1 kohdan 7.6.1 ontelot on tehtävä siten, ettei palon syttymisen eikä palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa olennaisesti kasva niiden johdosta; lisäksi annetaan ohje, että ontelot jaetaan osiin tehokkailla katkoilla palon leviämisen rajoittami-

seksi. Katkojen suunnittelussa tulee ottaa huomioon rakenteiden tuuletustarve ja muut rakennusfysikaaliset lähtökohdat.

Alakaton ja välipohjan välisen tilan paloturvallisuudesta esitetään ohjeita Suomen Rakennusmääräyskokoelman osassa E7 (Ympäristöministeriö 1980). Alakaton ja välipohjan välistä tilaa tai sen osaa voidaan sellaisenaan käyttää tuloilman johtamiseen (RakMK E7, kohta 6.2). Tällöin alakatto tuki- ja kiinnitysrakenteineen tehdään palamattomista tai syttymisherkkyysluokan 1 ja palonlevittämislukokan 1 vaatimukset täyttävistä palavista rakennustarvikkeista (kohta 6.2) (*huom. vuodelta 1980 oleva säädösteksti ei tunne euroluokkia; osan E7 uudistus on kirjoitushetkellä (v. 2003) valmisteilla*). Rakenteiden onteloita voidaan käyttää ilman johtamiseen, mikäli ne täyttävät ilmahormeille asetetut vaatimukset (kohta 6.3). Ilmahormien vaatimukset on esitetty E7:n kohdassa 8.2. Kohdan 8.2.1.2 mukaan ilmahormit tehdään yleensä palamattomista rakennustarvikkeista. Hormit saa kuitenkin sisäpuolelta pinnoittaa syöpymistä vastaan palavilla rakennustarvikkeilla tapauksissa, joissa poistettava ilma voi sisältää haitallisessa määrin syövyttäviä kaasuja Kohdan 8.2.1.6 mukaan ilmahormien ja laitteiden liitoksissa saadaan käyttää vähäisessä määrin palavia tarvikkeita, ellei tästä aiheudu vaaraa palotilanteessa. Kohdan 8.2.3.3 mukaan palokestävässä rakennuksessa (nyk. P1-luokan rakennuksissa) ilmahormin paloluokka määräytyy yleensä sen paloteknisen osaston palokuorman tai käyttötavan mukaan jota hormi palvelee. Kuitenkin sellaisen paloteknisen osaston alueella, jonka lävitse hormi kulkee, paloluokka määräytyy läpäistyn osaston palokuorman tai käyttötavan perusteella, mikäli nämä edellyttävät edellä mainittua suurempaa paloluokkaa. Kohdan 8.2.4 mukaan ilmahormit tulee kiinnittää ja kannattaa siten, että ne palotilanteessa pysyvät paikoillaan vähintään niiltä edellytetyn palonkestojen ajan. Kohdan 8.2.5 mukaan ilmahormin lävistäessä osastoivan rakennusosan tulee läpimenokohta tiivistää tai muutoin varmistaa siten, ettei läpivienti oleellisesti heikennä rakennusosan osastoivuutta (tämän muotoilun tarkoituksena on sallia hyvin pienten läpivientien, esim. yksittäisten vesiputkien, vieminen osastoivan rakennusosan läpi siten, ettei erityistoimia tarvita).

### 5.1.2.2 Sprinklerisäännöt

Suuriin toimisto- ja liikerakennuksiin on usein asennettu automaattinen sammutusjärjestelmä. Sprinklerisääntöjen (CEA 4001: 1998–12 1998) mukaan (kohta 5.4) piilotilat lattiasa 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 (CEA 4001:1998–12). Näitä ohjeita noudatettaessa palon leviämisaara on ilmeisesti hyvin pieni. Siten tässä luvussa tarkastel-

tavat ontelotilojen palovaarat ja niiden rakenteelliset torjuntakeinot koskevatkin lähinnä vain sprinklaamattomia kohteita. Alakaton ja korokelattioiden onteloiden palotorjunnassa passiivisten ja aktiivisten keinojen käyttö liittyvät toisiinsa ja siksi tämän aiheen tutkimusta jatketaan ja se saatetaan loppuun Ontelotilojen paloturvallisuus hankekokonaisuuden kolmannessa osahakkeessa Ontelotilojen sammutus.

### 5.1.2.3 Muita lähteitä

RT-kortin 84–10489 (alakatot ja sisäkattoverhoukset) kohdassa 6.1 on esitetty alakatossa tai sen ontelossa olevia LVI-asennuksia, ja kohdassa 6.2 sähköasennuksia. Alakaton on kestävä a.o. asennusten kuormittamana tulipaloa siten, että asennukset toimivat asianmukaisella tavalla. Tämä on erityisen tärkeää, kun alakattoon on asennettu paloilmalaitteita tai sprinklereitä. Alakatossa on myös oltava riittävästi huoltoluukkuja, joiden kautta asennuksia päästään huoltamaan. Asennustilan tarvetta alakaton ontelossa voivat LVI-laitteiden osalta kasvattaa lämmöneristykset, kosteuseristykset, paloeristykset sekä ilmastointilaitteiden äänenvaimentimet.

### 5.1.3 Palovaarat

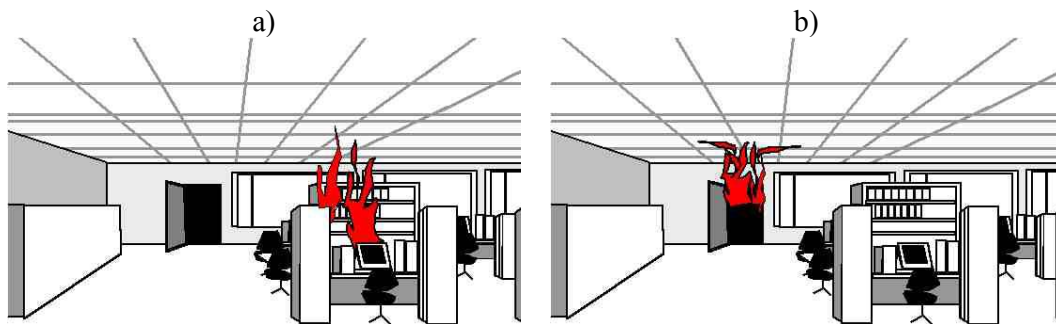
Pahin alakattojen ja korokelattioiden ontelopaloihin liittyvä vaara on se, että palo pääsee leviämään ontelotilassa niin nopeasti, että kaikki ihmiset eivät ehdi poistua vaan jäävät palon uhreiksi. Nopeasti leviävä palo muodostuu helposti tuhoisaksi myös omaisuudelle. Myös palokunnan toiminta saattaa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

#### 5.1.3.1 Ontelopalon alkamisen uhkakuvia

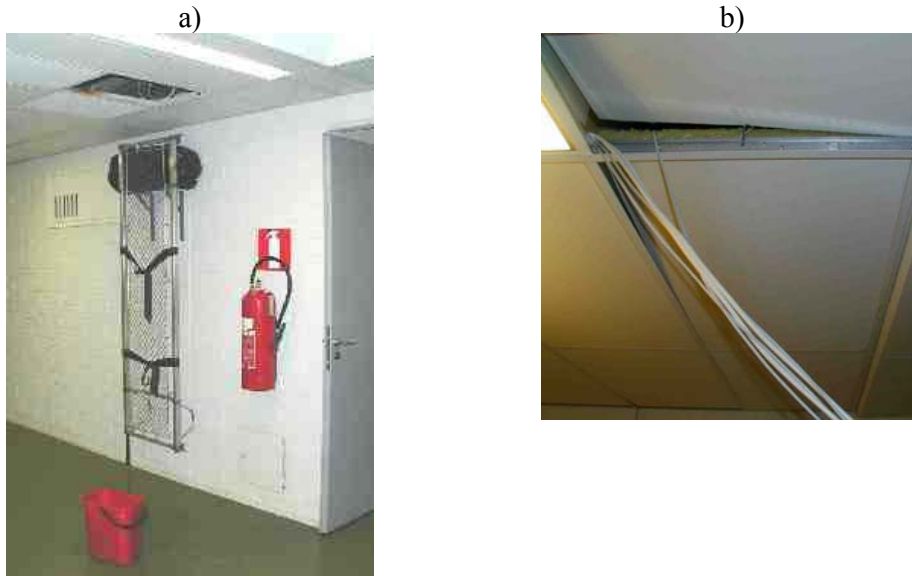
Alakaton ja korokelattian ontelopalo voi alkaa sisäisesti tai ulkoisesti. Pääasiallisena syttymissyynä sisäisesti tapahtuvassa syttymisessä voidaan pitää kaapelin kuumenemistä joko viallisen rakenteen tai löysän liitoksen johdosta. Syttymisriski kasvaa, kun kaapelin tehonsiirtokapasiteetti kasvaa. Ulkoisen syttymisen uhkakuva on alapuolisessa huoneistossa syttyneen palon leviäminen onteloon. Kaapelien palo-ominaisuuksien suhteen tässä uhkakuvasssa on kriittistä on se, osallistuvatko ontelossa olevat materiaalit paloon. Tähän liittyen on esitetty kritiikkiä sähkökaapelien palo-ominaisuuksien testausmenetelmistä, jotka saattavat olla riittämättömiä ulkoisen palon tapauksissa. Lisätarkasteluja näistä aiheista esitetään liitteessä C.



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 46). 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 tuloksiensa mukaan paikallisen palon palorasituksessa kipsilaastista tehdyt laatat putosivat 8–10 minuutissa ja kuitupohjaiset laatat kestivät 11–14 minuuttia. Lieskahtaneen palon tuottamassa palorasituksessa havaittiin kaupallisten kattojärjestelmien kestävän muutamasta minuutista pariinkymmeneen minuuttiin. Myös puuttuvat tai huonosti suljetut kattolaatat voivat tarjota tulelle kulkutien onteloon (Kuva 47). Korokelattioissa ulkoinen syttyminen on alakattoja harvinaisempaa, koska tuli pyrkii leviämään ylöspäin.



*Kuva 46. Kaksi alakaton onteloon ulkoisesti leviävän palon uhkakuvaa: a) työaseman paikallinen palo ja b) huonepalo.*



*Kuva 47. a) Puuttuvan ja b) huonosti suljetun kattolaatan tarjoama reitti palon leviämiselle alakaton onteloon.*

### 5.1.3.2 Ontelopalon leviäminen

Alakattojen ja korokelattioiden palokuorman määrä vaihtelee kohteen mukaan. Englantilaisessa tutkimushankkeessa (Fardell ym. 2000) tehdyssä onteloiden kaapelipalokuorman kartoituksessa havaittiin, että onteloissa voi olla kaapeleita hyvin paljon, jopa ”niin paljon kuin tilaan mahtuu”. Onteloissa palokuorman tiheydellä on kaksi vaikutusta. Toisaalta se vaikuttaa palon kestoon ja toisaalta tiheä palokuorma edesauttaa palon kehittymistä ja leviämistä. Koska onteloiden 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. VTT:n tekemässä kokeellisessa tutkimuksessa ontelopaloista (Hietaniemi ym. 2002) havaittiin, että kun ontelon lattiapintaa kohden lasketun palokuorman tiheys oli noin  $80 \text{ MJ/m}^2$ , palo levisi lähes  $2 \text{ m/s:n}$  nopeudella ja kun palokuorman tiheys oli noin  $140 \text{ MJ/m}^2$ , palo levisi lähes  $4 \text{ m/s:n}$  nopeudella. Myös aikaviive palokuorman syttymisestä kiivaan, nopeasti etenevän palamisen alkamiseen lyheni selvästi Tämä johtuu siitä, että korkeammalla palokuorman

tiheydellä palon alkukehityksessä suurempi määrä palavaa ainetta kuumenee, pyrolysoituu ja palaa.

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 ontelo kokonaispintaa pienempi: ontelopalo voi pystyä etenemään tilan pienuudesta johtuvan palamisen voimistumisen vuoksi laajassakin ontelossa, vaikka siellä ei olisi vain yksi syttynyt kaapelihylly.

Ontelopaloissa palokuorman laatu on yhtä tärkeää kuin sen määrä. Jos palokuorma on herkästi palavaa ainetta eli materiaalia, joka voi luovuttaa palaessaan paljon lämpöä (tyypillisesti kaapelit, jossa palavan aineen määrästä merkittävä osa muodostuu eristeissä<sup>20</sup> käytetystä palosuojamattomasta polyolefiinimuovista, esim. PE tai PP), niin palo etenee paljon nopeammin kuin tapauksessa, jossa palokuorma muodostuu heikosti paloon osallistuvasta materiaalista (esim. kaapeli, jonka vaippa ja eristeet ovat palosuojattua muovia tai fluoropolymeeriä) (Hietaniemi ym. 2002, Fardell ym. 2000). 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: ensimmäisessä 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 viiemeksi mainituista materiaaleista tai muista yhtä hyvät palo-ominaisuudet omaavista materiaaleista, ontelon osiin jaolla ei palon leviämisen suhteen ole saavutettavissa oleellisia paloturvallisuusetuja. Savun leviämisen estäminen voi toki olla tarpeen.

Palo voi edetä ontelossa hyvin nopeasti, jos ilma pääsee liikkumaan ontelossa niin, että paloon pääsee virtaamaan ilmaa sekä savukaasuja poistumaan kohtuullisen hyvin. Täl-

---

<sup>20</sup> Kaapeleita, joiden vaippa on polyolefiinimuovia ei juurikaan käytetä sisäasennuksissa.

löin 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 verhouslaattojen 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 palonleviäminen on tyypillistä esimerkiksi tapauksessa, jossa palaminen saa ilmansa huonetilan särkemän tai särkemien alakaton verhoukslevyjen kautta ja savukaasut poistuvat pääasiassa rakojen kautta. Tällöin palaminen voi olla hyvin epätyydellistä ja palossa syntyy paljon palamattomia palokaasuja, mihin liittyy em. räjähdysmäisesti humahtavan palon tai savukaasuräjähdyksen vaara.

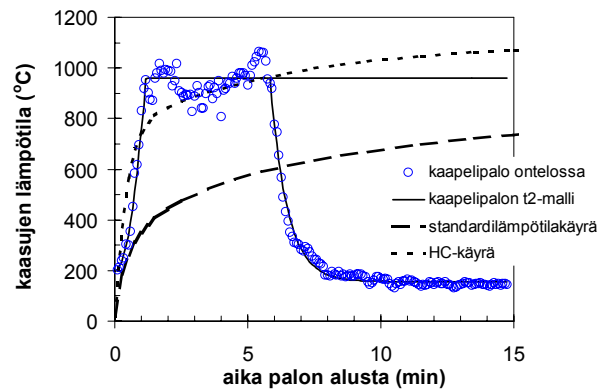
Englannissa (Fardell ym. 2000) ja VTT:llä (Hietaniemi ym. 2002) tehtyjen ontelojen kaapelipalojen tutkimusten perusteella voidaan tyypillisten kaapeleissa käytettyjen muovimateriaalien ontelopaloissa odotettavissa oleville leviämisenopeuksille esittää seuraavat yleistetyt suuruusluokka-arviot::

- kaapelit, joissa on eristeenä merkittävä osuus PP- tai PE-muovia: 1–2 m/s;
- PVC-vaippaiset ja -eristeiset kaapelit: 0,5–1,0m/s;
- palosuojatut ja FPE-kaapelit: <0,1 m/s.

Nämä nopeudet vastaavat tapauksia, joissa ontelon virtaus ei oleellisesti nopeuta palon leviämistä.

Ontelopalo voi kehittyä nopeasti hyvin kuumaksi. Kuvassa 48 verrataan eräässä VTT:n ontelopalokokeessa kaapelipalokuormalle mitattua lämpötilan kehitystä sekä standardipalokäyrään että hiilivetykalokäyrään (HC-käyrä). Nähdään, että hiilivetykalokäyrä 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 pahaa uhkakuvaa. Vaikka herkästi syttyvällä vaipalla varustettuja kaapeleita ei Suomessa ontelotiloihin asenneta, voi tietyissä

PVC-vaippaisissa kaapeleissa olla johtimien eristeenä merkittäviä määriä PE- tai PP-muovia<sup>21</sup>. Siksi tämän pahan uhkakuvan toteutuminen on kuitenkin täysin mahdollista. Palosuojatuilla tai fluoropolymeereihin perustuvilla kaapeleilla lämpötilat jäisivät kuitenkin ilmeisesti tuntuvasti alemmiksi.

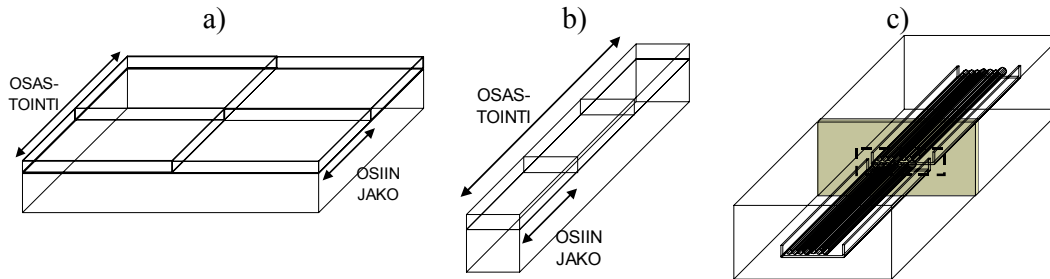


Kuva 48. Ontelopalossa muodostuvan kuumen kerroksen lämpötilan kehitys. Erilliset pisteet ovat mitattuja lämpötiloja (Hietaniemi ym. 2002) ja yhtenäiset ohuemmat käyrät esittävät neliöllisen palonkasvumallin mukaisia kuvauksia mitatuista lämpötiloista (tapaukset, joissa palokuorma loppuu samaan aikaan kuin kokeessa ja tapaus, jossa palokuormaa riittää pitempään paloon). Katkoviiva kuvaa standardipalokäyrää ja pisteviiva hiilivetypalokäyrää.

## 5.2 Onteloiden pinta-alan osiin jakaminen

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 49a). 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 49b).

<sup>21</sup> 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 (ks. liite C).



Kuva 49. Kaaviokuva a) laajan kahteen suuntaan ulottuvan tilan alakaton sekä b) käytävän alakaton osastoinnista ja osiin jakamisesta. c) Lämpiviennin kaaviokuva.

Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakavien rakenteiden toteuttaminen ei tuota erityisiä teknisiä ongelmia. Markkinoilla onkin saatavilla valmiita useita rakenneratkaisuja, joista esitetään esimerkkejä kohdassa 5.3. Ongelmallisempaa on läpivientien toteuttaminen (Kuva 49c): 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.

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

Tiiviiden suhteen voidaan luokituksen E 30 katsoa olevan sopiva alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamisen luokkavaatimukseksi. Edellä esitetyn perusteella eristävyysdel-

le voidaan katsoa riittävän luokkavaatimus I 15. Tällaiset vaatimukset ovat voimassa mm. Isossa-Britanniassa alakattojen osiin jakamiselle<sup>22</sup>. Seuraavassa luvussa esitettävien rakenteiden yksinkertaisimmat versiot on suunniteltu täyttävät juuri nämä vaatimukset.

### 5.2.2 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 syyttämään 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.

Ontelot, joissa on paloon osallistuvaa materiaalia, voi olla tarpeen jakaa osiin, jos palokuorman määrä riittää alentamaan paloturvallisuutta oleellisesti. Edellä (kohdassa 5.1.3) 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 pettäessä tällä kohdalla.

---

<sup>22</sup> Englannissa osiin jakovaatimus ei koske lattian alla olevia tyhjiä tiloja, joita käytetään asennuksiin (underfloor service voids).

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. pelkääntään IEC 60331-3 -testin läpäiseviä kaapeleita parempi<sup>23</sup>. 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 eristeenä 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 käyttäen 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 2 400 m<sup>2</sup>, 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. Sopivaksi 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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup>:n kokoinen palo-osasto tulisi jaetuksi 24 osaan, jol-

---

<sup>23</sup> Myös lämmöntuotto kartiokalorimetrikokeessa erottelee eri kaapeliryhmät: parhaiten palossa käyttäytyville kaapeleille lämmönvapautumisnopeus pinta-alaa kohden on korkeintaan 100 kW/m<sup>2</sup> ja merkittäviä määriä polyolefiineja sisältäville kaapeleille yli 300 kW/m<sup>2</sup>. PVC-vaippaisille ja -eristeisille kaapeleille lämmöntuottoarvo on näiden ryhmien välillä, tyypillisesti noin 150–250 kW/m<sup>2</sup> tuotteesta riippuen.



loin 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  $20 \times 20 \text{ m}^2$ :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  $20 \times 20 \text{ m}^2$  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.

### **5.3 Alakattojen ja korokelattioiden osiin jakamiseen soveltuvia rakenteita**

Tässä luvussa esitellään joitain markkinoilla olevia ratkaisuja alakattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien onteloiden palokatkoiksi. Rakenteet ovat pääasiassa Isosta-Britanniasta, jossa onteloiden palovaarojen vähentäminen nähdään hyvin oleelliseksi paloturvallisuustoimenpiteeksi<sup>24</sup>. On huomattava, että toisin kuin Suomessa, Isossa-Britanniassa myös alakatolta itseltään vaaditaan palonkestoluokitusta. Tässä luvussa rakenteet esitettävissä rakenteita tarkastellaankin tässä työssä vain onteloon jollain tavalla päässeen palon leviämisen katkaisemisen suhteen.

---

<sup>24</sup> Englannin ja Walesin palomääräykset sisältävässä dokumentissa Approved Document B on omistettu yksi laaja luku ontelopaloille.

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

### 5.3.1 Alakattojen ontelot

#### 5.3.1.1 Villaan perustuvia rakenteita

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

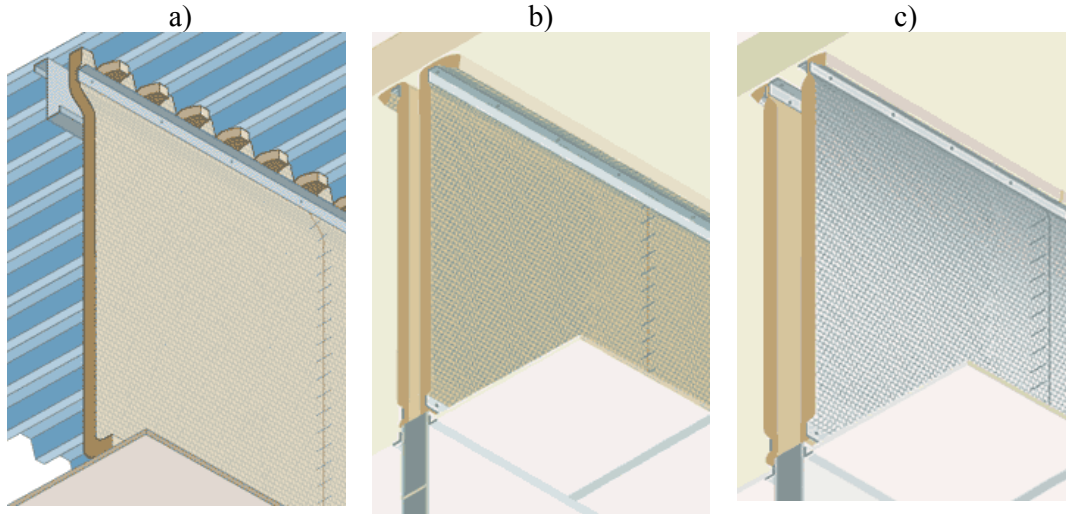
#### **Tuote 1**

Tuote 1 on kivivillasta valmistettu joustava huopa, jonka yhdellä puolella on galvanoitu lankaverkko. Sen kaupp nimi on Rocksil Smoke and Fire Barrier ja sen valmistaja on englantilainen Knauf Insulation Ltd<sup>4</sup> (Knauf Insulation 2003). Tuotteessa käytetyn kivivillan tiheys on 100 kg/m<sup>3</sup> 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/m<sup>2</sup> ja kaksipuolisesti päällystettynä hieman yli 20 euroa/m<sup>2</sup> (Kitsons Insulation Products 2003)

Valmistajan esitteen mukaan tuotetta käytetään alla olevassa kuvassa (Kuva 50) esitettyinä kolmea eri palonkestoluokitusta vastaavina rakenteina. Tämä palonkestoluokitus vastaa tiiviyyttä (integrity) standardin BS 476: Part 22: 1987 mukaisessa palotestissä<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> Testeissä palorasitus kohdistettiin lankaverkolla varustettuun puoleen, joka valmistajan mukaan on haavoittuvampi palon suhteen.



*Kuva 50. 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).*

Puolen tunnin paloluokituksen (E 30<sup>26</sup>) täyttävässä rakenteessa käytetään 50 mm paksua huopaa on yksikerroksisena. Se ripustetaan ontelon katosta ontelon sulkevaksi verhoksi. Myös huovan sivut kiinnitetään ontelon reunoihin ja alareuna. 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 60<sup>27</sup>) täyttävässä rakenteessa käytetään kahta 50 mm paksua huopaa, joiden välissä on 50 mm ilmakerros. Huovat asennetaan siten, että lankaverkkopuoli 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 120<sup>28</sup>) täyttävässä rakenteessa käytetään kahta 60 mm paksua huopaa, joiden välissä on 100 mm ilmakerros.

---

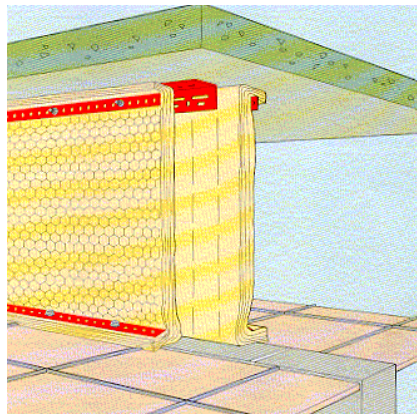
<sup>26</sup> Eristävyytensä rakenne menetti 19 minuutin kohdalla. Tiiviys säilyi kokeen lopettamiseen asti 35 minuutin kohdalla.

<sup>27</sup> Eristävyys piti 61 minuuttia ja tiiviys kokeen lopettamiseen asti 66 minuutin kohdalla.

<sup>28</sup> Eristävyys ja tiiviys pitivät kokeen lopettamiseen asti 157 minuutin kohdalla.

## Tuote 2

Tuote 2 on samankaltainen joustava palokestävä huopa kuin tuote 1 (Kuva 51). Sen tuotenimi on Rockwool Fire Barrier ja sitä valmistaa irlantilainen Firereins Ltd (Firereins 2002). Tuote on valmistettu kivivillamatosta, jonka toiselle puolelle on kiinnitetty 25 mm:n galvanoitu lankaverkko. Ilmanvaihtokanavasovelluksiin tuotteesta on tarjolla yhdeltä tai kahdelta puolelta foliolla päällystetty versio. Valmistajan mukaan tuote soveltuu uudiskohteiden lisäksi myös olemassa olevien kohteiden paloturvallisuuden kohentamisessa esim. sairaaloissa, toimistoissa, kaupoissa ja asuinrakennuksissa. Huopaa voidaan valmistajan mukaan käyttää myös muissa kohteissa kuin alakattojen onteloissa.

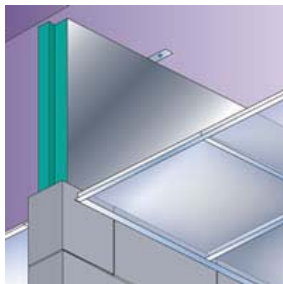


*Kuva 51. Rockwool Fire Barrier -tuote alakaton ontelon palokatkona (Firereins 2002).*

Huovasta voidaan tehdä puolen tunnin, yhden tunnin tai kahden tunnin palonkeston omaavia rakenteita. Se on palamaton standardin BS 476: Part 4: 1970 (1984) mukaan tehdyn kokeen perusteella. Puolen tunnin rakenne saadaan aikaan käyttämällä yhtä 50 mm paksua huopaa. Warrington Fire Research Centre -tutkimuslaitoksen tekemässä standardin BS 476: Part 8: 1972 mukaisessa palokokeessa eristävyys- ja tiiviysluokitus olivat yli 32 minuuttia. Yhden tunnin rakenteessa käytetään kahta 50 mm paksua huopakerrosta ja kahden tunnin rakenteessa käytetään kahta 60 mm paksua huopakerrosta, joiden etäisyys on 40 mm.

## Tuote 3

Tuote 3 muodostuu esipuristetusta mineraalivillasta, jonka molemmat puolet on päällystetty alumiinifolioilla (Kuva 52). Villan tiheys on puristamattomana  $80 \text{ kg/m}^3$  ja puristettuna  $85 \text{ kg/m}^3$ . Sen tuotenimi on SC SYSTEMS ja sitä valmistaa englantilainen Lamatherm Products Ltd (2003a). Suljettavien onteloiden korkeudet ovat 50–1 150 mm. Valmistajan mukaan tuote toimii myös akustisena katkona.



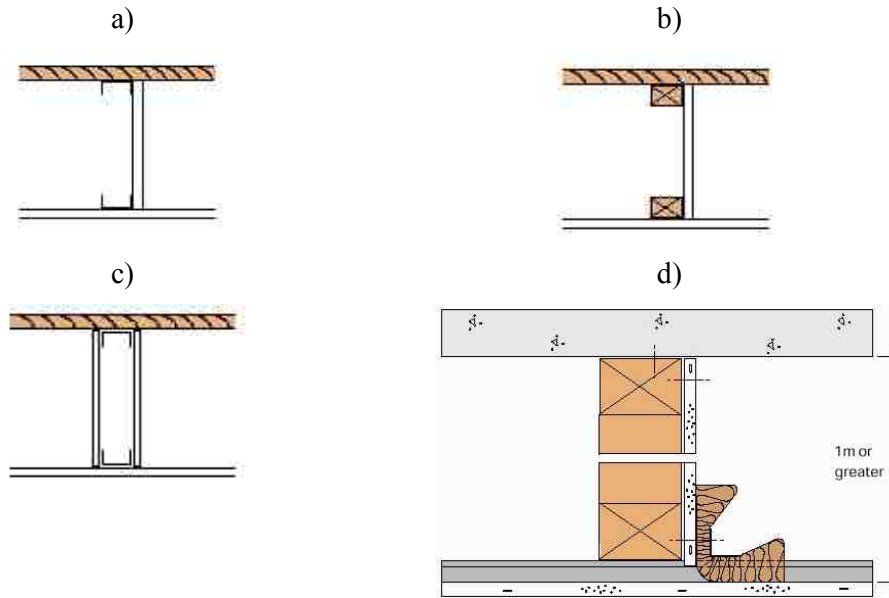
*Kuva 52. Mineraalivillasta tehty alakaton ontelon palokatko (Lamatherm Products 2003a).*

Tuote asennetaan siten, että tuotteen korkeus on 10 mm suurempi kuin ontelon korkeus, jolloin ylä- ja alareunat puristuvat tiiviisti kiinni ontelorakenteisiin. Sivureunojen sulkeminen suositellaan toteutettavaksi liimaamalla niiden päälle foliokaistaleet (alumiinipintainen teippi). Tätä ratkaisua suositellaan myös ylä- ja alareunan tiivistykseen ilmanvaihtokanavissa ja tavoiteltaessa hyvää tiiveyttä savun suhteen. Kiinnitys tehdään käyttäen galvanoituja teräskehyskiä. Standardin BS 476: Part 20 mukaisessa palonkestotestissä tuotteella saavutetaan 30 minuutin eristävyys- ja tiiviysluokitus, kun tuotteen paksuus 60 mm (jos tuotteen paksuus on 50 mm, eristävyysluokitus putoaa 15 minuuttiin, mutta tiiviysluokitus pysyy ennallaan). Tuotteen palonkestoluokitus riippuu tuotteen paksuuden lisäksi myös ontelotilan korkeudesta: esimerkiksi alle 600 mm korkeissa onteloissa 60 minuutin eristävyys- ja tiiviysluokitus saavutetaan 90 mm paksulla kerroksella, mutta 600–1 150 m korkeissa onteloissa tarvitaan 120 mm paksu kerros.

### 5.3.1.2 Levyrakenteita

#### **Tuote 4**

Tuote 4 on onteloon asennettava kipsilevy. Alla olevat rakenteet (Kuva 53) on esitetty British Gypsum -yhtiön teknisen avun verkkosivuilla (British Gypsum 2003). Niillä saavutetaan Englannin määräysten mukainen 30 minuutin tiiviys- ja 15 minuutin eristävyysluokitus.

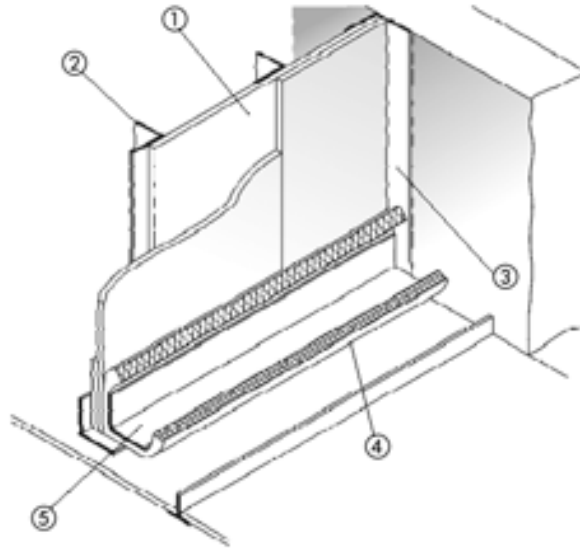


*Kuva 53. Erilaisia kipsilevyn käyttöön perustuvia Englannin palomääräysten mukaisia alakaton ontelon palokatkoja. Kaikkien rakenteiden palonkestoluokitus on E 30, I 15. a) yksi 10 mm levy kiinnitettynä kipsilevyruuveilla 48 mm:een metallikehykseen tai b) puukehykseen ( $75 \times 50 \text{ mm}^2$ ). c) kaksi 6 mm paksua levyä kiinnitettynä kipsilevyruuveilla 48 mm:n metallikehykseen. d) Rakenteen eristävyys parantaminen kivivillalla. (British Gypsum 2003)*

## **Tuote 5**

Tuote 5 muodostuu palamattomasta PROMATECT® 100 -levystä kuvassa 54 esitetyllä tavalla (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 (tiivius 30 minuuttia ja eristävyys 15 minuuttia). Sama palonkesto saavutetaan myös, jos kahden 8 mm paksun levyn sijasta käytetään yhtä 10 mm paksua levyä.

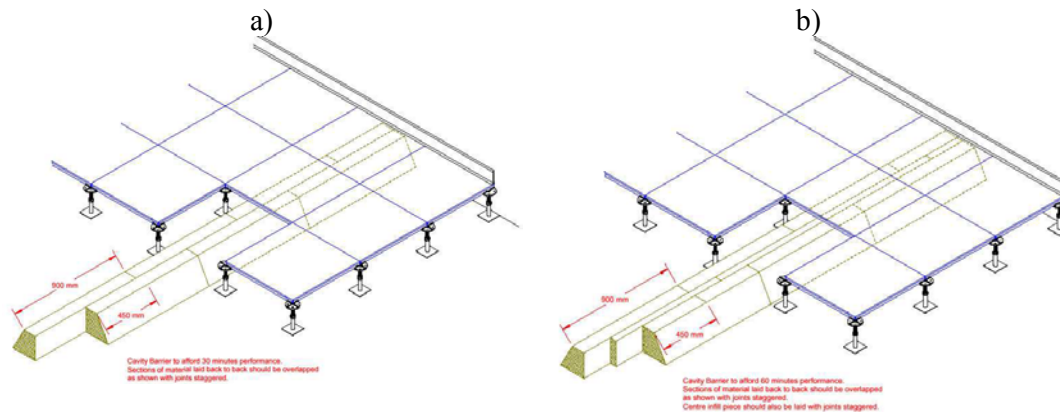


Kuva 54. Palamatonta levyä käyttäen toteutettu alakaton ontelon palokatko (E 30, I 15). Rakenteessa on kaksi 8 mm paksua PROMATECT® 100 -levyä (1), jotka kiinnitetään pystysuuntaisiin tukiin (2). Nämä tuet voivat olla galvanoituja kulmarautoja (välimatka 300 mm, mitat  $50 \times 50 \times 0,8 \text{ mm}^3$ ) 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  $23 \text{ kg/m}^3$ , 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)

### 5.3.2 Nostetut lattiat

#### Tuote 6

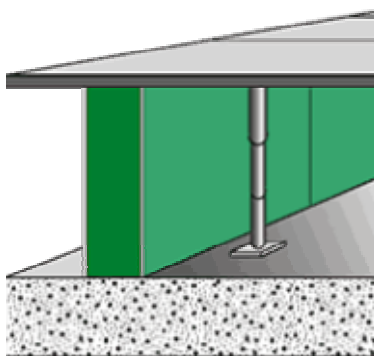
Kuvassa 55 esitetään USG Corporation -konsernin valmistama nostettujen asennuslattaiden palokatkotuote (USG Corporation 2003a, 2003b). Katkomateriaalin palat asennetaan limitettyinä taustapuolet vastakkain. Esitettyjen rakenteiden palonkestot ovat Englannin määräysten mukaan puoli tuntia ja yksi tunti.



Kuva 55. Nostetun asennuslattian a) 30 minuutin ja b) 60 minuutin palokatkorakenteet. (Englannin määräysten mukaan) (USG Corporation 2003a, 2003b).

### Tuote 7

Edellä esiteltyä Lamatherm Products Ltd:n alakattojen palokatkomenetelmää voidaan soveltaa myös nostettujen lattioiden katkomiseen (Lamatherm Products 2003b). Nostettujen lattioiden palokatko esitetään kuvassa 56. Rakenteen palonkesto on sekä eristävyyden että tiiviyyden suhteen 60 minuuttia (ontelon suurin mahdollinen korkeus on 400 mm). Valmistaja suosittelee rakenteen kiinnittämistä palo- ja äänitiivistettä käyttäen. Ilmanvaihtokanavissa ja tavoiteltaessa hyvää tiiviyyttä savun suhteen liitokset tulee sulkea liimaamalla niiden päälle foliokaistaleet (alumiinipintainen teippi).

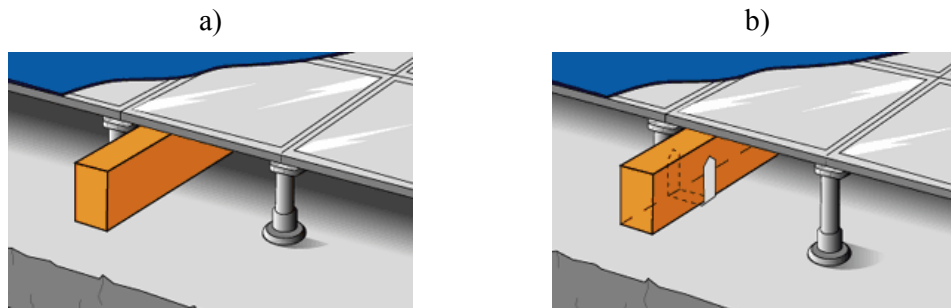


Kuva 56. Nostetun lattian palokatko (Lamatherm Products 2003b).



## Tuote 8

Tuote 8 perustuu muurilaastimaisen palokestävän valmisteen käyttöön (Kuva 57). Sitä markkinoi tuotenimellä C470 Raised Floor Fire Stop Englannissa toimivan PFC Group:n osa PFC Corofil Firestops, joka on Preformed Components Ltd:n markkinointiosasto (PFC Corofil 2003). Tuote soveltuu enintään 100 mm korkeiden onteloiden katkomiseen.



Kuva 57. Nostetun lattian ontelon palokatko (PFC Corofil 2003).

### 5.4 Läpivientien palokatkot: toiminta ontelokohteissa

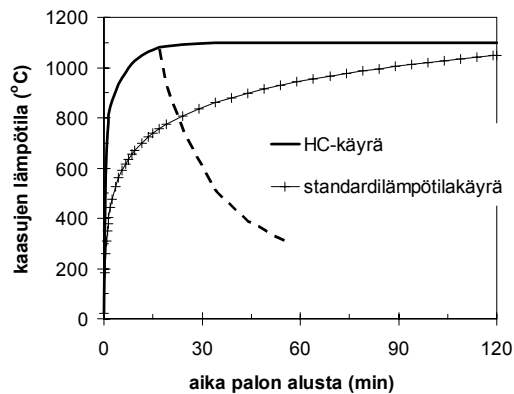
Ehkä tärkein ontelotilaa reunustavien osastoivien seinien läpi menevien asennusten aukkojen palokatkoihin liittyvä paloturvallisuusongelma on se, että palokatkot puuttuvat tai ne ovat esim. jälkeinpäin tehdyissä lisäasennuksissa jätetty palauttamatta asianmukaiseen kuntoon. Ontelotiloissa etenkin jälkimmäinen 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 palokatkarakenteita on olemassa, mutta ne liittyvät yhä enenevässä määrin vanhempaan rakennuskantaan. Uudisrakennuksissa käytettäväksi on tarjolla useita toimivuudeltaan kelpoisiksi todettuja ratkaisuja<sup>29</sup> ja niiden käyttö lisääntyy.

Tehokas tie ontelotiloissa olevien läpivientien palokatkoihin liittyvien palovaarojen vähentämiseen onkin niiden asennuksien ja kunnossapidon saaminen entistä kontrolloidummaksi siten, että asennuksissa käytetään vain toiminnaltaan kelpoisiksi todettuja

---

<sup>29</sup> 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.

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 palokatkosten osalta asianmukaisen työn toteutuksen ja valvonnan merkitys on korostunut: jos pienessä ontelotilassa palokatko on puutteellinen, tilanne on usein oleellisesti sama, kuin jos osastointi puuttuisi tai olisi toiminnaltaan merkittävästi vaadittua heikompi.



