



Jukka Hietaniemi, Tuula Hakkarainen,
Jaakko Huhta, Timo Korhonen,
Jaakko Siiskonen & Jukka Vaari

Ontelotilojen paloturvallisuus

Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla

Ontelotilojen paloturvallisuus

Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla

Jukka Hietaniemi, Tuula Hakkarainen, Jaakko Huhta,
Timo Korhonen, Jaakko Siiskonen & Jukka Vaari

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5953-3 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5954-1 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

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 Kerttu Tirronen

Tummavuoren Kirjapaino Oy, Vantaa 2002

Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla [Fire safety of cavity spaces. Experimental and simulation study of fires in cavities]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2128. 125 s. + liitt. 63 s.

Avainsanat fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, experimentation, simulation, compartments, ceilings, models, attics, roof structures, facades

Tiivistelmä

Rakennusten suljetut ja usein piilossa olevat tilat, ontelotilat, muodostavat merkittävän tulipalovaaran. Tässä työssä on tutkittu ontelotilojen paloja sekä kokeellisesti että mallinnuksella. On luotu perusteet ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiseksi muuttamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi tunnistamalla ja kuvaamalla ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymisen ja leviämisen suhteen. Hankkeen tuloksena saadut tiedot ja mallinnuskeinot ovat riittävän perusteellisia ja toimivia, että niitä voidaan käyttää työn jatko-osissa, joissa selvitetään yksityiskohtaisesti, miten ontelopaloja voidaan ehkäistä tai lieventää tilojen asianmukaisen osastoinnin ja liekkien leviämisreittien katkomisen tai aktiivisten sammutusmenetelmien avulla. Tutkimustyön tulokset luovat edellytykset myös syvälliselle suljetun tilan paloilmioiden perustutkimukselle.

Työssä on selvitetty, miten ontelon eri ominaisuudet, kuten koko, palavan aineen määrä ja laatu, tilaa reunustavat rakenteet sekä tilassa kulkevat virtaukset, vaikuttavat tulipalon kehittymisen ja etenemiseen ontelotiloissa. Tutkitut tapaukset liittyvät pääasiassa seuraaviin ontelotilojen tulipalotapausten kartoituksen perusteella tunnistettuihin tyyppitapauksiin: yläpohjan ontelot, alaslaskettujen kattojen tai nostettujen lattioiden ontelotilat, julkisivujen ja seinärakenteiden ontelot sekä kaksoislasijulkisivujen muodostamat ontelotilat. Tuloksia voidaan soveltaa myös rakennusten muiden ontelotilojen, kuten kanavistojen tai tiettyjen kattorakenteiden onteloiden, palotapausten tarkasteluun.

Vaakasuuntaisia ontelotiloja koskevat tulokset tekevät mahdolliseksi kuvata kvantitatiivisesti, miten ontelon koko, palokuorma, reunojen laatu ja virtaukset vaikuttavat tilan paloturvallisuuteen. Pystysuuntaisista ontelotiloista tutkittiin ontelon suunnan ja tilan syvyyden vaikutusta. Julkisivuista selvitettiin tuuletusilmaraon merkitystä palon leviämislle. Kaksoislasijulkisivujen tutkimus toi esille mm. ilmiön, jossa tila täyttyy savulla, koska savu leviää alaspäin, sekä tarpeen säädellä ontelon syvyyttä, jotta ulompi lasi tai rakenteet eivät pääse lämpenemään liikaa.

Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla [Fire safety of cavity spaces. Experimental and simulation study of fires in cavities]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2128. 125 p. + app. 63 p.

Keywords fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, experimentation, simulation, compartments, ceilings, models, attics, roof structures, facades

Abstract

Hidden cavity spaces and voids in buildings constitute a significant fire hazard. In this work, fires in such spaces have been investigated experimentally and using fire simulation and modelling. Using these methods, the most important features of the cavity spaces with respect to fire growth and spread have been identified and quantified. The results obtained lay the foundation to technical solutions aimed at improving the fire safety of the cavity spaces. Most importantly the knowledge and methods achieved are sufficiently thorough and practicable so that they can be directly utilised in the future work on the fire safety of the cavity spaces, namely, studies aimed at establishing practical and sufficiently efficient ways for compartmentation of the void spaces and sealing potential routes of flame spread as well as suppression of cavity-space fires. The results provide material also for in-depth research of dynamics of fires in cavity-spaces.

The study addresses the role that different properties of the cavity spaces play in fire growth and spread. The factors examined include the size, the amount and combustibility of the combustibles in the space, properties of boundaries of the cavity and potential forced flow through the space. The fire scenarios studied are related principally to the following typical cavity spaces which according survey made on fires of cavity spaces have been found very hazardous either with respect to frequency or severity of fires: voids in roof structures, including above-ceiling cavities and attics; cavities formed by suspended ceilings and under-floor voids and cavities in walls and facades. Also the fire hazards related to the cavity spaces made up by the inner and outer glass wall in double-skin facades have been studied. The results are applicable also beyond the specific cases listed above, e.g., to fire spread in channels in buildings.

Concerning horizontal cavities, the results obtained make it possible to evaluate quantitatively how the size, fuel load, properties of the boundaries and potential flows in the space influence the fire safety. Concerning vertical cavities it was established how strongly the direction and depth of the void space influence the fire development. The studies of facade fires give information on the role of the ventilation cavity in fire spread. The investigation of fires in the cavity spaces of double-skin facades revealed, e.g., a novel phenomenon of smoke filling via downward smoke movement as well as a distinct need to regulate the cavity depth to avoid excessive heating of the outer glass or the structures of the facade.

Alkusanat

Rakennusten ontelotilat muodostavat merkittävän tulipalovaaran. Ontelotilojen paloturvallisuutta voidaan lisätä muuttamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi ja parantamalla ontelopalojen sammutusmahdollisuuksia. Tässä työssä on kokeellisen työn ja mallinnuksen avulla luotu perusteet tälle parannustyölle tunnistamalla ja kuvaamalla ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymiselle ja leviämiselle.

Raportti on tekninen osa tutkimushankkeesta Ontelotilojen paloturvallisuus – Ontelopalojen ominaispiirteet. Hankkeen ovat rahoittaneet Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati (ml. Palosuojelun edistämissäätiön erikoisrahasto), Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto, Ympäristöministeriö ja VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Hankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet seuraavat rahoittajien ja pelastustoimen edustajat: Pekka Kallioniemi (Teollisuusvakuutus), Pirjo Kurki (YM), Antti Lastu (SPEK, puheenjohtaja), Hannu Olamo (SM), Yrjö Vorne (Espoon pelastuslaitos) ja Esko Mikkola (VTT). Tekijät kiittävät hankkeen rahoittajatahoja ja johtoryhmän jäseniä.

Kiitämme Matti Sundgrenia ja Seppo Kuria Reka Kaapeli Oy:stä hyvästä yhteistyöstä kaapelien polttokokeisiin liittyen.

Kiitämme myös tutkija Djebar Baroudia ja tutkija Simo Hostikkaa heidän neuvoistaan ja avustaan työn mallinnusosassa sekä erikoistutkija Henry Weckmania hänen panoksestaan kokeellisen työn valmistelun ja toteutuksen aikana. Tutkimusavustajat Risto Latva, Risto Rahikainen, Seppo Ruokonen ja Konsta Taimisalo toteuttivat koelaitteistojen rakentamisen ja instrumentoinnin sekä suuren joukon muita käytännön töitä. Tästä heille suuri kiitos.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
2. Ontelotilojen palovaarallisuuden palotekniset perusteet	15
2.1 Vaakasuuntaiset ontelotilat	16
2.1.1 Polttoaine	17
2.1.2 Liekit ja palopatsas.....	17
2.1.3 Tilaan muodostuva kuuma kerros	18
2.1.4 Tilan reunoihin tapahtuvat lämpöhäviöt	19
2.1.5 Tilan aukkojen vaikutus	20
2.1.5.1 Aukkojen kautta tapahtuvat lämpöhäviöt	20
2.1.5.2 Aukkojen kyky syöttää hapekasta ilmaa palotilaan.....	21
2.2 Pystysuuntaiset ontelot.....	22
2.3 Eri tekijöiden yhteisvaikutus	23
3. Kokeellinen tutkimus.....	24
3.1 Suuren mittakaavan ontelopalokokeet.....	24
3.1.1 Koejärjestelyt	24
3.1.2 Palokuormana käytetyt tuotteet ja materiaalit.....	27
3.1.2.1 Yleiset ominaisuudet.....	27
3.1.2.2 Palo-ominaisuudet	28
3.1.3 Tehdyt kokeet.....	28
3.1.3.1 Ilman palokuormaa tehdyt kokeet.....	29
3.1.3.2 Kaapelikokeet	29
3.1.3.3 Puuontelokokeet.....	32
3.1.4 Suuren mittakaavan kokeiden tulokset	32
3.1.5 Johtopäätökset suuren mittakaavan kokeista	38
3.1.5.1 Yleisiä huomioita.....	38
3.1.5.2 Onteloon madaltamisen ja virtauksen rajoittamisen vaikutus ..	39
3.1.5.3 Kriittiset tekijät: palokuorman laatu ja määrä.....	40
3.2 Pienen mittakaavan ontelopalokokeet	41
3.2.1 Koejärjestelyt ja tehdyt kokeet.....	42
3.2.2 Pienen mittakaavan kokeiden tulokset.....	45
3.2.3 Johtopäätökset pienen mittakaavan ontelopalokokeista	52

3.2.3.1	Pienen mittakaavan kokeiden tulosten käyttökelpoisuus.....	52
3.2.3.2	Ontelon korkeuden vaikutus palon voimakkuuteen.....	53
3.2.3.3	Palavan aineen määrän ja laadun vaikutus	55
3.2.3.4	Ontelon virtauksen vaikutuksesta	55
3.3	Kokeita julkisivujen onteloissa leviävistä paloista.....	56
3.3.1	Palamaton/palava julkisivumateriaali	56
3.3.1.1	Perusteet.....	56
3.3.1.2	Kokeellinen tutkimus.....	57
3.3.2	Palon leviämisenopeus ja aikaskaalat sekä niihin vaikuttavat tekijät.....	62
3.3.3	Johtopäätökset.....	64
4.	Mallintaminen.....	65
4.1	Tulipalon kehittymisen laskentaohjelma Fire Dynamics Simulator (FDS) ja sen käyttö.....	65
4.2	Mallin kelpoisuuden osoittaminen	68
4.2.1	Vertailu puuverhoilun palokammiokokoon palotehotuloksiin.....	68
4.2.2	Vertailu ilman palokuormaa tehdyn ontelopalokokeen lämpötilatuloksiin.....	70
4.2.3	Vertailu kaapelien ontelopalokokeen palotehotuloksiin.....	71
4.2.3.1	Kaapelien lämpeneminen, syttyminen ja lämmöntuotto.....	72
4.2.3.2	Vertailun tulokset.....	73
4.2.4	Vertailu puuverhoilun ontelopalokokeen palotehotuloksiin.....	74
4.3	Vaakasuurien ontelotilojen palojen mallinnustutkimus	75
4.3.1	Mallinnustapausten perusjaottelu.....	75
4.3.2	Mallinnustulosten analysointi	76
4.3.3	Palokuormana muovikaapeli.....	78
4.3.3.1	Suuren mittakaavan kaapelikokeiden perusteella tehdyt simuloinnit	78
4.3.3.2	Palokuorman luovuttaman palotehon vaikutus.....	80
4.3.3.3	Palokuorman syttyvyyden vaikutus	83
4.3.3.4	Ontelon reunojen lämpötekniisten ominaisuuksien vaikutus	84
4.3.3.5	Ontelon virtauksen palon leviämistä lisäävä vaikutus.....	85
4.3.4	Palokuorma verhoiluna ontelon reunoilla.....	87
4.3.4.1	Ontelon korkeuden vaikutus	88
4.3.4.2	Ontelon leveyden vaikutus.....	88
4.3.4.3	Palokuorman luovuttaman palotehon vaikutus.....	89
4.3.4.4	Palokuorman syttyvyyden vaikutus	91
4.3.5	Johtopäätökset vaakasuorien ontelotilojen tulipalojen mallinnustutkimuksesta.....	92
4.3.5.1	Ontelossa kulkeva virtaus	92
4.3.5.2	Ontelon korkeus ja leveys.....	93
4.3.5.3	Palokuorman luovuttama paloteho ja syttyminen.....	94

4.4	Pystysuuntaisen ontelon mallinnustutkimuksia	97
4.4.1	Ontelon suunnan vaikutus palon leviämiseen	97
4.4.2	Pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutuksesta.....	98
4.5	Mallinnustutkimus liittyen julkisivun palokokeisiin: tuuletusraon ja sen materiaalien palavuuden vaikutuksesta	101
4.6	Kaksoislasijulkisivujen palojen mallinnustutkimus	104
4.6.1	Tausta	104
4.6.2	Mallintamisen yksityiskohtia	105
4.6.3	Paloskenaariot ja niiden kuvaus	105
4.6.3.1	Savun leviämisen tarkastelun paloskenaario	105
4.6.3.2	Ontelon lämpenemisen tarkastelun paloskenaario.....	107
4.6.4	Kaksoislasijulkisivun ontelopalojen mallinnuksen tulokset	108
4.6.4.1	Savun leviäminen.....	108
4.6.4.2	Tilan lämpeneminen	110
4.6.5	Johtopäätökset kaksoislasijulkisivututkimuksesta	112
5.	Yhteenveto ja päätelmät.....	114
	Lähdeluettelo	122

LIITTEET

- Liite A: Suljetussa tilassa kehittyvän palon oleellisia paloteknisiä tekijöitä
- Liite B: Suuren mittakaavan ontelopalokokeiden yksityiskohtia
- Liite C: Suuren mittakaavan ontelokokeiden mittaustulokset
- Liite D: Pienen mittakaavan ontelokokeiden mittaustulokset
- Liite E: VTT:llä tehtyjen puujulkisivujen palokokeiden tuloksia
- Liite F: Alumiiniprofiililla kehystettyjen ikkunoiden palokokeet
- Liite G: Tarkastelu tulen leviämisestä pientalon ullakolle räystäään kautta
- Liite H: Wangin ym. tutkimus pystysuorien lähekkäin olevien pintojen palamisesta
- Liite I: Kattorakenteiden ontelojen palovaaroista

1. Johdanto

Rakennusten ja rakenteiden piilossa olevat ja usein vaikeapääsyiset tilat – ontelotilat – ovat merkittävä tulipalovaara. Viimeaikaisista ontelotilan kautta tuhoisaksi kehittyneistä tulipaloista on tunnetuimpia Düsseldorfin 17 ihmishenkeä vaatinut lentokenttäpalo 11.4.1996 (Wolf 1996). Siinä tuli levisi nopeasti kauas syttymiskohdasta alaslasketun katon muodostamassa ontelotilassa. Myös muita esimerkkejä tulipaloista, joissa ontelotilassa levinnyt palo on johtanut vakaviin vahinkoihin, on lukuisia. Suuria aineellisia vahinkoja aiheuttaneita teollisuuslaitosten kattorakenteiden onteloissa levinneitä paloja on Suomessa tapahtunut useita, esimerkiksi Finnforestin kattopalo Punkaharjulla 1994 (Silmäri 1994, Kallioniemi & Laamanen 1995) ja Wisapakin teollisuusrakennuksen kattopalo Kotkassa 1993 (Kovanen & Heininen 1993). Asuinrakennusten, etenkin rivitalotyyppisten talojen, välipohjan yläpuolisessa ontelotilassa levinneet palot voivat olla tuhoisia, esim. rivitalopalo Haukiputaalla 1992 (Kärppä 1992) ja Maaningan vanhusten palvelutalon tulipalo 1999. Hietaniemen ym. laatimassa raportissa (Hietaniemi ym. 2001) on esitetty kooste ontelotiloissa tapahtuneista tulipaloista.

Ontelopalotapauksista ilmenee, että tulipalot leviävät ontelotiloissa usein odottamattoman suurella nopeudella. Kun lisäksi onteloiden kaltaisissa rakennuksen piilotiloissa kehittyvät palot havaitaan usein varsin myöhään, on helppo ymmärtää, miksi ontelotilojen palot ovat vaarallisia.

Ontelotilojen paloturvallisuutta voidaan parantaa vähentämällä tulipalojen syttymisen todennäköisyyttä, kohentamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi ja parantamalla ontelopalojen sammutusmahdollisuuksia. Tässä työssä on luotu perusteet ontelotilojen paloteknisten tekijöiden parantamiseen ja ontelopalojen sammuttamiseen tähtäävälle työlle. Työssä on palokokeiden että paloteknisen mallintamisen avulla tunnistettu ja kuvattu ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymiselle ja leviämiselle. Tunnistettujen ongelmien yksityiskohtaiset tekniset ratkaisut sekä toteutussuositukset ja ohjeistus kehitetään tämän hankkeen jatkoprojekteissa Ontelotilojen palojen etenemisen katkaiseminen ja Ontelopalojen sammutus.

Tässä työssä on tutkittu, miten ontelon eri ominaisuudet, kuten koko, palavan aineen määrä ja laatu, tilaa reunustavat rakenteet ja tilassa kulkevat virtaukset vaikuttavat tulipalon kehittymiseen ja etenemiseen ontelotiloissa. Tutkitut tapaukset liittyvät pääasiallisesti seuraaviin ontelotilojen tulipalotapausten kartoituksen perusteella tunnistettuihin tyyppitapauksiin: yläpohjan ontelot, alaslasketun katon tai nostetun lattian muodostamat ontelotilat (näistä käytetään jatkossa nimitystä asennusontelot), julkisivujen ja seinärakenteiden ontelot sekä kaksoislasijulkisivujen ontelotilat. Tuloksia

voidaan soveltaa myös muiden rakennuksissa esiintyvien ontelotilojen palotapausten tarkasteluun, kuten rakennuksen kanavistojen tai teollisuusrakennusten ylipainekattojen paloihin.

Välipohjan yläpuolisten ontelotilojen ja asennusonteloiden tulipaloja tutkittiin sekä kokeellisesti että mallintamalla. Rakennusten pystysuuntaisten onteloiden paloturvallisuustekijöitä selvitettiin mallinnuksen keinoin. Julkisivujen ja seinärakenteiden ontelopaloja tutkittiin kokeellisesti sekä keräämällä yhteen VTT:n aiemmissa tutkimuksissa saatuja koetuloksia. Julkisivupalojen kokeisiin liittyen tehtiin myös mallinnustyötä.

Kaksoislasijulkisivujen tutkimuksessa selvitettiin mallinnuksen keinoin varsinaisen julkisivun ja ulomman lasivaipan muodostamaan ontelotilaan liittyviä palovaaroja.

Onteloiden eri tyyppitapauksia kuvaavissa kokeissa käytettiin kolmea erilaista koelaitteistoa. Näistä kahdella tutkittiin välipohjan yläpuolisten ontelotilojen ja asennusonteloiden tulipaloja ja kolmannella julkisivun ontelopaloja.

Välipohjan yläpuolisten ontelotilojen ja asennusonteloiden kaksi koejärjestelyä poikkesivat kooltaan toisistaan. Suurempi koejärjestelyistä muodostui VTT:n palotekniikan tutkimushalliin rakennetusta pitkänomaisesta ontelosta, jonka korkeus oli 60 cm, leveys 120 cm ja pituus 600 cm sekä siihen liittyvästä savunpoistojärjestelmästä ja mittausrakenteista. Näihin kokeisiin viitataan jatkossa nimityksellä suuren mittakaavan kokeet. Pienempi tutkimusontelo rakennettiin pienentämällä suuren mittakaavan kokeiden ontelokokoa mittakaavassa 1:6, joten sen leveys oli 20 cm ja pituus 100 cm. Ontelon korkeuden vaikutusten kokeelliseksi tutkimiseksi pienempi ontelo toteutettiin siten, että korkeutta voitiin vaihdella 5 cm – 30 cm. Kaikissa kokeissa mitattiin palamisessa syntyneen lämmön vapautumisnopeutta eli palotehoa sekä lämpötiloja eri paikoissa ontelon sisällä. Suuren mittakaavan kokeissa tutkittiin myös savuntuottoa, virtauksia ja säteilyä ontelon sisällä sekä ontelon reunojen lämpenemistä. Välipohjan yläpuolisen ontelotilan paloa kuvaavissa kokeissa palokuormana oli puuverhous ja asennusonteloissa leviävää paloa kuvaavissa kokeissa muovivaippainen kaapeli. Molemmissa palokuormien tapauksissa tutkittiin myös materiaalin palosuojauksen vaikutusta.

Suuren mittakaavan kokeissa savut johdettiin pois erillisellä hormilla, joka sai aikaan pakotetun virtauksen ontelotilaan. Pienen mittakaavan kokeissa hormia ei käytetty. Koelaitteet poikkesivat siten paitsi kooltaan myös palon saaman hapen osalta: suuren mittakaavan kokeissa palaminen sai happea paremmin kuin pienen mittakaavan kokeissa.

Tässä julkaisussa esitetään kokeissa saatuja paloteho- ja lämpötilatuloksia sekä näistä suureista johdettuja palon kehittymisen ja leviämisen nopeutta kuvaavia suureita.

Suuren mittakaavan koetuloksia tarkastellaan käyttämällä vertailevaa tarkastelutapaa seuraavien tekijöiden vaikutusten selvittämiseksi: palokuorman määrä, palavan aineen paloherkkyys (palosuojattu tai suojaamaton materiaali), ontelon korkeus, ontelon virtauksen rajoittaminen sen sisään tehdyllä kuristuksella. Pienen mittakaavan kokeiden tuloksista analysoitiin ontelon korkeuden vaikutus palon kehittymiseen ja etenemisnopeuteen.

Julkisivujen paloja tarkasteltiin kahdella tavalla: tekemällä palokokeita keskisuureen mittakaavaan rakennetulla laitteella (korkeus 1,5 m) ja käyttämällä hyväksi VTT:ssä 1990-luvulla tehtyjen lukuisten suuren mittakaavan julkisivujen palokokeiden tuloksia. Palokokeissa mitattiin palotehoa sekä rakenteen ontelotilan ja julkisivun pinnan lämpötiloja. Niiden tuloksia käytettiin mm. mallinnuksen perustana. Julkisivupaloja koskevista tuloksista johdettiin kvantitatiivisia arvioita mm. palon leviämisen aikaskaaloista ja siihen vaikuttavien tekijöiden merkityksestä.

Mallinnustutkimuksissa tutkittiin ontelopalojen kehittymistä ja etenemistä käyttäen pääasiallisesti Fire Dynamics Simulator (FDS) -tulipalon simulointiohjelmaa, joka on luotu Yhdysvalloissa National Standards and Technology -laitoksessa (NIST) kehitettyjen palotilanteen virtauksia ja lämmönsiirtoa kuvaavien matemaattisten mallien perustalle. Ohjelman kehitystyössä on ollut mukana myös VTT:n tutkija Simo Hostikka. Se edustaa paloteknisten laskentatyökalujen uusinta sukupolvea, jonka ohjelmille on ominaista se, että ne laskevat annetuista tilannetta ja syttymislähdettä kuvaavista syöttötiedoista lähtien, miten palo kehittyy. Edellisen sukupolven ohjelmathan, kuten vyöhykemalliohjelma CFAST, laskivat tilan lämpenemisen ja savukerroksen laskeutumisen (ja mahdollisesti joitain muita suureita) käyttäjän syötteenä antaman oletetun palon kehityksen avulla.

Ohjelma valittiin ehdolle hankkeen mallinnustyökaluksi lähinnä Hostikan kautta saadun erinomaisen käyttötuen ja ohjelman hyvän käytettävyyden vuoksi: ohjelman syötteillä on hyvin määritelty fysikaalinen merkitys ja tulosten esitystapa on selkeä. Malli valittiin, kun oli selvitetty sen kelpoisuus suljetussa tilassa kehittyvän palon kuvaamiseen vertaamalla mallilla laskettuja tuloksia VTT:ssä tehtyjen muiden hankkeiden koetuloksiin.

Mallin käyttökelpoisuus validoitiin vertaamalla sillä laskettuja tuloksia ontelo-palokokeissa saatuihin tuloksiin.

FDS-ohjelmaa käyttäen tutkittiin mm. seuraavien tekijöiden vaikutusta ontelopalojen kehittymiseen ja etenemiseen:

- ontelossa olevan palavan aineen palo-ominaisuudet (erityisesti paloteho yksikköpinta-alaa kohti ja syttyvyys),
- ontelon koko (korkeus ja leveys),
- ontelotilassa kulkevat virtaukset,
- ontelon reunojen lämpötekniset ominaisuudet.

Mallinnuksessa on tarkasteltu erikseen vaakasuuntaisia ja pystysuuntaisia ontelotiloja. Vaakasuuntaista ontelotyyppejä on tutkittu laajemmin kuin jälkimmäistä johtuen niiden suuremmasta osuudesta ontelopalotapauksissa (Hietaniemi ym. 2001). Niistä on eroteltu kaksi palokuorman sijainnin suhteen erilaista tapausta: tapaus, jossa palokuorma sijaitsee ontelon keskivaiheilla ilman välitöntä kontaktia ontelon reunoihin ja tapaus, jossa palokuorma sijaitsee tilan verhoiluna. Käytännössä ontelopalotapaukset käsittävät usein myös näiden tapausten moninaisia yhdistelmiä. Näiden tapausten palon kasvua ja leviämistä voidaan arvioida eri tapauksia sopivasti yhdistellen.

Pystysuuntaisten ontelotilojen tarkastelun pääpaino on kaksoislasijulkisivujen palovaarojen tunnistamiseen tähtäävässä mallintamisessa. Myös muista pystysuunnassa leviävistä ontelopaloista esitetään mallinnusesimerkkejä. Osa niistä liittyy tehtyihin pienen mittakaavan julkisivukokeisiin ja osa ontelon suunnan ja syvyyden paloa voimistavaan vaikutukseen.

Kaksoislasijulkisivujen mallinnustutkimuksessa oli kaksi pääaihetta: 1) miten sisemmän ja ulomman lasiseinän muodostama ontelotila täyttyy savulla ja 2) miten tila ja sen reunat sekä niiden rakenteet lämpenevät mahdollisessa tulipalotilanteessa. Uhkakuvana simuloinneissa oli rakennuksen jossain huonetilassa syttyneen huoneistopalon kehittyminen lieskahdukseen (esim. sprinklereiden toimimattomuuden vuoksi) ja lieskahtaneen palon liekkien tunkeutuminen sisemmän ja ulomman lasiseinän muodostamaan ontelotilaan palotilan ikkunan särkyessä. Skenaariota tutkittiin ikkunan särkymiseen osalta myös kokeellisesti (ks. liite F).

FDS-mallinnuksen lisäksi tehtiin joitain laskennallisia tarkasteluja käyttäen lähinnä käsinlaskentaan soveltuvia yksinkertaisia paloteknisiä laskentakaavoja (Karlsson & Quintiere 2000). Näitä tarkasteluja on esitetty lähinnä raportin liitteissä. Työssä havaittiin, että tällaiset kaavat voivat olla käyttökelpoisia etenkin, jos riittävää arvioida rajoitetusti yksittäisten tekijöiden vaikutuksen laatua. Koko palosysteemin määrälliseen

kuvaukseen ne eivät riitä. Law'n ja O'Brienin (1981) liekkimallia soveltava tarkastelu (Liite G) pientalon julkisivulta ullakolle leviävän palon suuruuden arvioinnista on esimerkki kvantitatiiviselle tasolle yltyvästä käyttökelpoisesta yksinkertaisten laskentamallien soveltamisesta.

Oleellisen tärkeä tekijä katto-ontelopaloissa on kate. Hyvin usein paksu ja monikerroksinen kate hidastaa ratkaisevasti katto-ontelossa riehuvan palon taltuttamista. Rajoituslinjan tekemiseen menee näet niin kauan, että palo on jo ehtinyt edetä linjan ohi, kun linja saadaan tehdyksi. Esimerkkinä paloturvallisuudeltaan erittäin huonosta kateratkaisusta voidaan mainita esim. teollisuusrakennuksen kattopalo Kotkassa 1993 (Kovanen & Heinisen 1993), jossa palokunnan piti puhkaista jopa 12 kerrosta kattohuopaa. Kate voi myös sisältää pieniä onteloita, jotka voivat levittää paloa, esim. katekerrosten välisissä ilmakerroksissa. Näin kävi Ylivieskassa tapahtuneessa tiilitehtaan palossa, jossa profiloitu pelti katossa toimi palotilanteessa hormin tavoin (Vähäkangas 1990). Tähän ongelmaan ei tässä työssä käytetyn kaltaisella paloteknisellä simuloinnilla juurikaan pääse pureutumaan. Lisäksi kattavaa kokeellista tutkimusta haittaa erilaisten katevariaatioiden suuri määrä. Siksi ongelmaa ei ole lähestytty kokein eikä mallintamalla, vaan lähinnä pelastuslaitoksilta saatujen tietojen perusteella. Yhteenveto aiheesta saaduista tiedoista on esitetty erillisenä osa-alueenaan liitteessä I, jossa käsitellään lyhyesti myös katto-ontelopalojen syttymissyitä.

Raportti on jaettu kahteen pääosaan:

- ontelopalokokeet (luku 3) ja
- ontelotilojen tulipalojen mallintaminen (luku 4).

Ontelokokeiden esitys jakautuu kolmeen osaan:

- suuren mittakaavan vaakasuoralla ontelopalokoeelaitteella tehdyt kokeet (luku 3.1),
- pienen mittakaavan vaakasuoralla ontelopalokoeelaitteella tehdyt kokeet (luku 3.2) ja
- julkisivujen palokokeet: 1) tässä hankkeessa tehdyt keskisuuren mittakaavan kokeet (luku 3.3) ja 2) esitys aiemmissa julkisivulla leviävää paloa koskevissa VTT:n tutkimuksissa saaduista tuloksista (liite E).

Selkeyden vuoksi kussakin koetyypissä saadut päätulokset ja niiden johtopäätökset on esitetty omina kappaleinaan heti koetulosten jälkeen.

Luvussa 4 esitetyn mallinnusosuuden aluksi esitellään FDS-ohjelma ja sen käyttö (luku 4.1) sekä osoitetaan useiden esimerkkien avulla, että ohjelma sopii ontelotilojen palojen kuvaamiseen (luku 4.2). Sen jälkeen käydään läpi vaakasuoria (luku 4.3) ja pystysuuntaisia ontelotiloja (luku 4.4) koskevat mallinnustulokset. Julkisivuja koskeva mallinnustapaus käydään läpi erikseen luvussa 4.5. Kaksoislasijulkisivujen palovaaroja kartoittava mallinnustutkimus esitetään luvussa 4.6.

Raportin yhteenveto ja tehdyt päätelmät on esitetty luvussa 5.

Raportin liitteinä on esitetty tekstissä esitettyjä tarkasteluja tukevaa ja syventävää aineistoa (esim. yhteenvetoja kirjallisuudessa esitetyistä tuloksista ja koetulosten yksityiskohtia).

Aivan raportin aluksi tarkastellaan lyhyesti suljetussa tilassa tapahtuvan palamisen käsitteitä ja oleellisimpia palon kehittymiseen vaikuttavia tekijöitä (luku 2). Tätä tarkastelua tukevaa aineistoa on esitetty liitteessä A.

2. Ontelotilojen palovaarallisuuden palotekniset perusteet

Kun tulipalo kehittyy suljetussa tilassa, tilan reunat ja kaasut lämpenevät, mikä puolestaan kiihdyttää eri lämmönsiirtomekanismien ja prosessien kautta palamista. Takaisinkytkentä palon aiheuttaman lämpenemisen ja palon voimakkuuden välillä on tulipalojen lämpötekkinen perusongelma. Jos takaisinkytkennän aiheuttama palon itseään kiihdyttävä kehittyminen saa jatkaa ilman, että paloa yritetään sammuttaa tai palava aine palaa loppuun ja palamiseen riittää happea, kehitys johtaa tilan lämpökatastrofiin, lieskahdukseen. Lieskahtaneessa palossa kaikki tilassa olevat palavat aineet osallistuvat paloon, ja sen voimakkuus kasvaa yleensä niin suureksi kuin palamiseen saatavilla oleva hapen määrä sallii.

Palon kehittyminen normaaleissa huonetiloissa on eniten tutkittuja tulipalotyyppisiä ja sen ominaispiirteet tunnetaan hyvin. Tässä luonnehdinta ”normaali” tarkoittaa huonetilaa, jonka korkeus on suurempi kuin noin 2,5 m ja jonka pituuden ja leveyden suhteet toisiinsa ja korkeuteen ovat sellaiset, että tila ei ole selvästi pitkänomainen, matalanomainen tai muodoltaan kapea.

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

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

Ennen tässä raportissa esitettyä työtä suljetussa tilassa kehittyvää paloa koskevat tiedot ja laskentamenetelmät kuvasivat pääasiassa normaaleissa huoneessa tapahtuvaa

tulipaloa. Ontelotiloissa koskevaa tietoa oli varsin vähän. Normaalaa huonepaloa koskevilla tiedoilla ja malleilla pystytään tarkastelemaan ontelopaloja lähinnä kvalitatiivisesti eli kuvailemaan, miten eri tekijät voivat periaatteessa vaikuttaa ontelopalon kehittymiseen ja leviämiseen. Kvantitatiiviseen tarkasteluun eli sen kuvaamiseen, kuinka suurina eri tekijöiden ja niiden vuorovaikutusten vaikutukset ovat, kyseiset tiedot eivät kuitenkaan sellaisenaan riitä.

Tässä työssä on tutkittu ontelopaloja systemaattisesti ja tulosten analysoinnin pohjalta on selvitetty *kvantitatiivisesti* ontelotiloissa kehittyvien palojen ominaispiirteet.

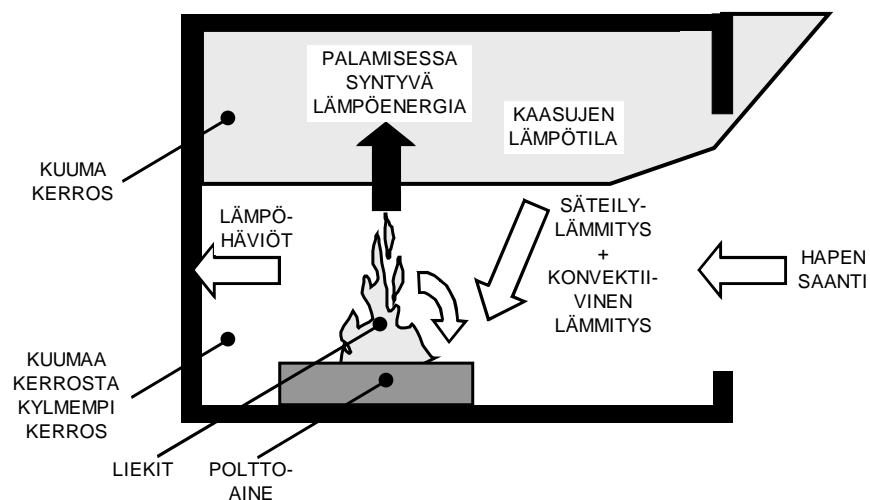
Perustaksi myöhemmin esitettävälle työlle ja tuloksille on seuraavassa kuvattu ontelotiloissa kehittyvien palojen kannalta oleelliset prosessit ja niiden luonne lyhyesti.

2.1 Vaakasuuntaiset ontelotilat

Kuvassa 1 on esitetty kaavamaisesti palavan tulipalon kehittymiseen suljetussa tilassa vaikuttavat tekijät. Ne ovat (ks. esim. Graham ym. 1997):

- polttoaineen ominaisuudet (syttymislämpötila, ominaispaloteho eli aineen pinta-ala-yksikköä kohden luovuttama lämpöenergian määrä aikayksikössä, savuntuottokyky, lämpöarvo, sulamisominaisuudet, jne.),
- syntyvien liekkien ja palopatsaan ominaisuudet (säteillen ja kuljettumalla eli konvektiivisesti siirtyvien energiamäärien suhde),
- tilaan muodostuvan kuumen kerroksen ominaisuudet (lämpötila, savuisuus, paksuus),
- tilan reunoihin tapahtuvat lämpöhäviöt (säteily, konvektio, lämmön johtumisen nopeus),
- lämpöhäviöt tilan aukkojen kautta (säteillen ja kuljettumalla tapahtuvat häviöt),
- tilassa olevien aukkojen kyky syöttää hapekasta ilmaa palotilaan ja poistaa palokaasuja,
- se, miten mainitut eri tekijät kombinoituvat polttoaineen palamista ylläpitäväksi tai kiihdyttäväksi takaisinkytkentämekanismiksi.

Seuraavaksi luonnehditaan lyhyesti tärkeimpiä näistä tekijöistä.



Kuva 1. Suljetussa tilassa palavan tulipalon kehittymiseen vaikuttavat tekijät.

2.1.1 Polttoaine

Palon kehittymiseen vaikuttavat polttoaineen palo- ja lämpötekniset ominaisuudet sekä polttoaineen sijainti samoin kuin se, miten paljon polttoaineen pintaa pääsee kosketuksiin ilma hapen kanssa. Esimerkiksi kaapeleiden palaessa palo kehittyy hitaammin tiiviisti pakatussa kaapeliniipussa kuin sopivan löyhästi pakatussa nipussa. Materiaalien lämpö- ja paloteknisiä ominaisuuksia on tarkasteltu lähemmin liitteessä A.

Paloturvallisuuden kannalta oleelliset palo-ominaisuudet ovat palavan aineen palaessaan luovuttaman lämmön vapautumisnopeus eli paloteho ja aika, jolloin lämmön vapautuminen alkaa eli syttymisviive.

2.1.2 Liekit ja palopatsas

Liekit ja niiden yläpuolella kohoava palopatsas siirtävät massaa ja energiaa suljetun tilan yläosaan muodostuvaan kuumaan kerrokseen. Jos lämpenevä tilavuus on pieni, niin tietty energia saa sen lämpenemään nopeammin kuin, jos lämmitettävä tilavuus on suuri. Se, miten korkeiksi lämpötilat nousevat, johtuu erilaisista lämpöhäviötekijöistä, joita tarkastellaan myöhemmin. Jos muut tekijät pysyvät oleellisesti samoina tilan koon muuttuessa, niin pieni tila lämpenee kuumemmaksi kuin suuri tila. Nopea kuumeneminen korkeisiin lämpötiloihin onkin ontelotilojen palovaarallisuuden perustekijä.

Liekkien suora säteilylämmitys on tärkein liekkien lähellä olevien kohteiden lämpenemisen kannalta. Käytännössä on usein oleellisinta liekkien takaisin palavan aineen pintaan säteilevä lämpö, joka kiihdyttää palamista.

Vaakasuurissa ontelotiloissa tilan korkeus on usein selvästi pienempi kuin liekkien korkeus, minkä vuoksi liekit voivat tulla lähelle palopaikasta kauempana olevaa vielä syttymätöntä ainetta. Tämä voi nopeuttaa palon leviämistä. Tilan katto kuumenee sitä voimakkaammin, mitä matalampi tila on: suhde lämpötilan nousun ΔT ja tilan korkeuden H välillä on Alpertin kaavojen (Alpert 1972) mukaan $\Delta T \propto H^{5/3}$.

2.1.3 Tilaan muodostuva kuuma kerros

Tilan yläosaan kertyvä savu ja muut palamistuotteet muodostavat kuuman kerroksen, jolla on suuri merkitys palon kehittymiselle ja leviämiselle. Merkittävin tekijä on kuuman kerroksen lähettämä lämpösäteily. Ontelotiloissa kuuma kerros voi lämmittää polttoainetta myös konvektiivisen lämmönsiirron kautta tilanteissa, joissa kuuma kerros laskeutuu niin alas, että se koskettaa polttoainetta.

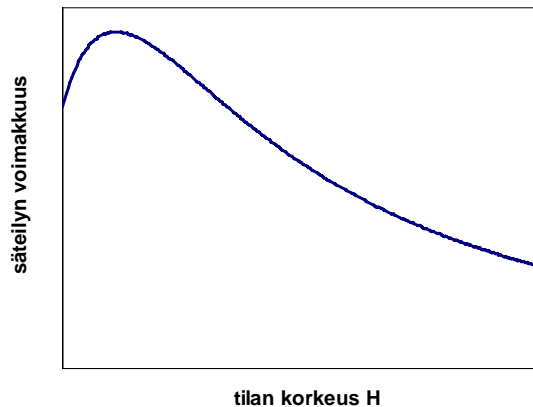
Kuuman kerroksen palokuorman kohdistaman lämpösäteilyn voimakkuuteen vaikuttavat kerroksen lämpötila T_U , paksuus H_U ja savuisuus sekä näkyvyystekijä ϕ kuumasta kerroksesta palokuorman. Liitteessä A on esitetty yksinkertainen malli tilan lattiaan kohdistuvan säteilyn voimakkuuden arviointiin.

Kuuman kerroksen kaasujen lämpötilan T_U ja sen seinien lämpötilan $T_{W,U}$ nousu kasvattaa voimakkaasti säteilevän lämpövirran tiheyttä \dot{q}_U'' : $\dot{q}_U'' \propto T_U^4$ ja $\dot{q}_U'' \propto T_{W,U}^4$. Koska kuuman kerroksen kaasujen tuottama säteily johtuu säteilyn emissiosta, se kasvaa kuuman kerroksen paksuuden H_U kasvaessa määrällä $1 - \exp(-\kappa \cdot H_U)$, missä tekijä κ kuvaa kerroksen savun kykyä vaimentaa lämpösäteilyä. Katon lähettämä säteily puolestaan vaimenee savukerroksessa määrällä $\exp(-\kappa \cdot H_U)$. (Kuva 2.)

Kuuman kerroksen kaasujen ja seinien lähettämästä säteilyenergiasta vain tietty, tilanteen geometristen suhteiden määräämä osuus suuntautuu palavaan kohteeseen. Tätä osuutta kuvataan näkyvyystekijäksi kutsutulla suureella ϕ . Yleisessä tapauksessa näkyvyystekijän laskenta voi vaatia erittäin työläitä tarkasteluja, mutta riittävän yksinkertaisissa tapauksissa tilan korkeuden ja leveyden vaikutus voidaan ilmaista ilman monimutkaisia matemaattisia lausekkeita. Tarkastellaan neliöpohjaista tilaa, jonka leveys on W ja korkeus H , sekä oletetaan savukerroksen asettuvan tilan puolivälin korkeudelle ($\Delta Z = H/2$). Jos tila on muodoltaan korkea ja kapea, niin näkyvyystekijä on kääntäen verrannollinen korkeuden toiseen potenssiin, $\phi \propto (W/H)^2$. Jos tila on

muodoltaan laaja matala tila, niin $\phi \propto 1/[1+(H/W)^2]$. Molemmissa tapauksissa palavaan kohteeseen tulevan säteilyn osuus vähenee voimakkaasti tilan korkeuden kasvaessa.

Kokonaisuudessaan kuumen kerroksen säteilylämmitys palavaan aineeseen on näkyvyystekijän ja kaasujen ja katon säteilyn summan tulo. Liitteessä A on asiaa tarkasteltu hieman tarkemmin (lähteenä Karlssonin ja Quintieren (2000) esitys). Siellä esitetyn mallin mukaan pienillä tilan korkeuksilla lattiaan kohdistuva säteily kasvaa korkeuden kasvaessa. Tietyllä korkeudella säteily saavuttaa huippuarvon, jonka jälkeen se alkaa vähetä tilan korkeuden kasvaessa. Tässä työssä vastaavanlainen ilmiö havaittiin pienen mittakaavan ontelokokeiden palamisen voimakkuudessa, ks. luku 3.2.3: palaminen oli voimakkainta tietyn korkuisessa ontelotilassa ja heikkeni sekä pienempiin että suurempiin korkeuksiin mentäessä.



Kuva 2. Kvalitatiivinen kuvaus ontelon korkeuden vaikutuksesta kuumen kerroksen kaasujen ja tilan katon palavaan kohteeseen kohdistaman säteilyn voimakkuudesta.

2.1.4 Tilan reunoihin tapahtuvat lämpöhäviöt

Tilan reunoihin tapahtuvat lämpöhäviöt muuttuvat voimakkaasti palon kehityksen aikana. Palon alussa reunapinnat ovat selvästi tilan kaasuja kylmempiä ja niihin siirtyy kaasusta runsaasti lämpöä, jolloin kaasun lämpeneminen hidastuu. Kun palo on kehittynyt täyteen voimaansa, reunat ovat kuumia, jolloin lämmönsiirto kaasusta niihin vähenee ja pinnat alkavat menettää energiaa lähettämällä lämpösäteilyä.

Eristemateriaalit, esimerkiksi mineraalivilla, joilla on alhainen lämmönjohtavuus, rajoittavat voimakkaasti lämmön siirtymistä kaasusta tilan rakenteisiin. Toisaalta hyvän lämmönjohtavuuden omaavat rakennusmateriaalit, kuten betoni, siirtävät lämpöä tehokkaasti pois kaasusta alentaen sen lämpötilaa.

Reunoihin kaasusta konvektiivisen lämmönsiirron kautta siirtyvän lämpövirran tiheys \dot{q}_w'' riippuu seinän lämpötilasta T_w ja kaasun lämpötilasta T_g pinnan

lämmönsiirtokerroimen h_k välityksellä: $\dot{q}_w'' = h_k \cdot (T_g - T_w)$. Lämmönsiirtokerroin riippuu kaasun ja seinän lämpötilaerosta, pinnan lämpöteknisistä ominaisuuksista ja pinnalla vaikuttavasta virtauksesta: palon alussa, kun lämpötilaero kaasun ja seinän välillä on suuri, lämmönsiirtokerroin on suuri ja palon kehittyessä se pienenee päätyen lopulta suunnilleen vakioiseen arvoon, jonka määrättyy seinän ominaisuuksista ja virtauksista.

Reunojen säteilevään lämmönsiirtoon liittyvät seikat riippuvat monista palotilanteen aikana muuttuvista tekijöistä, kuten niiden lämpötilasta, pinnan emissiviteetistä lämpösäteilyn aallonpituuksista, pintojen asemasta ja suunnasta lämmönlähteisiin nähden, lämmönlähteiden lämpötilasta ja tilan kaasujen säteilyn emissio- ja absorptio-ominaisuuksista. Yleispäteviä yksinkertaisia kaavoja, joilla nämä eri tekijät voidaan yhdistää kvantitatiivisesti, ei kirjallisuudesta ole löydettävissä. Joitain oleellisia tekijöitä on mainittu edellä kuuman kerroksen säteilyn yhteydessä (luku 2.1.3).

2.1.5 Tilan aukkojen vaikutus

Tilan reunojen aukkojen osuus paloa kasvattavina tai rajoittavina tekijöinä voidaan jakaa kahteen eri luokkaan. Palamisen kasvuvaiheen aikana sopivassa paikassa oleva aukko voi toimia kuumien pyrolyysikaasujen pakoaukkona, jolloin palon kehittyminen hidastuu, koska tällöin kuuman kerroksen lämpötila ja säteilyn voimakkuus pienenevät. Toisaalta siinä vaiheessa, kun palo muuttuu hapen saannin rajoittamaksi, aukkojen koko tulee ratkaisevaksi tekijäksi palon voimakkuuden kannalta.

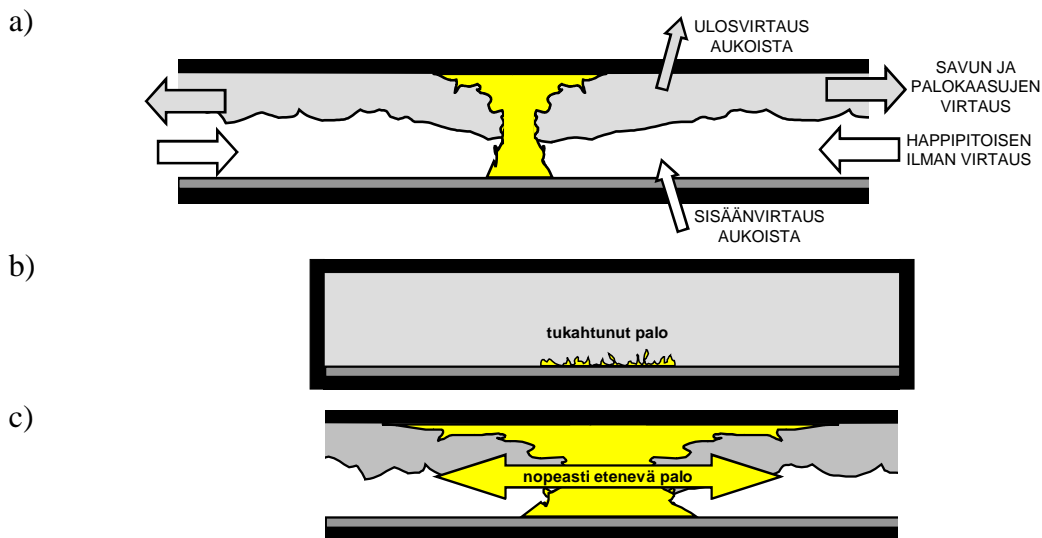
2.1.5.1 Aukkojen kautta tapahtuvat lämpöhäviöt

Kun normaalin huonetilan kuuman kerroksen alapinta on laskeutunut tilassa olevan aukon yläreunan alapuolelle, niin tilasta alkaa virrata ulos kuumia kaasuja, joiden mukana häviää lämpöenergiaa. Ontelotiloissa tilanne on samankaltainen: myös ontelopalossa syntynyt kuuma kaasukerros pyrkii purkautumaan ulos, jos ontelon yläosassa on sopivia aukkoja. Käytännössä nämä aukot voi usein olla pieniä, esim. satunnaisia vuotokohtia, jolloin aukkojen kautta tapahtuvat kaasujen virtaukseen liittyvät lämpöhäviöt voivat olla varsin pieniä. Huonepaloissa myös säteilylämmönsiirron välityksellä tapahtuvat lämpöhäviöt ulos tilan aukoista voivat olla merkittäviä, mutta ontelopaloissa ne usein ovat pieniä, koska kuumien liekkien, kuuman kerroksen ja kuumien pintojen näkyvyystekijät tilan aukkojen suhteen ovat usein pieniä (aukot ovat pieniä ja/tai kaukana lämmönlähteistä).

Mainitut syyt vaikuttavat osatekijänä ontelotilojen palovaarallisuuteen.

2.1.5.2 Aukkojen kyky syöttää hapekasta ilmaa palotilaan

Täysin kehittyneessä palossa tilassa olevat aukot auttavat palamista syöttämällä palolle happea. Suljetussa tilassa tapahtuvien palojen voimakkuus saavuttaa tavallisesti tietyn maksimisuuruuden, joka riippuu aukkojen kyvystä syöttää ilmaa palotilaan. Jos hapen saanti on riittävän vähäistä, palo voi tukahtua hapen puutteeseen. Kuva 3 havainnollistaa hapen saantia ja sen merkitystä ontelotilassa kehittyvässä palossa.



Kuva 3. a) Kaaviokuva tyypillisen vaakasuuntaisen ontelotilan hapen saannista. b) Jos hapen saanti ei riitä pitämään paloa yllä, palo tukahtuu ja tila täyttyy palokaasuilla (palo voi jatkua kytemällä). c) Jos hapen saanti on riittävän suuri, palo pääsee etenemään pitkin onteloa, mikä usein tapahtuu varsin suurella nopeudella.

Suurin osa tästä työstä käsittelee ontelopaloja, jossa happi riittää tilassa etenevän palon syntymiseen (kuva 3c), koska tuhoisista ontelotilojen tulipalotapauksista suuri osa on juuri eteneviä paloja (Hietaniemi ym. 2001).

Myös se tilanne, että palo tukahtuu hapen puutteeseen, voi johtaa vaarallisiin seuraamuksiin, kuten tilaan kertyneiden kaasujen räjähdysnomaiseen syttymiseen, jos ne pääsevät riittävän kuumina kosketuksiin hapen kanssa (tapahtuma, jota englanninkielissä kutsutaan termillä "backdraft") tai savukaasuräjähdykseen jossain toisessa tilassa, johon kaasut ovat päässeet kulkeutumaan. Tällaiset tilanteet ovat erityisen vaarallisia pelastushenkilökunnalle, mutta onneksi niitä esiintyy suhteellisen harvoin. Niiden ennaltaehkäisy teknisin keinoin on esim. Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan vaikeaa (Bengtsson 1999).

Vapaa konvektiovirtaus

Jos palotilaan virtaa ilmaa tilan ulko- ja sisäpuolella vallitsevien tiheyserojen aikaansaamien paine-erojen ajamana, voidaan tiettyjen yksinkertaistavien oletuksien puitteissa (ks. liite A) tilaan sisään virtaavan ilman massavirtaus \dot{m}_{in} lausua tilan aukon leveyden W_o ja korkeuden H_o avulla seuraavasti: $\dot{m}_{ilma} \approx 0.5 \cdot W_o H_o^{3/2}$. Tämän hyvin käyttökelpoisen tuloksen havaitsi ensimmäisenä Kawagoe (1958).

Kuluessaan täydellisesti tyypillisten polttoaineiden palamisessa kilogramma normaalin happipitoisuuden omaavaa ilmaa (happea 21 tilavuus-% tai 23 paino-%) vapauttaa energiaa noin 3 MJ/kg (Huggett 1980). Näin aukkojen kautta tapahtuvan ilmansaannin rajoittamaksi suurimmaksi mahdolliseksi palotehoksi saadaan $\dot{Q}_{max} \approx 1.5 \cdot W_o H_o^{3/2}$ MW.

Pakotettu virtaus

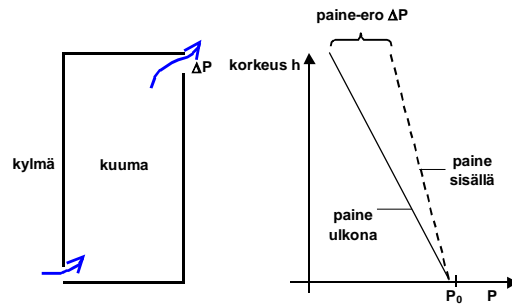
Ontelotiloissa ilman virtaus kohti paloa johtuu tilassa vallitsevasta tietyn suuruudesta virtauksesta, jota ylläpidetään esim. puhaltimin. Tyypillinen esimerkki tällaisesta ontelotilasta on ilmanvaihtoon käytetty kanava (joka voi olla esim. alaslasketun katon muodostama tila). Jos tämä pakotettu virtausnopeus on riittävän suuri, niin se määrää oleellisesti palon saaman hapen määrän. Ontelossa, jonka leveys on W ja korkeus H , keskimääräisellä nopeudella u etenevä virtaus kuljettaa mukanaan massaa nopeudella $\rho W H u$, missä tiheys ρ riippuu ilmamassan lämpötilasta.

2.2 Pystysuuntaiset ontelot

Pystysuuntaisen ontelotilan palotapauksessa liekit ja kuumat kaasut sekä savu kulkeutuvat ylöspäin suurella nopeudella. Osittain nopea eteneminen johtuu kuumiin ja siksi kevyisiin kaasuihin vaikuttavasta nostevoimasta ja osittain hormi-ilmiöstä, joka voimistaa nosteen aiheuttaa kaasujen nousemista. Hormi-ilmiö on tilan sisä- ja ulkopuolen välille kehittyvä paine-ero, kun tilan sisäpuoleiset kaasut ovat ulkopuolella olevia kuumempia (ks. kuva 4). Palotilanteissa tämä paine-ero saa aikaan usein hyvin voimakkaan virtauksen.

Pystysuuntaisessa ontelotilassa lähellä toisiaan olevat seinät kiihdyttävät palotapahtumaa voimistamalla tilassa vaikuttaa lämpösäteilyä. Osittain tähän vaikuttaa seinien välisen näkyvyystekijän kasvaminen ja osittain lämmitettävän tilan pieneneminen. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat pintojen ja kaasun emissiviteetti, jne. Säteilyn voimistumiselle kahden lähekkäin olevan pinnan vuoksi on esitetty kirjallisuudessa (Foley & Drysdale 1995) arvio, että säteilyn voimakkuus \dot{q}'' kasvaa seinien välisen välimatkan S pienentyessä suunnilleen kääntäen verrannollisena matkan

neliöjuureen, $\dot{q}'' \propto S^{-0.55}$. Tämän korrelaation toimivuutta on tarkasteltu lähemmin liitteellä A.



Kuva 4. Hormi-ilmiö pystysuuntaisessa ontelossa.