*Kuva 58. Standardipalokäyrän ja HC-käyrän vertaaminen ontelotilojen rakenteiden palonkeston testaamisen kannalta. Yhtenäinen käyrä kuvaa HC-palokäyrää. Katkovii-valla 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. kohta 5.1.3.2 ja Kuva 48). Tämä ongelma koskee lähinnä palokuormaa, joissa on merkittävä osuus palosuojamattomia polyolefinimuoveja.

Ontelopalon nopeasti korkeaksi kehittyvällä kuumuudella on mahdollisesti merkitystä ontelotiloihin asennettavien läpivientien palokatkosten testaamisen suhteen, koska ontelopalon palorasitus voi olla merkittävästi standardipalo-olosuhteita ankarampi (ks. Kuva 58). 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 pettämissä jo 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 (ao. kuva pyrkii havainnollistamaan tätä). Tällä on merkitystä erityisesti eristävyysominaisuuden 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 eristävyysominaisuuden suhteen yhtä kriittinen kuin tiiviyden suhteen.

## 6. Kaksoislasijulkisivujen ontelot

Kaksoislasijulkisivu on erityisesti suurten toimistorakennusten julkisivuratkaisu. Se yleistyí Suomessa 1990-loppupuolella, jolloin rakennettiin mm. Sanomatalo tai Nokian pääkonttori sekä useat rakennukset Helsingin Ruoholahdessa. Tällaisten kohteiden palotekniikan eräs kulmakivi on sprinklaus. Koska kaksoislasijulkisivu on suhteellisen uusi rakennetekninen ratkaisu, ja koska sprinklaus on suhteellisen toimintavarma palontorjuntakeino sekä toimistorakennusten syttymistaajuus on suhteellisen alhainen, ei Suomessa ole toistaiseksi esiintynyt kaksoislasijulkisivuihin liittyneitä palotapauksia. Tätä taustaa vasten kaksoislasijulkisivuihin ei paloturvallisuuden suhteen liity mitään hälyttävää. Toisaalta kuitenkin mahdolliset vaarat ovat suuret: etenkin taloudellisten vahinkojen suuruus voi olla mittava toiminnan keskeytymisen ja esim. imagokysymyksiin liittyvien tappioiden vuoksi. Siksi riskien punnitseminen on vaikea tehtävä. Joissain tapauksissa myös ontelotiloihin liittyvien rakenteellisten palotorjuntakeinojen käyttö voi olla vartenotettava asia palontorjuntakustannusten ja paloriskien balanssia haettaessa.

Tässä luvussa arvioidaan kaksoislasijulkisivuihin liittyviä vaaroja ja tarkastellaan niiden estämistä rakenteellisin keinoin.

### 6.1 Taustaa

#### 6.1.1 Nykyinen käytäntö

Kaksoislasijulkisivuilla varustetut talot ovat yleensä suuria P1-luokan rakennuksia, joiden käyttötapa on toimia työpaikkatilana (ks. liite D). Niiden palotekninen suunnittelu tehdään yhteistyössä paikallisten rakennusvalvonta- ja paloviranomaisten kanssa usein soveltaen uhkakuviiin perustuvaa palomitoitusta.

Kohteiden osastoinnissa pääasialliseksi käytännöksi on muodostunut lähestymistapa, jossa eri kerrokset ovat samaa palo-osastoa. Ulkoseinähän ei ole osastoiva ja siksi yhtenäinen, alhaalta ylös kulkeva julkisivun ontelo sitoo eri kerrokset samaksi palo-osastoksi. Tällainen ratkaisu sallitaan, koska rakennuksissa käytetään muita paloturvallisuuskeinoja. Näistä tärkein on sprinkleri.

Onteloita ei em. syystä jaeta myöskään vaakasuuntaisen palon leviämisen estämiseksi.

Nykykäytäntö on RakMK E1:n mukainen sikäli, että se toteuttaa sekä kohdassa 5.1.2 osastoinnille<sup>30</sup> että luvussa 11 sammutus- ja pelastustehtävien järjestelylle<sup>31</sup> asetetut vaatimukset.

## 6.2 Nykyisen käytännön arviointia

Nykykäytäntö kaksoislasijulkisivujen paloteknisessä suunnittelussa perustuu mm. siihen ajatukseen, että niissä palovaarat eivät ole oleellisesti korkeammat kuin tavallisissa lasijulkisivuissa rakennuksissa tai esim. atriumtilaisissa taloissa, joissa on samantyyppinen korkea yhtenäinen ilmatila. Kaksoislasijulkisivussa olevat ilmatilat ovat kuitenkin kaapeita ja siksi ne lämpenevät kuumemmiksi kuin laajat atriumtilat. Tämä aiheuttaa vaarojen kasvun tavalla, joka voi olla oleellista rakennuksen paloriskien kannalta.

Syntyvät palo-osastot ovat kooltaan hyvin suuria. Tyypillisellä pääkaupunkiseudulla toteutetulla kaksoislasijulkisivulla on leveyttä 100–400 m ja korkeussuunnassa se ulottuu 5–18 kerroksen alueelle. Kaksoislasijulkisivuun liittyvä huone on tyypillisesti maisemakonttori, jonka pinta-alat ovat varsin suuria. Esimerkiksi, jos 100 m leveä julkisivu kattaa 8 kerrosta ja siihen rajoittuvan toimistotilan syvyys on esimerkiksi 30 m, niin syntyvä palo-osasto kattaa  $8 \times 100 \text{ m} \times 30 \text{ m} = 24\,000 \text{ m}^2$ .

Sprinklerisysteemit ovat tehokkaita paloturvallisuuden parantajia, mutta niiden toiminta ei ole 100 %:n luotettavaa. Siksi paloturvallisuussuunnittelussa on pidettävä mielessä myös se mahdollisuus, että sprinklerit eivät toimi toivotulla tavalla. Tämän tapahtuman todennäköisyys on selvästi nollaa suurempi: suositeltava luku sprinklerijärjestelmän toimimisen epäonnistumisen todennäköisyydelle on 5–10 % eli se tapahtuu keskimäärin joka kymmenennessä – kahdennessakymmenennessä palossa.

---

<sup>30</sup> E1 5.1.2: Osastointivaatimus:

”Rakennuksen eri kerrokset ... on yleensä muodostettava eri palo-osastoiksi (kerrososastointi)”. Ohje: Palo-osasto voi käsittää useampia kerroksia, ei kuitenkaan majoitus- tai potilashuoneita sisältävät osastot.”

<sup>31</sup> E1 11.3.3: lievennykset koskien automaattisen paloilmoittimen asentamista:

”Mikäli rakennukseen tai sen palo-osastoon asennetaan automaattinen paloilmoitin, voidaan sallia lievennyksiä rakennuksen kerrosalaa ja sen palo-osaston pinta-alaa koskevista määräyksistä edellyttäen, että palokuorma on alle 600 MJ/m<sup>2</sup> eikä kysymyksessä ole majoitustila (soveltuu toimistorakennuksille).

E1 11.5.3: lievennykset koskien automaattisen sammutuslaitteiston asentamista: ”

Mikäli rakennukseen tai sen palo-osastoon asennetaan automaattinen sammutuslaitteisto, voidaan sallia lievennyksiä:

- rakennuksen kerrosalaa ja sen palo-osaston pinta-alaa koskevista määräyksistä,
- kulkureitin pituutta uloskäytävään koskevista määräyksistä,
- palokuormaryhmiin sijoittamista koskevista määräyksistä,
- rakenteita koskevista määräyksistä niin, että lämpötilan hitaamman nousun yleensä ja kantavien rakennusosien jäähdytyksen saa ottaa huomioon mitoituksessa,
- pintoja koskevista määräyksistä,
- määräyksistä, jotka on tarkoitettu estämään palon leviäminen naapurirakennuksiin ja torjumaan aluepalon vaara.

Lievennyksiä harkittaessa tulee kiinnittää huomiota pelastushenkilöstön mahdollisuuksiin sammuttaa tai rajoittaa alkanut palo henkilöturvallisuutta vaarantamatta.

Se, että miten merkittävä automaattisen sammutusjärjestelmän epäonnistumistodennäköisyys paloturvallisuuden kannalta on, riippuu siitä, miten suuria mahdolliset seuraamukset ovat. Jotta voisimme arvioida tätä, pitää ensin tarkastella kyseeseen tulevaa uhkakuvaa, jossa tietyssä kerroksessa syttyy tulipalo, joka särkee palotilan ikkunan, minkä jälkeen liekit, savu ja kuumat kaasut pääsevät ontelotilaan. Jos sprinklerijärjestelmä toimii, tällaisen tilanteen syntyminen on erittäin epätodennäköistä, mutta sprinklerijärjestelmän pettäessä se on yksi mahdollisista palon etenemistavoista. Jos sprinklerijärjestelmän pettäminen on koko rakennuksen kattava häiriö, uhkakuvaksi muodostuu se, että mitään osastointia ei ole estämässä tulipalon leviämistä jopa kymmenien tuhansien neliömetrien laajuisen tilaan.

Näin suuren tilan altistuessa palolle uhat henkilöturvallisuudelle voivat olla merkittäviä. Lisäksi taloudelliset tappiot voivat nousta hyvin suuriksi: suorien menetysten lisäksi epäsuorat vaikutukset ovat merkittäviä. Monet kaksoislasijulkisivulla varustetuista taloista toimivista yrityksistä ovat kansainvälisesti tunnettuja pörssiyrityksiä ja niille sellainenkin yleensä suhteellisen vähämerkityksellinen tekijä kuin yrityksen imagon vahingoittuminen voi johtaa vakaviin seurauksiin.

Kyse on uhasta, jonka todennäköisyys ( $P$ ) on suhteellisen pieni, mutta jonka seuraamukset ( $C$ ) voivat olla hyvin suuret<sup>32</sup>. Siten uhkakuvaan liittyvä riski  $R = P \times C$  voi olla merkittävä.

Oleellista on se, että kaksoislasijulkisivun ontelo voi nostaa palon leviämisvaaraa rakennuksessa. Jos tämän vaara lisääntyy ”olennaisesti”, niin joudutaan ristiriitaan E1:ssä esitetyn ontelotilojen suunnittelua ja toteuttamista säätelevän vaatimuksen kanssa (RakMK E1 7.6.1): ”Ullakot ja ontelot on tehtävä siten, ettei palon syttymisen eikä palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa *olennaisesti* kasva niiden johdosta.”

Jos kaksoisvaipparakenne tulkitaan ulkoseinärakenteeksi, niin silloinkin E1:ssä esitetty vaatimus on, että vaarat eivät saa kasvaa (RakMK E1 7.6.2): ”Ulkoseinät ja parvekkeet on rakennettava niin, että palo ei leviä niiden kautta vaaraa aiheuttavalla tavalla.” Tätä vaatimusta täydentävä ohje tarkentaa, että suunnittelussa on otettava huomioon palon leviämisvaara eli: ”Ulkoseinärakenteiden suunnittelussa otetaan huomioon palon le-

---

<sup>32</sup> Jos sprinklerit eivät toimi, palo voi leviä lasijulkisivussa tuhoisin seurauksien. Yhdysvalloissa on sprinklaamattomien toimistotalojen lasijulkisivujen kautta levinneissä paloissa kuollut siviilejä ja palomiehiä ja omaisuusvahingot ovat olleet korkeita, esim. Los Angelesissa 1998 ja Philadelphiassa 1991 tapahtuneissa paloissa vakuutusyhtiöt joutuivat korvaamaan noin 0,5 miljardia dollaria kussakin palossa (LPC 1999).

viämisvaara ulkoseinän ulkopintaa pitkin, ulkoseinärakenteen sisällä sekä ulkoseinän ja osastoivan rakennusosan liitoksen kautta.”

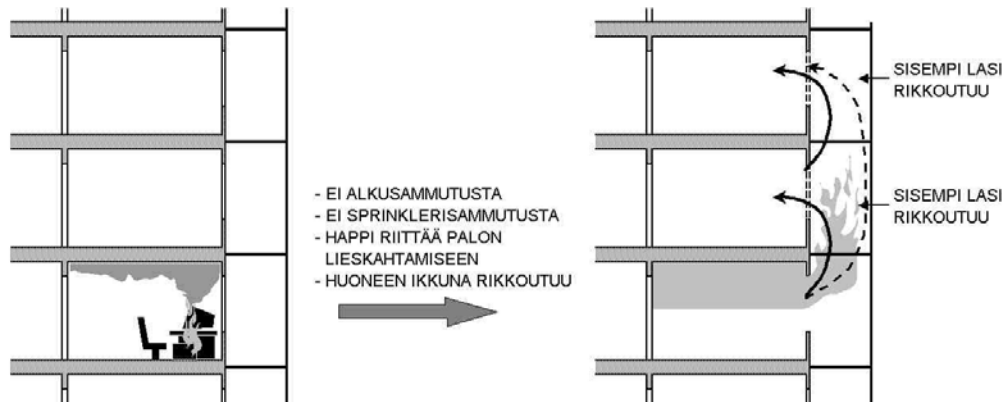
Vaatimukset perustuvat siis palon leviämisvaaraan. Siksi tämä vaara pitää tuntea määrällisesti. Ontelotilojen paloturvallisuushankkeen tärkein tehtävä kaksoislasijulkisivujen tutkimuksen osalta onkin juuri tämä. Kun uhka tunnetaan, voidaan arvioida sen vaikutuksia ja niiden estämistä.

Suomessa käytetty kaksoislasijulkisivutyypä, jossa lasien välitila ulottuu avoimena läpi koko rakennuksen korkeuden on tunnetusti kaikkien palovaarallisin ratkaisu. Se on myös edullisin toteuttaa. Muissa maissa, esim. Saksassa, jossa kaksoislasijulkisivurakentaminen on varsin yleistä, ja Ruotsissa, jossa se koko ajan yleistyy, on toteutettu useita pystysuuntaista ja vaakasuuntaista paloleviämistä vastaan osastoituja rakennuksia.

### **6.3 Uhkakuvien määrällinen arviointi**

Nykyaikaiset toimistorakennukset ovat tilasuunnittelultaan avoimia siten, että toimistoroketukset 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 kaksoisjulkisivun lasien väliseen ilmatilaan (Kuva 59). Tämä on tässä tutkimuksessa tarkasteltu paloskenaario. Alla tarkastellaan tällaisen palon kehittymistä ja leviämistä sekä palorasituksen voimakkuutta. Esitetyt tiedot perustuvat koetuloksiin ja palon simulointiin. Seuraavassa luvussa tarkastellaan uhkakuviin varautumista.



*Kuva 59. Uhkakuva: toimistohuoneessa syttynyt palo etenee lieskahtaneeksi paloksi, joka rikkoo palohuoneen ikkunan. Palo leviää palohuonetta ylempään kerrokseen ikkunasta ulostyöntyvien liekkien aiheuttaman lämpörasituksen vuoksi. Palo voi levitä samalla mekanismilla myös tätä ylempään kerrokseen. Palohuoneen liekit aiheuttavat lämpörasitusta myös tässä kerroksessa, mutta se ei ole niin voimakasta kuin välittömästi palohuoneen yläpuolella olevan kerroksen tasalla.*

### 6.3.1 Toimistohuoneen palo, ikkunan särkyminen ja ulostyöntyvien liekkien julkisivulle aiheuttama lämpörasitus

#### 6.3.1.1 Koetuloksia

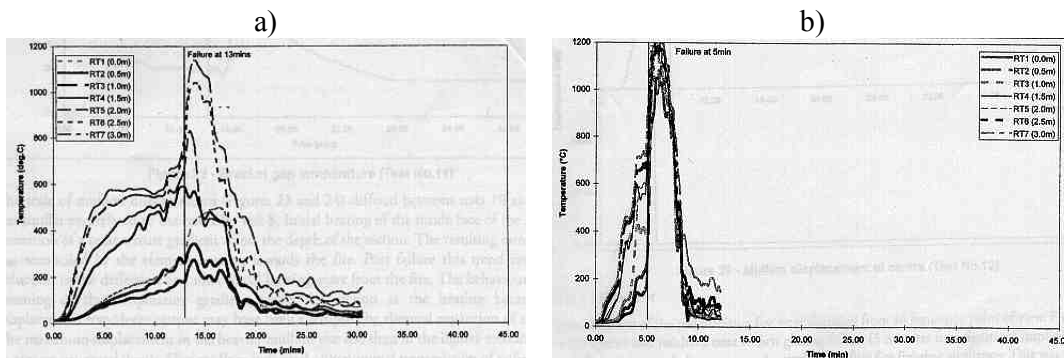
Lasijulkisivujen kautta levinneissä paloissa syntyvien omaisuusvahinkojen mahdollisen korkeuden vuoksi englantilainen Loss Prevention Council (LPC) tutki 1990-luvun lopulla lasijulkisivujen palovaaroja löytääkseen tehokkaita keinoja niiden pienentämiseen (LPC 1999). Tutkimus keskittyi sprinklaamattomien rakennusten ongelmiin<sup>33</sup>. Kyseisessä tutkimuksessa tarkasteltiin yhdestä lasikuoresta muodostuvaa ns. curtain wall-lasijulkisivua. Etenkin tässä tutkimukset saadut tulokset palohuoneessa tapahtuvasta palokehityksestä ja lasien rikkoutumisesta ovat merkityksellisiä myös kaksoislasijulkisivujärjestelmien palovaarojen arvioinnin kannalta, mutta myös tiedot siitä, miten ulostyöntyvät liekit kuumensivat julkisivua palohuoneen yläpuolella ovat käyttökelpoisia myös kaksoislasijulkisivujen tapauksessa.

<sup>33</sup> Muutamissa kokeissa palohuone varustettiin sprinklereillä. Tällöin lämpötilat huoneessa jäivät hyvin alhaisiksi (100–200 °C) eikä vaaraa ikkunan särkyämisestä ja palon leviämisestä ikkunan kautta havaittu.



LPC:n kokeissa toimistohuoneen korkeus oli 3,3 m, syvyys 4,0 m ja leveys 6,0 m. Huoneessa oli  $1,8 \times 1,0 \text{ m}^2$  suuruinen ovi, joka oli kokeen aikana auki. Julkisivun lasitus oli 2-kertaista float-lasia. Palokuormana käytettiin sekä puuritulöitä että normaalia toimiston sisutusta vastaavaa kalustusta. Palokuorman tiheys oli molemmissa tapauksissa  $455 \text{ MJ/m}^2$ . Palon kehittymisessä ja siten myös huoneen ikkunan särkymisessä eri palokuormat tuottivat merkittävästi erilaiset tulokset:

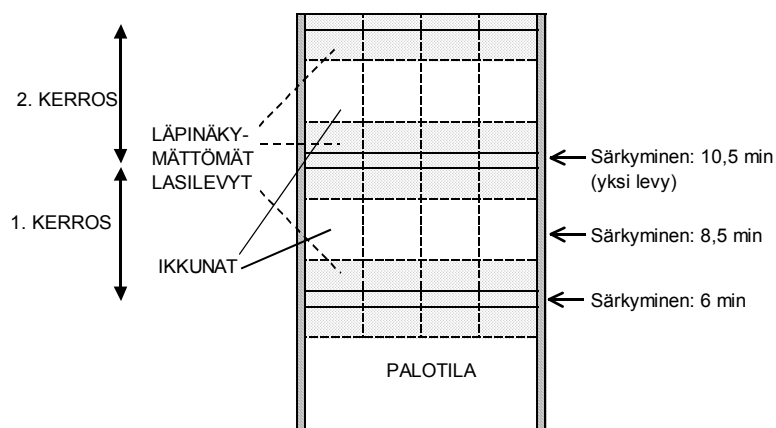
- Kun palokuormana oli puuritulöitä, palohuoneen kuuman kerroksen lämpötilojen kehitys vastasi varsin hyvin standardipalokäyrää (Kuva 60a). Kahdessa tehdyssä kokeessa huoneen lasitus särkyi 11,5 ja 13 minuuttia palokuorman sytyttämisen jälkeen<sup>34</sup>. Lasien rikkouduttua liekit tunkeutuivat ulos syntyneestä aukosta. Lämpötila palohuoneessa nousi palamiselle tarjoutuneen lisähapen vuoksi yli  $1\,000 \text{ °C}$ :n (korkein hetkellinen lukema  $1\,150 \text{ °C}$ ).
- Kun palokuormana oli toimistokalusteista muodostuva palokuorma, palon kehitys oli selvästi puuritulöpalokuormalla havaittua voimakkaampaa: palohuoneen kuuman kerroksen lämpötila saavutti  $700 \text{ °C}$  5 minuutissa sytyttämisen jälkeen (Kuva 60b). Tässäkin tapauksessa lasien rikkouduttua liekit tunkeutuivat ulos syntyneestä aukosta ja lisähapen saannin vuoksi palotilan lämpötilat nousivat hyvin korkeiksi, saavuttaen  $1\,200 \text{ °C}$ . Ikkunan yläpuolella ollut läpinäkymätön lasilevy särkyi pian ikkunoiden särkymisen jälkeen ja palo pääsi leviämään palotilan yläpuolella olleeseen tilaan.



Kuva 60. Loss Prevention Councilin (LPC 1999) tekemissä kokeissa mitatut palotilan lämpötilat: a) palokuormana puuritulöitä  $455 \text{ MJ/m}^2$  ja b) palokuormana toimistokalusteita  $455 \text{ MJ/m}^2$ . Lämpötilojen äkillinen hyppäys yli  $1\,000 \text{ °C}$ :n lukemiin johtuu ikkunoiden särkymisestä.

<sup>34</sup> Standardipalonkestokokeessa lasitusjärjestelmästä putosi 1. osa 9,5 minuutin kuluttua kokeen alusta. Tällöin ikkunan ulkopuolella mitattu lasin lämpötila oli noin  $275 \text{ °C}$ .

Kahdessa kokeessa tarkasteltiin lähemmin huoneesta ulostulevia liekkejä. Palokuormana käytettiin puuritiiloja, joten palorasitus oli lievempi kuin se, mitä toimistokalusteiden palo aiheuttaa. Lämpötiloja ei mitattu, vaan kokeissa tyydyttiin visuaalisiin havaintoihin. Niiden mukaan liekkien korkeus oli n. 2,5 m. Palotilan yläpuolella olleet keskimäiset läpinäkymättömät lasilevyt säröytyivät 2 minuutin kohdalla sytytyksen jälkeen ja ne pettivät hetkellä 6 minuuttia (Kuva 61). Tällöin liekit tunkeutuivat palotilan yläpuoliseen huoneeseen sytyttäen siellä olleen palokuorman välittömästi. Tämän jälkeen 1. kerroksen keskimäiset ikkunat särkyivät 8,5 minuutin kuluttua sytyttämisestä ja toinen 1. ja 2. kerroksen välissä olleista läpinäkymättömistä lasilevyistä hetkellä 10,5 minuuttia. Palokuorma ei kuitenkaan syttynyt 2. kerroksessa.

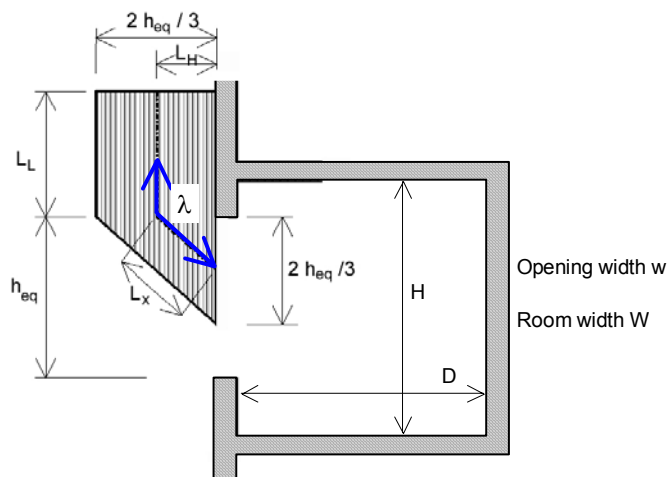


*Kuva 61. Loss Prevention Councilin (LPC 1999) tekemät havainnot yhdellä lasikuorella verhotun lasijulkisivujen lasien särkymisestä. Koelaitte on toteutettu oikeaa rakennusta vastaavassa mittakaavassa (huonekorkeus 3,3 m). Palokuormana puuritiilat, joka tuottaa toimistokalusteista muodostuvaa palokuormaa lievemmän palorasituksen.*

Loss Prevention Councilin tekemät kokeet osoittavat, että tilanteessa, jossa sprinklerit eivät sammuta paloa esim. toimintavian vuoksi, toimistohuoneen palo voi kehittyä nopeasti niin kuumaksi, että sen ikkunat särkyvät. Kokeissa havaittu särkymisaika oli 5 minuuttia. Särkyneistä ikkunoista ulostulevat liekit leviävät ainakin välittömästi palotilan yläpuolella olevaan huoneeseen. Puuritiiläpalokuormalla leviäminen tapahtui 6 minuutin kuluttua syttymisen jälkeen palotilan ja sen ylemmän kerroksen välillä olleiden läpinäkymättömien lasilevyn särkymisen vuoksi. Ylemmän huoneen ikkunalevyt särkyivät parin minuutin kuluttua tästä. Jos palokuormana olisi käytetty toimistokalusteita, em. ajat olisivat ilmeisesti olleet vielä lyhyemmät ja palo olisi saattanut leviätä myös 3. kerrokseen.

### 6.3.1.2 Eurokoodeissa ulkoisen palon voimakkuuden laskemiseksi esitetty malli

Kun halutaan laskennallisesti arvioida julkisivulle ikkunasta tulevien liekkien vaikutusta palon etenemiselle, voidaan käyttää Eurokoodissa 1–1–2 esitettyä mallia. Kaksoislasijulkisivun tarkasteluun se ei kuitenkaan sellaisenaan sovellu, koska malli on kehitetty tavanomaisille julkisivuille, jossa ei ole lasien välistä onteloa. Eurokoodin mallin tehtävänä tässä työssä onkin toimia ontelollisen julkisivun laskentamallin perustana kuvaamaan tilannetta, jossa ulompaa lasia eri ole tai kun se on hyvin kaukana sisemmästä lasikuoresta. Eurokoodin mallia käytetään myöskin ontelon syvyyden palotekniikan kannalta suositeltavan syvyyden mitoituksessa.



Kuva 62. Eurokoodissa 1–1–2 esitetyn ulkoisen palorasituksen laskentamallin asetelma, tilanne, jossa  $h_{eq} < 1,25w$  eikä palotilassa ole läpivetoa.

Eurokoodin 1 osassa 1–2 (Eurocode 1–1–2 2001) esitetään yksinkertainen malli ulkoisen palon palorasituksen laskemiseksi. Se on tarkoitettu ulkopuolisten rakenteiden lämpenemisen arviointiin. Malli perustuu Law'n ja O'Brienin (1981) esittämään laskentamalliin, joka puolestaan perustuu Englannissa 1960-luvulla ja 1970-luvun alussa kerättyyn suureen koeaineistoon. Laskentamalli perustuu edellä olevassa kuvassa 62 esitettyyn asetelmaan. Seuraavassa tarkastellaan vain sitä osamallia, jossa ikkunan korkeudelle  $h_{eq}$  ja leveydelle  $w$  pätee, että  $h_{eq} < 1,25w$ . Tällöin liekki pysyy kiinni seinässä, mikä aiheuttaa julkisivulle suuremman lämpörasituksen kuin päinvastaisessa tapauksessa, jolloin liekki suuntautuu ulos ikkunasta tietyssä kulmassa julkisivun suhteen. Tämä on tilanne myös silloin, kun palotilassa on läpiveto (esim. ovi auki).

Palossa vapautuva teho  $\dot{Q}$  lasketaan polttoainerajoitteiselle palolle kaavalla<sup>35,36</sup>

$$\dot{Q}_{fuel} = A_f q_f / \tau \text{ (yksikkönä MW)}$$

ja hapen saannin rajoittamalle palolle

$$\dot{Q}_{vent} = 3,15(1 - e^{-0,036/O}) A_v \sqrt{\frac{h_{eq}}{D/W}} \text{ (yksikkönä MW),}$$

missä  $A_f$  on palohuoneen pinta-ala ja  $q_f$  on siihen liittyvä palokuorman tiheys,  $\tau$  on vapaan palamisen kesto-aika (oletetaan 20 minuutiksi),  $A_v$  on aukon pinta-ala,  $D$  on palohuoneen syvyys ja  $W$  sen leveys. Aukkotekijä  $O$  lasketaan seuraavasti

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t,$$

missä  $A_t$  on palotilan sisäpinta-ala (Eurokoodissa tähän luetaan mukaan myös aukkojen pinta-ala, alkuperäisessä Law'n ja O'Brienin mallissa aukkopinta-alaa ei lasketa mukaan kokonaispinta-alaan  $A_t$ ).

Tasaisen palon aikainen palotilan lämpötila lasketaan mallin mukaan seuraavasti:

$$T_f = T_0 + 6000(1 - e^{-0,1/O})(1 - e^{-0,00286\Omega})\sqrt{O}$$

missä  $T_0$  on 293 K eli 20 °C ja

$$\Omega = A_f q_f / \sqrt{A_v A_t}.$$

Liekin lämpötila ikkunalla  $T_w$  lasketaan seuraavasti:

$$T_w = T_0 + \frac{520}{1 - 0,4725(L_f w / \dot{Q})},$$

missä  $w$  on aukon leveys ja  $L_f$  on liekin pituus ”akseliaan” pitkin

<sup>35</sup> Tässä esityksessä käytetään yksinkertaistettu merkintöjä, joista tiettyjä, tässä esityksessä epärelevantteja alaindeksejä on jätetty pois.

<sup>36</sup> Malli on johdettu lähinnä puurutilöiden polttokokeista. Siksi muovia sisältävälle palokuormalle paloteho voi olla korkeampi (eli palo-aika lyhyempi).

$$L_f = h_{eq} \left[ 2,37 \left( \frac{Q}{A_v \rho_g \sqrt{h_{eq} g}} \right)^{2/3} - 1 \right] + h_{eq}/2 \approx 1,9 \left( \frac{\dot{Q}}{w} \right)^{2/3} - h_{eq}/2 ,$$

missä likiarvomerkki vastaa oletuksien  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  (painovoiman kiihtyvyys) ja  $\rho_g = 0,45 \text{ kg/m}^3$  käyttöä.

Liekin lämpötila vähenee lineaarisesti korkeuden  $z$  kasvaessa kaavan

$$T(z) = (T_w - T_0) \left[ 1 - 0,4725 (\lambda w / \dot{Q}) \right] + T_0 = 520 \left[ \frac{1 - 0,4725 (\lambda w / \dot{Q})}{1 - 0,4725 (L_f w / \dot{Q})} \right] + T_0$$

mukaisesti, missä  $\lambda$  on ikkunasta mitattu matka pitkin liekin akselia. Liekkialueeksi on määritelty tilavuus, jossa kaasun lämpötila on  $520 \text{ °C}$  ympäristön lämpötilaa korkeampi (tämä nähdään helposti eo. kaavasta asettamalla  $\lambda = L_f$ , joka pätee liekin kärjessä).

Oleelliset liekin mittoja ja lämpötiloja koskevat tiedot on koottu alla olevaan taulukkoon 5.

*Taulukko 5. Yhteenvedo Eurokoodissa 1–1–2 esitetyn ulkoisen palorasituksen liekkimallista.*

1. Liekin leveys	Sama kuin ikkunan leveys $w$
2. Liekkien vaakasuuntainen ulottuma julkisivusta ulospäin	$2 h_{eq} / 3$
3. Sen alan korkeus, jolta liekki tulee ulos ikkunasta	$2 h_{eq} / 3$
4. a) Liekkien pystysuuntainen ulottuma ikkunan yläpuolella b) Vastaava liekin pituus sen akselia pitkin mitattuna $= L_f \approx L_L + h_{eq}/2$	$L_L \approx 1,9 \left( \frac{\dot{Q}}{w} \right)^{2/3} - h_{eq}$
5. Liekin lämpötila ikkunan tasossa	$T_w = T_0 + \frac{520}{1 - 0,4725 (L_f w / \dot{Q})}$
6. Liekin lämpötila ikkunan yläreunan tasalla	$T(z) = (T_w - T_0) \left[ 1 - 0,4725 \left( \frac{h_{eq} w}{2 \dot{Q}} \right) \right] + T_0$
7. Liekin kärjen lämpötila	$520 \text{ °C} + T_0$

Esimerkkinä kaavojen käytöstä tarkastellaan huonetta, jonka mitat ovat  $W = 3,6$  m,  $D = 3,6$  m ja  $H = 2,6$  m sekä aukon korkeus  $h_{eq} = 1,6$  m ja leveys  $w = 2,4$  m (tyypillinen suuri toimistohuoneen ikkuna). Olkoon palokuorman tiheys  $510$  MJ/m<sup>2</sup> vastaten Eurokoodissa annettua toimistorakennusten palokuorman 80 %:n fraktiilia. Tällöin on  $A_t = 63$  m<sup>2</sup>,  $A_v = 3,8$  m<sup>2</sup> ja  $O = 0,076$  m<sup>1/2</sup> ja  $\Omega = 427$  MJ/m<sup>2</sup>. Tällöin saadaan hapen saannin rajoittaman palon palotehoksi  $5,7$  MW ja lämpötilaksi  $T_f$   $873$  °C. Ulostulevan liekin lämpötila ikkunan tasalla on  $1\ 090$  °C. Tämä lämpötila on palohuoneen lämpötilaa korkeampi, koska palamiskykyiset kaasut kohtaavat ikkunalla lisää happea, joka lisää palamista. Lämpötilaa  $540$  °C vastaava liekin kärki on  $1,8$  m ikkunan yläpuolella. Mallilla ei siis pystytä kuvaamaan lämpötiloja kuin parin metrin korkeudelle ikkunan yläpuolella. Lappi ym. (2002) ovat kehittäneet menetelmän laskea lämpötilat Eurokoodin mallin pätevyysalueen yläpuolella. Tässä työssä tähän käytetään kuitenkin palon simulointia, jossa saadaan laskettua koko lämpötilakenttä halutulle korkeudelle asti.

### **6.3.2 Ontelon vaikutus kaksoislasijulkisivujärjestelmän lämpenemiseen ja palon leviämiseen julkisivun välityksellä**

#### **6.3.2.1 Laskentamalli ja kelpoisuus**

Tässä tutkimuksessa kehitettiin laskentamalli, jolla voidaan ottaa huomioon kaksoislasijulkisivun ontelon vaikutus palon leviämisen vaaraan. Malli on palon simuloinnin kenttämalliohjelman FDS 3 sovellus. Malli on kehitetty siten, että ilman ulompaa lasia se antaa samat tulokset kuin Eurokoodin malli eli sen laskema lämpörasitus on laajalti hyväksytyt menettelytavan tulosten mukainen. Siten siis jäljempänä esitetyn ontelon syvyyden mitoitusperusteena toimiva palorasitus on laajalti hyväksytyjen menettelytapojen (Eurokoodit) mukainen ja siten kelpoiseksi todettu. Myös ontelon liekkiä käyttäytymiseen ja siten tilan kuumenemiseen aiheuttamien muutosten laskentaan käytetty malli on todettu useissa tutkimuksissa todettu kelpoiseksi eli se toistaa hyvin kokeissa havaittuja tuloksia. Useita FDS-mallin kelpoisuutta osoittavia tuloksia on esitetty Ontelopalojen Ominaispiirteet -hankkeen loppuraportissa (Hietaniemi ym. 2002). FDS-malli on tällä hetkellä ehkä eniten käytetty palon simulointi työkalu koko maailmassa ja siksi sen kelpoisuutta on tutkittu laajalti myös muualla<sup>37</sup> (esim. Clement 2000, Friday & Mowrer 2001, Hostikka ym. 2002, Zhang ym. 2002).

---

<sup>37</sup> FDS-palonsimulointi mallilla on merkittävä rooli myös Yhdysvalloissa tehtävässä laajassa World Trade Center -katastrofin paloteknisessä tutkimuksessa.

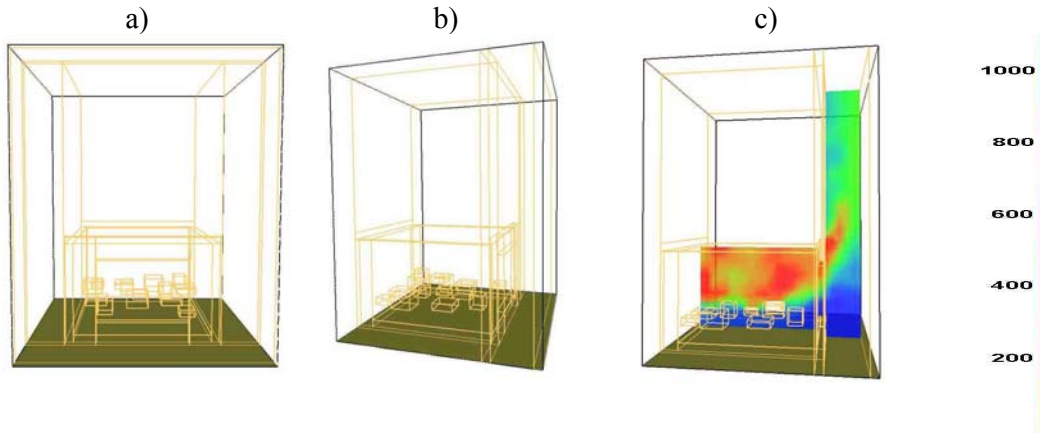
Kaksoislasijulkisivun ontelon kuumenemisen laskentajärjestely esitetään alla (Kuva 63). Palohuoneen sisämitat ovat seuraavat: leveys 3,6 m, syvyys 3,6 m, korkeus 2,6 m. Huoneen seinät on määritelty normaalipainoiseksi betoniksi (lämpötilanjohtavuus  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , lämmönjohtavuus  $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ja paksuus  $20 \text{ cm}$ <sup>38</sup>. Palotilassa on yksi ikkuna, jonka leveys on 2,4 m ja korkeus 1,6 m. Ikkunan alareunan korkeus lattian tasosta on 0,4 m ja se sijaitsee sivusuunnassa keskellä palotilaa. Palotilan palokuorman määrä ja palavuus säädettiin siten, että palosimuloinnin tulokset ovat yhtenevät Eurokoodin antamien julkisivulle tulevien liekkien korkeussuuntaisen lämpötilajakauman kanssa. Paloteho oli noin 7 MW. Ontelon ala-, sivu- ja yläreunojen oletettiin olevan avoimia siten, että kaasut pääsivät vapaasti virtaamaan niiden kautta.<sup>39</sup>

Kuvassa 64 verrataan FDS-laskentamallin antamaa pystysuuntaista lämpötilajakaumaa Eurokoodin mukaiseen lämpötilajakaumaan. Yhteensopivuus on erittäin hyvä.

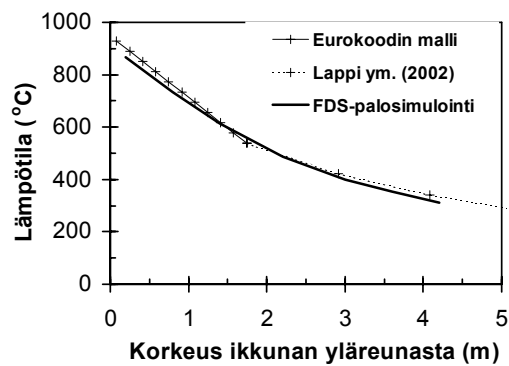
---

<sup>38</sup> Tämä mitta on laskentakoppien määräämä arvo. Sillä ei ole vaikutusta tuloksiin, koska lämpötilarintama ei ehdi kulkea seinien läpi palon kriittisten alkuvaiheiden aikana (esim. LPC:n tutkimuksissa (LPC 1999) palo levisi toiseen kerrokseen alle 10 minuutissa).

<sup>39</sup> Myös tilannetta, joissa ontelon yläreuna oli osittain tai kokonaan suljettu ja sivut avoimet sekä tilannetta, jossa ontelon yläreuna oli osittain tai kokonaan suljettu ja sivut suljettu tutkittiin. Alareuna oli avoin kaikissa tapauksissa. Näissä tapauksissa tarkasteltiin korkea, 28 m korkuista julkisivua, matalampia tapauksia tarkastellaan jäljempänä. Kun sivut olivat avoimet, yläreunan virtauksen muutokset eivät vaikuttaneet ontelon kuumenemiseen. Kun sivut olivat kiinni, palohuoneesta ulostulevien kaasujen palaminen heikkeni siten, että ontelon lämpötilat keskimäärin pienenevät. Kuitenkin, tilanteessa, jossa yläreuna oli melkein kiinni (avointa osuutta 10 %), savun ja kuumien kaasujen muodostaman patsaan alareuna paloi palotilan ikkunan yläpuolella, ja ontelo oli selvästi tätä avoimempia yläreunoja kuumempi. Kun yläreuna suljettiin kokonaan, savun ja kuumien kaasujen muodostaman patsaan alareuna laskeutui niin alas, että palamisen saama hapen määrä aleni sen vuoksi ja ontelo kylmeni melkein suljettuun yläreunaan nähden.



Kuva 63. Ontelon kuumenemisen laskentajärjestely: a) edestä, b) viistosti sivulta ja c) liekkiä havainnollistava kuva sivulta.



Kuva 64. Palonsimuloinnilla ja Eurokoodin 1–1–2 menetelmällä laskettujen lämpötilojen vertaaminen. Katkoviivalla merkityt Eurokoodin mallin tuloksia korkeussuunnassa jatkavat lämpötilat on laskettu käyttäen Lappin ym. (2002) kehittämää menetelmää<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> Lapin, Hietaniemen ja Kokkalan kehittämän menetelmän kelpoisuus on tarkistettu vertaamalla sillä laskettuja arvoja muutamiin VTT:n julkisivukokeissa mitattuihin lämpötila-arvoihin (Lappi ym. 2002).



### 6.3.2.2 Sisemmän ja ulomman lasin välimatkan vaikutus ontelon kuumenemiseen ja palon leviämiseen

Kaksoislasijulkisivun ontelo kuumenee sitä voimakkaammin, mitä pienempi sisemmän ja ulomman lasikuoren välimatka on. Kuvassa 66 on esitetty tätä koskevat tulokset, jotka on saatu edellä kuvatulla palonsimuloinnilla. Lisäksi esitetään Kunkelmanin (1997, 1998) Saksassa tekemien kokeiden tuloksia<sup>41</sup>, jotka osoittavat saman asian.

Koska Kunkelmanin kokeiden ja laskettujen tulosten palohuoneen palo ja sen ikkuna ovat erilaiset, ei esitettyjä tuloksia voi verrata suoraan. Ne osoittavat kuitenkin saman ilmiön: sisemmän ja ulomman lasin välimatkan pienetessä ontelon kuumuus kasvaa.

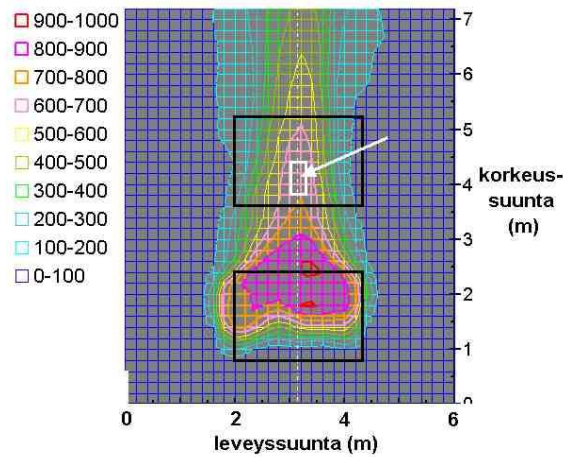
Lämpötilakäyrien voidaan havaita ryhmittyvän kahteen ryhmään siten, että pientä lasien välistä etäisyyttä vastaavat lämpötilat ovat selvästi suurempia etäisyyksiä vastaavia lämpötiloja korkeampia. Kun palonsimuloinnilla saadut lämpötilat esitetään sisemmän ja ulomman lasin välisen etäisyyden suhteen (Kuva 66), niin lämpötilojen ryhmittyminen ko. etäisyyden mukaan tulee ilmeiseksi. Nähdään, että on tietty etäisyyden raja-arvo, jota pienemmillä arvoilla lämpötilat ontelossa nousevat jyrkästi ontelon syvyyden pienentyessä. Kun lasien välinen etäisyys on suurempi kuin kyseinen raja-arvo, ei ontelolla juurikaan ole vaikutusta ontelon kuumenemiseen.

Palonsimulointia käyttäen tarkastelussa tapauksessa kyseinen ontelon syvyyden raja-arvo on noin 1 m. Tämä arvo vastaa edellä esitetyn Eurokoodissa 1–1–2 esitetyn mallin mukaista liekin vaakasuuntaista ulottumaa, jonka suuruus Eurokoodin mallin mukaan on kaksi kolmannesta ikkunan korkeudesta ( $2h_{eq}/3$ ). Palonsimuloinnissa tarkasteltiin 1,6 m korkeaa ikkunaa, joten Eurokoodin mallin mukainen liekin ulottuvuus on  $2 \times 1,6/3 = 1,06$  m. Myös Kunkelmanin (1997) esittämille lämpötilatuloksille (Kuva 65c) tuntuu pätevän sama lainalaisuus: hän käytti kokeissaan 0,90 m korkeaa ikkunaa, joten Eurokoodin mallin liekkien vaakasuuntainen ulottuvuus on 0,60 m. Yllä olevista lämpötilakäyristä nähdään, että alle 0,60 m syvälle ontelolle (0,30 m) lämpötilat ovat selvästi korkeampia kuin silloin, kun lasien välinen etäisyys ylittää 0,60 m (0,80 m ja 1,2 m). Eurokoodin mallin antama raja-arvo näyttää siis toimivan myös Kunkelmanin saamien koetulosten suhteen; yhtä tarkasti kuin palonsimuloinnin tuloksista ontelon syvyyden raja-arvoa ei mittauspisteiden vähäisyyden vuoksi voi päätellä.

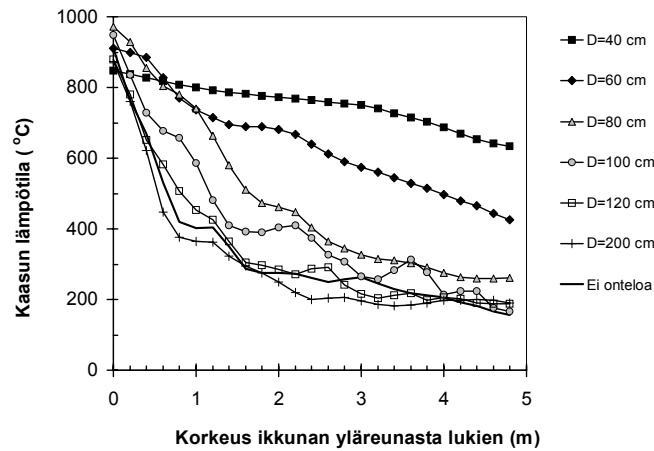
---

<sup>41</sup> Kunkelmanin tutkimukset on esitelty Ontelopalojen ominaispiirteet -hankkeen loppuraportissa.

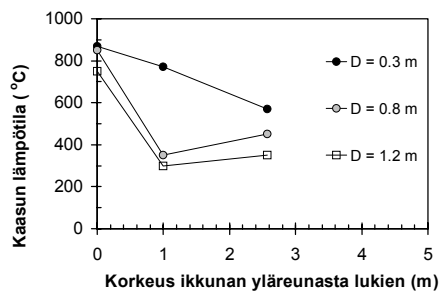
a)



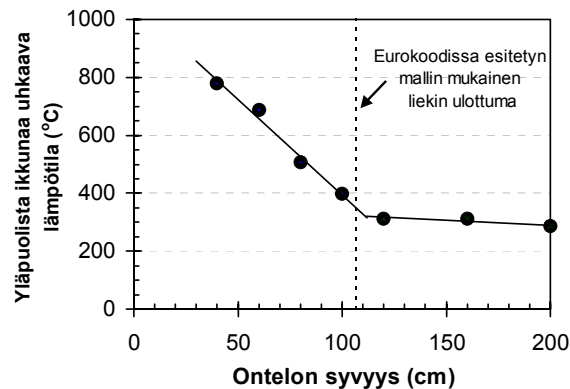
b)



c)



Kuva 65. Kaksoislasijulkisivun ontelon kuumenemisen riippuvuus korkeudesta palohuoneen ikkunan yläpuolella eri ontelon syvyyden  $D$  arvoilla. a) ja b) Tässä työssä palon-simuloinnilla määritetyt lämpötilat: a) esimerkki tapauksesta  $D = 60$  cm ja b) eri  $D$ :n arvoja vastaavat lämpötilat. c) Kunkelmanin (1997) tekemissä kokeissa mitatut lämpötilat (tässä työssä laskettujen ja Kunkelmanin kokeiden palohuoneen ja sen ikkunan mitat poikkeavat toisistaan, tuloksia ei tule verrata suoraan). Valkoinen nuoli osoittaa aluetta, jota kuvassa 66 esitetyt lämpötilat vastaavat.

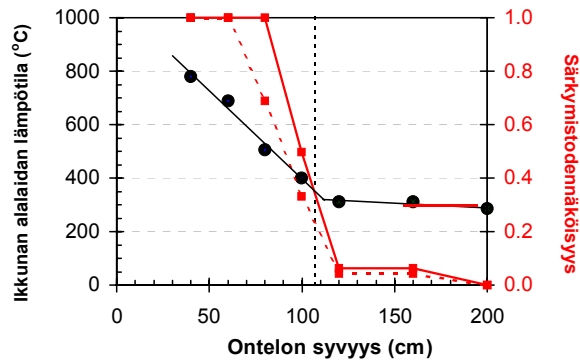


Kuva 66. Palonsimuloinnilla määritettyjen lämpötilojen riippuvuus kaksoislasijulkisivun ontelon sisemmän ja ulomman lasin etäisyydestä. Esitetyt lämpötila-arvot vallitsevat kuvassa 65a esitetyllä alueella palohuoneen yläpuolisen tilan ikkunan alaosassa.

Saatujen tulosten perusteella voidaan esittää seuraava yksinkertainen johtopäätös kaksoislasijulkisivun sisemmän ja ulomman lasin välisen etäisyyden vaikutuksesta niiden välisen ontelon kuumenemiseen: jos lasien välinen etäisyys on suurempi kuin kaksi kolmannesta ikkunan korkeudesta, ontelo ei oleellisesti lisää palotilan yläpuolella olevaan tilaan kohdistuvaa lämpörasitusta.

Se, miten palon leviämisen vaara lisääntyy, kun sisemmän ja ulomman lasin välinen etäisyys on pienempi  $\frac{2}{3} \times$  ikkunan korkeus, riippuu etenkin siitä, miten hyvin yläpuolisen tilan lasit kestävät palorasitusta. Nämä lasit ovat tyypillisesti 6 mm paksua floatlasia. Lasitusten palon aikaista toimintaa koskevien tutkimusten perusteella (esim. LPC 1999, Shields ym. 2001, 2002) voidaan arvioida, että lasit eivät yleensä säry niin paljoa, että ne putoaisivat pois paikaltaan ennen kuin niihin kontaktissa olevan kaasun lämpötila on saavuttanut noin 300 °C:n lämpötilan. Toisaalta, kun lasiin vaikuttava kaasun lämpötila nousee noin 500–600 °C:seen, niin lasien täydellinen särkyminen alkaa olla varsin varmaa. Kuvassa 67 esitetään, miten tämän lasin särkymistä koskevan mallin<sup>42</sup> puitteissa palotilan yläpuolella olevan huoneen lasien särkymisen todennäköisyys kasvaa sisemmän ja ulomman lasien välimatkan pientyessä.

<sup>42</sup> Lasin särkymiseen vaikuttaa myös esim. siihen vaikuttavan kaasun lämpötilan nousunopeus ja lasiin imeytyvä lämpösäteily. Ulkoisen palon aiheuttamassa palossa lämpörasitus nousee yleensä nopeasti, kun liekit purkautuvat äkillisesti ulos palotilan ikkunoista. Kun ontelotilassa olevan kaasun lämpötila kasvaa, sen lähettämä lämpösäteily kasvaa voimakkaasti (verrannollisena absoluuttisen lämpötilan 4:nteen potenssiin), lisäksi kaasukerroksen kymmenen senttimetrin syvyydessä ontelossa ole kuitenkään niin ohut, että säteilyn määrä pienenee merkittävästi kaasun emissiviteetin pientyessä kaasukerroksen muuttuessa ohuemmaksi.



Kuva 67. Palohuoneen yläpuolista ikkunaa uhkaavien lämpötilojen (ympyrät ja ohut viiva) ja niiden särkymistodennäköisyyden (neliöt ja paksu viiva) riippuvuus kaksoislasi-julkisivun sisemmän ja ulomman lasin välisestä etäisyydestä. Jyrkempi todennäköisyyskäyrä vastaa lasin särkymisväliä 300–500 C ja loivempi särkymisväliä 300–600 C.

Tärkeää on myös, että kapeissa onteloissa lämpötilat pysyvät pystysuunnassa varsin korkeina, joten myös välittömästi palohuoneen yläpuolella olevan huoneen yläpuolella olevien huoneiden ikkunoiden särkyminen on mahdollista.

Edellä esitetyn perusteella voidaan siis arvioida, että siinä tapauksessa, että kaksoislasi-julkisivun sisemmän ja ulomman lasin välinen etäisyys on pienempi kuin  $\frac{2}{3} \times$  ikkunan korkeus, lasien väliin jäävä ontelo lisää olennaisesti palon leviämisen vaaraa.

Palo voi levitä myös yläpuolisten lasien särkymisen lisäksi, jos sisempiä laseja kannattavat rakenteet pettävät. Jos ulompaa lasikuorta kannattavat rakenteet pettävät, palorasitus voi lievetä, jos kuumuus pääsee tuulettumaan syntyneiden aukkojen kautta. Vaarana on tällöin lähinnä sortuvien paksujen lasien ja putoavien rakenteiden alhaalla oleville henkilöille aiheuttama vaara. Runkorakenteissa käytetään terästä, ruostumatonta terästä ja alumiinia. Edellä saadut arviot ontelossa vallitseville lämpötiloille ovat korkeita etenkin kantokykyä ajatellen: tyypillisesti alumiini menettää kaiken kestävyytensä ennen 550 °C:n lämpötilaa (Eurocode 9) ja jotkut seokset sulavat vähän tämän lämpötilan yläpuolella. Toisaalta teräs- ja alumiinirakenteissa kuumenevien osien menettäessä kantokykyään voimat siirtyvät kylmempien rakenteiden kannettavaksi ja tämän takia kyseiset rakenteet voivat kestää odottamattoman pitkään tulipalon kuumuutta. LPC:n lasijulkisivututkimuksessa (1999) tutkittiin myös tätä asiaa. tarkastelun kohteena oli sisemmän lasijulkisivun alumiinista tehtyjen kannattimien kantokyky palon aikana. Koe tehtiin siten, että 1. kerroksen huonepalon kuumuuden annettiin lämmittää 1. ja 2. kerroksen väliseen lattialaataan kiinnitettyjä alumiinikannattimia, joiden lämpötilaa mitattiin. Kokeen aikana kannattimien lämpötila nousi tasaisesti siten, että ne saavuttivat noin 600 °C:n lämpötilan palo-

rasituksen jatkuttua noin 30 minuutin ajan. Rakenne kesti tämän, vaikka 200 °C:n lämpötila, jossa kyseinen alumiiniseos menettää 50 % lujuudestaan ja 350:n °C:n lämpötila, jolloin seoksen lujuus putoaa nolnaan, saavutettiin selvästi aiemmin. Tutkijat päättelivät tämän johtuneen juuri kuormien uudelleenjakautumisesta. Rakenteiden todellisen palonkestoajan arvioinnissa onkin syytä käyttää yksityiskohtaisia koko rakennejärjestelmän toiminnan huomioon ottavia laskentamenetelmiä tai kokeita. Tällaiset analyysit ovat liian laajoja tähän työhön sisällytettäväksi, mutta jos sprinklerien pettämisen seuraamuksia halutaan arvioida luotettavasti niitä ei voine välttää.

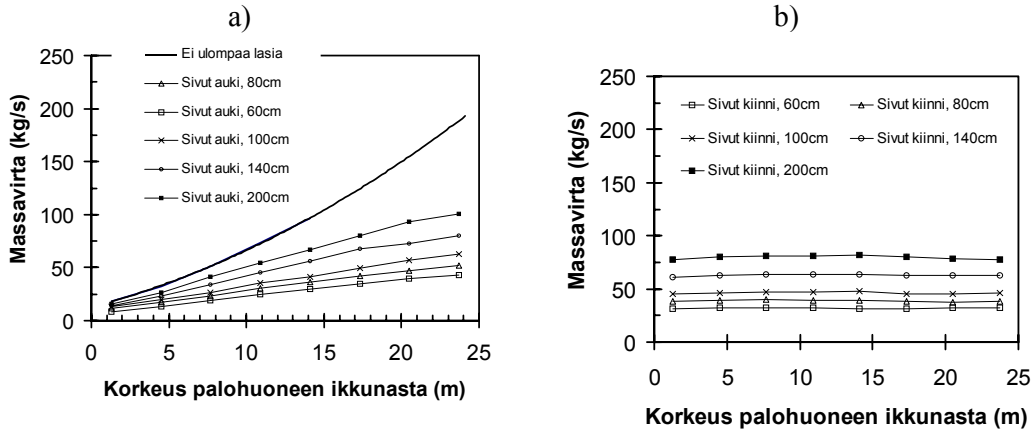
### 6.3.3 Ontelon savun hallinnan perusteet

Kun rakennuksen sisempi lasikuori rikkoutuu tulipalon vaikutuksesta, savu pääsee leviämään sen ja ulomman lasikuoren muodostamaan onteloon. Se, mitä tämä vaikuttaa paloturvallisuuteen, riippuu etenkin siitä, onko ontelolla roolia poistumisessa. Lähtökohtaisesti ontelotila ei ole poistumistie, koska tyypilliset kaksoislasijulkisivulla varustetut rakennukset ovat niin suuria tai korkeita, että ikkuna tai parveke ei ole niissä varapoistumistie, vaan niissä on kaksi osastoitua porrashuonetta uloskäytävänä (Aarnio 2001, RakMK E1: 10.3.1 ja 10.3.2).

Siinä varsin epätodennäköisessä tilanteessa, jota tässä kohdassa tarkastellaan, että rakennuksen sprinklaus pettää, ihmisten hakeutuminen turvaan ontelossa oleville huoltotasoille on kuitenkin mahdollista. Tässä tapauksessa henkilöturvallisuutta parantaa, jos ontelon savu tuulettuu tai tuuletetaan pois. Tämä parantaa myös palokunnan mahdollisuutta paikantaa palopaikka ja pelastettavat henkilöt.

Jos ontelo on avoin kaikilta sivuiltaan, kuten Suomessa usein asia on, savu virtaa nopeasti ulos ontelosta. Hormi-ilmiön voimistama virtausnopeus on palonsimulointien mukaan korkea, 10–15 m/s. Monesti kaksoislasijulkisivujen ontelot ovat kuitenkin rakenteeltaan suljettumpia: ontelo voi olla suljettu sivuiltaan ja myös ontelon yläreuna voi olla suljettavissa esim. kääntyvien ritilöiden avulla, jolloin ontelon tuulettumista voidaan säätää.

Seuraavassa esitetään ontelon savunhallinnan perustaksi, millaisia savumääriä eri tavoin suljetuissa onteloissa tulipalossa liikkuu (Kuva 68). Tarkastelu perustuu FDS-ohjelmalla tehtyihin palonsimulointilaskuihin. Niiden yksityiskohdat ovat muuten samat kuin edellä esitettyjen, onteloon kuumenemista koskevien simulointien, mutta tässä tapauksessa tarkasteltiin 28 m korkeaa ontelotilaa.



Kuva 68. Savukaasujen massavirran riippuvuus korkeudesta eri ontelon syvyyden arvoilla ( $D = 0,4, \dots, 2,0$  m): a) ontelon sivut ovat auki ja b) ontelon sivut ovat suljetut. Ontelon ylä- ja alapää ovat avonaisia. Paloteho 7 MW ja palohuoneen ikkunan koko 2,4 m (leveys)  $\times$  1,6 m (korkeus).

Ilman ulompaa julkisivua ylöspäin kulkeva massavirta voidaan laskea Karlssonin ja Quentieren (2000) esittämällä seinän vieressä tapahtuville paloille antamalla mallilla,  $\dot{m} = \frac{1}{2} f(2\dot{Q})$ , missä  $f(Q)$  on jonkin palopatsasmallin mukainen massavirran riippuvuus palotehosta. Parhaiten tässä tapauksessa soveltuu Heskestadin palopatsasmalli kaava  $f(\dot{Q}) = 0,071\dot{Q}_c^{1/3}(z - z_0)^{5/3} + 0,00192\dot{Q}_c$ , missä  $\dot{Q}_c$  on konvektiivinen paloteho kilowateissa ja  $z_0 = -h_{eq}$ . Näin laskettu massavirtaus antaa turvallisella puolella olevan arvion tilanteessa, jossa ontelon sivut ovat auki. Suurilla korkeuksilla arvio on hyvin konservatiivinen. Kun sivut ovat kiinni, massavirtaus ei riipu korkeudesta, koska onteloon ei pääse ala- ja yläpään välillä korvausilmaa. Massavirtaus riippuu ontelon syvyydestä  $D$ . Tälle riippuvuudelle saadaan yläraja-arvio, kun oletetaan ontelon kaasujen keskimääräiseksi ylösvirtausnopeudeksi 10 m/s ja kerrotaan tämä arvo ilman tiheydellä ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ) sekä ontelon poikkipinta-alalla. Tämäkin arvio on hyvin konservatiivinen suurilla ontelon syvyyksillä.

Edellä mainittuja massavirtausarvioita tarkemmin ontelon virtausta vastaavia arvoja saadaan laskemalla massavirtaus tapauskohtaisesti palonsimuloinnilla.

## 6.4 Uhkiin varautuminen

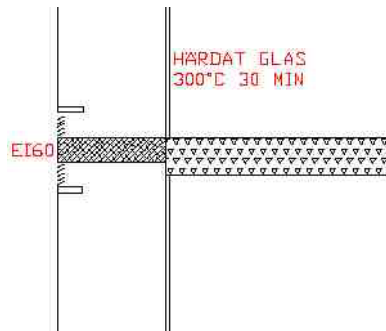
Edellä esitetyt uhkakuvat pätevät vain tapauksissa, joissa palo on päässyt kehittymään lieskahdukseen, mikä edellyttää ainakin alkusammutuksen ja sprinklerien tekemän sammutuksen epäonnistumista. Niiden todennäköisyys on pieni. Jos mahdolliset seu-

raamukset arvioidaan niin korkeiksi, että riskit ovat merkittävät, on syytä edellä kuvattuihin uhkakuviiin varautua myös passiivisin rakenteellisin keinoin.

Esimerkkejä tällaisista tapauksista ovat tietyt Saksassa toteutetut korkeat kohteet, kuten 162 metriä korkea RWE Tower -rakennus Essenissä ja 80 kerrosta korkea Düsseldorfin City Gate sekä 31-kerroksinen Kista Science Tower Ruotsissa. Näissä rakennuksissa kaksoislasijulkisivu on osastoitu. Edellä mainituissa saksalaiskohteissa osastointi on toteutettu kerroksittain ja ruotsalaisessa kohteessa yksi palo-osasto käsittää neljä päällekkäistä kerrosta.

Myös sisemmän lasikuoren laseina voidaan periaatteessa käyttää paloa kestäviä laseja, jolloin suojaavat rakennuksen sisäpuolta mahdolliselta ulkopuoliselta palolta. Lasien tulee täyttää tiiviysvaatimus ja estää lämpösäteilyn läpäisy. Eristävyysvaatimus ei ole niin oleellinen kuin edelliset. Palolasien tavallista lasia selvästi korkeamman hinnan ja kaksoislasijulkisivujen suurten pinta-alojen vuoksi tämä ratkaisu voi vaatia suuria kustannuksia.

Pystysuuntaisen palon leviämisen estäminen jakamalla ontelon vaakasuuntaisilla osastoivilla rakenteilla vaatii em. osastointivaihtoehtoa vähemmän rakenteita ja voi siten muodostua kustannuksiltaan edullisemmaksi. Esimerkkinä tällaisesta on kuvassa 69 esitetty Kista Science Towerissa käytettäväksi valittu ratkaisu, jossa ontelo on katkaistu kerrosrajalla EI 60 -luokitellulla rakenteella<sup>43</sup>. Sisempi julkisivu on toteutettu käyttäen karkaistua lasia.



*Kuva 69. Esimerkki Kista Science Tower -rakennuksessa käytettävästä pystysuuntaisen paloleviämisen estämiseen tarkoitetusta osastoivasta rakenteesta.*

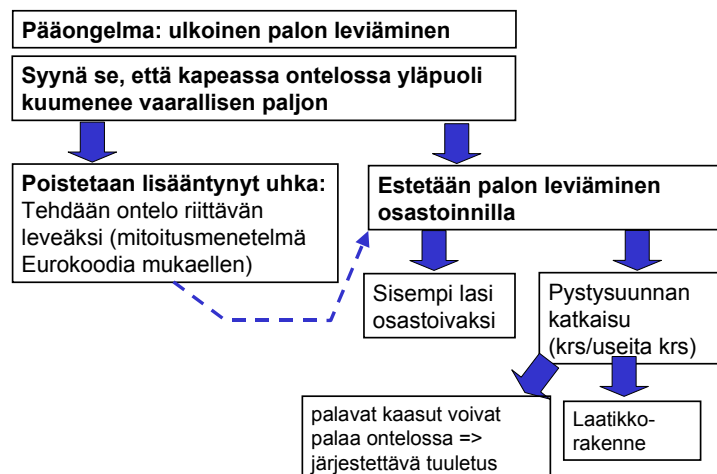
---

<sup>43</sup> Rakenne perustuu varta vasten tämän ongelman ratkaisun löytämiseksi tehtyihin palokokeisiin. Näitä kokeita ei ole käsitelty tässä raportissa, koska niiden paloskenaarioina oli ulomman lasin rikkoutuminen.

Kun ontelo jaetaan vaakasuuntaisin rakenteiden, syntyy julkisivuun käytävämäisiä osastoja. Jos nämä osastot ovat yhden kerroksen korkuisia, palonsimuloinnit osoittavat, että palaminen ja kuumat kaasut voivat levitä niissä sivusuuntaisesti laajalti Näin voi käydä riippumatta siitä, ovatko ontelon sivut avoimet vai suljetut: avoimessa tapauksessa palokaasut pääsevät helpommin virtaamaan pois, mutta toisaalta niitä korvaava ilma voimistaa palamista ja suljettuun osastoon kertyy enemmän kuumia ja palamiskykyisiä kaasuja, mutta hapen puute voi rajoittaa niiden palamista. Siksi tällaisissa osastoissa tulisi varautua palokaasujen riittävän tehokkaaseen tuulettamiseen palon aikana.

Mahdollinen sivusuuntainen paloleviäminen vaakarakentein osastoidussa julkisivussa voidaan estää myös jakamalla osastot edelleen pystyrakentein. Tällöin julkisivuun syntyy ns. laatikkorakenne, jota on käytetty esim. Saksassa. Palon aikana tässä tapauksessa liekit voivat työntyä ulos palahuoneesta koko laatikon tilavuudelle, koska palaminen hakeutuu sinne, missä on happea. Jos happea ei ole saatavilla, palo voi tukahtua, josta kuitenkin voi olla seurauksena ”backdraft”-leimahdus, jos esim. ulompi lasi pettää. Ehkä pahin ongelma tällaisessa rakenteessa on kuitenkin sen toteuttamisen vaatimat suhteellisen monimutkaiset rakenteet ja laitteet esim. tuulettusta varten, mikä johtaa sen hintaa.

Tässä luvussa esitetyt keinot, joita voidaan käyttää kaksoislasijulkisivullisten rakennusten paloturvallisuuden parantamiseksi voidaan esittää kaaviomuodossa (Kuva 70). Kaaviota luettaessa on tärkeää pitää mielessä että, se perustuu sprinklereiden pettäessä mahdollisesti kehittyvään uhkakuvaan.



Kuva 70. Kaaviokuva keinoista, joita voidaan käyttää kaksoislasijulkisivullisten rakennusten paloturvallisuuden parantamiseksi.



## 7. Teollisuushallien kattorakenteiden onteloiden osiin jakaminen

Teollisuusrakennusten kattopaloista koituu vuosittain merkittäviä taloudellisia vahinkoja ja niiden sammuttaminen aiheuttaa palokunnille paljon työtä ja toisinaan merkittävää vaaraakin. Siksi, vaikka henkilöturvallisuudelle koituvat uhat ovatkin monia muita kohteita selvästi pienemmät, teollisuusrakennusten kattopalot on erittäin tärkeä paloturvallisuustutkimuksen kohde. Tässä työssä teollisuusrakennusten kattopalojen laajasta ongelmakentästä käsitellään erästä rajattua aihetta, teollisuushallien katto-onteloiden paloja. Vaikka yksittäisten teollisuushallien palovahingot eivät useinkaan yllä palovahinkotilastojen korkeimpien vahinkokirjausten joukkoon, niin näiden rakennuksien lukuisuus ja monia muita kohteita oleellisesti korkeampi tulipalon syttymisen todennäköisyys nostavat tämän rakennustyyppin vahinkokertymän merkittäväksi.

Työssä tarkastellaan teollisuushallien katto-onteloiden paloturvallisuuden parantamista rakenteellisin keinoin katon osiin jakamisen avulla. Varsinainen osastointi jätetään tarkastelun ulkopuolelle mm. siksi, että siitä on olemassa seikkaperäistä ohjeistusta vakuutusyhtiöiltä (ks. liite F).

Teollisuushallien katto-ontelot eivät tyypillisesti muodosta erillisiä palo-osastoja ja siksi palo-osastojen osiin jakamisesta annetut määräykset eivät velvoita niiden osiin jakamiseen. Yleiseksi käytännöksi on kuitenkin muodostunut katto-onteloiden jako tyypillisesti 400 m<sup>2</sup>:n suuruisiin osiin. Tässä työssä tutkitaan, millainen onteloiden osiin jakaminen vastaa kohteiden paloturvallisuustavoitteita esim. sen kustannusvaikutusten suhteen. Eräänä lähtökohtana työlle onkin se viranomaisille toisinaan esitetty epäily, että kannattaako teollisuushallien katto-onteloita ylipäättään jakaa osiin. Nähdään, että jos hallia kohtaa tulipalo, itse hallitilassa olevien laitteiden ja irtaimiston arvo on niin paljon suurempi kuin katon, että katon suojaaminen ei ole kovin oleellista. Sellaisessa palossa, jossa laitteet ja irtaimisto kärsivät vakavia vahinkoja, suhteellisesti katon tuhoutuminen usein onkin vähäinen lisämenetys. Tärkeää on kuitenkin se, että myös pelkkä katon tuhoutuminen voi aiheuttaa merkittäviä kustannuksia, jotka voidaan välttää turvaamalla katto palon leviämistä vastaan. Voidaankin katsoa, että helposti paloa levittävä katto lisää paloriskejä *suhteettomasti* verrattuna rakenteellisesti suojattuun kattoon, koska pienikin syttymä voi helposti johtaa merkittäviin tuhoihin. Tämä katsantokanta sopii hyvin nimenomaan teollisuushalleihin, koska niissä pienet syttymät eivät toimintojen luonteen vuoksi ole lainkaan harvinaisia. Suhteellisuuden näkökulma tuo mukanaan kuitenkin myös tarpeen arvioida mahdollisia vahinkoja suhteessa niiden torjuntakustannuksiin.

Esitettävät tulokset perustuvat pitkälti kokemusperäiseen tietoon. Tätä tiedollista perustaa on tuettu ja laajennettu käyttäen kahta apuvälinettä, laskennallista tulipalon leviämisen arviointia sekä tilastotietoja. Nämä apukeinot täydentävät toisiaan. Edellinen auttaa hahmottamaan ne lainalaisuudet, joiden välityksellä rakennustekniset ratkaisut vaikuttavat palon leviämiseen sekä antaa hyödyllistä määrällistä tietoa. Tilastot valottavat mallleilla ja kokeilla vaikeasti saavutettavissa olevia tekijöitä, etenkin sitä, kuinka usein ja mistä syistä tulipaloja tapahtuu.

## 7.1 Paloturvallisuusnäkökohtia

Teollisuushallien katto-onteloissa leviävien palojen oleelliset riskit ovat:

- Kohteelle koituvat omaisuusvahingot:
  - Pelkästään katolla leviävä palo ei pieneksi jäädessään useinkaan aiheuta merkittäviä irtaimisto- tai keskeytysvahinkoja, joten pääosa kustannuksista tällaisissa paloissa aiheutuu rakennuksen vaurioitumisesta.
  - Suureksi kehittynyt kattopalo voi levitä hallin sisälle ja aiheuttaa vaurioita myös hallin sisätiloille ja irtaimistolle sekä aiheuttaa keskeytysvahinkoja. Jos palo rajoittuu vain kattoon, merkittäviä irtaimisto- tai keskeytysvahinkoja ei kuitenkaan aina synny, jos katto voidaan korjauksen ajaksi korvata tilapäiskatteella.
- Palokunnan turvallisuus ja työolot
  - Jos palo pääsee leviämään laajalle alueelle, sammutustyö vaatii paljon resursseja ja aikaa.
  - Sammutus korkeilla paikoilla on aina alempana tehtävää työtä hankalampi ja vaarallisempi tehtävä. Joskus se voi olla hyvin vaarallista (esim. kattorakenteiden pettäessä).

Osastoinnissa ja osiin jaossa perustekijät ovat

- alueen pinta-ala ja
- aluetta rajaavien rakenneosien tiiviys ja eristävyys.

Koska teollisuushallien kattopaloihin liittyvä henkilövahinkoriski on hyvin pieni, ovat niitä koskevat määräysten edellyttämät osastointiin liittyvät paloturvallisuustavoitteet (RakMK E1 2002, kohta 5.1.1) pelastus- ja sammutustoimien helpottaminen sekä omaisuusvahinkojen rajoittaminen. Osastoille esitetty toiminnallinen vaatimus on, että niiden tulee estää palon leviäminen osastosta toiseen määrätyn ajan. Palo-osastojen jakamisella

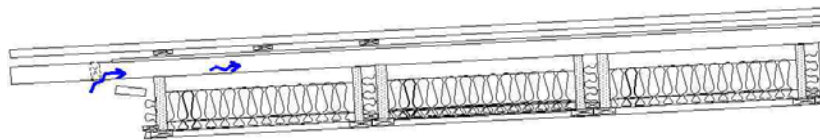
edelleen pienempiin osiin pyritään seuraaviin paloturvallisuustavoitteisiin (RakMK E1 2002, kohta 5.2.2): poistumisen turvaaminen *tai* pelastus- ja sammutustoimien helpottaminen. Teollisuushallien kattopalojen osalta oleellista on jälkimmäinen, pelastus- ja sammutustoimien helpottaminen. Tämän lisäksi, kuten jo luvun johdannossa esitettiin, omaisuuden suojeleminen voidaan nähdä keskeiseksi motiiviksi katto-onteloiden osiin jakamiselle.

## 7.2 Katto-ontelon osiin jakamisen merkitys tarkastellussa esimerkikohteessa

### 7.2.1 Kattorakenne

Jatkossa esitetään yksityiskohtaiselle tasolle vietyjä laskelmia. Niiden kohteeksi on valittu seuraavanlainen varsin tyypillinen teollisuushalli:

- hallin pituus on noin 100 m, leveys 30 m ja korkeus 6 m,
- hallin kantavat rakenteet ovat liimapuupalkkeja,
- kattorakenne on toteutettu tuulettavana hallin toimintaan liittyvän suuren kosteuskuorman takia,
- erilaisista kattorakenteista valittiin tarkasteltavaksi tuulettuva peltikatto (Kuva 71).



*Kuva 71. Työssä tarkasteltu kattorakenne.*

Peltikaton kaltevuudeksi oletetaan 1:7. Tässä tutkimuksessa valitulla kaltevuudella on merkitystä vain katolla leviävän palon etenemisnopeuden kannalta. Kattorakenteen rakennustarvikkeet ovat ylhäältä alas lueteltuina seuraavat:

- peltikate,
- ruodelaudat,
- sekundäärikannattajat (ontelo),

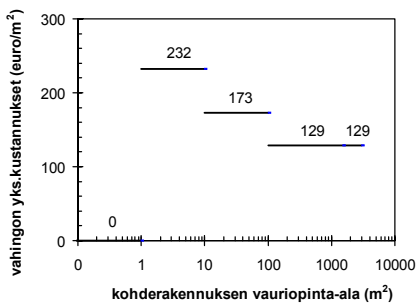
- kattoelementtien kertopuut sekundääri- ja primäärikannattajien välillä,
- villat,
- alusrakenteet ja primäärikannattaja.

Ontelotilan korkeus voi olla sekundäärikannattajien korkeutta suurempi, jos elementtien kertopuut ulottuvat villan pinnan yläpuolelle (esimerkkirakenne on tällainen).

Kuvassa 71 esitetyn kattorakenteen palon leviämisen laskennallisen tarkastelun yksityiskohtia esitetään liitteessä E.

## 7.2.2 Palovahingot erilaajuisissa paloissa

Edellä esitetylle peltikattorakenteen palovahingoille tehtiin kustannusarvio a) pienelle palovahingolle (vaurioitunut ala 1–10 m<sup>2</sup>), b) suuremmalle palovahingolle (vaurio 10–100 m<sup>2</sup>) ja c) suurelle kattovahingolle (vaurio 100 m<sup>2</sup> – koko katto). Laskennan suoritti Matti Salmela SPU-Systems Oy:stä. Laskennan oletukset ja tulokset esitetään alla olevassa taulukoissa (Taulukot 6, 7 ja 8). Tulokset on esitetty graafisesti alla olevassa kuvassa 72. Siinä on laskettujen tulosten lisäksi tehty arvio, että jos katon molemmat lappeet tuhoutuvat, yksikkökustannukset neliötä kohden ovat suunnilleen samat kuin tapauksessa, jossa vain toinen lape tuhoutuu.



Kuva 72. Kattopalon aiheuttamien suorien omaisuusvahinkojen riippuvuus vaurion pinta-alasta tarkastelulle kattorakenteelle.

Taulukko 6. Arvio kuvassa Kuva 71a esitetyn kattorakenteen 10 m<sup>2</sup> suuruisen palova-  
hingin kustannuksista.

<b>Kattovaurion koko 10 m<sup>2</sup></b>				
Oletukset:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontelopalossa katto vaurioituu siten, että se puretaan. Korjaus tehdään paikan päällä.</li> <li>• Alapinnan verhous säilyy, joten hallitilaan ei tule savuvaurioita. Verhous joudutaan vaihtamaan.</li> <li>• Kattoelementtien kertopuita joudutaan vaihtamaan 2 kpl, pituus 6 m.</li> </ul>				
	yksikkö	yksikköjen määrä	yksikköhinta (euro/yksikkö)	yhteensä (euro)
Purku ja siivous (altapäin, 2 hlöä + nostin)	tunti	8	70	560
Kuljetus ja kaatopaikkamaksu	erä	1	100	100
<u>Paikalla rakentaminen</u> : työkustannukset	tunti	24	30	720
Henkilönostimen vuokra	päivä	2	70	140
Materiaalikustannukset <sup>a)</sup>	m <sup>2</sup>	10	50	500
Yhteensä				2 020
+ työmaan käyttö-, ja yht. kustannukset, arvio 15 %				303
<b>Vahinko yhteensä</b>				<b>2 323</b>
<b>Vahinko/m<sup>2</sup> = 232 euroa/m<sup>2</sup></b>				

a) Sis. kertopuuvahv. villat, höyrynsulkumuovi, aluskate, koolaukset, ruoteet, pellit ja asennustarvikkeet

Taulukko 7. Arvio kuvassa Kuva 71a esitetyn kattorakenteen 100 m<sup>2</sup> suuruisen palova-  
hingin kustannuksista.

<b>Kattovaurion koko 100 m<sup>2</sup></b>				
Oletukset:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontelopalossa katto vaurioituu siten, että se puretaan. Korjaus tehdään paikan päällä.</li> <li>• Alapinnan verhous säilyy, joten hallitilaan ei tule savuvaurioita. Verhous joudutaan vaihtamaan.</li> <li>• Kattoelementtien kertopuita joudutaan vaihtamaan 2 kpl, pituus 6 m.</li> </ul>				
	yksikkö	yksikköjen määrä	yksikköhinta (euro/yksikkö)	yhteensä (euro)
Purku ja siivous (altapäin, 3 hlöä + nostin)	tunti	24	100	2 400
Kuljetus ja kaatopaikkamaksu	erä	5	100	500
<u>Paikalla rakentaminen</u> : työkustannukset	tunti	180	30	5 400
Työnaikainen suojaus ja purku	tunti	20	30	600
+ suojausmateriaalia (puutav. ja peitteet)	m <sup>2</sup>	120	4	480
Henkilönostimen vuokra	päivä	10	70	700
Materiaalikustannukset <sup>a)</sup>	m <sup>2</sup>	100	50	5 000
Yhteensä				15 080
+ työmaan käyttö-, ja yht. kustannukset, arvio 15 %				2 262
<b>Vahinko yhteensä</b>				<b>17 342</b>
<b>Vahinko/m<sup>2</sup> = 173 euroa/m<sup>2</sup></b>				

a) Sis. kertopuuvahv. villat, höyrynsulkumuovi, aluskate, koolaukset, ruoteet, pellit ja asennustarvikkeet

Taulukko 8. Arvio kuvassa Kuva 71a esitetyn kattorakenteen yhden lappeen (1500 m<sup>2</sup>) suuruisen palovahingon kustannuksista.

<b>Kattovaurion koko 1500 m<sup>2</sup></b>				
Oletukset:				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontelopalossa katto vaurioituu siten, että se puretaan.</li> <li>• Uudisrakentamisessa käytetään elementtejä.</li> <li>• Alapinnan verhous säilyy, joten hallitilaan ei tule savuvaurioita. Verhous joudutaan vaihtamaan.</li> <li>• Kattoelementtien kertopuita joudutaan vaihtamaan 2 kpl, pituus 6 m.</li> </ul>				
	<b>yksikkö</b>	<b>yksikköjen määrä</b>	<b>yksikköhinta (euro/yksikkö)</b>	<b>yhteensä (euro)</b>
Purku ja siivous (altapäin, 3 hlöä + nostin)	tunti	240	100	24 000
Kuljetus ja kaatopaikkamaksu	erä	50	100	5 000
Työnaikainen suojaus <sup>b)</sup> ja purku	tunti	300	30	9 000
+ suojausmateriaalia (puutav. ja peitteet)	m <sup>2</sup>	1 500	4	6 000
Henkilönostimen vuokra (2 kpl)	päivä	10	140	1 400
Uudet elementit ja vesikatepelti	m <sup>2</sup>	1 500	82	123 000
Yhteensä				168 400
+ työmaan käyttö-, ja yht. kustannukset, arvio 15 %				25 260
<b>Vahinko yhteensä</b>				<b>193 660</b>
<b>Vahinko/m<sup>2</sup> = 129 euroa/m<sup>2</sup></b>				

a) Sis. kertopuuvahv. villat, höyrynsulkumuovi, aluskate, koolaukset, ruoteet, pellit ja asennustarvikkeet  
b) Ei aina välttämättä tarvita.