2.3 Eri tekijöiden yhteisvaikutus

Edellä on esitetyt tiedot muodostavat semikvantitatiivisen kuvauksen suljetussa tilassa kehittyvään paloon vaikuttavista tekijöistä. Kuvaus sisältää määrällisiä arvioita tiettyjen tekijöiden, kuten korkeuden, vaikutuksesta puettuna niiden vaikutuksen voimakkuutta kuvaaviin matemaattisiin ilmaisuihin (on mainittu esim. joitain potenssityyppisiä riippuvuuksia). Ontelopalojen ominaispiirteiden kuvaamiseksi tarvitaan kuitenkin näiden tietojen lisäksi määrällistä tietoa eri tekijöiden *suhteellisista* suuruuksista. Kun haetaan onteloiden kannalta kriittisiä tekijöitä, on eri tekijöiden vaikutus pystyttävä kuvaamaan myös *absoluuttisella* tasolla. Näin syvälinen palotilanteen kuvaus on mahdollista joko kokeiden avulla tai käyttämällä tietokonelaskuihin perustuvia palon kehittymistä simuloivia malleja.

3. Kokeellinen tutkimus

3.1 Suuren mittakaavan ontelopalokokeet

Suuren mittakaavan palokokeissa tutkittiin palon kehittymistä ja leviämistä kahdessa tyyppillisessä vaakasuuntaisessa ontelotilassa:

- ylösnostetun lattian tai alaslasketun katon (asennusontelot) muodostamassa ontelotilassa,
- välipohjan yläpuoleisessa ontelotilassa (esim. asumaton kylmä ullakkotila) tai muussa vastaavassa ontelotilassa, jossa puu on merkittävä paloa levittävä materiaali.

3.1.1 Koejärjestelyt

Kokeita varten rakennettiin suorakulmaisen särmiön muotoinen ontelo, jonka mitat olivat 60 cm × 120 cm × 600 cm (ks. kuva 5). Rakennuslevymateriaalina käytettiin palonkestävää, 12 mm paksua Luja A-levyä. Katossa käytettiin kahta levyä ontelon tiiviyn takaamiseksi. Ontelon runkona olivat alapuolella kantavat puiset tukirangat (48 × 72 mm²), yksi keskellä ja toiset molemmissa reunoissa. Sivuseinät oli kiinnitetty reunimmaisiiin tukirankoihin tavallisilla (22 × 95 mm²) laudoilla. Rakennelma seisoi tuettuna neljästä pisteestä Leca-harkoilla noin 70 cm:n korkeudella. Ontelon seinämät oli tuettu yläpäästään ruuvaamalla kuusi terästankoa Luja A-levyihin (kuva 6a).

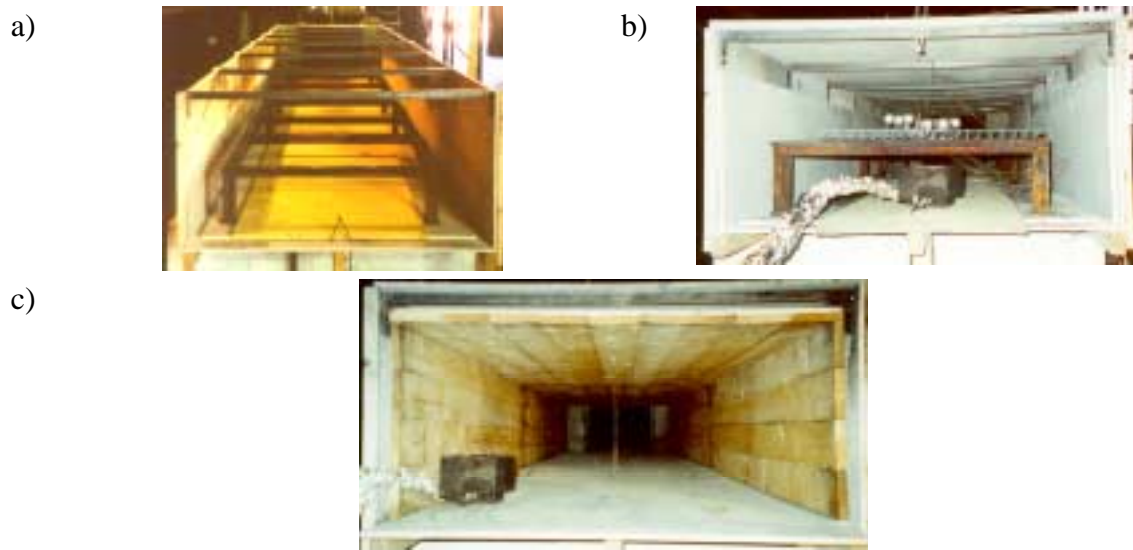
Kaapelikokeissa olivat ontelon pohjalla metalliset tukikehikot (kuva 6a), joiden päällä noin 25 cm korkeudella olivat kaapeleiden kiinnitystä varten asennetut metalliritilät. Kaapelit kiinnitettiin ritilään rautalangoin (kuva 6b). Puuontelokokeissa palokuorma asennettiin seinien verhoiluksi (kuva 6c).

Palokuormat sytytettiin propaanikaasupolttimella. Kaapelikokeissa poltin sijaitsi kaapeleiden alla niiden keskikohdalla noin 50 cm:n päässä ontelon etureunasta (ks. kuva 6b). Puuontelokokeissa poltin sijaitsi ontelon vasemman seinän vieressä kiinni seinässä noin 50 cm:n päässä ontelon etureunasta (ks. kuva 6c).

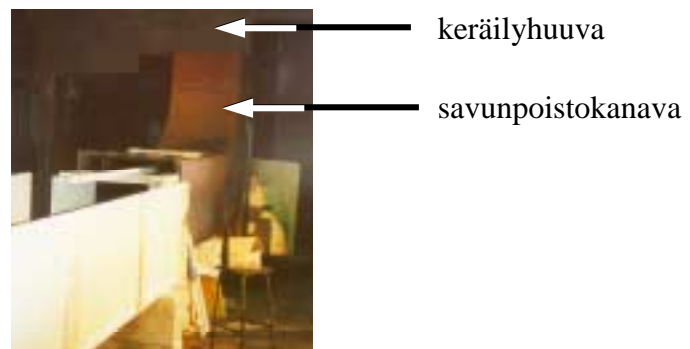
Ontelon alkupää oli avonainen ja sen loppupää yhdistetty 90°:een taitettuun savunpoistokanavaan (ks. kuvat 5 ja 7). Savunpoistokanava toimi lämpenemisen aiheuttaman luonnollisen ilmamassan liikkeen perusteella. Se johti palokaasut keräilyhuuvaan, joka imi kaasut poistoputkeen, jossa kaasusta määritettiin massavirtaus sekä happi- ja hiilidioksidipitoisuus palotehon määrittämistä varten. Poistoputken tilavuusvirtaus huoneenlämpöisille kaasuille oli säädetty noin arvoon 3,5 m³/s. Näytteenoton jälkeen savu johdettiin savukaasunkäsittelylaitokselle puhdistettavaksi.



Kuva 5. Yleiskuva suuren mittakaavan kokeissa käytetystä ontelosta.

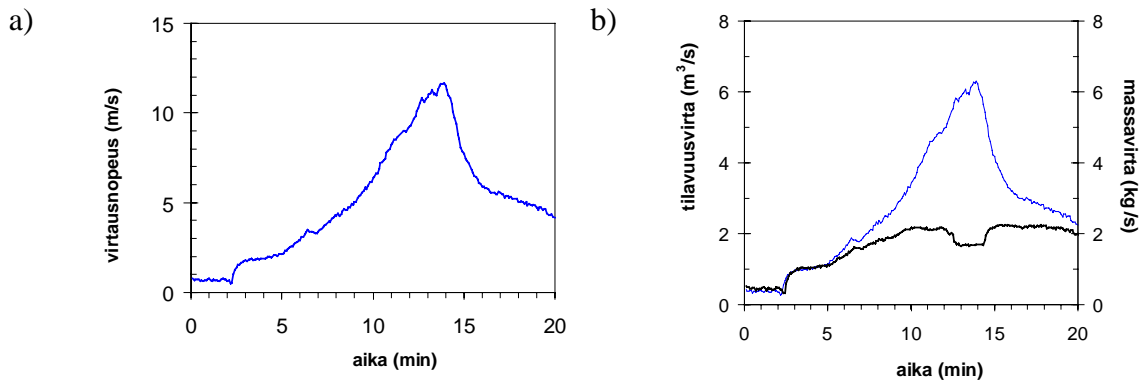


Kuva 6. a) Ontelon rakenne (lattialla oleva rautakehikko on kaapelipalokuorman kiinnittämistä varten, puuontelokokeissa sitä ei käytetty). b) Palokuorman asentaminen ja sytyttämiseen käytetyn polttimen paikka kaapelipalokokeissa. c) Puuontelokokeissa palokuorma oli seinien verhoiluna ja poltin sijaitsi seinän vieressä.



Kuva 7. Savunpoistosysteemi.

Savukaasuja ontelosta poistava systeemi tuotti onteloon sen loppupäätä kohti suuntautuneen virtauksen, jonka nopeus oli noin 0,7 m/s, mikä vastaa hieman yli 0,3 m³/s suuruista tilavuusvirtaa (massavirtaus huoneen lämpötilassa noin 0,4 kg/s). Kun poltin sytytettiin, virtausnopeus nousi noin arvoon 1,8 m/s ja palokuorman syttyessä virtausnopeus ontelossa kasvoi edelleen kuvassa 8a esitetyllä tavalla. Myös tilavuusvirta ja massavirta kasvoivat kuvassa 8b esitetyllä tavalla.



Kuva 8. Ontelon virtaukset tyypillisen kokeen aikana: a) virtausnopeus ja b) tilavuus- ja massavirrat. Esimerkkinä kaapelikokeessa 2 mitatut arvot.

Kokeissa mitattiin palotehoa, lämpötilaa ja virtauksia ontelossa sekä savun muodostumista. Tässä raportissa esitetään tuloksia vain kolmesta ensin mainitusta suureesta. Palotehon mittaamisessa käytettiin ns. hapenkulutuskalorimetriaa standardin ISO 9705:1993(E) mukaisesti. Ontelon sisälämpötiloja mitattiin K-tyypin lämpötilantureilla ja sen ulkopinnan lämpenemistä seurattiin IR-kameralla. Onteloon sisään ja ulos virtaavien kaasujen virtausnopeutta mitattiin paine-eroantureiden avulla.

Ontelon tiiviys ja savunpoistosysteemin toiminta olivat riittäviä tarkkojen palotehomittausten tekemiseksi. Palotehokalibroinnin tulos on esitetty liitteessä B.

Sytyttäminen tehtiin kaikissa kokeissa propaanikaasupolttimella. Poltin oli ISO 9705-standardin mukaisesti 17 × 17 cm² polttopinta-alaltaan ja 14,5 cm korkea. Polttimen keskikohta sijaitsi noin 50 cm:n päässä ontelon etureunasta. Kaasu johdettiin letkun avulla polttimen kotelon alaosaan, josta se vapautui karkean hiekan läpi palaen tasaisella liekillä. Kaikkien kokeiden alussa polttimen ulostulotehoksi säädettiin 50 kW. Poltin sammutettiin noin 4 minuuttia sytyttämisen jälkeen, paitsi palosuojattu kaapeleita ja puuta käyttäen tehdyissä kokeissa, joissa palokuorma ei syttynyt 50 kW:n teholla. Näissä kokeissa polttimen tehoa nostettiin kokeen aikana (yksityiskohdat on esitetty myöhemmin kunkin kokeen kuvauksen yhteydessä). Kaapelikokeissa poltin oli 10 cm kaapeleiden alapuolella.

3.1.2 Palokuormana käytetyt tuotteet ja materiaalit

Kokeissa käytettiin palokuormana seuraavia tuotteita ja materiaaleja:

- keskijännitekaapeli Ø28 mm, jonka vaippa oli pääosin tehty silloitetusta polyeteenimuovista (PEX-muovi),
- keskijännitekaapeli Ø40 mm, jonka vaippa oli palosuojattu,
- 22 mm:n paksuisesta kuusilaudasta tehty verhoilu ja
- 22 mm:n paksuisesta palosuojatusta kuusilaudasta tehty verhoilu.

3.1.2.1 Yleiset ominaisuudet

PEX-vaippaisen kaapelin kokonaismassa pituusyksikköä kohti oli 820 g/m. Johtimena oli alumiini (Ø28 mm), jonka massa pituusyksikköä kohti oli 385 g/m. Vaipan massa pituusyksikköä kohti oli 434 g/m, josta palavaa muovia oli 408 g/m (sisä- ja täytevaippa 348 g/m PEX-muovia ja ohut ulkovaippa 30 g/m PE-muovia). Vaipan massasta 6 % oli nokea. Kaapelin rakennetta on käsitelty tarkemmin liitteessä B.

Palosuojatun kaapelin kokonaismassa pituusyksikköä kohti oli 2990 g/m, josta kuparijohtimen paino-osuus oli noin 57 %, palavan aineen paino-osuus noin 33 % ja muiden rakenneosien paino-osuus noin 10 %. Palava aine muodostui kumista, etyyli-vinyylisetaatista, polyeteenistä, silloitetusta polyeteenistä ja polypropeenista. Palavasta aineesta 88 % oli palosuojattu alumiinitrihydroksidilla.

Molemmista kaapelityypeistä käytettiin 6 metriä pitkiä näytteitä. Kaapelit kiinnitettiin metalliritilöihin rautalangoilla noin puolen kaapelinhalkaisijan etäisyydelle toisistaan.

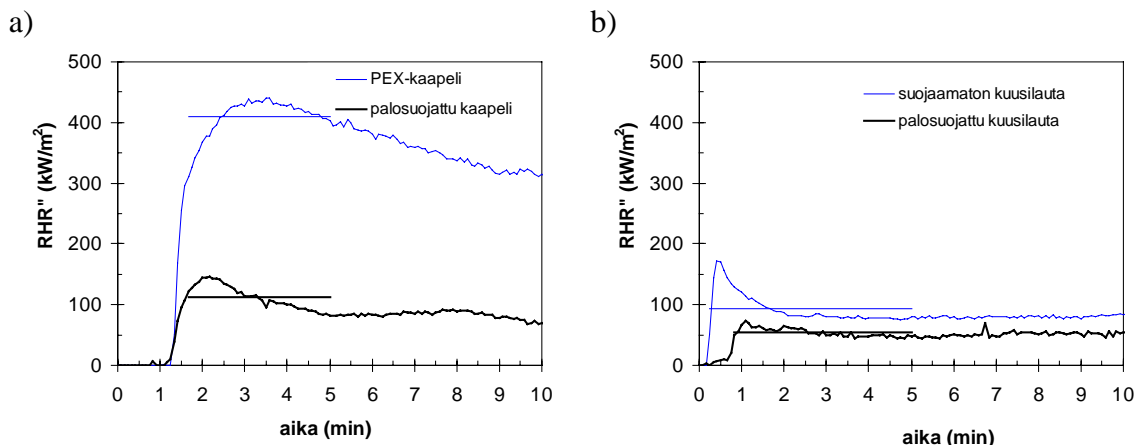
Puuontelokokeissa käytetty puutavara oli höyläämätöntä $22 \times 125 \text{ mm}^2$ kuusilautaa. Puuontelokokeessa 2 laudat palosuojattiin sivelemällä ne kahteen kertaan palonsuoja-aineella. Aiempien, vastaavalla tavalla tehtyjen käsittelyjen perusteella voidaan arvioida, että palonsuoja-aineen pinta-alaa kohden oli noin 300 g/m^2 . Puun kosteus kokeiden alussa oli noin 9,5 % sekä palosuojatulla että suojaamattomalla laudalla.

3.1.2.2 Palo-ominaisuudet

Kaapelien ja puumateriaalien lämmöntuottonopeus määritettiin kartiokalorimetrillä. Mitatut palotehokäyrät (pinta-alayksikköä vapautuva paloteho) on esitetty kuvassa 9. Pinta-alayksikköä vapautuvan palotehon (RHR^{''}) keskimääräiset arvot näytteen syttymishetken ja 5 minuutin välisenä aikana sekä teholliset lämpöarvot (EHC) olivat seuraavat:

- PEX-kaapeli: keskimääräinen RHR^{''} = 410 kW/m² ja EHC = 40 MJ/kg.
- Palosuojattu kaapeli: keskimääräinen RHR^{''} = 110 kW/m² ja EHC = 15 MJ/kg.
- Suojaamaton puu: keskimääräinen RHR^{''} = 95 kW/m² ja EHC = 15 MJ/kg.
- Palosuojattu puu: keskimääräinen RHR^{''} = 50 kW/m² ja EHC = 9 MJ/kg.

Yllä olevista arvoista nähdään, että keskimääräisesti puu palaa huonommin kuin palosuojattu kaapeli. Kuvasta 9b nähdään, että puu syttyy varsin nopeasti (tässä tapauksessa 15 s:ssä) ja ensimmäisen parin minuutin aikana se palaa keskimääräistä palamistaan selvästi voimakkaammin. Puun palovaarallisuus perustuu juuri tähän. Palosuojaus parantaa paloturvallisuutta viivästyttämällä lämmöntuoton alkamista ja vähentämällä sen määrää.



Kuva 9. Paloteho yksikköpinta-alaa kohden (kartiokalorimetri, säteily 50 kW/m²): a) PEX-kaapeli ja palosuojattu kaapeli ja b) suojaamaton ja palosuojattu kuusilauta. Vaakaosuudet viivästyttävät keskiarvoa syttymisestä 5 minuuttiin.

3.1.3 Tehdyt kokeet

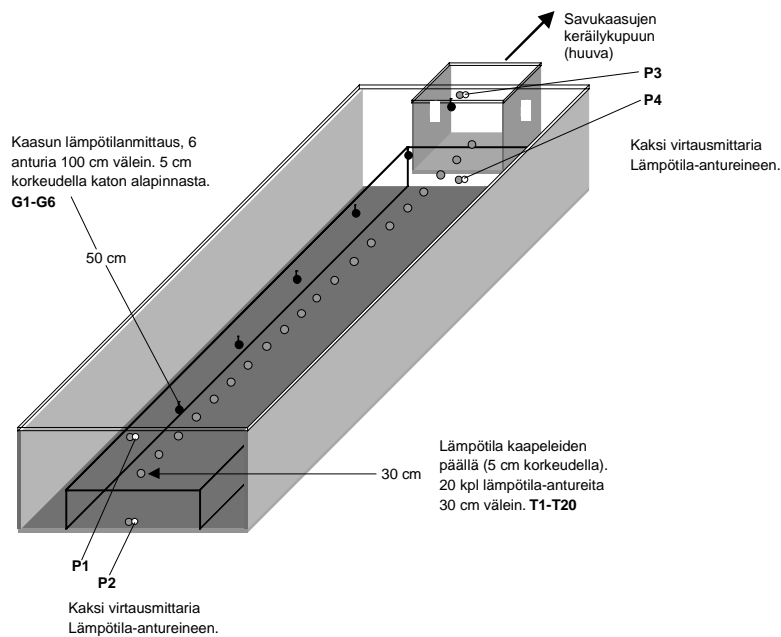
Koesarjassa tehtiin 5 kaapelipalokoetta ja 2 puuontelokoetta sekä kaksi koetta ilman palokuormaa. Kokeet ja niitä koskevia tietoja on esitetty taulukossa 1.

3.1.3.1 Ilman palokuormaa tehdyt kokeet

Koesarjan aluksi tehtiin kaksi koetta ilman onteloon asennettua palokuormaa systeemin lämpö-, virtaus- ja mittausteknisten ominaisuuksien selvittämiseksi. Lämmönlähteenä oli propanikaasupoltin. Nämä kokeet toimivat myös kokeellisena aineistona palamattoman ontelotilan paloteknisestä toiminnasta. Toinen kokeista muodosti myös palotehomittauksen kalibroinnin; toista käytettiin FDS-mallinnuksen vertailukokeena.

3.1.3.2 Kaapelikokeet

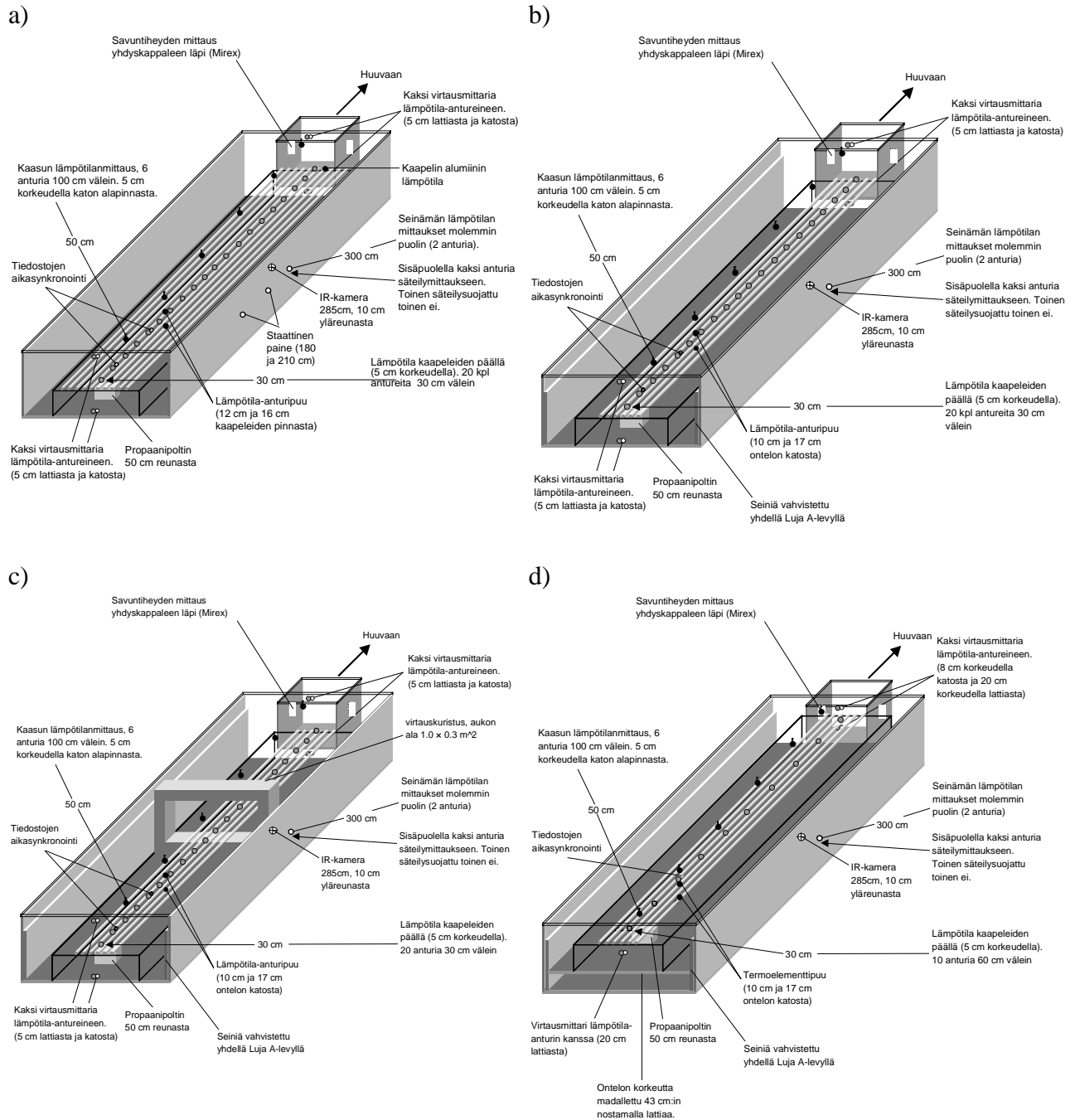
Kaikissa kaapelikokeissa mitattiin lämpötiloja ontelon yläosassa noin 5 cm:n päässä katosta sekä kaapelien päällä noin 5 cm:n korkeudella kaapelien yläpuolella. Näiden lämpötila-antureiden päätarkoitus oli mitata kuumassa kerroksessa ja polttoaineen pinnalla tapahtuvan liekin leviämisen nopeutta. Niiden ja virtausmittarien paikat on esitetty kuvassa 10. Kokeissa tehtiin myös muita apumittausten luonteisia mittauksia, joihin käytetyt instrumentit käyvät ilmi kunkin koejärjestelyn yksityiskohtia esittävistä kuvista 11a–d.



Kuva 10. Lämpötila- ja virtausmittareiden paikat kaapelikokeissa.

Taulukko 1. Suuren mittakaavan koelaitteistolla tehdyt kokeet.

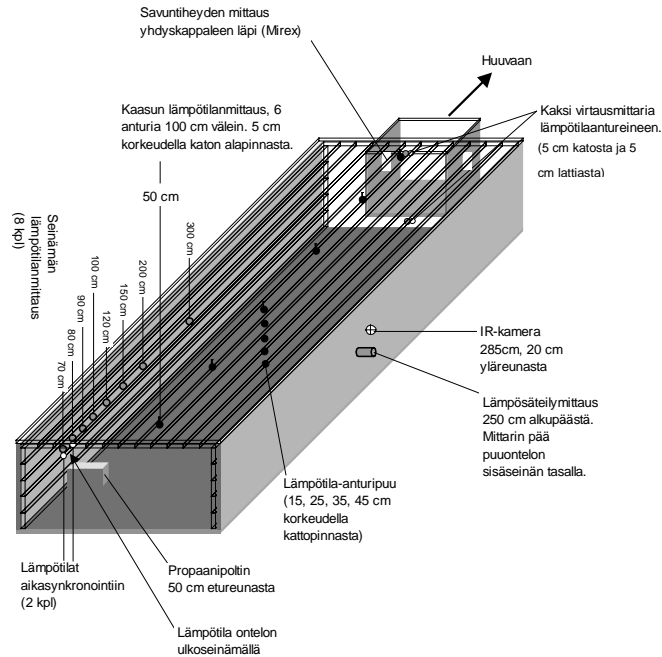
	Palokuorma	Ontelon dimensiot (sisämitat)	Kokeen oleellinen piirre	Yksityiskohtia
Palamaton ontelo, koe 1	-	60 × 120 × 600 cm	Ei palokuormaa	
Palamaton ontelo, koe 2	-	60 × 120 × 600 cm	Ei palokuormaa	
Kaapelikoe 1	10 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	60 × 120 × 600 cm	Suurempi palokuorma kuin muissa kaapelikokeissa	Onteloon asennettiin yhteensä 47 eri instrumenttia: 39 K-tyyppin lämpötila-anturia, 4 dynaamisen ja 2 staattisen paineen mittaria, yksi savuntiheyden mittauslaite sekä yksi IR-kamera. Asennetut instrumentit on esitetty kuvassa 11a. Ontelon lattia lasivillaa.
Kaapelikoe 2	6 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	60 × 120 × 600 cm	Kokeiden 1 ja 35 vertailukoe	Muuten samat instrumentit, paitsi staattisen paineen mittarit ja kaapelin johtimen lämpötilan mittaus jätetty pois. Asennetut instrumentit on esitetty kuvassa 11b. Seinällä 2 Luja A -levy. Ontelon lattia tulisijavillaa.
Kaapelikoe 3	6 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	60 × 120 × 600 cm	Virtauskuristus ontelon keskivaiheilla	Ontelon keskivaiheille asennetun virtauskuristuksen aukon ala oli 1,0 × 0,3 m ² (kuva 11c). Kokeessa mukana lämpökamera, jolla kuvattiin ontelon pinta-lämpötilan kehittymistä.
Kaapelikoe 4	6 palosuojattua kaapelia (6 m, Ø 40 mm.)	60 × 120 × 600 cm	Vähän palava kaapelimateriaali	Sama instrumentointi ja koelaitteen järjestely kuin kaapelikokeessa 2 (kuva 11b).
Kaapelikoe 5	6 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	41 × 120 × 600 cm	Onteloa madallettu nostamalla lattiaa	Ontelon korkeus 43 cm, toteutettu nostamalla lattiaa (kuva 11d). Alkupäässä on vain yksi paineanturi ja kaapeleiden pinnan lämpötilan mittaamiseen käytettiin 10 termoelementtiä.
Puuontelokoe 1	kuusilautaverhoilu	48 × 112 × 600 cm	Normaalisti palava puumateriaali	Mittausjärjestely esitetty kuvassa 12.
Puuontelokoe 2	palosuojattu kuusilautaverhoilu	48 × 112 × 600 cm	Vähän palava puumateriaali	Mittausjärjestely esitetty kuvassa 12.



Kuva 11. Kaapelikokeiden yksityiskohtaiset järjestelyt: a) kaapelikoe 1, palokuormana 10 PEX-kaapelia; b) kaapelikokeet 2 ja 4, joista edellisessä palokuormana 6 PEX-kaapelia ja jälkimmäisessä palosuojattu kaapeli; c) kaapelikoe 3, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon keskellä virtauskuristin ja d) kaapelikoe 5, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon korkeutta vähennetty 60 cm:stä 43 cm:iin.

3.1.3.3 Puuontelokokeet

Puuontelokokeissa polttoaineen pinnalla etenevien liekkien nopeutta mitattiin seinältä, jonka viereen poltin oli näissä kokeissa asetettu. Onteloon muodostuvan kuuman kerroksen lämpötilaa mittaavat lämpötila-anturit olivat 5 cm katon alapuolella.



Kuva 12. Lämpötila- ja virtausmittareiden paikat puuontelokokeissa.

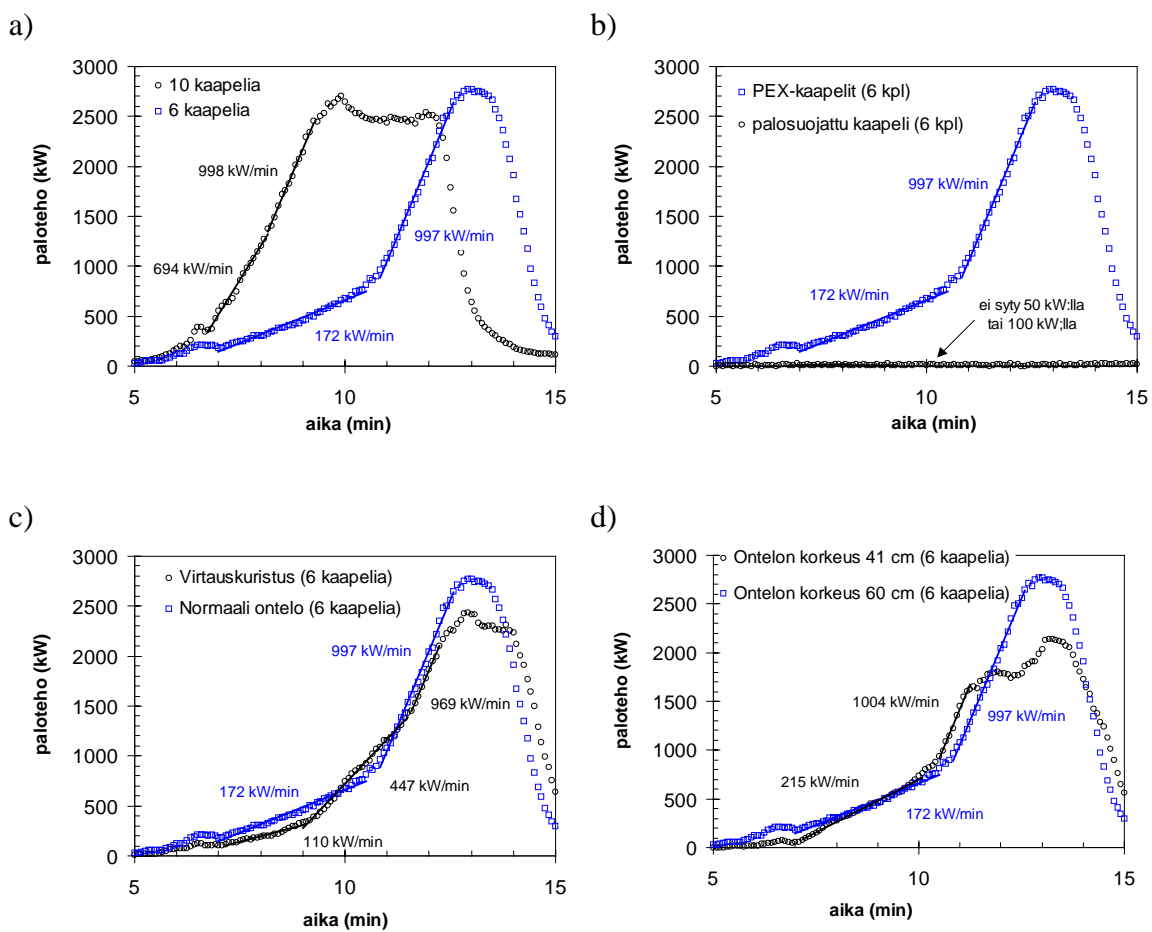
3.1.4 Suuren mittakaavan kokeiden tulokset

Palamattoman ontelon kokeissa todettiin koejärjestelyn toimivan niin lämpö- kuin virtausteknisestikin tarkoituksenmukaisesti. Mitattuja lämpötiloja käytettiin FDS-ohjelman toimivuuden vertailuun tällaisten onteloiden tapauksessa (ks. luku 4.2.2). Havaittiin olevan erinomainen.

Eri tekijöiden vaikutusta kaapelien luovuttamaan palotehoon on verrattu kuvassa 13. Kaapelikokeissa havaitut lämpötilaa 600 °C vastaavan lämpötilarintaman etenemisnopeudet kuumassa kerroksessa on esitetty kuvassa 14 ja liekkirintaman etenemisnopeudet polttoaineen pinnalla kuvassa 15. Molemmat etenemisnopeudet määritettiin siten, että lämpötilakäyristä luettiin hetki t , jolloin kyseinen, paikassa x sijainnut lämpötila-anturi oli noussut 600 °C:n lämpötilaan. Nopeus saadaan selville piirtämällä paikka x ajan t funktiona.

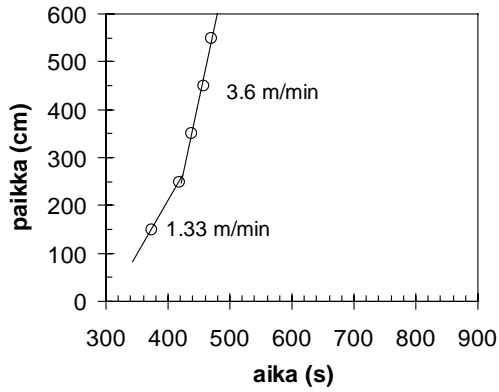
Puuverhousten luovuttamat palotehot on esitetty kuvassa 16. Liekkirintaman etenemisnopeudet kuumassa kerroksessa on esitetty kuvassa 17 ja liekkien etenemisnopeus polttoaineen pinnalla kuvassa 18.

Tuloksia on esitetty lukuarvoina taulukossa 2. Annetut keskinopeusarvot on laskettu jakamalla kuumuus- tai liekkirintaman kokeen aikana kulkema matka, noin 550 cm, ajalla, joka kyseisessä kokeessa kului palokuorman syttymisestä siihen, kun kuumuus- tai liekkirintama saavutti ontelon loppupään.

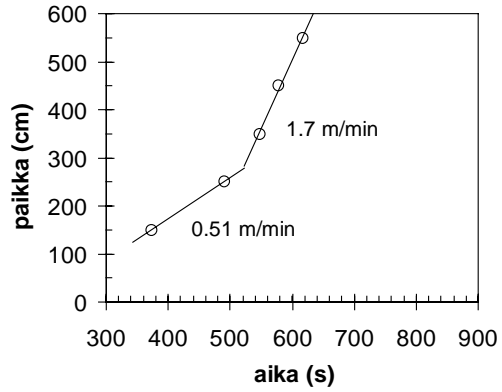


Kuva 13. Eri tekijöiden vaikutus suuren mittakaavan kokeissa kaapeleiden luovuttamiin palotehoihin (polttimen osuus vähennetty pois): a) palokuorman määrä (6 ja 10 PEX-kaapelia), b) palokuorman palavuuden vaikutus (PEX-kaapelit ja palosuojattu kaapeli), c) onteloon keskivaiheille asennetun virtausta kuristavan elimen vaikutus ja d) ontelon korkeuden vaikutus. (Palon alkuhetki, eli polttimen sytyttämishetki on noin 2.5 minuuttia.)

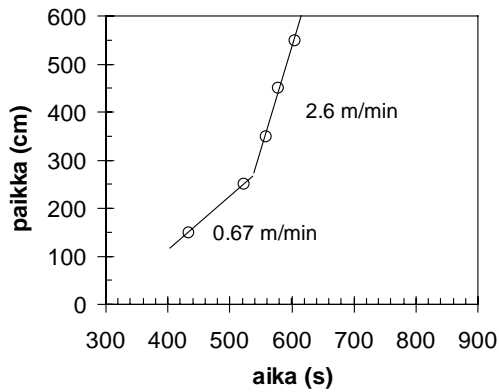
a) kaapelikoe 1



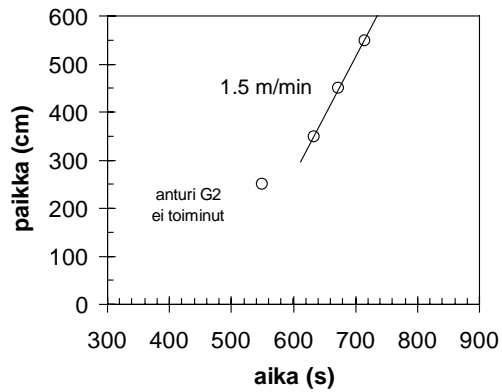
b) kaapelikoe 2



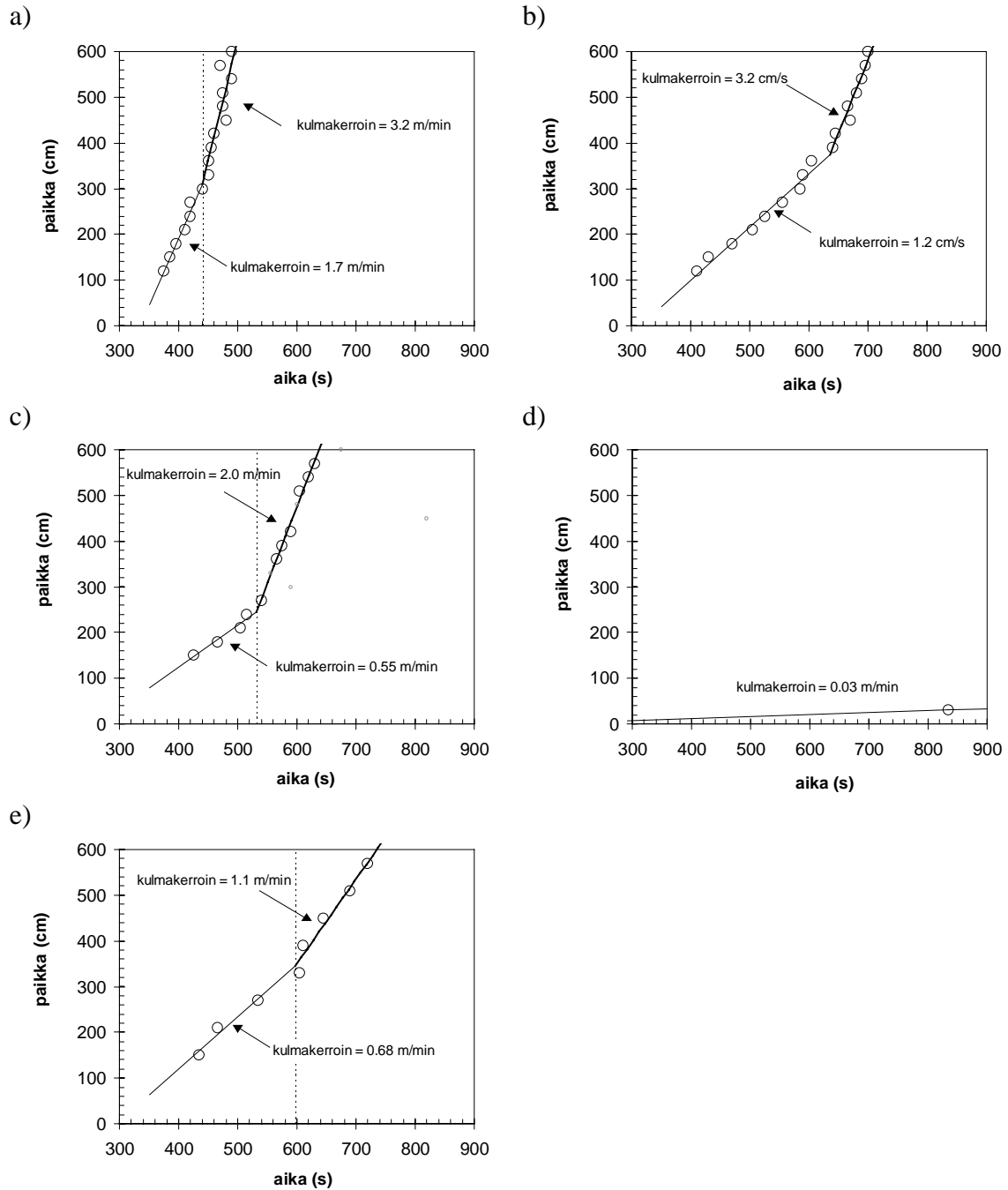
c) kaapelikoe 3



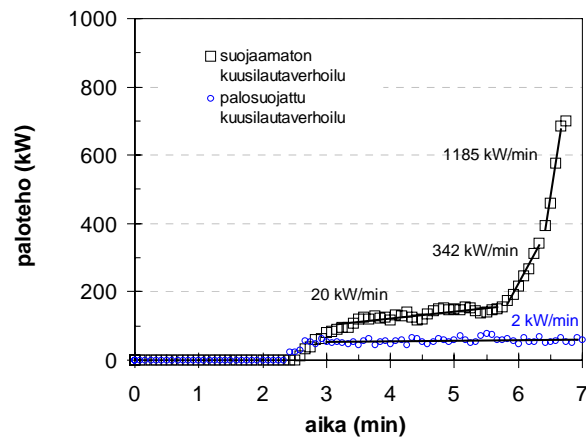
d) kaapelikoe 5



Kuva 14. Kaapelikokeet: 600 °C vastaavan lämpötilarintaman etenemisnopeus kuumassa kerroksessa: a) kaapelikoe 1, palokuorman määrä 10 PEX-kaapelia, b) kaapelikoe 2, palokuorman määrä 6 PEX-kaapelia, c) kaapelikoe 3, 6 PEX-kaapelia, ontelon keskivaiheille asennettu virtausta kuristava elin ja d) kaapelikoe 5, 6 PEX-kaapelia, ontelon korkeus 43 cm. Kaapelikokeessa 4 kuumen kerroksen lämpötilat eivät nousseet 600 °C:een.

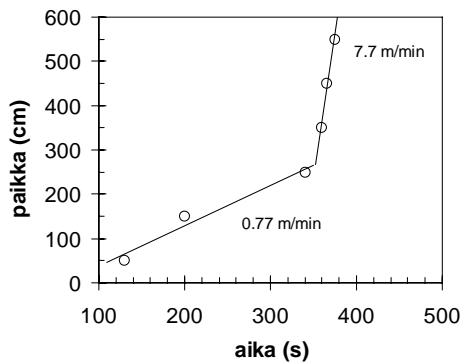


*Kuva 15. Kaapelikokeet: liekkirintaman etenemisnopeus polttoaineen pinnalla:
 a) kaapelikoe 1, palokuorman määrä 10 PEX-kaapelia; b) kaapelikoe 2, palokuorman
 määrä 6 PEX-kaapelia; c) kaapelikoe 3, 6 PEX-kaapelia, ontelon keskivaiheille
 asennettu virtausta kuristava elin; d) kaapelikoe 4, palosuojattu kaapeli ja e)
 kaapelikoe 5, 6 PEX-kaapelia, ontelon korkeus 43 cm.*



Kuva 16. Puuverhosten suuren mittakaavan ontelokokeissa luovuttamat palotehot (polttimen osuus vähennetty pois).

a) suojaamaton puu

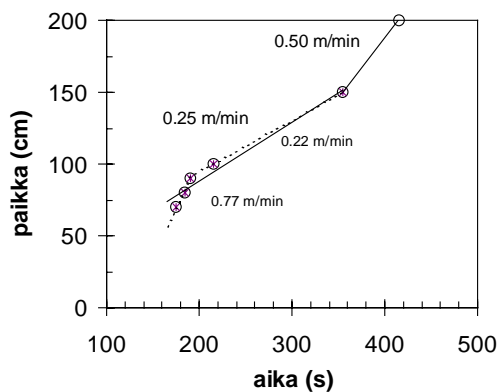


b) palosuojattu puu

liekit eivät edenneet

Kuva 17. Puuontelokokeet: 600 °C vastaavan lämpötilarintaman etenemisnopeus kuumassa kerroksessa: a) suojaamaton kuusiverhous ja b) palosuojattu kuusiverhous.

a) suojaamaton puu



b) palosuojattu puu

liekit eivät edenneet

Kuva 18. Puuontelokokeet: liekkirintaman etenemisnopeus polttimen puoleisella seinällä: a) suojaamaton kuusiverhous ja b) palosuojattu kuusiverhous.

Taulukko 2. Suuren mittakaavan koelaitteistolla tehtyjen kokeiden tuloksia.

		t _{ig} (min)	palo- tehon huippu- arvo (kW)	aika syttyttämi- sestä palotehon huippu- arvoon (min)	aika syttyttämi- sestä vaiheen 2 alkuun (min)	kuuman kerroksen lämpötila täysin kehittyneessä palossa (°C)	palotehon kasvunopeus (kW/min)		600 °C lämpötilarintaman etenemisnopeus kuumassa kerroksessa (m/min)			liekkirintaman etenemisnopeus polttoaineen pinnalla (m/min)		
							vaihe 1 ^{a)}	vaihe 2 ^{b)}	vaihe 1	vaihe 2	keski- nopeus	vaihe 1	vaihe 2	keski- nopeus
Kaapelikoe 1	10 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	2,2	2700	7,3	5,6	990	690	1000	1,3	3,6	1,7	1,7	3,2	1,7
Kaapelikoe 2	6 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	2,0	2780	10,4	8,3	940	170	1000	0,51	1,7	1,0	1,2	3,2	0,91
Kaapelikoe 3	virtauskuristus, 6 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	1,2	2430	10,3	8,9	930	110-450, ka. 300	970	0,67	2,6	0,81	0,55	2,0	0,89
Kaapelikoe 4	6 palosuojattua kaapelia (6 m, Ø 40 mm)	-	33	-	-	160	0	0	0	0	0	0,03	-	-
Kaapelikoe 5	matala ontelo, 6 PEX-kaapelia (6 m, Ø 28 mm)	2,5	2140	10,6	7,8	850	215	1000	ei mitt.	1,5	0,76	0,68	1,1	0,71
Puuontelokoe 1	kuusilautaverhoilu	0,3	700	4,1	3,7	720	20	1180	0,77	7,7	1,4	0,25	0,50	ei mitt.
Puuontelokoe 2	palosuojattu kuusilautaverhoilu	-	27	-	-	180	2		0	0	-	0	-	-

a) Vaiheella 1 tarkoitetaan vaihetta, jossa palo etenee suhteellisen hitaasti.

b) Vaiheella 2 tarkoitetaan vaihetta, jossa palo etenee varsin nopeasti (palo on saavuttanut leviämisenä kannalta kriittisen tilan).

3.1.5 Johtopäätökset suuren mittakaavan kokeista

3.1.5.1 Yleisiä huomioita

Kokeissa palojen kehitymisessä oli erotettavissa kaksi vaihetta:

- Vaihe 1, jolloin palotehon kasvu ja liekkien sekä kuumien kaasujen eteneminen oli selvästi hitaampaa kuin kokeen lopussa havaittu kasvu ja eteneminen. Tässä vaiheessa liekit olivat levinneet noin tilan puoleen väliin.
- Vaihe 2, jossa palotehon ja liekkien sekä kuumien kaasujen eteneminen oli hyvin nopeaa, moninkertaista verrattuna vaiheessa havaittuun (suojaamattoman puuverhoilun kokeessa kuumuuden etenemisnopeus kuumassa kerroksessa jopa 10-kertaistui).

Palotehokäyrän muoto ajan suhteen ei ollut usein mitoituspalomalleissa oletettua t^2 -muotoa, vaan parempi kuvaus palotehon kasvulle on kaksi kohtuullisella tarkkuudella lineaarista osaa, joiden kulmakerroin muuttuu tietyllä hetkellä. Virtauskuristetussa ontelossa kuristus aiheutti 3. vaiheen, jossa palo ei kasvanut vielä täydellä voimallaan, mutta kuitenkin selvästi nopeammin kuin palon alussa.

Palon toisessa vaiheessa palosuojaamattomien kaapeleiden palotehon kasvunopeus oli noin 1000 kW/min kaikissa tehdyissä kokeissa. Suojaamattomalle puulle se oli hiukan suurempi, noin 1200 kW/min. Jos tätä vaihetta kuvataan siirretyllä¹ t^2 -mallilla, kaapelikokeiden palonkasvu vastaa suunnilleen nopeasti kasvavaa paloa ($t_g = 150$ s) ja suojaamattoman puun kokeen palonkasvua voidaan luonnehtia erittäin nopeaksi ($t_g = 75$ s).

Kuumuus eteni kuumassa kerroksessa varsin suurella nopeudella, useita metrejä minuutissa. Kaapelikokeissa suurin havaittu nopeus oli 3,6 m/min, kun palokuorman oli 10 kaapelia ja 6 kaapelin palokuormalla kuumuus eteni noin 1,5–2,5 m/min. Suojaamattoman puulla verhoillun ontelon kokeessa kuumen kerroksen lämpötilarintama eteni vähän aikaa lähes nopeudella 8 m/min. Kaapelikokeissa liekkirintaman eteneminen palokuorman pinnalla oli suunnilleen yhtä nopeaa kuin kuumuuden eteneminen kuumassa kerroksessa. Suojaamattoman puuverhoillun ontelon

¹ Funktiomuotona $\dot{Q}_0 \left[(t - t_i) / t_g \right]^2$, missä $\dot{Q}_0 = 1000$ kW, t_i on palotehon kasvamisen alkuhetki ja t_g on palon kasvuaika.

kokeessa liekit etenevät polttoaineen pinnalla (seinällä) selvästi kaasun etenemisnopeutta hitaammin.

Vaiheessa 2 palo on niin voimakas ja etenee niin nopeasti, että sen saaminen hallintaan on vaikeaa. Ontelotilojen paloturvallisuuden kannalta onkin oleellisen tärkeää, että palokunta saapuu paikalle hyvissä ajoin ennen kuin palo riistäytyy tähän tilaan.

3.1.5.2 Onteloon madaltamisen ja virtauksen rajoittamisen vaikutus

Matala ontelo

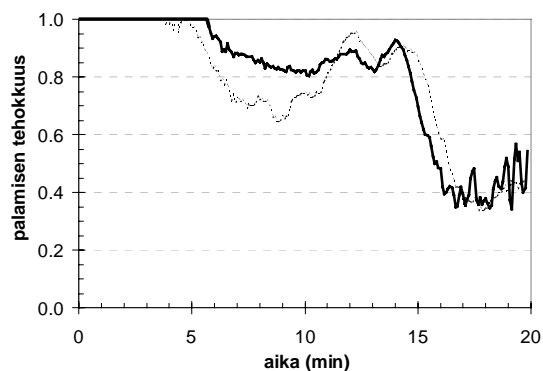
Kaapelikokeiden 2 ja 5 erona oli ontelon korkeus: kaapelikokeessa 5 ontelon korkeus oli 43 cm, vertailukokeessa 60 cm. Matalassa ontelossa mitattu paloteho näyttää aluksi vertailukokeen palotehoa pienemmältä, mikä johtuu kuitenkin siitä, että tässä vaiheessa kuumia kaasuja ja savua pääsi ulos ontelon etupäästä. Kun palo kehittyi riittävän suureksi, savunpoiston aiheuttama veto imi kaikki kaasut ja savun poistoputkeen. Matalammassa ontelotilassa palo muuttuu voimakkaasti eteneväksi hieman aiemmin kuin vertailukokeessa. Matalassa ontelossa ei saavutettu niin korkeaa palotehoa kuin vertailukokeessa: suurin saavutettu paloteho matalassa ontelossa oli 2,2 MW, kun se vertailukokeessa oli 2,8 MW. Tämä johtuu hapen saannin aiheuttamasta rajoituksesta.

Palotehojen huippuarvojen suhde on noin 1,3, mikä on varsin lähellä tilojen korkeuden suhdetta $0,60/0,43 = 1,4$. Aukon yli olevan paine-eron mukaan saadaan ennuste, että suurin paloteho skaalautuu aukon korkeuden H_o mukana kuten $H_o^{3/2}$ (ks. luku 2.1.5.2). Tämä skaalaus antaisi 0,6 m ja 0,43 m korkeiden onteloiden maksimipalotehojen suhteeksi 1,6, joka poikkeaa mitatusta arvosta. Syy tähän on luonnollisesti se, että suuren mittakaavan kokeissa ontelon ilmanvaihto oli suurelta osin savunpoistokanavan tuottaman virtauksen pakottamaa. Siksi mitattu palotehojen skaalaus on lähempänä suoraa verrannollisuutta aukon korkeuteen.

Kaiken kaikkiaan ontelon korkeuden muuttaminen ei muuttanut ontelon paloa oleellisesti vertailutapaukseen verrattuna. Eräs tärkeä syy tähän on, että suuren mittakaavan kokeet jouduttiin järjestämään siten, että niissä virtaus ontelossa oli pakotettua, jotta palokaasut ja savut saatiin kerättyä savunpoistosysteemiin. Seuraavassa luvussa esitetyissä pienen mittakaavan kokeissa tilan ilmanvaihto toimi vapaasti paine-erojen ajamana ja näissä kokeissa ontelon korkeudella havaittiin olevan vaikutusta palamisen voimakkuuteen.

Virtauskuristuksen vaikutus

Kaapelikokeessa 3 ontelon ilmatilaa oli sen keskeltä pienennetty noin 41 %:ksi vertailukokeeseen (kaapelikoe 2) nähden. Tämän kuristuksen vaikutus osoittautui varsin pieneksi: alussa paloteho on kuristetussa ontelossa pienempi, mutta täysin kehittynyt palo saavutetaan suunnilleen samalla hetkellä kuin vertailukokeessa. Paloteho jää pienemmän ilman saannin takia kuristetussa ontelossa vertailukoetta pienemmäksi. Hitaampi palotehon kehitys kuristetussa ontelossa johtuu kuristuksen takana olevan tilan heikommasta hapen saannista, joka ilmenee hyvin kuvassa 20 esitetyistä palamisen tehokkuutta² esittävästä käyrästä: noin 5–10 minuutin välillä kuristetussa tilassa palamisen tehokkuus on pienempi kuin vertailukokeessa.



Kuva 19. Vertailukokeen (kaapelikoe 2, paksu yhtenäinen käyrä) ja virtauskuristetulla ontelolla tehdyn kokeen (ohut katkoviiva) CO₂/CO-suhteesta johdetut palamisen tehokkuudet.

3.1.5.3 Kriittiset tekijät: palokuorman laatu ja määrä

Palon etenemisen kannalta kriittisimmäksi tekijäksi nousi selvästi palokuorman palavuus: sekä palosuojattu kaapeli- että puu eivät levittäneet paloa lainkaan samalla alkupalolla, jolla muut materiaalit aiheuttivat rajun palon. Sinänsä tämä havainto ei ole yllättävä, koska turvallisinta on, jos ontelossa ei ole lainkaan palavaa ainetta. Tämän tutkimuksen mallinnusosassa asiaa käsitellään kuitenkin pidemmälle ja johdetaan määrällisiä ehtoja sille, millaisia rajoituksia esim. kaapelituotteiden tai ontelotilan verhousten tulisi täyttää, jotta saavutetaan halutun pituisia ajallisia turvamarginaaleja.

² Palamisen tehokkuus on laskettu hiilidioksidin ja hiilimonoksidin suhteen avulla käyttäen Tewarsonin (1995) esittämiä kaavoja.

Kaapelikokeiden 1 ja 2 erona oli se, että kokeessa 1 palokuormana oli kymmenen kaapelia ja kaapelikokeessa 2 kuusi kaapelia. Kuvista 13 ja 14 nähdään, miten voimakkaasti tämä ero vaikutti palotehoon ja liekkirintaman etenemisnopeuteen polttoaineen pinnalla: ontelossa, jossa palokuormana oli 10 kaapelia, palotehon kasvunopeus oli huomattavasti nopeampi kuin ontelossa, jossa palokuormana oli 6 kaapelia. Palotekniikan alalla palokuorman kasvattaminen liitetään lähinnä palorasituksen ajalliseen pitenemiseen. Esitetty tulos osoittaa kuitenkin painokkaasti, että palokuorman palon kehittymistä kiihdyttävää vaikutusta ei tule jättää huomiotta onteloiden paloturvallisuutta tarkasteltaessa.