### 7.2.3 Palon leviäminen kattorakenteessa

Tuulettuva kattorakenne edesauttaa tehokkaasti palon leviämistä. Matalan tilan aiheuttama paloon takaisin kohdistuvan lämpösäteilyn voimistuminen kiihdyttää syttymän kehittymistä, joka johtaa varsin pian huonepalon lieskahdusta vastaavaan palon äkilliseen voimistumiseen, jossa lämpötilat nousevat korkeiksi. Tuuletetussa katto-ontelossa happea voi riittää niin paljon, että lämpötilat nousevat noin 1 000 °C:seen. Ontelossa lieskahtunut palo lähtee etenemään nopeasti. Eteneminen pysähtyy vasta sitten, kun palo kohtaa jonkin esteen. Katto-ontelossa palo leviää ensin pienemmän virtausvastuksen reittiä sekundääräkannattimien suunnassa syttymiskohdasta kohti harjaa. Kannattimien päältä ja alta leviävät kuumat kaasut levittävät paloa myös sivusuunnassa (kohtisuora suunta räystäsharja -suuntaan nähden), mutta ennen kuin palo saavuttaa harjarakenteiden muodostaman ontelotilan virtausvastusta suuremman vastuksen, tämä leviäminen on varsin vähäistä. Sen jälkeen, kun palo on saavuttanut katon harjan, leviäminen sivusuunnassa voimistuu. Sivusuunnassa leviävä palo alkaa levitä myös alaspäin kohti räystästä.

Sivusuunnassa palo etenee niin kauan, kunnes se kohtaa jonkin esteen, esim. palokatkon. Jos palokatkoja ei ole tai ne toimivat puutteellisesti, ensimmäinen este on katteen yläpuolelle ulottuva osastoiva seinä tai räystäshallin päädyssä. Tässä tapauksessa vahingoista tulee yleensä suuria.

Jos peltikatteeseen syntyy rakoja, osa ontelossa olevista kuumista kaasuista pääsee tuuletumaan ulos, ontelon lämpötila ja palamisen kohdalla vallitseva ylipaine alenevat ja ontelossa tapahtuva palon leviäminen hidastuu. Jos palava-aineiseen katteeseen palaa reikä, käy samalla tavoin, mutta palo lähtee etenemään ontelotilan lisäksi myös katteen pinnalla. Jälkimmäistä tilannetta tarkastellaan lähemmin tuonnempana.

Tuuli vaikuttaa katto-ontelon paloon. Kun palo on alkanut levitä, se suuntautuu kohti harjaa. Jos tuuli puhaltaa räystään suunnasta päin, se nopeuttaa palon leviämistä harjalle. Voidaan arvioida, että sivuttaissuuntaiseen palon leviämiseen heikko tai kohtalainen tuuli ei vaikuta oleellisesti, mutta jos räystään suunnalta tuleva tuuli on navakka tai sitä voimakkaampi, se lisää palon voimakkuutta. Samoin harjalta kohti räystästä suuntautuva palon leviäminen hidastuu tuulen vaikutuksesta, kun tuulen nopeus on kohtalaista tuulta suurempi. Harjan suunnalta puhaltava voimakas tuuli voi hidastaa palon leviämistä harjaa kohti, mikä voimistaa palon leviämistä sivusuunnassa ja alaspäin, heikompi tuuli ei harjarakenteiden vuoksi pääse vaikuttamaan oleellisesti palon leviämiseen. Rakennuksen pituussuuntainen tuuli painaa liekkejä tuulen suuntaan, mutta jos katto on jaettu osiin tätä suuntaa vastaan kohtisuorilla katkoilla vaikutus ei ole kovin suuri.

Olosuhteissa, joissa tuulen vaikutus on vähäinen, palon leviää alussa, sen edetessä kohti räystästä on noin 2–3 metriä minuutin aikana. Kun palorintaman eteneminen harjalla suuntautuu sivulle ja alaspäin, eteneminen hidastuu noin puoleen<sup>44</sup>. Aika, joka kuluu siitä, kun syttymä on vakiintunut ontelossa (esim. puutavara syttynyt räystäällä), siihen, kun palo alkaa levitä nopeasti, on vain pari minuuttia, joten paloturvallisuustarkasteluisa sen pituus voidaan olettaa nolllaksi ja lähteä siis siitä, että onteloon päässyt palo alkaa levitä käytännöllisesti katsoen välittömästi.

Palokatkot hidastavat palon leviämisestä kahdella tavalla: ne toimivat fyysisenä esteenä liekkien, savun ja kuumien kaasujen etenemiselle ja tämän lisäksi ne rajoittavat myös palon saamaa happimäärää, mikä pienentää palon voimakkuutta ja siten hidastaa palon leviämistä ja alentaa tilan lämpötiloja. Näistä edellä mainittu tekijä on paloturvallisuuden kannalta tärkeämpi, mutta laskennallisesti saatujen tulosten perusteella myös jälkimmäinen tekijä on merkittävä.

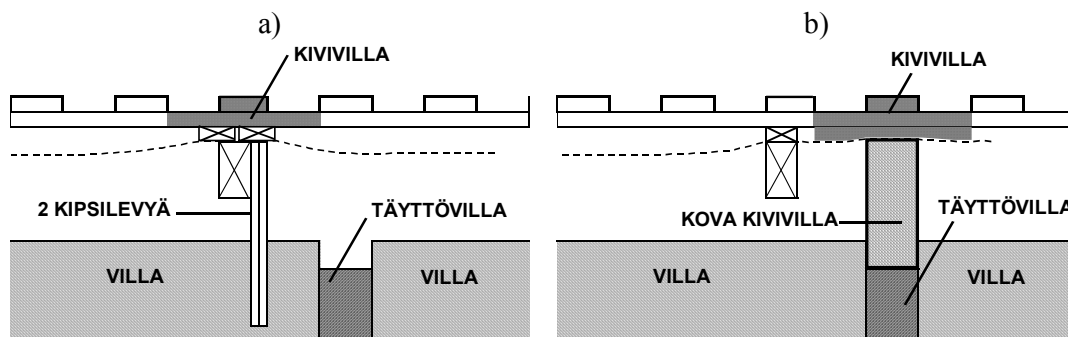
---

<sup>44</sup> Jyrkällä katolla palo leviää alaspäin hitaammin kuin sivusuunnassa. Jatkossa kuitenkin tarkastellaan loivaa kattoa, jossa sivusuuntainen ja alaspäin etenevä palon leviäminen tapahtuu oleellisesti samalla tavalla.

## 7.2.4 Osiin jakavat rakenteet

Seuraavat tarkastelut perustuvat sellaiseen palokatkojen sijoitusjärjestelyyn, jossa katto on katkaistu koko harjan matkalta. Muut katkot asennetaan kohtisuoraan suuntaan tätä katkoa vastaan eli räystääs-harja-linjan suuntaisesti. Lapetta ei katkaista harjan suuntaisille palokatkoilla, koska ne katkaisivat katon tuuletuksen räystäältä harjalle. Tämä tarkoittaa sitä, että palon aikana palo pääsee leviämään harjalle asti, mutta ei sen yli. Kun palon eteneminen sivuttain on katkaistu, lappeesta tuhoutuu palossa todennäköisesti räystäältä harjalle ulottuva palokatkojen välimatkan levyinen kaista. Lappeelle asennettavilla harjan suuntaisilla palokatkoilla tämä kaista saataisiin katkaistua pienemmäksi, mutta siitä seuraisi merkittävä kosteusvaurioriskin kasvu.

Tarkastellun hallin tyyppisissä kohteissa osiin jakavien rakenteiden toteutus vastaa periaatteelta luvussa 3 tarkasteltuja rivitalon osastoivien seinien ja niiden liittymien ratkaisuja. Myös palonkeston luokkavaatimukset voivat olla samat, EI 30, vaikka RakMK:n osa E1 mainitsee osiin jakamiseen liittyen luokituksen EI 15. Ontelopalon ankaruuden huomioon ottaen EI 30 on suositeltava luokitus. Elementtikatossa, joka tarkastellussa kohteessakin on, palokatkot asennetaan tyypillisesti elementtien liittymäkohtaan. Alla olevassa kuvassa 73 on esitetty kaaviollisesti kaksi tyypillistä lappeen suunnassa kulkevaa palokattorakennetta. Niistä kipsilevyillä toteutettu on tiiviimpi kaasujen vuotamista vastaan. Lisäksi se ilmeisesti on rakenteellisesti tukevampi. Tällaisten katkorakenteiden kustannuksiksi voidaan arvioida 20–30 euroa/m.



Kuva 73. a) Kipsilevyillä ja b) villalla toteutetut EI30-luokan palokatkot.

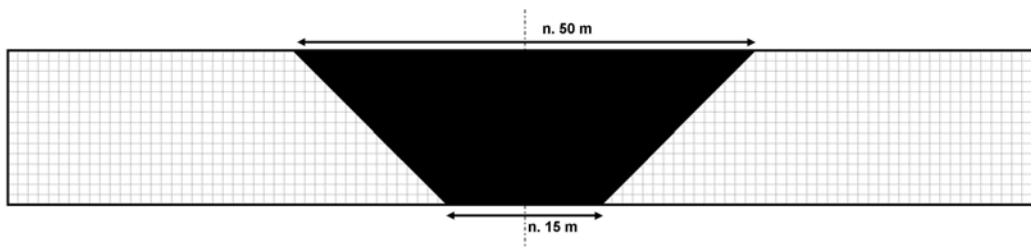
## 7.2.5 Osiin jakamisen vaikutus palon leviämiseen ja palovahinkoihin

Alla esitettävät arviot sisältävät vain katolle koituvat vahingot edellä esitettyjen yksikövahinkoarvojen valossa. Palokunnan toiminnan on arvioitu olevan seuraavanlainen: Palokunta saapuu paikalle tyypillisen toimintavalmiusaikajakauman kuvaamalla tavalla (Tillander & Keski-Rahkonen 2000). Tarkastellaan varmuuden vuoksi jakauman loppu-



päättä ja oletetaan tämän perusteella, että palokunta saapuu paikalle noin 20 minuutin kuluttua hälytyksestä. Tyypillisessä, esim. tulitöistä aiheutuneessa palossa hälytyksen voidaan arvioida tapahtuvan samoihin aikoihin, kun palo ontelossa alkaa (tulityön tekijät hälyttävät palokunnan paikalle, kun he havaitsevat alkusammutuksen epäonnistuneen). Aina ei toki ole näin, mutta jatkossa keskitytään tähän tapahtumien kulkuun. Palomiesten oletetaan saapuvan katolle noin 10 minuutissa palopaikalle saapumisensa jälkeen. Tästä hetkestä oletetaan menevän vielä noin 10–15 minuuttia siihen, kun rajoituslinja saadaan auki. Jos kattoa ei ole jaettu osiin, sen leviäminen päättyy vasta tällöin, 40–45 minuuttia palon alkamisen jälkeen.

Tarkastellaan palovahinkoja ensin tapauksessa, jossa kattoa ei ole jaettu osiin palokatkoilla. Tämä tarkastelu tehdään siksi, että se antaa vertailukohtan osiin jaettujen kattojen paloissa syntyville omaisuusvahingoille. Hetkellä, jolloin palokunta saapuu katolle eli noin puolen tunnin kuluttua palon alkamisesta, palon laajuus on noin  $450 \text{ m}^2$  (Kuva 74). Edellä kuvatulla tavalla palon voidaan arvioida leviävän vielä tämän jälkeen noin 10–15 minuuttia, ennen kuin palokunta saa leviämisen katkaistua. Tällöin palon laajuus on noin  $750\text{--}900 \text{ m}^2$ , joka vastaa noin 100 000–120 000 euron vahinkoa. Vahinko voi olla suurempikin, aina koko katon tuhoutumiseen asti, koska palokunnalla on vastassaan hyvin suureksi päässyt palo, jota ei kaikissa tapauksissa saada hallintaan.

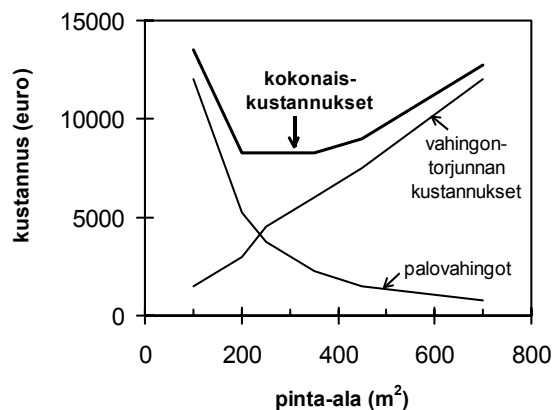


*Kuva 74. Kattopalon laajuus noin puolen tunnin palon jälkeen. Osiin jakamaton katto.*

Kun katto-ontelo on jaettu osiin tehokkailla palokatkoilla, palon leviäminen pysähtyy niihin. Jos palokunta on paikalla edellä kuvatulla tavalla, on epätodennäköistä, että palo leviää palokatkon toiselle puolelle ja palokatkojen määräämä pinta-ala muodostuu palon lopulliseksi laajuudeksi.

Jos katto-ontelo on katkottu esimerkiksi  $400 \text{ m}^2$  suuruisiin pinta-aloihin, todennäköinen kattovaurio vastaa noin 60 000 euron vahinkoa. Esimerkkirakennuksemme tapauksessa yleisen käytännön mukainen osiin jakaminen siis vähintään puolittaa kattovahingot verrattuna katkomattomaan kattoon. Jos osiin jakaminen toteutettaisiin esim.  $200 \text{ m}^2$ :n jaon mukaan, niin vahingot putoaisivat 30 000 euroon.

Seuraavassa osassa (kohta 7.3) tarkastellaan tilastotietoja teollisuushallien kattopaloista. Eräs tulos on, että 3 000 m<sup>2</sup>:n kokoiselle hallille kattopalon tapahtumisen todennäköisyys rakennuksen elinkaaren aikana on noin 0,1. Yhdistämällä tämä luku edellä esitettyihin yhtä paloa koskeviin lukuihin saadaan seuraavat karkeat<sup>45</sup> arviot elinkaaren aikaisille kattopalovahingoille: osiin jakamattomassa tapauksessa vahingot ovat 10 000–12 000 euroa sekä 400 m<sup>2</sup>:n ja 200 m<sup>2</sup>:n osiinjaolla 6 000 euroa ja 3000 euroa. Noudattaen tämän osan alussa esitettyä palokatkojärjestelyä 400 m<sup>2</sup>:n pinta-alajako vastaa palokatkojen asentamista 24 m välein (6:lla jaollinen luku on valittu, koska se sopii yhteen hallien muiden jakojen kanssa). Sadan metrin matkalle tarvitaan 3 palokatkolinjaa, joiden pituus on noin 15 m. Yhteensä 400 m<sup>2</sup>:n jaossa yhteen lappeeseen pitää siis tehdä palokatkoja 3 × 15 m = 45 m ja koko kattoon 90 m, mikä yksikkökustannuksilla 20–30 euroa/m vastaa noin 2 000–3 000 euron kustannuksia. 200 m<sup>2</sup>:n suuruisella osiinjaolla vastaava luku on 105 m/lape eli 210 m/katto (jakona 12 m), mikä vastaa noin 4 000–6 000 euron kustannuksia. Vastaavalla tavalla voidaan laskea myös muun kokoisia jakoja vastaavat palovahingot ja palokatkojen asennuskustannukset. Näin saadaan muodostettua alla esitetty kaavio (Kuva 75) tarkastellun teollisuushallin katon odotettavissa olevista palovahingoista, niiden torjumiskustannuksista palokatkojen avulla ja näistä kahdesta kustannuserästä muodostuvista kokonaiskustannuksista. Kokonaiskustannukset ovat pienimmillään noin 200 m<sup>2</sup>:n ja 400 m<sup>2</sup> suuruisen jakamispinta-alan välissä. Käytännössä tässä tapauksessa siis noin 400 m<sup>2</sup>:n jako on taloudelliselta kannalta suositeltava.



Kuva 75. Tarkastellun teollisuushallin katon ontelopalon arvioidut kustannukset ja niiden jakautuminen itse palovahingon ja sen torjunnan aiheuttamiin kustannuksiin.

<sup>45</sup> Esimerkkirakennuksesta tarkasteltiin tyypillistä kattopaloa, mutta ei kaikkia kattopalon mahdollisia variaatioita ja siksi lukuihin liittyy epävarmuutta. Eri osinjakamisratkaisujen suhteelliseen vertailuun liittyy kuitenkin vähemmän epävarmuutta kuin absoluuttisiin lukuihin.

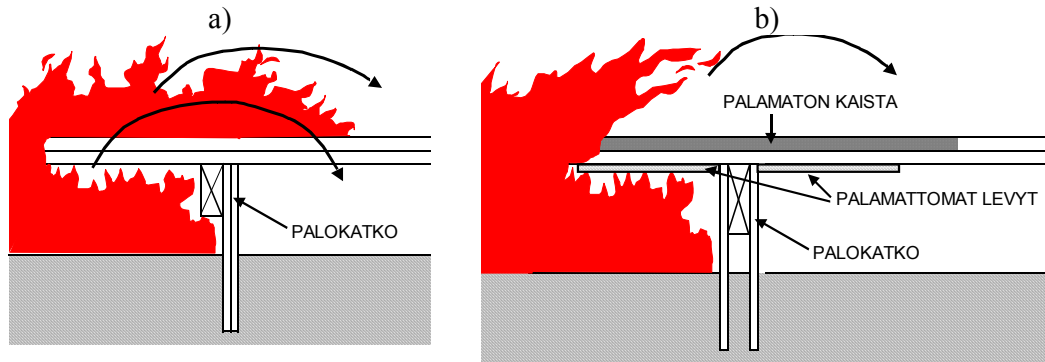
## 7.2.6 Bitumikermikaton osiin jakamisesta

Edellä tarkasteltiin tuuletetun peltikaton osiin jakamista. Seuraavassa tarkastellaan, miten tilanne muuttuisi, jos katteena olisi bitumikermikate. Katon ontelopalon kannalta yksi olennainen ero peltikattoon verrattuna on se, että bitumikermikatossa ontelopalo voi polttaa katteen puhki, jolloin palo voi sytyttää katteen. Esimerkiksi 22 mm aluslaudoitusta käytettäessä laudat palavat ontelopalorasituksessa puhki alle 20 minuutissa, minkä jälkeen palo voi alkaa levitä katteella. Toisaalta myös katteen syttyminen voi johtaa ontelopaloon, kun tuli pääsee katteen alapuolelle. Palon leviäminen bitumikermikatteen päällä voi olla varsin nopeaa, etenkin silloin, jos tuuli edesauttaa palon leviämistä.

Koska palo leviää bitumikermikattorakenteessa nopeasti katteen päällä, katsotaan usein, että katteen alla olevan ontelon katkominen ontelon sisällä olevalla rakenteella on niin tehoton ratkaisu, että sen hyödyllisyys on kyseenalainen. Osastoivien seinien kohdalla katto katkaistaankin jatkamalla osastoiva rakenne reilusti katteen yläpuolelle (Kallioniemi & Miettinen 1996). Osiin jakamisessa tällaiset rakenteet voisivat kuitenkin johtaa muiden rakennusteknisten ominaisuuksien heikkenemiseen ja niiden kustannusvaikutus olisi merkittävä.

Paloa levittävän katteen alapuolisen ontelon katkomisongelma on samankaltainen kuin palavan julkisivun takana olevan tuuletusraon katkomisongelma: vaikka ontelo katkaistaan, palo voi levitä sitä rajoittavan materiaalin pinnalla. Julkisivujen kohdalla on kuitenkin nähty tarpeelliseksi myös siihen liittyvän ontelon, tuuletusraon, katkaiseminen. Ajatuksena on se, että palo voi levitä tuuletusraossa selvästi nopeammin kuin pinnalla ja siksi tuuletusraossa leviävän palon katkaiseminen tuo mukanaan merkittävän paloturvallisuuslisän. Tämä pätee myös katto-ontelopaloissa. Lisäksi palon leviäminen piilossa julkisivun takana tulee ehkäistyksi. Näitä periaatteita voidaan soveltaa myös palavalla aineella katetun kattorakenteen kohdalla.

Jos katteen alapuolisessa ontelossa ei pala, on palon leviäminen katteen päällä selvästi hitaampaa kuin siinä tapauksessa, että myös ontelossa palaa.



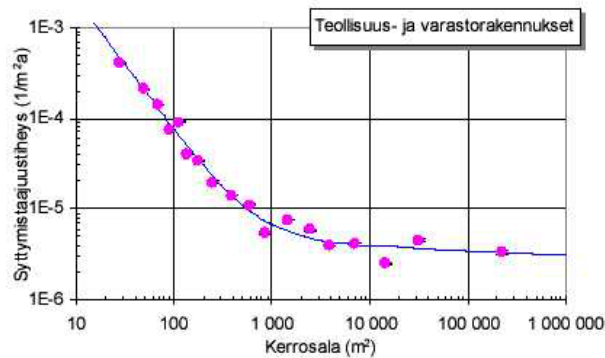
Kuva 76. a) Palon leviäminen palokatkon yli pinnalla sekä ontelossa. Katkorakenne on kaaviollinen esitys eräästä käytännössä sovellettavasta rakenteesta. b) Keino katkaisuta/hidastaa ontelossa leviävä palo: 1) Katteeseen tehtävä palamaton kaista estää katteen palamisen puhki katkon kohdalla ylhäältä päin. 2) Aluslaudoitusta suojaavat palamattomat levyt hidastavat katerakennetta alhaaltapäin. 3) Kun palokatkon kipsilevyt asennetaan molemmin puolin kannatinta, ne suojaavat sitä hiiltymiseltä ja palamisen alkamiselta.

Tuuletusraossa leviävän palon tavoin katto-ontelossa ja katteen pinnalla leviävä palo voi ohittaa palokatkon yläpuolelta (Kuva 76) siten, että palo pääsee etenemään myös katkon toisella puolella sekä ontelossa että pinnalla. Palo pääsee tunkeutumaan myös katkon takana olevaan onteloon, koska katkon kohdalla olevat liekit vähitellen polttavat katteen ja aluslaudoituksen puhki. Jos katteen palaminen katkon kohdalla estetään ja aluslaudoitus suojataan, katteen ja sen alusrakenteen puhki palaminen hidastuu merkittävästi tai voi jopa estyä. Katteen palamattoman kaistan leveyden tulee olla riittävän suuri, jotta se samalla hidastaa tuntuvasti pinnalla etenevää paloa. Jos palo jatkuu riittävän kauan, tällainen rakenne pettää: palon puolella aluslaudoitus palaa puhki ja kannatinkin voi pettää. Ajatuksena ei olekaan palon täydellinen pysäyttäminen osiin jakavaan rakenteeseen, vaan sama kuin tuuletusraon katkaisemisessa eli se, että rakenne toimii riittävän tehokkaana palokatkona. Tällöin toteutuu RakMK osan E1 kohdan 7.6.1 vaatimus siitä, että palon leviämisen vaara ei olennaisesti kasva katto-ontelon johdosta. Tässä tapauksessa riittävä palon pidättäminen vastaa ajallisesti sitä aikaa, joka kuluu palokunnan sammuustoimien alkamiseen.

## 7.3 Katto-ontelon osiin jaon merkitys tilastotietojen valossa

### 7.3.1 Teollisuushallien tulipalojen todennäköisyys

Suomessa on noin 35 000 teollisuusrakennusta (Tillander & Keski-Rahkonen 2001). Perustuen PRONTO-tietokantaan vuosina 1966–1999 kirjattuihin tapauksiin<sup>46</sup>, teollisuusrakennuksissa tapahtuu vuosittain noin 300 tulipaloa (Tillander & Keski-Rahkonen 2001). Teollisuus- ja varastorakennuksissa syttymistäajuustiheys riippuu rakennuksen pinta-alasta kuvassa 77.



Kuva 77. Syttymistäajuustiheyden riippuvuus rakennuksen pinta-alasta teollisuus- ja varastorakennuksissa (Tillander & Keski-Rahkonen 2001).

Tarkastellaan esimerkiksi 3 000 m<sup>2</sup>:n kokoista teollisuushallia. Yllä olevasta kuvasta voidaan lukea tätä pinta-alaa vastaavan syttymistäajuustiheyden olevan  $4 \cdot 10^{-6}$  tulipaloa/m<sup>2</sup>/vuosi. Kertomalla tämä luku rakennuksen pinta-alalla saadaan arvio  $p_1 = 0,012$  ko. rakennuksen syttymistäajuudelle. Käännettynä tämä syttymistäajuuden arvo merkitsee sitä, että yhden vuoden tarkasteluaikana tämän kokoisista teollisuushalleista keskimäärin yhdessä 83:sta syttyy sellainen tulipalo, että se tulee kirjatuksi PRONTO-järjestelmään eli palokunta kutsutaan paikalle. Todennäköisyys, että ko. rakennus joutuu koko elinkaarensa aikana tällaisen palon uhriksi on  $p_N = 1 - (1 - p_1)^N$ , missä  $N$  on rakennuksen elinkaaren kesto vuosissa. Eräs varsin yleisesti käytetty arvo rakennusten elinkaaren pituudelle on 50 vuotta. Käyttäen arvoa  $N = 50$  saadaan em. todennäköisyydelle arvo 0,45, mikä merkitsee sitä, että lähes joka toisessa tämänkokoisessa

<sup>46</sup> PRONTO-tietokanta perustuu palokuntien antamiin tietoihin, minkä vuoksi tapaukset, joihin palokuntaa ei ole hälytetty, eivät siihen ole kirjattu.

teollisuushallissa sattuu sellainen tulipalo, että palokunta kutsutaan paikalle. Tuhannen neliön hallille vastaava arvo on 0,29 ja 5 000 m<sup>2</sup>:n hallille 0,63.

Vaara henkilövahinkojen syntymiseen teollisuushallien paloissa on pieni verrattuna muiden käyttötapaluokkien rakennuksiin: Tillanderin ym. raportin (Tillander 2002) mukaan kaikista teollisuus- ja varastorakennuksissa kuolemaan johtaneiden tulipalojen prosentuaalinen osuus kaikista rakennuspaloista, on 0,2 %. Asuinrakennuksille tämä osuus on noin 3 % eli 15-kertainen ja muille kuin näihin rakennusluokkiin kuuluville 0,5 % eli 2,5-kertainen teollisuusrakennuksiin verrattuna. Teollisuushallien kattopaloissa henkilövahinkojen vaara on vielä selvästi pienempi kuin kaikissa teollisuushallien paloissa: yleensä henkilövahingot syntyvät palon alkuvaiheessa rakennuksen sisätuloissa, joista uhrit eivät ole ehtineet poistumaan tarpeeksi nopeasti.

### 7.3.2 Tilastotietoja teollisuushallien kattopaloista

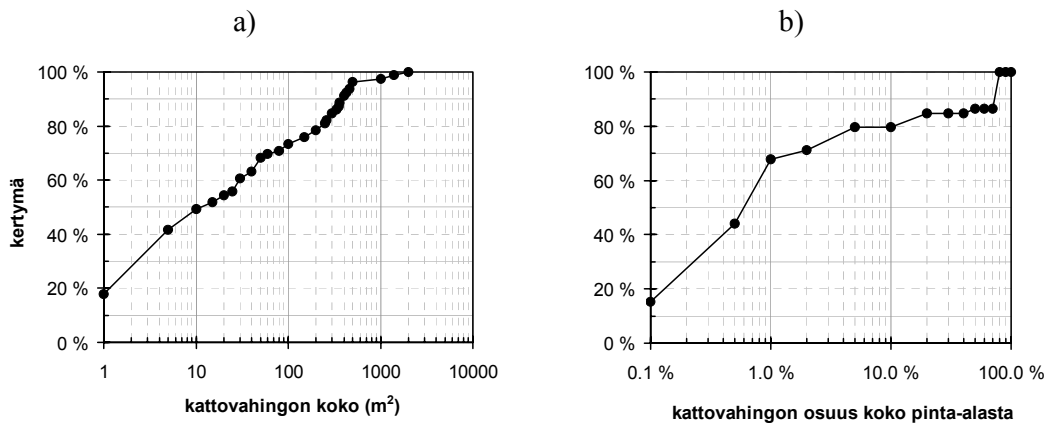
Teollisuushallien paloja kirjattiin vuosina 1996–2001 PRONTO-tietokantaa noin 1 120 kappaletta eli noin 190 paloa/vuosi. Näistä noin 20–25 % oli paloja, joissa rakennuksen katto osallistui paloon. Kattopalot voidaan alkuperänsä perusteella jakaa seuraaviin kolmeen kategoriaan,

- Katolla alkavat palot. Tärkeimpiä katolla alkavien palojen syitä ovat tulityöt ja katon läpäisevien kuumenneiden hormien ja putkien aiheuttama syttyminen. Osuus kattopaloista hieman alle 50 %.
- Katolle rakennuksen sisälle syttyneestä palosta levinnyt tulipalo. Näiden palojen syttymissyöt ovat varsin vaihtelevia; eräs tärkeä syyloikka on koneiden ja laitteiden syttyminen. Osuus kattopaloista vajaa kolmannes.
- Katolle rakennuksen ulkoseinää pitkin levinneet tulipalot. Tärkeimpinä ulkoseinän syttymissyitä ovat tulityöt ja seinän läpi kulkevien hormien ja putkien aiheuttama syttyminen. Osuus kattopaloista noin 20 %.

Tarkastelukohteessa, 3 000 m<sup>2</sup>:n suuruudessa teollisuushallissa, kattopalon todennäköisyys rakennuksen elinkaaren (50 v) aikana on siis  $0,45 \times (0,2, \dots, 0,25) = 0,09, \dots, 0,11 \approx 0,10$ . Kymmenestä hallista siis yhden katto palaa. Tuhannen neliön ja 5 000 m<sup>2</sup>:n hallille vastaavat luvut ovat 0,04 ja 0,14.

Kattopaloissa ei PRONTO-aineiston tarkasteluaikana 1996–2001 kuollut ketään. Seitsemän henkilön raportoitiin loukkaantuneen: ilmeisesti näistä tapauksista yksi, sammuttajan putoaminen, liittyi varsinaisesti kattopaloon, muut johtuivat räjähdyksistä, jotka tapahtuivat palon alkuvaiheissa ennen kuin se oli levinnyt katolle.

Kattopaloit ovat merkittäviä omaisuusvahinkojen kannalta: vaikka niistä monet saadaankin hallintaan varsin pieninä, merkittävä osa leviää tuhoten jopa koko katon, ks. Kuva 78. Jakaumista nähdään, että noin viidennes kattopaloista ei oleellisesti leviä lainkaan syttymispaikalta, ne vahingoittavat vain syttymispaikan välitöntä ympäristöä. Tähän on usein syynä se, ne saadaan taltutettua alkusammutuksen avulla; näin on asianlaita etenkin tulitöistä alkaneissa paloissa. Noin puolet kattopaloista rajoittuu alle 10 m<sup>2</sup>:n. Noin viidennes paloista kasvaa satojen neliömetrien suuruisiksi ja noin 15 %:ssa kattopaloista tuhoutuu koko katto.



Kuva 78. Kattopalojen suuruus. a) Vaurioitunut kattopinta-ala (tietoarvojen lukumäärä  $N = 79$ ). b) Vaurioituneen kattopinta-alan osuus koko rakennuksen pinta-alasta ( $N = 59$ ). Lähde PRONTO-tietokanta, teollisuushallipalot 1996–2001.

Pelkästään katon palamisen aiheuttamista kustannuksista PRONTO-tietokannassa on löydettävissä vain vähän tietoa. Eräs syy tähän on se, että useimmissa palotapauksissa, joissa katto on ollut tullessa, on tuhoutunut muutakin omaisuutta. Toisaalta PRONTO-tietokannassa vahinkomerkitöjä on varsin vähän (esim. rakennusvahingot on merkitty n. 50 %:ssa tapauksista) ja vielä harvemmin on kirjattu yhtäaikaaisesti vahingot ja kattovahingon koko. Kaikkiaan löydettiin neljä kappaletta paloja, joissa rakennusvahingot pääasiallisesti olivat aiheutuneet katon vaurioitumisesta. Näissä neljässä tapauksessa tuhoutuneet alat ja rakennusvahinkosummat esitetään alla olevassa taulukossa 9. Nähdään, että nämä yksikkökustannukset ovat välillä 50–150 euroa/m<sup>2</sup>, keskiarvo on noin 110 euroa/m<sup>2</sup>. Tämä tulos on laskettu lähinnä mielenkiinnon vuoksi: kun sitä verrataan edellä tietyille peltikattorakenteelle laskettuihin arvoihin, nähdään, että Prontosta saatu tulos on pienempi, mutta osoittaa kuitenkin suuruusluokan, yli 100 euroa/m<sup>2</sup>.

Taulukko 9. PRONTO-tietokannasta löydettyä tietoa koskien kattopalon pelkästään katon palamisesta aiheutuvia kustannuksia.

Kattovahingon koko (m <sup>2</sup> )	Rakennusvahinko (euro)	Rakennusvahinko / kattovahingon koko (euro/m <sup>2</sup> )
6	841	140
80	11 773	147
400	20 183	50
2 000	218 644	109

### 7.3.3 Kohderakennuksen kaltaisen teollisuushallin keskimääräinen kattovahinko tilastojen perusteella

Yllä esitettyä laajuuden jakaumaa (Kuva 78) voidaan kohderakennukselle tarkastella seuraavan viiden eri vahingon laajuuden luokan avulla:  $-1 \text{ m}^2$ ,  $1-10 \text{ m}^2$ ,  $10-100 \text{ m}^2$ ,  $100-1\,500 \text{ m}^2$  ja  $1\,500-3\,000 \text{ m}^2$ . Näille kokoluokille voidaan edellä esitettyjen kattovaurion yksikkökustannusten perusteella arvioida seuraavat yksikkökustannukset:  $300-400$ <sup>47</sup>,  $200-250$ ,  $150-200$ ,  $100-150$  ja  $100-150$  euroa/m<sup>2</sup>.

Yhtä kattopaloa kohden odotettavissa olevat katon vaurioitumisesta aiheutuvat suorat kustannukset voidaan arvioida eri kokoluokkien kustannusten (yksikkökustannus (euro/m<sup>2</sup>)  $\times$  luokan pinta-ala (m<sup>2</sup>)) summana, kun summaus lasketaan luokkien suhteellisella osuudella painotettuna. Laskussa tarvittavat tiedot on koottu alla olevaan taulukkoon 10. Tuloksena saadaan arvio  $80\,000 - 120\,000$  euroa per kattopalo. Tuhannen neliön hallille vastaava luku on noin  $30\,000 - 40\,000$  euroa ja  $5\,000 \text{ m}^2$ :n hallille noin  $400\,000 - 600\,000$  euroa.

Tietylle tarkastellun kokoiselle teollisuushallille sen elinkaaren aikana odotettavissa olevat kattopaloista aiheutuvat suorat omaisuusvahingot voidaan arvioida kertomalla yhtä kattopaloa kohden lasketut kustannukset kattopalon todennäköisyydellä elinkaaren aikana (0,1). Näin saadaan tulos, että noin  $3\,000 \text{ m}^2$ :n suuruudessa teollisuushallissa keskimääräinen tilastotietojen mukaan odotettavissa oleva kattopalojen aiheuttamien suorien omaisuusvahinkojen suuruus on noin  $10\,000$  euroa. Tuhannen neliön hallille vastaa-

---

<sup>47</sup> Tulos ei ole lainkaan herkkä näille  $1 \text{ m}^2$ :n vauriota vastaaville vahinkoarvioille. Siksi niiden suuruus voi vaihdella hyvin paljon ilman, että sillä on vaikutusta tulokseen.



va luku on noin  $0,04 \times 35\,000 \approx 1\,400$  euroa ja  $5\,000\text{ m}^2$ :n hallille noin  $0,14 \times 500\,000 \approx 70\,000$ .

Tilastotietojen valossa kattopalon vahingot kasvavat voimakkaasti rakennuksen koon kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että tilastoissa hyvin suurten kattopalojen, jopa koko katon tuhoavien palojen, osuus on merkittävän suuri. Vaikka tulos koskeekin kaikkia kattotyyppejä, ei pelkästään ontelorakenteisia kattoja, on sillä merkitystä myös ontelorakenteisten kattojen osiin jakamisen suhteen: jos katto jaetaan osiin tehokkailla palokatkoilla, etenkin suurissa halleissa kattopalovahingot pienevät voimakkaasti. Esimerkiksi  $5\,000\text{ m}^2$  suuruudessa 10 % pudotus laajojen kattopalojen suhteellisessa määrässä voisi pudottaa kattopalovahingot yhteen neljäsosaan.

*Taulukko 10. Yhden kattopalon keskimääräisten katon vaurioitumisesta aiheutuvien suorien omaisuusvahinkojen arviointi.*

Vahingon pinta-alaluokka (m <sup>2</sup> )	Vahingon yksikkökustannukset (euro/m <sup>2</sup> )	Luokan suhteellinen osuus	Kustannukset (euro)	Kuokan osuus kustannuksiin (1000 euro)
–1	300–400	7 %	300	0,02–0,03
1–10	200–250	24 %	2 000	0,48–0,60
10–100	150–200	32 %	15 000	4,8–6,4
100–1 500	100–150	22 %	150 000	33–50
1 500–3 000	100–150	15 %	300 000	45–68
<b>3 000 m<sup>2</sup>:n teollisuushallin kattopalon kattovahingon odotusarvo:</b>				<b>80–120</b>

## 7.4 Päätelmät

Peltikaton tapauksessa teollisuushallin tuulettuvan katto-ontelon osiin jakaminen vähentää katon palovahinkoihin liittyviä kokonaiskustannuksia. Optimaalinen osiin jakamisen koko riippuu tapauksesta. Tässä työssä tarkastellun teollisuushallin tapauksessa taloudelliselta kannalta suositeltava jakopinta-ala osoittautui olevan noin  $400\text{ m}^2$ . Kyseinen halli on kooltaan ja kattoratkaisultaan varsin tyypillinen ja tätä tulosta voidaan soveltaa myös muissa rakenteeltaan ja kokoluokaltaan vastaavissa teollisuushalleissa. Osiin jakavien palokatkorakenteiden palonkeston tulisi täyttää luokan EI 30 vaatimukset.

Bitumikermikate voi levittää paloa katteen pinnalla, minkä vuoksi katto-ontelon katkaisemisella ei voida kokonaan estää palon leviämistä. Se kuitenkin voidaan estää, että katto-ontelo ei tässä tapauksessa olennaisesti lisää palon leviämisen vaaraa. Tähän vaaditaan tyypillisten osiin jakavien katto-onteloiden palokatkojen lisäksi myös katteen ja sen aluslaudoituksen suunnattuja toimenpiteitä: katkon kohdalla katteen pala-

minen tulee estää riittävän leveältä kaistalta ja aluslaudoitus on suojattava palolta. Tällaiset palokatkoratkaisut muodostuvat kalliimmiksi kuin peltikatonle soveltuvat ratkaisut ja siksi osiin jakamisen taloudellinen optimikoko voi poiketa peltikattotapauksesta. Palorasituksen ankaruus puoltaa tässäkin tapauksessa EI 30 -luokan rakenteita.

Harkittaessa teollisuushallin kattojen osiin jakamisen vaatimusten asettamista, tulee taloudellisten kysymysten lisäksi tarkasteltavaksi myös muut paloturvallisuustavoitteet. Tässä mielessä osiin jakamisen kokoa tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon teollisuushallin palovaarallisuuden 3 perustekijää: rakennuksen paloluokka, palovaarallisuusluokka ja suojaustaso.

Rakennuksen paloluokka liittyy olennaisesti siihen, miten rakennuksen kantavat rakenteet säilyttävät kantokykynsä palon aikana. Tässä tutkimuksessa tarkasteltavien teollisuushallien tuulettuvien kattorakenteiden tapauksessa osiin jakamisen vaikutus rakennuksen kantavien rakenteiden kantokykyyn on pieni sinä aikana, jonka osiin jakavat rakenteet säilyttävät toimintansa. Siksi näiden rakennusten tapauksessa osiin jakamisen kokoa ei tarvitse liittää rakennuksen paloluokkaan. Tämä vastaa myös RakMK osan EI osiin jakoa koskevien kohtien 5.2.2 ja 7.6.1 yleistä lähestymistapaa: osiin jakamista koskevat vaatimukset eivät riipu paloluokasta.

Teollisuushallit, joiden toiminta edellyttää tuulettuvan ontelollisen kattorakenteen valintaa, toimivat usein puunjalostuksen piirissä: juuri puusta sen kuivuessa vapautuva kosteus vaatii kattoon tuuletusontelon. Tällaisissa kohteissa on herkästi syttyvää palokuormaa (puutuotteita ja niiden valmistamissa syntynyttä haketta, purua, lastuja, yms. sekä runsaasti pölyä). Siksi ne kuuluvat palovaarallisuusluokkaan 2. Suurin palovaara liittyy rakennuksen sisällä tapahtuviin syttymiseen. Kuten luvun johdannossa mainittiin, näissä paloissa katon osiin jakamisella ei välttämättä ole olennaista roolia omaisuusvahinkojen vähentämisessä. Palokunnan toimia se kylläkin helpottaa näissäkin paloissa. Tärkein kattoon liittyvä seikka ei olekaan sisällä tapahtuvat syttymiset, vaan se, että em. teollisuuslaitoksissa syttymisiä tapahtuu sangen usein myös rakennuksen ulkopuolella, usein etenkin katolla, jossa esim. purunkuljettimet ja niihin kertynyt puupöly voivat aiheuttaa paloja. Myös rakennuksen läheisyydessä syttyvät puutavarat, hakekasat, yms. voivat palaessaan levittää palon räystään kautta katto-onteloon. Katto-onteloon voi myös olla kertynyt pölyä, joka lisää palon leviämisen voimakkuutta. Nämä ovat puualalla toimivia halleja koskevia esimerkkejä, mutta vastaavanlaisia erityisuhkia esiintyy muissakin palovaarallisuusluokan 2 teollisuushalleissa. Näissä kohonneen riskin kohteiden paloissa palokunnat kohtaavat usein odottamattomia ongelmia ja vaaroja<sup>48</sup> ja siksi katon palamiseen liittyvien

---

<sup>48</sup> Lähteenä mm. PRONTO-tietokannan teollisuuspaloja koskevien ilmoitusten suulliset kuvaukset syttymisen syystä, onnettomuuden kulusta ja palokunnan toimista.

ongelmien lievittäminen tehokkaalla osiin jaolla on paikallaan. Siksi osiin jakamisen pinta-alojen liittäminen paloturvallisuusluokkaan on perusteltua.