3.2 Pienen mittakaavan ontelopalokokeet

Suuren mittakaavan ontelokokeiden lisäksi tehtiin 11 pienen mittakaavan ontelokoetta, joissa ontelon dimensioita oli pienennetty suhteessa 1:6 verrattuna suuren mittakaavan kokeisiin. Pienen mittakaavan kokeiden tarkoitus oli suuren mittakaavan kokeissa saatujen tulosten täydentäminen systemaattisella tutkimuksella ontelon korkeuden vaikutuksesta palon kasvuun ja leviämiseen. Pienoismallia käyttäen tehdyssä koesarjassa tehtiin myös kokeita, joiden tuloksia voidaan verrata suuren mittakaavan kokeissa saatuihin tuloksiin.

Pienoismallikokeiden etu suuren mittakaavan kokeisiin nähden on se, että selvästi pienempien koekohtaisten kustannusten vuoksi kokeissa pystytään käymään läpi kattavammin eri tekijöiden variaatiota kuin mihin suuren mittakaavan kokeissa resurssien puitteissa yleensä pystytään.

Pienoismallikokeiden käyttö paloteknisissä tutkimuksissa perustuu siihen, että oleelliset paloa kuvaavat suureet, kuten paloteho, lämpötila ja aika skaalautuvat palotilan dimension D mukana. Eri suureiden skaalautuminen voidaan johtaa massan, liikemäärän ja energian säilymislaeista ja niihin liittyviä eri prosesseja kuvaavista malleista (Quintiere 1989). Esimerkiksi paloteho \dot{Q} , lämpötila T ja aika t skaalautuvat seuraavasti: $\dot{Q} \propto D^{5/2}$, $T \propto D^0$ (lämpötila ei siis muutu dimension D muuttuessa) ja $t \propto D^{1/2}$ sekä nopeus $u \propto D/D^{1/2} = D^{1/2}$.

Kaikkia palotilanteen dynamiikkaa kuvaavia suureita ei pystytä skaalaamaan samanlaisilla yksinkertaisilla potenssilaeilla kuin edellä esitetyt suureet. Oleellisin näistä on lämpösäteily, joka määräytyy tilan eri tekijöistä eri tavoin: lämpötila muuttaa lämpösäteilyä verrannollisena lämpötilan neljänteen potenssiin, kun taas esim. tilaan muodostuvan savukerroksen paksuus ja säteilyominaisuudet muuttavat lämpösäteilyn määrää eksponentiaalisesti. Epätäydellisyyksistään huolimatta pienoismallikokeet antavat arvokasta tietoa palotapahtumista, ja menetelmää on sovellettu lukuisien

paloteknisten ongelmien ratkaisemisessa (esim. Quintiere ym. 1978, Chow & Lo 1995, Oka & Atkinson 1995, Bryner ym. 1995).

3.2.1 Koejärjestelyt ja tehdyt kokeet

Pienoismallikokeita varten rakennettiin VTT Palotekniikan SBI-palotestilaitteen kaasunkeräilyhuuvan alle ontelo, jonka mitat olivat $100 \times 200 \times 1000 \text{ mm}^3$ (ks. kuva 20a). Rakennusmateriaalina käytettiin samaa Luja A- levyä kuin varsinaisissa kokeissa. Kuvissa 20b ja c on esitetty pienoisonTELON rakennusperiaate. Ontelon korkeutta pystyttiin säätämään lattian alla olevien kappaleiden avulla ja ontelon kattona toimi Luja A -levy, jonka päällä oli painona tiiliskivet. Pienoisontelo oli tuettu sivuiltaan Leca-harkoilla.

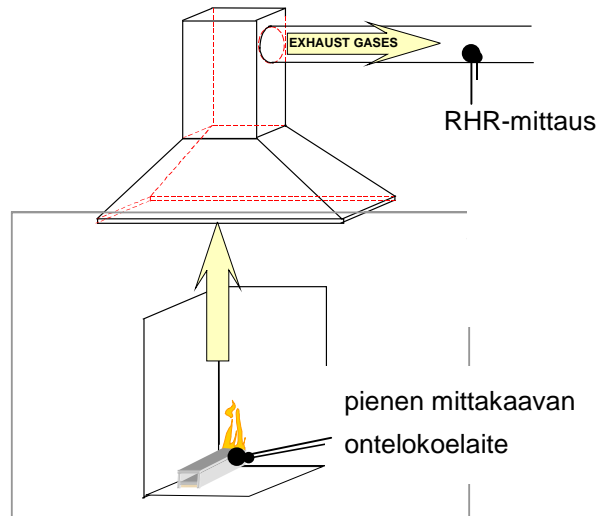
Tehdyt pienen mittakaavan kokeet on esitetty taulukossa 3.

Palokuormana käytettiin kahta eri tyyppistä palavaa ainetta, jotka sijoitettiin eri tavoin onteloon. Ensimmäiset kuusi koetta tehtiin käyttäen suuren mittakaavan kokeissa käytetyn PEX-kaapelin vaippamateriaalista leikattuja 1 m:n pituisia, poikki-pinta-alaltaan noin $7,5 \text{ mm}^2$:n suuruisia muovisuikaleita, jotka sidottiin ontelon keskikorkeudelle nostetulle ritilälle. Materiaalit sytytettiin keskikohdasta noin 6 cm:n päässä ontelon etureunasta. Seuraavissa kokeissa käytettiin palokuormana 4 mm paksua vanerilevyä, joka ruuvattiin Luja A -levyihin kiinni. Yhdessä kokeessa vaneri oli palosuojattu samankaltaisella sivelykäsittelyllä kuin suuren mittakaavan ontelokokeissa käytetty palosuojattu lautatavara. Näissä kokeissa sytytyslähde sijaitsi ontelon edestä katsottuna tilan vasemmassa reunassa siten, että sen keskikohta noin 6 cm:n päässä etureunasta.

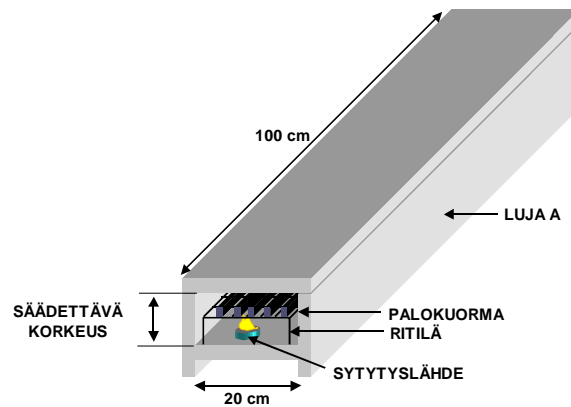
Sytytyslähteenä käytettiin lämpökynttilän alumiiniastiaa (halkaisija 37 mm), jossa polttoaineena oli lamppuöljy. Lamppuöljyn massankulutuksen perusteella sytytyslähteen tehoksi voidaan arvioida noin 0,5–0,6 kW, mikä palotehon skaalauslain mukaan vastaisi dimensioltaan 6-kertaisessa tilassa noin 50 kW:n palotehoa, eli samaa arvoa kuin käytettiin keskisuuren mittakaavan kokeissa.

Kokeissa mitattiin palotehoa standardin (prEN 13823, 2001 (SBI)) mukaisesti ja mitattiin sekä kuuman kerroksen että palokuorman pinnan lämpötiloja. Kuuman kerroksen lämpötila-anturit olivat noin 2 cm ontelon katon alapuolella etäisyyksillä 10, 40, 70 ja 100 cm ontelon etupäästä (ks. kuva 21). Palokuorman pinnan lämpötilojen mittausta tehtiin joko ritilään tai seinään kiinnitetyillä lämpötila-antureilla, jotka olivat paikoissa 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 ja 95 cm ontelon etupäästä (ks. kuva 21).

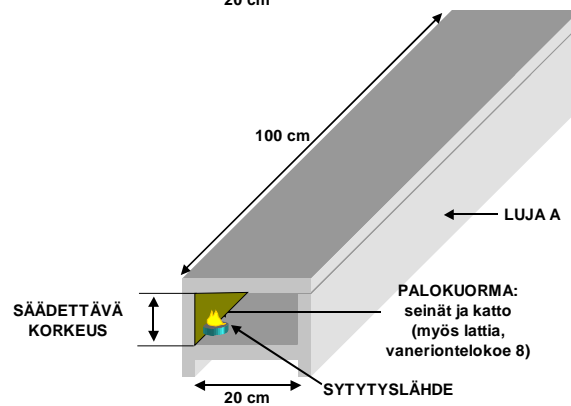
a)



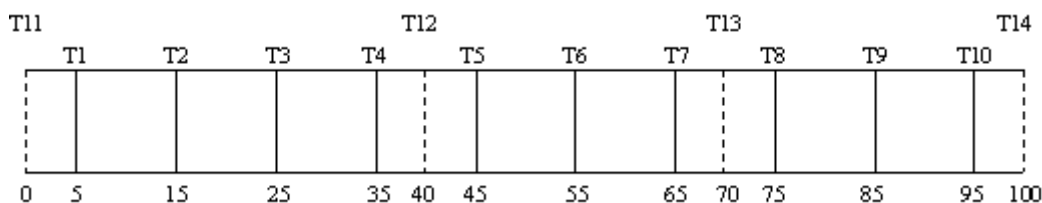
b)



c)



Kuva 20. Pienen mittakaavan ontelokokeiden järjestelyt: a) koelaitte SBI-palotestauslaitteen yhteydessä, b) PEX-kaapeleiden vaippamateriaalista tehdyn palokuorman tutkimusjärjestely ja c) vaneripalokuorman tutkimusjärjestely.



Kuva 21. Lämpötila-antureiden paikat pienen mittakaavan kokeissa. Kuvan alla olevat numerot tarkoittavat termoelementtien etäisyyksiä ontelon etupäästä (kuvan vasen laita). PEX-kaapelin vaippamateriaalia käyttäen tehdyissä kokeissa 1–6 lämpötila-anturit T1–T10 olivat kiinni palokuorman kannatinritilässä ja vaneriontelokokeissa 1–5 ne olivat kiinni ontelon vasemmassa seinässä. Kuvassa katkoviivalla merkityt lämpötila-anturit T11–T14 olivat kaikissa kokeissa kiinni ontelon katossa.

Taulukko 3. Pienoismalliontelokokeet ja niitä koskevia tietoja. Ontelon leveys oli 20 cm ja pituus 1 m kaikissa kokeissa.

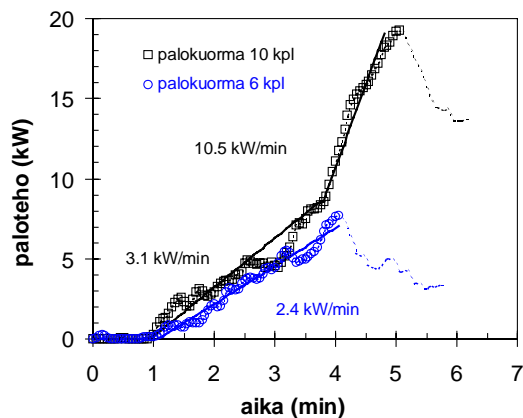
	Palokuorma	Ontelon korkeus (mm)
Muovikoe 1	6 PEX-muovisuikaletta, 340 g	100
Muovikoe 2	10 PEX-muovisuikaletta, 523 g	100
Muovikoe 3	6 PEX-muovisuikaletta, 330 g	75
Muovikoe 4	6 PEX-muovisuikaletta, 346 g	200
Muovikoe 5	6 PEX-muovisuikaletta, 319 g	∞, palokuorma poltettiin ontelon päällä
Muovikoe 6	6 PEX-muovisuikaletta, 333 g	300
Vanerikoe 1	4 mm vaneri, seinät ja katto, 970 g	100
Vanerikoe 2	4 mm vaneri, seinät, katto ja lattia, 1420 g	100
Vanerikoe 3	4 mm vaneri, seinät ja katto, 1490 g	200
Vanerikoe 4	4 mm vaneri, seinät ja katto, 710 g	50
Vanerikoe 5	4 mm palosuojattu vaneri, seinät ja katto, 970 g	100

3.2.2 Pienen mittakaavan kokeiden tulokset

Pienen mittakaavan kokeiden tulokset on esitetty kuvissa 22–28 sekä taulukossa 4.

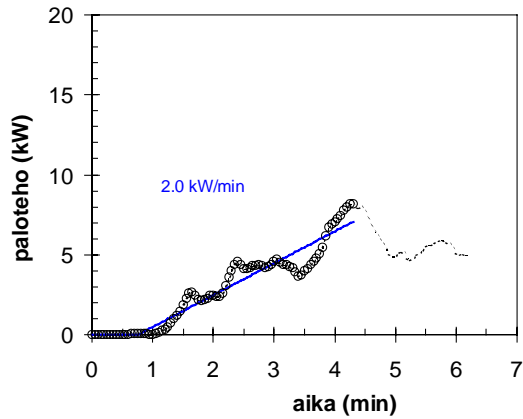
Palotehoa koskevat tulokset on esitetty vertaamalla eri tekijöiden vaikutuksia. Kuvassa 22 vertailun kohteena on kaapelimateriaalista tehdyn palokuorman määrä ja kuvassa 23 ontelon korkeuden vaikutus kaapelimateriaalin avulla tehdyissä kokeissa. Vaneriverhoilun määrän vaikutus palotehoon on esitetty kuvassa 25, vanerin palavuuden vaikutus (palosuojattu tai suojaamaton) kuvassa 26 ja vanerilla verhoillun ontelon korkeuden vaikutus kuvassa 27.

Kuumassa kerroksessa etenevän 600 °C:n lämpötilan rintaman etenemisnopeudet ja liekkirintaman etenemisnopeudet polttoaineen pinnalla on esitetty kuvissa 24 (kaapelimateriaali) ja 28 (puu).

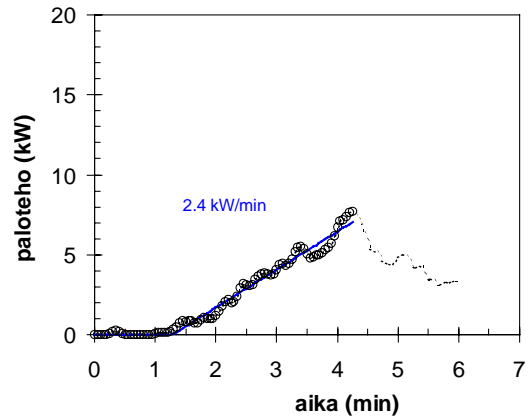


Kuva 22. Palokuorman luovuttamien palotehojen kehittyminen pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuormana oli PEX-kaapelin vaipasta leikatut suikaleet: palokuorman määrän vaikutuksen vertailu, 6 ja 10 PEX-kaapelin vaipan suikaletta.

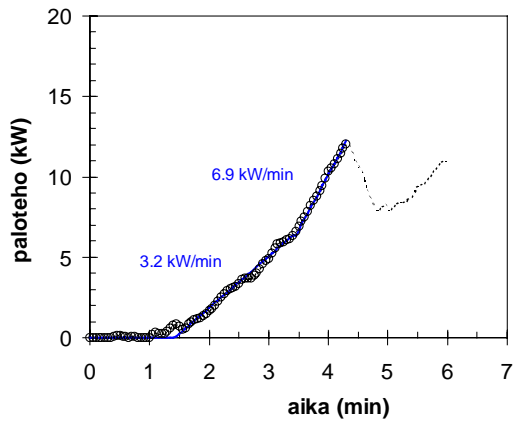
a) 7,5 cm



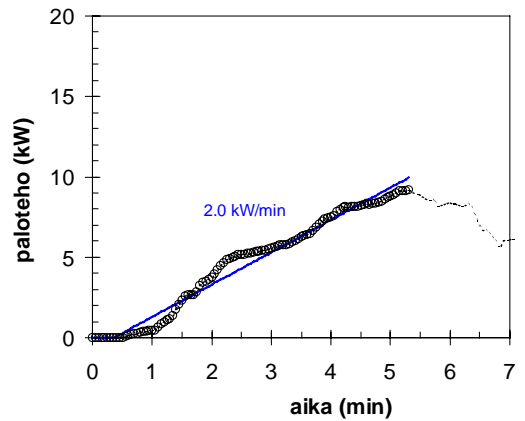
b) 10 cm



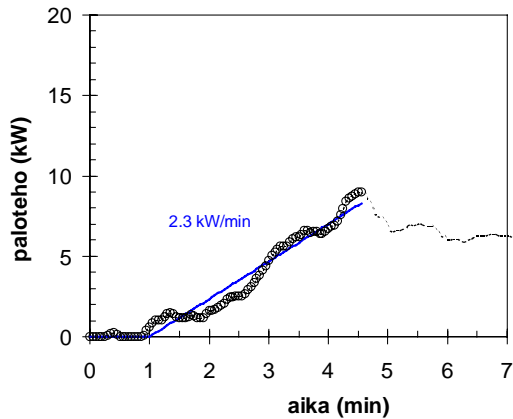
c) 20 cm



d) 30 cm

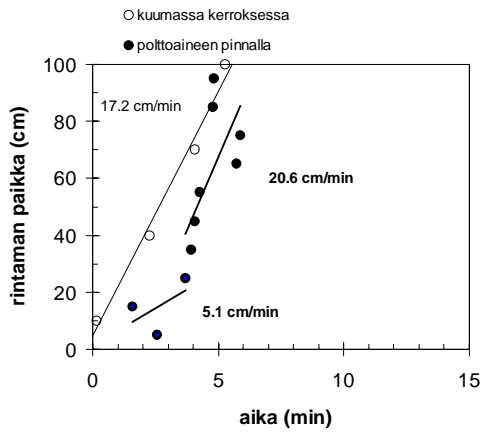


e) ei onteloa (rajoittamaton korkeus)

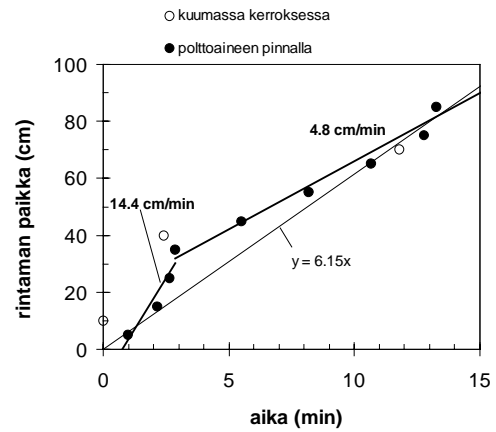


Kuva 23. Palokuorman luovuttamien palotehojen kehittyminen pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuormana oli 6 PEX-kaapelin vaipasta leikattua suikaletta: ontelon korkeuden vaikutus. a) ontelon korkeus 7,5 cm, b) 10 cm, c) 20 cm, d) 30 cm ja e) tapaus, jossa kaapelit palavat ontelon ulkopuolella.

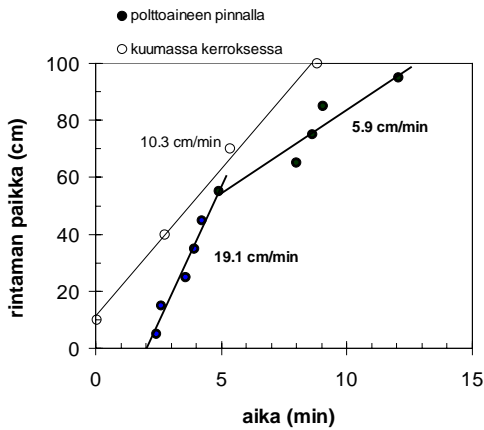
a) palokuorma 10 kpl, korkeus 10 cm



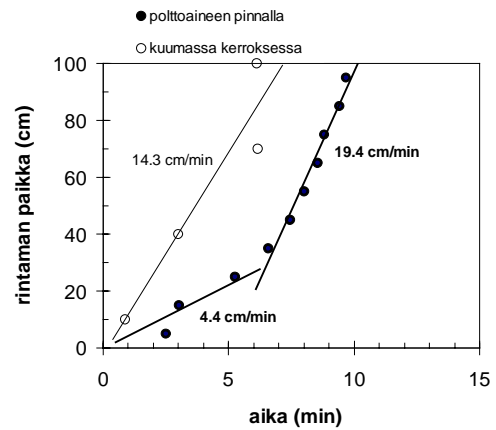
b) palokuorma 6 kpl, korkeus 7,5 cm



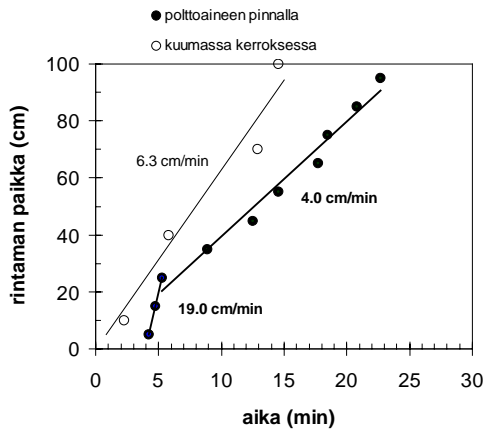
c) 10 cm



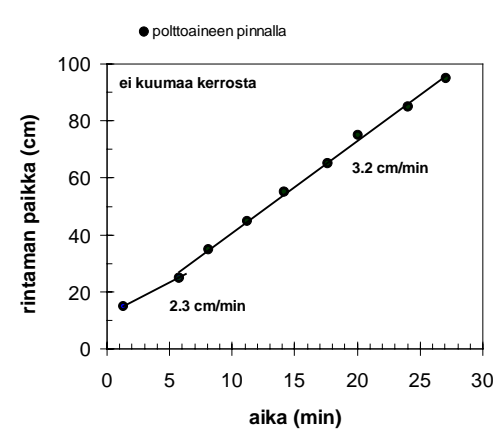
d) 20 cm



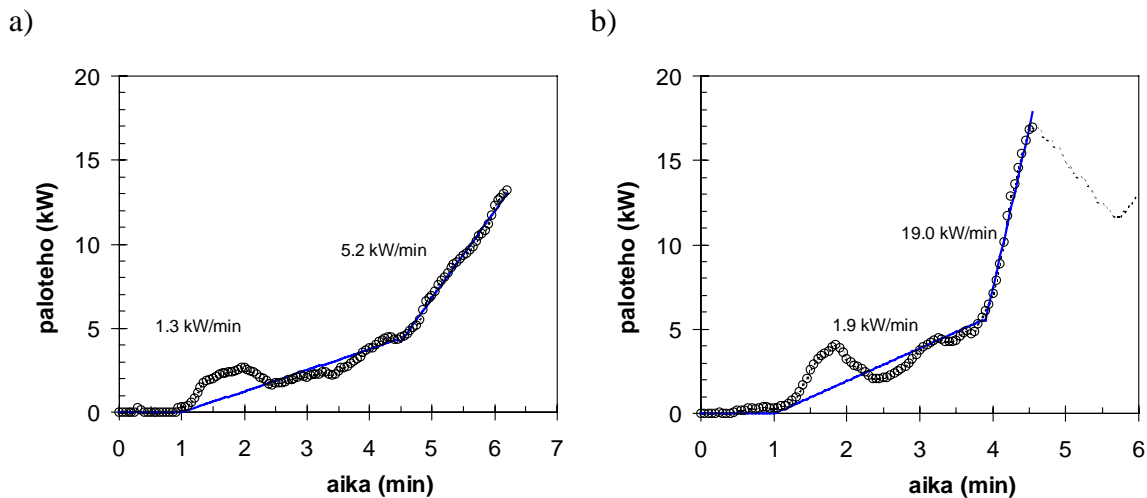
e) 30 cm



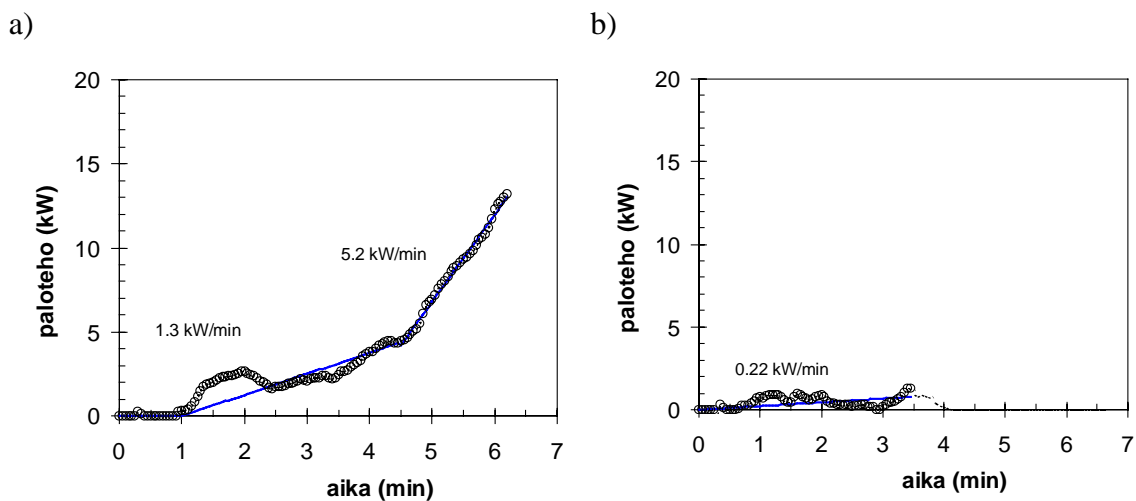
f) ei onteloa (rajoittamaton korkeus)



Kuva 24. Lämpötilaa 600 °C vastaavan lämpötilarintaman ja polttoaineen pinnalla etenevän liekkirintaman paikat pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuormana oli PEX-kaapelin vaipasta leikatut suikaleet: a) palokuormana 10 PEX-kaapelin vaipasta leikattua suikaletta, ontelon korkeus 10 cm b) palokuormana 6 PEX-kaapelin vaipasta leikattua suikaletta, ontelon korkeus 7,5 cm, c) sama palokuorma, korkeus 10 cm, d) sama palokuorma, 20 cm, e) sama palokuorma, 30 cm ja e) tapaus, jossa kaapelit palavat ontelon ulkopuolella (sama palokuorma).

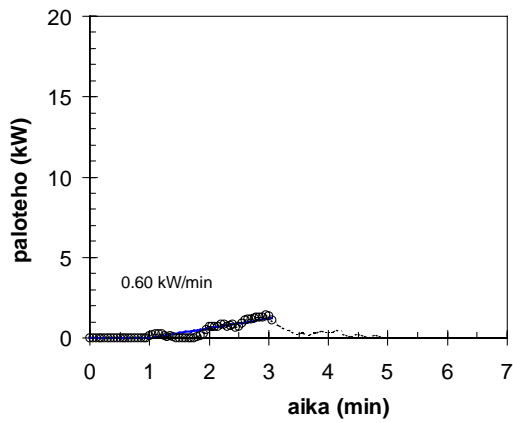


Kuva 25. Palokuorman luovuttamien palotehojen kehittyminen pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuormana oli ontelon verhoiluksi asennettu 4 mm paksu vanerilevy: palokuorman asettelun tai määrän vaikutuksen vertailu, a) vanerilevy seinillä ja katossa sekä b) vanerilevy seinillä, katossa ja lattialla.

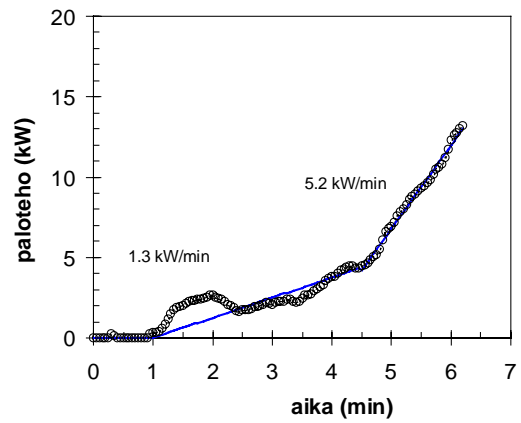


Kuva 26. Palokuorman luovuttamien palotehojen kehittyminen pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuormana oli ontelon verhoiluksi asennettu 4 mm paksu vanerilevy: palokuorman palo-ominaisuuksien vaikutuksen vertailu, a) suojaamaton vanerilevy ja b) palosuojattu vanerilevy.

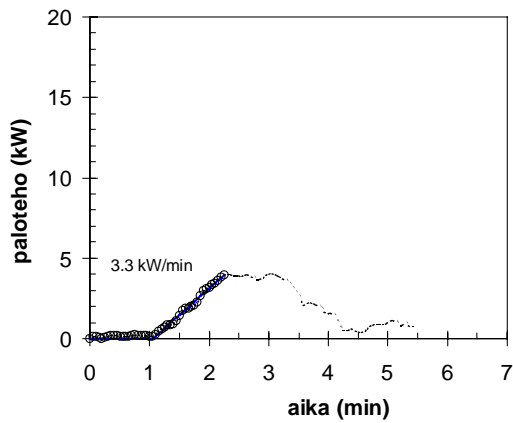
a) 5 cm



b) 10 cm

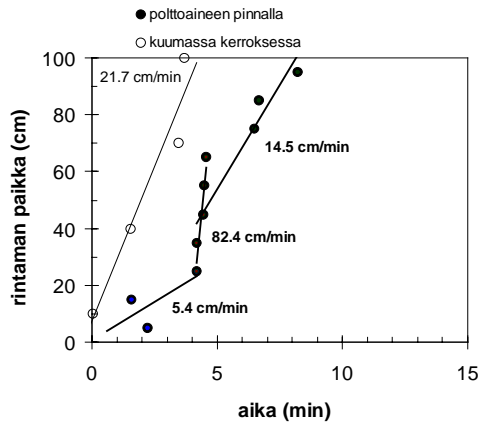


c) 20 cm



Kuva 27. Palokuorman luovuttamien palotehojen kehittyminen pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuorman oli ontelon verhoiluksi asennettu 4 mm paksu vanerilevy: ontelon korkeuden vaikutus. a) ontelon korkeus 5 cm, b) 10 cm ja c) 20 cm.

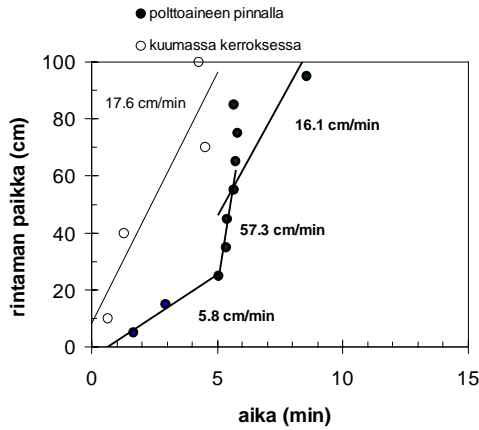
a) 10 cm, vaneri seinillä, katossa ja lattialla



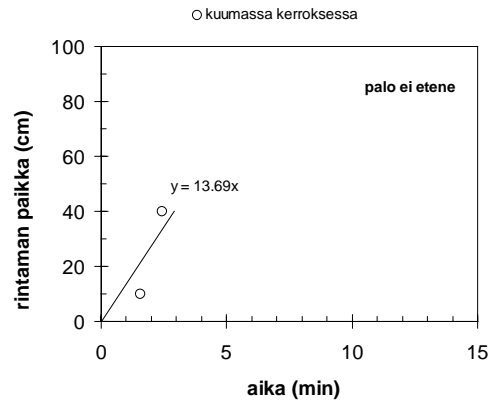
b) 5 cm, vaneri seinillä ja katossa

palo ei etene

c) 10 cm, vaneri seinillä ja katossa



d) 20 cm, vaneri seinillä ja katossa



e) 10 cm, palosuojattu vaneri

palo ei etene

Kuva 28. Lämpötilaa 600 °C vastaavan lämpötilarintaman ja polttoaineen pinnalla etenevän liekkirintaman paikat pienen mittakaavan kokeissa, joissa palokuormana oli 4 mm paksu vanerilevy: a) vaneri seinillä, katossa ja lattialla, ontelon korkeus 10 cm, b) vaneri seinillä ja katossa, ontelon korkeus 5 cm, c) sama palokuorma, korkeus 10 cm, d) sama palokuorma, 20 cm, e) palosuojattu vaneri, 10 cm.

Taulukko 4. Pienen mittakaavan koelaitteistolla tehtyjen kokeiden tuloksia. Suluissa annetut luvut ovat skaalausrelaatioiden avulla saatuja suurta mittakaavaa vastaavia lukuja.

	ontelon korkeus (cm)	palotehon huippuarvo (kW, skaalatut MW)	aika sytyttämisestä vaiheen 2 alkuun (min)	palotehon kasvunopeus (kW/min)			600 °C lämpötilarintaman keskinopeus kuumassa kerroksessa (m/min)	liekkirintaman etenemisnopeus polttoaineen pinnalla (m/min)		
				vaihe 1 ^{a)}	vaihe 2 ^{b)}	ka. ^{c)}		vaihe 1	vaihe 2	keskinopeus
6 × PEX, 340 g	10 (60)	13,7 (1,2)	-	2,4 (90)		2,3 (80)	0,13 (0,32)	0,19 (0,47)	0,057 (0,14)	0,084 (0,21)
10 × PEX, 523 g	10 (60)	23,0 (2,0)	2,8 (7)	3,1 (110)	11,3 (410)	6,5 (230)	0,22 (0,54)	0,049 (0,12)	0,21 (0,50)	0,125 (0,31)
6 × PEX, 330 g	7,5 (45)	9,2 (0,8)	-	2,2 (80)		2,0 (70)	0,063 (0,15)	0,14 (0,35)	0,049 (0,12)	0,067 (0,16)
6 × PEX, 346 g	20 (120)	45,7 (4,0)	2,0 (5)	3,2 (120)	6,9 (250)	4,4 (160)	0,12 (0,29)	0,045 (0,11)	0,19 (0,48)	0,110 (0,27)
6 × PEX, 319 g	∞,	9,7 (0,9)	-	2,6 (90)		2,3 (80)	ei kattoa	0,024 (0,06)	0,033 (0,08)	0,035 (0,09)
6 × PEX, 333 g	30 (180)	13,0 (1,1)	-	2,1 (80)		2,0 (70)	0,071 (0,17)	0,19 (0,47)	0,041 (0,10)	0,040 (0,10)
vaneri, seinät ja katto, 970 g	10 (60)	16,0 (1,4)	3,5 (9)	1,3 (50)	5,2 (190)	3,2 (120)	0,30 (0,74)	0,057 (0,14)	0,16 (0,39)	0,13 (0,32)
vaneri, seinät, katto ja lattia, 970 g	10 (60)	20,6 (1,8)	2,9 (7)	1,9 (70)	19,0 (680)	10,5 (380)	0,37 (0,91)	0,053 (0,13)	0,15 (0,36)	0,13 (0,32)
vaneri, seinät ja katto, 1490 g	20 (120)	4,0 (0,3)	-	3,3 (120)		3,3 (120)	ei etene	ei etene	ei etene	ei etene
vaneri, seinät ja katto, 710 g	5 (30)	1,4 (0,1)	-	0,60 (20)		0,60 (20)	ei etene	ei etene	ei etene	ei etene
palosuojattu vaneri, seinät ja katto, 970 g	10 (60)	1,3 (0,1)	-	0,22 (8)		0,22 (8)	ei etene	ei etene	ei etene	ei etene

a) Vaiheella 1 tarkoitetaan vaihetta, jossa palo etenee suhteellisen hitaasti; b) Vaiheella 2 tarkoitetaan vaihetta, jossa palo etenee varsin nopeasti (palo on saavuttanut leviämisen kannalta kriittisen tilan); c) Palotehon keskimääräinen kasvunopeus tarkasteluajana.

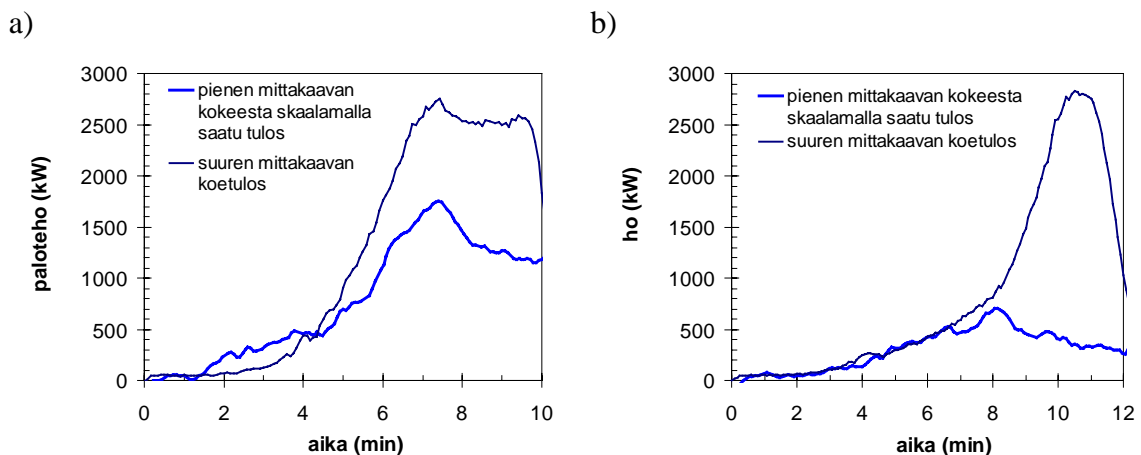
3.2.3 Johtopäätökset pienen mittakaavan ontelopalokokeista

3.2.3.1 Pienen mittakaavan kokeiden tulosten käyttökelpoisuus

Kuvassa 29 on verrattu pienen mittakaavan ja suuren mittakaavan tuloksia koskien PEX-kaapelin vaippamateriaalilla tehtyjä kokeita. Tässä pienen mittakaavan kokeiden palotehot on esitetty suurta mittakaavaa vastaamaan skaalattuina, eli kerrottuna tekijällä $6^{5/2} = 88$. Näissä kokeissa pienen mittakaavan ontelon korkeus oli 10 cm, joten luvussa 2 mainittu ilmansaannin rajoittama paloteho on 10 kW (kun ontelo saa ilmaa vain toisesta päästään), eli suureen mittakaavaan skaalattuna noin 900 kW. Kuvasta 29 nähdään, että tämän palotehoarvon alapuolella suuren ja pienen mittakaavan palokokeiden tulokset vastaavat toisiaan kohtuullisen hyvin; etenkin kuvassa 29b yhteensopivuus on hyvä.

Tätä palotehoarvoa suuremmilla arvoilla pienen ja suuren mittakaavan koetulokset eroavat toisistaan, koska niiden ilmanvaihto oli erilainen: suuressa mittakaavassa tehdyissä kokeissa savunpoistohormi sai aikaan vedon, joka pystyi syöttämään palolle enemmän happea kuin pienen mittakaavan kokeissa, joissa vastaavaa savunpoistosysteemiä ei ollut.

Positiivinen vertailu suuren mittakaavan kokeisiin osoittaa, että tehdyt pienen mittakaavan kokeet pystyivät tuottamaan suuren mittakaavan kokeita vastaavia tuloksia ja siksi niiden tuloksia voidaan pitää käyttökelpoisina arvioitaessa normaalin kokoisten ontelotilojen paloturvallisuutta.



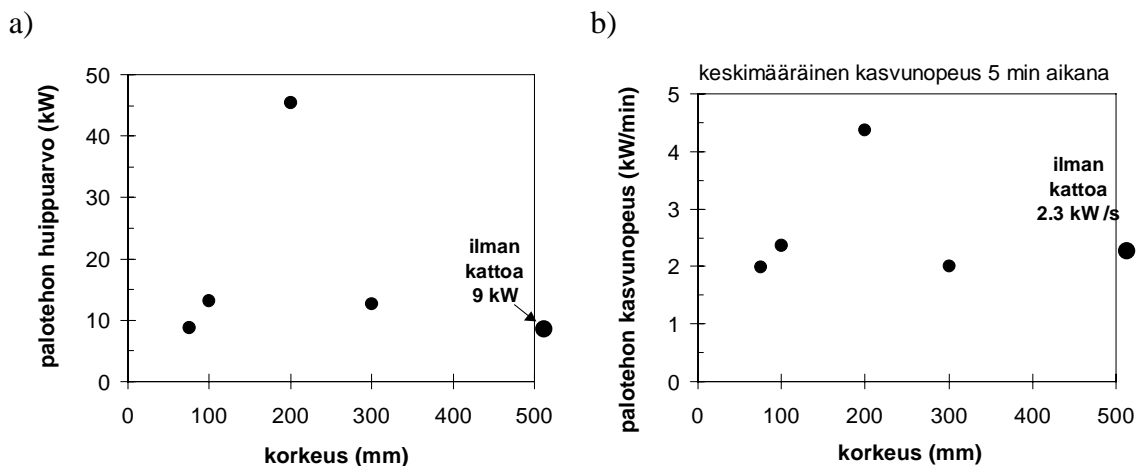
Kuva 29. Pienen mittakaavan kokeista skaalaamalla saatujen tulosten ja suuren mittakaavan kokeiden tulosten vertailu: a) 10 ja b) 6 palokuormayksikköä. Siihen asti, kunnes pienen ja suuren mittakaavan kokeiden erilainen ilmansaanti alkaa vaikuttaa, tulokset vastaavat toisiaan kohtuullisen hyvin.

3.2.3.2 Ontelon korkeuden vaikutus palon voimakkuuteen

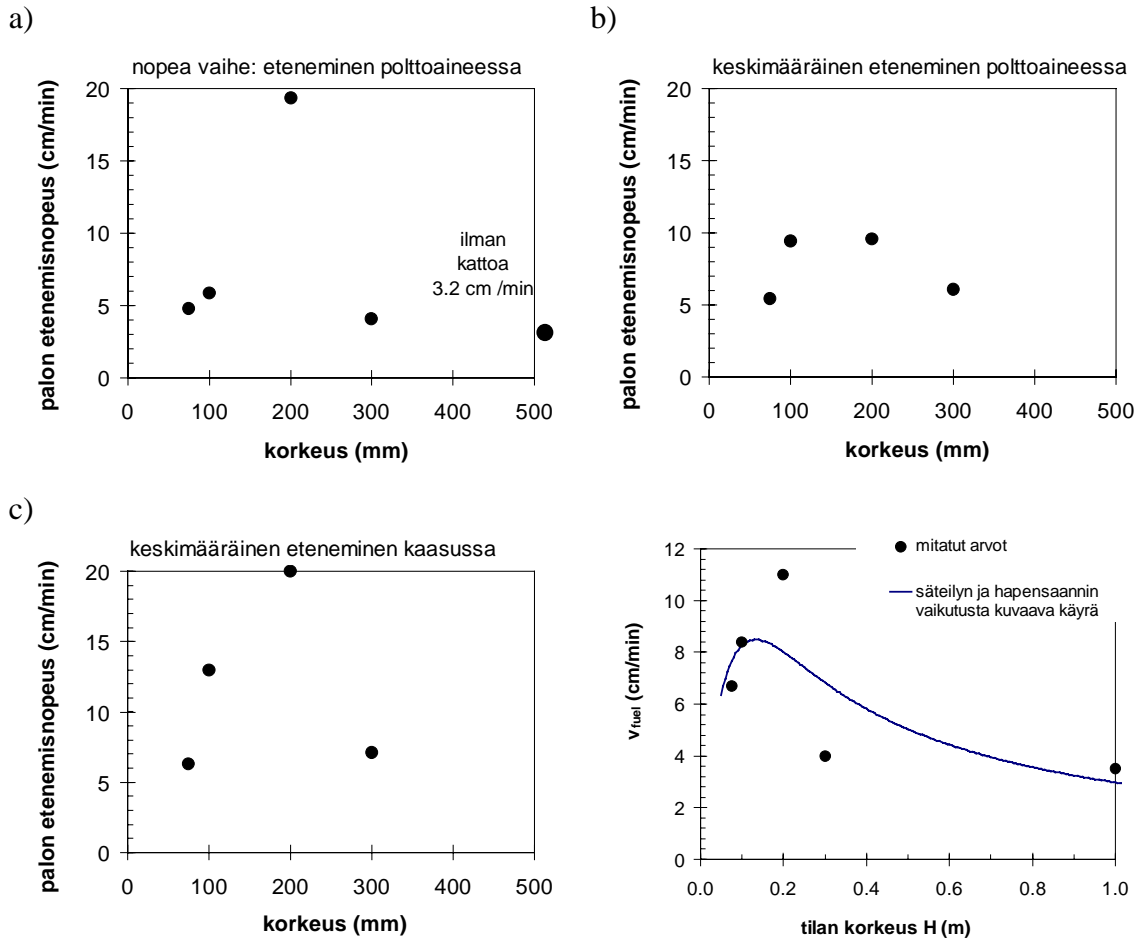
Oleellisin havainto pienen mittakaavan kokeista on se, että tietyllä ontelon korkeudella palo on selvästi voimakkaampi kuin sitä pienemmillä tai suuremmilla korkeuksilla. Tätä on havainnollistettu palotehon osalta kuvassa 30 sekä liekkien ja kuuman kerroksen kaasujen lämpötilan etenemisnopeuksien osalta kuvassa 31.

Pienen mittakaavan kaapelikokeissa 20 cm korkeassa ontelossa palo oli selvästi voimakkaampi ja eteni nopeammin kuin muilla korkeuksilla. Kuvassa 31d on havainnollistettu, että tämä tulos on selitettävissä kvalitatiivisella tasolla yhdistämällä kuuman kerroksen tilan lattiaan kohdistaman säteilyn suuruus ja hapen saannin matalissa tiloissa paloa rajoittava vaikutus.

Kaapelimateriaalista tehty palokuorma oli riittävän herkästi palavaa (lämmöntuotto tai pinta-ala riittävän suuri), jotta palo pystyi etenemään myös ilman ontelon palamista vahvistavaa vaikutusta.



Kuva 30. Pienen mittakaavan kokeista saatu tulos ontelon korkeuden vaikutuksesta a) palotehon huippuarvoon ja b) palotehon keskimääräiseen kasvunopeuteen .



Kuva 31. Pienen mittakaavan kokeista saatu tulos ontelon korkeuden vaikutuksesta etenemisnopeuteen: a) liekkirintaman etenemisnopeus vaiheessa, jossa palo kasvaa voimakkaasti, b) liekkirintaman keskimääräiseen etenemisnopeus ja c) 600 °C vastaavan lämpötilarintaman etenemisnopeus kuumassa kerroksessa sekä d) keskimääräisen liekkirintaman etenemisnopeuden vertaaminen teoreettiseen säteilyn ja hapensaannin vaikutusta kuvaavaan funktioon (funktio ei ole tarkka teoreettinen kuvaus tilanteesta, vaan se on mielivaltaisilla kerroin-arvoilla saatu lineaarinen yhdistelmä liitteessä A esitetyistä tilan lattiaan kohdistuvan säteilyn ja hapen saannin vaikutuksista).

Palon voimakkuuden kannalta kriittinen ontelon korkeus riippuu palokuorman palavuudesta ja sen asettelusta. Puuverhoiluissa onteloissa liekit eivät edenneet 5 cm korkeissa eivätkä 20 cm korkeissa onteloissa. Jälkimmäisessä tapauksessa ontelon korkeus oli ilmeisesti niin suuri, että palamisen takaisinkytkentämekanismi ei ollut riittävän voimakas saadakseen aikaan vanerissa etenevän palon. Edellisessä tapauksessa palamisen eteneminen estyi hapen vähyyteen.

Pienen mittakaavan kokeissa havaittu palon voimakkuuden kannalta kriittinen ontelon korkeus on löydettävissä myös todellisen mittakaavan ontelotiloissa. Tämän korkeuden

määrittäminen skaalaamalla pienen mittakaavan tulokset suuriin onteloihin ei kuitenkaan onnistu suoraviivaisesti, koska kyseinen korkeus määräytyy eri tekijöiden yhteisvaikutuksena, jossa näiden tekijöiden osuudet ovat tuntemattomia. Siksi kyseisen suureen skaalautumista ei tunneta.

3.2.3.3 Palavan aineen määrän ja laadun vaikutus

Samoin kuin suuren mittakaavan kokeissa, myös pienen mittakaavan kokeissa ontelon palokuorman määrän ja laadun vaikutus palamiseen oli merkittävä.

Kuvasta 22 nähdään, että pienen mittakaavan kaapelimateriaalin kokeissa 10 kaapelinsuikaleen palokuormalla paloteho kasvaa noin 2,5-kertaiseksi verrattuna 6 kaapelinsuikaleella tehtyyn kokeeseen verrattuna. Merkittävin ero kokeissa on se, että 10 kaapelinsuikaleen palokuormalla tehdyssä kokeessa palo etenee nopeasti kehittyvään vaiheeseen, mutta pienemmällä palokuormalla palaminen lähtee laskuun, kun paloteho tulee lähelle hapen määrän sallimaa rajaa. Suuremmalla palokuormalla maksimipaloteho vastaa hapen saannin rajoittamaa arvoa silloin, kun ontelo saa happea molemmista päistään. Kun tarkastellaan liekkirintaman paikkoja (kuva 24 a ja b), havaitaankin, että suuremmalla palokuormalla palo oli ennättänyt noin 4–5 minuutin kohdalla ontelon loppupäähän.

Kuva 25 osoittaa, miten palokuorman lisääminen siten, että verhoilu on katon ja seinien lisäksi myös lattialla nopeuttaa palon kehitystä nopeasti etenevään vaiheeseen noin 25 %, ja nopeasti etenevässä palossa paloteho kasvaa selvästi nopeammin saavuttaen korkeamman arvon.

Palosuojatulla vanerilla verhoillussa pienen mittakaavan ontelossa palokuorma ei juurikaan osallistunut palamiseen.

3.2.3.4 Ontelon virtauksen vaikutuksesta

Tarkastelemalla suuren mittakaavan kokeissa saatuja (taulukko 2) ja pienen mittakaavan kokeista suurta mittakaavaa vastaamaan skaalattuja arvoja (taulukko 4) palotehon kasvunopeuksille sekä kuumassa kerroksessa etenevän lämpötilarintaman ja polttoaineen pinnalla etenevän liekkirintaman etenemisnopeuksille havaitaan, että pienen mittakaavan kokeissa saadut arvot ovat suuren mittakaavan kokeissa saatuja arvoja pienempiä.

Tärkein syy mainittujen nopeuksien eroihin on se, että suuren mittakaavan kokeissa savunpoistohormi tuotti onteloon voimakkaan vedon (virtausnopeus ilman paloa ontelon sisällä noin 0,7 m/s), jota pienen mittakaavan kokeissa ei ollut. Myöhemmin esitettävät mallinnustutkimukset osoittavat, että ontelotilan virtauksen kasvaminen lisää merkittävästi palon kasvu- ja etenemisnopeutta.

3.3 Kokeita julkisivujen onteloissa leviävistä paloista

Tyypillisiä julkisivujen ja seinärakenteiden onteloiden paloturvallisuustarkastelussa on huomioitavia palotilannetta ovat seuraavat uhkakuvat:

- Tuli syttyy julkisivun alaosassa (usein tahallaan sytytettyinä) ja etenee pääasiassa ylöspäin. Alkupalo on tyypillisesti pienempi kuin 1 MW.
- Tulen alkuperä on lieskahtanut huoneistopalo, tyypillisesti suurempi kuin 1 MW.

Molemmissa tapauksissa tarkastelun kohteena ovat

- palamattoman ja palavan julkisivumateriaalin väliset erot,
- julkisivun korkeuden vaikutus ja palon leviämisen aikaskaala sekä
- palokatkojen, ulokkeiden ym. rakenteellisten ratkaisujen vaikutus.

Kun tuli pääsee räystäälle, se voi levitä tuuletusraon kautta ullakon ontelotilaan. Tulen leviämistä räystään kautta ullakolle on tarkasteltu erikseen liitteessä G.

3.3.1 Palamaton/palava julkisivumateriaali

3.3.1.1 Perusteet

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1, Rakennusten paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet vuodelta 1997 esitetään ulkoseinien pintojen luokkavaatimukset seuraavasti:

TAULUKKO		ULKOSEINIEN PINTOJEN LUOKKAVAATIMUKSET				
8.3.4		Syttymisherkkyyssluokka / palonlevittämislukka				
Rakennuksen paloluokka ja käyttötapa						
	P1		P2		P3	
	P1-luokan rakennukset yleensä	Enintään 4-kerroksiset asuin- ja työpaikka-rakennukset	Hoito-laitokset	3-4 -kerroksiset asuin- ja työpaikka-rakennukset	Muut P2-luokan rakennukset	
Ulkoseinän ulkopinta	1 / I ¹⁾	1 / I ²⁾	1 / I ²⁾	1 / I ²⁾	2 / –	2 / –
Tuuletusilma-rakoon rajoittuvat pinnat	1 / I ¹⁾	1 / I ²⁾	1 / I ²⁾	1 / I ²⁾	2 / –	– / –

Taulukon huomautukset:

- 1) Enintään kahdeksankerroksisessa P1-luokan rakennuksessa julkisivun pinnan osa saa olla luokkaa 2/–, mikäli tällaisia osia ympäröivät rakenteet suojaavat seinäpintaa palon leviämiseltä. Julkisivulevyjen kiinnitykseen saa enintään kahdeksankerroksisessa rakennuksessa vähäisessä määrin käyttää palavia rakennustarvikkeita.
- 2) Luokan 2/– tarvikkeiden käyttö on sallittu kohdan 8.3.5 edellytyksin.

Kohdassa 8.3.5 todetaan seuraavaa:

"Enintään 4-kerroksisessa P1-luokan asuin- tai työpaikkarakennuksessa, 3–4-kerroksisessa P2-luokan asuin- tai työpaikkarakennuksessa sekä P2-luokan hoitolaitos-rakennuksessa voidaan ulkoseinän ulkopinnassa käyttää 2/–-luokan tarviketta, mikäli

- rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla ja
- palon leviäminen ulkoseinän pinnassa ja tuuletusraossa on rajoitettu katkoina sekä
- ulkoisen syttymisen vaara on otettu huomioon."

Tarkasteltaessa palon leviämistä tuuletusraossa voidaan siis rajoittaa muihin P2-luokan rakennuksiin (enintään 2 kerrosta) ja luokan P3 rakennuksiin (voi olla 1–2 kerrosta).

3.3.1.2 Kokeellinen tutkimus

Palamattoman ja palavan julkisivumateriaalin eroja tutkittiin pienen mittakaavan kokeissa. Koekappaleet koostuivat puurungosta, tuulensuojalevystä, tuuletusraosta ja rimoituksesta sekä julkisivumateriaalista. Rakenne selviää kuvasta 32a ja käytetyt materiaalit taulukosta 5. Koekappaleiden pystysivut suljettiin kokeen ajaksi puurimoilla.

Taulukko 5. Julkisivuontelokokeiden materiaalit. Palamaton alaosa oli tehty Luja A -levystä.

Koekappale	Tuulensuojalevy	Tuuletusrako	Julkisivumateriaali
1	Huokoinen kuitulevy	22 mm	Luja A
2	Huokoinen kuitulevy	22 mm	Havuvaneri
3	Huokoinen kuitulevy	50 mm	Luja A
4	Huokoinen kuitulevy	50 mm	Havuvaneri
5	Luja A	22 mm	Luja A
6	Havuvaneri palosuojattuna	22 mm	Luja A

Tuuletusrako muodostettiin vaakarimoitusta käyttäen ja sen paksuus oli 22 tai 50 mm. Tuulensuojalevynä käytettiin kokeissa 1–4 huokoista kuitulevyä (Tuulileijona, paksuus 12 mm), jonka paloluokitus on -/-. Palamatonta julkisivulevyä edusti Luja A (paksuus 12 mm) ja palavaa havuvaneri (paksuus 12 mm), jonka paloluokitus on 2/-. Koe 5 tehtiin kokonaan palamattomista levyistä rakennetulle vertailukoekappaleelle. Kokeen 6 tuulensuojalevynä käytettiin BSM 2000 -palonsuoja-aineella kahteen kertaan siveiltyä havuvaneria, joka on ominaisuuksiltaan palamattoman ja luokan -/- materiaalin väliltä.

Sytytylähteenä käytettiin propaanikaasupoltinta (pinta-ala 30 cm × 30 cm, korkeus 15 cm) joka sijoitettiin koekappaleen alareunan keskikohdalle kuvan 32b osoittamalla tavalla. Poltin paloi 30 minuuttia 20 kW:n paloteholla. Polttimen liekin korkeus oli noin 30 cm, joten se ulottui noin 15 cm:n korkeudelle julkisivulevyn alareunasta. Kokeen aikana mitattiin lämpötiloja tuuletusraossa (termoelementit $T_{in1}-T_{in5}$) ja julkisivulevyn pinnassa (termoelementit $T_{s1}-T_{s3}$) K-tyypin termoelementeillä (langan paksuus 0,5 mm). Koekappaleiden lämmöntuotto mitattiin hapenkulutuskalorimetriaa käyttäen ja savantuotto valon vaimennukseen perustuen.

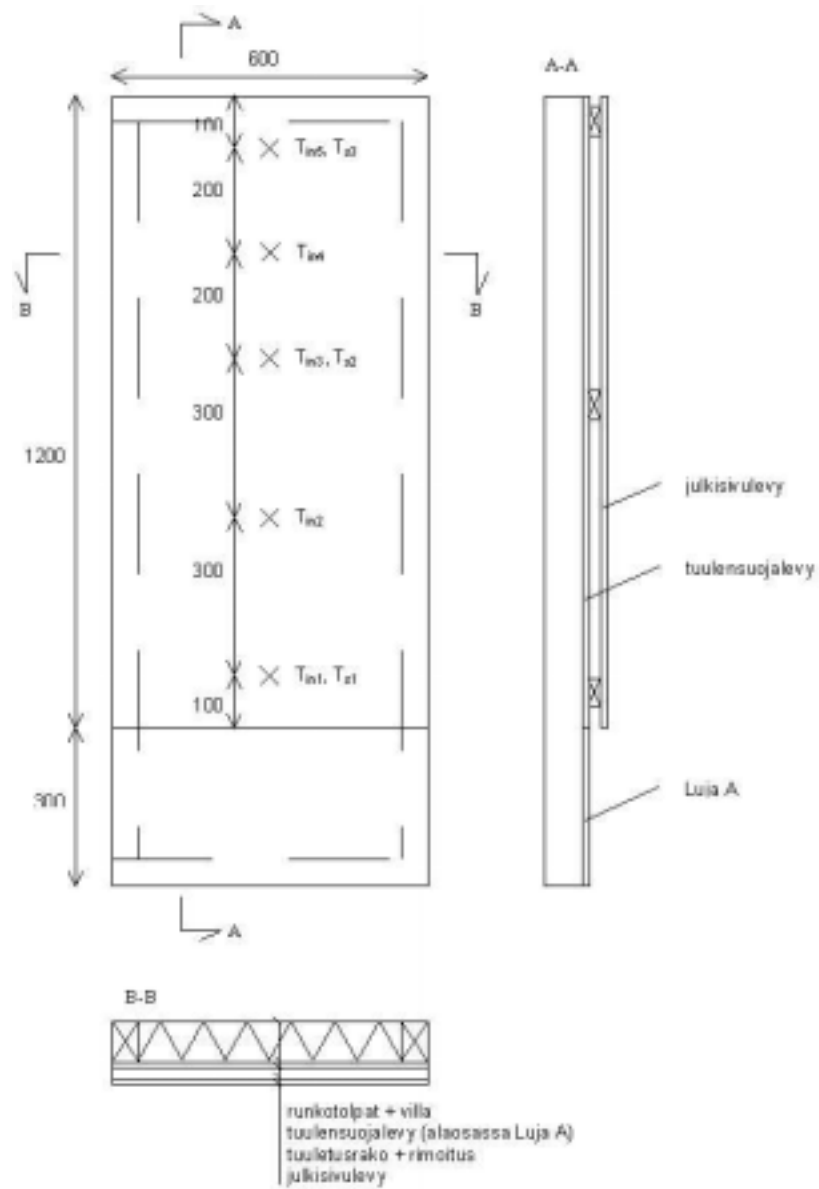
Koekappaleilla, joiden julkisivulevy oli palamaton, vaakasuuntainen rimoitus esti tehokkaasti liekkien pääsyn tuuletusrakoon riippumatta tuulensuojalevymateriaalista. Vaikka tuulensuojalevy altistui polttimen liekeille, huokoinen kuitulevy ja palosuojattu vaneri paloivat vain vähäisessä määrin alimman vaakariman takaa. Tähän on syynä alhainen happipitoisuus koekappaleen alaosassa, missä polttimen propaaniliekki kulutti pääosan hapesta.

Kokeiden lämpötiläkäyrät mittauspisteissä T_{in1} ja T_{in2} esitetään kuvassa 33 ja maksimilämpötilat eri mittauspisteissä taulukossa 6.

Kokeissa 2 ja 4 luokan 2/- julkisivumateriaali osallistui palamiseen. Liekin leviäminen koekappaleen pinnalla oli kuitenkin odotettua vähäisempää, joten koekappaleen aiheuttama lämmöntuotto jäi enimmilläänkin alle 10 kW:n.

Kokeessa 2 liekit levisivät tuuletusrakoon noin 17 minuutin kuluttua kokeen alusta, kun julkisivulevy paloi puhki. Tämä havaittiin lämpötilan T_{in1} nousuna yli 350 °C:n, joka on puutuotteille tyypillinen syttymislämpötila. Liekit levisivät T_{in2} :n kohdalle (300 mm T_{in1} :n yläpuolella) noin 11 minuuttia myöhemmin. Liekin leviämisenopeus oli siis varsin hidas, alle 3 cm/min. Palo ei levinnyt tuuletusraon ylempiin osiin, joissa lämpötilan nousu jäi vähäiseksi. Myös kokeessa 4 todettiin suurempi lämpötilojen T_{in1} ja T_{in2} nousu kuin palamattomalla julkisivulevyllä tehdyissä kokeissa. Julkisivulevy paloi puhki, mutta n. 300 °C:een jäänyt maksimilämpötila viittaa siihen, että tuulensuojalevy ei kuitenkaan syttynyt.

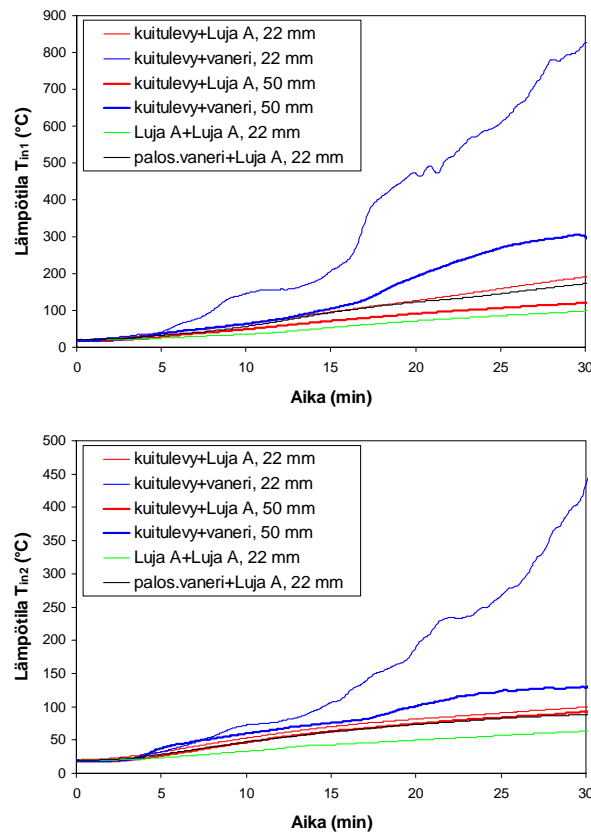
Koekappaleiden vaakarimoitus vastasi käytännössä julkisivun tuuletusraon katkaisua, koska julkisivumateriaalia edustavat tuotteet olivat levymäisiä. On kuitenkin huomattava, että esim. lomalaudoituksen tapauksessa rimojen ja julkisivulautojen väliin jää paikoitellen ilmarako, jossa liekkirintama voi edetä ylöspäin hormi-ilmion vaikutuksesta.



Kuva 32. a) Julkisivuontelokoekappaleiden rakenne ja b) polttimen sijoittelu.

Taulukko 6. Maksimilämpötilat eri mittauspisteissä.

Koe	$T_{in1, max}$ (°C)	$T_{in2, max}$ (°C)	$T_{in3, max}$ (°C)	$T_{in4, max}$ (°C)	$T_{in5, max}$ (°C)	$T_{s1, max}$ (°C)	$T_{s2, max}$ (°C)	$T_{s3, max}$ (°C)
1	191	99	55	60	61	470	161	105
2	825	434	55	53	58	662	507	159
3	120	92	52	52	53	435	141	97
4	305	130	56	58	59	692	181	122
5	98	63	40	40	44	412	157	99
6	172	89	49	53	57	473	145	109



Kuva 33. Lämpötilat koekappaleiden tuuletusraossa mittauspisteissä T_{in1} ja T_{in2} .

Koesarjassa tehtiin seuraavat havainnot:

- Palo ei levinnyt julkisivun tuuletusrakoon vaakariman takaa palavaa materiaalia olevan tuulensuojalevyn kautta. Julkisivulevyn materiaalilla ei ollut tähän vaikutusta.
- Palon leviäminen tuuletusrakoon tapahtui julkisivulevyn puhkipalamisen seurauksena. Palamattoman julkisivumateriaalin tapauksessa palo ei siis levinnyt tuuletusrakoon.

- Pitkäkestoisessa palotilanteessa, jossa vaakarima ehtisi palaa puhki, palo luonnollisesti leviäisi tuuletusrakoon. Tuuletusraon katkaisu vaakarimoilla kuitenkin hidastaisi merkittävästi palon kehittymistä.

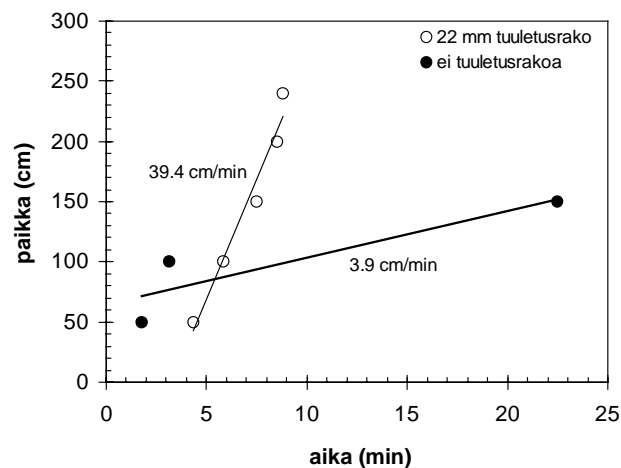
Koesarjan tuloksia tulkittaessa on huomioitava, että kokeet suoritettiin pienessä mittakaavassa suhteellisen pienellä palorasituksella (20 kW) ja lyhyehköllä kestolla (30 min). Tulokset ovat siis suuntaa-antavia eikä suoraan sovellettavissa täyden mittakaavan palotilanteeseen. Niiden merkitys mallintamisen perustana on kuitenkin suuri (ks. luku 4.5).

3.3.2 Palon leviämisenopeus ja aikaskaalat sekä niihin vaikuttavat tekijät

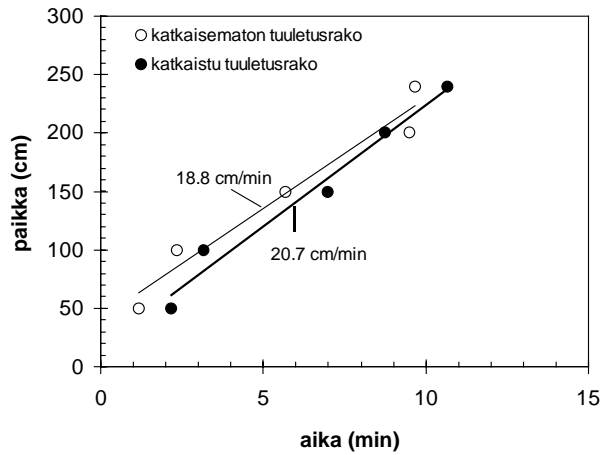
VTT:ssä on tehty 1990-luvulla joukko julkisivun pinnalla leviävää paloa tarkastelevia tutkimuksia (Hakkarainen ym. 1996, Hakkarainen ym. 1997 ja Hakkarainen & Oksanen 2001). Kooste näistä tutkimuksista on esitetty liitteessä E. Alla esitetään tuloksia näistä kokeista.

Keskisuuren mittakaavan julkisivukoelaitteella on tutkittu mm. tuuletusraon merkitystä liekkien leviämiselle sekä tuuletusraon katkaisemisen ja julkisivumateriaalin vaikutusta leviämisenopeuteen. Tuloksia näitä tutkimuksista on esitetty kuvissa 34, 35 ja 36a.

Suuren mittakaavan julkisivulaitteella on tutkittu palosuojauksen vaikutusta puu julkisivulla leviävän palon etenemiseen. Kuvassa 36b on esitetty, miten palosuojaus hidasti liekkirintaman etenemistä julkisivulla näissä kokeissa.

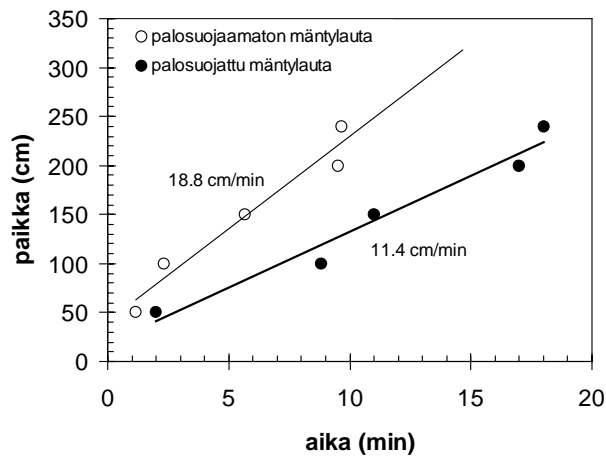


Kuva 34. Tuuletusraon merkitys liekkien leviämiselle palavalla julkisivulla. Maalattu mäntylomalauta, keskiuuren mittakaavan julkisivukoelaitte.

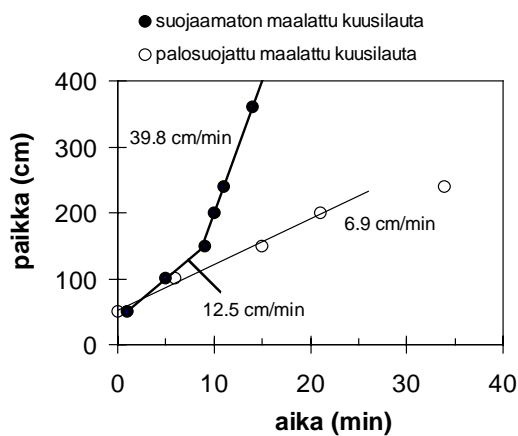


Kuva 35. Tuuletusraon katkaisemisen vaikutus liekkien leviämiseen. Maalattu mäntylomalauta, keskisuuren mittakaavan julkisivukoelaite.

a)



b)



Kuva 36. Liekkien leviäminen julkisivulla, kun sen materiaali on suojaamatonta kuusipuuta ja palosuojattua kuusipuuta. a) Keskisuuren mittakaavan ja b) suuren mittakaavan julkisivukoelaite.

3.3.3 Johtopäätökset

Tapauksessa, jossa ulkoseinän ulkopinta on palavaa materiaalia, palon leviäminen tuuletusraossa on toissijainen tapahtuma julkisivun pinnalla tapahtuvaan liekin leviämiseen verrattuna. Käytännössä palo leviää palavaa materiaalia olevan julkisivun pinnalla vähintään yhtä nopeasti kuin tuuletusraossa.

Tuuletusraon vaikutus palon kehittymiseen ei kuitenkaan ole merkityksetön, koska katkomattomassa pystysuuntaisessa raossa alkupalon liekit ja kuumuus kulkeutuvat tehokkaasti ylöspäin nosteen ja hormi-ilmiön vuoksi. Rakoon syntyvä virtaus kuljettaa mukanaan happea, minkä vuoksi palavaa ainetta oleva tuulensuojalevy voi antaa osuutensa palamiseen. Tällaisia tuulensuojalevyjä onkin syytä välttää sekä lisäksi liekkien ja kuumuuden pystysuuntaisen leviämisen rajoittamiseksi rakoa on syytä katkoa ainakin vaakasuuntaisin rakentein. Tuuletusraon merkitystä palon leviämisen kannalta on tutkittu mallinnuksen keinoin luvussa 4.5.

Ulkoisen sytytyslähteen tapauksessa palo leviää palavan julkisivun pinnalla seuraavaan kerrokseen noin 10 minuutissa. Tämä jälkeen leviäminen hidastuu, koska alkuperäisen sytytyslähteen vaikutus on pieni ylemmissä kerroksissa. Palava julkisivumateriaali itsessään voi kuitenkin edelleen levittää paloa.

Jos sytytyslähde on lieskahtanut huoneistopalo, julkisivun pintaan kohdistuva lämpösäteily sytyttää palavat materiaalit noin 10 sekunnissa 4–5 m²:n suuruiselta alueelta. Palo leviää tällöin palotilan yläpuolella olevaan kerrokseen alle 1 minuutissa. Puupinnalla liekit leviävät seuraavaan kerrokseen noin 3 minuutissa, koska sytytyslähteen aiheuttama palorasitus on edelleen merkittävä. Tämän jälkeen etenemisnopeudeksi voidaan arvioida yksi kerros 10 minuutissa.

Palon leviäminen julkisivun pinnalla ja tuuletusraossa voidaan pysäyttää rakenteellisin keinoin: tuuletusraon palokatkoilla, ulokkeilla ja erkkereillä. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteissa käytettäviin materiaaleihin. Esim. ulokkeet on syytä pinnoittaa palamattomalla materiaalilla.

4. Mallintaminen

Tässä luvussa esitetään ontelopalojen mallintamisen tulokset. Tarkastelujen aluksi esitellään lyhyesti käytetty tulipalon kehittymisen simulointiohjelma Fire Dynamics Simulator sekä esitetään tulokset sen kelpoisuuden arvioinnista, jotka on saatu vertaamalla koetuloksia ja mallin antamia tuloksia.

4.1 Tulipalon kehittymisen laskentaohjelma Fire Dynamics Simulator (FDS) ja sen käyttö

Laskennan työkaluksi valittiin Fire Dynamics Simulator (FDS) -ohjelmaa (versio 1) (McGrattan ym. 2000a, 2000b, Hostikka 2001) seuraavista syistä:

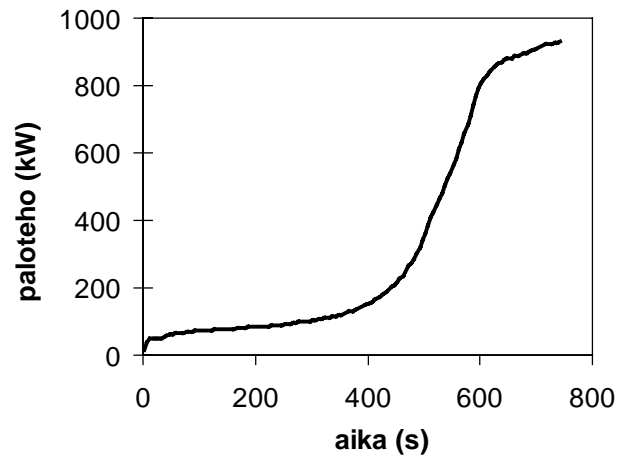
- FDS-ohjelma lähestyy palotapahtuman mallintamista lähtien palotehosta, joka on sekä fysikaalisesti ja käytännön kannalta monia muita vaihtoehtoja toimivampi lähestymistapa.
- VTT:n tutkija Simo Hostikka osallistui FDS-ohjelman kehitystyöhön Yhdysvaltain vaihtokoulutuksensa aikana elokuusta 2000 toukokuuhun 2001. Hänen panoksensa ohjelman kehitykseen on jatkunut vahvana myös vaihtokoulutuksen jälkeen. Tämän vuoksi hankkeessa on ollut käytettävissä erittäin hyvä tuki ohjelman käyttöön.
- Useimpiin tulipalon simulointiohjelmiin verrattuna ohjelma on helppo käyttää ja sen tulosten jälkikäsitteily on yksinkertaista ja selkeää.
- Jo ohjelmaa valittaessa oli käytettävissä alustavia tuloksia siitä, että mallin toimii kelvollisella tavalla.

FDS-ohjelma kuvaa palon kehittymistä ratkaisemalla systeemiä kuvaavat säilymisyyhtälöt kolmiulotteisesti. Ohjelma on tulipalojen laskennan kehittyneintä ohjelmistoa, joilla on se yhteinen piirre, että ne antavat tulokseksi palon leviämisen syttymisen jälkeen (esim. vyöhykemallit eivät tee sitä, vaan niissä käyttäjä määrittää palon kehittymisen lähtötietona). FDS-ohjelman tulokset ovat osoittautuneet varsin luotettaviksi kuvattaessa palon kehittymistä, kun palaminen ei ole merkittävästi hapen määrän rajoittamaa eli syttymästä lieskahtaneeseen paloon saakka. Sen liekinleviämismalli on riittämätön kuvaamaan tarkasti happirajoitettua paloa. Ohjelman toiseen versioon kehitetään monipuolisempaa liekinleviämisen kuvausta, jonka odotetaan toimivan myös happirajoitetussa palossa.

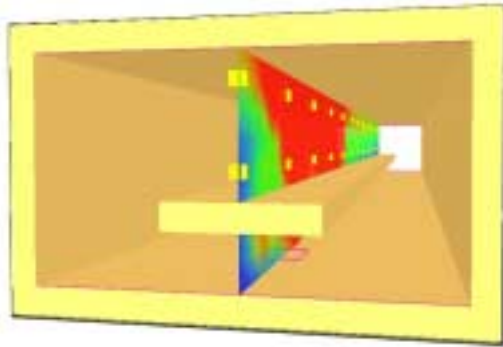
Palon simuloiminen FDS-ohjelman versiolla 1 sisältää seuraavia osia:

- Systemin geometrinen mallintaminen.
- Systemin pakotettujen virtausten suuruudet (virtausnopeutena tai tilavuusvirtana).
- Eri komponenttien (reunapinnat, ensimmäisenä syttyvä kohde, muut palavat kohteet, jne.) lämpö- ja paloteknisen toiminnan mallintaminen, joka sisältää arvojen valitsemisen seuraaville tekijöille:
 - Materiaalin lämmönjohtavuus k , lämpötilanjohtavuus α ja paksuus d .
 - Palavien materiaalien syttymistä kuvaava lämpötila T_{ig} ja palamisen aikana materiaalin yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho \dot{q}'' sekä tämä suureen ajallinen kehitys. Viimeksi mainitusta suureesta riittää useimmiten sen hetken ilmaiseminen, jolloin materiaali alkaa tuottaa lämpöä arvon \dot{q}'' osoittamalla voimalla (käytännössä se on aineen syttymishetki).
- Alkupalon mallintaminen, jossa kuvataan käyttäjän määrittämässä paikassa olevan ensimmäisenä syttyvän kohteen luovuttama paloteho. Tämä suure spesifioidaan antamalla ohjelmalle syötteenä alkupalon palavan pinta-alan suuruus, muoto ja suunta sekä kyseisen pinnan paloteho yksikköpinta-alaa kohden.
- Laskennan suorittaminen tietokoneella, mikä tyypillisesti ontelopalojen laskentatapauksissa vei aikaa muutamista tunneista muutamiin päiviin.
- Ohjelman laskemien suureiden tulostaminen, johon on mm. seuraavia mahdollisuuksia:
 - palotehon ajallisen kehittymisen kuvaaminen aikasarjana (ks. kuva 37a),
 - valituissa pisteissä vallitsevien lämpötilojen kuvaaminen aikasarjoina,
 - kaasujen virtaus- ja lämpötilakentän sekä savun leviämisen visuaalinen esittäminen (ks. kuva 37b),
 - reunapintojen lämpötilojen ja lämpövirran tiheyksien (sekä konvektiivisesti että säteillen siirtyvä osuus) visuaalinen esittäminen (ks. kuva 37c).
- Tulosten käsittely.

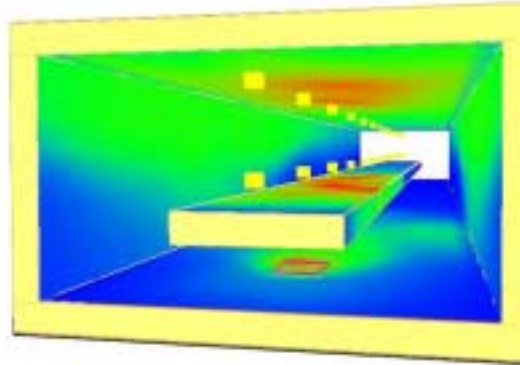
a)



b)



c)



Kuva 37. FDS-ohjelmalla laskettujen tulosten esitystapoja: a) aikasarjaesitys (esim. paloteho), b) kenttäsuureiden, kuten virtaukset tai lämpötilat, esittäminen tasojen avulla ja c) pintojen lämpötilan, yms. visualisointi.

On huomattava, että ontelopalojen ominaispiirteitä on vaikea tutkia kentämalleja yksinkertaisempien tulipalojen vyöhykemalliin perustuvien ohjelmien avulla (esim. CFAST-ohjelma), koska ontelotilat ovat muodoltaan sellaisia, että niitä laskettaessa joudutaan vyöhykemallien kelpoisuusalueen ulkopuolelle (Hietaniemi ym. 2000). Hankkeessa tehtiin muutama laskentakokeilu CFAST- ja BRIE 2 -ohjelmilla, jotka vahvistivat tämän seikan: lasketut tulokset eivät vastanneet koetuloksia.

4.2 Mallin kelpoisuuden osoittaminen

FDS-laskentamallin kelpoisuus arvioitiin sen toiminnan suhteen. Mallin dokumentointia ja muita täydelliseen ISO:n (ISO TR 13387 Part 3 1999) suosittelemaan kelpoisuuden arviointiin liittyviä tekijöitä ei tarkasteltu.

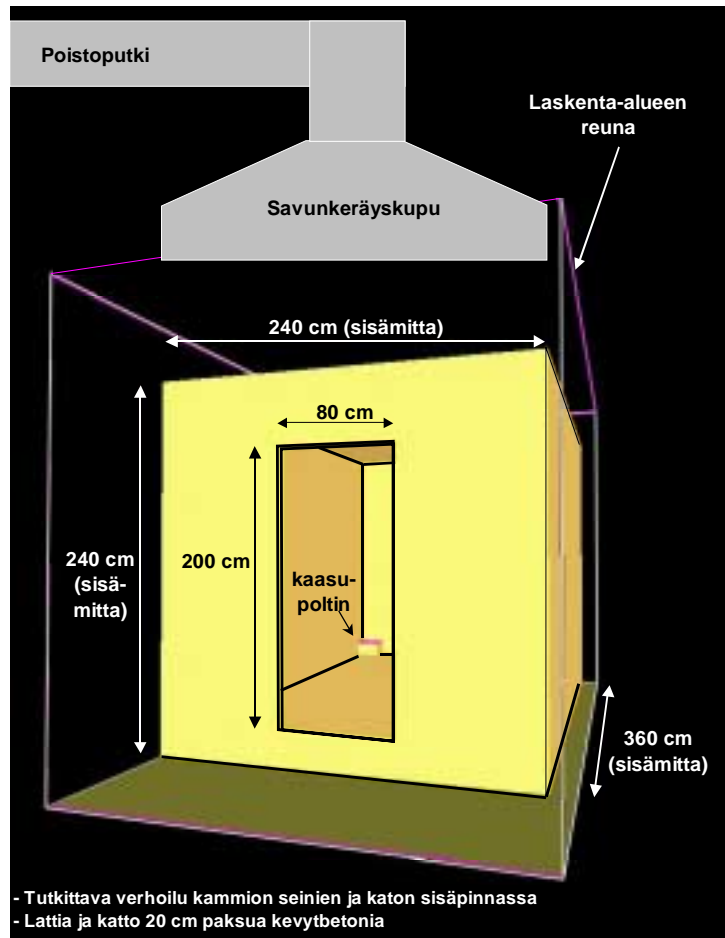
4.2.1 Vertailu puuverhoilun palokammiokeeseen palotehotuloksiin

Palokammiokeessa koetilan seinät verhotaan tutkittavalla materiaalilla, joka sytytetään tilan nurkkaan sijoitetun kaasupolttimen avulla. Koe kestää 20 minuuttia, ellei sitä lieskahduksen takia jouduta keskeyttämään ennen tätä. Ensimmäisen 10 minuutin ajan polttimen teho on 100 kW ja se nostetaan 300 kW:iin 10–20 minuutiksi. Koejärjestelyn yleiskuva on esitetty kuvassa 38.

Kokeissa näytemateriaaleina käytettiin palosuojaamatonta ja palosuojattua sahattua kuusilautaa. Lautojen palosuojaus tehtiin sivelemällä ne kahteen kertaan suomalaisella tähän tarkoitukseen erityisesti kehitetyllä palonsuoja-aineella (aineen märkäpaino käsittelyjen jälkeen oli noin 300 g/m²). Laudat asennettiin ruuvikiinnityksellä palokammion kahdelle seinälle ja kattoon. Näytemateriaali peitti palokammion takaseinän, toisen sivuseinän 240 cm:n leveydeltä ja näiden mittojen määräämän kokoisen kolmiomaisen osan katosta.

Taulukko 7. Palokammiokeeseen mallintamisessa käytetyt parametriarvot.

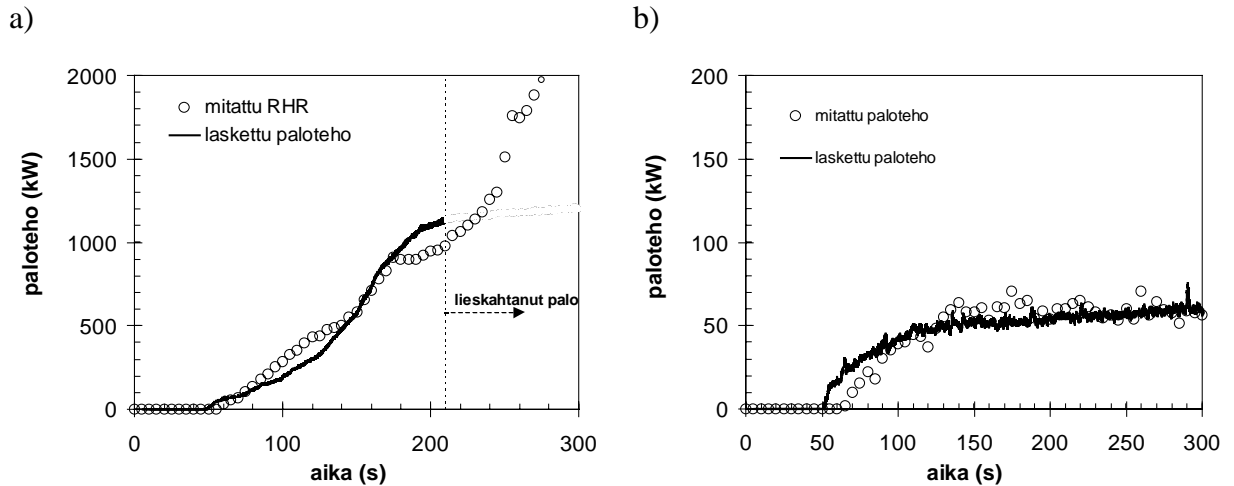
	kammion reunat	palosuojattu puu	suojaamaton puu
materiaali	kevyt betoni	pintakäsitelty kuusilauta	kuusilauta
paksuus (m)	0,2	0,2	0,2
lämmönjohtavuus (Wm⁻¹K⁻¹)	0,1	0,2	0,2
lämpötilanjohtavuus (m²s⁻¹)	2·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁷
syttymislämpötila (°C)	palamaton	300	280
paloteho yksikköpinta-alaa kohden (kWm⁻²)	palamaton	40	120
syttymisviive (s)	palamaton	30	30



Kuva 38. Yleiskuva palokammiokokoon järjestelystä.

Laskentamallin kelpoisuus suljetussa tilassa tapahtuvan puun palamisen kuvaamiseen käy ilmi kuvasta 39. Nähdään, että lasketut palotehoarvot vastaavat hyvin mitattuja arvoja. Yhteensopivuus on saatu aikaan käyttämällä vain kahta säädettävää parametriarvoa, puumateriaalin syttymislämpötilaa ja yksikköpinta-alaa kohden vapautuvaa palotehoa, muut parametriarvot määräytyivät koejärjestystä (ks. taulukko 7).

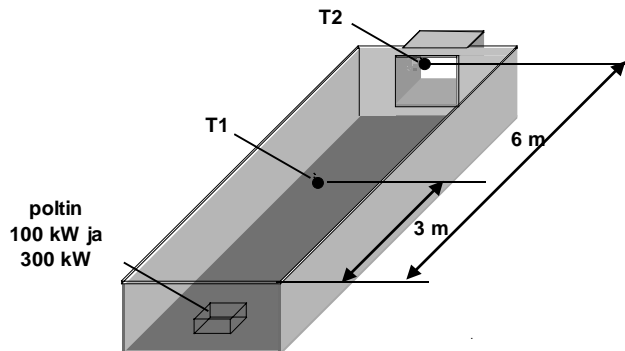
Puun syttyvyyttä ja palamista kuvaavat parametriarvot vastaavat hyvin puulle kokeissa määritettyjä arvoja: Havaittiin, että syttymislämpötilana tulee käyttää lämpötilaa, jossa puun syttyminen tulee mahdolliseksi, eli oksidatiivisen pyrolyysin alkamista kuvaava lämpötilaa. Pinta-alayksikköä kohden vapautuvaa palotehoa kuvattiin aineen tasaista palamista vastaavalla arvolla.



Kuva 39. Palokammiokokeen laskennallinen mallintaminen: lasketut palotehot (yhtenäiset käyrät) verrattuna mitattuihin palotehoihin (erilliset pisteet): a) suojaamaton puuverhoilu ja b) palosuojattu puuverhoilu. Suojaamattoman puuverhoilun tapauksessa laskettu paloteho on esitetty vain lieskahdukseen saakka, koska käytetyn laskentamallin oletukset rajaavat sen pätevyysalueen runsaassa hapessa tapahtuvaan palamiseen, eli pääasiassa ennen lieskahdusta tapahtuvaan palamiseen. Huom. laskettujen tulosten ja koetulosten vertailun selventämiseksi kuvat a ja b on esitetty eri palotehoasteikkoja käyttäen.

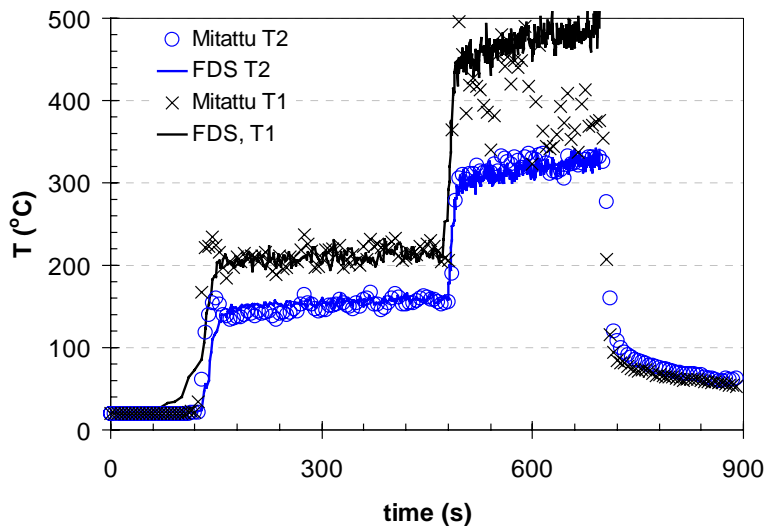
4.2.2 Vertailu ilman palokuormaa tehdyn ontelopalokokeen lämpötilatuloksiin

Suuren mittakaavan ontelokoesarjassa tehtiin ontelon palo- ja lämpöteknisen toimivuuden koe. Tässä kokeessa poltettiin propaanipoltinta 100 kW:n ja 300 kW:n teholla. Kokeiden aikana ontelossa vallinneen virtauksen suuruudeksi määritettiin anemometrimitausten avulla noin 0,7 m/s. Tätä arvoa käytettiin FDS-laskuissa ontelon pituussuuntaisen virtausnopeuden arvona.



Kuva 40. Ilman palokuormaa tehdyn kokeen koejärjestely.

Kokeen aikana mitattiin lämpötiloja ontelon keskikohdassa (3 m ontelon alkupäästä) ja loppupäässä (6 m alkupäästä), ks. kuva 40. FDS-ohjelmalla laskettiin samoissa paikoissa vallitsevat lämpötilat. Laskettuja ja mitattuja tuloksia on verrattu toisiinsa kuvassa 41. Yhteensopivuus laskettujen ja mitattujen tulosten välillä on mainio.



Kuva 41. Ilman palokuormaa tehdyssä kokeessa lämpötila-antureilla T1 ja T2 mitatut lämpötilat (T1 rastit ja T2 pallot) sekä FDS-ohjelmalla lasketut vastaavat lämpötilat.

Yhteensopivuus mitattujen arvojen ja laskettujen arvojen välillä on erittäin hyvä etenkin kun otetaan huomioon, että kokeen lopussa ontelon katon keskikohta alkoi taipua sisäänpäin, jolloin anturi T1 laskeutui osittain pois kuumasta kerroksesta ja siksi noin 600 s jälkeen sen antamat lämpötilalukemat ovat virheellisen alhaisia.

4.2.3 Vertailu kaapelien ontelopalokokeen palotehotuloksiin

Kaapelien ontelopalokokeista valittiin FDS-ohjelmalla simuloitaviksi kaapelikokeet 1 ja 2, eli kokeet, joissa palokuormana oli 10 tai 6 kappaletta PEX-vaippaisia kaapeleita, joiden halkaisija oli 28 mm, vaipan paksuus 6 mm ja alumiinijohtimen halkaisija 16 mm. Kaapelit sytytettiin propaanipolttimella, jonka teho oli 50 kW. Poltin oli päällä 240 sekuntia kokeen alussa, minkä jälkeen se sammutettiin.

Kaapelikoetta 2 (6 kaapelin koe) käytettiin laskentamallin geometrian ja parametrien hakemiseen siten, että malli saatiin kuvaamaan mahdollisimman hyvin kyseisessä kokeessa mitattua palotehoa. Tätä prosessia on kuvattu tarkemmin alla. Kun kaapelikoe 2 oli saatu mallinnettua riittävän hyvin, tarkistettiin mallin toiminta vertaamalla sillä laskettua palotehoa kaapelikokeessa 1 mitattuun palotehoon.

4.2.3.1 Kaapelien lämpeneminen, syttyminen ja lämmöntuotto

FDS-simuloinnissa sellaisia pieniä yksityiskohtia sisältäviä palokuormia, kuten kaapeleita ei käytännössä mallinneta niiden todellisen rakenteen mukaan, vaan palokuormaa kuvataan sen keskimääräisillä ominaisuuksilla. Syynä tähän on se, että yksityiskohtien mallintamisessa jouduttaisiin käyttämään niin tiheää laskentahilan jakoa, että laskennan vaatima tietokoneen muistikapasiteetti ylittää nykyään toimistokäytössä olevien laitteiden kapasiteetin. Vaikka muistitila riittäisikin, laskenta-aika voisi lisäksi kasvaa jopa useiden kuukausien mittaiseksi.

Kaapelin lämpenemisen laskentaa varten muovivaipasta ja alumiinijohtimesta koostuva kaapeli kuvattiin homogeenisella aineella, joka lämpenee mahdollisimman hyvin samalla tavoin kuin kaapeli. Tätä varten työssä tutkittiin sylinterisymmetrisellä FEM-mallilla lämmönsiirtoa ilmasta kaapeliin ja kaapelin lämpenemistä. Tulokseksi saatiin, että eristemuovin sisällä olevalla alumiinijohtimella ei ollut merkittävää vaikutusta kaapelin pinnan lämpiämiseen. Kaapelin pintalämpötilan käyttäytymiseen vaikuttavat lähinnä vain eristemateriaalin ominaisuudet, kun lämpötilat olivat palokokeissa tavattavien lämpötilojen luokkaa³. Tämän perusteella FDS-laskuissa käytettiin kaapelien lämmön- ja lämpötilanjohtuvuuksille polyeteenimuovia vastaavia arvoja eli $k = 0,10 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Kaapelin vaippamateriaalin syttymislämpötilana käytettiin lämpötilaa, jossa kyseisen materiaalin terminen hajoaminen alkaa kiihtyä selvästi (pyrolysoitumislämpötila). Tämä lämpötila mitattiin laboratoriuunissa tehdyllä kokeella, jossa kaapelin vaipasta leikatun pienen näytepalan lämpötilaa nostettiin vakionopeudella $5 \text{ °C}/\text{min}$ ja samaan aikaan monitoroitiin näytteestä emittoituvan hiilimonoksidin määrää. Hiilimonoksidin määrä alkoi kasvaa jyrkästi lämpötilassa 184 °C , mikä ilmaisee näytteen pyrolysoitumislämpötilaa. Mallinnuksessa kaapelin syttymislämpötilana T_{ig} käytettiin tätä lämpötilaarvoa. Kaapelin syttymisviive asetettiin kartiokalorimetrikokeen mukaan siten, että lämmönluovutus alkoi 85 s lämpörasituksen alkamisen jälkeen ja täysi paloteho saavutettiin ajassa 115 s .

³ Yleinen havainto oli se, että kaapelin pinta lämpesi nopeasti, kun taas lämpö siirtyi kaapelin sisään hitaasti. Tämä johtui tietenkin kaapelin vaippana käytetyn PEX-muovin hyvästä lämmöneristävytydestä. Näiden tulosten perusteella päätettiin FDS-simuloinneissa käyttää todellisia kaapeleita kuvaamaan pelkästä eristemateriaalista tehtyjä kaapeleita. Tämä on myös lämpömäärien säilymisen kannalta toimivaa, sillä palokokeen keston (10 min) aikana kaapelin sisällä olevan alumiinin lämpötila ei ehdi nousta paljoa, joten alumiinijohtimen vaikutus koko lämmönsiirtoon on merkityksetön.

Kokeilujen perusteella laskentahilan jaoks valittiin ontelon poikkisuunnissa 5 cm ja sen pituussuunnassa 10 cm⁴, joka edustaa kompromissia ohjelman salliman laskentakoppien muodon, laskennan vaatiman ajan ja systeemin geometrisen mallintamisen tarkkuuden välillä. Kyseinen laskentahilan jako on suurempi kuin kaapelin dimensio, jonka vuoksi kaapelit mallinnettiin 4 laskennallisella kaapelilla. Näiden laskennallisten kaapelien poikkileikkaus oli neliö, koska FDS-ohjelmassa kohteet määritellään karteesisissa koordinaateissa. Niiden pinta-ala oli hieman suurempi kuin kaapelikokeessa 2 poltettujen kaapeleiden, mikä kompensoitiin käyttämällä niille hieman kartio-kalorimetrikokeessa mitattua arvoa pienempää lämmönvapautumisarvoa, 310 kW/m².

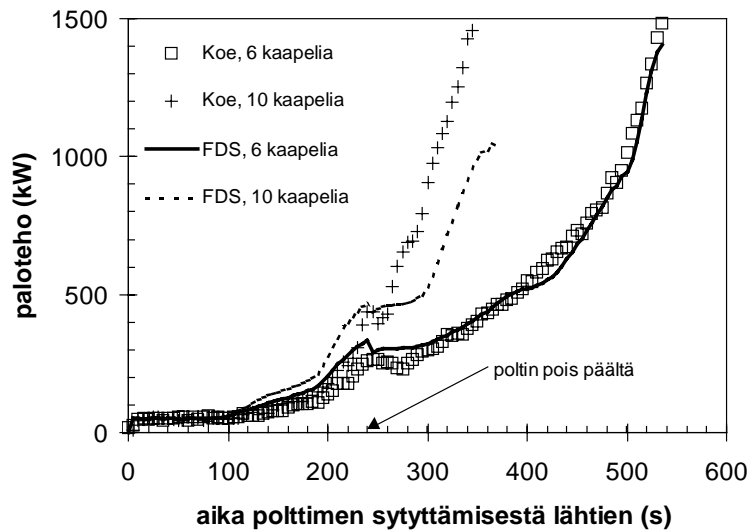
Kaapelikokeessa 1 poltettuja 10 kaapelia kuvattiin 5 laskennallisella kaapelilla, joiden pinta-alayksikköä kohden luovuttama paloteho laskettiin skaalaamalla suoraan pinta-aloihin verrannollisesti.

Laskennassa ontelossa vallinneen virtauksen perustasoksi asetettiin kokeissa havaittu 0,7 m/s suuruinen virtausnopeus.

4.2.3.2 Vertailun tulokset

Kuvassa 42 on esitetty mitatut palotehokäyrät kuuden ja kymmenen kaapelin palokokeista sekä vastaavat FDS-ohjelmalla lasketut tulokset. Löydetyt parametrit onnistuvat kuvaamaan hyvin kuuden kaapelin palokokeen. Kokeen alun kaapelin syttymistä malli ei pysty kuvaamaan täydellisesti, sillä käytetty hilajako on siihen liian karkea. Myös suuremman palokuorman tapaus eli kymmenen kaapelia mallittuu kuuden kaapelin kokeeseen sovitetuilla parametreilla varsin hyvin. Palon kasvunopeus toistuu hyvin, mutta lasketun palotehon kasvu alkaa polttimen sammuttamisen jälkeen noin puolen minuutin viiveellä mitattuun verrattuna. Kaikkiaan FDS-laskennan tulosten ja mitattujen tulosten yhteensopivuus on tässäkin tapauksessa hyvä.

⁴ Ontelon tilavuus, eli 6 m × 1,2 m × 0,6 m katettiin 60 × 24 × 12 laskentahilalla, jolloin ontelon poikkileikkauksen suuntaiseksi hilajaoiksi tuli 5 cm ja ontelon pituussuuntaiseksi 10 cm.



Kuva 42. Mitatut ja lasketut palotehot suuressa mittakaavassa tehtyjen kuuden ja kymmenen kaapelin palokokeille (kaapelikokeet 2 ja 1). Kuuden kaapelin kokeen laskenta toistaa kokeellisen tuloksen erittäin hyvin. Kymmenen kaapelin tapauksessa vastaavuus ei ole yhtä hyvä, vaan laskettu käyrä alkaa kasvaa mitattuun verrattuna noin puoli minuuttia viivästyneenä. Palotehon kasvunopeuden laskenta ennustaa tässäkin tapauksessa oikein.

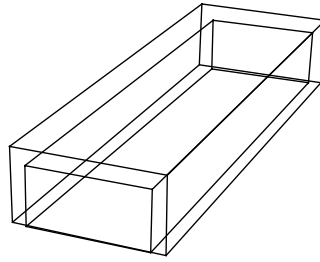
4.2.4 Vertailu puuverhoilun ontelopalokokeen palotehotuloksiin

Puuverhoiltu ontelotila muodostaa palokuorman sijainnin kannalta erilaisen systeemin kuin ontelossa tapahtuva kaapelipalo. Siksi FDS-ohjelman kelpoisuus verhoiltujen ontelotilojen palojen laskentaan varmistettiin vertaamalla laskettuja tuloksia puuontelokokeen 1 tuloksiin (palokuormana palosuojaamaton puu). Vertailusuure oli paloteho.

Laskennassa ontelon geometria ja palokuorman sijainti kuvattiin koejärjestelyn mukaisesti siten, että puurakenteen ulkopuolella oli Luja A -levystä tehty ontelo (ks. kuva 43a). Puun lämpö- ja palotekniset ominaisuudet käytettiin edellä kuvatus palokammiokokoon laskennan mukaisia lämmön- ja lämpötilanjohtavuuden sekä syttymislämpötilan ja yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon arvoja (ks. taulukko 7). Laudan paksuudeksi asetettiin sen todellinen paksuus eli 22 mm. Laskennassa asetettiin palon alussa ontelossa tapahtuvan virtauksen nopeudeksi 0,7 m/s, joka vastaa anemometrillä mitattua arvoa.

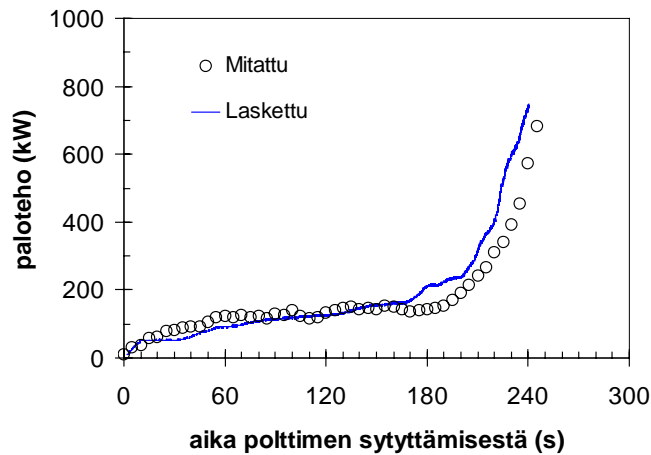
Laskettu paloteho vastaa erittäin hyvin mitattua palotehoa, ks. kuva 43b.

a)



- puuontelo + villalattia
- ulkopuolella Luja A -ontelo

b)



Kuva 43. a) Puuontelokokeen asetelma ja b) mitattu ja laskettu paloteho. Laskettu palotehokäyrä vastaa mitattua erittäin hyvin.

4.3 Vaakasuorien ontelotilojen palojen mallinnustutkimus

4.3.1 Mallinnustapausten perusjaottelu

Vaakasuorien onteloiden palotapausten mallintamisessa on tarkasteltu perustapauksina kahta palokuorman asettelun kannalta erilaista tapausta.

Toinen tapaus on ontelotilat, joissa palokuorma on ontelossa erillisenä yksikkönä erillään tilan reunoista. Sitä, millaista asetelmaa tämä tapaus tyypillisesti vastaa, on havainnollistettu kuvassa 44a. Lämpöteknisesti asetelmassa on oleellista, että ontelotilan pääasialliset lämpöä poistavat reunat eli seinät ja katto eivät pala, vaan ontelon kuumien kaasujen lämpöenergia pääsee siirtymään niihin ja niiden läpi ”normaalin” konvektiojohtumisprosessin kautta. Tyypillinen esimerkki tällaisesta ontelotilasta on esim. kaapelipalo alaslasketun katon tai ylösnostetun lattian ontelotilassa, mutta tämän ontelomallinnustapausten kattavuus on toki paljon laajempi. Siihen kuuluvat

esimerkiksi kaikki tapaukset, joissa palokuorma liittyy tilan lattiaan, kuten lämpöä tuottava villa tai muut materiaalit tai molemmat yläpohjan ontelon lattialla.

a)



b)



Kuva 44. Vaakasuorien ontelotilojen mallinnuksessa tutkitut kaksi palokuorman sijainniltaan erilaista tapausta: a) palokuorma on selvästi erillään tilan reunoista ja b) palokuorma on tilan verhoiluna.

Toinen tapaus on ontelotilat, joissa palokuorma sijaitsee tilan verhouksena (seinillä, katossa ja/tai lattialla). Tällainen asetelma on hyvä yksinkertaistus esimerkiksi yläpohjan ontelotilasta, jossa katon ruodelaudoitukset ja katonkannattimet ovat puuta: esimerkiksi 50 m pitkän ja 10 m leveän rivitalon 1 m korkeassa kylmässä ullakkotilassa, jossa kattoristikoiden k-jako on 900 mm, voi puupinnan määrä olla 90 % koko tilan sisäpinta-alasta 1000 m^2 (täyslaudoitettu katto n. 550 m^2 ja ristikoiden puutavara 350 m^2 , eli yhteensä 900 m^2). Toinen todellinen ontelotila, jota tämä malli kuvaa, on kanava, jonka seiniin on kertynyt palavaa ainetta, esim. rasvanpoistokanava, jonka seinämille on puhtaanapidon riittämättömyyden takia kertynyt kerros rasvaa ja mahdollisesti muuta likaa, kuten pölyä.

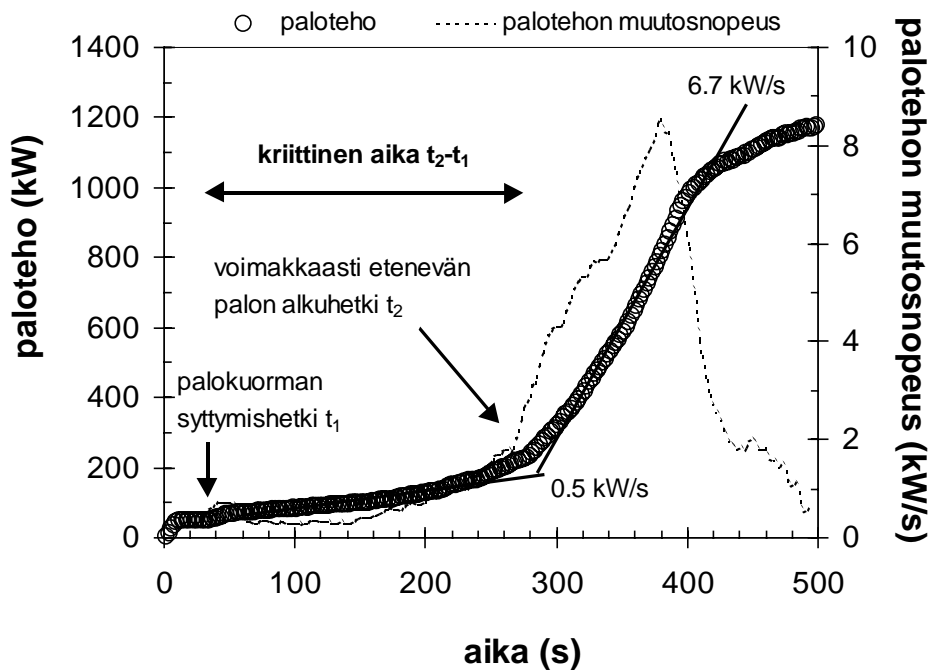
Toinen mallinnuksessa käytetty tapauksia erotteleva jako on jako onteloihin, joiden läpi käy virtaus ja onteloihin, joissa ennen palon synnyttämiä ilman liikkeitä ei esiinny merkittäviä virtauksia.

4.3.2 Mallinnustulosten analysointi

Tyypillinen palotehon laskentatulokset on esitetty kuvassa 45. Se on samanmuotoinen kuin suuren mittakaavan palokokeissa saadut käyrät: aluksi paloteho kasvaa varsin vähäisellä nopeudella (joissain tapauksissa, kuten kuvan esimerkkitapauksessa käyrä voi olla lähes vaakasuora), mutta tietyn hetken (kuvassa aika t_2) jälkeen paloteho alkaa kasvaa jyrkästi. Aika palokuorman syttymisestä, hetki t_1 , hetkeen t_2 on oleellisen tärkeä ontelotilojen paloturvallisuuden kannalta: jos paloa ei saada taltutettua tänä aikana, on sen hallintaan saaminen sen jälkeen hyvin vaikeaa. Ontelotilojen paloturvallisuutta

saadaan parannettua, jos tätä aikaa pystytään kasvattamaan, koska tällöin paranevat palokunnan tai paikalla olevien henkilöiden tai molempien mahdollisuudet saada palo hallintaan ennen sen riistäytymistä nopeasti leviäväksi paloksi. Parasta olisi, jos palokunta ehtisi aloittaa sammutustoimensa hyvissä ajoin ennen hetkeä t_2 . Jatkossa aikaväliä t_2-t_1 kutsutaan kriittiseksi ajaksi, ja sille käytetään merkintää

$$t_{kriit} = t_2 - t_1. \quad (1)$$



Kuva 45. Tyypillinen FDS-ohjelmalla tehdyn ontelopalosimuloinnin tuottama palotehokäyrä sekä siihen liittyviä simulointitulosten analysoinnissa käytettyjä suureita. Myös palotehokäyrän muutosnopeus on esitetty, koska sitä on joissain tapauksissa käytetty voimakkaasti etenevän palon alkamisen määrittämisessä (ks. teksti).

Joissain simulointitapauksissa palotehokäyrä kasvaa kuvassa 45 esitettyä tasaisemmin, jolloin siirtymähetkeä t_2 voi olla hankala määrittää tarkasti palotehokäyrästä. Näissä tapauksissa hetki t_2 on määritetty palotehon muutosta kuvaavasta käyrästä: tässä käyrässä siirtymähetki näkyy selvänä käyrän kulmakertoimen muutoksena (ks. kuvassa 45 katkoviivalla esitetty käyrä). Joissain tapauksissa on aikaskaalojen esille saamisessa käytetty apuna myös liitteessä A esitettyä MQH-malliin (McCaffrey ym.

1981) perustuvaa arviota tilan lieskahtamisen kannalta kriittiselle paloteholle: kriittiseksi ajaksi on tulkittu aika, jolloin paloteho saavuttaa tämän arvon.

Samalla tavalla kuin mitatuista palotehokäyristä, voidaan lasketusta palotehokäyrästä määrittää palotehon kasvunopeus käyttämällä kahta lineaarista sovitetta, toista palon hitaan kasvun vaiheeseen ja toista palon nopeasti etenevään vaiheeseen. Periaatteessa palotehon muutosnopeuskäyrä on tarkempi kuvaus palotehon kasvunopeuden kuvaamiseen, mutta lineaaristen sovitteiden käyttäminen antaa helpommin esitettävän ja tulkittavan tuloksen likimääräistuloksen, joka ilmaisee palon keskimääräisen kasvun nopeuden. Esimerkiksi kuvan 45 tapauksessa voidaan sanoa, että paloteho kasvaa alussa nopeudella 0,5 kW/s (30 kW/min) ja nopeasti kasvavassa vaiheessa nopeudella 6,7 kW/s (400 kW/min).