Eräs suojaustasojen 1 sekä 2 ja 3 ero on se, että suojaustasoon 1 ei sisälly automaattisia paloilmittimia, mutta suojaustasoihin 2 ja 3 ne kuuluvat. Nämä laitteet parantavat rakennusten sisätilojen paloturvallisuutta. Jos sisätiloissa oleva palo leviää katolle, pääsee palokunta suojaustason 1 rakennuksissa aloittamaan katon sammutuksen keskimäärin myöhemmin kuin suojaustason 2 tai 3 rakennuksissa. Palokunnan toimien kannalta onkin perusteltua, että suojausluokan 1 rakennusten katto-onteloihin osiin jakaminen suoritetaan tehokkaammin suojausluokkien 2 ja 3 rakennuksissa.

Yhteenvetona osiin jakamisen pinta-alasta voidaan siis todeta, että tämä pinta-ala on perusteltua liittää rakennuksen paloturvallisuusluokkaan ja suojelutasoon siten, että paloturvallisuusluokassa 1 suojelutasoilla 2 ja 3 osiin jako voi olla pinta-alaltaan suurempi kuin paloturvallisuusluokassa 2 ja suojelutasolla 1.

## 8. Yhteenveto

Tässä työssä tutkitaan ontelopalojen leviämisen katkaisemista erilaisten liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Näiden lisäksi esitellään myös joitain muita, esim. palokuorman ominaisuuksiin vaikuttamiseen perustuvia keinoja rajoittaa ontelopalojen kehittymistä ja leviämistä. Tutkimuksessa käytetään lähestymistapaa, jossa perustana on tilaa uhkaava palo ja sen mahdolliset seuraamukset. Tältä osin tutkimus nojaa tuloksiin, joita saatiin Ontelotilojen paloturvallisuuden tutkimuskokonaisuuden ensimmäisessä osahankkeessa, Ontelopalojen ominaispiirteet.

Työn tavoitteen mukaisesti useimmat tulokset esitetään konkreettisina rakenteina, osa detaljitasolle asti vietyinä. Alalla toimivien suunnittelijoiden ja tuotekehittelijöiden tarpeita silmällä pitäen työssä esitetään myös rakenneratkaisujen perusteita, toiminnallisia edellytyksiä ja periaatteita. Joitain ongelmia koskien tulokset esitetään ehdotuksena suuntaviivoiksi aihetta koskevia keskusteluja ja jatkokehityksiä varten.

Tutkimuksessa keskitytään viiteen ongelma-alueeseen: yläpohjan ontelon tulipalot ja räystäään vaikutus niihin, palon leviäminen julkisivun tuuletusraoissa, alaslaskettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien ontelotilojen palot, kaksoislasi-julkisivurakenteeseen mahdollisesti liittyvät palovaarat ja palon teollisuushallien tuulettujen kattojen ontelopalot. Paloteknistä toimintaa tarkastellaan yhdessä kosteustekniikan toimivuuden kanssa, koska onteloiden paloturvallisen rakentamisen perusongelma on juuri palo- ja kosteusteknisten vaatimusten yhtäaikaisten toteuttaminen.

Laajimmin käsitelty aihepiiri on yläpohjan onteloiden ja räystäiden muodostama ongelmakokonaisuus, jonka tutkimuksessa pääpaino on annettu rivitalojen osastoinnin ongelmille sekä pientalojen räystäiden kehittämiseksi paloturvallisemmaksi. Yläpohjan ontelon osastointia tutkittiin täyden mittakaavan rakenteilla tehdyllä uunikokeella. Sen tulosten perusteella esitetään johtopäätöksiä ja suosituksia paloteknisesti toimivista rakenteellisista ratkaisuista toteutettiin palokoe koskien koko rakennekokonaisuuden (osastoiva seinä, sen vesikattoliittymät ja luukku sekä palon mahdollinen kiertäminen räystäään kautta) toimintaa. Yläpohjan onteloon etenevien palojen vähentämiseksi kehitettiin lähinnä rivitaloihin ja muihin pientaloihin tarkoitettu palon etenemistä tietyn ajan, 10–15 minuuttia, pidättävä räystästyppi. Myös muiden kohteiden yläpohjan ontelopaloiden rakenteellista palontorjuntaa tutkitaan, esimerkkinä 3–4-kerroksiset P2-luokan rakennukset.

Julkisivujen tuuletusraoissa leviävän tulipalon ongelmaan liittyen tutkittiin kokeellisesti kahden erityyppisen palokatkoratkaisun toimintaa sekä kerättiin yhteen ja analysoitiin aiempien VTT:llä tehtyjen tutkimusten tuloksia. Tulokset luovat perustan sille, miten palokatkoilla palosuojatun seinän tulee toimia, jotta sitä voidaan pitää riittävän hyvin

palon etenemistä estävänä, samoin kuin esittävät kaksi ratkaisua perustaksi käytännön toteutuksille.

Alaslaskettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien ontelotilojen palovaaroista keskitytään yhä lisääntyvän kaapelipalokuorman muodostamaan uhkaan. Työssä tarkastellaan tätä uhkaa sen torjuntaa rakenteellisin keinoin: esitetään suositus näiden tilojen osiin jakamiselle sekä joitain rakenteellisia keinoja osiin jakamiseen.

Kaksoislasijulkisivuissa sisemmän ja ulomman lasikuoren väliin syntyvän ontelon oleellisin palovaara on se, että ontelo edesauttaa palon leviämistä palotilasta muihin tiloihin. Tätä vaaraa punnitaan ottaen huomioon se, että kaksoislasijulkisivulla varustetut rakennukset on yleensä varustettu sprinklerilaitteistoilla, mikä voimakkaasti vähentää em. uhkakuvan todennäköisyyttä. Tuloksena esitetään julkisivun ontelon syvyyden mitoitusohje, jota noudattaen palon leviämisen vaaraa em. kaltaisessa uhkakuvassa voidaan pienentää merkittävästi sekä tarkastellaan kaksoislasijulkisivujen osastointiratkaisuja ja niihin liittyviä ongelmia.

Teollisuushallien tuuletetuissa kattorakenteissa leviävien palojen katkaisemista tarkastellaan lähtökohtana pienen alkupalon aiheuttamien suhteettoman suurten omaisuusvahinkojen välttäminen. Tuloksena esitetään arvio tuuletun peltikattoratkaisun osiin jakamisen taloudellisesta kannattavuudesta ja tarkastellaan osiin jakamiseen käytettäviä rakenteita. Myös bitumikermikaton osiin jakamista tarkastellaan. Lopulta esitetään yleisluonteinen arvio tuuletuvien teollisuushallien osiin jakamisesta ottaen huomioon myös muut paloturvallisuustavoitteet, etenkin palokunnan turvallisen toiminnan takaaminen.

Raportti on laaja ja sisältää paljon yksityiskohtia. Tekijät painottavat, että kukin esitetty yksityiskohta ja sen esittämisessä käytetyt ilmaisut liittyvät siihen asiayhteyteen, johon ne raportin rakenteella on määritetty kuuluviksi. Yksityiskohtia ja niiden luonnehtimiseen käytettyjä tekstejä ei tule tulkita irrallisina niiden asiayhteydestä.

## Lähdeluettelo

- Aarnio, M. 2001. Kaksoislasijulkisivut 2. Pelastustieto, 3/2001, s. 30–31.
- 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](http://www.british-gypsum.bpb.com/PDF/f10_072.pdf).
- Byggforsk. 2002. Brannsikring av bygninger med kaldt loft – Konstruktive løsninger. Byggforskserien Byggedetaljer. Oslo, NO: Norges byggforskningsinstitutt. (Byggedetaljer 525.108. )
- CEA 4001: 1998–12. 1998. Sprinklerilaitteistot. Suunnittelu ja asentaminen. Comité Européen des Assurances. 138 s. ISBN 951–9180–47–8
- Clement, J. M. 2000. Experimental Verification of the Fire Dynamics Simulator (FDS) Hydrodynamic Model. PhD Thesis. Christchurch, NZ: University of Canterbury. 231 s.
- Eurocode 1–1–2. 2001. Actions on Structures. Part 1–2: General Actions – Actions of structures exposed to fire. Brussels, BE: European Committee for Standardization. (prEN1991–1–2, 3rd Draft 30 May 2001)
- Eurocode 9. 1998. Design of aluminium structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings. Brussels, BE: European Committee for Standardization.
- Fardell, P. J., Colwell, R., Hoare, D., Chitty, R. & Hoover, J. 1999. Full-Scale BRE/FRS Fire Tests of "Local Area Network" (LAN) Data Communication Cables: A "Partners in Technology" Study. Teoksessa: Interflam '99. International Interflam Conference, 8th Proceedings. Volume 1. Edinburgh, Scotland, 29 June – 1 July 1999, London, GB: Interscience Communications Ltd. S. 393–406. ISBN 0-9532312-1-6
- Fardell, P. J., Colwell, R. & Chitty, R. 2000. Study of Cable Insulation Fires in Hidden Voids. Garston, GB: Building Research Establishment. 207 s.
- Firereins. 2002. Rockwool Fire Barrier [verkkodokumentti]. Dublin, IE: Firereins Ltd. [Viitattu 23.12.2002]. Saatavissa: <http://www.firereins.com/blanket.html>.

Friday, P. A. & Mowrer, F. W. 2001. Comparison of FDS Model Predictions With FM/SNL Fire Test Data. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 104 s. (NIST GCR 01–810)

Hakkarainen, T., Oksanen, T. & Mikkola, E. 1996. Puujulkisivujen paloturvallisuus sprinklatuissa kerrostaloissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 29 s. + liitt. 16 s. (VTT Tiedotteita 1736) ISBN 951–38–4892–2

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

Hietaniemi, J. 2001. Puun palosuojauksen vaikutus suljetussa tilassa kehittyvään paloon – kokeellinen todennus ja koetulosten soveltamisesimerkki. Palontorjunta-tekniikka, Nro. 3–4/2002, s. 109–114.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Vaari, J. & Weckman, H. 2001. Ontelotilojen paloturvallisuus – Ontelopalotapauksia ja -tutkimuksia. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. 68 s. + liitt. 11 s. (Palotutkimusraati, projektin no. 68 julkaisu.)

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 2128) ISBN 951–38–5953–3

Hostikka, S., McGrattan, K. B. & Hamins, A. 2002. Numerical Modeling of Pool Fires Using LES and Finite Volume Method for Radiation. Teoksessa: 7th International Symposium on Fire Safety Science. Worcester, MA, 16–21 June 2002. (Painossa)

Jones, B. 2001. Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires. Christchurch, NZ: University of Canterbury. S. 174. (Fire Engineering Research Report 01/4)

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. & Miettinen, P. 1996. Osastoivat seinät ja palomuurit – Suosituksia osastoinnin järjestämisestä ja rakennerratkaisuista. Helsinki: Sampo-ryhmä, Riskienhallinta. 16 s. ISBN 951–9280–23–5

Karlsson, B. & Quintiere, J. G. 2000. Enclosure Fire Dynamics. Boca Raton, FL: CRC Press LLC. 315 s. ISBN 0–8493–1300–7

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](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 teknillinen tutkimuskeskus. 29 s. + liitt. 116 s. (VTT Tiedotteita 1834) ISBN 951-38-5114-1

Kunkelmann, J. 1997. Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und ausserhalb der Brandwohnung. Karlsruhe, DE: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). 129 s. + 18 s. (Forschungsbericht no 105) ISSN 0170-0060

Kunkelmann, J. 1998. Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebel-Löschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden. Karlsruhe, DE: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). 163 s. + 18 s. (Forschungsbericht no 108) ISSN 0170-0060

Lamatherm Products. 2003a. Fire, smoke and acoustic stop for use within suspended ceilings [verkkodokumentti]. Measteg, GB: Lamatherm Products Limited. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: <http://www.lamatherm.co.uk/Datasheets/0801.pdf>.

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>.

Lappi, E., Hietaniemi, J. & Kokkala, M. 2002. Ikkunan kautta julkisivulle tulevan palon leviämisen todennäköisyyspohjainen riskitarkastelu. Palontorjuntatekniikka, No. 1, s. 20-24.

Law, M. & O'Brien, T. 1981. Fire safety of bare external structural steel. Croydon, GB: Constructional Steel Research and Development Organisation (Constrado). 87 s. ISBN 0 86200 026 2

LPC 1999. Fire spread in Multi-Storey Buildings with Glazed Curtain Wall Facades. Borehamwood, GB: Loss Prevention Council. 55 s. (LPR 11:1999) ISBN 0 902167 59-6



McGrattan, K. B., Baum, H. R., Rehm, R. G., Hamins, A., Forney, G. P., Floyd, J. E., Hostikka, S. & Prasad, K. 2002. Fire Dynamics Simulator (Version 3) – Technical Reference Guide. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 46 s. (NISTIR 6783, 2002 Ed.)

McMillan, J. & Buchanan, A. 2000. The effect of combustible construction on fire safety in shopping centres. Sydney, AU: Fire Code Reform Centre Limited. 33 s. + liitt. 30 s. (Project Report FCRC PR 00–02)

Möttönen, H. & Hirviniemi, J. 2000. Korotuslattiat tulossa rakentamiseen. Teräsrakenne 1–2000 [verkkodokumentti]. Helsinki, FI: Teräsrakenneyhdistys. [Viitattu 23.12.2002]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/virtual/try/>.

PFC Corofil. 2003. C470 / C470E – Raised Floor Firestop [verkkodokumentti]. Ches-sington, GB: PFC Corofil Firestop Products. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: <http://www.pfc-corofil.co.uk/products/c470.php>.

Proe, D. J. & Bennetts, I. D. 1994. Timber Crib Fire Test for Comparison of Ceiling Tiles. Melbourne, Australia: BHP Melbourne Research Laboratory. (BHP Research Report No. BHPR/PPA/R/94/085/SG021A)

Proe, D. J. & Bennetts, I. D. 1996. Fire Tests on Commercial Ceiling Systems. Mel-bourne, 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>.

RT 84–10489. 1992. Alakatot ja sisäkattoverhoukset. Helsinki: Rakennustieto Oy. 16 s.

RT 85–10596. 1996. Metalliset sadevesijärjestelmät. Helsinki: Rakennustieto Oy. 12 s.

RT 99–10779. 2002. Tiiviin puutaloalueen suunnittelu. Moderni puutalo kaupunki. Hel-sinki: Rakennustieto Oy. 19 s.

Shields, T. J., Silcock, G. W. H. & Flood, M. F. 2001. Performance of a Single Glazing Assembly Exposed to Enclosure Corner Fires of Increasing Severity. Fire and Materials, Vol. 25, s. 123–152.

Shields, T. J., Silcock, G. W. H. & Flood, M. F. 2002. Performance of a Single Glazing Assembly Exposed to a Fire in the Centre of an Enclosure. *Fire and Materials*, Vol. 26, s. 51–75.

Tillander, K. & Keski-Rahkonen, O. 2000. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 200 s. + liitt. 55 s. (VTT Tiedotteita 2013) ISBN 951–38–5634–8

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

USG Corporation. 2003a. Cavity barrier to afford 30 minutes performance [verkkodokumentti]. Peterlee, GB: USG Corporation (UK) Ltd. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: <http://europe.usg.com/usguk/techdrawings/Act-f012.pdf>.

USG Corporation. 2003b. Cavity barrier to afford 60 minutes performance [verkkodokumentti]. Peterlee, GB: USG Corporation (UK) Ltd. [Viitattu 19.2.2003]. Saatavissa: <http://europe.usg.com/usguk/techdrawings/Act-f014.pdf>.

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

Ympäristöministeriö 1980. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E7: Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus. Ohjeet 1980. 12 s.

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

Zhang, W., Hamer, A., Klassen, M., Carpenter, D. & Roby, R. 2002. Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation. *Fire Safety Journal*, Vol. 37, s. 721–752.

Östman, B., Voss, A., Hughes, A., Hovde, P. J. & Grexa, O. 2001. Durability of Fire Retardant Treated Wood Products at Humid and Exterior Conditions: Review of literature. *Fire and Materials*, Vol. 26, s. 7–27.

Östman, B., König, J., Mikkola, E., Stenstad, V., Carlsson, J. & Karlsson, B. 2002. Brandsäkra trähus – Nordisk kunskapsöversikt och vägledning. Stockholm: Träteknik. 107 s. (Publ. nr. 0210034) ISBN 91–88170–30–6

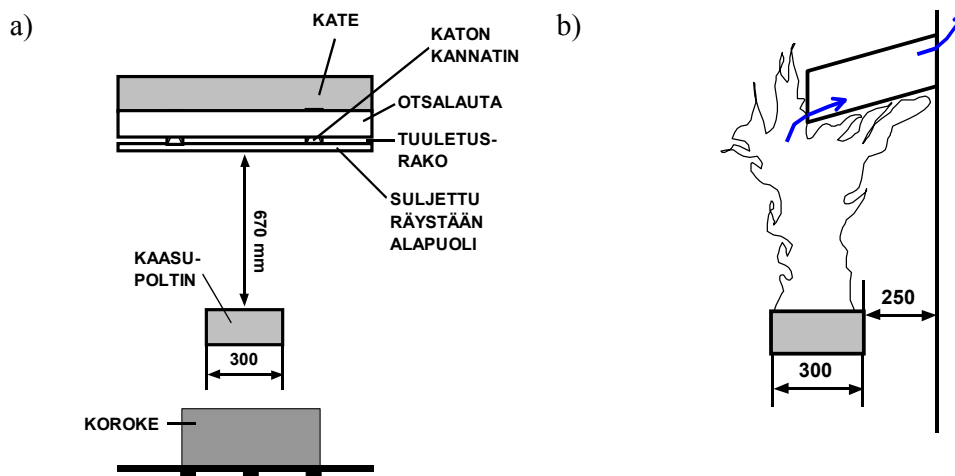
## Liite A: Räystäiden palokokeet

Räystäiden palokokeita tehtiin viisi kappaletta. Niiden avulla kehitettiin tekstissä esitelty räystäästyppi, joka selvästi hidastaa palon etenemistä räystäään kautta.

Ensimmäinen tehtävä oli sopivan koejärjestelyn kehittäminen (kuva A1). Sille asetettuja vaatimuksia olivat mm. seuraavat:

- Kokeita tulee voida useita eri räystääsratkaisuilla, mikä asettaa rajoituksia yhden kokeen valmisteluun, suorittamiseen ja tulosten analysointiin kuluville resursseille.
- Kokeet tulee suorittaa hallituissa olosuhteissa siten, että kokeiden toistettavuus on hyvä ja ne mahdollista tarvittaessa uusia.
- Palorasituksen tulee täyttää edellä mainitut ehdot sekä lisäksi sen tulee olla riittävän voimakas, jotta se vastaa pääasiallisena paloskenaarioina olevan lieskahtaneen huoneistopalon räystäälle tuottamia olosuhteita.
- Rakenteen tulee riittävän hyvin kuvata todellisen räystäään toimintaa.

Näiden vaatimusten perusteella kokeet toteutettiin hieman normaalitilannetta vastaavaa mittakaavaa pienemmässä koejärjestelyssä. Hallittujen olosuhteiden aikaansaamiseksi kokeet tehtiin erillisessä tilassa, jonka virtaukset olivat säädettävissä ja mitattavissa. Palorasitus toteutettiin kaasupolttimella.



Kuva A1. Räystäiden palokokeiden järjestelyjen pääpiirteet: a) edestä ja b) sivusta.

Kokeet tehtiin käyttäen yllä esitettyä järjestelyä. Ne suoritettiin VTT:n SBI-palotestauslaitteen savunkeräyskuvun alla. Sen lisäksi, että savut saatiin näin tehokkaasti kerättyä savunpoistojärjestelmään, SBI-mittauslaitteiston avulla saatiin seurattua palorasituksen voimakkuutta ja räystään osallistumista palamiseen (palotehomittaus).

Palorasitus saatiin aikaan neliönmuotoisella pinta-alaltaan 300 mm × 300 mm olevalla propaanikaasupolttimella. Poltinta ajettiin noin 70 kW:n teholla.

Eri kokeiden erityispiirteet ja räystäiden rakenneratkaisut esitetään yksityiskohtaisesti jäljempänä.

*Taulukko A1. Räystäiden palokokeiden aiheet.*

<b>Koe 1</b>	Tutkittiin, miten räystään alapuoleisen pinnan sulkeminen kaasutiiviiksi ja tuuletuksen ilmanoton siirtäminen räystään otsalautojen yhteyteen vaikuttaa palon leviämiseen.
<b>Koe 2</b>	Tutkittiin, miten räystään alapuoleisen pinnan sekä osittainen räystään sisäosan villoittaminen vaikuttaa palon leviämiseen. Motiivina se, että palamaton villa suojaa räystään sisäosissa olevia puuosia tulelta.
<b>Koe 3</b>	Tutkittiin, voiko räystään alla olevaa laudoitusta ja pellitystä jatkamalla 50 mm yli etureunasta ohjata liekit ulospäin räystäältä siten, että vaarallista hormi-ilmiötä ei pääsisi syntymään.
<b>Koe 4</b>	Kokeen 3 toistokoe muutetulla ilman ulosvirtausjärjestelyllä tarkoituksena todentaa, että kokeessa 3 havaittu lupaava tulos ei ole herkkä poistoilman virtaukselle.
<b>Koe 5</b>	Kokeiden 3 ja 4 tulosten perusteella laadittu kaksinkertaisen räystäskourun käyttöön perustuvan ratkaisun koestus. Tulosten perusteella ratkaisu on riittävän toimiva hankkeen koeohjelman kannalta.

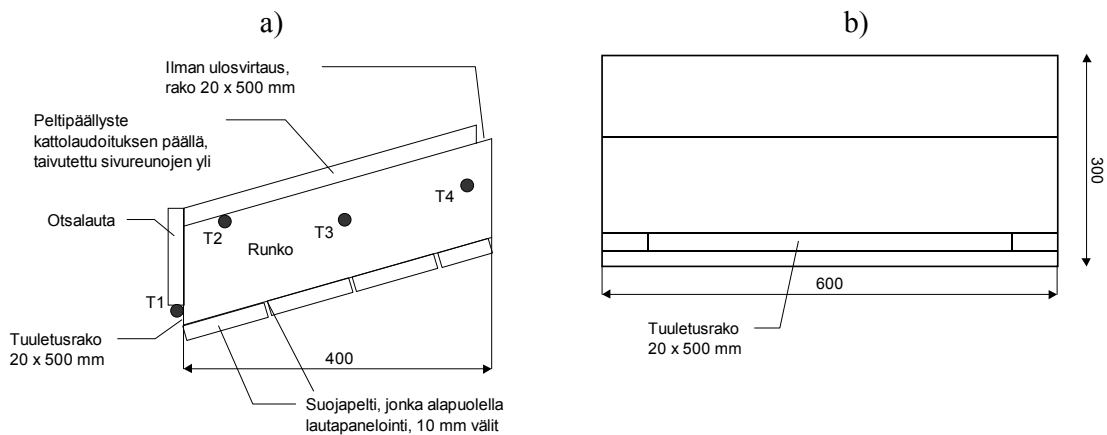
## **Koe 1: räystästyppi 1**

Räystästä tehtiin yksinkertainen, jotta sen rakentaminen sujui nopeasti ja kustannustehokkaasti. Mitään palotekniikan kannalta ratkaisevan oleellisia elementtejä ei kuitenkaan jätetty pois. Räystään 1 kaaviokuva, josta käyvät ilmi myös räystään tärkeimmät mitat ja lämpötilan mittausantureiden sijainti, sekä valokuvia räystästä on esitetty alla olevissa kuvissa (Kuva A2 ja Kuva A3).

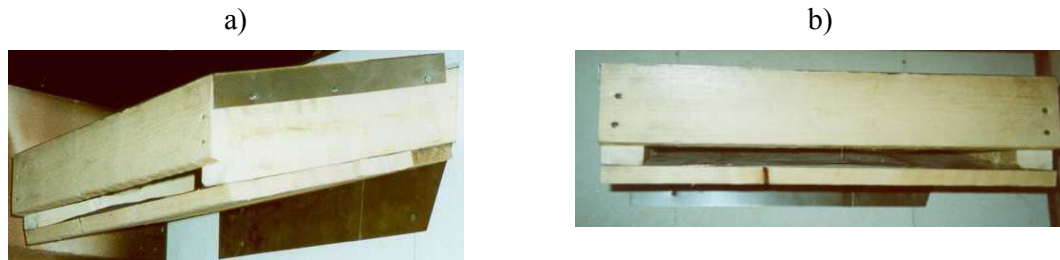
Räystään rungon rakennusmateriaalina käytettiin 50 mm × 100 mm lautaa ja räystään laudoitukseen 22 mm × 120 mm lautaa. Räystään alapuoli suljettiin laudoituksen alle asennetulla 1 mm:n paksuisella pellillä. Kattolaudoituksessa laudat olivat kiinni toisisa-  
saan. Laudoituksen päälle asennettiin vielä 1 mm pellistä tehty kate, joka taivutettiin sivureunojen yli kiinni runkolautoihin, jotta savukaasut eivät pääsisi poistumaan katto-  
laudoituksen rakojen läpi. Kattoon ei asennettu aluskatetta.

Räystään otsalautoitus toteutettiin yksinkertaisuuden vuoksi yhdellä laudalla. Tuuletus-  
rako sijaisi tämän laudan alapuolella. Sen leveys oli 500 mm ja korkeus 20 mm<sup>2</sup>. Tuule-  
tuksen poistoaukkoa kuvattiin kattoon tehdyllä aukolla, jonka koko oli 20 mm × 500 mm<sup>2</sup>. Poistoaukko sijaitsi noin 300 mm tuuletusraon yläpuolella.

Koekappale kiinnitettiin taustaan, joka rakennettiin kahdesta päällekkäisestä CaSi-  
levystä.



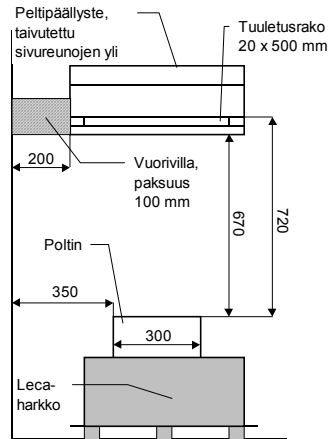
Kuva A2. Räystäään 1 kaaviokuvat, tärkeimmät mitat ja lämpötilan mittausantureiden (T1–T5) paikat: a) räystääs sivulta ja b) räystääs edestä.



Kuva A3. Valokuvia räystäästä 1: a) räystääs viistosti oikealta ja b) räystääs edestä katsottuna.

Koejärjestely esitetään alla olevissa kuvissa kaaviokuvien (Kuvat A4a ja b) ja valokuvi-  
en avulla (Kuvat A4c ja d).

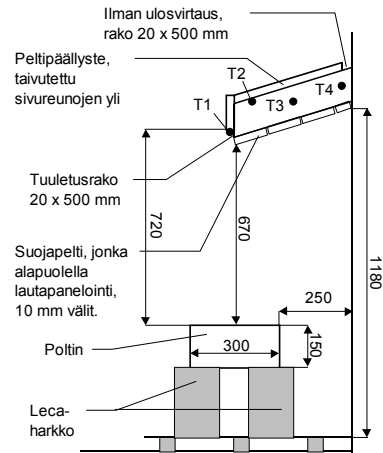
a)



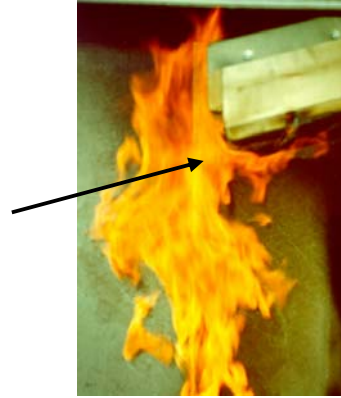
c)



b)



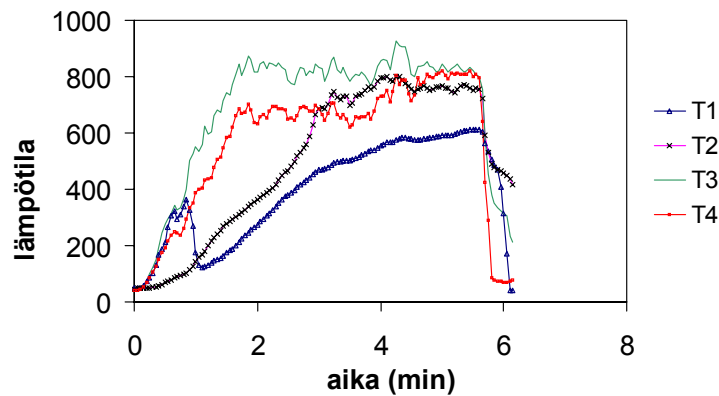
d)



Kuva A4. Räystä 1, kojärjestelyt: a) kaaviokuva edestä ja b) kaaviokuva sivulta. c) valokuva ennen koetta ja d) valokuva kokeen aikana 3 minuuttia polttimen sytyttämisen jälkeen (liekit ylettyvät räystäään yli).

Kokeessa mitatut lämpötilat esitetään kuvassa A5. Koekappaleen sisällä kaasun lämpötilat nousivat nopeasti polttimen sytyttämisen jälkeen. Tämä viittaa siihen, että räystään sisälle muodostuu heti hormi-ilmiö, joka imi liekkejä räystään sisälle (tämä on nähtävissä kuvan A4d nuolella merkityssä kohdassa). Kaasun lämpötila lähempänä tuuletusrakoa oli kokeen aikana noin 100–200 °C korkeampi kuin kauempana. Kaasun lämpötila koekappaleen sisällä oli kokeen aikana noin 600–900 °C. Kappaleen sisällä katon lautojen alapinnan lämpötila nousi hieman hitaammin kuin kaasun lämpötila siten, että noin 3 minuutin kohdalla pinta saavutti kaasun kanssa saman lämpötilan.

Hormi-ilmiötä räystäässä tarkastellaan lähemmin tuonempana.



Kuva A5. Kokeessa mitatut lämpötilat. Lämpötila-anturi T1 vaurioitui n. 1 minuutin kohdalla.

Kokeen tulosten perusteella voidaan sanoa, että räystäskoekappaleen 1 mukainen rakenne ei ole toimiva ratkaisu pyrittäessä estämään palon leviämistä räystään kautta yläpohjan ontelotilaan. Näemme tuloksista, että heti syttymisensä jälkeen räystäskoekappaleessa 1 syntyy hormi-ilmiö ja palo leviää koekappaleen sisäosiin ja sitä kautta yläpohjan onteloon.

## Koe 2: räystästyyppe 2

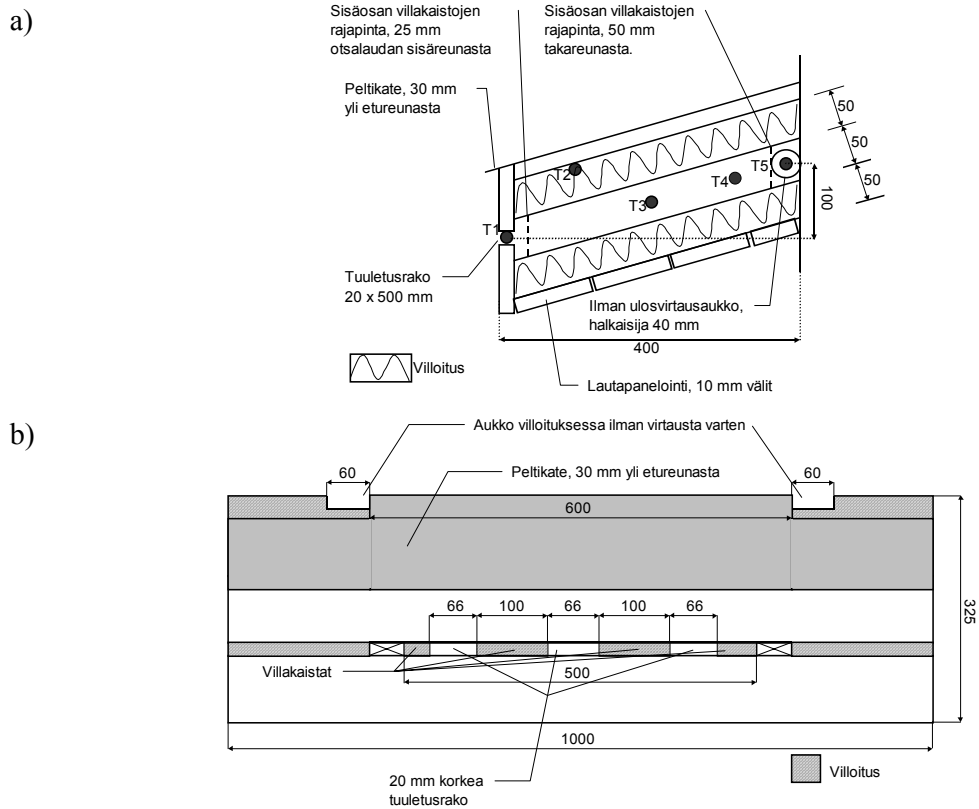
Räystään rakenne on esitetty alla olevassa kuvassa A6, jossa näkyvät räystään tärkeimmät mitat sekä lämpötilan mittausantureiden sijainnit. Valokuvia räystäästä on esitetty kuvassa A7.

Tässä kokeessa räystään runkolaudoitus on korotettu 150 millimetriin (edellisessä kokeessa 100 mm). Tämä on tehty siksi, että sisäosa on saatu vuorattua 50 mm mineraalivillalla sekä ala- että yläpuolelta jättäen väliin vapaan tilavuuden ilman virtausta varten. Räystään sisäosa koostuu siten kahdesta 50 mm mineraalivillalevystä sekä niiden väliin jäävästä osittain vapaasta tilavuudesta. Väliin jäävään alueeseen on edelleen laitettu mineraalivillakaistat, joiden etäisyys toisistaan sekä mitat näkyvät kuvasta A6b. Lämpötila-anturi T1 mittasi räystäääseen sisälle tulevan kuumen kaasun lämpötilaa tuuletusraon keskellä, lämpötila-anturi T2 mittasi kattolaudoituksen pinnan lämpötilaa eristyksen alla ja lämpötilanmittaus-anturit T3 ja T4 mittasivat kuumen kaasun lämpötilaa keskellä villalevyjen väliin jäävää vapaata tilavuutta. Lämpötila-anturit T1–T4 oli sijoitettu edestä katsoen ontelon keskilinjalle. Lämpötila-anturi T5 mittasi räystäästä ulostulevan kaasun lämpötilaa ulosvirtausaukon keskilinjalla kuvan A6b osoittamalla paikalla. Tässä kokeessa otsalaudoituksen pituus oli 1 000 mm (edellisessä kokeessa 600 mm).

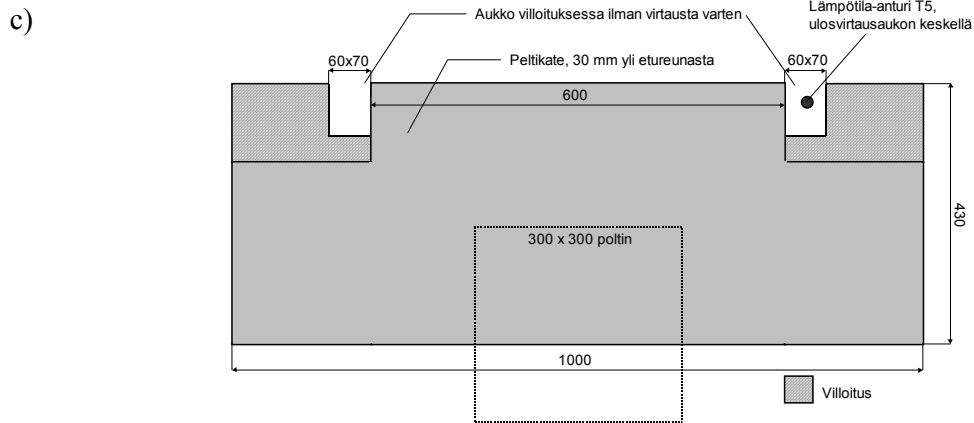
Ilman ulosvirtausaukot tehtiin kuvan A6a osoittamalla tavalla. Muutoksena edelliseen kokeeseen verrattuna tuuletusrako siirrettiin korkeussuunnassa otsalaudoituksen keskelle. Räystästä tehtiin kuitenkin edelleen yksinkertainen, jotta sen rakentaminen sujui nopeasti ja kustannustehokkaasti. Korkeussuunnassa keskelle runkolaudoitusta räystäään molemmin puolin porattiin  $\phi 40$  mm reiät ja villoitukseen tehtiin  $60 \times 70$  mm<sup>2</sup> aukot ilman virtausta varten (ks. Kuva A6c).

Katon ja räystään alapinnan laudoitus toteutettiin samalla tavalla kuten räystäskokeessa 1, muuten erona oli räystään päälle asennettu 1 mm peltikate, joka tuli 30 mm yli etureunasta. Peltikatetta ei tässä kokeessa taivutettu sivureunojen yli. Koekappale kiinnitettiin samaan CaSi-levyistä tehtyyn taustaan, jota käytettiin räystäskokeessa 1.

Koejärjestely on esitetty alla olevissa kuvissa (kaaviokuvat Kuva A8 ja valokuvat Kuva A9).



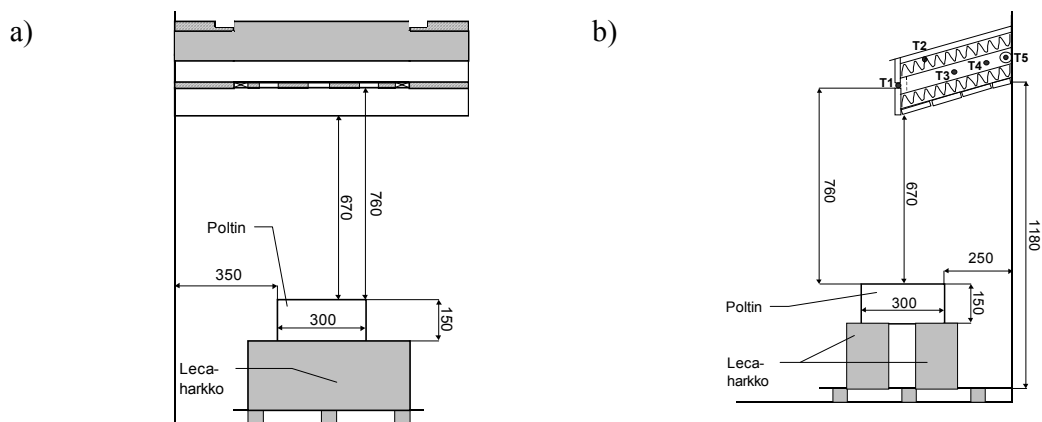




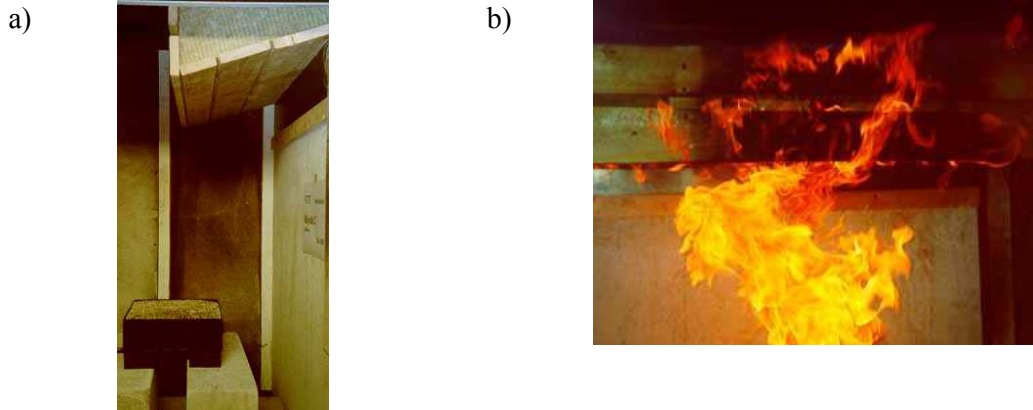
Kuva A6. Räystään 2 kaaviokuvat, tärkeimmät mitat ja lämpötilan mittausantureiden (T1–T5) paikat: a) räystääs sivulta, b) räystääs edestä ja c) räystääs ylhäältä katsottuna.



Kuva A7. Valokuvia räystäästä 2: a) räystääs edestä ja b) räystääs viistosti edestä oikealta.