Vain joistain FDS-simuloinneista tarkasteltiin tilaan sijoitettujen virtuaalisten lämpötila-anturien antamia tuloksia. Syy tähän oli laskentatekninen: FDS-ohjelmaan määriteltävät lämpötila-anturit eivät ole pistemäisiä, vaan ne ilmaisevat keskiarvoa laskentakopeista, joiden rajalle anturit asettuvat (kopin ”sisään” ohjelma ei voi sijoittaa mitään, koska tällaista tilaa ei sen kannalta ole olemassa: laskennan kannalta on olemassa vain kopin koko tilavuus sitä kuvaavine keskimääräisine suureineen ja laskentakoppien reunapinnat). Käytännössä tämä hankaloitti polttoaineen pintaa monitoroivien elinten lukemien tulkintaa (epäselvien lukemien selvittämiseksi olisi pitänyt tutkia laskentahilan geometriaa yksityiskohtaisesti) ja siksi tätä analyysia ei liikaa aikaa vievänä työvaiheena tehty. Lisäksi palotehosta saatava informaatio on – kuten lähes poikkeuksetta palotekniikassa – täysin riittävää palon kuvaamiseen.

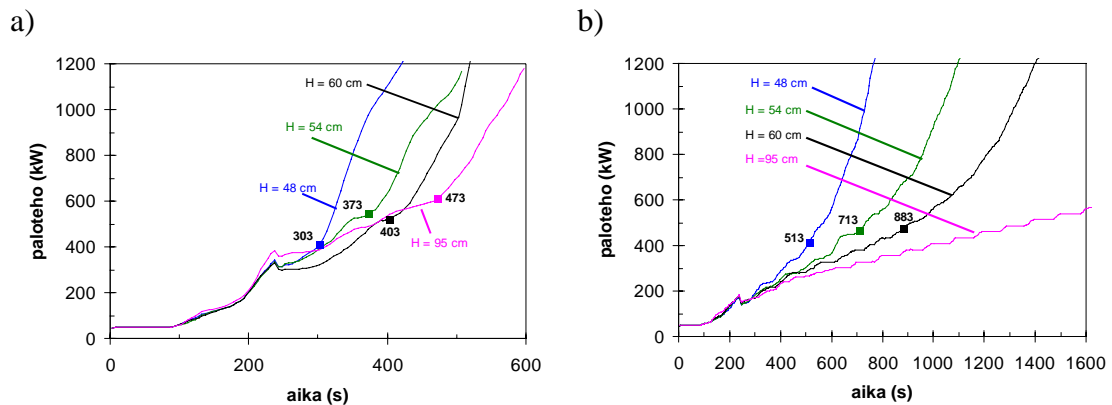
4.3.3 Palokuormana muovikaapeli

4.3.3.1 Suuren mittakaavan kaapelikokeiden perusteella tehdyt simuloinnit

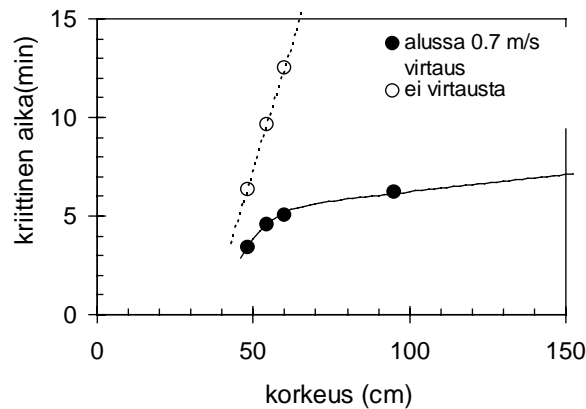
Täsmälleen samoilla ontelorakenteen ja palokuorman malleilla, joita käytettiin kaapelikokeen 2 mallintamisessa, laskettiin kaksi simulointisarjaa: toisessa ontelon läpi oletettiin alkutilanteessa kulkevan nopeudella 0,7 m/s etenevän virtauksen ja toisessa ontelon ilman oletettiin olevan alkutilanteessa liikkumatonta. Muuttuva tekijä oli ontelon korkeus H , jolle käytettiin arvoja 48, 54, 60 ja 95 cm. Simulointeja kuvaavat oleelliset parametriarvot on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Ontelon korkeuden vaikutusta tutkittaessa tehdyissä kaapelikokeisiin perustuvissa simuloinneissa käytetyt parametriarvot. Eri laskuissa muuttuvana tekijänä oli ontelon korkeus jolle käytettiin arvoja 48, 54, 60 ja 95 cm.

Yleiskuvaus: pituus: 6 m leveys: 110 cm korkeus: muuttuja, virtaus alkutilanteessa 0,7 m/s			
	seinät ja katto	lattia	palokuorma
aine	Luja A -levy	Luja A -levy	palosuojaamaton kaapeli, esim. PEX-muovi
d (mm)	12	12	60
k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0,48	0,48	0,1
α (m^2s^{-1})	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
T_{ig} ($^{\circ}\text{C}$)	palamaton	palamaton	184
\dot{q}'' (kWm^{-2})	palamaton	palamaton	310
t_{ig} (s)	palamaton	palamaton	115



Kuva 46. Kaapelikokeiden perusteella tehdyt ontelotilan kaapelipalosisimuloinnit, korkeuden vaikutus palotehoon kahdessa eri virtaustilanteessa: a) kun ontelon sisällä kulkee alkutilanteessa nopeudella 0,7 m/s pituussuuntaan etenevä ilmavirtaus ja b) kun alkutilanteessa ei esiinny virtauksia.



Kuva 47. Kriittinen aika ontelon korkeuden funktiona kahdessa eri virtaustapauksessa: kun ontelon sisällä kulkee alkutilanteessa nopeudella 0,7 m/s pituussuuntaan etenevä ilmavirtaus ja kun alkutilanteessa ei esiinny virtauksia.

4.3.3.2 Palokuorman luovuttaman palotehon vaikutus

Palokuorman palavuuden vaikutusta ontelotilan palon kehitykseen tutkittiin hieman erilaisella laskentajärjestelyllä kuin edellisiä tapauksia: laskentahilan jakoa suurennettiin 8 cm:iin, jolloin saatiin pienennettyä laskenta-aikoja helpommin käytännössä toteutettavalle tasolle. Myös seinien ja katon lämpöteknisiä ominaisuuksia muutettiin hieman, jotta tuloksia voitaisiin verrata myöhemmin esitettäviin puuverhotun ontelon tuloksiin. Lattialla oletettiin olevan 12 mm paksua kivivillaa.

Palokuorman palavuutta kuvattiin kaapeleiden yksikköpinta-alaa kohden luovuttamalla paloteholla. Tutkitut arvot olivat $\dot{q}'' = 150, 200, 250, 350, 500, 750$ ja 1000 kW/m^2 . Näistä alimmat arvot vastaavat PVC-vaippaisille kaapeleille tyypillisiä arvoja ja suurimmat erittäin hyvin palavia kaapeleja (Grayson ym. 2000). Simulointeja kuvaavat oleelliset parametriarvot on koottu taulukkoon 9.

Lasketut palotehokäyrät on esitetty kuvassa 48. Kuvassa 49 on esitetty käyristä määritetyt kriittiset ajat palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon funktiona. Kriittisiä aikoja esittävään kuvaan on piirretty myös sovitte käyttäen funktiomuotoa

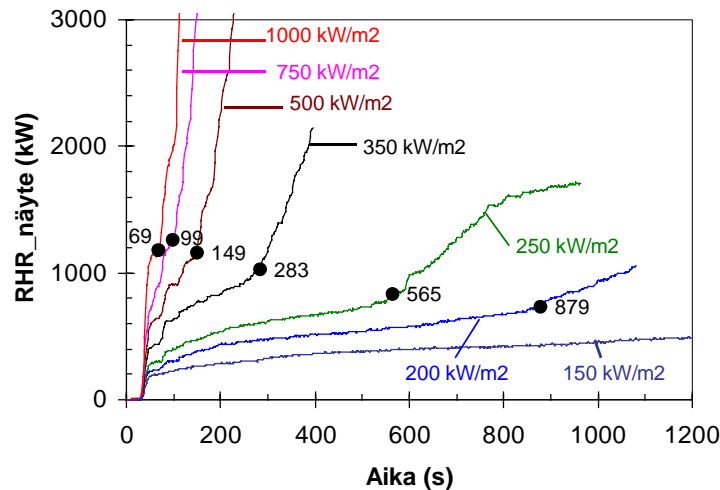
$$t_{\text{kriit,kaapeli}} = \Delta t_{c1} + \Delta t_{c2} \left(\frac{\dot{q}'' - \dot{q}_c''}{\dot{q}_c''} \right)^{-2}, \quad (2)$$

missä esiintyvillä parametreilla on seuraavat arvot: $\Delta t_{c1} = 0,16 \text{ min}$, $\Delta t_{c2} = 365 \text{ min}$ ja $\dot{q}_c'' = 32,6 \text{ kW/m}^2$. Kriittinen aika siis pienenee kääntäen verrannollisena palokuorman luovuttaman palotehon neliöön. Tämä funktionaalinen muoto on sopusoinnussa

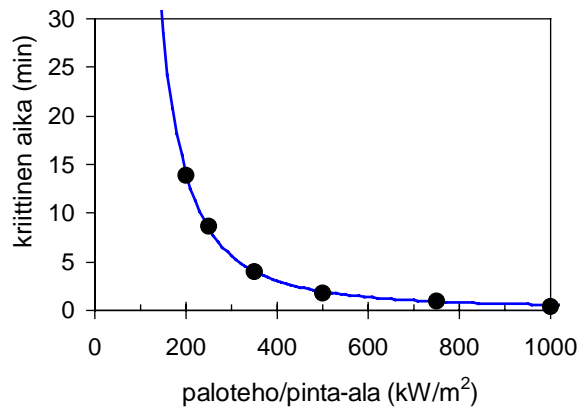
liitteessä A esitetyn Tewarsonin & Khanin (1989) kehittämän palon etenemismallin kanssa (nopeus kasvaa neliöllisesti palavuuden kasvaessa).

Taulukko 9. Palokuorman palavuuden vaikutusta tutkittaessa tehdyissä simuloinneissa käytetyt parametriarvot. Eri laskuissa muuttuvana tekijänä oli kaapeleiden lämmönvapauttamiskyky, jolle käytettiin arvoja 150, 200, 250, 350, 500, 750 ja 1000 kW/m².

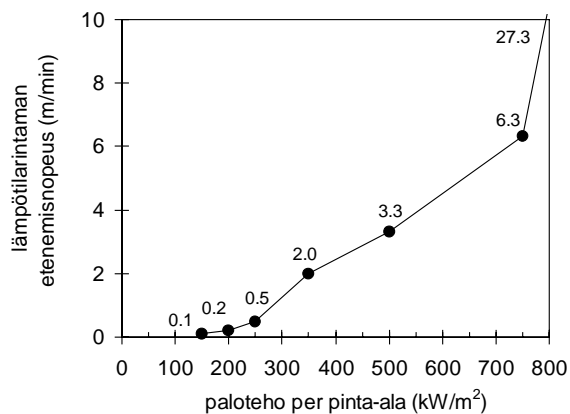
Yleiskuvaus: pituus: 6 m leveys: 110 cm korkeus: 64 cm ei virtausta alkutilanteessa			
	seinät ja katto	lattia	palokuorma
aine	esim. kevytbetoni	kivivilla	palosuojaamaton kaapeli, esim. PEX-muovi
d (mm)	22	12	60
k (Wm⁻¹K⁻¹)	0,2	0,1	0,1
α (m²s⁻¹)	2·10 ⁻⁷	10·10 ⁻⁷	2,5·10 ⁻⁷
T_{ig} (°C)	palamaton	palamaton	184
q̇'' (kWm⁻²)	palamaton	palamaton	muuttuja
t_{ig} (s)	palamaton	palamaton	115



Kuva 48. Ontelotilan kaapelipalosuulointi: palokuorman palavuuden vaikutus palotehoon, kun ontelossa ei alkutilanteessa ole virtauksia. Eri käyrät vastaavat eri palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvaa palotehon määrää. Kuvaajiin liitetyt ajat ovat kriittisiä aikoja, jolloin palo alkaa kasvaa (ks. kuva 45 ja siihen liittyvä teksti).



Kuva 49. Kriittinen aika palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon funktiona.



Kuva 50. Kuumassa kerroksessa etenevän 600 °C:n lämpötilarintaman keskimääräinen etenemisnopeus välillä 3–5 m palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon funktiona. Suurinta arvoa, 1000 kW/m², vastaava nopeuslukemaan liittyy selvästi muita suurempi epävarmuus ja siksi sitä ei ole esitetty.

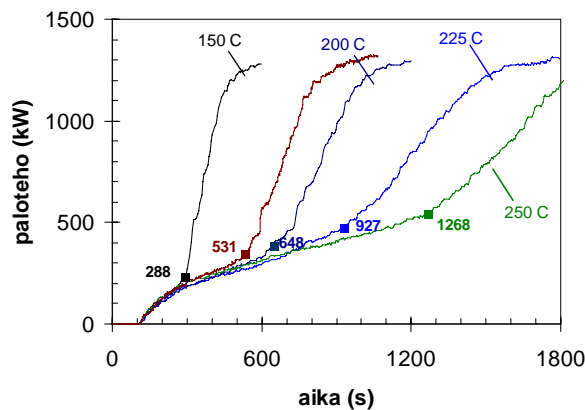
Palokuorman luovuttaman palotehon vaikutusta lämpötilarintaman etenemisnopeuteen kuumassa kerroksessa on havainnollistettu kuvassa 50. Esitetyt arvot ovat kuumassa kerroksessa etenevän 600 °C:n lämpötilarintaman keskimääräisiä etenemisnopeuksia välillä 3–5 m. Suurinta palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvaa palotehon arvoa, 1000 kW/m², vastaavan nopeuslukeman määrittäminen oli epävarmaa, koska lämpötilarintama eteni pitkän matkan ohjelman tulosteissa käytetyn aika-askeleen aikana. Näyttää kuitenkin siltä, että se olisi selvästi muita suurempi, suuruusluokkaa 30 m/min. Näin nopeasti etenevä ilmiö lähestyy deflagraatiota eli hyvin nopeaa palamisilmiötä, jossa paineaallon etenemisnopeus ei kuitenkaan yllä äänen nopeuden suuruusluokkaan (äänen nopeuden suuruusluokan saavuttavaa palamista kutsutaan

detonaatioksi, eli räjähdyskeksi). Yleisesti nähdään palokuorman luovuttaman palotehon kasvun lisäävän hyvin voimakkaasti kuumuuden etenemisnopeutta.

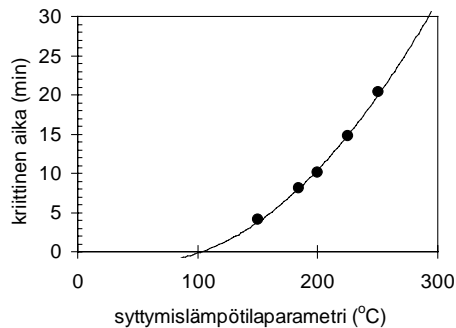
4.3.3.3 Palokuorman syttyvyyden vaikutus

Palokuorman syttyvyyden vaikutusta palon kehittymiseen tarkasteltiin käyttämällä FDS-laskennassa syttymislämpötilaa kuvaavalle parametrille T_{ig} arvoja 150 °C, 184 °C (koetapausten simuloinnissa käytetty arvo), 200 °C, 225 °C ja 250 °C. On huomattava, että tämä parametri kuvaa siis materiaalin pyrolysoitumisen kannalta kriittistä lämpötilaa: se on lämpötila, jossa palaminen ylipäänsä tulee mahdolliseksi.

Lasketut palotehokäyrät on esitetty kuvassa 51 ja palotehokäyristä määritetyt kriittisen ajan arvot on esitetty pyrolyysilämpötilan T_{ig} funktiona kuvassa 52. Esitetyn sovitteen mukaan kriittinen aika on verrannollinen pyrolyysilämpötilan toiseen potenssiin: kriittinen lämpötila $\propto T_{ig}^2$.



Kuva 51. Ontelotilan kaapelipalosuoritus: palokuorman pyrolyysilämpötilan vaikutus palotehoon palokuormalla verhoilussa ontelossa.



Kuva 52. Kriittinen aika palokuorman pyrolyysilämpötilan funktiona.

4.3.3.4 Ontelon reunojen lämpötekniisten ominaisuuksien vaikutus

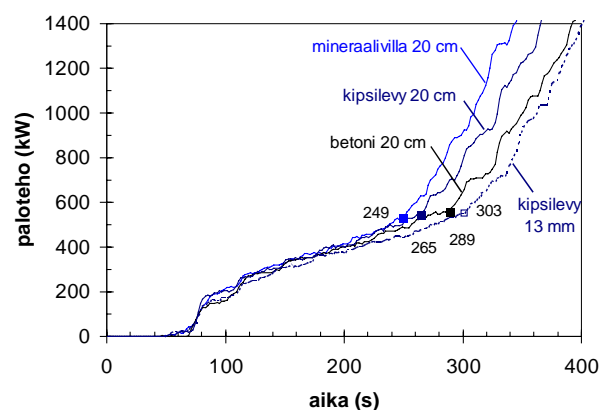
Ontelon reunojen lämpötekniisten ominaisuuksien vaikutusta tutkittiin tarkastelemalla kahta eri tapausta: seinän ja katon lämmönjohtavuuden sekä niiden paksuuden vaikutusta. Mitoiltaan ja palokuormaltaan tarkasteltu ontelo oli samanlainen kuin edellisessä kohdassa tarkasteltu ontelo (ks. taulukko 9). Siinä ei alkutilanteessa ollut virtauksia.

Tarkastellut materiaalit olivat betoni, kipsilevy ja mineraalivilla, joille kaikille lämpötilanjohtavuuden arvo on likimain $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Aineiden lämmönjohtavuuksille käytettiin seuraavia arvoja:

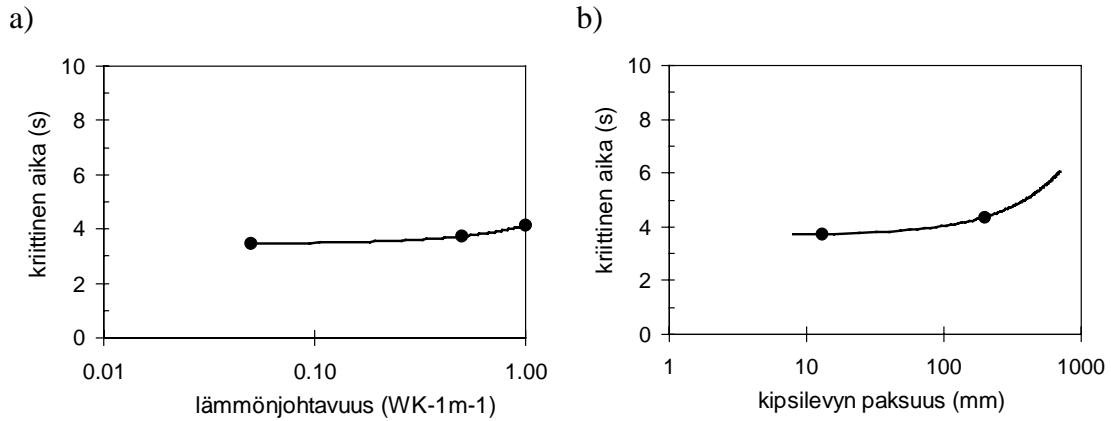
- betoni: $1 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$,
- kipsilevy: $0,5 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja
- mineraalivilla: $0,05 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Kaikkien materiaalien paksuudeksi asetettiin 20 cm, joka betonille ja mineraalivillalle on tavanomainen arvo, mutta ei kipsilevyille. Kipsilevyistä tarkasteltiinkin mainitun paksuuden lisäksi normaalipaksuista eli 13 mm paksua levyä.

Tulokset on esitetty kuvissa 53 ja 54. Nähdään, että 20 cm paksuilla ainekerroksilla lämmönjohtavuuden kasvaminen pidentää kriittistä aikaa, mutta varsin vähän. Reunan paksuus vaikuttaa enemmän, mutta senkään vaikutus kriittiseen aikaan ei ole läheskään yhtä suuri kuin esim. ontelon korkeuden tai palokuorman palo-ominaisuuksien.



Kuva 53. Ontelotilan kaapelipalosimulointi: ontelon reunojen lämpötekniisten ominaisuuksien vaikutus palotehoon, kun ontelossa ei alkutilanteessa ole virtauksia. Kuvaajiin liitetyt ajat ovat kriittisiä aikoja, jolloin palo alkaa kasvaa.



Kuva 54. Kriittinen aika a) ontelon reunojen lämmönjohtavuuden funktiona ja b) kipsilevyn paksuuden funktiona (molemmat esitetyt sovitteet ovat lineaarisia, mutta logaritmissen vaaka-akselin vuoksi ne näyttävät kaareutuvilta)

4.3.3.5 Ontelon virtauksen palon leviämistä lisäävä vaikutus

Edellä (luku 4.3.3.1) tarkasteltiin, miten ontelopalon kehittyminen muuttuu, kun tilaan kytketään päälle pakotettu virtaus, kuten tilanne on esim. ilmanvaihtoon käytetyissä ontelotiloissa. Tässä luvussa jatketaan virtauksen vaikutuksen tutkimista tarkastelemalla erästä olemassa olevaa ontelotilaa, jossa oletetaan virtaavan eri suuruisia ilmavirtoja.

Tarkasteltu ontelotila on erään 1970-luvulla toimistorakennuksen käytävän yläpuolella oleva alaslasketun katon muodostama ontelo. Ontelossa kulkee kaapeleita. Sitä ei käytetä ilmanvaihtokanavana, joten normaalitilanteessa siellä ei ole virtauksia. Tämän tarkastelun tarkoituksena onkin tutkia, miten paloturvallisuus muuttuisi, jos tilaa käytettäisiin ilmanvaihtotarkoituksiin, jolloin siellä kulkisi tietyn suuruinen virtaus. Asetettu spesifinen kysymys oli, kuinka paljon nopeammin tuli leviäisi koko käytävän matkalle, jos ontelossa olisi virtaus. Paloskenaariona on palon kulkeutuminen onteloon toimistohuoneessa lieskahtaneesta palosta. Liekkien reitin onteloon oletetaan kulkevan puuttuvan tai palossa särkyvän käytävän kattolaatan kautta.

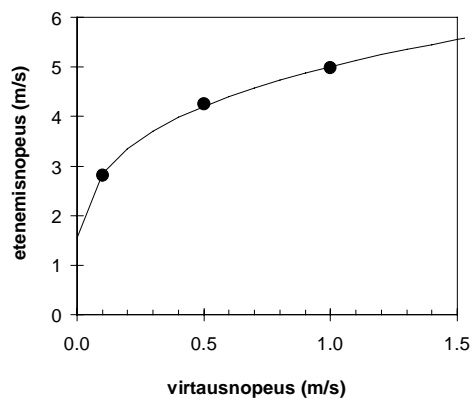
Mallinnuksessa käytetyt mitat ja muut yksityiskohdat ovat seuraavat:

- Ontelon leveys on sama kuin käytävän leveys eli 180 cm ja ontelotilan korkeus on 75 cm. Laskennassa on tarkasteltu onteloa 10 m:n pituudelta.
- Ontelon katto ja seinät ovat betonia, jolle on mallinnuksessa oletettu paksuus $\delta_w = 0,1$ m. Tämä on riittävän suuri paksuus, jotta lämpö ei ehdi kulkea seinän läpi tarkasteluaikana. Tässä tarkastelussa betonin lämpöteknisinä suureina käytetään

seuraavia arvoja: lämmönjohtavuus $k_w = 1,0 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja lämpötilanjohtavuus $\alpha_w = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

- Ontelon lattia eli alaslasketun katon materiaali on kipsilevyä, jonka paksuus on $\delta_s = 13 \text{ mm}$, lämmönjohtavuus $k_s = 0,13 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$, lämpötilanjohtavuus $\alpha_s = 2,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.
- Ontelopalo alkaa puuttuvan tai palossa särkyvän kipsilevyn (dimensiot $0,3 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$) kautta onteloon kulkeutuvasta noin 290 kW :n tehosta, mikä pinta-alayksikköä kohden laskettuna vastaa arvoa 1600 kW/m^2 .
- Laskennassa tarkastellun ontelon osan ilmansaannin on oletettu tapahtuvan auki olevien päätyjen kautta.
- Ontelossa olevaa palokuormaa on kuvattu polyeteenivaippaisella (PE) kaapelilla, jonka vaipan lämmönjohtavuus on $k_c = 0,16 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja lämpötilanjohtavuus on $\alpha_s = 0,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Kaapelin vaipan on oletettu palavan voimakkaasti (huippuarvo lämmöntuotolle per yksikköpinta-ala 2800 kW/m^2), (Babrauskas & Grayson 1992) ja sen syttymislämpötilana on käytetty arvoa $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tarkastelussa keskityttiin lämpötilarintaman etenemiseen. Kuvassa 55 on esitetty, miten $600 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilarintaman etenemisnopeus kasvaa ontelossa vallitsevan ilmavirtauksen kasvaessa. Nähdään, että jo nopeudella 1 m/s etenevä virtaus nopeuttaa kuumien kaasujen etenemistä virtaamattomaan tapaukseen verrattuna noin tekijällä 3–4.



Kuva 55. Ontelossa kulkevan virtauksen vaikutus kuuman kerroksen etenemisnopeuteen: $600 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilaa vastaavan lämpötilarintaman etenemisnopeus ontelossa kulkevan virtauksen nopeuden funktiona.

Jos tarkasteltu alaslasketun katon ontelotila toimisi ilmanvaihtokanavana, niin tulipalotilanteessa palo voisi edetä koko käytävän matkalle (noin 30 m) runsaassa 5 minuutissa, mutta virtaamattomassa tapauksessa tähän kuluisi yli 15 minuuttia. Edellisessä tapauksessa turvalliselle poistumiselle ei ole paljoakaan aikaa, ja siksi henkilövahinkojen riski on varsin suuri, mutta jälkimmäisessä tapauksessa työntekijät mitä todennäköisimmin pystyisivät poistumaan rakennuksesta turvallisesti.

4.3.4 Palokuorma verhoiluna ontelon reunoilla

Kun palokuorma sijaitsee ontelon reunoilla, tilan lämpeneminen on erilaista kuin edellä käsitellyissä tapauksissa, koska tilaan muodostuvien kuumien kaasujen lämpö ei pääse poistumaan niitä kuumempien palavien reunojen läpi. Toisaalta palokuorman jäähtytys voi olla tehokasta, kun lämpöä siirtyy palokuormasta seinien läpi kylmempiin ulkotiloihin tai muihin rakenteisiin.

Tässä luvussa tarkastellaan, miten ontelon koko (korkeus ja leveys) ja palokuorman palo-ominaisuudet vaikuttavat palon kehittymiseen verhoillussa ontelossa.

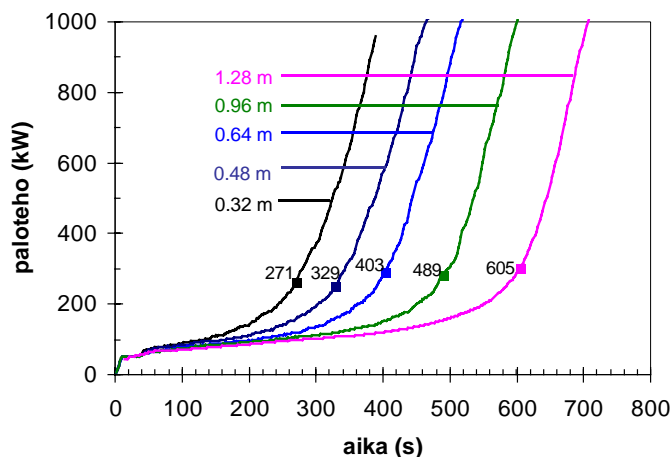
Palokuormana on oletettu olevan puuta. Sen mallintamisessa on käytetty edellä esitetyissä kokeiden ja FDS-tulosten vertaamisen yhteydessä määritettyjä parametreja (taulukko 10).

Taulukko 10. Verhoillun ontelotilan palojen FDS-simulointien perusparametriarvot. Alla olevissa tarkasteluissa on varioitu ontelon korkeutta, leveyttä, palontehoa pinta-alayksikköä kohti \dot{q}'' ja syttymislämpötilaa T_{ig} .

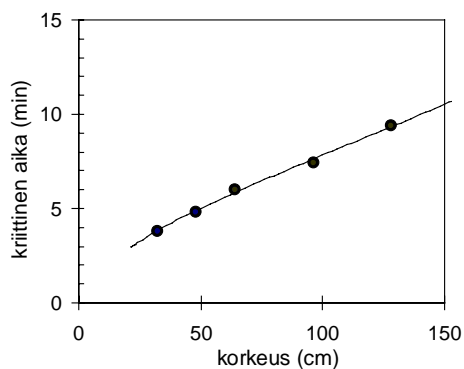
Yleiskuvaus:	pituus: 6 m	leveys: 110 cm tai muuttuja	korkeus: 50 cm tai muuttuja	ei virtausta alkutilanteessa
	palokuorma: seinät ja katto		lattia	
aine	kuusipuu		kivivilla	
d (mm)	22		12	
k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0,2		0,1	
α (m^2s^{-1})	$2 \cdot 10^{-7}$		$10 \cdot 10^{-7}$	
T_{ig} ($^{\circ}\text{C}$)	280 tai muuttuja		palamaton	
\dot{q}'' (kWm^{-2})	120 tai muuttuja		palamaton	
t_{ig} (s)	35		palamaton	

4.3.4.1 Ontelon korkeuden vaikutus

Ontelon korkeuden vaikutusta tutkittiin tekemällä simuloitteja viidellä eri ontelon korkeudella, 32 cm, 48 cm, 64 cm, 96 cm ja 128 cm. Lasketut palotehokäyrät on esitetty kuvassa 56 ja palotehokäyristä määritetyt kriittisen ajan arvot on esitetty ontelon korkeuden funktiona kuvassa 57.



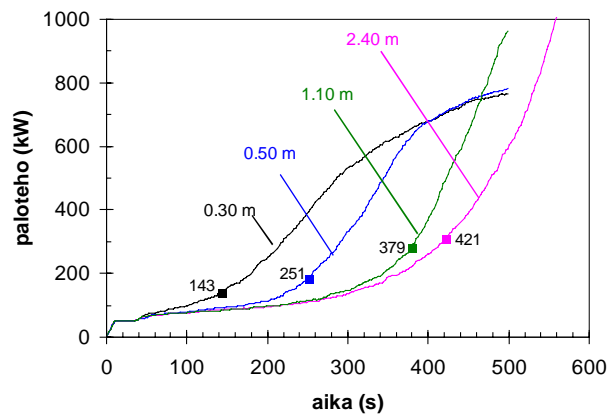
Kuva 56. Ontelon korkeuden vaikutus palokuormalla verhoillun ontelon palotehoon. Esitetyt kriittiset hetket on luettu palotehokäyriä muutosnopeudesta.



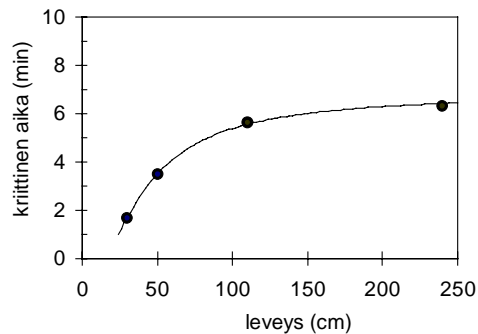
Kuva 57. Kriittinen aika ontelon korkeuden funktiona palokuormalla verhoillussa ontelossa.

4.3.4.2 Ontelon leveyden vaikutus

Ontelon leveyden vaikutusta tutkittiin tekemällä simuloitteja neljällä eri ontelon korkeudella, 30 cm, 50 cm, 110 cm ja 240 cm. Lasketut palotehokäyrät on esitetty kuvassa 58 ja palotehokäyristä määritetyt kriittisen ajan arvot on esitetty ontelon leveyden funktiona kuvassa 59.



Kuva 58. Ontelon leveyden vaikutus palokuormalla verhoillun ontelon palotehoon. Esitetyt kriittiset hetket on luettu palotehokäyrien muutosnopeudesta.



Kuva 59. Kriittinen aika ontelon leveyden funktiona palokuormalla verhoillussa ontelossa. Ontelon korkeus on 50 cm.

4.3.4.3 Palokuorman luovuttaman palotehon vaikutus

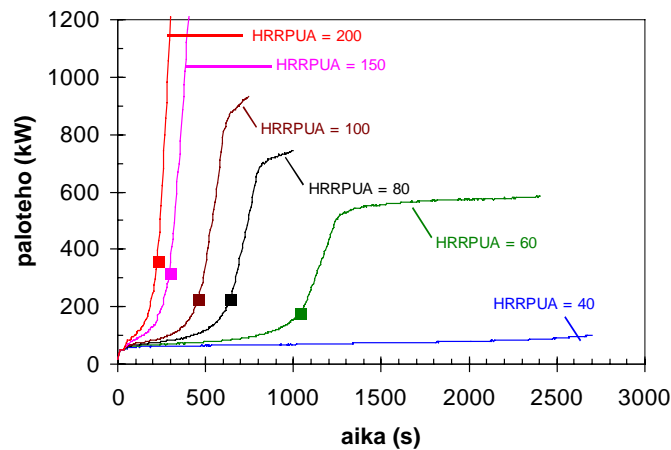
Tässä tarkastelussa tutkittiin, miten palokuorman pinta-alayksikköä kohti luovuttaman palotehon määrä (kW/m^2) vaikuttaa palo kehittymiseen. Palokuorman luovuttamalle paloteholle annettiin arvoja 40–200 kW/m^2 . Alempi näistä arvoista vastaa esimerkiksi palosuojattua puuta huonepalo-olosuhteissa, ja arvo 120 kW/m^2 vastaa palosuojamatonta puuta huonepalo-olosuhteissa (ks. luku 4.2.1). Näistä vastaavuuksista lähtien voidaan arvioida palotehoarvon 200 kW/m^2 vastaavan esimerkiksi joitain hyvin palavia puulevytuotteita, kuten esim. ohutta kevyttä kuitulevyä.

Lasketut palotehokäyrät on esitetty kuvassa 60 ja palotehokäyristä määritetyt kriittisen ajan arvot on esitetty palokuorman luovuttaman palotehon funktiona kuvassa 61. Nähdään, että arvolla 40 kW/m^2 palo ei kehittynyt kriittiseksi tarkasteluaikana (2600 s eli 43 min).

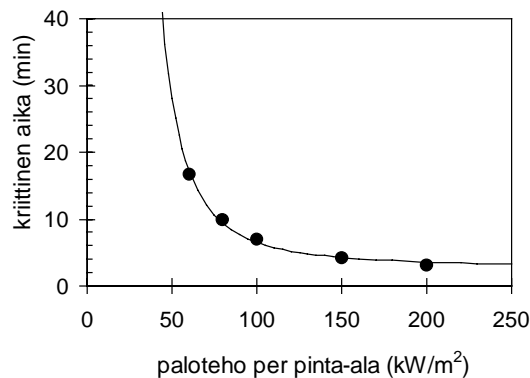
Kriittisiä aikoja esittävään kuvaan on piirretty myös sovitte käyttäen funktiomuotoa

$$t_{\text{kriit., puuverhoilu}} = \Delta t_{w1} + \Delta t_{w2} \left(\frac{\dot{q}'' - \dot{q}_w''}{\dot{q}_w''} \right)^{-2}, \quad (3)$$

missä esiintyvillä parametreilla on seuraavat arvot: $\Delta t_{w1} = 2,8 \text{ min}$, $\Delta t_{w2} = 62 \text{ min}$ ja $\dot{q}_w'' = 19,4 \text{ kW/m}^2$. Tässäkin tapauksessa kriittinen aika siis pienenee kääntäen verrannollisena palokuorman luovuttaman palotehon neliöön (vrt. luku 4.3.3.2).

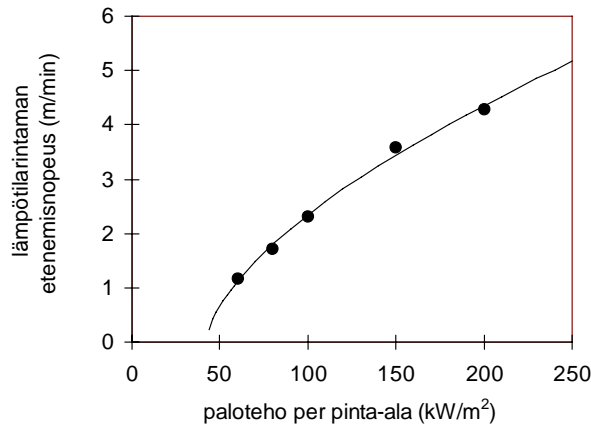


Kuva 60. Palokuorman palavuuden vaikutus palotehoon palokuormalla verhoilussa ontelossa: eri käyrät vastaavat eri palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvaa palotehon määrää.



Kuva 61. Kriittinen aika palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon funktiona.

Palokuorman luovuttaman palotehon vaikutusta lämpötilarintaman etenemisnopeuteen kuumassa kerroksessa on havainnollistettu kuvassa 62. Esitetyt arvot ovat kuumassa kerroksessa etenevän 600 °C:een lämpötilarintaman keskimääräisiä etenemisnopeuksia välillä 3–5 m. Esitetyn sovitteen mukaan alle $\dot{q}_0'' \approx 40 \text{ kW/m}^2$ suuruisilla arvoilla etenemisnopeus v on häviävän pieni ja kasvaa tätä suuremmille \dot{q}'' -arvoille seuraavasti: $v \propto (\dot{q}'' - \dot{q}_0'')^{0.6}$.

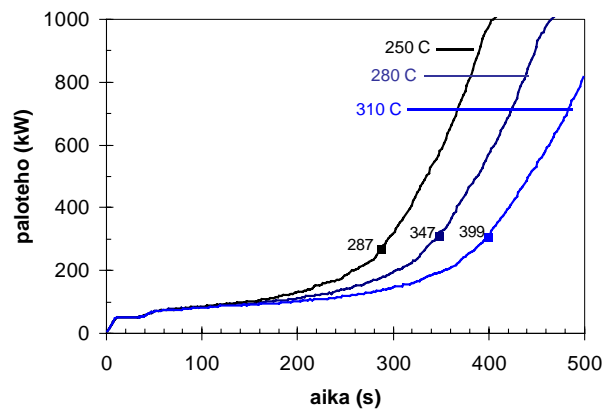


Kuva 62. Kuumassa kerroksessa etenevän 600 °C:n lämpötilarintaman keskimääräinen etenemisnopeus välillä 3–5 m palokuorman yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon funktiona.

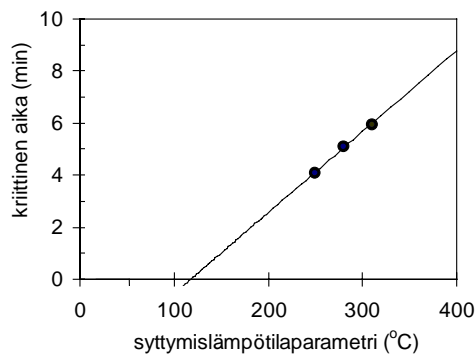
4.3.4.4 Palokuorman syttyvyyden vaikutus

Palokuorman syttyvyyden vaikutusta palon kehittymiseen tarkasteltiin käyttämällä FDS-laskennassa syttymislämpötilaa kuvaavalle parametrille T_{ig} arvoja 250 °C, 280 °C ja 310 °C. On huomattava, että tämä parametri kuvaa siis materiaalin pyrolysoitumisen kannalta kriittistä lämpötilaa: se on lämpötila, jossa palaminen ylipäänsä tulee mahdolliseksi. Siksi sitä alla kutsutaan pyrolyysilämpötilaksi. Se on alempi kuin esim. puulle kirjallisuudessa yleisesti annetut syttymislämpötilan arvot, jotka ovat suuruusluokkaa 350 °C.

Lasketut palotehokäyrät on esitetty kuvassa 63 ja palotehokäyristä määritetyt kriittisen ajan arvot on esitetty pyrolyysilämpötilan T_{ig} funktiona kuvassa 64. Esitetyn sovitteen mukaan kriittinen aika on suoraan verrannollinen pyrolyysilämpötilaan: kriittinen lämpötila $\propto T_{ig}$.



Kuva 63. Palokuorman pyrolyysilämpötilan vaikutus palotehoon palokuormalla verhoilussa ontelossa.



Kuva 64. Kriittinen aika palokuorman pyrolyysilämpötilan funktiona.

4.3.5 Johtopäätökset vaakasuorien ontelotilojen tulipalojen mallinnustutkimuksesta

Seuraavassa esitetään johtopäätöksiä, joita voidaan tehdä edellä esitettyjen mallinnustarkasteluiden perusteella.

4.3.5.1 Ontelossa kulkeva virtaus

Ontelossa kulkeva virtaus levittää paloa tehokkaasti. Kaapelipalotarkastelussa, jossa ontelotilan korkeutta vaihdeltiin (kuva 47) havaittiin, että jos ontelossa ei ole virtausta alkutilanteessa, niin kriittinen aika kasvaa voimakkaasti suoraan verrannollisena ontelon korkeuteen. Kun alkutilanne oli se, että ontelossa kulki nopeudella 0,7 m/s etenevä ilmavirta, tilanne oli selvästi toinen: tässä tapauksessa kriittinen aika piteni vain vähän ontelon korkeuden kasvaessa, ja kasvu oli sitä hitaampaa, mitä korkeampaa tilaa

tarkasteltiin. Syy tähän on se, että tilanteessa, jossa ontelossa on virtaus, liekit leviävät virtauksen ajamina, eikä esim. tilan korkeudella siten ole merkittävää vaikutusta paitsi matalissa onteloissa (korkeus suuruusluokkaa puoli metriä), joissa kuumen kerroksen paloa vahvistava vaikutus on riittävän voimakas.

Kuvassa 55 esitetty tarkastelu osoittaa, miten jo 1 m/s nopeudella kulkeva virtaus voi tyypillisen toimistorakennuksen käytävän alaslasketun katon ontelotilassa nopeuttaa palon leviämistä tekijällä 3–4 virtauksettomaan tilanteeseen verrattuna.

Ontelossa kulkevan virtauksen nopeuden kasvattaminen nopeuttaa palon leviämistä aina siihen saakka, kunnes virtaus on riittävän voimakas puhaltamaan liekit sammuksiin. Tähän vaadittavan virtausnopeuden suuruutta voidaan arvioida tarkastelemalla olosuhteiden (mm. virtausnopeuden) määräämää palamistapahtumalle käytettävissä olevaa aikaa τ_r ja palamisen kemiallisten reaktioiden vaatimaa aikaa τ_{ch} : jos virtaus on niin voimakas, että $\tau_r < \tau_{ch}$, palaminen ei enää ole mahdollista (Drysdale 1998).

4.3.5.2 Ontelon korkeus ja leveys

Kuvista 47 ja 57 nähdään, miten virtauksettomassa ontelossa kriittinen aika kasvaa jokseenkin lineaarisesti ontelon korkeuden kasvaessa. Kun palokuorma on ontelotilan reunoilla (kuva 57), kriittinen aika kasvaa hitaammin kuin tapauksessa, jossa palokuorma on ontelotilassa esim. kaapeleiden muodossa (kuva 47). Tämä voidaan selittää seuraavasti: Kun palokuorma reunustaa ontelotilaa, on osa siitä eli katto ja osa seinillä olevasta palokuormasta kuumassa kerroksessa, joka lämmittää palokuormaa sekä konvektion että säteilyn avulla. Kaapelityyppiseen palokuormaan voi puolestaan kohdistua merkittävää konvektiivista lämmitystä vain, kun ontelo on riittävän matala. Kun ontelon korkeus kasvaa, konvektiivinen lämmitys kaapelityyppiseen palokuormaan tulee merkityksettömän pieneksi. Lisäksi säteilylämmitys pienenee ontelon korkeuden kasvaessa nopeammin kuin tapauksessa, jossa palokuormaa on kuumassa kerroksessa.

Jos ontelossa kulkee sen pituussuuntainen virtaus, niin tilan korkeuden suhteellinen merkitys palon leviämiseen vaikuttavana tekijänä vähenee virtauksen kasvaessa (ks. edellinen luku).

Kuvan 59 mukaan ontelon leveys tulee merkittäväksi tekijäksi ontelon paloturvallisuudelle, kun leveys on pienempi kuin noin kaksi ontelon korkeutta. Tätä suuremmilla ontelon leveyden arvoilla leveyden kasvattaminen ei juurikaan pidennä kriittistä aikaa.

4.3.5.3 Palokuorman luovuttama paloteho ja syttyminen

Yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho

Edellä esitetyt tarkastelut osoittavat, että se, miten voimakkaasti palokuorma voi luovuttaa lämpöä palaessaan, on hyvin tärkeä tekijä ontelotilojen paloturvallisuudessa. Kriittinen aika lyhenee kääntäen verrannollisena palokuorman yksikköpinta-alaa kohden luovuttaman palotehon toiseen potenssiin, kuten kuvissa 49 (kaapelipalolle tyyppinen palokuorman asettelu) ja 61 (tapaus, jossa palokuorma on tilan seinien verhoiluna) on esitetty. Myös kuumien kaasujen eteneminen nopeutuu voimakkaasti palokuorman yksikköpinta-alaa kohden luovuttaman palotehon kasvaessa (kuvat 50 ja 62).

Tarkastelluissa esimerkkitapauksissa palokuormalla verhotun ontelon tapauksessa vaaditaan pitkien kriittisten aikojen (suuruusluokkaa puoli tuntia tai suurempi) saavuttamiseksi varsin vähän lämpöä luovuttava materiaali, jolle laskennassa käytetty paloteho yksikköpinta-alaa kohden on noin 50 kW/m^2 tai pienempi. Kun palokuorma sijaitsee ontelon keskivaiheilla, niin em. tavalla kriittinen arvo on noin 150 kW/m^2 . Edellinen arvo vastaa esim. palosuojattua puuta ja jälkimmäinen esim. palosuojattua kaapelimateriaalia.

Aineen yksikköpinta-alaa kohti vapautuva paloteho on paloteknisissä tarkasteluissa käyttökelpoinen suure, jonka suuruutta voidaan mitata etenkin kartiokalorimetrialaitteella (Babrauskas 1995). On kuitenkin hyvä pitää mielessä, että tämä laite mittaa lämmönluovuttamista olosuhteissa, joissa palamisen hapensaanti ei ole rajoittunutta ja siksi sen antamat lämmöntuottotulokset ovat usein korkeampia kuin mitä materiaalit suljetuissa tiloissa tapahtuvissa paloissa todella pystyvät luovuttamaan. Lisäksi saatu yksikköpinta-alaa kohti vapautuvan palotehon arvo muuttuu palamisen aikana, ks. kuva 9. Näiden syiden vuoksi tässä työssä mallinnuksessa käytetty yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon arvo on valittu hienosäätämällä kartiokalometrikokeen antamaa tulosta vertaamalla laskennan tuloksia täyden mittakaavan koetuloksiin.

Syttyvyys

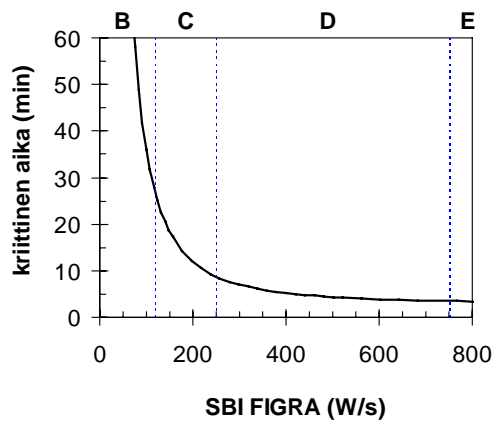
Myös palokuorman syttymiseen vaadittava lämpötila vaikuttaa merkittävästi ontelopalon kehittymiseen ja leviämiseen (ks. kuvat 52 ja 63). Kun palokuorma sijaitsee tilassa sen keskivaiheilla koskettamatta reunoihin, niin sen syttymislämpötilan muutokset vaikuttavat hyvin voimakkaasti (neliöllinen riippuvuus) ontelopalon kriittiseen aikaan. Verhoillun ontelon tapauksessa kriittisen ajan riippuvuus syttymislämpötilasta on lineaarinen.

Käytännön paloturvallisuustyön kannalta syttymiseen vaadittava lämpötilan merkitys voidaan sisällyttää aineen luovuttaman palotehon tarkasteluun, koska käytännössä syttyminen merkitsee palotehon luovuttamisen alkamista. Näin menetellään esim. pintakerrosten palo-ominaisuuksien SBI-euroluokitustestissä (prEN 13823, 2001 (SBI)). Monissa tapauksissa syttymisherkyys ja palavuus lisäksi korreloivat.

Tulkinta euroluokitustestien tulosten avulla

Monissa palotekniikan sovelluksissa ja esim. säädöksissä, yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho tai materiaalin syttymislämpötila eivät ole yleisesti tunnettuja tai käytettyjä suureita. Siksi seuraavassa esitetään, miten yllä esitetyt tulokset palokuorman syttävyyden ja palavuuden vaikutuksesta ontelotilojen paloturvallisuuteen voidaan tulkita uusien rakennustuotteiden ja kaapeleiden palo-ominaisuuksien euroluokkien avulla. Rakennustuotteiden euroluokkatesti, SBI-testi (prEN 13823, 2001 (SBI)), on ollut koekäytössä monissa laboratoriossa jo lähes viisi vuotta, ja siksi on sen tuloksista ja niiden vertautuvuudesta esim. kartiokalorimetrituloksiin kertynyt jo paljon tietoa (esim. Hakkarainen 2001, Hietaniemi ym. 2002). Siksi seuraavassa esitetyt rakennustuotteista esimerkkimateriaaliksi valittua puuta koskevat arviot ovat varsin vankalla pohjalla. Kaapelien uusi euroluokitussysteemi on uudempi, eikä siitä ole kertynyt vastaavaa tietomäärää kuin SBI-testiin liittyen. Siksi kaapelimateriaalien osalta seuraava esitys onkin luonteeltaan alustava suuntaa-antava tarkastelu.

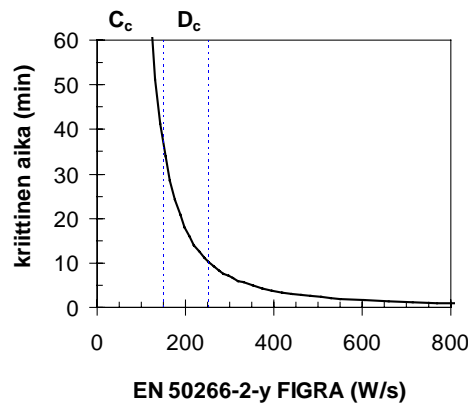
Edellä esitetyissä verhoillun ontelon simuloinneissa palosuojaamattomalle lautatavaralle käytettiin yksikköpinta-alaa kohti vapautuvalle paloteholle \dot{q}_w'' arvoa 120 kW/m^2 ja palosuojujalle lautatavaralle arvoa \dot{q}_{FRW}'' arvoa 40 kW/m^2 . Toisaalta näille materiaaleille tehdyistä SBI-kokeista tiedetään vastaavien FIGRA-arvojen ja lämmönluovuttamiseen liittyvien euroluokkien olevan noin 400 W/s , luokka D (suojaamaton puu) ja noin 75 W/s , luokka B (palosuojujattu puu). Näiden tietojen perusteella saatava SBI FIGRA-indeksi ja ontelopalon kriittisen ajan vastaavuus on esitetty kuvassa 65. Kuvaan on merkitty myös eri FIGRA-arvoja vastaavat euroluokat.



Kuva 65. Palokuorman euroluokituksen merkitys puutuotteella verhoillun ontelotilan palon kehittymiseen kriittiseksi. Vaaka-akselina on SBI-testissä määritettävä FIGRA-palonkasvuindeksi ja kuvan yläpuolella on esitetty FIGRA-arvoja vastaavat euroluokat.

Kaapeleiden palo-ominaisuuksien ja niiden euroluokituksen välistä yhteyttä koskevia tietoja on tällä hetkellä löydettävissä pääasiassa FIPEC-projektin tuloksista (Grayson ym. 2000). Luokitustestin tuloksina tarkastellaan tässä yhteydessä FIPEC-hankkeessa käytetyn palotilanteen 1 (sytytysteho 20,5 kW ja sytytysaika 20 min) mukaisia FIGRA-arvoja (Grayson ym. 2000, taulukko A5.3, s. 153). Tämän palotilanteen mukainen testaaminen suoritetaan standardin prEN 50266-2-y mukaisesti (prEN 50266-2-y: 2001). Palotilanteessa 2 (sytytysteho 30 kW ja sytytysaika 40 min) saatuja tietoja ei tässä käytetä, koska niiden ja kartiokalorimetritulosten välinen korrelaatio on heikko. Kartiokalorimetrikokeissa määritetyistä suureista tarkastellaan yksikköpinta-alaa kohti vapautuvaa palotehoa $\dot{q}''_{composite}$ koejärjestelyssä, jossa kaapelit testattiin tasomaisina kerroksittaisina komposiitteina, kun säteilytaso oli 75 kW/m^2 (Grayson ym. 2000, taulukko A8.13, s. 271). Muunnos kartiokalorimetrituloksista palotilanteen 1 mukaisiin luokitustestin FIGRA-tuloksiin on luettavissa näiden suureiden välisestä korrelaatiosta ($R^2 = 0,8$), jonka mukaan FIGRA-arvo on laskettavissa seuraavasti: $FIGRA \approx 1,3 \cdot \dot{q}''_{composite}$, missä FIGRA on ilmaistu yksiköissä W/s ja paloteho yksiköissä kW/m^2 . Näin saatu kriittisen ajan ja FIGRA-indeksin vastaavuus on esitetty kuvassa 66.

Yhteenveto kriittisistä ajoista kahdelle edellä käsitellylle tapaukselle on esitetty taulukossa 11.



Kuva 66. Kaapelin euroluokituksen merkitys ontelotilan palon kehittymiseen kriittiseksi. Vaaka-akselina on testissä prEN 50266–2–y määritettävä FIGRA-palonkasvuindeksi ja kuvan yläpuolella on esitetty kyseistä FIGRA-arvoa vastaavat luokat. Kaapelimateriaalin luovuttaman palotehon ja FIGRA-indeksin vastaavuuden määrittämisessä käytettyjen lähtötietojen vähyyden takia esitetty tulos on luonteeltaan alustava arvio.

Taulukko 11. Palokuorman euroluokituksen merkitys ontelopalon kehittymiseen kriittiseksi: kriittinen aika puutuotteella verhoillun ontelotilan ja kaapelipalokuorman tapauksissa (lähimpään 5 minuuttiin pyöristetyt luvut).

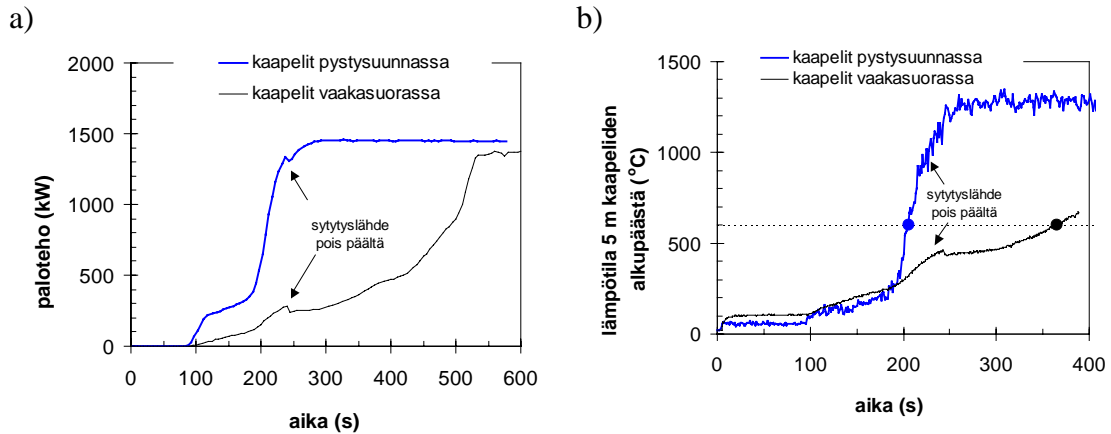
euroluokka ^{a)}	puutuote	kaapeli
B	$t_{kriit} > 25 \text{ min}$	
C	$25 \text{ min} > t_{kriit} > 10 \text{ min}$	$40 \text{ min} > t_{kriit} > 10 \text{ min}$
D	$10 \text{ min} > t_{kriit} > 5 \text{ min}$	$10 \text{ min} > t_{kriit}$
E	$5 \text{ min} > t_{kriit}$	

a) Lämmöntuoton FIGRA-indeksiä vastaava luokka.

4.4 Pystysuuntaisen ontelon mallinnustutkimuksia

4.4.1 Ontelon suunnan vaikutus palon leviämiseen

Kun palokuorma on asennettu pystysuuntaisesti, tuli leviää paljon nopeammin kuin jos palokuorma on vaakasuorassa. Esimerkki tästä on esitetty kuvassa 67, jossa on tarkasteltu suuren mittakaavan palokokeissa käytetyn 6 PEX-kaapelin palamista. Vaakasuuntaisten kaapeleiden paloteho- ja lämpötilakäyrät on laskettu kohdassa 4.2.3 esitetyille järjestelyille. Pystysuuntaisen kaapeleiden simuloinnissa kokeissa käytetty systeemi oli käännetty pystyasentoon.



Kuva 67. Esimerkki pystysuunnassa ja vaakasuorassa asennossa olevien kaapelien palamisesta: a) paloteho ja b) lämpötila 5 m kaapeleiden alkupäästä (pisteet ilmaisevat hetken, jolloin lämpötila nousee 600 °C:seen).

Pystysuuntaisessa tapauksessa paloteho kehittyi paljon nopeammin kuin vaakasuuntaisessa tapauksessa. Myös kuumuuden leviämiseen palokuorman suunta vaikuttaa voimakkaasti. Vaakasuorassa suunnassa palavalle kuuden PEX-kaapelin muodostamalle palokuormalle 600 °C:n lämpötilarintaman suurin etenemisnopeus on n. 3,2 m/min ja samalle palokuormalle pystysuuntaisesti asennettuna vastaava arvo on noin 8 m/min (määritetty 10 cm etäisyydellä kaapelien pinnassa). Kun kaapeleiden lähelle (noin 10 cm päähän) tuotiin vastakkainen seinä, kasvoi etenemisnopeus arvoon 13–14 m/min. Keskimääräinen kuumuuden etenemisnopeus 5 m päähän kaapeleiden alusta (eli 4,5 m päähän sytytyslähdeestä) oli vaakasuuntaisessa systeemissä noin 1,0 m/min ja pystysuuntaisessa systeemissä 2,4 m/min.

4.4.2 Pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutuksesta

Tässä tarkastelussa käytettiin kuvassa 68 esitettyä järjestelyä. Siinä oletettiin kahden palavan seinän syttyvän niiden välissä olevan polttimen luovuttaman lämmön seurauksena (polttimen paloteho 23 kW). Polttimen yläpinta sijaitsi 25 cm:n korkeudella. Seinien korkeus oli 1 m ja leveys 60 cm. Seinien oletettiin olevan suhteellisen herkästi palavaa ainetta (FDS-ohjelman syttymislämpötilaparametri 200 °C ja paloteho per yksikköpinta-ala 300 kW/m²). Simuloinneissa muunneltava tekijä oli seinien välinen etäisyys, jolle käytettiin arvoja 9, 15, 21 ja 27 cm.

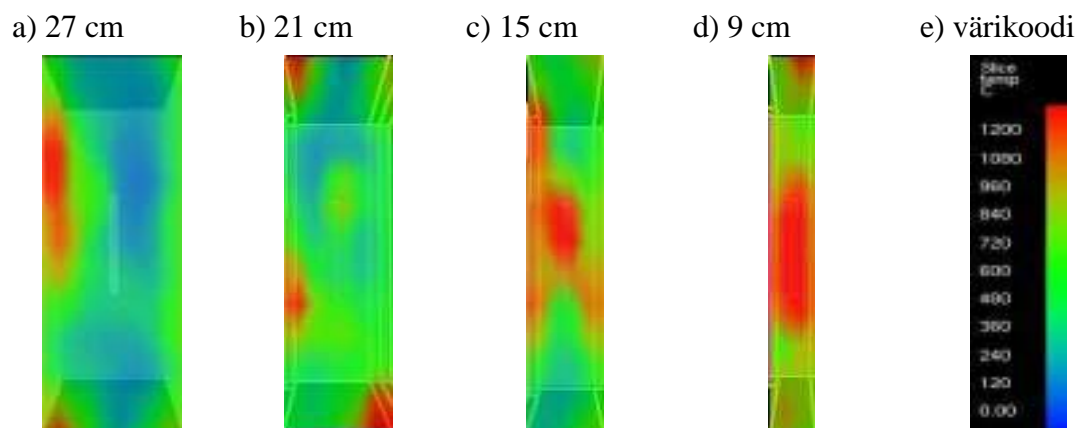


Kuva 68. Asetelma, jossa tutkittiin pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutusta tilassa kehittyvään paloon: kaksi lähekkäin olevaa palavaa seinää sytytetään niiden keskellä olevalla lämmönlähteellä (teho 23 kW). Systeemiin tulee ilmaa vasemman seinän alaosassa olevan aukon kautta.

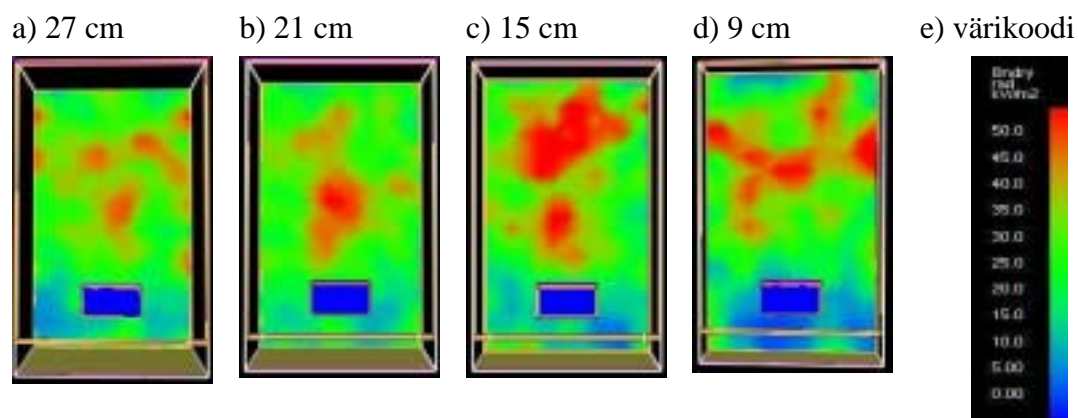
Simuloinneissa saadut tulokset tilan lämpenemisestä, seiniin kohdistuvasta säteilystä ja virtauksista on esitetty kuvissa 69, 70, 71 ja 72.

Tuloksista (kuva 70) voidaan nähdä, että säteily tilan enemmän lämpenevään reunaan (kuvan 68 vasemman puoleinen seinä) muuttuu vain vähän ontelon syvyyden pienetessä. Sama pätee myös tähän reunaan kohdistuvaa konvektiiviseen lämpövirtaan. Tämä löytö on yhdenmukainen Wangin ym. (1999) tekemän tutkimuksen tulosten kanssa: he havaitsivat, että lähekkäin oleviin palaviin seiniin kohdistuva säteily muuttui varsin vähän, kun seinien etäisyyttä pienennettiin 33 cm:stä noin 6 cm:iin (ks. liite H). Kylmempänä pysyvä oikea reuna sen sijaan lämpenee säteilyn vaikutuksesta sitä voimakkaammin, mitä kapeampi ontelo on (kuvat 69 ja 71). Tulos on sopusoinnussa myös Foleyn ja Drysdalen (1995) tulosten kanssa (ks. liite A).

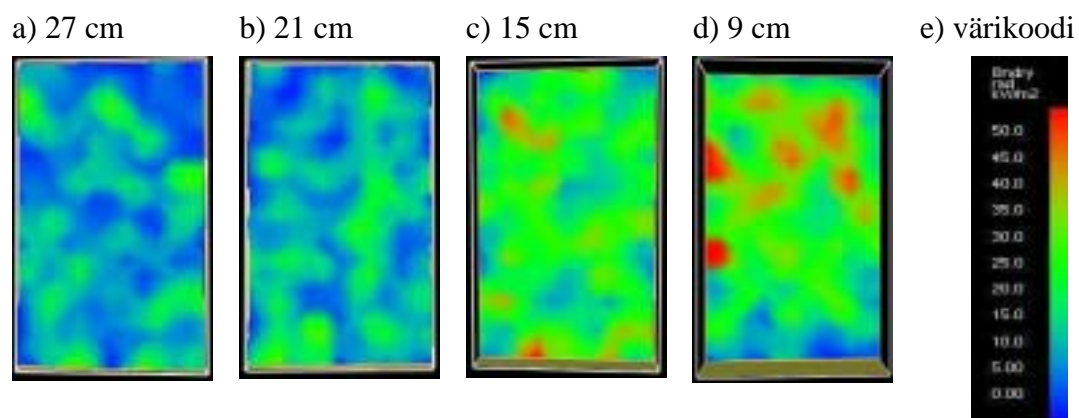
Tilan keskimääräinen lämpötila (kuva 69) ja pystysuuntainen virtausnopeus (kuva 72) kasvoivat selvästi. Virtausnopeuden kasvaminen vastaa Wangin ym. (1999) havaintoa, että virtausta ajava paine kasvaa voimakkaasti tilan syvyyden pienentyessä (ks. liite H).



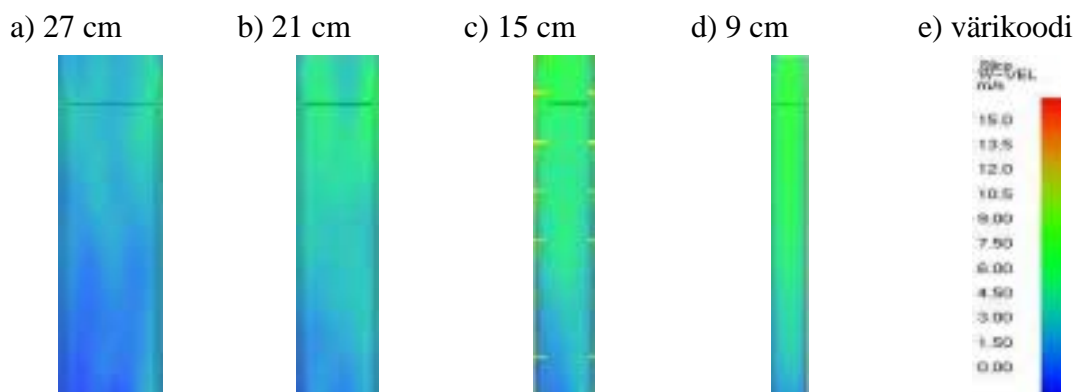
Kuva 69. Pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutus tilan lämpenemiseen: lämpötilakenttä 25 cm polttimen yläpuolella olevassa pystysuuntaa vastaan kohtisuorassa leikkaustasossa.



Kuva 70. Pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutus tilan reunoihin kohdistuvaa lämpösäteilyyn: säteilyjakauma kuvan 68 esittämän järjestelyn vasemman puoleisen seinän sisäpinnalla.



Kuva 71. Pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutus tilan reunoihin kohdistuvaa lämpösäteilyyn: säteilyjakauma kuvan 68 esittämän järjestelyn oikean puoleisen seinän sisäpinnalla.



Kuva 72. Pystysuuntaisen ontelotilan syvyyden vaikutus tilan virtauksiin: pystysuuntainen nopeuskenttä tilan keskeltä halkaisevassa y-suuntaa vastaan kohtisuorassa leikkaustasossa.

Merkittävää yllä olevissa tuloksissa on se, että 27 cm ja 21 cm syville onteloille saadut etenkin tilan lämpenemistä koskevat tulokset ovat varsin samanlaiset ja toisaalta myös 9 cm:n ja 15 cm:n suuruisilla ontelon syvyyksillä saadut tulokset ovat keskenään varsin samanlaiset. Tarkastellut kaksi kapeampaa ja kaksi leveämpää onteloa siis poikkeavat toisistaan, mikä voidaan tulkita siten, että ontelon tulee olla varsin kapea sytytyslähteen ja seinille etenevien liekkien vaakasuoraan dimensioon verrattuna, jotta ontelon paloa voimistava vaikutus tulisi merkittäväksi.

Tekemällä suurehko joukko edellä esitetyn kaltaisia tarkasteluja voitaisiin virtaustekniikan skaalauslakeja ja dimensioanalyysiä hyväksi käyttäen saattaa mainittu semikvantitatiivinen havainto kvantitatiiviseksi riippuvuusrelaatioksi. Tämän työn ja sen jatkotöiden kannalta tämä ei ole tarpeen, koska jokainen erillistapaus voidaan tarvittaessa käsitellä varsin vaivattomasti erikseen omana simulointitapauksenaan.

4.5 Mallinnustutkimus liittyen julkisivun palokokeisiin: tuuletusraon ja sen materiaalien palavuuden vaikutuksesta

Tässä luvussa tarkastellaan mallinnuksen keinoin luvussa 3.3.1 esitettyjä pienennetyn mittakaavan julkisivupalokokeita. Tarkasteltavina ovat seuraavat kysymykset:

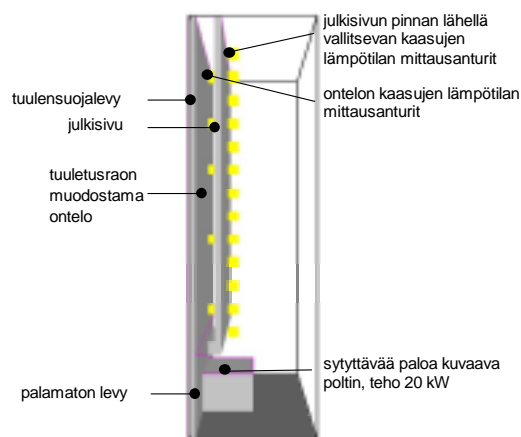
- Miten olisi kokeissa käynyt, jos tuuletusraon alaosassa ollut puu olisi palanut puhki ja siten päästänyt liekit leviämään tuuletusrakoon?
- Mikä on tuulensuojalevyn palavuuden vaikutus tässä tapauksessa?

Tarkastelun lähtökohtana oli julkisivukoe 4 (ks. luku 3.3.1.2), jossa huokoisen kuitulevyn ja vanerijulkisivun välisen tuuletusraon syvyys oli 50 mm. Systemin FDS-mallinnuksen asetelma on esitetty kuvassa 73.

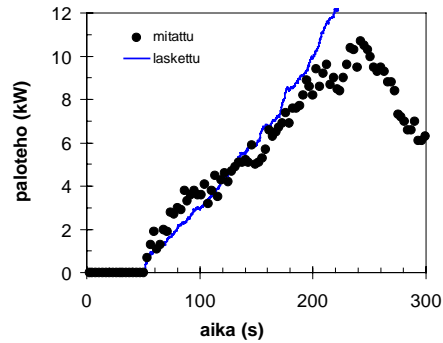
Kuvassa 74 on esitetty tulos FDS-mallin säätämisestä vastaamaan kokeessa 4 mitattua palotehoa. Kokeiden ja mallin yhteensopivuuden löytäminen edellytti, että vanerilevyn yksikköpinta-alaa kohti luovuttamalle paloteholle käytettiin varsin alhaista arvoa, 60 kW/m^2 . Tämä johtuu siitä, että julkisivun palaminen on varsin voimakkaasti hapen saannin rajoittamaa sen alla olevan polttimen takia, ja siksi julkisivun palaminen on epätäydellistä. FDS1-mallissa hapen saannin rajoituksen vaikutusta palamiseen voidaan jossain määrin ottaa huomioon juuri käyttämällä alhaista yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon arvoa.

Kuvassa 75a esitetyn laskelman mukaan siinä tapauksessa, että kokeessa 4 liekit olisivat päässeet tunkeutumaan koko julkisivun leveydeltä tuuletusrakoon, paloteho olisi kasvanut noin 5–6-kertaisella nopeudella verrattuna tehdyssä kokeessa toteutuneeseen tapaukseen, jossa liekit eivät tuuletusrakoon tunkeutuneet. Tässä simuloinnissa on tuulensuojalevyn palotehoksi per yksikköpinta-ala oletettu sama kuin julkisivulle, eli 60 kW/m^2 . Kuvassa 75b on esitetty tarkastelu siitä, miten tilanne olisi muuttunut, jos tuulensuojalevylle olisi käytetty tästä oletetusta arvosta poikkeavaa palotehon arvoa per yksikköpinta-ala: nähdään, että varsin laajalla alueella (30 kW/m^2 – 150 kW/m^2) palotehon kasvunopeus pysyy oleellisesti lähes samana, 11–16 kW/min (ks. kuva 76).

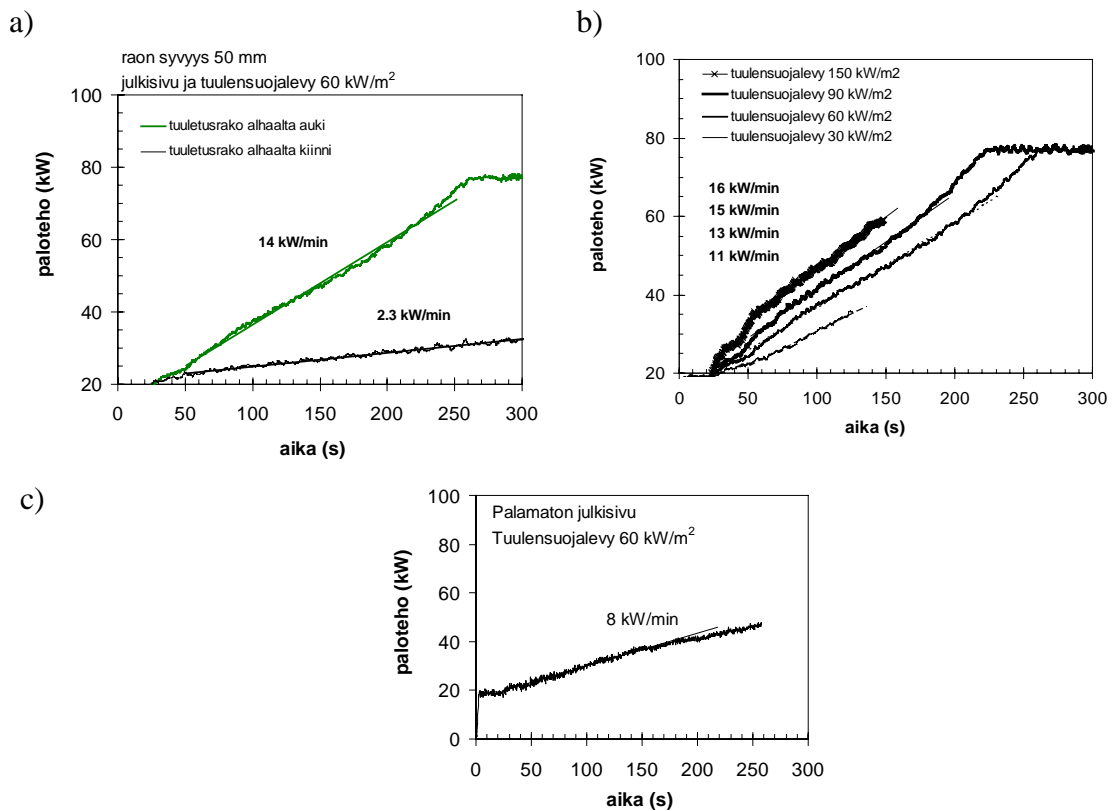
Tuuletusraon merkitys käy hyvin ilmi kuvassa 75c esitetystä tapauksesta, jossa julkisivu on palamaton.



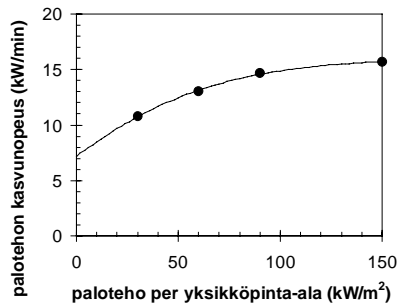
Kuva 73. Julkisivukokeiden mallinnuksen asetelma (korkeus 150 cm ja leveys 60 cm). Julkisivu ja tuulensuojalevy alkavat 30 cm:n korkeudelta, alaosa on palamatonta levyä. Tulipalon sytyttävää paloa kuvataan polttimella, joka luovuttaa 20 kW suuruisen palotehon.



Kuva 74. Mallin kalibroiminen vastaamaan julkisivukokeessa 4 mitattua palotehoa (ks. taulukko 5) säätämällä julkisivumateriaalin lämmöntuottoa: laskettu käyrä vastaa arvoa 60 kW/m^2 .



Kuva 75. a) Laskennallinen arvio tuuletusraon alhaalta sulkevan vaakariman puhkipalamisen vaikutuksesta: tilanne "rako kiinni" vastaa sitä, että vaakarima estää liekkien leviämisen tuuletusrakoon ja "rako auki" vastaa tilannetta, jossa vaakarima on palanut puhki koko leveydeltään ja liekit pääsevät tunkeutumaan tuulestusraon onteloon. b) Herkkyystarkastelu tuulensuojalevyn palavuuden vaikutuksesta. Julkisivumateriaalin lämmöntuottona käytettiin mallin kalibroinnin tuloksena saatua arvoa 60 kW/m^2 . c) Palon kehittyminen, kun julkisivu on palamaton. Tuuletusrakontelon syvyys on kokeen 4 mukainen eli 50 mm.



Kuva 76. Tuulensuojalevyn materiaalin palavuuden vaikutus kuvassa 68 esitetyn julkisivusysteemin mallin lämmöntuoton kasvunopeuteen. Julkisivumateriaalin lämmöntuotto 60 kW/m².

4.6 Kaksoislasijulkisivujen palojen mallinnustutkimus

4.6.1 Tausta

Kaksoislasijulkisivujen ontelopalojen tutkimustavaksi valittiin mallintaminen. Tärkeimmät syyt tähän ovat seuraavat:

- Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa tehdyssä tapahtuneiden ontelopalojen kartoituksessa ei tullut esille yhtään kaksoislasijulkisivujen onteloissa tapahtunutta tulipaloa.
- Kaksoislasijulkisivujen kokeellinen tutkimus katsottiin liikaa resursseja vieväksi ja myös ennen aikaiseksi siinä mielessä, että tämänhetkisen tiedon pohjalta on vaikea identifioida niitä paloskenaarioita ja paloturvallisuusongelmia, joihin kokeiden järjestelyissä tulisi kohdistaa pääpaino.

Kaksoislasijulkisivujen mallinnuksen tavoite tässä työssä onkin juuri niihin liittyvien oleellisimpien paloturvallisuusongelmien identifiointi.

Tässä työssä tarkastellut kaksoislasijulkisivujen tapahtumat ovat:

- savun leviäminen ontelossa
- ontelotilan kuumeneminen (kaasu/reunat).

Simulointitulokset antavat yksityiskohtaisen ja havainnollisen kuvauksen ontelopalon kehittymisestä tarkastelun kohteeksi valitun kaltaisessa ontelotilassa. Tulosten kattavuutta ja yleisyyttä on arvioitu sekä kvalitatiivisesti että kvantitatiivisesti. Saatujen tulosten perusteella on esitetty arvioita siitä, mitkä ovat oleellimmat kaksoislasijulkisivupaloon vaikuttavat tekijät sekä siitä, milloin nämä tekijät muodostavat eri paloturvallisuuden osatekijöiden kannalta kriittisiä kombinaatioita.

4.6.2 Mallintamisen yksityiskohtia

Tässä luvussa esitetty mallintaminen tehtiin käyttämällä Fire Dynamics Simulator -ohjelmiston uudempaa versiota, FDS 2. Syynä oli mm. se, että tämä malli antaa tulosteena savuntiheyden savun optisena vaimennuskertoimena κ_D (yksikkö 1/m), joka kuvaa valon vaimentumista, kun se kulkee kaasun läpi. Optinen vaimennuskerroin on tulkittavissa näkyvyytenä savun läpi S metreissä: näkyvyys on kääntäen verrannollinen optiseen vaimennustekijään (Mulholland 1995). Esimerkiksi valoa heijastavien kohteiden näkyvyys savussa on likimain $S = 1,3/\kappa_D$, joten esimerkiksi optisen vaimennustekijän arvo 1 m^{-1} vastaa 1,3 m näkyvyyttä savun läpi.

Ontelon kuumentumista tarkastellaan ontelotilan kaasun ja ontelon reunojen lämpötilojen sekä lasihin kohdistuvan lämpösäteilyn voimakkuuden avulla.

4.6.3 Paloskenaariot ja niiden kuvaus

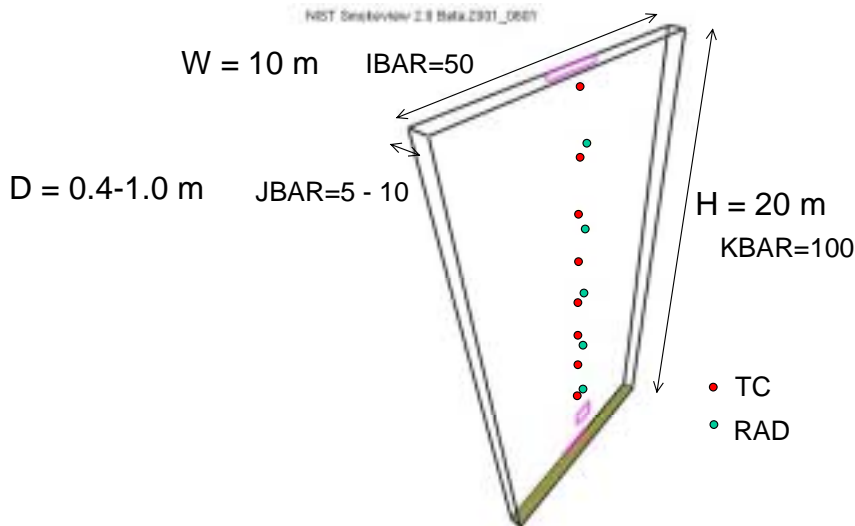
Kaksoislasijulkisivun ontelon tulipalon tärkeimpänä uhkakuvana voidaan pitää lieskahtanutta huoneistopaloa, joka rikkoo onteloon johtavan ikkunan. Uhkakuvan perusoletusta, lasin särkymistä kuumuuden vaikutuksesta, tutkittiin kokeellisesti (ks. liite F). Ontelon ei oleteta sisältävän palavia materiaaleja, joten tutkitut palovaarat liittyvät savun ja kuumuuden leviämiseen ontelotilassa sekä niiden aiheuttamiin uhkiin.

Tutkittujen paloskenaarioiden yksityiskohdat ovat kahdelle työssä tarkastellulle tapaukselle, joissa tarkasteltiin erikseen savun leviämistä ja ontelon kuumentumista.

4.6.3.1 Savun leviämisen tarkastelun paloskenaario

Savun leviämisen tarkastelussa paloskenaarioksi valittiin 2 MW:n palo onteloon johtavasta ikkunasta, jonka pinta-ala oli 1 m^2 . Valittu paloteho vastaa suunnilleen sitä osaa lieskahtaneen huoneistopalon palotehosta, joka vapautuu huoneeseen johtavan tuuletusaukon ulkopuolella. Laskenta-ajan säästämiseksi itse palohuonetta ei

mallinnettu, vaan ikkunaa edusti laskuissa kaasupoltin. Tämän valinnan seurauksena liekki asetui hyvin lähelle sisemmän julkisivun pintaa, kun taas todellisessa tilanteessa palokaasuilla on vaakasuuntainen nopeuskomponentti tullessaan ikkunasta ulos. Savun leviämisen tutkimiselle tällä ei arvioitu olevan merkitystä. Ikkunan paikan vaikutusta tutkittiin korkeuden funktiona (ylhällä, keskellä ja alhaalla).



Kuva 77. Savun leviämisen mallintamisessa tarkasteltu kaksoislasijulkisivu. Sen korkeudeksi on oletettu $H = 20$ m, leveydeksi $W = 10$ m ja syvyydeksi $D = 0,4-1,0$ m. Suureet IBAR, JBAR ja KBAR ovat laskennassa käytetyn hilan ulottuvuudet, TC tarkoittaa julkisivun ilmatilassa olevaa lämpötilan mittausta ja RAD julkisivun pinnassa olevaa säteilyvuomittausta. Vaaleanpunaisella kehystetyt aukot ontelon ylä- ja alareunassa ovat tuuletusaukkoja, ja julkisivussa oleva aukko edustaa palohuoneeseen johtavaa (rikkoutunutta) ikkunaa.

Tutkittavaksi onteloksi valittiin kaksoislasijulkisivu, jonka leveys on 10 m ja korkeus 20 m (ks. kuva 77). Ontelon syvyyttä vaihdeltiin 0,4 m–1,0 m. Ontelotilan reunojen oletettiin olevan 10 mm paksua lasia, jonka lämmönjohtavuudelle κ_l ja lämpötilanjohtavuudelle α_l käytettiin lasille tyypillisiä arvoja $0,8 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ ja $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Mallinnuksessa tutkittiin ontelon ylä- ja alaosassa olevien tuuletusaukkojen vaikutusta, pyrkien löytämään riippuvuus tuuletusaukkojen pinta-alojen sekä savun leviämisen välille. Simuloinnissa käytetyt eri tekijöiden variaatiot on esitetty taulukossa 12.

Savun leviämistä tutkittaessa ei mallissa otettu huomioon kaksoislasijulkisivuissa yleensä olevia huolto- yms. tarkoituksiin käytettyjä tasoja. Syy tähän on se, että nämä tasot ovat tavallisesti metalliritilöitä, joissa aukkojen pinta-alan suhde koko pinta-alaan on merkittävä, selvästi yli 50 %. Tanskalaisen tutkimuksen (Avlund 1994) mukaan näin suuren aukkopinta-alan omaava elin ei juurikaan vaikuta savun leviämiseen.

Taulukko 12. Savun leviämisen tutkimiseksi suoritettut laskut ja niissä muutellut parametrit. Oikeanpuoleisin sarake ilmaisee laskennan tuloksena saadun savupatjan alareunan korkeuden.

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

4.6.3.2 Ontelon lämpenemisen tarkastelun paloskenaario

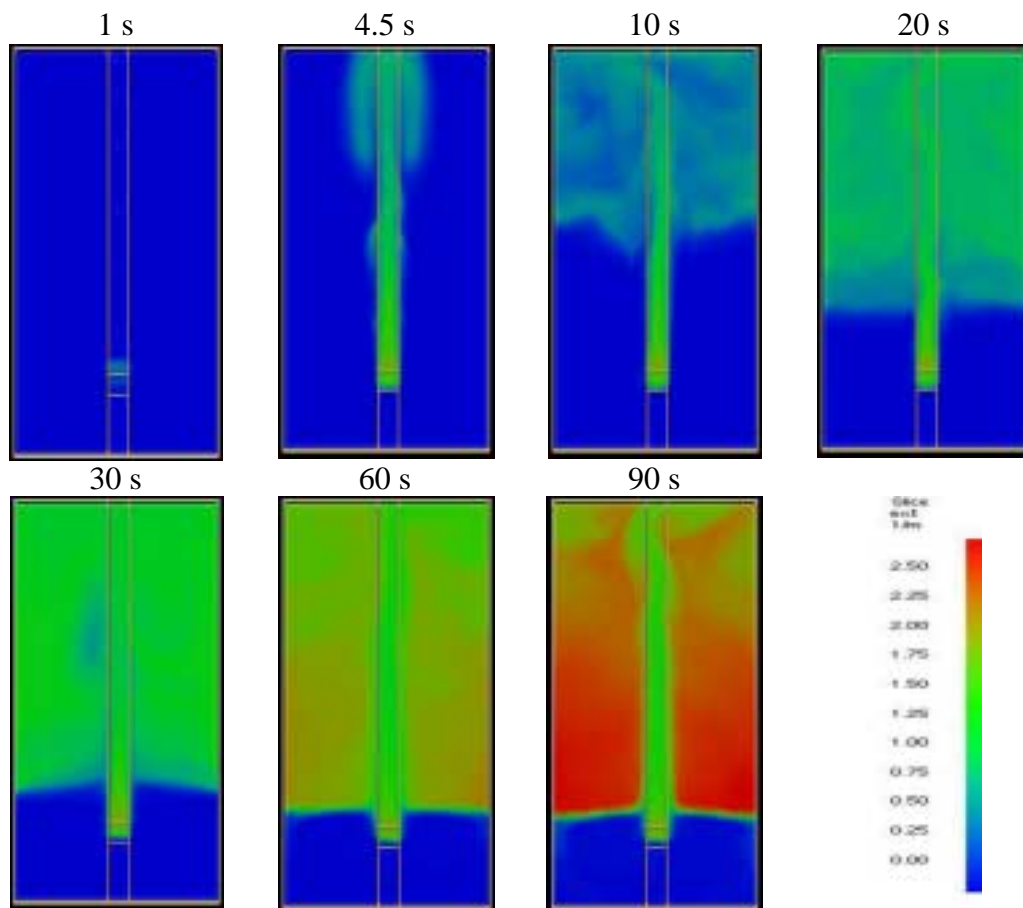
Ontelon reunojen lämpenemisen laskennassa käytettiin pienempiä laskentakoppeja (noin 3 cm jakoväli) kuin savun leviämistä tarkastelevissa laskuissa, jotta reunoihin siirtyvän lämpövirran tiheys saatiin laskettua tarkasti. Tämä oli tarpeen etenkin liekkien ja niiden kohdalla olevien reunojen välisen lämmönsiirron kuvaamisen parantamiseksi, ei niinkään liekkien ulkopuolisella alueella. Jotta laskennan vaatima aika saatiin pysymään järkevissä rajoissa (suuruusluokkaa parikymmentä tuntia), laskentahilan koppien pienentämisen aiheuttamaa laskenta-ajan kasvua kompensoitiin pienentämällä tarkastellussa julkisivun korkeus- ja leveyssuuntaista ulottuvuutta verrattuna savun leviämisen laskennassa käytettyyn tapaukseen. Syvyys pidettiin ennallaan.

Ontelon lämpenemisen laskut suoritettiin leveydeltään 1,2 m ja korkeudeltaan 6 m ontelossa, jonka syvyys vaihteli 0,4–1 m. Palon mallinnuksessa annettiin nyt ikkunasta tuleville kaasuille vaakasuuntainen nopeus 1 m/s, jonka ansiosta vapaasti palava liekki ulottui noin 60 cm ikkunan ulkopuolelle vastaten likimain todellista tilannetta. Ontelon seinien termiset ominaisuudet valittiin vastaamaan paksuudeltaan 6 mm ikkunalasia. Palotehona tässä skenaariossa käytettiin 2,5 MW:a.

4.6.4 Kaksoislasijulkisivun ontelopalojen mallinnuksen tulokset

4.6.4.1 Savun leviäminen

Lasketut savukerroksen alareunan korkeudet eri tapauksissa on esitetty taulukossa 12. Alla tarkastellaan tuloksien eri aspekteja hieman tarkemmin.



Kuva 78. Esimerkki savupatjan muodostumisesta kaksoislasijulkisivun palossa: laskenta-ajossa 3 (ikkunan korkeus 3,5 m) tapahtuva savukerroksen kehittyminen (ajat ilmaistu kuvien päällä; oikealla alhaalla oleva värikoodi ilmaisee savun optisen tiheyden arvon). Savunpoisto ei ole riittävän tehokas pitääkseen tilan savuttomana ja savukerros tasaantuu lopulta hieman ikkunan yläpuolelle.

Savukerroksen muodostuminen

Kuvassa 78 esitetty kuvasarja havainnollistaa savupatjan muodostumisen nopeutta tarkastellun paloskenaarion mukaisessa tulipalotapauksessa. Tässä tapauksessa (tapaus 3 taulukossa 12) savunpoisto ei ole riittävän tehokas pitääkseen tilan savuttomana, ja tila täyttyy savulla.

Täyttymistapahtuma on varsin nopea, kuten kuvasarja osoittaa. Nouseva savupatsas saavuttaa ontelon katon noin 4,5 s sen jälkeen. Kun palo pääsee ryöstäytymään ontelotilaan. Nousunopeus on siis noin 4 m/s. Katon saavutettuaan savu kiertyy reunoja myöten alas. Yhtenäinen savupatja muodostuu noin hetkellä 20 s. Puoli minuuttia palon pääsemisestä ontelotilaan savukerros on saavuttanut lähes lopullisen korkeutensa (alareuna hieman ikkunan yläpuolella). Tämän jälkeen savu paksunee siten, että tila on suurelta osin läpinäkymätön noin 1 minuutin kohdalla (keskimääräinen näkyvyys pienempi kuin ontelon syvyys). Tämän jälkeen savun tiheys lisääntyy vähitellen edelleen. Ikkunan alapuoleinen tila säilyy kuitenkin täysin kirkkaana.

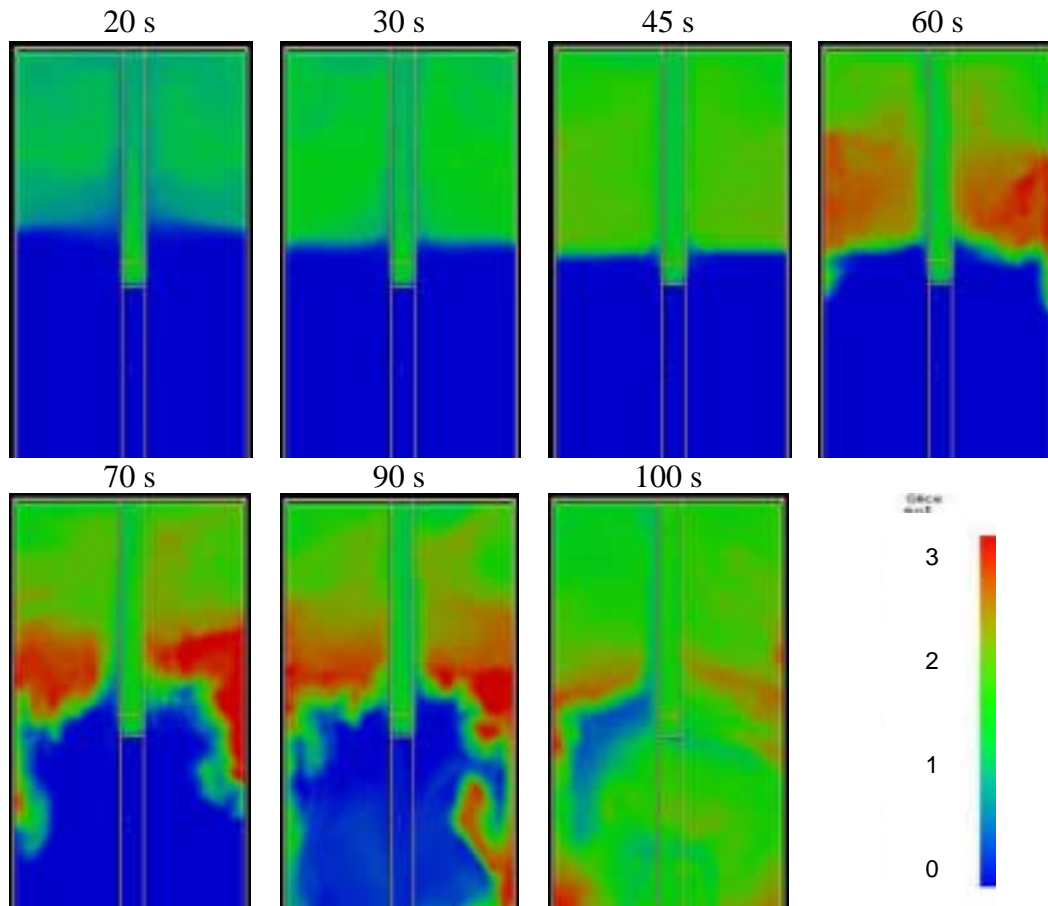
Savun kulkeutuminen ”alaspäin”

Taulukon 12 ajossa 6, jossa palohuoneen ikkuna oli 10 m tasolla, huomataan erikoinen piirre: vaikka ontelon yläreunassa on samanlainen savunpoistoaukko kuin edellä tarkastelussa tilanteessa, täyttyy ontelo kokonaan savulla. Tämän tilanteen kehittyminen on esitetty kuvassa 79.

Noin 45 s:iin asti tilanne kehittyy samaan tapaan kuin kuvan 78 esittämässä tapauksessa: savukerroksen alareuna näyttää tasaantuvan hieman ikkunan yläpuolelle. Tämä tilanne ei kuitenkaan ole stabiili, vaan savua alkaa vähitellen siirtyä alaspäin ontelon reunoilla (ks. 60 s:n hetki). Alettuaan tämä savun valuminen jatkuu kohtalaisen nopeasti siten, että jo 120 s:n kohdalla ontelo on käytännöllisesti katsoen täyttynyt kokonaan savulla.

Tarkastelemalla ontelon kaasun lämpötiloja havaitaan, että ilmiö johtuu kaasujen kylmenemisestä ontelon reunalla, jolloin ne painavampina lähtevät valumaan alaspäin. Ilmiö näyttää olevan herkkä palohuoneen korkeudelle: myös kun ikkunan korkeus oli 16,5 m, niin savukerros laskeutui ikkunan alapuolella, mutta vain vähän jääden tasolle 16 m, eli koko ontelo ei täyttynyt savulla.

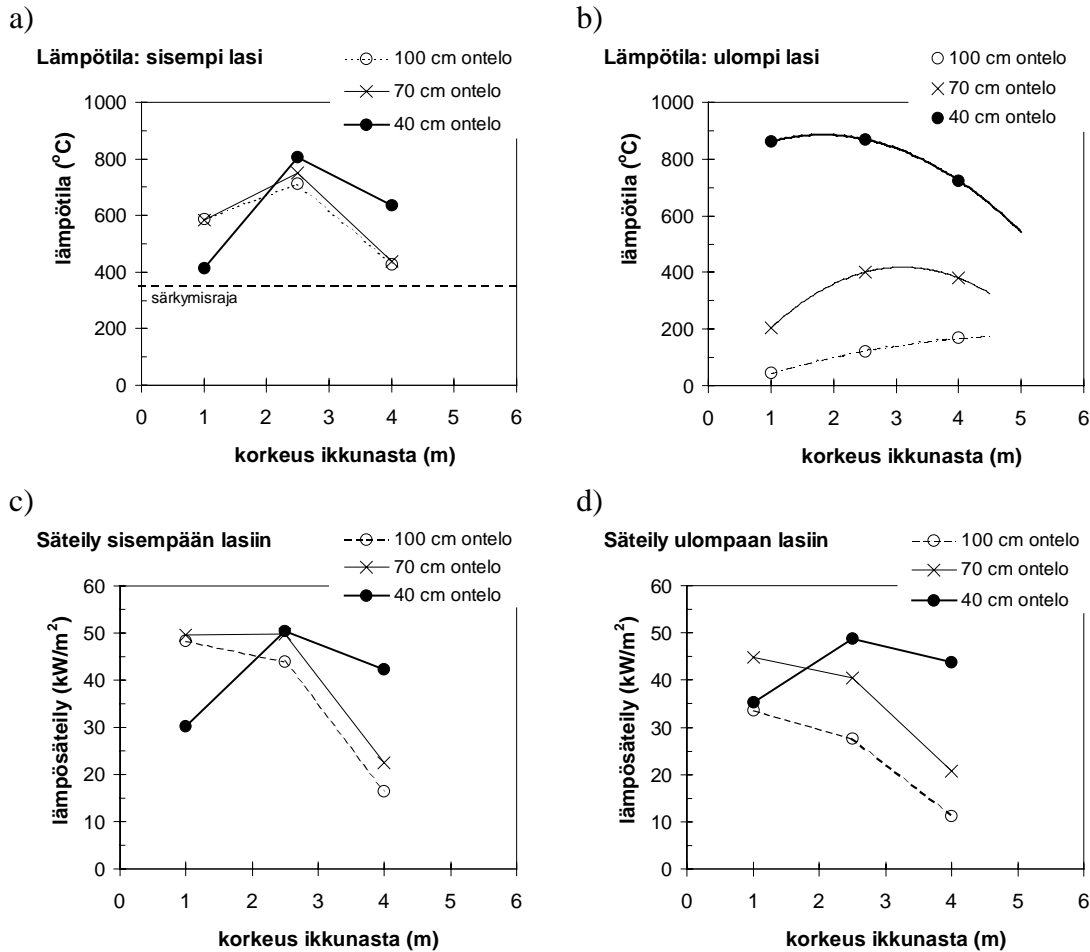
Edellä kuvattu ilmiö muistuttaa Lahdessa tapahtuneen kerrostalopalon tilannetta, jossa yksi ongelmista oli rappukäytävän täytyminen kokonaan savulla, vaikka palohuoneisto ei ollutkaan talon alakerroksissa.



Kuva 79. Esimerkki savupatjan muodostumisesta kaksoislasijulkisivun palossa: laskenta-ajossa 6 (ikkunan korkeus 10 m) tapahtuva savukerroksen kehittyminen (ajat ilmaistu kuvien päällä; oikealla alhaalla oleva värikoodi ilmaisee savun optisen arvon). Savupatja laskeutuu palohuoneen tason alapuolelle täyttäen lopulta koko ontelon.

4.6.4.2 Tilan lämpeneminen

Kuvassa 80 on esitetty, miten ontelon lasipintojen lämpötilat ja niihin kohdistuva lämpösäteily muuttuu palohuoneen ikkunasta mitatun korkeuden funktiona kolmelle eri syvyyiselle ontelolle: 100 cm, 70 cm ja 40 cm.

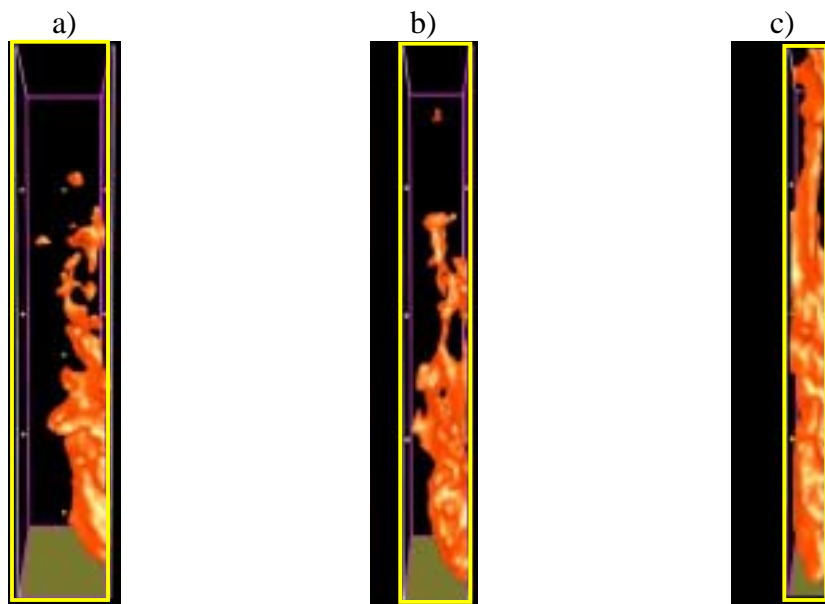


Kuva 80. Onteloa reunustavien lasien lämpötilat ja niihin kohdistuvat lämpösäteilyvirran tiheydet palohuoneen ikkunasta mitatun korkeuden funktiona: a) lämpötila sisempi lasi, b) lämpötila ulompi lasi, c) säteily sisempään lasiin ja d) säteily ulompaan lasiin.

Lämpötilatiedoista nähdään, että sisempään lasiin kohdistuvat maksimilämpötilat ovat 70 cm ja 100 cm syville onteloille likimain samat, noin 700–750 °C ja hieman korkeampi 40 cm syvälle ontelolle, hieman yli 800 °C. Ulomman lasin lämpötilat sen sijaan kasvavat jyrkästi ontelon syvyyden pienentyessä: kun maksimilämpötila 100 cm:n syvyiselle ontelolle on selvästi alle 200 °C, niin 40 cm syvässä ontelon ulompi lasi lämpenee lähes 900 °C:n lämpötilaan.

Myös lämpösäteilytasot, jotka kohdistuvat lasiin ovat korkeita. Etenkin 40 cm syvässä ontelossa säteily on voimakasta vielä usean metrin päässä palotilan aukosta. Tarkastelemalla kuvaa 81, jossa on näytetty onteloon työntyvät liekit ontelon eri syvyyksillä, havaitaan, että 40 cm syvässä ontelossa liekit nuolevat ulompaa lasia, jolloin siihen kohdistuu myös voimakas konvektiivinen lämpövirran tiheys.

Yllämainitut lasien lämpötilat ja niihin kohdistuvat säteilytasot vastaavat myös rakenteisiin kohdistuvia lämpörasituksia.



Kuva 81. Liekkien työntyminen onteloon, kun ontelon syvyys on b) 100 cm, c) 70 cm ja d) 40 cm. Paloteho kaikissa tapauksissa 2,5 MW.

4.6.5 Johtopäätökset kaksoislasijulkisivututkimuksesta

Lieskahtaneen huonepalon päästessä murtautumaan sisemmän lasinseinän läpi suurikin kaksoislasijulkisivun ontelotila voi täytyä nopeasti savulla. Tässä työssä tutkitussa 20 m korkean julkisivun tapauksessa täyttymisaika oli 1 minuutin suuruusluokkaa. Mallinnustulokset toivat esille mielenkiintoisen ja paloturvallisuuden kannalta tärkeän ilmiön, savukerroksen laskeutumisen palohuoneen ikkunan alapuolelle aina tilan pohjalle asti.

Kaksoislasijulkisivun lämpenemisen tutkimus paljasti, että julkisivun ontelon syvyys on paloturvallisuuden kannalta kriittinen tekijä. Jos ontelo on liian kapea, niin myös ulompi lasi ja siihen liittyvät rakenteet joutuvat alttiiksi hyvin voimakkaalle lämpörasitukselle, mikä voi johtaa lasin särkymiseen tai rakenteiden pettämiseen tai molempiin. Tällöin alhaalla olevat henkilöt, esim. pelastushenkilökunta, voivat joutua vaaraan.

Tulosten valossa näyttääkin ilmeiseltä, että rakennusmääräyksiin olisi saatava vaatimuksia kaksoislasijulkisivujen ontelon syvyydestä. Edellä esitetyn perusteella 70 cm:n syvyys voisi olla riittävä, mutta asian varmistamiseksi olisi syytä tehdä hyvin kontrolloituja suuren mittakaavan kokeita. Myös julkisivun rakenteiden palonkestävyydestä tulee huolehtia: esim. edellä esitetty 40 cm syvässä ontelossa vallitsevat

lähes 900 °C:n lämpötilat ovat hyvin korkeita esim. alumiinirakenteiden samoin kuin palosuojaamattomien teräsrakenteiden palonkeston suhteen. Myös julkisivun liitosrakenteiden palonkestosta tulee huolehtia (Vuolio 2001).

5. Yhteenveto ja päätelmät

Rakennusten ontelotilat muodostavat merkittävän tulipalouhan, koska niissä palot pääsevät usein alkamaan ja kehittymään kenenkään havaitsematta ja lopulta kasvettuaan riittävän suuriksi, ne voivat kehittyä hyvin voimakkaasti ja levitä hyvin nopeasti. Tässä työssä on tunnistettu ontelotilojen palojen ominaispiirteet ja luotu perusteet ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiseen tähtäävälle työlle koskien sekä tilojen osastointia ja liekkien mahdollisten etenemisreittien katkomista että ontelopalojen sammuttamista. Kaksi viimeksi mainittua tehtävää toteutetaan tämän työn jatkohankkeissa.

Tutkimuksen sisältö, laitteet ja menetelmät

Kokeellisesti ja mallinnuksen keinoin tutkittiin, miten ontelotilojen eri ominaisuudet, kuten koko, palavan aineen määrä ja laatu, tilaa reunustavat rakenteet ja tilassa kulkevat virtaukset, vaikuttavat tulipalon kehittymiseen ja etenemiseen ontelotiloissa. Tutkitut tapaukset liittyvät pääasiassa seuraaviin ontelotilojen tyyppitapauksiin: yläpohjan ontelot, alaslasketun katon ja nostetun lattian muodostamat ontelotilat (asennusontelot), julkisivujen ja seinärakenteiden ontelot sekä kaksoislasijulkisivujen ontelotilat. Tuloksia voidaan soveltaa myös muiden rakennuksissa esiintyvien ontelotilojen palotapausten tarkasteluun, kuten rakennuksen kanavistojen tai esim. teollisuusrakennuksien ylipaineattojen paloihin. Välipohjan yläpuolisten ontelotilojen ja asennusonteloiden tulipaloja tutkittiin sekä kokeellisesti että mallintamalla. Rakennusten pystysuuntaisten ontelotilojen osalta tutkittiin ontelon suunnan ja syvyyden vaikutusta paloa voimistavina tekijöinä. Julkisivujen ja seinärakenteiden ontelopaloja tutkittiin kokeellisesti sekä keräämällä yhteen VTT:n aiemmissa tutkimuksissa saamia koetuloksia. Julkisivukokeisiin liittyen tehtiin julkisivupalon simulointitutkimusta. Kaksoislasijulkisivujen tutkimuksessa selvitettiin mallinnuksella varsinaisen julkisivun ja ulomman lasivaipan muodostamaan ontelotilaan liittyviä palovaaroja.

Kokeissa käytettiin kolmea erilaista koelaitteistoa, joista kaksi oli vaakasuuntaisia ja yksi pystysuuntainen (julkisivukoelaitte). Vaakasuuntaisilla laitteilla tutkittiin välipohjan yläpuolisten ontelotilojen ja asennusonteloiden tulipaloja ja pystysuuntaisella laitteella julkisivun ontelopaloja. Vaakasuuntaiset koejärjestelyt poikkesivat suuruudeltaan, toinen oli 6 metriä pitkä suuren mittakaavan koelaitte ja toinen tätä laitetta vastaava 1:6-mittakaavaan tehty pienoismalli. Palokuormana kokeissa oli puuverhous ja muovivaippainen kaapeli. Molempien palokuormien osalta tutkittiin myös materiaalin palosuojauksen vaikutusta. Suuren mittakaavan kokeissa savut johdettiin pois erillisellä hormilla, mikä sai aikaan pakotetun virtauksen ontelotilaan. Pienen mittakaavan kokeissa hormia ei käytetty. Siten koelaitteet poikkesivat kokonsa lisäksi myös palon saaman hapen osalta: suuren mittakaavan kokeissa palaminen sai happea paremmin kuin pienen mittakaavan kokeissa.

Mallinnustutkimuksissa tarkasteltiin ontelopalojen kehittymistä ja etenemistä käyttäen pääasiallisesti Fire Dynamics Simulator (FDS) -tulipalon simulointiohjelmaa, joka laskee annetuista tilannetta ja syttymislähdettä kuvaavista syöttötiedoista lähtien, miten palo kehittyy. Mallin käyttökelpoisuus validoitiin vertaamalla sillä laskettuja tuloksia ontelopalokokeissa saatuihin tuloksiin. Ohjelmalla tutkittiin mm. seuraavien tekijöiden vaikutusta ontelopalojen kehittymiseen ja etenemiseen: ontelossa olevan palavan aineen palo-ominaisuudet; ontelon koko; ontelotilassa kulkevat virtaukset ja ontelon reunojen lämpötekniset ominaisuudet. Mallinnuksessa tarkasteltiin erikseen vaakasuuntaisia ja pystysuuntaisia ontelotiloja. Vaakasuuntaisten ontelotilojen palojen tarkastelussa eroteltiin kaksi palokuorman sijainnilta erilaista tapausta: ensimmäinen, jossa palokuorma sijaitsee ontelon keskivaiheilla ilman välitöntä kontaktia ontelon reunoihin ja toinen, jossa palokuorma sijaitsee tilan verhoiluna. Käytännössä ontelopalotapaukset käsittävät usein myös näiden tapausten moninaisia yhdistelmiä. Näiden tapausten palon kasvua ja leviämistä voidaan arvioida mainittuja tapauksia sopivasti yhdistellen.

Kaksoislasijulkisivujen mallinnustutkimuksen aiheena oli sisemmän ja ulomman lasiseinän muodostaman ontelotilan täyttyminen savulla sekä tilan ja sen reunojen lämpeneminen. Uhkakuvana simuloinneissa oli huoneistopalon kehittyminen lieskahdukseen ja lieskahtaneen palon liekkien tunkeutuminen ontelotilaan palotilan ikkunan särkyessä. Skenaariota tutkittiin ikkunan särkymiseen osalta myös kokeellisesti.

Tulokset

Vaakasuoran ontelotilan palon kehittymisen yleispiirteet

Vaakasuuntaisilla ontelokoelaitteilla tehtyjen kokeiden perusteella havaittiin, että tällaisessa tilassa ontelopalo kehittyy palokuorman syttymisen jälkeen tyypillisesti siten, että alun hitaamman kasvun jälkeen palo alkaa vähitellen kiihtyä ja saavuttaa kiihtymisen alettua varsin nopeasti tilan, jossa palotehon ja liekkien sekä kuumien kaasujen eteneminen on hyvin nopeaa. Esim. suojaamattoman puuverhoilun kokeessa kuumuuden etenemisnopeus kuumassa kerroksessa jopa kymmenkertaisui tässä palon muutoksessa. Muutos vastaa normaalikokoisten huonetilojen tulipalojen lieskahdustapahtumaa. Siirtymä nopeasti kehittyvään paloon voi ontelon palokuorman laadusta ja määrästä sekä sen dimensioista riippuen kuitenkin tapahtua tyypillistä huonetilan lieskahdusta hitaammin, koska vaakasuuntaisen ontelotilan palossa lämpöä pääsee kulkeutumaan onteloa pitkin pois tulesta olevista paikoista. Ontelotilassa voidaankin sanoa tapahtuvan dynaamisen lieskahduksen, jossa tilan lieskahduttamiseen vaadittavat olosuhteet etenevät pitkin tilaa.