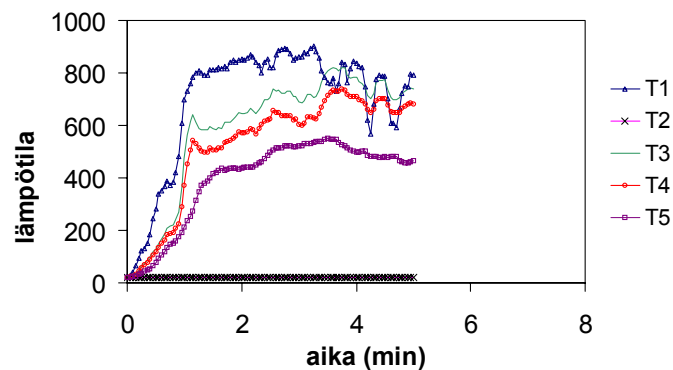
Kuva A8. Kaaviokuvat räystääskokeen 2 järjestelyistä: a) räystääs edestä ja b) räystääs oikealta.



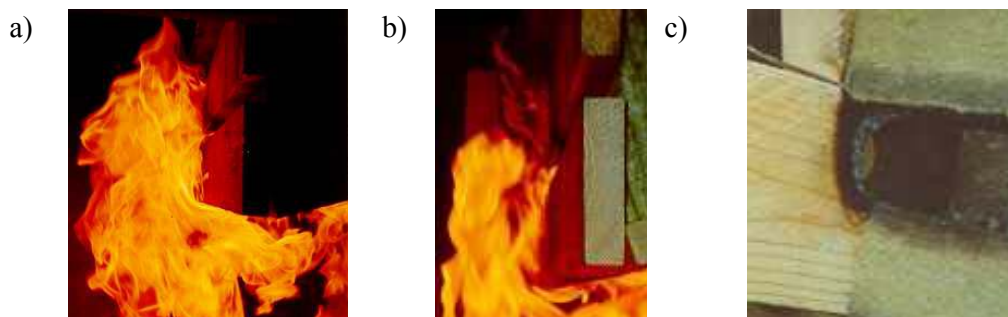
Kuva A9. Valokuvia kokeen 2 järjestelyistä: a) ennen koetta ja b) kokeen aikana hetkellä 2:30 polttimen sytyttämisen jälkeen otettu kuva.

Kokeessa mitatut lämpötilat esitetään kuvassa A10. Kappaleen sisällä kaasun lämpötilat nousivat hyvin nopeasti polttimen tehon saavutettua 70 kW arvonsa. Tämä viittaa siihen, että räystäään läpi syntyi välittömästi polttimen liekkien saavutettua räystäään hormi-ilmiön ajama ilmavirtaus (Kuva A11). Kaasun lämpötila kappaleen sisällä kokeen aikana oli 500–800 °C. Lämpötila räystäään tuuletusraossa oli kokeen aikana melko tasaisesti 800–900 °C. Räystäään sisällä kattopaneloinnin laudan alapinta ei lämminnyt juuri ollenkaan, sillä se oli eristetty villoituksella palosta.

Myös lämpötila ilman ulosvirtausaukon ulkopuolella nousi nopeasti polttimen saavutettua asetusarvonsa, koska hormi-ilmiö johti kuumat kaasut aukon kautta ulos räystäästä. Sen lämpötila ei kuitenkaan noussut aivan yhtä korkealle kuin kappaleen sisällä olevat lämpötilat, koska kuumat kaasut sekoittuivat ulosvirtausaukossa ympäristön ilman kanssa. Lämpötila ulosvirtausaukon ulkopuolella oli noin 400–500 °C.



Kuva A10. Kokeessa mitatut lämpötilat.



*Kuva A11. Rästyskokeen 2 aikana havaittu hormi-ilmion synnyttämä imu (kuva a) 2:05 ja kuva b) 2:30 polttimen sytyttämisen jälkeen). c) Ulosvirtausaukon hiiltyminen räystäään sisäpuolelta katsottuna.*

Kokeen jälkeen palanutta räystästä tutkittaessa havaittiin, että räystäs oli palanut voimakkaasti. Kuvassa A11c on esitetty ulosvirtausaukon hiiltyminen räystäään sisäpuolelta katsottuna. Aukko oli hiiltynyt eniten sisäpuolen yläreunastaan, noin 10 mm syvyydeltä.

Koetulosten perusteella on selvää, että räystäskokeen 2 mukainen ratkaisu ei toimi yrittäessä estää palon leviäminen räystäään kautta yläpohjan ontelotilaan. Räystäään alapuoleisen pinnan sekä osittainen räystäään sisäosan villoittaminen ei estä palon leviämistä vaan kiihdyttää sitä. Tämä havaitaan verrattaessa räystäään sisäosan lämpötilojen kehittymistä räystäskokeiden 1 ja 2 välillä. Räystäskokeessa 2 kuumen kaasun lämpötilat saavuttavat nopeammin huippuarvonsa kokeen alussa (1:10 min) kuin kokeessa 1 (1:50 min). Räystäskoekappaleen 2 sisällä kaasut ahdistettiin pienempään tilavuuteen, joka edesauttoi hormi-ilmion nopeampaa kehittymistä.

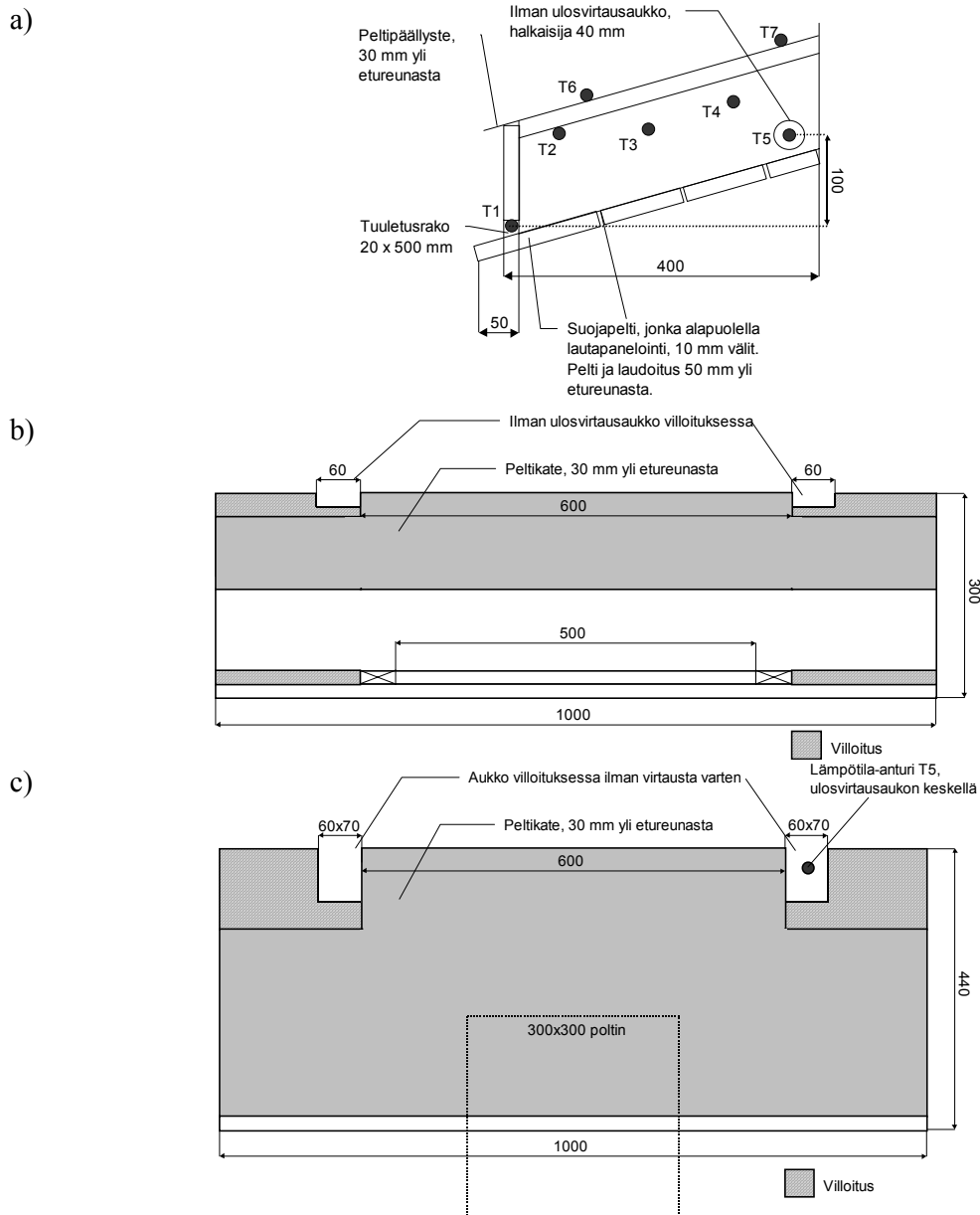
### **Koe 3: räystästyyppe 3**

Kolmannessa räystäsvalitohdossa räystäään alla ollutta laudoitusta ja pellitystä jatkettiin 50 mm yli etureunasta tavoitteena eliminoida edellisissä kokeissa ongelmaksi osoittautunut räystäään sisälle muodostuvan hormi-ilmion tuuletusrakoon aiheuttaman imun vaikutus.

Räystäään 3 rakenne esitetään alla olevissa kuvissa (Kuva A12, kaaviokuvat ja Kuva A15, valokuvia). Kaaviokuvassa näkyvät räystäään tärkeimmät mitat sekä lämpötilan mittaustantureiden sijainnit.

Lämpötila-anturi T1 mittasi räystääseen sisälle tulevan kuumen kaasun lämpötilaa tuuletusraon keskellä, lämpötila-anturi T2 mittasi kattolaudoituksen pinnan ja lämpötilanmittaus-anturit T3 ja T4 mittasivat kuumen kaasun lämpötilaa kuvan A12a osoittamalla

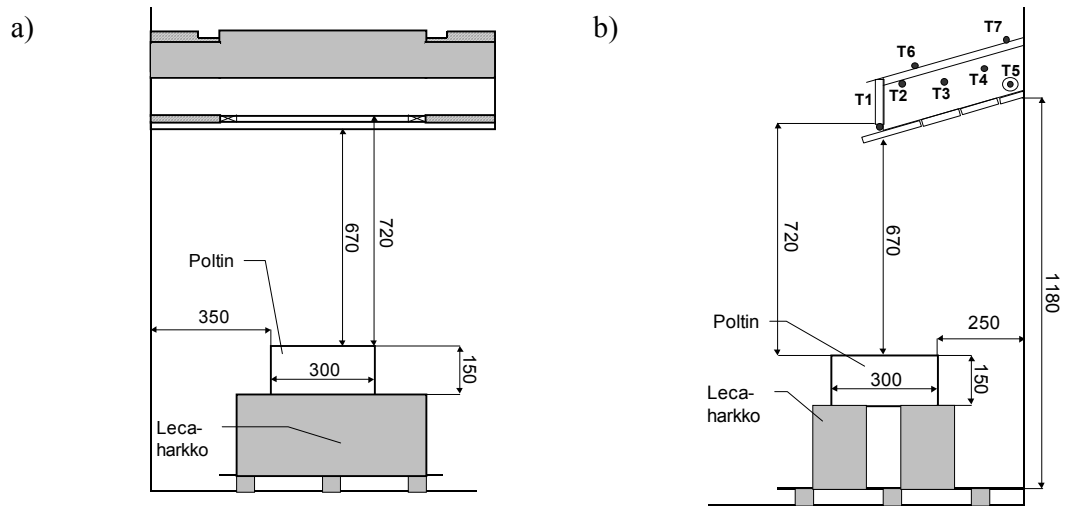
paikoilla räystäään sisällä. Lämpötila-anturit T1–T4 olivat sijoitettu edestä katsoen onte-  
lon keskilinjalle. Lämpötila-anturi T5 mittasi räystäästä ulostulevan kaasun lämpötilaa  
ulosvirtausaukon keskilinjalla kuvan A12b osoittamalla paikalla. Räystäskokeessa 3  
mitattiin lämpötiloja myös kattopellin pinnan lähellä kahdessa eri paikassa räystäään  
keskilinjalla: lämpötila-anturi T6 150 mm räystäspellin etureunasta ja anturi T7 40 mm  
kattopellin takareunasta.



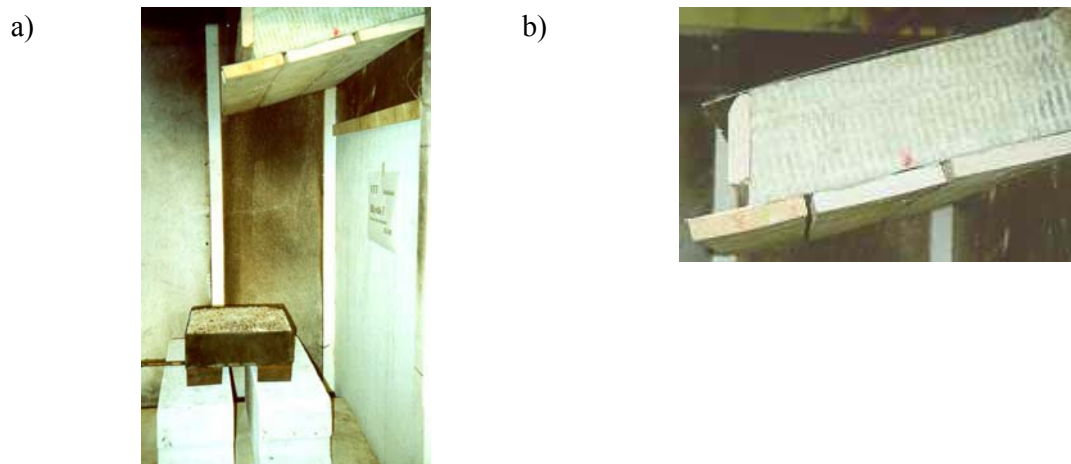
Kuva A12. Räystäään 3 kaaviokuvat, tärkeimmät mitat ja lämpötilan mittaussantureiden (T1–T7) paikat: a) räystääs sivulta, b) räystääs edestä ja c) räystääs ylhäältä katsottuna.



Kuva A13. Edestä otettu valokuva räystäästä 3.



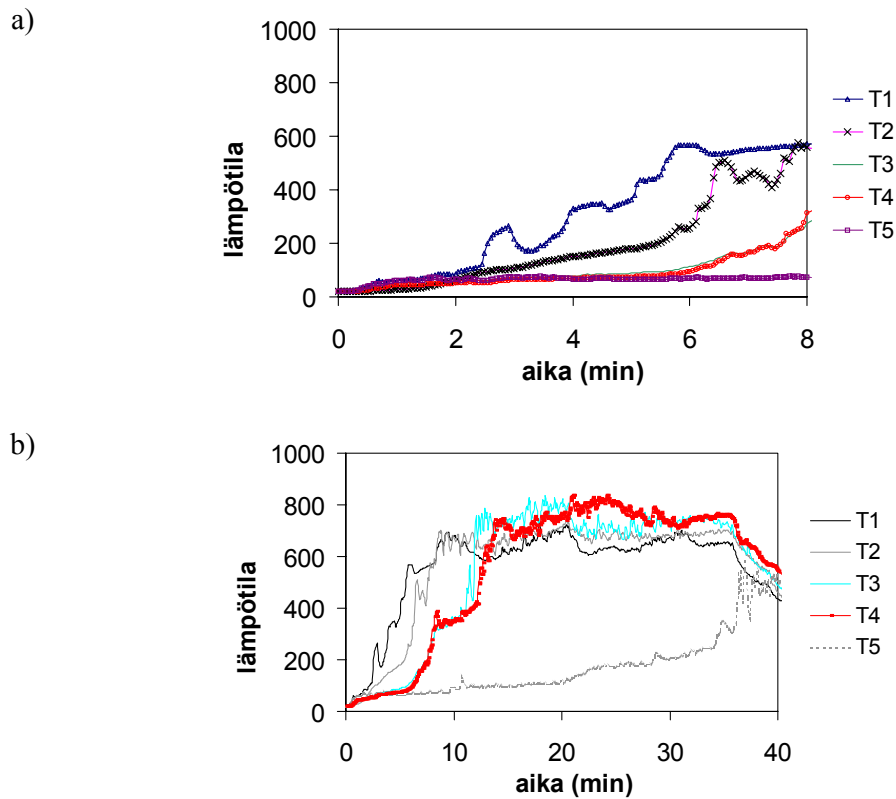
Kuva A14. Kaaviokuva räystäskokeen 3 järjestelyistä: a) räystäs edestä ja b) oikealta.



Kuva A15. Valokuvia räystäskokeen 3 järjestelyistä: a) yleiskuva sivulta ja b) lähikuva eteen-työntyvästä alalautoituksesta ja pellistä.

Tuuletusrako oli räystäskokeen 1 tapaan otsalaudan alapuolella, mutta ilman ulosvirtaus toteutettiin räystäskokeen 2 tapaan runkolautoihin porattujen reikien avulla ( $\phi$  40 mm ulosvirtausaukko tehtiin runkolautoituksen alareunaan).

Katon ja räystään alapinnan laudoitus toteutettiin samalla tavalla kuten räystäskokeessa 1, muuten erona oli räystään päälle asennettu 1 mm peltikate, joka tuli 30 mm yli etureunasta. Peltikatetta ei tässä kokeessa taivutettu sivureunojen yli. Koekappale kiinnitettiin samaan CaSi-levyistä tehtyyn taustaan, jota käytettiin räystäskokeessa 1. Koejärjestelyt esitetään kuvissa A14 ja A15.



Kuva A16. Räystäskokeessa 3 mitatut lämpötilat: a) tarkempi esitys kokeen alkuhetkestä, 0–8 min ja b) lämpötilat koko kokeen aikana.

Kokeessa mitatut lämpötilat esitetään kuvassa A16. Lämpötilojen kehitys 8 minuutin vertailuvälillä oli varsin erilaista kuin edellisissä räystäskokeissa. Räystään sisällä kaasun lämpötila oli 6 minuuttiin saakka alle 100 °C ja 8 minuutin kohdallakin vain 270–300 °C. Räystään sisäiset lämpötilat pysyivät räystään voimakkaasta palamisesta huolimatta varsin alhaisena, mikä vahvistaa kokeen aikaiset havainnot siitä, että hormi-ilmioitä ei tässä koekappaleessa päässyt syntymään (ks. kuvat A17a ja b). Lämpötila

räystään tuuletusraossa lähti nousemaan 2 minuutin kohdalta tasaisesti noin 90 °C:sta 8 minuutin noin 560 °C:seen saakka.

a)



b)



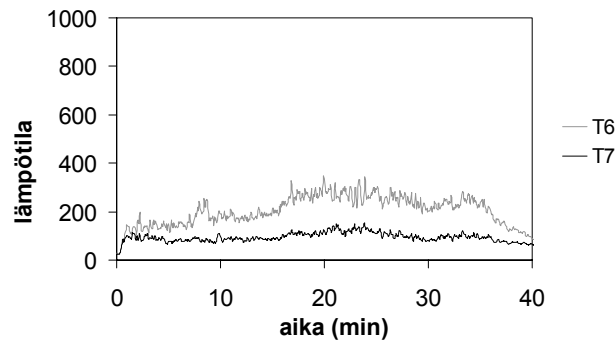
*Kuva A17. Räystäskokeen 3 aikana ei havaittu hormi-ilmiötä: a) kuva 4 minuuttia ja b) kuva 17 minuuttia polttimen sytyttämisen jälkeen.*

Lämpötilat ilman ulosvirtausaukon ulkopuolella pysyttelivät koko 8 minuutin vertailuajanjakson alle 80 °C lämpötilan. Myös tämä osoittaa selvästi sen, että räystään läpi ei tällä aikavälillä muodostunut ilmavirtausta (hormi-ilmiötä). Todellisessa palossa kuumat kaasut eivät siis olisi päässeet räystään kautta tunkeutumaan yläpohjan ontelotilaan. Kokeen aikana havaittiin, että pidennetty alalaudoitus ja -pellitys ohjasivat liekkiä ulospäin räystään tuuletusraosta.

Kaasujen lämpötila räystään sisällä nousi nopeasti 8–9 minuutin välillä noin 350 °C:seen ja tästä edelleen 12 minuuttiin saakka 700–800 °C:seen, jolla tasolla lämpötila pysyi kokeen loppuun saakka. Räystään sisällä kattopaneloinnin alapinnan lämpötila nousi hieman nopeammin noin 700 °C:seen saakka 9 minuutissa ja pysytteli lähellä tätä arvoa kokeen loppuun saakka.

Lämpötila ulosvirtausaukon ulkopuolella oli 20 minuuttiin saakka alle 100 °C. Tämän jälkeen lämpötila nousi kohtuullisen hitaasti ja oli 34 minuuttia kokeen alusta noin 250 °C, jonka jälkeen lämpötila ilman ulosvirtausaukossa lähti nopeampaan nousuun. Tämä osoittaa sen, että 34 minuutin jälkeen palo saavutti ilman ulosvirtausaukon. Tätä tukee myöskin kokeen aikana tehty havainto (ajassa 34:15), jossa liekin havaittiin lyövän ulos ulosvirtausaukosta.

Lämpötilat kattopellin yläpuolella 150 mm räystäspellin etureunasta olivat 250–300 °C ja lämpötilat kattopellin takareunan lähellä (40 mm kattopellin takareunasta) pysyivät kohtuullisen tasaisesti lähellä 100 °C:ta (Kuva A18).



*Kuva A18. Kattopellin pinnan lämpötilat räystäskokeen 3 aikana.*

Tulokset osoittavat, että räystästyypissä 3 käytetty alareunan 50 mm mittainen uloke eliminoi räystään sisälle syntyvän hormi-ilmiön aiheuttaman imun. Tämä viivästää jonkin verran palon leviämistä räystään kautta yläpohjan ontelotilaan: esim. verrattuna räystästyypillä 1 tehtyyn kokeeseen, räystään sisällä olevien kaasujen lämpötilat saavuttivat tyypillisen puun syttymistä vastaavan lämpötilan, 300 °C, noin 7 minuuttia myöhemmin, ja 600 °C:seen nämä lämpötilat nousivat runsaat 10 minuuttia myöhemmin kuin räystästyypillä 1 tehdyssä kokeessa.

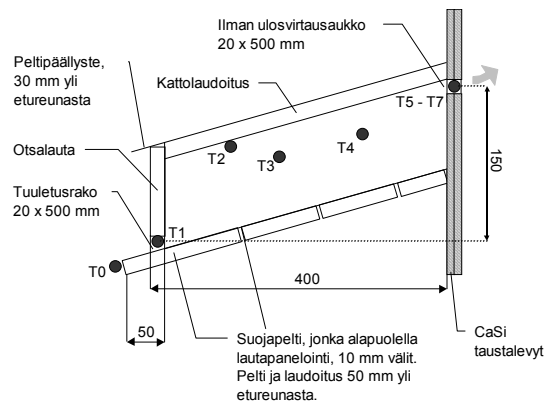
Katon yläpuoleiset lämpötilat mitattiin siksi, että haluttiin nähdä, miten kuumaa katolla räystään lähellä on. Tällä on merkitystä, kun pohditaan sellaisia yläpohjan tuuletusvaihtoehtoja, joissa tuuletus suoritetaan räystään sijasta katolle tehtävien rakenteiden avulla. Ellei näitä rakenteita tehdä aivan räystään välittömään läheisyyteen, lämpötilat näyttävät tämän kokeen perusteella olevan varsin alhaisia.

#### **Koe 4: räystästyyppi 3, muutettu ulosvirtaus**

Tässä kokeessa tutkittiin miten räystääseen koejärjestelyssä tehty ilman ulosvirtausaukko vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Tutkittu räystääs oli tyyppiä 3 eli sama kuin kokeessa 3. Koejärjestelyn rakenteellinen ero verrattuna kokeeseen 3 oli ilman ulosvirtauksen muuttaminen runkoraudoituksen läpi poratuista  $2 \times \phi 40$  mm rei'istä CaSi-taustalevyjen läpi leikattuun  $20 \times 500$  mm<sup>2</sup> aukkoon (Kuva A19). Tässä järjestelyssä räystään läpi kulkevat savukaasut purkautuivat vapaasti koetilan viereiseen hallitilaan (Kuva A20).



a)



Kuva A19. Ilmanvirtausjärjestelyt kokeessa 4.



Kuva A20. Valokuva koetilan ulkopuolelta räystäskokeessa 4. Savu tulee räystäään poistoilma-aukosta nuolen osoittamassa paikassa.

Lämpötila-anturi T0 mittasi kuuman kaasun lämpötilaa räystään ala-laudoituksen päässä polttimen yläpuolella, lämpötila-anturi T1 mittasi räystääseen sisälle tulevan kuuman kaasun lämpötilaa tuuletusraon keskellä, lämpötila-anturi T2 mittasi kattolaudoituksen pinnan lämpötilaa ja lämpötila-anturit T3 ja T4 mittasivat kuuman kaasun lämpötilaa (noin 5 cm katon alapinnasta) alla olevan kuvan osoittamilla paikoilla (Kuva A19). Lämpötila-anturit T0–T4 olivat sijoitettu edestä katsoen ontelon keskilinjalle. Lämpötila-anturi T5 mittasi räystästä ulos tulevan kaasun lämpötilaa edestä katsoen ulosvirtausaukon oikeassa reunassa, anturi T7 vasemmassa reunassa ja lämpötila-anturi T6 mittasi räystästä ulostulevan kaasun lämpötilaa räystään keskilinjalla. Koekappale kiinnitettiin uuteen CaSi-levyistä tehtyyn taustaan, johon oli työstetty aukko ilman ulosvirtaus-ta varten.

Koe suoritettiin muuten samalla tavalla kuin edelliset räystäskokeet, paitsi tässä kokeessa ei mitattu palotehoa, koska osa palamiskaasuista ei kulkeutunut keräyshuuvaan, vaan purkautui koehalliin.

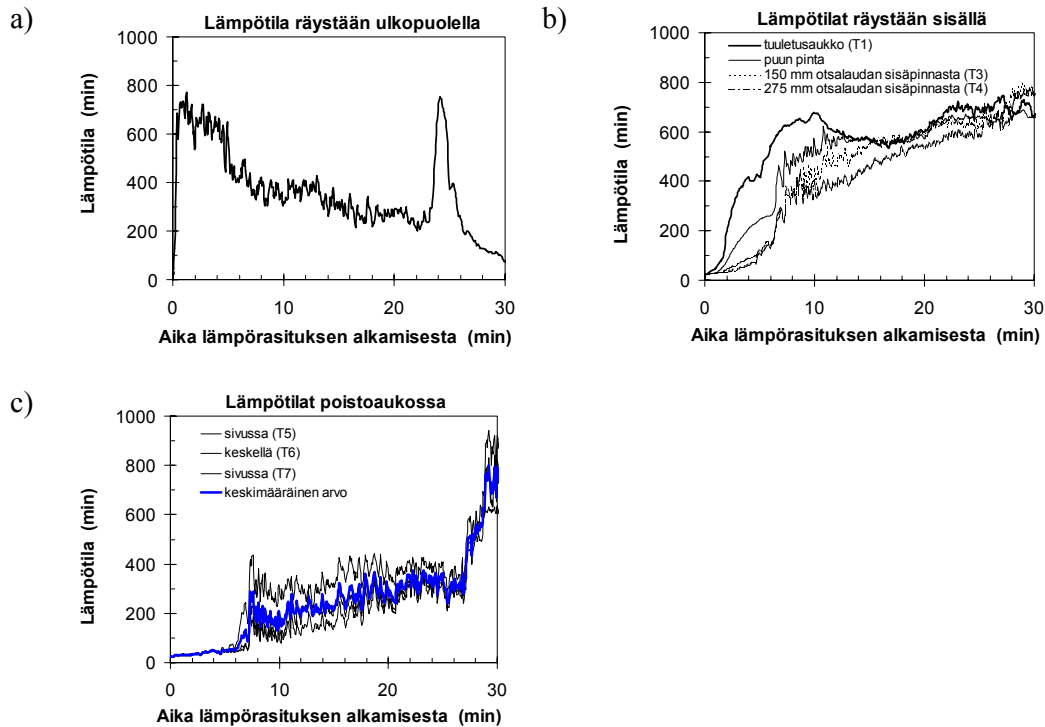
Kokeessa kiinnitettiin erityistä huomiota koetilan ilmavirtauksiin. Tuuletusraossa ennen palorasituksen alkamista tapahtuvaa virtausta tutkittiin kynttilän liekkiä ja virtausnopeusmittarin (anemometri) avulla. Tuuletusraon lähelle viety kynttilän liekki suuntautui hieman ulospäin (Kuva A21), mikä osoittaa, että vähäinen ilmavirtaus kulki tuuletusraosta ulospäin. Virtausnopeusmittauksen mukaan tämän ilmavirran nopeus oli n. 0,2–0,3 m/s.



*Kuva A21. Valokuva ilman virtauksesta tuuletusraossa ennen räystäskoetta 4.*

Räystäskokeessa 4 mitatut lämpötilat on esitetty kuvassa A22. Lämpötila räystään tuuletusraossa lähti 2 minuutin kohdalla nousemaan tasaisesti noin 150 °C:sta ja saavutti noin 8 minuutin kohdalla lämpötilan 600 °C. Lämpötila tasaantui suunnilleen tälle tasolle kokeen loppuajaksi (vaihteluväli 550–730 °C).

Lämpötila kattolaudoituksen alapinnassa nousi noin 6,5 minuutissa lähelle 300 °C:ta, jonka jälkeen se nousi äkillisesti noin 450 °C:seen (puu alkoi palaa). Tämän jälkeen kattolaudoituksen alapinnan lämpötila nousi hitaasti ja saavutti kokeen lopussa noin 700 °C:n lämpötilan.



Kuva A22. Rästäskokeessa 4 mitatut lämpötilat: a) räystään ulkopuolella (T0), b) räystään sisällä ja c) poistoaukossa. Lämpötila-anturi T0 irtosi paikaltaan noin 5 minuutin kohdalla eivätkä sen lukemat tämän jälkeen kuvaa räystäällä vallitsevaa lämpötilaa.

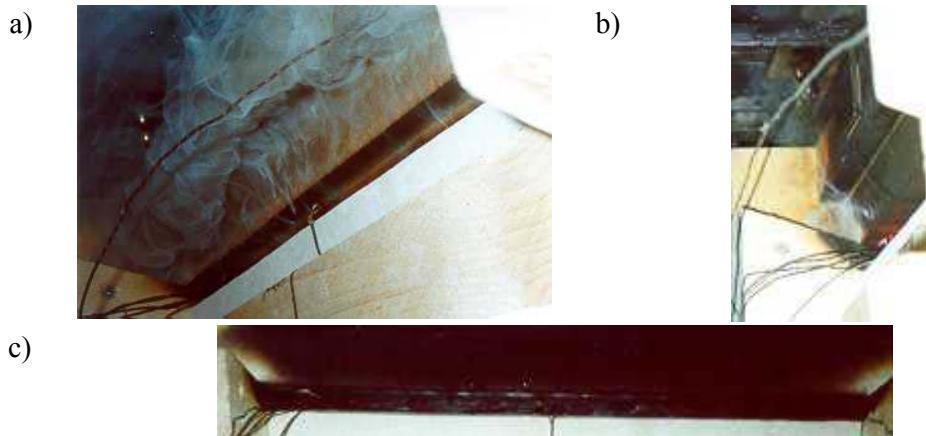
Räystään sisällä kaasun lämpötila oli 5 minuuttiin saakka alhainen pysyen alle 100 °C:ssa. Ilmeisesti kattolaudan palamisen alkamisen vuoksi kaasun lämpötilat nousivat noin 7 minuutin kohdalla 330–360 °C:seen. Tämän jälkeen kaasun lämpötila nousi vähitellen siten, että se saavutti 600 °C runsaan 20 minuutin kohdalla. Kokeen lopussa kaasun lämpötila räystään oli noin 780 °C.

Lämpötilat ilman ulosvirtausaukossa pysyttelivät 6 minuuttiin saakka alle 70 °C:ssa. Tämän jälkeen lämpötilat aukon keskellä ja edestä katsoen oikeassa reunassa nousivat nopeasti siten, että 8 minuutissa mitattujen lämpötilojen keskiarvo nousi lähelle 300 °C:ta. Lämpötilat ilman ulosvirtausaukon vasemmalla reunalla nousivat nopeasti siten, että 8 minuutissa mitattujen lämpötilojen keskiarvo nousi lähelle 300 °C:ta. Lämpötilat ilman ulosvirtausaukon vasemmalla reunalla kävivät hetkellisesti noin 430 °C:ssa, mutta pienivät sitten lähelle arvoa 300 °C. Tämän jälkeen lämpötilat ulosvirtausaukossa pysyivät suunnilleen ennallaan ylittäen ajoittain 300 °C, kunnes ne noin 15–16 minuutin kohdalla nousivat aukon vasemmalla reunalla noin 400 °C:seen. Tämän jälkeen aina noin 27 minuuttiin saakka lämpötilat ulosvirtausaukossa vaihtelivat 170 ja 420 °C välillä, kunnes ne lähtivät nopeaan nousuun saavuttaen noin 900 °C 29 minuutin kohdalla.

Räystäskokeen 4 aikana todettiin sama ilmiö kuin kokeessa 3: koekappaleen pidennetty alalautoitus ja -pellitys ohjasivat liekkiä ulospäin räystäään tuuletusraosta, eikä hormi-ilmiön aiheuttamaa imua tuuletusraosta räystäään sisälle havaittu. Vaikka räystääs paloi voimakkaasti, lämpötilat sen sisällä pysyttelivät räystäään suhteellisen alhaisina (ks. Kuva A23).



*Kuva A23. Räystääs paloi voimakkaasti, mutta liekit eivät työntyneet sisään sen tuuletusaukosta (kuva 11:00 polttimeen sytyttämisen jälkeen).*



*Kuva A24. Ulosvirtausaukko räystääskokeessa 4: a) aukosta purkautuu ulos savua (15:40), b) polttimeen sammuttamisen jälkeen liekit löivät jatkuvana virtana ulos aukosta (29:58) ja c) aukon yläpuolella ollut lauta on kokeen aikana lähinnä mustunut, ei juurikaan hiiltynyt.*

12 minuuttia kokeen alkamisen jälkeen ulosvirtausaukossa havaittiin paksumpaa savua, mutta liekkien havaittiin tunkeutuvan ulosvirtausaukosta jatkuvina selvästi myöhemmin eli 29 minuutin kohdalla. Tämä tapahtui kaksi minuuttia polttimen sammuttamisen jälkeen (ks. Kuva A24). Kokeen jälkeen ulosvirtausaukkoa tutkittaessa havaittiin, että sen yläpuolella sijainnut lankku oli pinnaltaan lähinnä mustunut, ei juurikaan hiiltynyt, joka osoittaa aukon olleen alttiina korkeille lämpötiloille ja liekeillä vain varsin lyhyen ajan.

## **Räystäystyyppi 5: kaksinkertainen räystäskouru palon etenemisen estäjänä**

Räystäskokeessa 5 tutkittiin räystääseen asennetun kaksinkertaisen räystäskourun vaikutusta tuloksiin. Tutkittu räystäsmalli on vain hieman muunneltu version RT-kortissa RT 85–10596 (1996) esitetystä versiosta. Räystään 5 kaaviokuva esitetään kuvassa A25. Valokuva räystäästä 5 esitetään kuvassa A27.

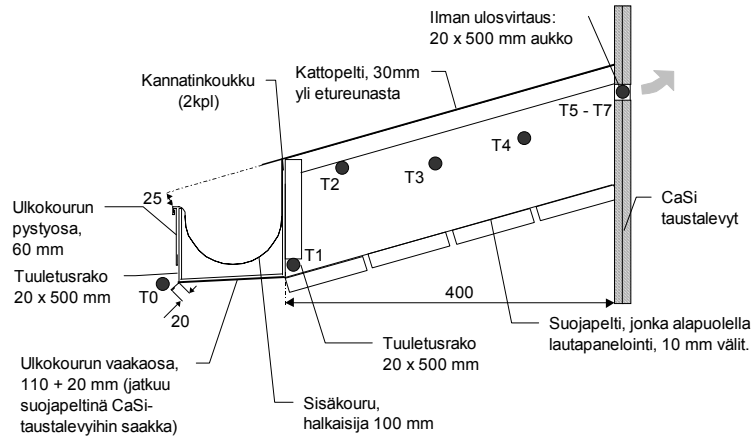
Koejärjestely esitetään kuvassa A26. Savukaasujen poisto oli järjestetty samalla tavalla kuin räystäskokeessa 4. Koekappale kiinnitettiin samaan CaSi-levyistä tehtyyn taustaan, jota käytettiin räystäskokeessa 4.

Koururakenne esitetään yksityiskohtaisemmin kuvassa A28. Se koostui kaksiosaisesta ulkokourusta sekä siihen liitetystä  $\phi$  100 sisäkourusta. Kourut olivat kiinnitetty suoraan toisiinsa, sekä kannatinkoukkujen välityksellä pistehitseillä (ks. Kuva A28). Ulkokourun pysty- ja vaakaosien väliin jätettiin  $20 \times 500 \text{ mm}^2$  tuuletusrako. Ulkokourun vaakaosaa jatkettiin siten, että se saatiin kiinnitettyä pistehitseillä räystään alapuolelle kiinnitettyyn suojaapeltiin. Näin saatiin aikaan yhtenäinen palolta suojaava rakenne räystään alapuolelle.

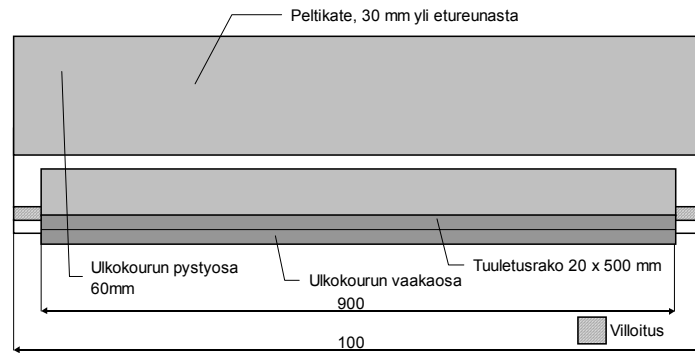
Tuuletusraossa ilman palorasitusta tapahtuvaa virtausta tutkittiin ennen koetta kynttilän liekin ja virtausnopeusmittarin (anemometri) avulla. Samalla tavalla kuin kokeessa 4 tuuletusraon lähelle viety kynttilän liekki suuntautui hieman ulospäin. Tämä osoittaa, että vähäinen ilmavirtaus kulki tuuletusraosta ulospäin. Virtausnopeusmittauksen mukaan tämän ilmavirran nopeus oli n. 0,3–0,4 m/s.

Räystäskokeen 5 lämpötilat esitetään kuvassa A29. Räystään toimintaa kokeen aikana havainnollistavat kuvat A30 ja A31.

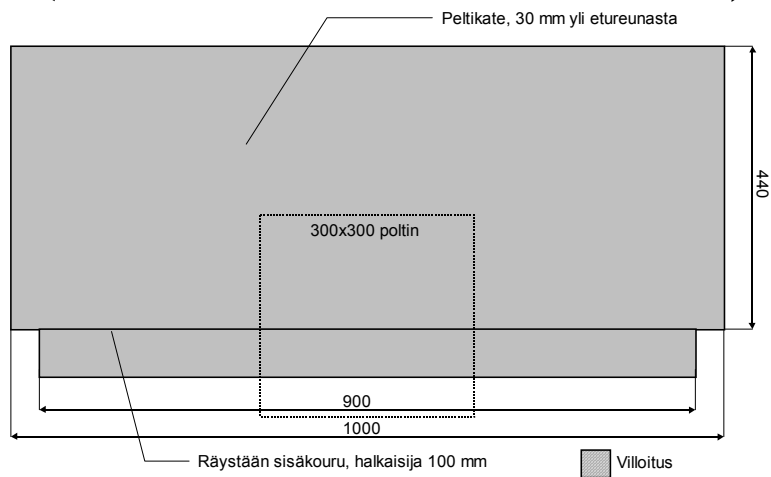
a)



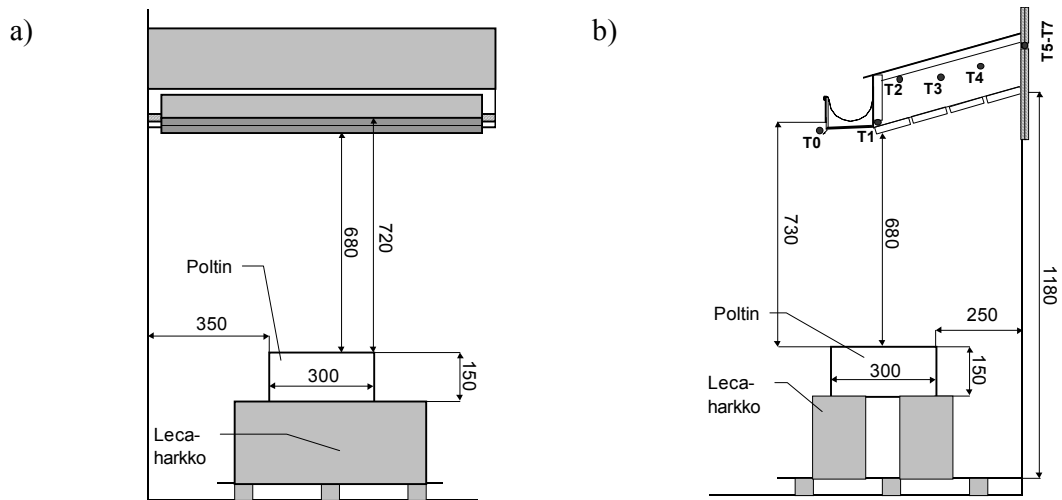
b)



c)



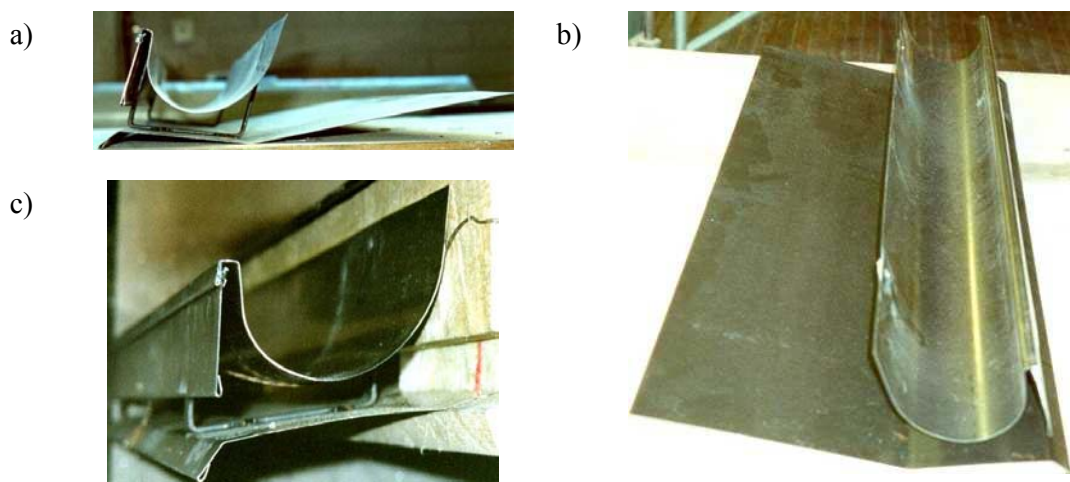
Kuva A25. Räystään 5 kaaviokuvat, tärkeimmät mitat ja lämpötilanmittausantureiden (T0–T7) paikat: a) räystäs sivulta, b) edestä ja c) ylhäältä katsottuna.