Tässä julkaisussa on onteloa pitkin voimakkaasti etenevää paloa kutsuttu kriittiseksi paloksi ja aikaa, joka kuluu palokuorman syttymisestä tällaiseen palamistapaan

siirtymiseen, kriittiseksi ajaksi. Nimitys ”kriittinen” on kuvaava, sillä jos paloa ei saada taltutetuksi ennen tätä vaihetta, sen hallintaan saaminen on hyvin vaikeaa. Ontelotilojen paloturvallisuutta saadaankin parannettua, jos palon kehittyminen kriittiseen vaiheeseen saadaan estettyä kokonaan tai sitä saadaan hidastettua niin paljon, että palokunta saapalon hallintaan ennen tätä vaihetta.

Suuren mittakaavan kokeissa havaittiin kriittisen palon vaiheessa palosuojaamattomien kaapeleiden palotehon kasvunopeuden olevan suuruusluokkaa 1000 kW/min palokuorman määrän mukaan. Suojaamattomalla puulla kasvunopeus oli hiukan suurempi, noin 1200 kW/min. Jos palon kasvua tässä vaiheessa kuvataan t^2 -mallilla, kaapelikokeiden palonkasvu vastaa suunnilleen nopeasti kasvavaa paloa ($t_g = 150$ s) ja suojaamattoman puun kokeen palonkasvua voidaan luonnehtia erittäin nopeaksi ($t_g = 75$ s). Kuumuus eteni kuumassa kerroksessa varsin suurella nopeudella, useita metrejä minuutissa. Kaapelikokeissa suurin havaittu nopeus oli 3,6 m/min, kun palokuormana oli 10 kaapelia ja 6 kaapelin palokuormalla kuumuus eteni noin 1,5–2,5 m/min. Suojaamattoman puulla verhoillun ontelon kokeessa kuumen kerroksen lämpötilarintama eteni vähän aikaa lähes nopeudella 8 m/min. Kaapelikokeissa liekkirintaman eteneminen palokuorman pinnalla oli suunnilleen yhtä nopeaa kuin kuumuuden eteneminen kuumassa kerroksessa. Suojaamattoman puuverhoillun ontelon kokeessa liekit etenevät polttoaineen pinnalla (seinällä) selvästi kaasun etenemisnopeutta hitaammin. Kun palokuorma oli palosuojattu, palo ei edennyt kummassakaan tapauksessa.

Jos palo ei saa riittävästi happea, se ei pääse etenemään. Tällöin palo voi jatkua useita eri kehityspolkuja pitkin. Joskus palo voi sammua kokonaan ja joissain tapauksissa liekit voivat tukahtua, mutta palokuorma jatkaa palamista kyteväenä. Palo voi myös jatkua voimakkuudeltaan rajattuna liekehtivänä palona, joka etenee varsin hitaasti. Kaikissa hapen puutteen tukahduttamisissa tai voimakkaasti rajaamissa paloissa syntyy runsaasti pääosin palamattomista hiilivedyistä koostuvia kaasuja. Jos näiden kaasujen pitoisuus pääsee nousemaan riittävän korkeaksi, niin on olemassa vaara, että tilanteessa, jossa esim. palokunta avaa tilaan aukon, nämä kaasut syttyvät aiheuttaen palon räjähdysmäisen kasvun. Tällainen tapahtuma syntyy monen tekijän tapahtumaketjuna eikä sitä onneksi tapahdu kovin usein (Bengtsson 1999) verrattuna nopeasti kehittyvien ontelopalojen esiintymiseen. Toisaalta tällaisen tapahtumaketjun estäminen teknisin keinoin on hankalaa (aiheesta on tehty mm. väitöskirja (Fleischmann 1994) ja muita opinnäytetöitä, esim. Bengtsson (1999), joissa ei kuitenkaan ole löydetty reseptejä ilmiön estämiseen tai hallintaan saamiseen).

Ontelotilojen paloturvallisuuden kokonaisuutta ajatellen riittävässä hapessa tapahtuva nopea palon eteneminen on tärkeämpi vaaratekijä kuin hapen puutteen rajaama palaminen.

Vaakasuuntaisen ontelossa kulkevien virtausten vaikutus

Kokeissa ja palosimuloinneissa havaittiin, että mahdollinen ontelossa kulkeva virtaus on erittäin merkittävä palon kasvulle ja leviämislle. Ensimmäinen virtauksen vaikutuksista on se, että tässä tapauksessa palo yleensä saa riittävästi happea, jotta se voi kehittyä kriittiseksi. Toinen palon leviämistä kiihdyttävä tekijä on ilmanvirran liekkiä eteenpäin ajava vaikutus. Koska kuumat liekit ovat varsin herkkäliikkeisiä (normaaliolosuhteita selvästi pienempi tiheys ja viskositeetti), jo esim. noin 1 m/s suuruinen virtaus tyyppillisessä 1960–1970-luvulla rakennetun toimistorakennuksen alaslasketun katon ontelotilassa nopeuttaa kuumien kaasujen etenemistä virtaamattomaan tapaukseen verrattuna noin tekijällä 3–4.

Vaakasuuntaisen ontelon palokuorman määrän ja laadun vaikutus

Kokeet ja mallinnustutkimukset osoittivat, että palokuorman määrä ja laatu ovat ratkaisevan tärkeitä tekijöitä ontelopalojen kasvun ja leviämisen kannalta. Kvalitatiivisestihan tämä tulos ei ole uusi, vaan tavallaan jopa itsestäänselvyys. Tässä työssä asia on kuitenkin kvantifioitu perusteellisesti, mikä on ontelotilojen teknisiin menetelmiin pohjautuvan paloturvallisuuden parantamisen samoin kuin yksityiskohtaisen ohjeistamisen tai säädösten laatimisen perusedellytys.

Alaslasketun katon ontelotilan kaapelikokeissa sekä välipohjan ontelotilan puuverhouskokeissa tuli molemmissa esille palokuorman *määrän* vaikutus paloa voimakkaasti kiihdyttävänä tekijänä. Monestihan paloturvallisuustyössä palokuorman kasvattamisen katsotaan liittyvän vain palonkestoon palorasituksen ajallisen pitene-misen välityksellä. Saatu tulos osoittaa kuitenkin painokkaasti, että palokuorman määrän palon kehittymistä kiihdyttävää vaikutusta ei tule jättää ottamatta huomioon onteloiden paloturvallisuutta tarkasteltaessa. Palokuorman määrän kasvattaminen kiihdyttää ontelopaloa siksi, että tätä kautta tilaan yleensä tulee lisää pinta-alaa, joka pystyy vapauttamaan lämpöä. Kaikissa tapauksissahan palavan aineen lisääminen ei kuitenkaan välttämättä lisää tätä pinta-alaa. Esimerkin tällaisesta tapauksesta muodostaa kaapeleiden massana lasketun määrän lisääminen tiivistämällä palokuormaa, jolloin kaapeleiden määrän lisääminen saattaa jopa vähentää tilanteen palovaarallisuutta.

Palavan aineen lämpöä tuottavan pinta-alan lisääminen kiihdyttää paloa aineen paloteknisen *laadun* eli palo-ominaisuuksien määräämällä tavalla. Ontelopalojen kannalta tärkeimmiksi materiaalin palo-ominaisuuksiksi havaittiin aineen kyky tuottaa lämpöä pinta-alayksikköä kohti, tai lyhyemmin paloteho yksikköpinta-alaa kohden (yksikkönä kW/m²) ja aineen syttyvyys. Käytännön paloturvallisuustyön kannalta syttyvyyden merkitys voidaan sisällyttää aineen luovuttaman palotehon tarkasteluun, koska käytännössä syttyminen merkitsee palotehon luovuttamisen alkamista. Näin

menetellään esim. pintakerrosten palo-ominaisuuksien SBI-euroluokitustestissä. Monissa tapauksissa syttymisherkyys ja palavuus lisäksi korreloivat.

Työssä on kehitetty tapa yhdistää palokuorman euroluokitustulos aikaan, joka kuuluu palokuorman syttymisestä siihen, kun ontelotilassa kehittyvän palon muuttuu kriittiseksi. Esimerkkeinä on esitetty sovellus puuverhotun ontelon tapaukseen ja asennusontelon kaapelipalotapaukseen. Nämä tulokset koskevat tietyn kokoisia onteloita, mutta muiden työssä saatujen tulosten avulla niiden sovellusaluetta voidaan laajentaa huomattavasti. Tätä tulosta voidaan hyödyntää esimerkiksi ontelotiloja koskevien säädösten ja ohjeiden kehittämisessä.

Palosuojaus havaittiin tehokkaaksi tavaksi vähentää ontelotilojen palovaaroja.

Vaakasuurtaisen ontelon korkeuden ja leveyden vaikutus

Ontelon korkeuden vaikutusta palon kehittymiseen tutkittiin sekä kokeellisesti että mallintamalla. Todellista rakennusten onteloiden mittakaavaa tarkastelevissa simuloinneissa havaittiin, että odotetusti ontelon korkeuden lisääminen hidastaa palon kehittymistä. Virtauksettomassa ontelossa kriittisen ajan havaittiin kasvavan jokseenkin lineaarisesti ontelon korkeuden kasvaessa. Tässä tapauksessa kriittinen aika kasvaa hitaammin tapauksessa, jossa palokuorma sijaitsee ontelotilan reunoilla, kuin tapauksessa, jossa palokuorma on ontelotilassa esim. kaapeleiden muodossa. Jos ontelossa kulkee sen pituussuuntainen virtaus, niin tilan korkeuden suhteellinen merkitys palon leviämiseen vaikuttavana tekijänä vähenee virtauksen kasvaessa.

Pienen mittakaavan vaakasuoran ontelolaitteen kokeissa havaittiin, että pienillä ontelon korkeuksilla ontelon korkeuden pienentäminen ei lisää palon kehittymisestä, vaan on olemassa tietty kriittinen ontelon korkeus, jota pienemmillä ontelon korkeuksilla palon kehitys vähenee ontelon madaltuessa. Tämä löytö on koetuloksena ilmeisesti aivan uusi: ainakaan kirjoittajien tietojen mukaan vastaavaa kokeellista havaintoa ei ole raportoitu aiemmin.

Pienen mittakaavan kokeissa havaittu palon voimakkuuden kannalta kriittinen ontelon korkeus on löydettävissä myös todellisen mittakaavan ontelotiloissa. Tämän korkeuden määrittäminen skaalaamalla pienen mittakaavan tulokset kuvaamaan suuria onteloita ei kuitenkaan onnistu suoraviivaisesti, koska kyseinen korkeus määräytyy eri tekijöiden yhteisvaikutuksena, jossa näiden tekijöiden osuudet ovat tuntemattomia. Siksi kyseisen suureen skaalautumista ei tunneta.

Ontelon leveyden havaittiin simulointitutkimuksissa tulevan merkittäväksi tekijäksi ontelon paloturvallisuudelle, kun leveys on pienempi kuin noin kaksi kertaa ontelon

korkeus. Tätä suuremmilla ontelon leveyden arvoilla leveyden kasvattaminen ei juurikaan pidennä kriittistä aikaa.

Vaakasuuntaisen ontelon reunojen lämpötekniisten ominaisuuksien vaikutus

Ontelotilan reunojen lämmönjohtavuuden kasvamisen havaittiin pidentävän ontelopalon kriittistä aikaa (muutos turvalliseen suuntaan), mutta varsin vähän. Reunan paksuus vaikuttaa enemmän, mutta senkään vaikutus kriittiseen aikaan ei ole läheskään yhtä suuri kuin esim. ontelon korkeuden tai palokuorman palo-ominaisuuksien.

Pystysuuntaisia ontelotiloja koskevat mallinnustulokset

Pystysuuntaisessa ontelossa paloteho kehittyy paljon nopeammin kuin vastaavan kaltaisessa (sama palokuorma ja reunamateriaalit) vaakasuuntaisessa tapauksessa. Myös kuumuuden leviämiseen palokuorman suunta vaikuttaa voimakkaasti. Esimerkiksi kaapelien palaessa pystysuuntaisessa ontelossa palon etenemisnopeus nousi vaakasuuntaisessa tilanteessa havaitusta noin 3 m/min:n arvosta noin arvoon 8 m/min, kun pystyontelon syvyys oli niin suuri, että sen paloa voimistava vaikutus oli varsin pieni ja edelleen arvoon 13–14 m/min, kun pystyontelo oli kapea.

Tutkimuksissa havaittiin, että säteily tilan reunoihin kasvaa merkittävästi vasta varsin kapeissa pystysuuntaisissa onteloissa. Tutkituissa tapauksissa ontelon havaittiin olevan kapea säteilyn voimistumisen kannalta, kun sen leveys oli noin 10 cm suuruusluokkaa. Tämä löytö on yhdenmukainen kirjallisuudessa esitettyjen pienehkön mittakaavan koetulosten kanssa. Tilan keskimääräinen lämpötila ja pystysuuntainen virtausnopeus kasvoivat selvästi ontelon syvyyden pienentyessä.

Julkisivujen ontelopalot

Tapauksessa, jossa ulkoseinän ulkopinta on palavaa materiaalia, palon leviäminen tuuletusraossa on toissijainen tapahtuma julkisivun pinnalla tapahtuvaan liekin leviämiseen verrattuna. Käytännössä palo leviää palavaa materiaalia olevan julkisivun pinnalla vähintään yhtä nopeasti kuin tuuletusraossa.

Merkityksetön tuuletusraon vaikutus palon kehittymiseen ei kuitenkaan ole, koska katkomattomassa pystysuuntaisessa raossa alkupalon liekit ja kuumuus kulkeutuvat tehokkaasti ylöspäin nosteen ja hormi-ilmiön vuoksi. Rakoon syntyvä virtaus kuljettaa mukanaan happea, minkä vuoksi palavaa ainetta oleva tuulensuojalevy voi antaa osuutensa palamiseen. Tällaisia tuulensuojalevyjä onkin syytä välttää. Lisäksi liekkien ja kuumuuden pystysuuntaisen leviämisen rajoittamiseksi rakoa on syytä katkoa ainakin vaakasuuntaisin rakentein.

Tuuletusraon merkitystä palon leviämislle tutkittiin myös mallinnuksen keinoin. Havaittiin, että palon kehittymisnopeus julkisivulla moninkertaistuu, jos tuli pääsee leviämään katkomattomaan tuuletusrakoon, vaikka raossa ei olisikaan palavaa ainetta. Tuulensuojan palavuus voi vielä suunnilleen kaksinkertaistaa palon kehittymisnopeuden.

Ulkoisen sytytyslähteen tapauksessa palo leviää palavan julkisivun pinnalla seuraavaan kerrokseen noin 10 minuutissa. Sen jälkeen leviäminen hidastuu, koska alkuperäisen sytytyslähteen vaikutus on pieni ylemmissä kerroksissa. Palava julkisivumateriaali voi kuitenkin itsessään levittää paloa edelleen.

Jos sytytyslähde on lieskahtanut huoneistopalo, julkisivun pintaan kohdistuva lämpösäteily sytyttää palavat materiaalit noin 10 sekunnissa 4–5 m²:n suuruiselta alueelta. Palo leviää tällöin palotilan yläpuolella olevaan kerrokseen alle 1 minuutissa. Puupinnalla liekit leviävät seuraavaan kerrokseen noin 3 minuutissa, koska sytytyslähteen aiheuttama palorasitus on edelleen merkittävä. Sen jälkeen etenemisnopeudeksi voidaan arvioida yksi kerros 10 minuutissa.

Palon leviäminen julkisivun pinnalla ja tuuletusraossa voidaan pysäyttää rakenteellisin keinoin: tuuletusraon palokatkoilla, ulokkeilla ja erkkereillä. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteissa käytettäviin materiaaleihin. Esim. ulokkeet on syytä pinnoittaa palamattomalla materiaalilla.

Kaksoislasijulkisivujen palovaarat

Kaksoislasijulkisivujen ontelotilojen palovaaroja kartoittaneessa simulointitutkimuksessa havaittiin, että lieskahtaneen huonepalon päästessä murtautumaan sisemmän lasinseinän läpi suurikin kaksoislasijulkisivun ontelotila voi täytyä nopeasti savulla. Tässä työssä tutkitussa 20 m korkean julkisivun tapauksessa täyttymisaika oli 1 minuutin suuruusluokkaa. Mallinnustulokset toivat esille mielenkiintoisen ja paloturvallisuuden kannalta tärkeän ilmiön: savu voi laskeutua palohuoneen ikkunan alapuolelle aina tilan pohjaan asti. Tällä ilmiöllä on merkitystä myös muiden kohteiden kuin kaksoislasijulkisivujen paloturvallisuuden kannalta. Esimerkiksi Lahdessa 1990-luvulla tapahtuneessa kohtalokkaassa kerrostalopalossa rappukäytävän täytyminen savulla oli yksi pelastustoimia merkittävästi haitannut tekijä.

Kaksoislasijulkisivun lämpenemisen tutkimus paljasti, että julkisivun ontelon syvyys on paloturvallisuuden kannalta kriittinen tekijä. Jos ontelo on liian kapea, niin myös ulompi lasi ja siihen liittyvät rakenteet joutuvat alttiiksi hyvin voimakkaalle lämpörasitukselle, jotka voivat johtaa lasin särkymiseen tai rakenteiden pettämiseen tai molempiin. Tällöin alhaalla olevat henkilöt, esim. pelastushenkilökunta, voivat joutua vaaraan.

Tulosten valossa näyttääkin ilmeiseltä, että rakennusmääräyksiin olisi saatava vaatimuksia kaksoislasijulkisivujen ontelon syvyydestä. Edellä esitetyn perusteella 70 cm:n syvyys voisi olla riittävä, mutta asian varmistamiseksi olisi syytä tehdä hyvin kontrolloituja suuren mittakaavan kokeita. Myös julkisivun rakenteiden palonkestävyydestä tulee huolehtia: esim. edellä esitetyt 40 cm syvässä ontelossa vallitsevat lähes 900 °C:n lämpötilat ovat hyvin korkeita esim. alumiinirakenteiden tai palosuojaamattomien teräsrakenteiden palonkeston suhteen. Myös julkisivun liitosrakenteiden palonkestosta tulee huolehtia.

Lähdeluettelo

Alpert, R. L. 1972. Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors. *Fire Technology*, Vol. 8, s. 181–195.

Avlund, M. 1994. Experimental investigation of influence of porosity in suspended ceiling on smoke detection. Lund: EUSAS – Brandforsk – Workshop on Smoke Detection, 26. & 27.9.1994.

Babrauskas, V. & Grayson, S. J. (toim.) 1992. *Heat Release in Fires*. New York: Elsevier Applied Science. 656 s.

Babrauskas, V. 1995. The cone calorimeter. Teoksessa: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (2. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

Bengtsson, L.-G. 1999. Övertändning, backdraft och brandgasexplosion sett ur räddningstjänstens perspektiv. Lund: Lund Universitet. 171 s. + liitt. 74 s.

Bryner, N. P., Johnsson, E. L. & Pitts, W. M. 1995. Scaling Compartment Fires – Reduced- and Full-Scale Enclosure Burns. Teoksessa: *International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE) Proceedings* (toim. Lund, D. P. & Angell, E. A). Orlando, FL: September 10–15, 1995. Boston, MA; SFPE. S. 9–14.

Chow, W. K. & Lo, A. C. W. 1995. Scale Modelling Studies on Atrium Smoke Movement and the Smoke Filling Process. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 7, No. 3, s. 55–64.

Drysdale, D. D. 1998. *Introduction to Fire Dynamics* (2. painos). New York: John Wiley and Sons. 466 s.

Fleischmann, C. M. 1994. Backdraft phenomena. Gaithersburg, MD: National Institute for Standards and Technology. 127 s. + liitt. 105 s. (NIST-GCR-94-646)

Foley, M. & Drysdale, D. 1995. Heat transfer from flames between vertical parallel walls. *Fire Safety Journal*, Vol. 24, s. 53–73.

Graham, T. L., Makhvilazde, G. M. & Roberts, J. P. 1997. Flashover and the effects of compartment scale. *Journal of Applied Fire Sciences*, Vol. 7, s. 115.

Grayson, S. J., Van Hees, P., Vercellotti, U., Breulet, H. & Green, A. 2000. *The FIPEC Report. Fire Performance of Electric Cables – new test methods and measurement*

techniques (Final Report of the European Commission SMT Programme Sponsored Research Project (SMT4-CT96-2059). London: Interscience Communications Limited. 410 s. ISBN 0 9532312 5 9

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

Hakkarainen, T., Oksanen, T. & Mikkola, E. 1997. Fire behaviour of facades in multi-storied wood-framed houses. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 42 s. + liitt. 16 s. (VTT Tiedotteita 1823)

Hakkarainen, T. 2001. Correlation studies of SBI and cone calorimeter test results. Edinburgh, GB, 17–19 Sept. 2001. Teoksessa: INTERFLAM 2001. Proceedings of the 9th International Conference. Vol. 1. London: Interscience Communications. S. 519–530.

Hakkarainen, T & Oksanen, T. Fire safety assessment of wooden facades. Julkaistaan Fire and Materials -lehdessä, 2001.

Hietaniemi, J., Hostikka, S., Lindberg, L. & Kokkala, M. 2000. Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi. Espoo: VTT Rakennustekniikka. 51 s. + liitt. 14 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2027) ISBN 951-38-5664-5; 951-38-5665-8

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Vaari, J. & Weckman, H. 2001. Ontelotilojen paloturvallisuus: Ontelopalotapauksia ja -tutkimuksia. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö. Palotutkimusraadin projektin 68 julkaisu.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Mikkola, E., Salonvaara, M, Ahola, P., Nurmi, A. & Ranta-Maunus, A. 2002. Paloturvallisten puutuotteiden palo- ja puutekniset ominaisuudet. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Julkaistaan VTT Tiedotteita -sarjassa.

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

Huggett, C. 1980. Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption. Fire and Materials, Vol. 4, s. 61–65.

ISO/R 13387-3: 1999 (E). Fire safety engineering – Assessment and verification of mathematical fire models. Genève, Switzerland: International Organization of Standardization. 35 s.

Kallioniemi, P. & Laamanen, R. 1995. Tuhoisasta ylipaineekaton palosta selvittiin kesäseisokin aikana. Teollisuusvakuutus, 1, s. 18–23.

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

Kawagoe, K. 1958. Fire Behaviour in Rooms. Tokyo: Building Research Institute. (Report No. 27).

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

Kärppä, A. 1992. Rajusti levinnyt palo surmasi neljä lasta rivitaloturmassa. Palontorjunta 7, s. 10–12.

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

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

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

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

Mulholland, G. W. 1995. Smoke Production and Properties. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-217–2-227.

Oka, Y. & Atkinson, G. T. 1995. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires. Fire Safety Journal, Vol. 25, No. 4, s. 305–322.

prEN 13823. 2001. Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. Brussels: European Committee for Standardization, September 2001. 95 s.

prEN 50266-2-y. 2001. Draft Commission Decision amending Commission Decision 2000/147/EC implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the reaction to fire performance of construction products (power, control and communication cable). RG N208 Rev. 6, (CONSTRUCT 00/430 Rev 5), 31.10.2001. 4 s.

Quintiere, J. G., McCaffrey, B. J. & Kashiwagi, T. 1978. Scaling Study of a Corridor Subject to a Room Fire. *Combustion Science and Technology*, Vol. 18, s. 1–19.

Quintiere, J. G. 1989. Scaling Applications in Fire Research. *Fire Safety Journal*, Vol. 15, No. 1, s. 3–29.

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

Tewarson, A. & Khan, M. M. 1989. Fire Propagation Behavior of Electrical Cables. Teoksessa: *Fire Safety Science, Proceedings 2nd International Symposium*. Hasemi, Y., Sekizawa, A. & Seeger, P. G. Tokyo, Japan: June 13–17, 1988, Tokyo, Japan. New York: Hemisphere Publishing Corp. S. 791–800.

Vuolio, A. 2001. Kaksoislasijulkisivujärjestelmien rakennetekniikka. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 72 s. (Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion julkaisuja 22) ISBN 951-22-5624-X

Wang, H. Y., Joulain, P. & Most, J. M. 1999. Modeling on burning of large-scale vertical parallel surfaces with fire-induced flow. *Fire Safety Journal*, Vol. 32, s. 241–271.

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

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

Liite A: Suljetussa tilassa kehittyvän palon oleellisia paloteknisiä tekijöitä

Materiaalien palo-ominaisuudet

Syttyvyys

Jotta aine voisi syttyä, sen lämpötilan on noustava niin korkeaksi, että lämpöhajoaminen eli pyrolyysi tapahtuu riittävän voimakkaasti ja palamisen kemialliset reaktiot voivat käynnistyä. Siksi aineiden syttymiseen vaikuttaa voimakkaasti se, miten materiaali lämpenee, eli sen lämpötekniset ominaisuudet sekä se, miten lämpö materiaaliin kohdistuu.

Syttymiseen vaikuttavat tekijät ovat yleisesti hyvin tunnettuja: kostean aineen saa syttymään vain vaivoin, aineesta tehdyt ohuet palaset syttyvät helpommin kuin paksut materiaaliyksiköt ja kevyemmät aineet syttyvät nopeammin kuin raskaat (esim. mäntypuu syttyy nopeammin kuin tiheämpi tammipuu). Ulkoisista tekijöistä syttyvyyteen vaikuttavat materiaaliin kohdistuva lämpörasitus ja sen vaikutusmuoto.

Kosteus vaikuttaa syttymiseen pääosin lämpönieluna, so. näytteessä olevan veden lämmittäminen ja etenkin sen höyrystyminen kuluttavat näytteeseen kohdistuvaa lämpöenergiaa. Tämän lisäksi kosteus kasvattaa näytteen termistä inertiaa.

Eripaksuisten ainekerrosten syttyminen riippuu niiden lämpöteknisestä (termisestä) paksuudesta. Termisesti ohut kerros syttyy huomattavasti helpommin (nopeammin) kuin termisesti paksu materiaali. Termisesti ohuena pidetään tuotetta, joka lämpenee yhdeltä puolelta suunnatussa lämpörasituksessa selvästi myös toiselta puolelta (ideaalinen termisesti ohut näyte on sellainen, jonka molemmat pinnat ovat suunnilleen samassa lämpötilassa). Tuote, joka yhdeltä puolelta suunnatun lämpörasituksen aikana ei lämpene toiselta puoleltaan, on termisesti paksu. Terminen paksuus voi olla myös jossain ohuen ja paksun välillä niin kuin käytännössä on usein asianlaita. Käytännössä ainekerros on useimmiten termisesti ohut, jos sen paksuus on korkeintaan muutamia millimetrejä ja termisesti paksu, kun sen paksuus on suuruusluokkaa 10 mm tai enemmän.

Syttymisviive

Syttymisviive Δt_{ign} on aika, joka kuluu lämpöaltistuksen alkamisesta pinnan syttymiseen. Viiveen riippuvuutta aineen sisäisistä ominaisuuksista voidaan tiivistetysti luonnehtia seuraavilla kaavoilla, jotka kuvaavat aineen syttymisaikaa, kun siihen vaikuttaa säteilylämmitys (Mikkola ja Wichman 1989 ja Mikkola 1990):

$$\Delta t_{ign} \approx \frac{\rho C d (T_{ign} - T_0)}{\dot{q}_{net}''}, \quad (A1)$$

kun tuote on termisesti ohut ja

$$\Delta t_{ign} \approx \frac{\rho C k (T_{ign} - T_0)^2}{\dot{q}_{net}''^2}, \quad (A2)$$

kun tuote on termisesti paksu. Edellä olevissa kaavoissa d on ainekerroksen paksuus, ρ aineen tiheys ja C sen ominaislämpö. Lämpötila T_{ign} on aineen syttymistä kuvaava lämpötila⁵ ja T_0 aineen lämpötila lämmityksen alkaessa (tyypillisesti noin 20–25 °C). Suure \dot{q}_{net}'' on aineen pintaan kohdistuvan lämpövuon tiheyden arvo (yksikkö W/m²).

Tarkastellaan esimerkiksi puuainetta, jonka tiheys on noin 500 kg/m³, lämmönjohtavuus noin 0,2 WK⁻¹m⁻¹, ominaislämpö 1900 JK⁻¹kg⁻¹. Olkoon pintaan kohdistuva tehollinen lämpövuon tiheys noin 20 kW/m². Tällöin 1 mm paksun ainekerroksen syttymisviive on noin 15 s ja esim. 20 mm paksun ainekerroksen noin 50 sekuntia.

Kun tuotteen terminen paksuus on ohuen ja paksun välillä, on lämpöärsityksen \dot{q}_{net}'' ja lämpötilaeron $T_{ign} - T_0$ vaikutuksen voimakkuutta kuvaava eksponentti välillä 1, ..., 2.

⁵ Kiinteille aineille ei voi määrittää tarkkaa syttymislämpötilaa, koska syttymistapahtuma riippuu aina myös ympäristön vaikutuksista.

Aineen pinnan lämpeneminen ja lämpötilan nousu aineen sisällä

Kaavassa A2 esiintyvää tekijä ρCk kutsutaan aineen lämpöhitaudeksi⁶. Nimensä mukaisesti se kuvaa sitä, miten nopeasti aineen pinta lämpenee: lämpenemisen aikaskaalaa kuvaa suure

$$t_s = \frac{\rho Ck}{h^2}, \quad (\text{A3})$$

missä h on pinnan lämmönsiirron voimakkuutta kuvaava lämmönsiirtokerroin. Lähellä huoneen lämpötilaa olevien kaasujen luonnollisen konvektion aikaansaamassa virtauksessa suureen h arvo on tyypillisesti $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ tai alle ja palotilanteissa voidaan usein käyttää arvoja $25\text{--}50 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Esimerkiksi villoilla lämpöhitauden arvo on usein suuruusluokkaa $1000\text{--}10\,000 \text{ W}^2\text{sm}^{-4}\text{K}^{-2}$, jolloin palotilanteessa niiden pinnan lämpenemisen aikavakio on sekuntien suuruusluokkaa; puupinnoilla lämpöhitauden arvo on tyypillisesti suuruusluokkaa $100\,000 \text{ W}^2\text{sm}^{-4}\text{K}^{-2}$, joka siis vastaa aikoja alle minuutista aina muutamiin minuutteihin asti. Metallien lämpöhitaus on suuri, esimerkiksi teräksellä noin $150\,000\,000 \text{ W}^2\text{sm}^{-4}\text{K}^{-2}$.

Sitä, miten hyvin pinnan kohonneen lämpötilan tuottama lämpötilarintama etenee aineessa, kuvaa aineen lämpötilajohtavuus eli lämpötilan diffuusiokerroin⁷

$$\alpha = \frac{k}{\rho C}. \quad (\text{A4})$$

Esimerkiksi aikaa t_d , jossa lämpötilarintama läpäisee paksuuden d omaavan ainekerroksen voidaan arvioida lämpötilajohtavuuden avulla kaavaa

$$t_d = \frac{d^2}{4\alpha} \quad (\text{A5})$$

käyttäen. Lämpötilajohtavuuden arvo on monille aineille noin $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} - 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, joten esimerkiksi 12 mm paksuiselle levyllä aika t_d on tyypillisesti noin 1–6 minuuttia.

⁶ Usein käytetään myös termiä terminen hitaus; englanniksi nimitys on ”thermal inertia”.

⁷ Englanniksi ”thermal diffusivity”.

Lämmönvapautuminen ja palon leviäminen

Paloteho

Palamisessa syntyvä lämpö on tulipalon ajava voima: mitä voimakkaammin palava kohde lämpöä vapauttaa, sitä nopeammin tuli etenee ja sitä kuumemmiksi palotilan kaasut ja sitä rajoittavat pinnat tulevat. Siksi lämmönvapautumisnopeus on eräs oleellisimpia aineiden palamista kuvaavia suureita, jota mitataan useissa uuden sukupolven palotutkimus- ja testauslaitteissa. Palotekniikassa lämmönvapautumisnopeudelle käytetään yleensä lyhyempää nimitystä *paloteho*.

Kirjallisuudessa palotehosta käytetään usein nimityksiä RHR (Rate of Heat Release) tai HRR (Heat Release Rate). Sen symbolina käytetään useimmiten merkkiä \dot{Q} . Lämmönvapautumisnopeus on tietyssä ajassa syntyneen lämpöenergian määrä eli teho, joten sitä voidaan nimittää lyhyemmin myös palotehoksi. Sen yksikkö on tehon yksikkö eli Watti (W) tai sen kerrannaiset (kW, MW).

Aineen sisäiseen rakenteeseen liittyvien tekijöiden lisäksi paloteho riippuu voimakkaasti ulkoisista tekijöistä; usein ulkoisten tekijöiden vaikutus on hallitseva. Ulkoista tekijöistä merkittävimmät ovat aineen pintaan kohdistuva säteilyrasitus \dot{q}'' ja ympäristön happipitoisuus (tekijä f_{O_2}). Aineen sisäisistä ominaisuuksista vaikuttavat palotehoon aineen lämpöarvo ΔH_c (aineesta sen palaessa vapautuva energiamäärä, yksikkö MJ/kg) ja aineen termisen hajoamisen vaatima lämpöenergia L_v (MJ/kg). Lisäksi aineen ominaislämpö C vaikuttaa, koska aineen lämmittämiseen alkulämpötilasta T_0 syttymislämpötilaan T_{ign} tarvittava lämpöenergia massayksikköä kohti on $C(T_{ign} - T_0)$.

Edellä mainitut tekijöiden vaikutus lämmönvapautumisnopeuteen voidaan tiivistää seuraavaan kaavaan, joka esittää palotehon palavaa pinta-alayksikköä (A_{burn}) kohden \dot{q}'' (W/m^2) (voidaan käyttää myös merkintää RHR'')

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{Q}}{A_{burn}} = \dot{q}_{net}'' \cdot f_{O_2} \cdot \frac{\Delta H_c}{L_v + C(T_{ign} - T_0)}. \quad (A6)$$

On huomattava, että pintaa lämmittävä lämpövirrantiheys \dot{q}_{net}'' riippuu ulkoisista lähteistä tulevan lämpövirrantiheyden lisäksi pinnalta tapahtuvista lämpöhäviöistä. Näitä ei yleensä tunneta, ja siksi yllä esitetyllä palotehon kaavalla ei käytännössä juurikaan ole merkitystä pinta-alaa kohden vapautuvan palotehon arvioinnissa, vaan tämä suure pitää määrittää kokeellisesti.

Pinta-alayksikköä kohden vapautuvaa lämpöä \dot{q}'' voidaan mitata esim. kartiokalorimetrikokein, jotka kuvaavat palamista ympäristössä, jossa happea on saatavilla runsaasti (tulipalon alkuvaihe). Saadut tulokset kuvaavat eri materiaalien lämmöntuotto-ominaisuuksia, vaikka ne riippuvatkin jonkin verran mm. kokeessa käytetystä ulkoisen säteilylämmityksen tasosta, näytteen pinnan ominaisuuksista ja sen käyttäytymisestä kokeen aikana sekä näytteiden paksuudesta.

Liekin leviäminen

Aineen palaessa liekit leviävät sen pinnalla. Liekin leviämistä voidaan ajatella sarjana peräkkäisiä syttymisiä, joten siihen vaikuttavat samat tekijät kuin aineen syttymiseen. Jo palavan alueen vapauttama lämpö vaikuttaa suoraan liekkien välityksellä sekä palotilan lämpenemisen kautta liekinleviämisenopeuteen; siksi liekinleviämisessä oleellisia suureita ovat myös palotehooon vaikuttavat tekijät.

Quintiere (1995) esittää seuraavat yhteydet aineen palo-ominaisuuksien ja aineen pinnalla leviävän palon leviämisenopeudelle v_s tilanteessa, jossa liekit etenevät vaakasuorassa vastaan palon synnyttämää, liekkiä kohti tulevaa virtausta.

Kun ainekerros on termisesti ohut, nopeus v_s on

$$v_s \approx \left[\frac{\rho C d (T_{ign} - T_0)}{k_{gas} (T_{flame} - T_0)} \right]^{-1}, \quad (A7)$$

missä k_{gas} on ainetta ympäröivän kaasun lämmönjohtavuus ja T_{flame} on liekkien lämpötila, (liekkien adiabaattista lämpötilaa vähennettynä lämpöhäviöiden aiheuttamalla korjaustekijällä). Esimerkiksi puupinnalle, jonka tiheys on noin 500 kg/m^3 , ominaislämpö $1900 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$, syttymislämpötila $T_{ign} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $T_{flame} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ilmassa ($k_{gas} \sim 0.05 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$), eo. kaava antaa nopeudelle v_s arvon 2 cm/min .

Kun ainekerros on termisesti paksu, nopeus v_s on

$$v_s \approx v_{gas} \left[\frac{\rho C k (T_{ign} - T_0)^2}{\rho_{gas} C_{gas} k_{gas} (T_{flame} - T_0)^2} \right]^{-1}, \quad (A8)$$

alaindeksi "gas" viittaa ainetta ympäröivän kaasun ominaisuuksiin. Suure v_{gas} on palon aiheuttama kaasujen virtausnopeus. Sen arvoa on vaikea arvioida tarkasti ja siksi ym.

kaavalla ei käytännössä pystytä arvioimaan nopeutta v_s ilman lisätietoja, joita voidaan saada esim. koetuloksista tai käyttämällä kehittyneitä palonsimulointiohjelmiä.

Yllä olevat etenemisnopeuden lausekkeet voidaan esittää aineen pinta-alayksikköä kohden luovuttaman palotehon \dot{q}'' avulla, kun tehdään seuraavat sijoitukset:

$$\frac{k_{gas} (T_{flame} - T_0)}{\ell} \rightarrow \dot{q}'' \text{ (termisesti ohut ainekerros)} \quad (A9)$$

ja

$$(T_{flame} - T_0) \sqrt{\frac{v_{gas} \rho_{gas} C_{gas} k_{gas}}{\ell}} \rightarrow \dot{q}'' \text{ (termisesti paksu ainekerros)}, \quad (A10)$$

missä pituusmitta ℓ kuvaa liekkien lämmittämää matkaa. Näin saadut lausekkeet nopeudelle v_s ovat

$$v_s \approx \frac{\ell \dot{q}''}{\rho C d (T_{ign} - T_0)} \text{ (termisesti ohut ainekerros)} \quad (A11)$$

ja

$$v_s = \frac{\ell \dot{q}''^2}{\rho C k (T_{ign} - T_0)^2} \text{ (termisesti paksu ainekerros)}. \quad (A12)$$

Jälkimmäinen näistä lausekkeista on sama kuin Tewarson & Khanin (1989) johtama palon leviämisenopeuden laskentakaava.

Käytännön kannalta oleellisimpia ovat termisesti paksut ainekerrokset. Tärkeintä niille kannalta palon etenemisnopeuden lausekkeessa (A12) on se, että lauseke ilmaisee, mitkä tekijät ovat oleellisia etenemisnopeuden suhteen:

- Kun aineen paloteho yksikköpinta-alaa kohden lisääntyy, etenemisnopeus kasvaa voimakkaasti.
- Syttymislämpötilan aleneminen vaikuttaa yhtä voimakkaasti kuin pinta-alayksikköä kohden vapautuvan palotehon lisääntyminen.
- Lämpöhitauden kasvattaminen alentaa liekkien etenemisnopeutta, mutta heikommin kuin paloteho per yksikköpinta-ala tai syttymislämpötila.

Suljetun tilan lämpenemisestä palon aikana

Lämpötilan nousua suljetussa tilassa voidaan arvioida käyttäen McCaffreyn, Quintieren ja Harkleroadin kehittämää mallia (MQH-malli, McCaffrey ym. 1981). Mallin mukaan kasvavan palon aiheuttama kaasun lämpötilan nousu $\Delta T_u = T_u - T_\infty$ riippuu palotehosta \dot{Q} ja huonetilan ominaisuuksista seuraavasti (Karlsson & Quintiere 2000):

$$\Delta T_u = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{h_k A_T A_o \sqrt{H_o}} \right)^{1/3}, \quad (\text{A13})$$

missä A_T on tilan kokonaispinta-ala, A_o sen aukkojen pinta-ala ja H_o aukkojen korkeus. Tilan seinien termisiä ominaisuuksia kuvataan tehollisella lämmönsiirtokerroimella h_k , joka ilmaistaan yksiköissä $\text{kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Lämmönsiirtokerroin muuttuu, kun lämpöaalto saavuttaa seinän kylmän puolen. Aika t_p , jossa tämä tapahtuu voidaan MQH-mallin mukaan laskea seuraavasti

$$t_p = \frac{\delta^2}{4\alpha_w}, \quad (\text{A14})$$

missä δ on seinän paksuus ja α_w on seinämateriaalin lämpötilajohtavuus, $\alpha_w = k_w \rho_w^{-1} c_w^{-1}$, kun k_w , ρ_w ja c_w ovat materiaalin lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpö. Riippuen siitä, onko aika t pienempi vai suurempi kuin t_p , tehollinen lämmönsiirtokerroin on

$$h_k = \sqrt{\frac{k_w \rho_w c_w}{t}}, \text{ kun } t < t_p \quad (\text{A15})$$

$$h_k = \frac{k_w}{\delta}, \text{ kun } t \geq t_p.$$

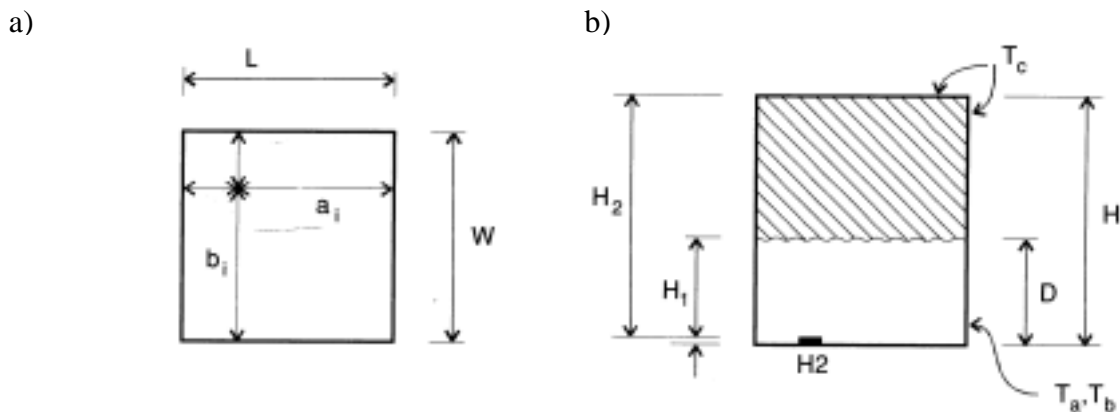
MQH-mallia voidaan käyttää palotilan lieskahtamisen arviointiin. Tämä perustuu siihen, että lieskahduksen on tyypillisesti havaittu tapahtuvan, kun ylemmän kerroksen lämpötila on noin $500\text{ }^\circ\text{C} - 600\text{ }^\circ\text{C}$ (Karlsson & Quintiere 2000). Tämän tiedon perusteella voidaan kirjoittaa seuraava arvio tilan lieskahduttamiseen vaadittavalle paloteholle

$$\dot{Q}_{crit} = 610 \cdot (h_k A_T A_o H_o^{1/2}) \text{ kW}. \quad (\text{A16})$$

Tässä työssä tehtävissä arvioinneissa käytettiin lämmönsiirtokertoimelle vakioarvoa $0.05 \text{ kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Kuuman kerroksen säteilyn voimakkuuden arvioinnista

Karlsson ja Quintiere (2000) esittävät yksinkertaisen mallin tilan yläosaan kehittyvän kuuman kerroksen tilan lattiaan kohdistaman lämpösäteilyn laskemiseksi. Tarkasteltu tilanne on paikallinen palo huoneessa, jonka korkeus H . Kuuman kerroksen alareuna on korkeudella D . Tilanne on esitetty kuvassa A1.



Kuva A1. Kuuman kerroksen tilan lattiaan kohdistaman säteilyn laskennan geometria: a) ylhäältä ja b) sivusta. Laskentakaavan esitystä on yksinkertaistettu olettamalla, että alemman kerroksen seinien lämpötilat ovat samat eri kvadranteissa, eli $T_a = T_b = T_L$. Lisäksi on oletettu, että palo on neliöpohjaisen huoneen keskellä, eli kaikki tekijät a_i ja b_i ovat yhtä suuria $= a$. Ylemmän kerroksen seinien lämpötilalle on laskentakaavassa käytetty merkintää T_c havainnollisempaa merkintää $T_{W,U}$.

Lauseke, josta lattiaan kohdistuvan lämpövirran tiheys \dot{q}''_{floor} (yksikkönä kW/m^2) voidaan laskea on:

$$\dot{q}''_{floor} = \exp(-\kappa_L D) \cdot (\dot{q}''_1 + \dot{q}''_2 + \dot{q}''_3 + \dot{q}''_4), \quad (\text{A17})$$

missä eksponenttitekijä kuvaa säteilyn vaimennusta alemman kerroksen kaasun absorption (vaimennustekijä κ_L ($1/\text{m}$)) vuoksi. Käytännössä tämä tekijä on merkityksellinen vain, jos alempi kerros on merkittävässä määrin savuinen, kirkkaalle alemmalle kerrokselle $\kappa_L \approx 0$, joten vaimennustekijä ≈ 1 . Säteilutekijät \dot{q}''_1 , \dot{q}''_2 , \dot{q}''_3 ja \dot{q}''_4 ovat tilan eri kvadranteista (ks. kuva A1a) tulevat osuudet. Jos palo on neliöpohjaisen huoneen keskellä, ne ovat kaikki yhtä suuret $= \dot{q}''_c$, jolloin

$$\dot{q}_{floor,sq}'' = 4 \exp(-\kappa_L D) \cdot \dot{q}_c'', \quad (A18)$$

Lämpövirrantiheys \dot{q}_c'' riippuu ylemmän kerroksen kaasun lämpötilasta T_U ja seinien lämpötilasta $T_{W,U}$, kerroksen savuisuudesta (vaimennuskerroin κ_U) sekä ylemmän kerroksen ja lattian välisestä näkyvyystekijästä ϕ_U ja alemman kerroksen ja lattian välisestä näkyvyystekijästä ϕ_L seuraavasti:

$$\begin{aligned} \dot{q}_c'' &= \phi_U \cdot \left[(1 - \exp(-\kappa_U L_m)) \cdot \sigma T_U^4 + \exp(-\kappa_U L_m) \cdot \sigma T_{W,U}^4 \right] + \phi_L \cdot \sigma T_L^4 \\ &\approx \phi_U \cdot \left[(1 - \exp(-\kappa_U L_m)) \cdot \sigma T_U^4 + \exp(-\kappa_U L_m) \cdot \sigma T_{W,U}^4 \right] \end{aligned} \quad (A19)$$

missä L_m kuvaa säteilyn kuumassa kerroksessa kulkemaa matkaa. Tässä yksinkertaisessa tapauksessa se on sama kuin kaksi kertaa savukerroksen paksuus, $L_m = 2AZ$. Tekijä σ on Stefan-Boltzmannin vakio. Ensimmäinen termi kuvaa kuuman kerroksen emittoimaa säteilyä, toinen katon säteilyä, joka vaimenee kuumaan kerrokseen absorboituessaan ja viimeinen termi κ_u alemman kerroksen aiheuttamaa säteilyä, joka alemman kerroksen alhaisen lämpötilan takia on yleensä paljon pienempi kuin kuuman kerroksen kaasujen ja katon osuus.

Näkyvyystekijät riippuvat tilan vaakamitasta W ja korkeudesta H seuraavasti:

$$\phi_U = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\frac{1}{2}W}{\sqrt{H_1^2 + \frac{1}{4}W^2}} \right) \arctan \left(\frac{\frac{1}{2}W}{\sqrt{H_1^2 + \frac{1}{4}W^2}} \right) \quad (A20)$$

ja

$$\phi_L = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{\pi}{4} - \left(\frac{\frac{1}{2}W}{\sqrt{H_1^2 + \frac{1}{4}W^2}} \right) \arctan \left(\frac{\frac{1}{2}W}{\sqrt{H_1^2 + \frac{1}{4}W^2}} \right) \right], \quad (A21)$$

tekijän H_1 merkitys ilmenee kuvasta A1.

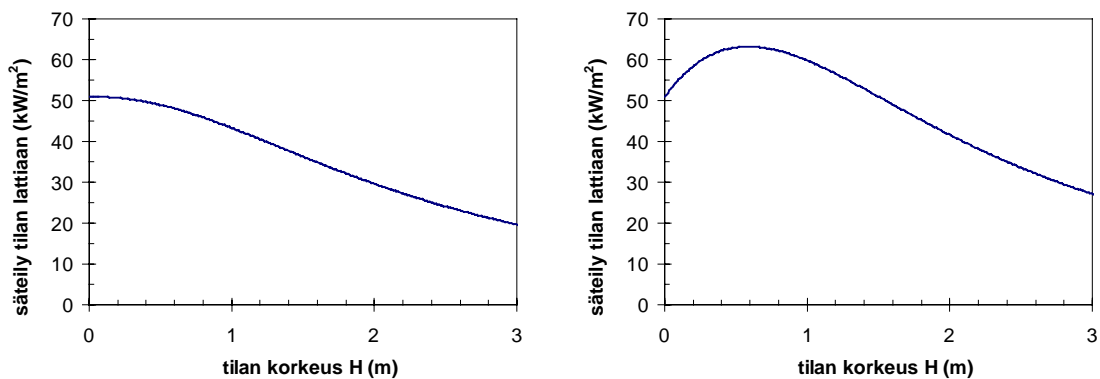
Yllä esitetyllä mallilla laskettuja lattiaan kohdistuvan säteilyn voimakkuuksia eri tilanteille on esitetty kuvassa A2. Näissä laskuissa on oletettu savukerroksen paksuuden olevan 50 % tilan korkeudesta. Kuuman kerroksen kaasujen lämpötilan on oletettu olevan 800 °C ja sen seinien lämpötilan 700 °C. Alemman kerroksen lämpötilan on oletettu olevan 20 °C ja se on oletettu savuttomaksi.

Nähdään, että jos kuumassa kerroksessa ei tapahtuisi säteilyn emissiota ja absorptiota, niin lattiaan kohdistuva säteily vähenee monotonisesti korkeuden kasvaessa. Tällainen

tilanne on käytännössä hyvin harvinainen. Se voi tulla esille, jos palava aine ei tuota juurikaan savua, eli lähinnä joidenkin kaasujen tapauksessa, mutta on olemassa myös kiinteitä aineita, joiden savuntuotto on mitätön (esim. kumin valmistuksessa käytettävä tetrametyyliuramimonosulfidi) (Hietaniemi ym. 1999).

Kun kuuma kerros on savuinen, pienillä tilan korkeuksilla lattiaan kohdistuva säteily kasvaa korkeuden kasvaessa. Tietyllä korkeudella säteily saavuttaa huippuarvon, jonka jälkeen se alkaa vähetä tilan korkeuden kasvaessa. Tässä työssä tämä ilmiö havaittiin pienen mittakaavan ontelokokeissa, ks. luku 3.2.3.

a) lähes savuton kuuma kerros ($\kappa_U = 0,05 \text{ m}^{-1}$) b) savuinen kuuma kerros ($\kappa_U = 2 \text{ m}^{-1}$)

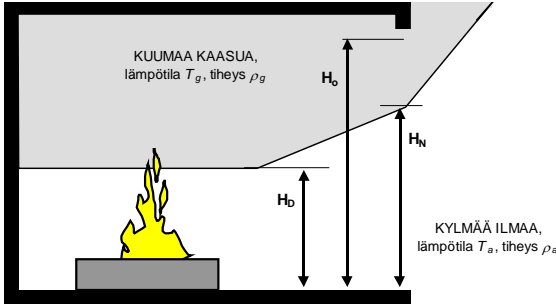


Kuva A2. Kuuman kerroksen tilan lattiaan kohdistaman säteilyn voimakkuus neliömuotoisen tilan (sivu 2 m) korkeuden H funktiona kahdessa eri tapauksessa: a) kuuma kerros oleellisesti savuton ja b) normaali savuinen kuuma kerros.

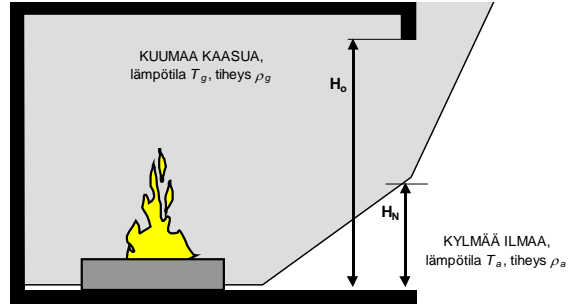
Aukkovirtauksista ontelotilojen paloissa

Tilan aukkojen kautta tapahtuvat virtaukset muuttuvat palon aikana, koska kuuma kerros laskeutuu yhä alemmas (ks. kuva A3). Kehittyvässä palossa kuuma kerros on selvästi lattian yläpuolella (korkeus H_D kuvassa A3a), kun taas täysin kehittyneessä palossa sen alareuna on lähellä lattiaa ($H_D \approx 0$, kuva A3b). Paineen neutraalitaso, eli taso, jolla tilan sisällä ja sen ulkopuolella vallitsevat paineet ovat yhtä suuret, sijaitsee korkeudella H_N .

a) kehittyvä palo



b) täysin kehittynyt palo



Kuva A3. Kaaviokuvat suljetussa tilassa olevan palon eri kehitysvaiheiden virtauksien laskennassa käytetyistä asetelmista: a) kehittyvä palo ja b) täysin kehittynyt palo.

Aukon kautta tilaan sisään tapahtuvaa massavirtausta voidaan hyvällä tarkkuudella arvioida kaavalla

$$\dot{m}_{in} = C_d \cdot W \int_0^{H_N} \rho(z) v(z) dz, \quad (A22)$$

missä $C_d = 0,6, \dots, 0,7$ on aukon virtauskerroin, W on aukon leveys sekä $\rho(z)$ ja $v(z)$ ovat kaasun tiheys ja virtausnopeus korkeudella z . Koska virtaus on erilaista väleillä $[0, H_D]$ ja $[H_D, H_N]$, massavirtauksen lauseke pitää integroida paloittain näiden alueiden yli. Lopputuloksena saadaan ilmapinnan sisäänvirtausnopeudelle lauseke (Karlsson & Quintiere 2000, s. 106)

$$\dot{m}_{in} = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} (H_N - H_D)^{1/2} (H_N + \frac{1}{2} H_D), \quad (A23)$$

missä olevien korkeuksien H_N ja H_D merkitys käy ilmi kuvasta A3.

Kun kuuma kerros on laskeutunut hyvin alas, on $H_D \approx 0$ ja

$$H_N \approx \frac{H_o}{1 + (\rho_a / \rho_g)^{1/3}}, \quad (A24)$$

joten

$$\dot{m}_{in} \approx \frac{2}{3} C_d W H_o^{3/2} \rho_a \sqrt{2g} \sqrt{\frac{(\rho_a - \rho_g) / \rho_a}{(1 + (\rho_a / \rho_g)^{1/3})^3}}. \quad (A25)$$

Kun tähän lausekkeeseen sijoitetaan tyypilliset palotilannetta kuvaavat arvot, saadaan ilman sisäänvirtaukselle yksinkertainen lauseke (yksikkö kg/s)

$$\dot{m}_{in} \approx 0,5 \cdot WH_o^{3/2}, \quad (\text{A26})$$

missä aukon leveys W ja korkeus H_o on ilmaistava metreissä.