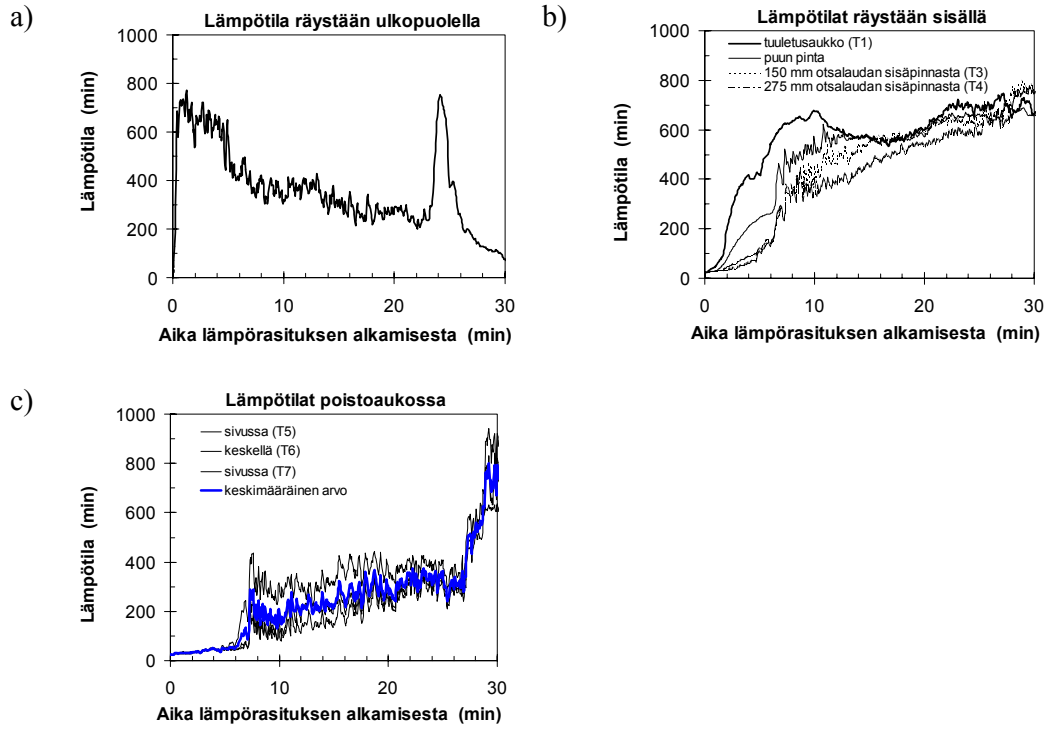
Kuva A26. Kaaviokuva räystäskokeen 5 järjestelyistä: a) edestä ja b) oikealta.



Kuva A27. a) Räystäs oikealta sivulta ja b) edestä.



Kuva A28. Kaksoisräystäskourun rakenne: a) ja b) kaksoisräystäskouru ennen asennusta ja c) kouru asennettuna räystääseen.



Kuva A29. Räystäskokeessa 5 mitatut lämpötilat: a) räystään ulkopuolella (T0), b) räystään sisällä ja c) poistoaukossa.



a)



b)



*Kuva A30. Voimakkaasta palamisesta huolimatta liekit eivät menneet sisään räystäs-  
koekappaleen 5 tuuletusaukosta: a) 1:00 ja b) 14:00 polttimen sytyttämisen jälkeen.*

a)



b)

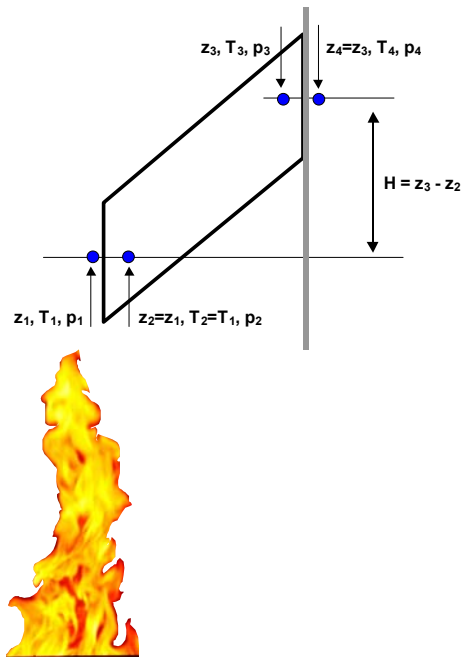


*Kuva A31. Ilman ulosvirtausaukko räystäskokeessa 5: a) 8:20, aukosta ei juurikaan pur-  
kaudu ulos savua ja b) 17:10, vaaleaa savua virtaa aukosta ulos.*

# Hormi-ilmiö räystäässä

## Räystään yksinkertaistettu virtausmekaaninen malli

Virtausteknisesti räystääs voidaan pelkistää virtauskanavaksi. Käytetään kuvassa A32 esitettyä merkintätapaa, jossa systeemin alapään korkeus, lämpötila ja paine ovat  $z_1$ ,  $T_1$  ja  $p_1$ . Kanavan yläpääta olosuhteita luonnehtivat vastaavat suureet ovat  $z_4$ ,  $T_4$  ja  $p_4$ . Korkeusero kanavan ylä- ja alapään välillä on  $H = z_4 - z_1$ . Tarkastelupisteet 2 ja 3 ovat kanavan sisällä samoilla korkeuksilla kuin niiden lähellä olevat kanavan ulkopuolella olevat pisteet.



*Kuva A32. Räystään yksinkertaistettu virtaustekninen kuvaus seinän lävistävänä virtauskanavana. Yksinkertaisuuden vuoksi piste 1 on virtauskanavan ulkopuolella alapään kohdalla ja piste 4 ulkopuolella yläpään kohdalla. Pisteet 2 ja 3 ovat kanavan sisällä: piste lähellä pistettä 1 ja piste 3 lähellä pistettä 4.*

Seuraavassa sovelletaan tähän virtaussysteemiin ajasta riippumatonta Bernoullin yhtälöä (differentiaalimuoto)

$$\frac{dp}{\rho} + vdv + gdz = 0, \quad (1)$$

missä  $p$  on paine,  $\rho$  kaasun tiheys,  $v$  kaasun virtausnopeus,  $g$  on putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ja  $z$  on korkeus.

Bernoullin yhtälön integrointi virtaviivaa pitkin pisteestä  $i$  pisteeseen  $j$  antaa seuraavan sidosehdon eri pisteissä vallitseville olosuhteille:

$$\int_i^j \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} \rho_j v_j^2 - \frac{1}{2} \rho_i v_i^2 + g \rho_j z_j - g \rho_i z_i = 0, \quad (2)$$

Kaavassa (2) olevan integraalin laskenta riippuu kaasun paineen ja tiheyden yhteydestä. Seuraavassa tarkastellaan yksinkertaista tapausta, jossa lämpötilaa virtauskanavan sisällä voidaan pitää vakiona.

Vakiolämpötilasysteemeissä ideaalikaasun tiheys ja paine riippuvat toisistaan seuraavasti:

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \quad (\text{isoterminen}), \quad (3)$$

missä suure  $R$  on yleinen kaasuvakio ( $8,3143 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) ja  $M$  on kaasun moolimassa. Palokaasujen moolimassan voidaan arvioida olevan sama kuin ilmalle eli  $M \approx 0,02895 \text{ kgmol}^{-1}$ . Tällöin kaavan (2) integraali kanavan sisällä olevasta pisteestä 2 pisteeseen 3 antaa tuloksen (Bird ym. 1960, s. 461)

$$\int_2^3 \frac{dp}{\rho} = \frac{RT_1}{M} \int_2^3 \frac{dp}{p} = \frac{RT_1}{M} \ln \frac{p_3}{p_2} \approx \frac{RT_1}{MP_\infty} (\Delta p_2 - \Delta p_3) = \frac{\Delta p_2 - \Delta p_3}{\rho_1} \quad (\text{kanavan sisällä}), \quad (4)$$

missä kaavan toiseksi viimeinen muoto on saatu merkitsemällä  $p_k = P_\infty - \Delta p_k$ , missä  $P_\infty$  on normaali ilmanpaine (noin 101 kPa) ja pisteiden  $k = 2$  tai  $3$  paine-erot normaaliin ilmanpaineeseen nähden ovat pieniä:

$$\Delta p_k \ll P_\infty. \quad (5)$$

Suure  $\rho_1$  on kaasun tiheys lämpötilassa  $T_1$ .

Pisteiden 3 ja 4 välillä lämpötila muuttuu ja integraalin  $\int_i^j dp/\rho$  laskemiseksi pitää käyttää tähän tilanteeseen soveltuvaa ideaalikaasun tilanyhtälöä

$$p\rho^{-\gamma} = \text{vakio}, \quad (6)$$

missä  $\gamma \approx 1,4$ . Tällöin saadaan

$$\int_3^4 \frac{dp}{\rho} = \frac{P_3^{1/\gamma}}{\rho_3} \int_3^4 \frac{dp}{P_3^{1/\gamma}} = \frac{P_3}{\rho_3} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \approx \frac{P_\infty - \Delta p_3}{\rho_3} \left( \frac{\Delta p_3}{P_\infty} - \frac{\Delta p_4}{P_\infty} \right) \approx \frac{\Delta p_3 - \Delta p_4}{\rho_3}. \quad (7)$$

Saman muotoinen yhteys pätee myös pisteiden 1 ja 4 välillä.

Tässä vakiolämpötilasysteemissä pisteiden 1, 2 ja 3 lämpötilat ovat samat. Lämpötilan  $T_4$  voidaan olettaa olevan  $T_\infty$ . Pisteissä 1 ja 4 voidaan kanavan suuntaisten virtausnopeuksien olevan niin pieniä, että ne voidaan olettaa nolliksi. Pisteessä 1 vallitsevaksi paineeksi voidaan olettaa normaali ilmanpaine, eli

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 = T_3, \quad T_4 \approx T_\infty; \\ v_1 \approx 0, \quad v_4 \approx 0; \\ P_1 \approx P_\infty \text{ (eli } \Delta p_1 = 0). \end{aligned} \quad (8)$$

Virtauskanavassa pätee massan säilymlaki

$$\rho v = \text{vakio (virtauskanavassa)}, \quad (9)$$

jonka mukaan virtausnopeudet  $v_2$  ja  $v_3$  ovat yhtä suuret,

$$v_2 = v_3, \quad (10)$$

koska kaasun tiheydet näissä pisteissä ovat samat (lämpötilat ovat samat).

Bernoullin yhtälön ja yllä esitettyjen oletusten soveltaminen eri pisteiden välillä antaa seuraavat yhtälöt:

$$\begin{aligned} 1 \rightarrow 2: \quad P_2 - P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_2^2 &= 0 \\ \Rightarrow \Delta p_2 &= \frac{1}{2} \rho_1 v_2^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 2 \rightarrow 3: \quad \frac{\Delta p_2 - \Delta p_3}{\rho_1} + gH &= 0 \\ \Rightarrow \Delta p_3 &= \Delta p_2 + g\rho_1 H \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 3 \rightarrow 4: \quad \frac{\Delta p_3 - \Delta p_4}{\rho_1} + \frac{1}{2} v_3^2 &= 0 \\ \Rightarrow \Delta p_4 &= \Delta p_3 + \frac{1}{2} \rho_1 v_2^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$1 \rightarrow 4: \quad \frac{\Delta p_1 - \Delta p_4}{\rho_4} + gH = 0 \quad (14)$$

$$\Rightarrow \Delta p_4 = g\rho_\infty H$$

Yhdistämällä nämä kaavat saadaan räystäään tuuletusaukolla vaikuttavaksi paine-eroksi

$$\Delta p_2 = \Delta p_3 - g\rho_1 H = \Delta p_4 - \frac{1}{2}\rho_1 v_2^2 - g\rho_1 H = g\rho_\infty H - \frac{1}{2}\rho_1 v_2^2 - g\rho_1 H, \quad (15)$$

josta yhtälön (11) kanssa voidaan ratkaista sisään kulkevan virtauksen nopeus  $v_2$ :

$$v_2 = \sqrt{\frac{gH(\rho_\infty - \rho_1)}{\rho_1}} = \sqrt{gH\left(\frac{T_1}{T_\infty} - 1\right)}. \quad (16)$$

Räystäskokeessa 1 havaittiin tuuletusaukkoon syntyvän imun, joka veti liekkejä räystäään sisälle. Tässä kokeessa poistoaukko sijaitsi noin 30 cm korkeammalla kuin räystäään tuuletusaukko eli virtauskanavamallissa kokeelle  $H \approx 0,3$  m. Ympäristön lämpötila oli runsaat  $20^\circ\text{C}$  eli  $T_\infty$  oli noin 295 K. Lämpötilat räystäään sisällä nousivat keskimäärin noin  $700^\circ\text{C}$ :seen eli  $T_1$  oli noin 970 K. Imun virtausnopeudelle saadaan siten arvio  $v_2 \approx 2,6$  m/s. Imu on siis varsin tehokas.

## Viitteet

Bird, R. B., Stewart, W. E. & Lightfoot, E. N. 1960. Transport Phenomena. 1. painos. New York: John Wiley & Sons, Inc. 780 s.



## Liite B: Koetuloksia ulkoisesti syttyneen palon leviämisestä puujulkisivulla

VTT on tehnyt 1990-luvulla useita kokeellisia tutkimuksia pystysuoralla pinnalla etenevistä paloista (Hakkarainen ym. 1996, Kokkala ym. 1997). Alla on esitetty joitakin puupinnalla etenevää paloa tarkastelevia kokeita, joissa palolähteenä on ulkoinen sytytys (taulukot B1 ja B2). Tässä työssä päämielenkiinto on puupintaa koskevissa tuloksissa. Lastulevytuloksista nähdään, että puuta koskevat tulokset ja johtopäätökset eivät koske pelkästään puutavaraa, vaan niillä on laajempi soveltuvuus.

Puupinnalla etenevää paloa koskeva aineisto esitetään kuvissa B1 ja B2. Puulla tehdyistä voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Kun puupinnan takana on 50 mm mineraalivilla, palo etenee pystysuuntaisesti keskimääräisesti nopeudella 20 cm/min. Etenemisnopeus hidastuu palon aikana: noin 10 minuuttiin saakka (noin 0–4 m), palo eteni keskimäärin nopeudella 25 cm/min ja myöhemmin, 10 minuutista eteenpäin (4–7,5 m) keskimääräinen etenemisnopeus oli 15 cm/min.
- Kun puupinnan takana on kosteahko vaneri, kosteuspitoisuus 15–20 %, niin palo etenee hitaasti, keskimäärin 4 cm/min. Hakkaraisen ym. raportissa (1996) esitetyn arvion mukaan verrattuna kosteudeltaan 10 % vaneriin kosteuseron vaikutus palon etenemisnopeuteen on jopa 30–60 %. Tässä oletetaan vaikutuksen olevan tuolta väliltä arvona 50 %.
- Kun puupinnan takana on ilmarako, jossa ilma ei pääse virtaamaan pystysuunnassa, palon keskimääräinen etenemisnopeus on sama, kuin silloin, kun puu takana on eriste, 20 cm/min.
- Kun puupinnan takana on ilmarako, jossa ilma pääsee virtaamaan pystysuunnassa, palon keskimääräinen etenemisnopeus noin kaksinkertaistuu arvoon 40 cm/min.

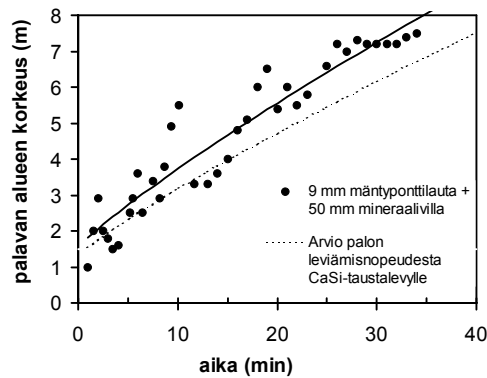
Lastulevyllä saadut tulokset ovat samansuuntaisia: leviämisnopeus on hieman pienempi mm. siksi, että sen tiheys on korkeampi kuin puun. Kun kuumat kaasut pääsevät virtaamaan takana olevassa ilmaraossa, palon leviämisnopeus noin kaksinkertaistuu.

Lastulevyllä tehtiin koe, jossa taustamateriaalina oli rakennuslevy. Tämän muutoksen tuottamaa eroa palon etenemisnopeuteen ei kuitenkaan mitattu suoraan. Tämän muutoksen raportoitiin vähentävän pinnan luovuttamaa palotehoa noin 15 %:lla. Se johtuu siitä,

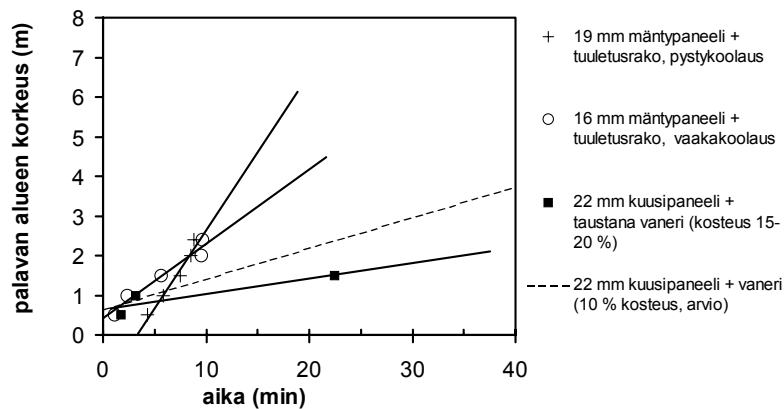
että paremmin lämpöä johtavan taustalevyn tapauksessa julkisivulevyn läpi kulkee enemmän energiaa kuin silloin, kun taustana on villaeriste. Tällöin julkisivun pinnan pyrolysoitumiseen on tarjolla vähemmän energiaa, joten pyrolyysi hidastuu samoin kuin myös pyrolyysirintaman etenemisnopeus. Täten pyrolyysirintaman etenemisen hidastuminen on verrannollista palotehon alenemiseen ja siksi voidaan arvioida, että palon etenemisnopeus vähenisi suunnilleen saman verran kuin paloteho eli 15 %.

Kootut tulokset esitetään alla olevissa kuvissa. Kuvassa B1 on esitetty koetulokset sekä niiden perusteella arvioidut tulokset. Kuvassa B2 esitetään yksinkertaistettu kaavio erilaisten taustaratkaisujen, avoin tai suljettu tuuletusrako sekä erilaiset taustamateriaalit tuuletusraottomassa rakenteessa, vaikutuksesta palon etenemisnopeudesta puupinnalla.

a)



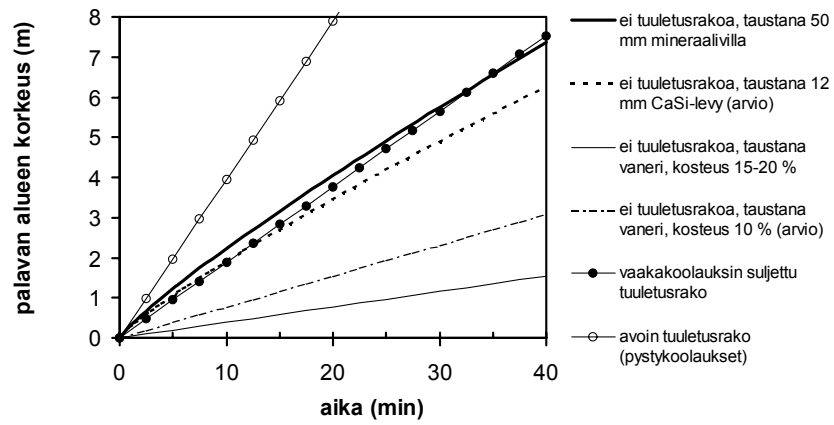
b)



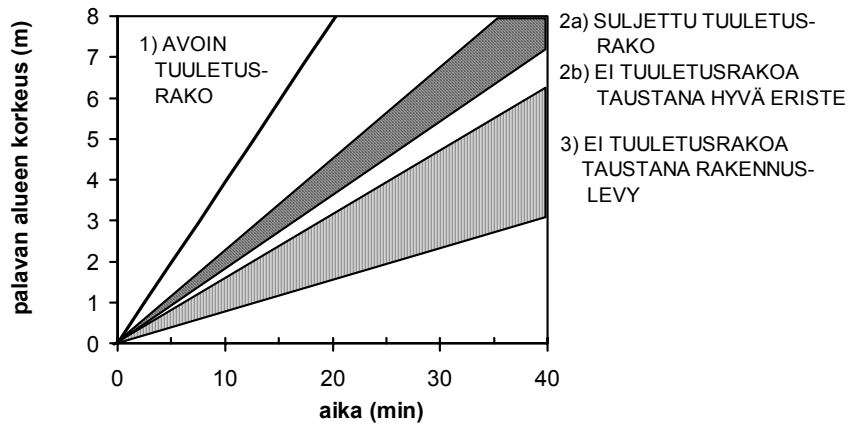
Kuva B1. Koetuloksia pystysuuntaisella puupinnalla leviävän palon etenemisestä: a) Kokkalan ym. (1997) raportissa esitetyt tulokset ja b) Hakkaraisen ym. (1996) esittämät tulokset.



a)



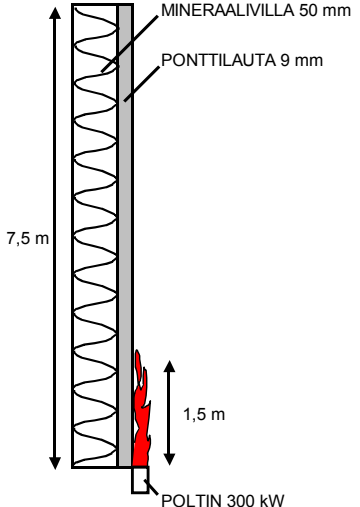
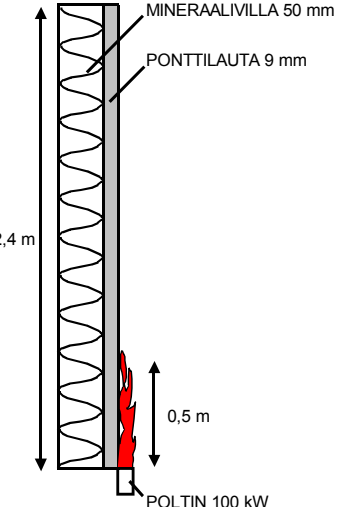
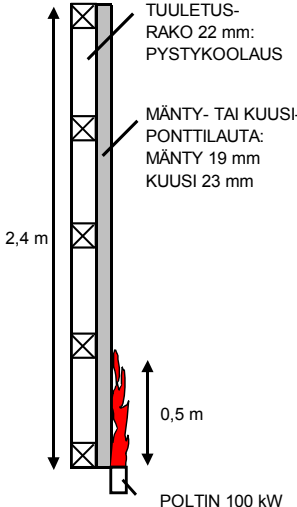
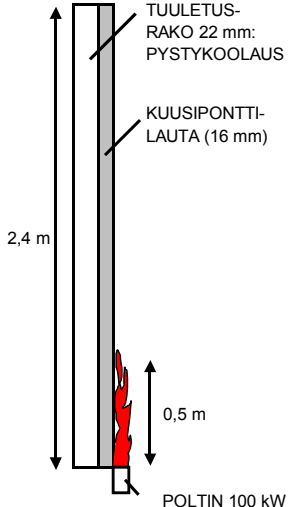
b)



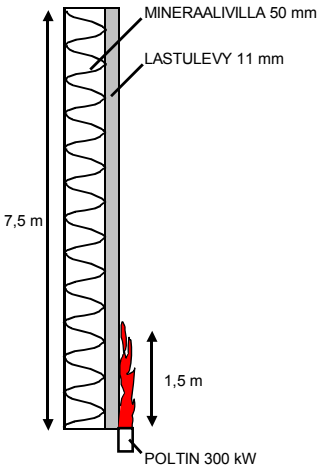
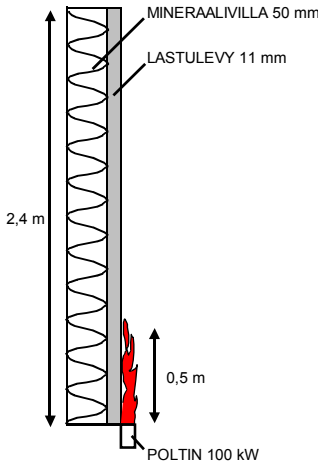
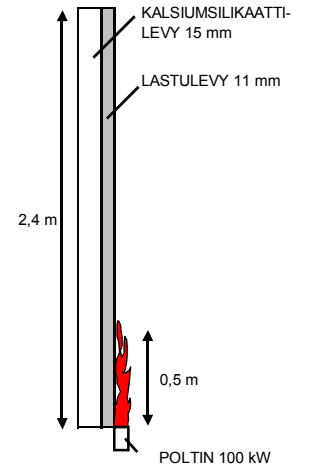
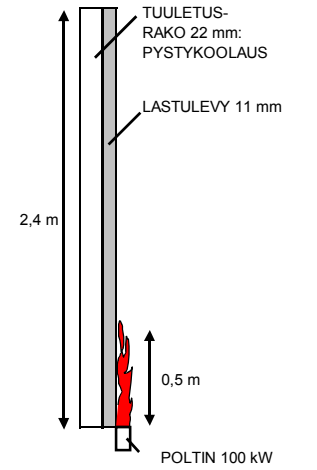
Kuva B2. a) Kokkalan ym. (1997) ja Hakkaraisen ym. (1996) esittämät tulokset yhdistettynä siten, että palon leviämisen alkaminen tapahtuu hetkellä 0 s korkeudelta 0 m. b) Yksinkertaistettu kaavio pystysuuntaisella puupinnalla leviävän palon etenemisestä.

Taulukko B1. Puulla tehtyjä kokeita.

B4

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponttilauta (9 mm) mineraalivillan (50 mm) päällä (Kokkala ym. 1997)</li> <li>• 7,5 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 300 kW, liekin korkeus 1,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palon keskimääräinen etenemisvauhti 15–17 cm/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponttilauta (9 mm) mineraalivillan (50 mm) päällä (Kokkala ym. 1997)</li> <li>• 2,4 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 100 kW, liekin korkeus 0,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palon keskimääräinen etenemisvauhti 13 cm/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maalattu kuusi ja mänty (23 mm) + tuuletusrako (22 mm), vaakakoolaus (Hakkarainen ym. 1996)</li> <li>• 2,4 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 100 kW, liekin korkeus 0,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paloteho n. 15 % pienempi kuin mineraalivillan kanssa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maalattu kuusi (23 mm) + tuuletusrako (22 mm), pystykoolaus (Hakkarainen ym. 1996)</li> <li>• 2,4 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 100 kW, liekin korkeus 0,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palon keskimääräinen etenemisvauhti 28 cm/min</li> </ul>
---	--	---	--

Taulukko B2. Lastulevyllä tehtyjä kokeita.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastulevy (11 mm) mineraalivillan (50 mm) päällä (Kokkala ym. 1997)</li> <li>• 7,5 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 300 kW, liekin korkeus 1,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palon keskimääräinen etenemisvauhti 15–17 cm/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastulevy (11 mm) mineraalivillan (50 mm) päällä (Kokkala ym. 1997)</li> <li>• 2,4 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 100 kW, liekin korkeus 0,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palon keskimääräinen etenemisvauhti 13 cm/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastulevy (11 mm) kalsiumsilikaattilevyn (15 mm) päällä (Kokkala ym. 1997)</li> <li>• 2,4 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 100 kW, liekin korkeus 0,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paloteho n. 15 % pienempi kuin mineraalivillan kanssa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastulevy (12 mm) + tuuletusrako (22 mm), pystykooraus (Hakkarainen ym. 1996)</li> <li>• 2,4 m korkea seinämä</li> <li>• Poltin 100 kW, liekin korkeus 0,5 m</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palon keskimääräinen etenemisvauhti 28 cm/min</li> </ul>
--	---	--	---

## **Viitteet**

Hakkarainen, T., Oksanen, T. & Mikkola, E. 1996. Puujulkisivujen paloturvallisuus sprinklatuissa kerrostaloissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 29 s. + liitt. 16 s. (VTT Tiedotteita 1736) ISBN 951-38-4892-2

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

# Liite C: Kirjallisuustietoja kaapelien palo-ominaisuuksista

## Kaapelien syttyminen

Sähkökaapelit voivat syttyä joko ulkoisen tai sisäisen lämmönlähteen vaikutuksesta (Elliot & Whiteley 2000). Sisäinen lämmönlähde on resistiivinen lämpeneminen jonka syynä voi olla ylisuuri virta. Ylivirtasuojat toimivat tyypillisesti vasta, kun virta johtimessa ylittää moninkertaisesti johtimen mitoitusarvon. Pelkistetysti kolme syttymistapa on mahdollisia:

1. ylivirta on niin pieni, että kaapelin vaippamateriaali vain lämpenee muttei lähde hajoamaan termisesti;
2. ylivirta on niin suuri, että kaapelin vaippamateriaali hajoaa termisesti, mutta niin pieni, että ylivirtasuoja ei laukea;
3. ylivirta on niin suuri, että ylivirtasuoja laukeaa; sulaneen kuparin (yli 1 000 °C) mahdollisuus.

Toiseen skenaarioon liittyvä paloriski on ensisijaisesti savun ja myrkyllisten kaasujen muodostus.

Keski-Rahkosen ja Mangsin (2001) mukaan kaapelissa oleva löysä liitos (pistemäinen vikakohta, jossa suuri resistanssi) on todennäköisempi kaapelin lämpenemiseen johtava syy kuin ehjän kaapelin ylikuormitus. Löysien liitosten syttyminen tapahtuu niin pienillä teho- ja energiatasoilla ja nopeasti, että syttyminen myös aivan pienissä paristokäyttöisissä laitteissa on mahdollista, eikä suojaus sulakkeilla ole tehokasta. Esim. poikkipinta-alaltaan 1 mm<sup>2</sup>:n PVC-kuorisessa johdossa jo 4,6 W:n sähköteho johtaa 200 asteen lämpötilan nousuun 1 minuutin aikana, joka riittää sulattamaan PVC:n. Vastaavassa ehjässä johtimessa tähän lämpönnousuun päästäisiin vasta 50–100 A:n virroilla.

## Palo-ominaisuuksien testauksesta

VTT:llä on tehty esitutkimus standardien ja määräysten kehitystarpeesta kaapelien paloturvallisuuden osalta (RTE1282/01). Esitutkimuksessa käytettyjä lähteitä ovat mm. Ympäristöopas 39 (1998), Ympäristöministeriön opas 1/1995 (1995) ja suomalaiset standardit SFS 6000–5–52 (johtojärjestelmät) ja SFS 6000–4–48 (pienjännite-sähköasennusten suojausmenetelmät). Mikään näistä eri erityisesti puutu sähköasennuksien paloturvallisuuteen onteloissa vaan yleisesti sähköturvallisuuteen kaikissa asennuk-

sisä. Yleisesti kaapeleilta vaaditaan standardin EN 50265, ja johtojärjestelmän muilta osilta standardien SFS-EN 50085 ja SFS-EN 50086 vaatimusten täyttämistä. Kuitenkin, mikäli kaapelit eivät ole standardin EN 50265 vaatimusten mukaisia, niitä saa käyttää yhden palo-osaston sisällä lyhyillä etäisyyksillä, esim. liitettäessä sähkölaite kiinteään asennukseen. Asennuksissa, joissa esiintyy 'erityisiä vaaratekijöitä', voi olla tarpeen käyttää kaapeleita, jotka täyttävät standardin EN 50266 niputettuja kaapeleita koskevat vaatimukset.

Will & Hosser (2000) ovat tutkimuksessaan verranneet kolmea käytössä olevaa kaapelien palokoemenetelmää (DIN 4102-1, IEC 60332-3 ja ISO 5660). Menetelmien DIN 4102-1 ja IEC 60332-3 todetaan tarkastelevan paikallisen syttymislähteen aiheuttamaa palonleviämisen uhkaa kaapelissa, kun taas kartiokalorimetrissä lämpövuoto kohdistetaan kaikkialle näytteeseen; näin ollen kartiokalorimetrikoe vastaa tilannetta, jossa johtoasennus joutuu alttiiksi kehittyneelle huonepalolle. Tutkimus esittää paisuvilla suoja-aineilla päällystetyille kaapeleille koetuloksia joiden mukaan alkavan palon skenaarioilla testatut ja hyväksytyt kaapelit osallistuvat paloon, mikäli ne altistuvat kehittyneelle huonepalolle. Tutkimus ehdottaa uutta täyden mittakaavan koemenetelmää (room test), jossa yhdistetään paikallinen palo ja ulkoinen lämpövuoto.

Englannissa BRE:ssä on tehty laaja tutkimus onteloihin asennettujen kaapelien aiheuttamista palovaaroista ja niiden torjumisesta (Fardell ym. 1999, 2000). Siinä tehtiin täyden mittakaavan koesarja, jossa on tutkittu vaakasuorien kaapelihyllyjen palamista alaslaskettujen kattojen onteloissa, kun kaapelit syttyvät onteloon pääsevien huonepalon liekkien vaikutuksesta. Palon oletetaan pääsevän onteloon alaslasketussa katossa olevasta aukosta (onteloon pääsevä paloteho luokkaa 100–200 kW). Kokeissa tätä tilannetta edusti 1 MW:n suuruinen palo, jonka liekit tunkeutuivat onteloon puuttuvan alakaton levyn (akustinen tiili) muodostamasta aukosta. Tutkimuksen yksi tulos tukee Willin ja Hosserin tutkimuksessa (Will & Hosser 2000) esitettyjä johtopäätöksiä: kaapelit, jotka läpäisevät pienen mittakaavan pystysuorille näytteille tehdyt testit, voivat osallistua paloon, jos ne joutuvat alttiiksi kehittyneelle palolle. Tutkimus vertasi myös IEC 60332-3 -testin ja NFPA 262 -testin läpäisseiden kaapelien osallistumista paloon. NFPA 262 (Steiner-tunneli) on suuremman mittakaavan ja suuremman lämpöaltistuksen koe, jonka läpäisseet kaapelit osallistuivat vähemmän paloon ontelossa ja tuottivat vähemmän savua ja myrkyllisiä kaasuja. Erikoisena huomiona Fardellin ym. (1999, 2000) tutkimuksessa tehdyissä kokeissa oli ontelotilan ilmanvaihdon merkitys: IEC 332-3:n läpäisseiden kaapelien tapauksessa havaittiin, että kun huonepaloa simuloiva kaasupoltin sammutettiin, kaapelit tuottivat pyrolyysikaasuja jotka aiheuttivat uudelleensyttymisen, mikäli ontelotilan ilmanvaihto oli pysäytetty (palava kaasuseos pääsi syntymään). Palaminen alensi tilan happipitoisuutta, mutta nosti lämpötilaa. Tämä johti syttymis-sammumis-sykliin, joka päättyi vasta kun tila oli päässyt jäähtymään tarpeeksi. Ontelo-

tilasta huonetilaan pääsevien kaasujen myrkyllisyys todettiin uhaksi, erityisesti mikäli ontelon saumojen tiiviys kärsii ontelopalon seurauksena.

## Viitteet

Elliot, P. J. & Whiteley, R. H. 2000. The measurement of smoke production from electrical wires under conditions of current overload. *Fire and Materials*, Vol. 24, s. 259–263.

Fardell, P. J., Colwell, R., Hoare, D., Chitty, R. & Hoover, J. 1999. Full-Scale BRE/FRS Fire Tests of "Local Area Network" (LAN) Data Communication Cables: A "Partners in Technology" Study. Teoksessa: Interflam '99. International Interflam Conference, 8th Proceedings. Volume 1. Edinburgh, Scotland, 29 June – 1 July 1999, London, GB: Interscience Communications Ltd. S. 393–406.

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

Keski-Rahkonen, O. & Mangs, J. 2001. Kaapelin lämpiäminen ylikuormituksesta tai löysästä liitoksesta. *Palontorjunta-tekniikka*, Nro. 3–4/2002, s. 91–93.

RTE1282/01. 2001. Kaapelien paloturvallisuus. Standardien ja määräysten kehitystarpeet – Esitutkimus. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 12 s. (Julkaisematon tutkimusselostus)

Will, J. & Hosser, D. 2000. Comparison of the burning behaviour of electric cables with intumescent coating in different test methods. *Kerntechnik*, Vol. 65, Nro. 2, s. 2–3.

Ympäristöministeriön opas 1/1995. 1995. EU:n rakennustuotedirektiivi – järjestelmä – direktiivi – muut asiakirjat. Helsinki: Ympäristöministeriö. 290 s. ISBN 951-731-126-5

Ympäristöopas 39. 1998. Rakennusten paloturvallisuus & Paloturvallisuus korjauskentämissä. Helsinki: Ympäristöministeriö. 160 s. ISBN 952-11-0264-0



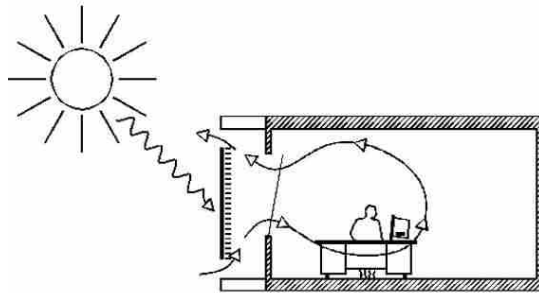


## Liite D: Kaksoislasijulkisivujen rakennustekniikkaa

Julkisivun toteuttaminen kaksoislasijulkisivuna on voimakkaasti lisääntynyt rakenneratkaisu. Pinta-alana laskettuna kaksoislasijulkisivujen määrä kasvoi voimakkaasti etenkin vuosina 2000 ja 2001: kun 1990-luvun lopulla (vuosina 1998 ja 1999) kaksoislasijulkisivujen pinta-ala oli suunnilleen vakio, alle 10 000 seinä-m<sup>2</sup>, niin vuonna 2000 pinta-ala lähes kasvoi lähes 15 000 seinä-m<sup>2</sup>:iin ja vuonna 2001 kaksoislasijulkisivujen pinta-ala oli jo 35 000 seinä-m<sup>2</sup> (Tenhunen ym. 2001, s. 9).

### Yleiskuvaus

Kaksoisjulkisivu koostuu kahdesta julkisivukerroksesta, joita erottaa ilmatila. Yleisesti ottaen ulomman julkisivun tarkoituksena on toimia suojana sääolosuhteita vastaan, jolloin sisemmän julkisivun ikkunoita voidaan avata ja sulkea sääolosuhteista riippumatta riittävän sisäilman laadun takaamiseksi. Ulompi julkisivu ehkäisee myös auringon säteilyn lämmittävää vaikutusta rakennuksen sisällä sekä torjuu esim. liikenteen aiheuttamaa melua. Periaatekuva kaksoisjulkisivusta on esitetty kuvassa D1. Jälkimmäisistä syistä kaksoisjulkisivuja käytetään erityisesti eteläpuoleisilla seinustoilla sekä vilkkaasti liikennöityjen väylien läheisyydessä. Ulompi julkisivu rakennetaan poikkeuksetta lasista. Sisempi julkisivu on myös useimmiten kokonaan lasia (muotivirtaus tämänhetkisessä arkkitehtuurissa) mutta voi olla myös muuta materiaalia.



*Kuva D1. Kaaviokuva: kaksoisjulkisivu ja sen viereinen huone.*

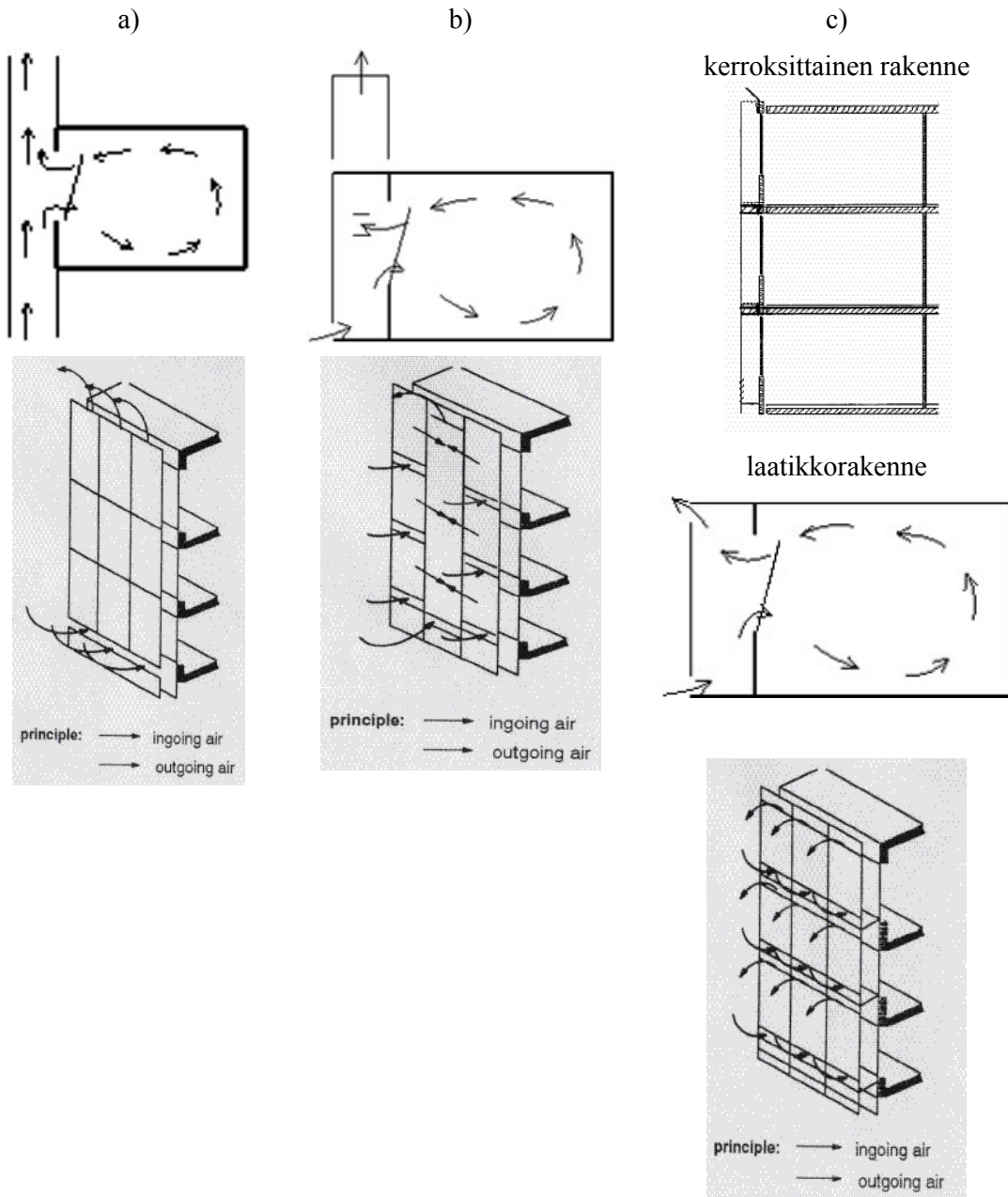
## Kaksoislasijulkisivujärjestelmät

Kaksoislasijulkisivujen rakenteissa on erotettavissa kolme eri päätyyppiä, ks. kuva D2 (Uttu 2001):

- Verhousvaippasysteemi (curtain wall system, kuva D2a).
- Tuuletuskuilulla varustettu laatikkomainen rakenne, jossa kuilu voi ulottua koko rakennuksen korkeudelle ("shaft system", kuva D2b).
- Kukin kerros toimii erillisenä systeeminä (kerroksittainen rakenne, kuva D2c, ylempi kuva) ja laatikkomainen rakenne ("box system", kuva D2c, alempi kuva).

Kaksoislasijulkisivun lasipintojen etäisyys toisistaan voi vaihdella parista kymmenestä senttimetristä useisiin metreihin (Uttu 2001). Suomessa on toteutettu 300–2 000 mm:n syvyisiä onteloita (ks. taulukko D1). Tyypillinen ontelon syvyys Suomessa on noin 600–700 mm.

Kuvasta D1 havaitaan, että verhousvaippasysteemiä käyttäen rakennettu kaksoislasijulkisivu on vaarallisin tulipalon pystysuoran leviämisen kannalta, koska siinä onteloita ei ole jaettu pystysuunnassa. Palo voi levitä useaan yläpuoliseen kerrokseen laatikkomaiseen rakenteeseen yhdistetyssä kuilussa. Tämä on Suomessa vallitseva rakennustapa.



*Kuva D2. Lasijulkisivujärjestelmiä: a) koko rakennuksen korkuinen verhousvaippasysteemi, c) tuuletuskuilulla varustettu yksikerrosrakenne ja c) yksikerroksiset ratkaisut: kerroksittainen rakenne (ylempi) ja laatikkomainen rakenne (alempi). Nuolet kuvaavat tuuletukseen liittyviä virtauksia.*

Taulukko D1. Tietoja Helsingin seudulla toteutetuista kaksoislasijulkisivuista. Lähde: Uttu 2001.

RAKENNUS			KAKSOISLASIJULKISIVU					ONTELO		SISEMPI LASI	ULOMPI LASI			
Nimi, sijainti	krs. lkm	korkeus	pinta-ala m <sup>2</sup>	leveys m	tyyppi	rakennustapa	materiaalit	syvyys (mm)	huolto- taso	tyyppi	tyyppi	paksuus (mm)	korkeus (mm)	leveys (mm)
		m												
Sanomatalo, Helsinki	12	48	5 000	104	1	ulokepalkki	AISI	700	kyllä	triple I	T,L	12	3 750	1 300
Radiolinja, Espoo	8	32	10 000	313	1	ulokepalkki	AISI	650	kyllä	triple I	T	12	3 600	1 300
SysOpen Tower, Helsinki	16	64	5 800	91	1	ulokepalkki	hot galv, Al	550	kyllä	double I	T	8	3 600	1 300
Martela, Helsinki	4	16	1 800	113	1	ulokepalkki	AISI,Al	700	kyllä	I	T	12	3 600	1 350
Itämerentori, Helsinki	16	64	4 000	63	1	ripustettu runko	weather.Fe	925	ei	I	T	6-8	850	2 690
Nokia Ruoholahti, Helsinki	7	28	8 000	286	1	ripustettu runko	hot galv	900	ei	double I	T,print	6	3 600	1 350
Nokia K2, Espoo	5	20	1 900	95	1	ripustettu runko	AISI	600	kyllä	double I	T	6	900	1 500
Iso Omena, Espoo	5-7	24	1 000	42	1	ripustettu runko	hot galv	1 000	ei	I	T	8	2 000	2 600
Kone, Espoo	18	72	5 000	69	1	kehärakenne	hot galv,AISI	582	kyllä	I	T,print	8	3 900	13 500
Nokia Keilalahti, Espoo	5	20	8 600	430	1	kehärakenne	AISI, Al	690	kyllä	double I	T	6	3 600	13 500
High Tech Center, Helsinki	7	28	12 000	429	2	ulokepalkki	hot galv, Al	342	ei	double I	T	10	2 700	650
Sonera, Helsinki	6	24	1 060	44	1	ripustettu runko	Al	300	ei	double I	L,print	8	2 400	1 200
Korona, Helsinki	4	16	2 500	156	1	kehärakenne	hot galv	2 000	ei	double I	F	6	2 500	750

Type: 1 = Building-high DSF, 2 = Storey-high DSF.

Structure material: AISI = acid resistant steel, hot galv = hot galvanized steel, Al = aluminium, weather. Fe = weathering steel

Glass types: I = insulating glass, T = tempered glass, L = laminated glass, F = float glass, print = silk screen printed glass

## Rakenteista

Kaksoisjulkisivujen sisempi lasiseinä on yleensä kaksi- tai kolmilasinen eristyslaselementti, jonka lasilevyjen välissä on kaasutiivis ilman tai jalokaasun täyttämä tila. Lasit ovat float-lasia ja ne voivat olla karkaisemattomia, karkaistuja tai laminoituja.

Ulompana lasiseinäenä kaksoisjulkisivussa on tavallisesti yksi karkaistu lasilevy. Karkaisun lisäksi ulkolasi voi olla myös laminoitu (Vuolio 2000), mutta tämä ratkaisu on Suomessa selvästi vähemmän käytetty kuin pelkän karkaistun lasin käyttö. Myös pelkästään laminoitua ulkolasia on käytetty (Soneran talo).

- Karkaistun lasin käytöllä saavutetaan seuraavia etuja (Vuolio 2000):
- Se on rikkoontuessaan turvallista, koska lasi tällöin menee pieniksi muruiksi.
- Se lujaa (lujuus noin viisinkertainen float- ja laminoituun lasiin verrattuna) ja siksi se kestää hyvin lämpötilan epätasaista jakautumista ja nopeaa vaihtelua.
- Karkaistulle lasille voidaan käyttää pistemäistä tuentaa, sillä se kestää parhaiten reikien ympärille syntyvät jännityshuiput.

Myös laminoitu lasi on turvallista rikkoutuessaan, koska lasilevyjen rikkoutuessa syntyvät sirpaleet jäävät kiinni laminaattiin. Nykyaikaiset palonsuojalasit ovat laminoituja.

Kaksoisjulkisivujärjestelmien runko valmistetaan yleensä joko kuumasinkitystä tai maalattua teräksestä, ruostumattomasta teräksestä tai alumiinista (Vuolio 2000).

## Viitteet

Tenhunen, O., Lehtinen, T., Lintula, K., Lehtovaara, J., Vuolio, A., Uuttu, S., Alinikula, T., Kesti, J., Viljanen, M., Söderlund, J., Halonen, L & Mäkeläinen P. 2001. Metallilasirakenteet kaksoisjulkisivuissa. Esitutkimus. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Teräsrakennetekniikan laboratorio. 91 s. + liitt. 16 s. (TKK-TER-21) ISBN 951-22-5528-6

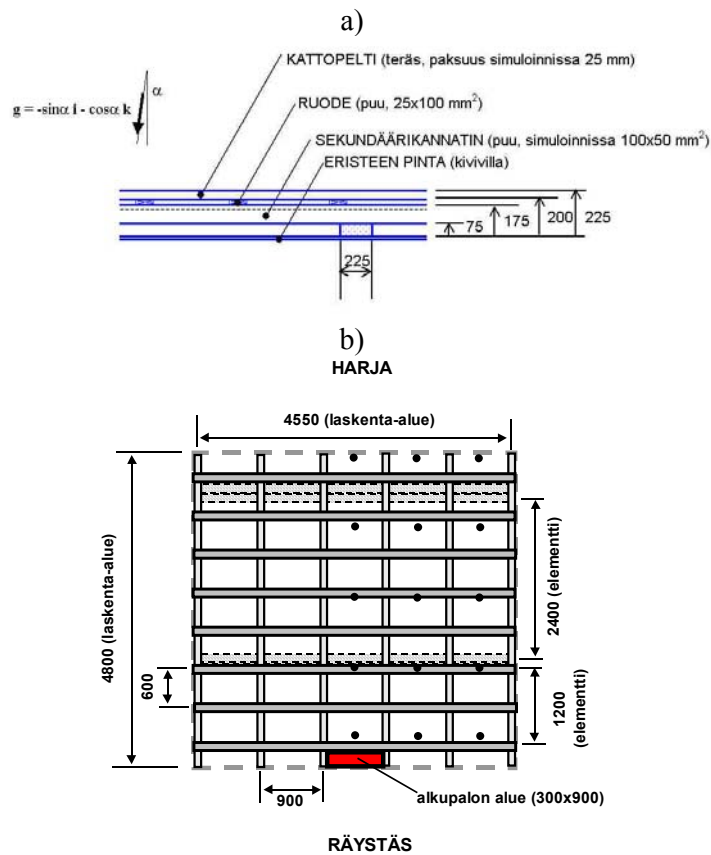
Uuttu, S. 2001. Current Structures in Double-Skin Facades. Master's Thesis. Espoo: Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics. 62 s. + liitt. 38 s.

Vuolio, A. 2001. Kaksoislasijulkisivujärjestelmien rakennetekniikka. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 72 s. (TKK-TER-22) ISBN 951-22-5624-X



## Liite D: Teollisuushallin tuulettuvassa kattorakenteessa leviävän palon laskennallinen tarkastelu

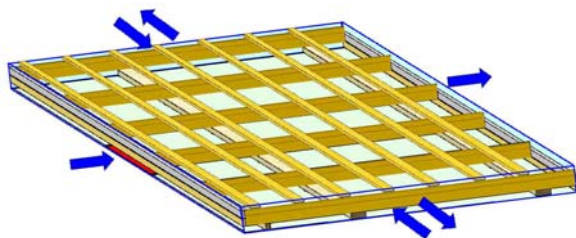
Tässä liitteessä esitetään palon leviämisen simuloinnin tuloksia kuvan D1 mukaiselle tuulettuvalle kattorakenteelle. Tarkasteltu rakenteen osa päättyy alhaalla villoituksen pintaa, koska katon osiin jakamisen suhteen kyseeseen tulevien aikojen (selvästi alle tunti) puitteissa lämpörintama ei ehdi edetä villojen läpi katon alusrakenteisiin tai primäärikannattajiin. Lappeen tasossa laskenta-alue on mitoiltaan noin  $4,5 \times 4,8 \text{ m}^2$ . Katon kaadon suunnassa laskenta-alue kattaa kaksi kattoelementtiä (toinen 1 200 mm ja toinen 2 400 mm leveä) ja sivu suunnassa 5 sekundäärikannattajien väliä (k900). Ruodejakona käytettiin jakoa k600.



Kuva D1. Palon leviämisen laskennassa tutkittu rakenne ja sen mitat (millimetreissä). Aluskatteen (katkoviiva) syttyminen ja palaminen otettiin huomioon lisäämällä ruodelautojen ja sekundäärikannattajien lämmöntuottoa palamisen alussa aluskatetta vastaavalla määrällä, noin 25 %.

Kuva D2 havainnollistaa laskenta-alueen ilmanvaihtoa. Tässä liitteessä tarkastellaan järjestelyä, jossa räystään tehollinen tuuletusaukon korkeus on 75 mm ja harjalla on vastaavan kokoinen tuuletusaukko. Tulosten herkkyyttä räystään ja harjan tuuletukselle tutkittiin toistamalla ajo pienemmällä korkeudella, 25 mm. Tällä muutoksella ei ollut oleellista vaikutusta palon leviämiseen, mikä johtuu siitä, että tuulettuva kattorakenne on palon ilmantarpeen kannalta varsin avoin eikä palo siksi helposti rajoitu ilman saantiin: kun palo kasvaa suuremmaksi, myös sen aiheuttamat paine-erot kasvavat ja lisäävät virtauksia (palo toimii virtausten ”moottorina”).

Sillä, että näinkin merkittävä räystään ja harjan tuuletuksen muutos ei vaikuta juurikaan palon leviämiseen, on merkitystä myös katon paloteknisen osiin jakamisen kannalta: se osoittaa, että katossa räystääs-harja -suunnalle poikittaiset virtaukset ovat merkittävä palon ilmansaannin lähde. Jos tämä virtaussuunta katkaistaan, myös lappeen suunnassa tapahtuva palon leviäminen hidastuu. Osiin jakamisen tehokkuutta palon voimakkuuden hillitsemisessä tutkittiin myös erillisten lisälaskelmien avulla.



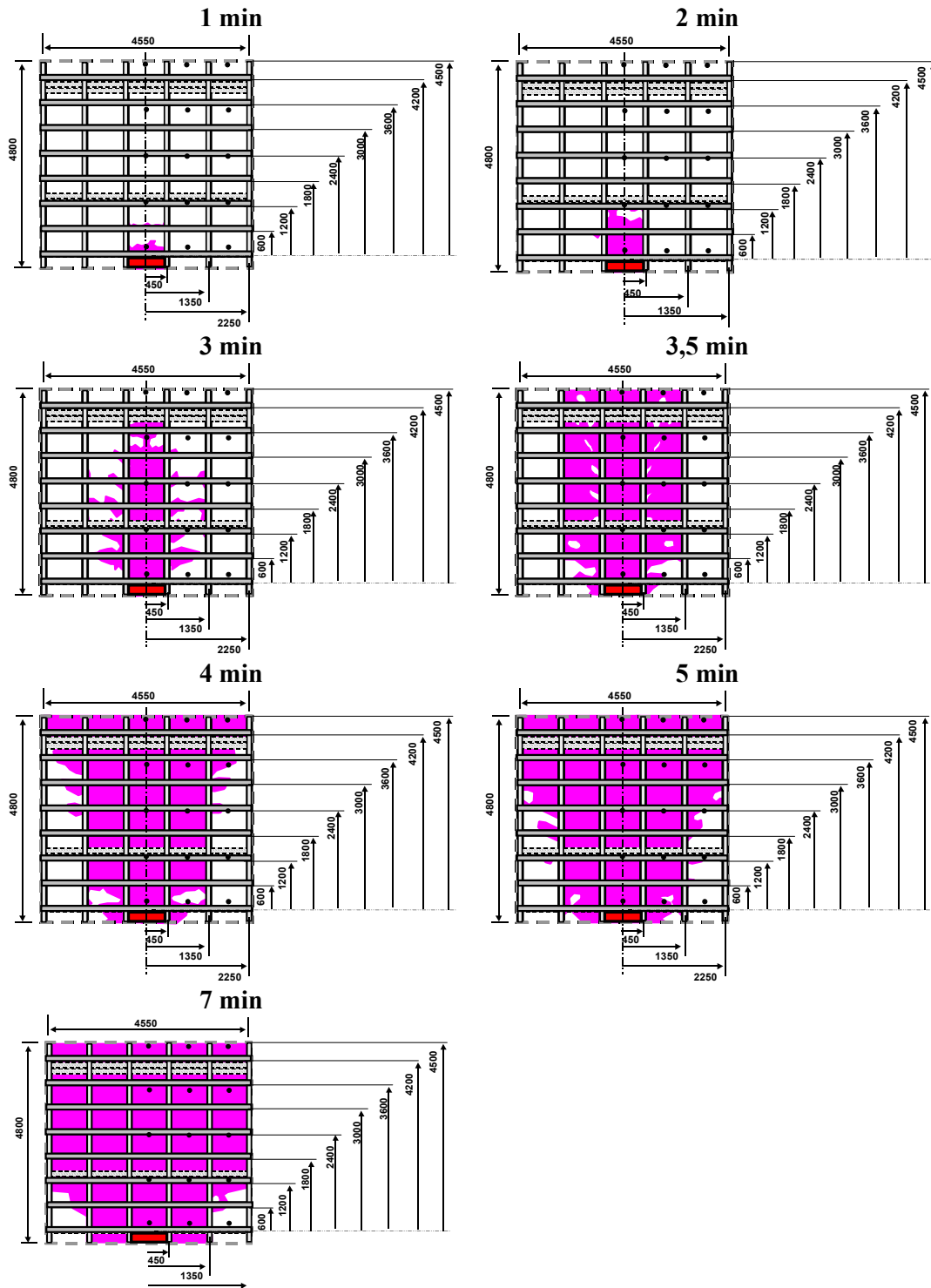
*Kuva D2. Kaaviokuva laskenta-alueen ilmanvaihdon päävirtauksista. Palo saa ilmaa sekä räystäältä (vasemmalla) että laskenta-alueen laidoilta. Laskenta-alueen laidoilla tuuletus tapahtuu sekundääräkannattimien alta (tarkastellaan sellaista kattorakennetta, jossa kannattimien ja villan välillä on ilmatilaa) sekä kannattimien ja katteen välisestä raosta ruoteiden välissä. Poistovirtaus tapahtuu harjalta (oikealla) ja laskenta-alueen laidoilla.*

Tässä esimerkissä esitettyssä tapauksessa palon oletettiin leviävän ulkoseinältä räystään tuuletusraon kautta katon tuuletusonteloon. Palon laskenta aloitettiin hetkellä, jolloin kattorakenteeseen pureutunut palo oli kasvanut niin suureksi (40 kW), että se lähestyy vaihetta, jossa liekit alkavat levitä katto-ontelossa.

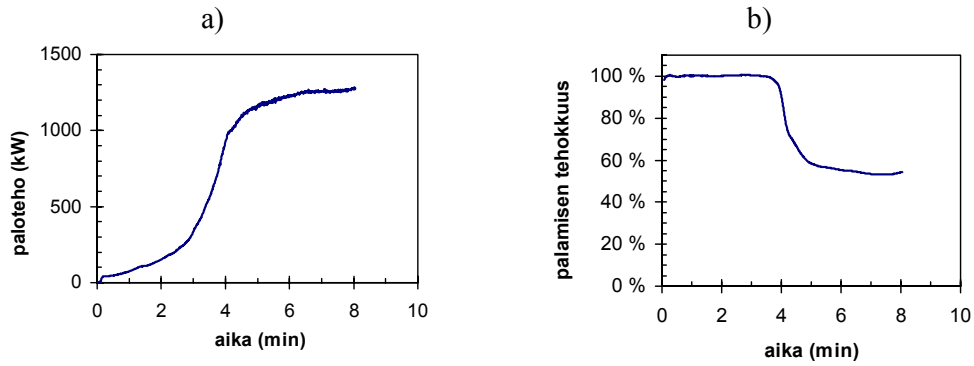
Palon leviämisen laskenta tehtiin FDS 3 -ohjelmalla. Palavien aineiden mallintaminen tehtiin Ontelopalojen ominaispiirteet -hankkeessa kelpoiseksi todettuja parametrisarvoja käyttäen. Aluskatteen osallistuminen paloon otettiin huomioon siten, että puutavaran palotehoa kasvatettiin syttymisen jälkeisen 4 minuutin aikana 25 %. Tämä vastaa tyypillisen noin 200 g/m<sup>2</sup> painavan aluskatemuovin palamista. Laskennassa käytettiin tiheää hilajakoa (jako 25 × 25 × 25 mm<sup>3</sup>:n kokoiisiin tilavuuksiin).



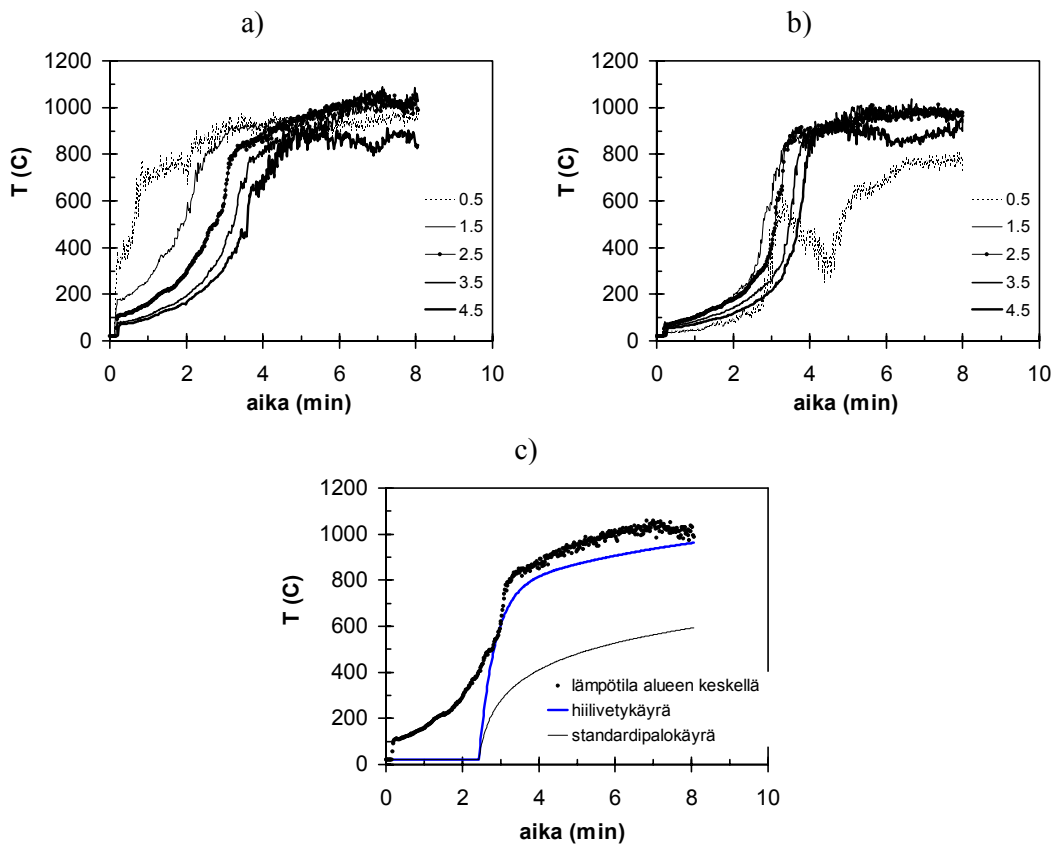
Kuvassa D3 esitetty kuvasarja havainnollistaa, miten palo leviää laskenta-alueessa. Merkityt alueet vastaavat liekeissä olevaa tilaa. Ensimmäisen kahden minuutin aikana palo leviää kohti harjaa noin 1 metrin matkan. Etenemisnopeus palon leviämisen alussa on siis noin 0,5 m/min. Palo ei juurikaan leviä sivusuunnassa. Palon leviäminen kiihtyy selvästi aikavälillä 2–3 minuuttia: 3 minuutissa palo on levinnyt lähelle laskenta-alueen yläreunaa. Palon etenemisnopeus tällä välillä on noin 2,5–3 m/min. Kun tarkastellaan palotehoa ja lämpötiloja (kuvat D4 ja D5), havaitaan, että noin 3 minuutin kohdalla palossa tapahtuu Hietaniemen ym. (2002) kuvaama lieskahdusta vastaava muutos. Välillä 3–3,5 minuuttia palo leviää sivuttain täyttäen viereiset kannattimien välit (nopeus 1,8 m/min). Tämän jälkeen palo etenee sivuttain laskenta-alueen laitimmaksiin kannattinväleihin ja alkaa edetä myös alaspäin kohti räystästä. Alaspäin tapahtuva leviäminen on aluksi nopeampaa ja tasaantuu sitten noin nopeuteen 0,6 m/min.



*Kuva D3. Palon leviäminen tuulettussa kattorakenteessa. Mustat pisteet esittävät kohtia, joiden lämpötilat esitetään kuvassa D5.*



Kuva D4. a) Paloteho ja b) palamisen tehokkuus.



Kuva D5. a) Onteloon muodostuvan kuuman kerroksen lämpötilat laskenta-alueen keskimmaisessä sekundääririkannattimien väliin jäävässä räystäs-harja -suuntaisessa kaistassa alkupalon keskikohdalla ja b) lämpötilat viereisessä kaistassa. c) Ontelon keskivaiheilla vallitsevan kuuman kerroksen lämpötilan vertaaminen standardi- ja hiilivety-palokäyrään.

Ontelon palokuorman luovuttama paloteho tasaantuu nopean kasvun vaiheen jälkeen hieman alle 1,5 MW:n tasolle. Samalla palamisen tehokkuus alenee lähelle 50 %:ia. Palon voimakkuuden kasvu pysähtyy siis ilman saannin rajoittamana. Palon saavuttama voimakkuus, 1,5 MW, on kuitenkin hyvin suuri ontelon tilavuuteen nähden. Neliometriä kohden palo luovuttaa lämpöä noin 70 kW/m<sup>2</sup>.

Lämpötiloista nähdään, että katto-ontelo tulee kuumaksi. Tämä johtuu siitä, että rakenteen tuulettavuus on niin hyvä, että ontelon paloa voimistava vaikutus (Hietaniemi ym. 2002) pääsee vaikuttamaan tehokkaasti: hyvin tuulettuvasta ontelosta voi tulla ahjon kaltainen hyvin kuuma paikka. Tulipalon palorasituksen mallikäyrästä hiilivetykäyrä vastaa ontelon olosuhteita tässäkin tapauksessa standardilämpötilakäyrää paremmin.

## **Viitteet**

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 2128) ISBN 951-38-5953-3

## Liite D: Teollisuusrakennusten katon osastointia koskevia vaatimuksia ja ohjeita

Yksikerroksisten teollisuusrakennusten yläpohjien osastojen pinta-alavaatimukset ja palonkestovaatimukset esitetään taulukossa F1:

*Taulukko F1. Yksikerroksisten teollisuusrakennusten pinta-alaosastointia koskevat osastojen pinta-ala- ja palonkestovaatimukset (RakMK E2, 1997, kohta 6.1).*

<b>Teollisuusrakennusten pinta-alaosastointi</b>				
Pinta-alat	Palovaarallisuusluokka 1:			
	Suojaustaso:	1	2	3
	P1	6 000	12 000	harkinnan mukaan
	P2	4 000	6 000	harkinnan mukaan
	P3	2 000	4 000	12000
	Palovaarallisuusluokka 2:			
	Suojaustaso:	1	2	3
	P1	2 000	4 000	harkinnan mukaan
	P2	1 000	4 000	harkinnan mukaan
	P3	ei sallittu	ei sallittu	12000
	Palonkesto- vaatimukset (tehdään pala- mattomasta tarvikkeesta)	Palovaarallisuusluokka 1:		
		Suojaustaso:	1 & 2	3
		P1	EI-M 90	EI-M 60
P2		EI-M 90	EI-M 60	
P3		EI-M 90	EI-M 60	
Palovaarallisuusluokka 2:				
Suojaustaso:		1 & 2	3	
P1		EI-M 120	EI-M 60	
P2		EI-M 120	EI-M 60	
P3		ei sallittu	EI-M 60	
Muuta		<p>Pinta-alaosastoja rajaavat rakennusosat tehdään massiivina palomuurin tapaan. Liittymät vesikattoon ja ulkoseinään rakennetaan soveltaen palomuurista annettuja ohjeita: (RakMK E1 2002, kohta 9.2.2 Palomuurin liittymäkohtia koskevat ohjeet):  <i>Vesikaton rakenteet ja eristeet katkaistaan palomuurin kohdalta. Jos tarvikkeet ovat vähintään luokkaa A2-s1, d0, ei katkoa tarvita. Mikäli vesikattojen korkeusero on pienempi kuin 300 mm, palomuuuri ulotetaan vähintään 300 mm katteen yläpuolelle. Tämä voidaan korvata riittävällä vaakakatkolla. Palokuorman ylittäessä 1 200 MJ/m<sup>2</sup> palomuuuri ulotetaan vähintään 750 mm katteen yläpuolelle, eikä korotusta yleensä voi korvata vaakakatkolla. Palomuuuri ulotetaan sivusuunnassa vähintään 100 mm ja palokuorman ylittäessä 1 200 MJ/m<sup>2</sup> vähintään 750 mm seinälinjan ohi. Tämän sijasta voidaan myös käyttää seinän suuntaista katkoa.</i></p>		

Sampo-ryhmän julkaisussa "Osastoivat seinät ja palomuurit" esitetään seuraavat suositukset osastoinnista teollisuusrakennuksissa (Kallioniemi & Miettinen 1996)

Osastoiva seinä tulee ulottaa vesikaton tai katon ylimmän kohdan yläpuolelle, jotta tulipalo ei pääse osastoivan seinän toiselle puolelle. Kun yläpohjarakenne on palonkestävä, mutta lämmöneriste, kate tai katteen liima on palavaa, on osastoiva seinä vietävä vesikaton yläpuolelle. Palon leviäminen vesikattoa pitkin ja palon siirtyminen rakenteita pitkin molemmille puolille osastoivaa seinää kattoikkunoiden tai ilmastointiaukkojen kautta on ehdottomasti estettävä. Pehmeällä katteella vaaditaan osastoiva seinä rakennettavaksi vähintään 500 mm yli vesikatteen. Vesikatossa olevien aukkojen tulee olla vähintään 5 m etäisyydellä osastoivasta seinästä. Tällöin lasiaukon koko saa olla enintään 1 m<sup>2</sup>.

Tasakatoilla, joissa on palava katemateriaali, voidaan vesikatto osastoivan seinän yläpuolelle rakentaa ainoastaan seuraavasti: Vesikaton tulee olla vähintään 5 m matkalla molemmin puolin osastoivaa seinää palonkestävä ja palamaton sekä aukoton, paloluokkaa K1 ja palamaton lämmöneristys. Tähän rakenteeseen liittyvän kantavan rakenteen on oltava palonkestävä ja palamaton.

Paloa kestämillä saha- ja vinokatoilla tulee osastoiva seinä ulottaa vähintään 300 mm (mieluummin 500 mm) yli vesikaton korkeimman huipun tai palonkestävillä katoilla osastoivan seinän tulisi liittyä katon korkeimpiin kohtiin. Jos vesikatto on paloa kestävä ja katon kaltevuus on vähäinen, tulee osastoiva seinä ulottaa niin korkealle, että vaakasuora etäisyys seinän yläpinnasta katon pintaan on vähintään 5 m.

## Viitteet

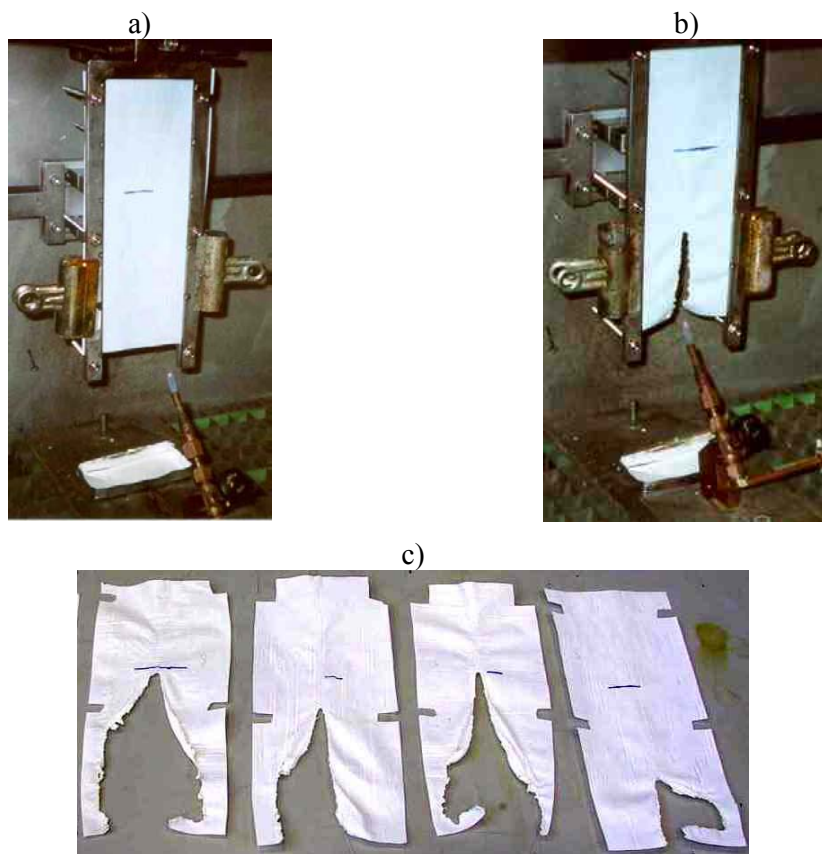
RakMK E2. 1997. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E2: Tuotanto ja varastorakennusten paloturvallisuus – Ohjeet 1997. Helsinki: Ympäristöministeriö. 7 s.

Kallioniemi, P. & Miettinen, P. 1996. Osastoivat seinät ja palomuurit – Suosituksia osastoinnin järjestämisestä ja rakenneratkaisuista. Helsinki: Sampo-ryhmä, Riskienhallinta. 16 s. ISBN 951-9280-23-5

## Liite D: Kokeissa käytetyn aluskatteen palo-ominaisuuksista

Yläpohjan ontelon osastoinnin palokokeissa käytettiin Rankka-aluskatetta<sup>4</sup>. Mittausten mukaan aluskatteen neliömassa oli 100 g/m<sup>2</sup>.

Aluskatteen syttyvyyttä tutkittiin ns. pienen liekin menetelmällä EN ISO 11925-2 (Reaction to fire tests. Part 2: Ignitability for building products when subjected to direct impingement of flame). Kokeissa käytettiin euroluokkaa E vastaavaa 15 s:n pituista altistusaikaa liekille. Sytytystapa oli reunasytytys. Kuva G1 esittää koejärjestelyn ja aluskatteen käyttäytymisen eräässä useista toistokokeista sekä näytteitä kokeen jälkeen.



Kuva D1. Aluskatteen syttyvyyskokeet menetelmällä EN ISO 11925-2: a) koejärjestely, b) aluskate kokeen aikana (eräs koe useista toistokokeista) ja c) näytteitä kokeen jälkeen. Näytteissä oleva merkki vastaa 150 mm:n etäisyyttä sytytyspaikasta.

Useimmissa kokeissa aluskate vetäytyi liekin tieltä ja syttymä jäi tyypillisesti lyhytaikaiseksi. Kuvassa G1c näkyvä vaurioalue on muodostunut juuri näytteen vetäytymisen takia, ei liekin leviämisen vuoksi. Kaikissa kokeissa liekin leviäminen jäi alle 150 mm matkan, mikä euroluokituksena tulkittuna vastaa luokkaa E (tätä ei tule kuitenkaan tulkita tuotteen viralliseksi euroluokitustulokseksi; se on tulos tutkimustarkoituksessa aluskatteen syttyvyyden luonnehtimiseksi tehdyistä kokeista, joissa käytettiin standardin EN ISO 11925-2 mukaista koelaitetta). Joissakin kokeissa aluskate tiputti palaessaan palavia pisaroita. Ne eivät kuitenkaan sytyttäneet aluspaperia.



Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Kouhia, Ilpo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry			
Nimeke <b>Ontelotilojen paloturvallisuus</b> <b>Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen</b>			
Tiivistelmä Julkaisussa käsitellään ontelopalojen leviämisen katkaisemista erilaisten liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla.  Useimmat tulokset esitetään konkreettisina rakenteina, osa detaljitasolle asti vietyinä. Alalla toimivien suunnittelijoiden ja tuotekehittelijöiden tarpeita silmällä pitäen työssä esitetään myös rakenneratkaisujen perusteita, toiminnallisia edellytyksiä ja periaatteita. Joitain ongelmia koskien tulokset esitetään ehdotuksena suuntaviivoiksi aiheita koskevia keskusteluja ja jatkokehitystyötä varten.  Tutkimuksessa keskitytään viiteen ongelma-alueeseen: yläpohjan ontelon tulipalot ja räystäään vaikutus niihin, palon leviäminen julkisivun tuuletusraoissa, alaslaskettujen 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.			
Avainsanat fire safety, structural fire prevention, fire spread, cavity spaces, building voids, eaves, attics, façade, air vent slot, suspended ceilings, double skin façades, fire stop, roofs, ceilings, fire simulation			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6156-2 (nid.) 951-38-6157-0 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Projektinumero R2SU00150	
Julkaisu-aika Toukokuu 2003	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivu- ja 168 s. + liitt. 52 s.	Hinta D
Projektin nimi Fire safety of cavity spaces – Prevention of progress of fire		Toimeksiantaja(t) Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati ry (ml. Palosuojelun edistämissäätiön erikoisrahasto sekä Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto), ympäristöministeriö, Wood Focus Oy, If Vahinkovakuutusyhtiö Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. +358 9 4561  
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and  
report code of publication

VTT Research Notes 2202  
VTT-TIED-2202

<b>Author(s)</b> Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Kouhia, Ilpo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry			
<b>Title</b> <b>Fire safety of cavity spaces</b> <b>Prevention of fire spread in building voids</b>			
<b>Abstract</b> <p>This report considers prevention of fire spread in building void spaces and cavities using structural means to stop or retard propagation of flames, heat and smoke. The basic approach of the study is that of fire safety engineering with the fire hazard and the potential consequences in focus.</p> <p>Most of results are presented as structural solutions with some of them presented in details. To facilitate further development by designers and R&amp;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.</p> <p>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.</p>			
<b>Keywords</b> fire safety, structural fire prevention, fire spread, cavity spaces, building voids, eaves, attics, façade, air vent slot, suspended ceilings, double skin façades, fire stop, roofs, ceilings, fire simulation			
<b>Activity unit</b> VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland			
<b>ISBN</b> 951-38-6156-2 (soft back ed.) 951-38-6157-0 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		<b>Project number</b> R2SU00150	
<b>Date</b> May 2003	<b>Language</b> Finnish, Engl. abstr.	<b>Pages</b> 168 p. + app. 52 p.	<b>Price</b> D
<b>Name of project</b> Fire safety of cavity spaces - Prevention of progress of fire		<b>Commissioned by</b> Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati ry, Ministry of the Environment (YM), Wood Focus Ltd, If P & C Insurance	
<b>Series title and ISSN</b> VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		<b>Sold by</b> VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Julkaisussa käsitellään ontelopalojen leviämisen katkaisemista liekkien, lämmön ja savun etenemistä rajoittavien asennusten avulla. Osa tuloksista esitetään rakenneratkaisujen perusteina, toiminnallisina edellytyksinä ja periaatteina sekä osa konkreettisina rakenteina. Aihepiirinä ovat yläpohjan ontelon tulipalot ja räystäään vaikutus niihin, palon leviäminen julkisivun tuuletusraoissa, alaslaskettujen kattojen ja nostettujen asennuslattioiden muodostamien ontelotilojen palot, kaksoislasijulkisivurakenteeseen mahdollisesti liittyvät palovaarat ja teollisuushallien tuuletettujen kattojen ontelopalot. Paloteknistä toimintaa tarkastellaan yhdessä kosteusteknisen toimivuuden kanssa.

---

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

---