Pystysuuntaisten lähekkäisten pintojen säteilyä voimistavasta vaikutuksesta

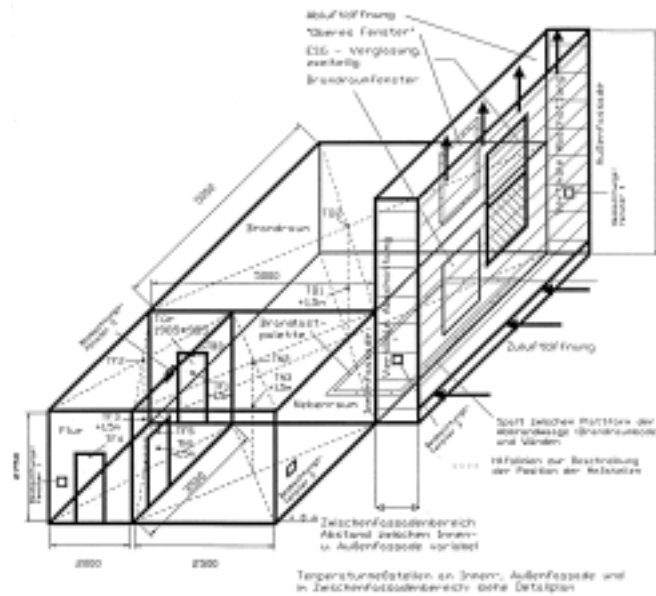
Tässä tarkastelussa selostetaan eräs kirjallisuudessa esitetty lähestymistapa arvioida seinäpinnalle suuntautuvaa lämpövirran tiheyttä palotilanteessa, jossa liekit ja kuumat kaasut sekä savu kulkevat kahden lähekkäin olevan seinän välissä. Lähestymistavan ovat kehittäneet Foley ja Drysdale (1995).

Foleyn ja Drysdalen korrelaatiomalli perustuu laboratoriomittakaavan kokeisiin, joissa on varsin perusteellisesti tutkittu kaasupolttimen liekistä saatavaa lämpövuota pystysuoran ontelon seiniin. Tutkimuksen tuloksena on luotu kvantitatiivinen yhteys palotilanteen geometrian ja lämpövuon välille. Korrelaatio on ilmoitettu laaduttomien lukujen avulla, joten periaatteessa tulos voidaan skaalata täyteen mittakaavaan. Kuitenkaan korrelaatioiden pätevyysalueita esim. skaalauksen suhteen ei ole annettu, joten alla esitetyt tulokset ovat epävarmoja. Siksi on syytä tarkastella mallin kelpoisuutta vertaamalla sen tuloksia suuren mittakaavan palokokeissa saatuihin tuloksiin.

Käytetyn mallin kelpoisuuden tarkastelu

Koeaineisto: saksalaisen kaksoislasijulkisivun palokokeen tulokset

Saksalaisessa koesarjassa (Kunkelmann 1997, 1998) suoritettiin kahdeksan täyden mittakaavan koetta, jossa tutkittiin erityisesti julkisivun konstruktion, palohuoneen tuuletusaukkojen sekä ikkunamateriaalin vaikutusta. Koejärjestely on esitetty kuvassa A4.



Kuva A4. Saksalaisissa kaksoislasisiikkunapalokokeissa käytetty koejärjestely (Kunkelmann, 1997, 1998).

Ontelotilaan leviävä palo oli odotetusti suurin tapauksessa, jossa palohuone oli läpituuletettu, ts. sekä ikkuna että ovi olivat auki, ja ontelo oli alhaalta ylös asti avoin. Tässä tapauksessa todettiin kvalitatiivisesti, että ikkunasta onteloon tulevat liekit voivat ulottua ylemmän kerroksen ikkunan tasolle. Tutkimus päättyi suosittamaan näissä tapauksissa huoneistojen sprinklaamista. Julkisivujen välimatkan todettiin vaikuttavan siten, että pienenevä välimatka johti lämpötilojen yleiseen nousuun. Koesarja on kattavasti instrumentoitu ja dokumentoitu.

Taulukko A1. Valikoituja tuloksia saksalaisesta koesarjasta.

Koe	Ilmatila (m)	Palamisnopeus (kg/min)	Paloteho (MW)	Säteily (kW/m ²)
1	1,2	9	2,6	8,0
2	0,8	8,5	2,4	15
3	0,3	10	2,9	27
4	0,8	19	5,3	40
5	1,2	36	10,2	67

Saksalaisessa koesarjassa palohuoneesta onteloon johtava ikkuna oli mitoiltaan 1080 mm × 1080 mm ja etäisyys ikkunan yläreunasta ylemmän kerroksen ikkunan keskelle 2380 mm. Jälkimmäiseen paikkaan oli asennettu säteilymittari. Valittuja mittaustuloksia on koottu taulukkoon A1.

Foleyn ja Drysdalen mallin vertailukoetuloksiin

Tarkastellaan nyt Foleyn ja Drysdalen korrelaatioiden toimivuutta em. koetulosten avulla. Foleyn ja Drysdalen kokeissa käytetty poltin oli lineaarinen kaasupoltin, joka sijaitsi joko kiinni toisessa julkisivussa tai ontelon keskellä. Korrelaatioissa on näin ollen käytettävä kokonaispalotehon asemesta sitä palotehoa, joka vapautuu onteloon siellä olevasta liekistä. Tälle voidaan ainoastaan olettaa jokin arvio, joka on pienempi kuin kokonaispaloteho. Tarvittavat parametrit ovat polttimen pituus (tässä tapauksessa ikkunan leveys), paloteho ontelossa, sekä säteilymittarin paikka suhteessa polttimen keskikohtaan. Sovelletaan tapausta, jossa poltin on kiinni toisessa julkisivussa (samassa johon säteilymittari on kiinnitetty), ja ontelo on alhaalta avoin.

Mallin mukaan lämpövirran tiheys on

$$\dot{q}'' = 67,38 \left[\left(\frac{a}{D} \right)^{0,36} \left(\frac{x}{\hat{Q}_l^{2/3} D} \right) \left(\frac{y'}{D} \right)^{-0,38} \right]^{-1,47} \quad (\text{A27})$$

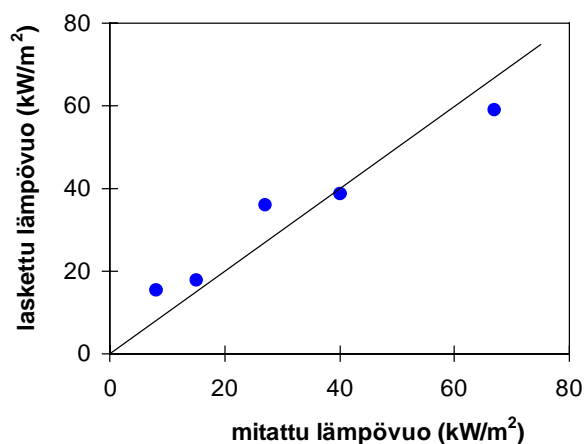
missä a on ontelon ilmatilan mitta, D on ikkunan leveys, x on pystysuora etäisyys polttimesta säteilymittariin, sekä $y' = 0,5D - y$, missä y on vaakasuora etäisyys polttimen keskikohdasta säteilymittariin (tässä tapauksessa $y = 0$). Laaduton paloteho on

$$\hat{Q} = \frac{Q/D}{\rho C_p T g^{0,5} D^{1,5}} \quad (\text{A28})$$

missä Q on todellinen ontelossa vapautuva paloteho, ρ ilman tiheys, C_p ilman ominaislämpökapasiteetti, T ilman absoluuttinen lämpötila ja g putoamiskiikkyvyys. Vertailu korrelaation antamien tulosten ja koetulosten välillä on esitetty taulukossa A2 käyttäen kahta ontelotilassa vapautuvalle paloteholle: 30 % ja 60 % kokonaispalotehosta. paloteho-osuutta 60 % vastaava tulos on esitetty graafisesti kuvassa A5.

Taulukko A2. Säteilyvuon vertailu saksalaisen koesarjan ja Foleyn ja Drysdalen korrelaation kesken. Prosenttiluvut tarkoittavat sitä osuutta kokonaispalotehosta, jonka on oletettu vapautuvan ontelotilassa.

Koe	Mittaus	F&D 30 %	F&D 60 %
1	8,0	7,86	15,5
2	15	9,31	17,8
3	27	18,8	36,0
4	40	20,2	38,7
5	67	31,1	59,2



Kuva A5. Mitattu ja laskettu lämpövuoto. Lasketussa tuloksessa on oletettu, että ontelotilassa vapautuva paloteho on 60 % kokonaispalotehosta.

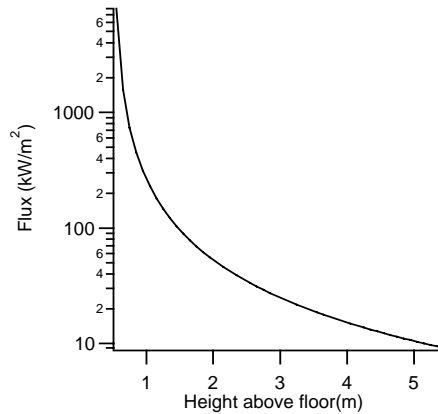
Nähdään, että olettamalla ontelotilassa vapautuvan palotehon olevan 60 % kokonaispalotehosta, Foleyn ja Drysdalen korrelaatio antaa suhteellisen hyvän selityksen kokeellisesti mitatuille säteilytasoin. Edellä esitetyn perusteella voidaan olettaa, että korrelaatiota sovellettaessa tulee kaavaan sijoittaa noin puolet kokonaispalotehosta.

Laskentaesimerkki

Lasketaan esimerkin vuoksi säteilyn voimakkuus kuvitteellisessä tapauksessa, jossa Sanomatalon yhdessä toimistohuoneessa tapahtuisi lieskahtanut palo. Oletetaan, että sprinkleri ei toimi, ja palo rikkoo julkisivun puoleisen ikkunan. Paloa pakeneva toimittaja jättää oven auki takanaan. Tilanne vastaa hyvin tuuletettua (läpituuletettua) huoneistopaloa, jossa palokaasut pääsevät poistumaan horminkaltaiseen pystysuoraan onteloon. Oletetaan kokonaispalotehoksi 5 MW ja ontelon ilmatilan mitaksi 0,6 m. Kerroskorkeus on 4 m.

Sanomatalon sisempi julkisivu on kokonaisuudessaan lasia, joten onteloon tulevan liekin voidaan olettaa rikkovan sisemmän ikkunan koko kerroksen korkeudelta, ja onteloon kuvitellun lineaarisen kaasupoltin voidaan kuvitella olevan lähes ylemmän kerroksen lattian tasalla. Esimerkkilaskussa poltin asetetaan puoli metriä lattian alapuolelle. Hajoavan ikkunan leveydeksi oletetaan 2 m. Maksimisäteilyteho ylemmän kerroksen ikkunaan korkeuden funktiona on laskettu kuvaan A6. Säteilylvuot ylemmän kerroksen ikkunan alaosissa ovat niin suuria, että ne todennäköisesti riittävät joko rikkomaan ikkunan tai sytyttämään lähellä ikkunaa olevia tekstiilejä tai puisia

huonekaluja. Pienillä korkeuksilla malli kuitenkin antaa tuloksena epäfysikaalisen korkeita säteilytasoja.



Kuva A6. Esimerkki Foleyn ja Drysdalen kehittämän mallin ennustamasta säteilyn voimakkuudesta kahden lasiseinän välissä. Pienillä korkeuksilla malli antaa tuloksena epäfysikaalisen korkeita säteilytasoja.

Viitteet liitteeseen A

Foley, M. & Drysdale, D. 1995. Heat transfer from flames between vertical parallel walls. Fire Safety Journal, Vol. 24, s. 53–73.

Hietaniemi, J., Kallonen, R. & Mikkola, E. 1999. Burning Characteristics of Selected Substances: Production of Heat, Smoke and Chemical Species. Fire and Materials, Vol. 23, No. 4, s. 171–186.

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

Kunkelmann, J. 1997. Auswirkung von Schallchutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und ausserhalb der Brandwohnung. Forschungsbericht No 105, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). ISSN 0170-0060

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

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

Mikkola, E. & Wichman, I.S. 1989. On the Thermal Ignition of Combustible Materials. *Fire and Materials*. Vol. 14, s. 87–96.

Mikkola, E. 1990. Puun hiiltyminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimuksia 689. 40 s.

Quintiere, J. G. 1995. Surface flame spread. Teoksessa: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (2. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

Tewarson, A. & Khan, M. M. 1989. Fire Propagation Behavior of Electrical Cables. Teoksessa: *Fire Safety Science, Proceedings 2nd International Symposium*. Hasemi, Y., Sekizawa, A. and Seeger, P. G. Tokyo, Japan: June 13–17, 1988, Tokyo, Japan. New York: Hemisphere Publishing Corp. S. 791–800.

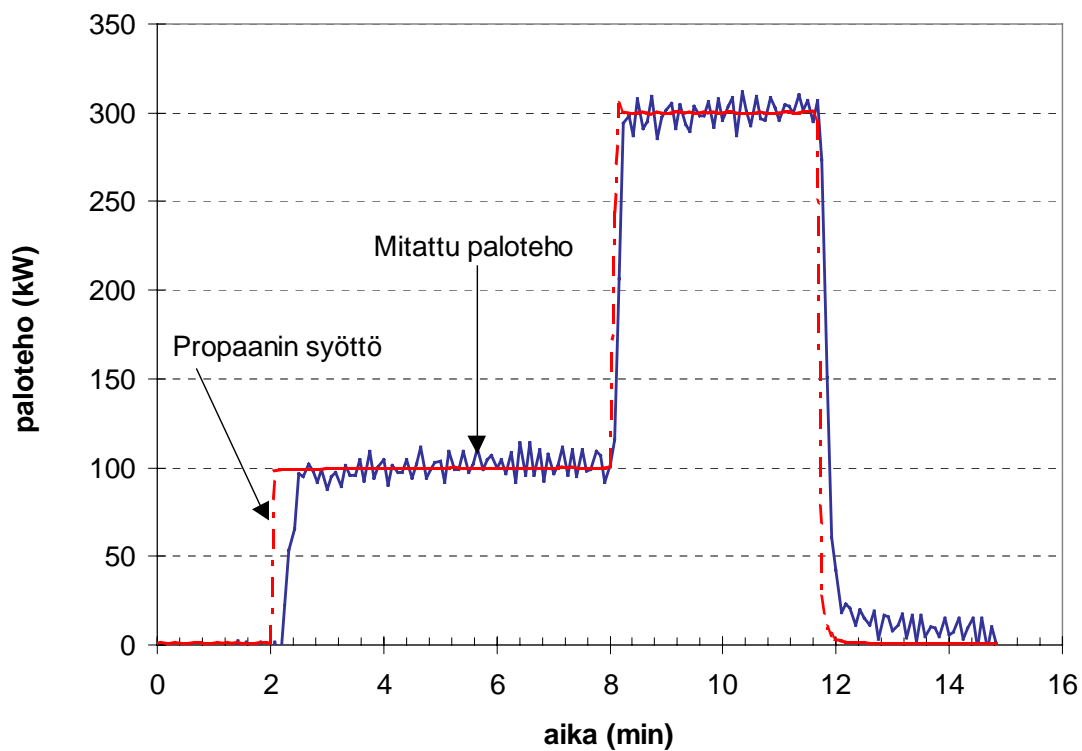
Tewarson, A. 1995. Generation of heat and chemical compounds in fires. Teoksessa: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (2. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

Zukoski, E. E., Kubota, T. & Cetegen, B. 1980. Entrainment in Fire Plumes. *Fire safety Journal*, Vol. 3, s. 107–121.

Liite B: Suuren mittakaavan ontelopalokokeiden yksityiskohtia

Palotehon kalibrointi

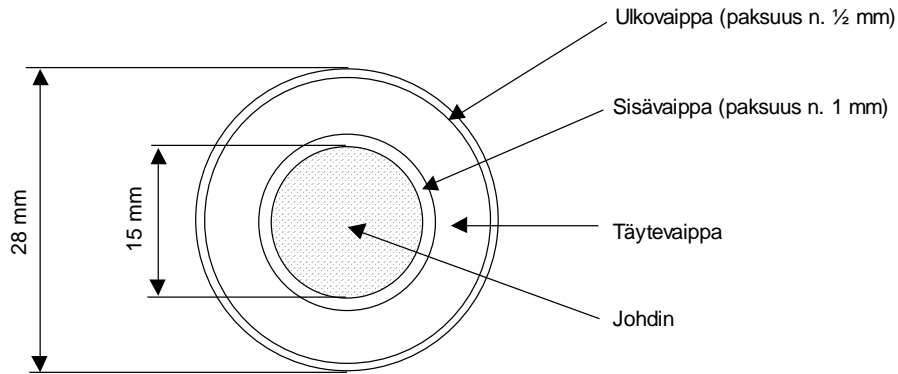
Koejärjestelyn tiiviys ja palokaasujen keräämisen tehokkuus olivat riittävän hyviä palotehomittauksia varten. Kuvassa B1 on esitetty mitatun palotehon kalibrointitulokset: mitattu paloteho on erittäin hyvällä tarkkuudella sama kuin polttimen syöttämä paloteho.



Kuva B1. Palotehon mittauksen tarkkuuden tarkistus: polttimeen syötetyn propanin määrän perusteella laskettu paloteho ja mitattu paloteho.

Kaapeleiden rakenteen yksityiskohdat

PEX-muovivaippaisen kaapelin rakenne esitetään kuvassa B2 ja yksityiskohtaiset tiedot sen rakenteesta on esitetään taulukossa B1. Tietoja palosuojatun kaapelin rakenteesta on annettu taulukossa B2.



Kuva B2. PEX-muovivaippaisen kaapelin rakenne.

Taulukko B1. Tietoja PEX-muovivaippaisen kaapelin rakenteesta.

	Materiaali	Massa/pituusyksikkö (g/m)	Paino-osuus (%)
Johdin	alumiini	385	47,0
Sisävaippa	PEX-muovi	30	3,7
	noki	13	1,6
Täytevaippa	PEX-muovi	348	42,2
Ulkovaippa	PEX-muovi	30	3,7
	noki	13	1,6
	yhteensä:	820	

Taulukko B2. Tietoja palosuojatun kaapelin rakenteesta.

	Materiaali	Massa/pituusyksikkö (g/m)	Paino-osuus (%)
Johdin	Kupari	1717	57,4
Eristys	Kiille/ lasikuitunauha	42	1,4
	PEX	121	4,0
Sydänlanka	EVA/PE/ATH-seos	29	1,0
Täytevaippa	Kumi/ATH-seos	494	16,5
Kons. johdin	Kupari	232	7,8
Sidenauha	PP	7	0,2
Ulkovaippa	EVA/PE/ATH-seos	348	11,6
	Yhteensä	2990	

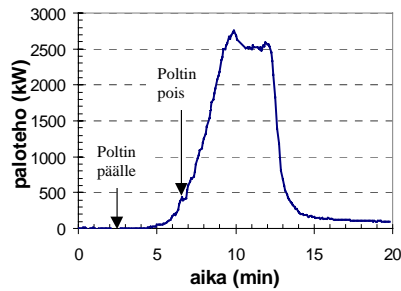
Taulukossa olevat lyhenteet tarkoittavat seuraavaa: ATH - alumiinitrihydroksidi (Al(OH)₃), EVA - etyyli/vinyylisetaatti, PE - polyeteeni, PEX - silloitettu polyeteeni ja PP - polypropeeni.

Liite C: Suuren mittakaavan ontelokokeiden mittaustulokset

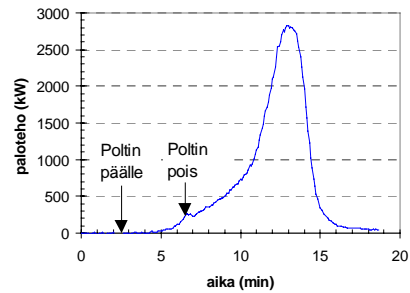
Kaapelikokeet

Kaapelikokeissa mitatut palotehot on esitetty kuvassa C1, kuuman kerroksen lämpötilat kuvassa C2 ja 5 cm kaapelien yläpuolelta mitatut lämpötilat kuvissa C3 ja C4.

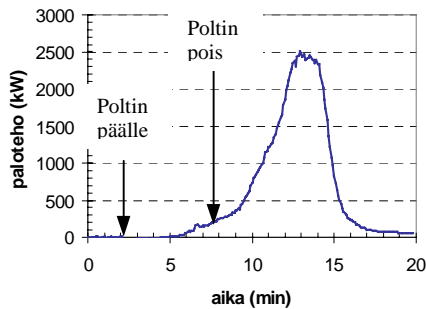
a)



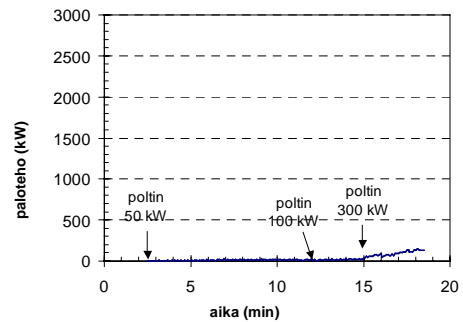
b)



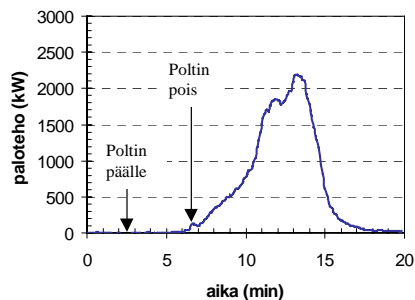
c)



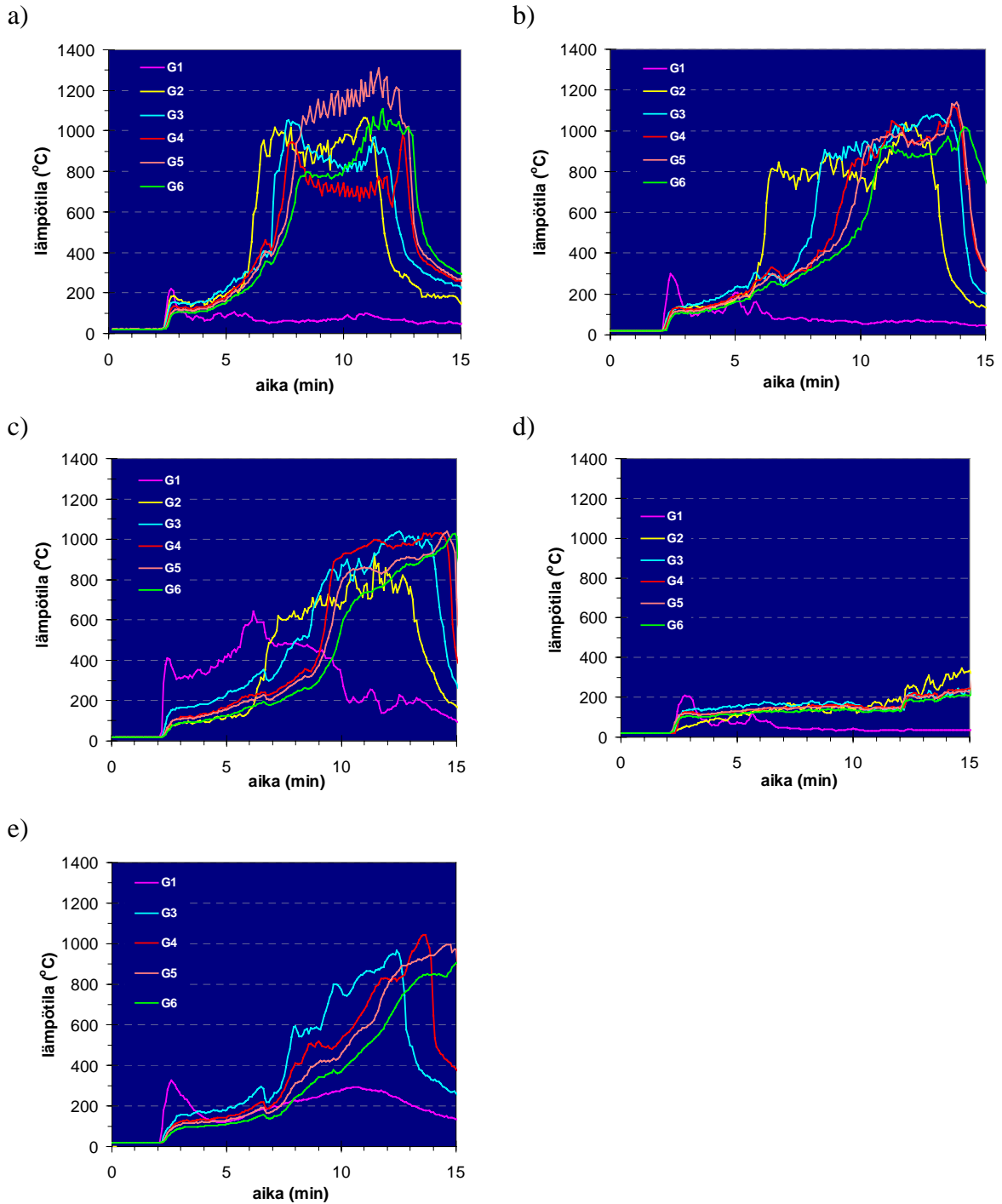
d)



e)

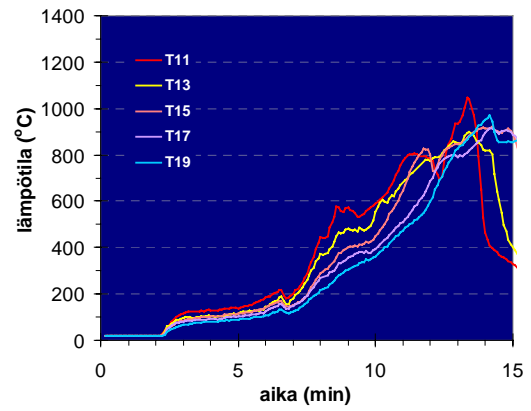
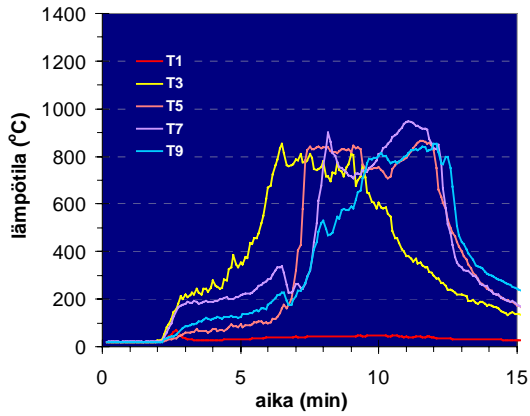


Kuva C1. Kaapelikokeissa mitatut kaapeleiden luovuttamat palotehot (polttimen osuus poistettu): a) kaapelikoe 1, palokuormana 10 PEX-kaapelia; b) kaapelikoe 2, palokuormana 6 PEX-kaapelia; c) kaapelikoe 3, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon keskellä virtauskuristin; d) kaapelikoe 4, palokuormana palosuojattu kaapeli ja e) kaapelikoe 5, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon korkeutta vähennetty 60 cm:stä 43 cm:iin.

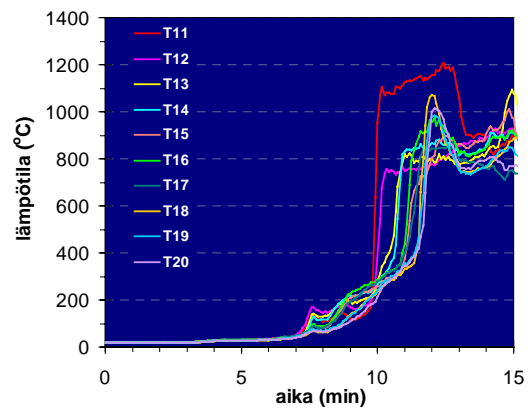
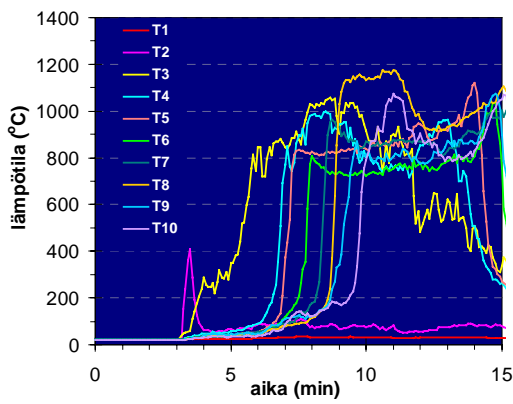


Kuva C2. Kaapelikokeissa mitatut kuumen kerroksen lämpötilat: a) kaapelikoe 1, palokuormana 10 PEX-kaapelia; b) kaapelikoe 2, palokuormana 6 PEX-kaapelia; c) kaapelikoe 3, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon keskellä virtauskuristin; d) kaapelikoe 4, palokuormana palosuojattu kaapeli ja e) kaapelikoe 5, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon korkeutta vähennetty 60 cm:stä 43 cm:iin.

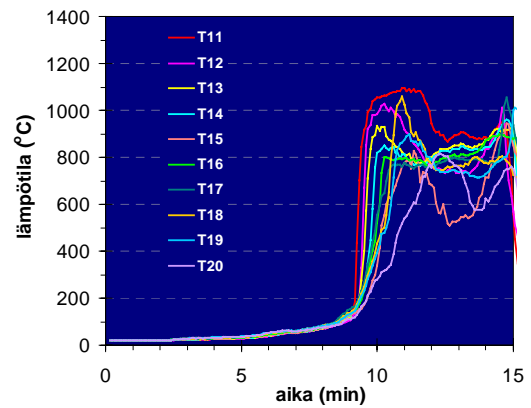
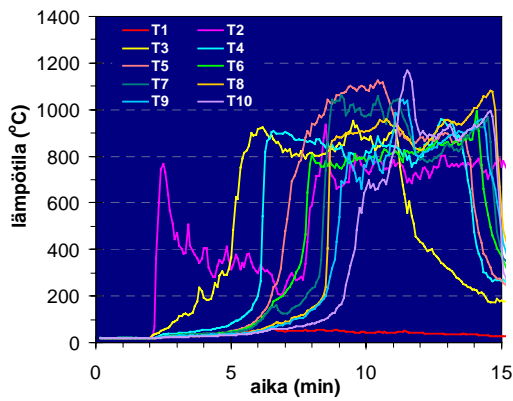
a)



b)

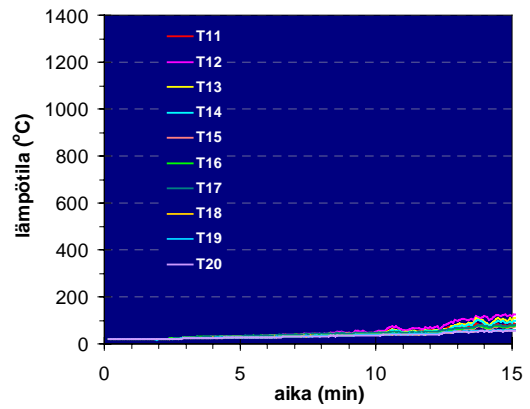
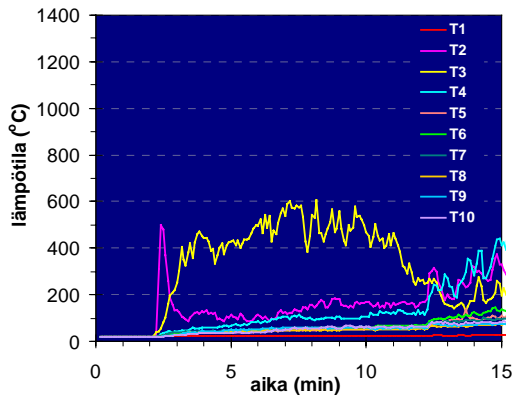


c)

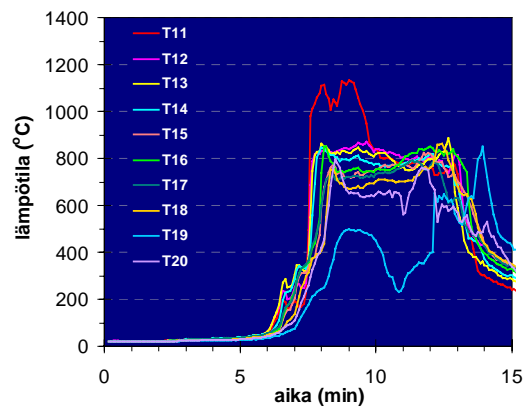
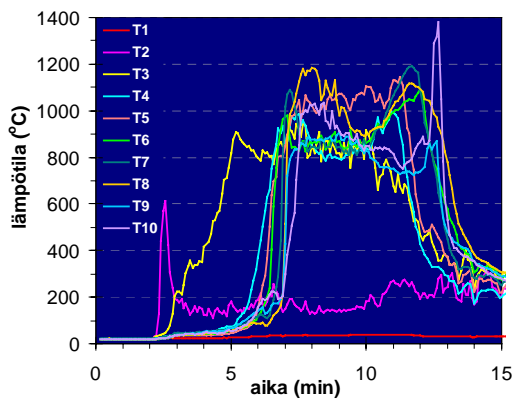


Kuva C3. Kaapelikokeissa 5 cm kaapeleiden yläpuolelta mitatut lämpötilat:
 a) kaapelikoe 1, palokuormana 10 PEX-kaapelia; b) kaapelikoe 2, palokuormana 6 PEX-
 kaapelia; c) kaapelikoe 3, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon keskellä virtauskuristin.

a)



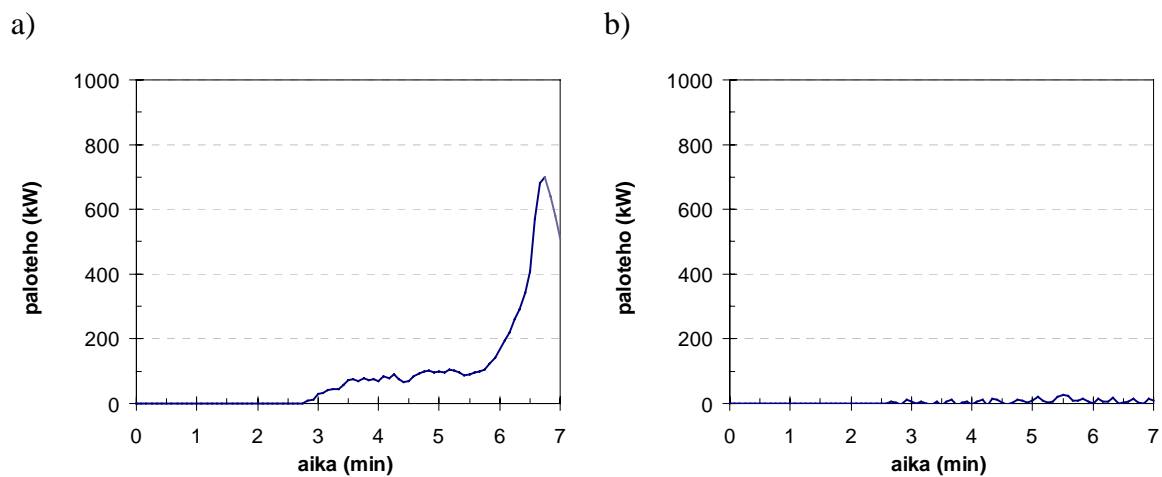
b)



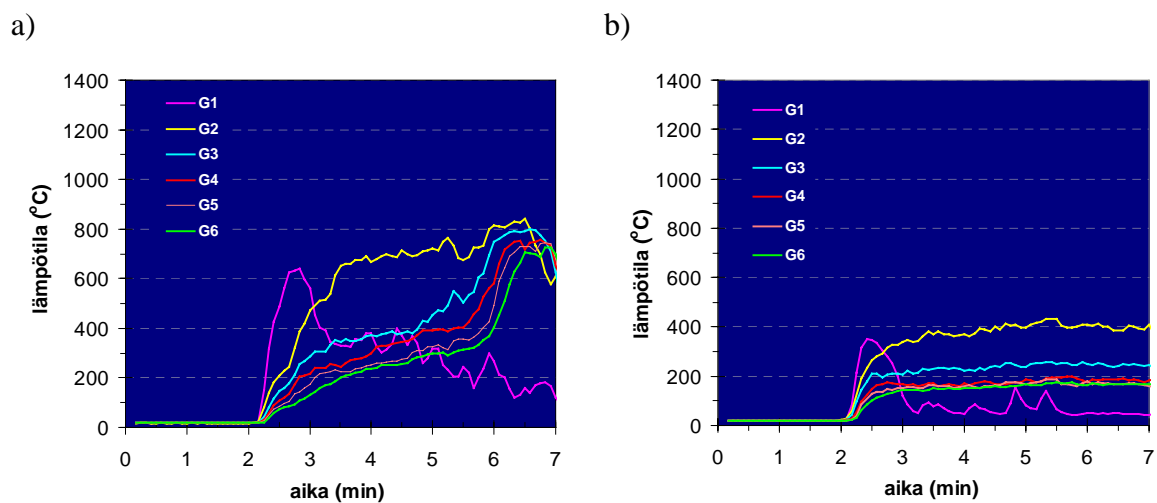
Kuva C4. Kaapelikokeissa 5 cm kaapeleiden yläpuolelta mitatut lämpötilat: a) kaapelikoe 4, palokuormana palosuojattu kaapeli ja b) kaapelikoe 5, palokuormana 6 PEX-kaapelia, ontelon korkeutta vähennetty 60 cm:stä 43 cm:iin.

Puuontelokokeet

Puuontelokokeiden palotehotulokset on esitetty kuvassa C5, kuuman kerroksen lämpötilat kuvassa C6 ja polttimen puoleiselta seinältä mitatut lämpötilat kuvassa C7.

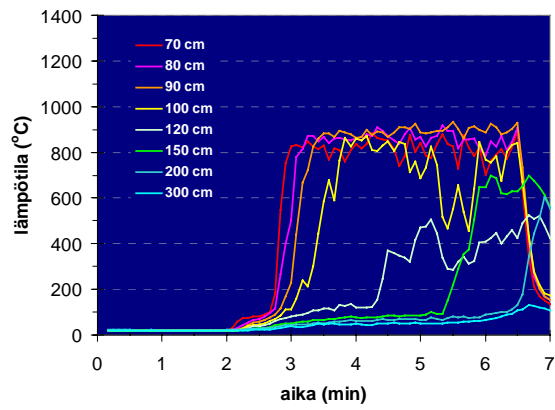


Kuva C5. Puuontelokokeissa mitatut puuverhoilujen luovuttamat palotehot (polttimen osuus poistettu): a) suojaamaton puuontelo ja b) palosuojattu puuontelo.

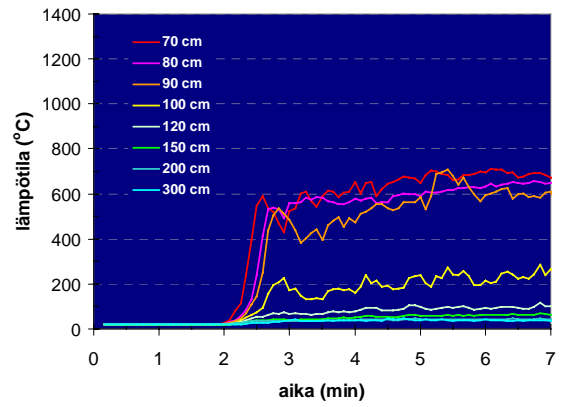


Kuva C6. Puuontelokokeissa mitatut kuuman kerroksen lämpötilat: a) suojaamaton puuontelo ja b) palosuojattu puuontelo.

a)



b)



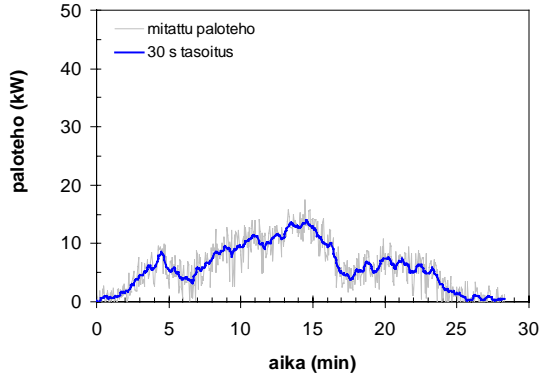
Kuva C7. Puumontelokokeissa polttimeen puoleiselta seinältä mitatut lämpötilat: a) suojaamaton puuontelo ja b) palosuojattu puuontelo.

Liite D: Pienen mittakaavan ontelokokeiden mittaustulokset

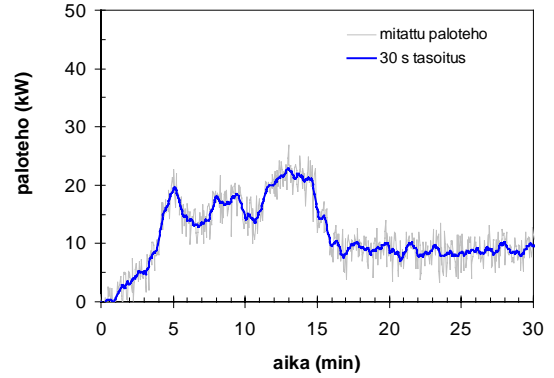
PEX-kaapelin vaipan materiaalista tehty palokuorma

Pienen mittakaavan kokeissa, joissa käytettiin PEX-kaapelin vaipan materiaalista tehtyä palokuormaa, mitatut palotehot on esitetty kuvassa D1. Kuumen kerroksen lämpötilat on esitetty kuvassa D2 ja kaapelin pinnan lämpötilaa osoittavat lämpötilalukemat kuvassa D3.

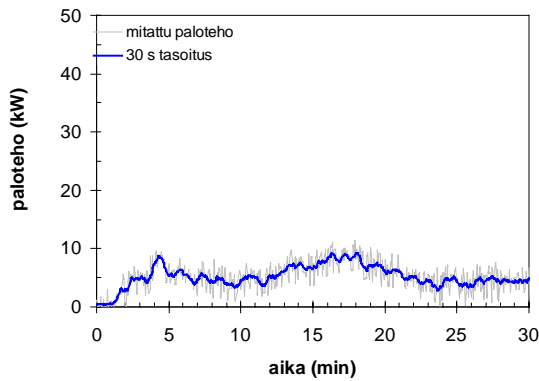
a) korkeus 10 cm



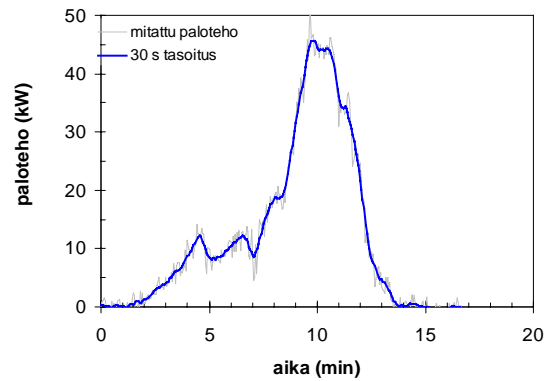
b) korkeus 10 cm, suurempi palokuorma



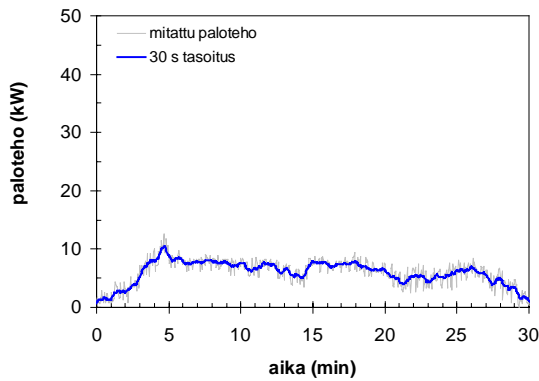
c) korkeus 7,5 cm



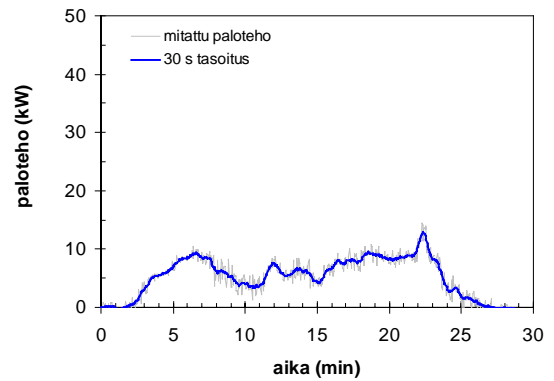
d) korkeus 20 cm



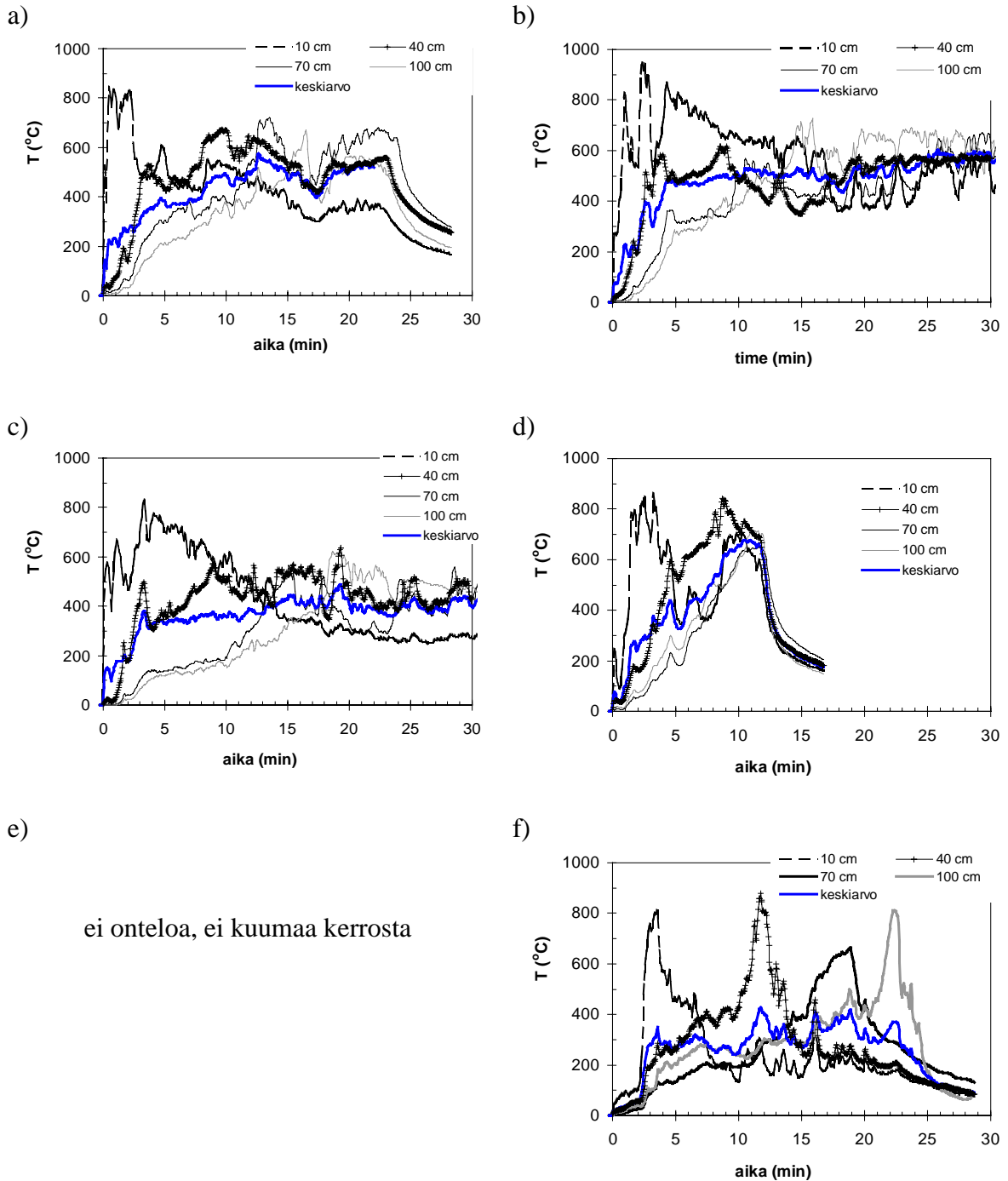
e) vapaassa tilassa palava palokuorma



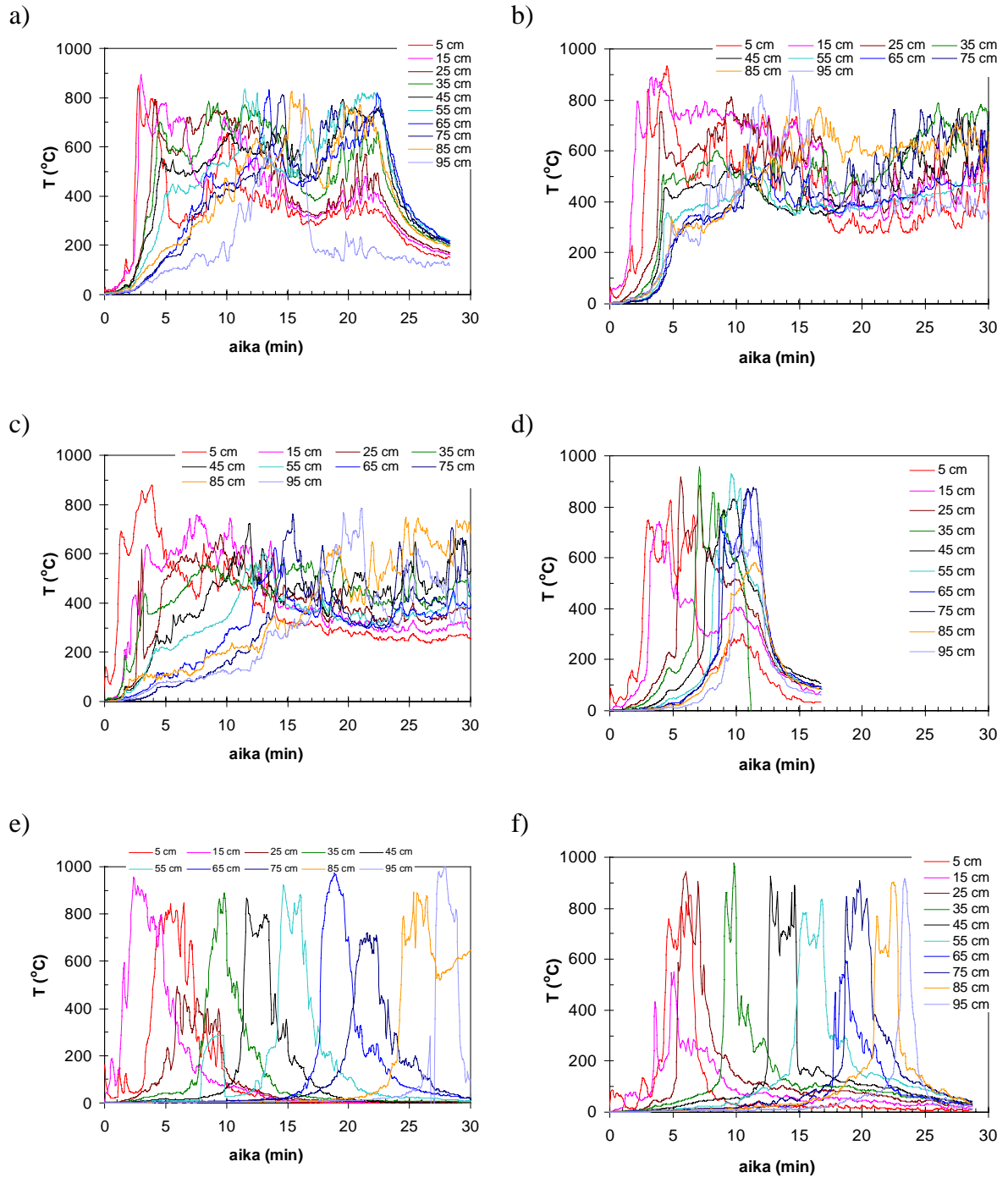
f) korkeus 30 cm



Kuva D1. Palotehot kokeissa, joissa käytettiin PEX-kaapelin vaipan materiaalista tehtyä palokuormaa (sytetyslähteen palotehon osuus poistettu): a) koe 1, ontelon korkeus 10 cm, palokuormana 6 suikaletta; b) koe 2, ontelon korkeus 10 cm, palokuormana 10 suikaletta; c) koe 3, ontelon korkeus 7,5 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2; d) koe 4, ontelon korkeus 20 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2; e) koe 5, ei onteloa, sama palokuorma kuin kokeessa 2 ja f) koe 6, ontelon korkeus 30 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2.



Kuva D2. Kuumen kerroksen lämpötilan nousu kokeissa, joissa käytettiin PEX-kaapelin vaipan materiaalista tehtyä palokuormaa: a) koe 1, ontelon korkeus 10 cm, palokuormana 6 suikaletta; b) koe 2, ontelon korkeus 10 cm, palokuormana 10 suikaletta; c) koe 3, ontelon korkeus 7,5 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2; d) koe 4, ontelon korkeus 20 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2; e) koe 5, ei onteloa, sama palokuorma kuin kokeessa 2 ja f) koe 6, ontelon korkeus 30 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2.

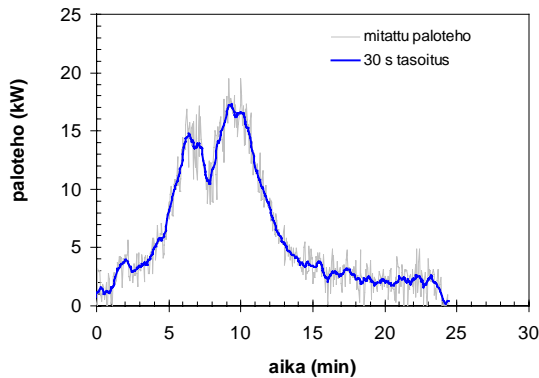


Kuva D3. Polttoaineen pinnan lämpötilan nousu kokeissa, joissa käytettiin PEX-kaapelin vaipan materiaalista tehtyä palokuormaa: a) koe 1, ontelon korkeus 10 cm, palokuormana 6 suikaletta; b) koe 2, ontelon korkeus 10 cm, palokuormana 10 suikaletta; c) koe 3, ontelon korkeus 7,5 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2; d) koe 4, ontelon korkeus 20 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2; e) koe 5, ei onteloa, sama palokuorma kuin kokeessa 2 ja f) koe 6, ontelon korkeus 30 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 2.

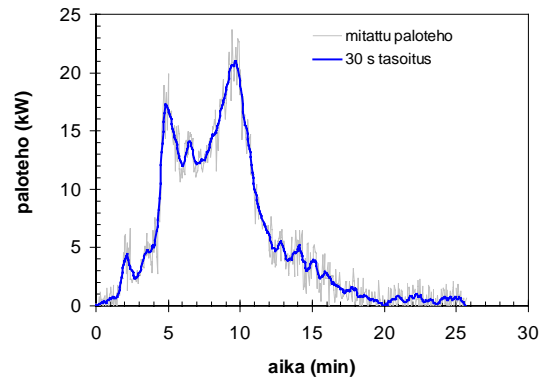
Vaneripalokuorma

Pienen mittakaavan vaneriontelokokeissa mitatut palotehot on esitetty kuvassa D4. Kuuman kerroksen lämpötilat on esitetty kuvassa D5 ja kaapelin pinnan lämpötilaa osoittavat lämpötilalukemat kuvassa D6.

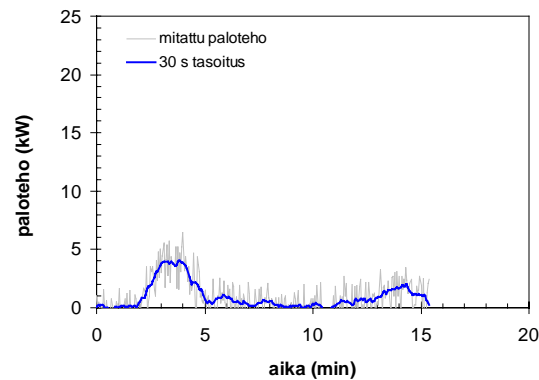
a) korkeus 10 cm



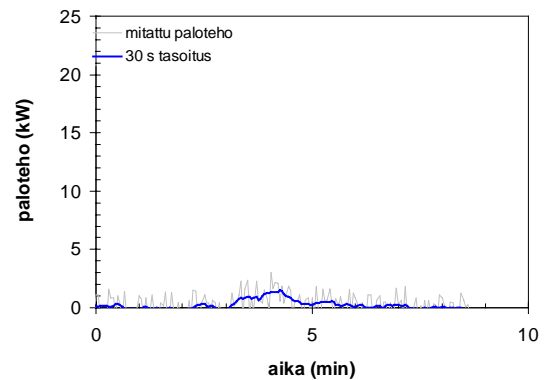
b) korkeus 10 cm, vaneria myös lattialla



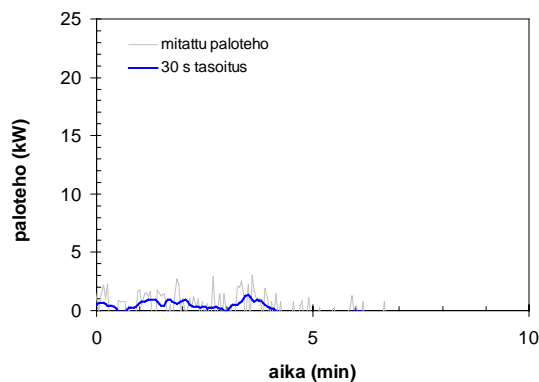
c) korkeus 20 cm



d) korkeus 5 cm

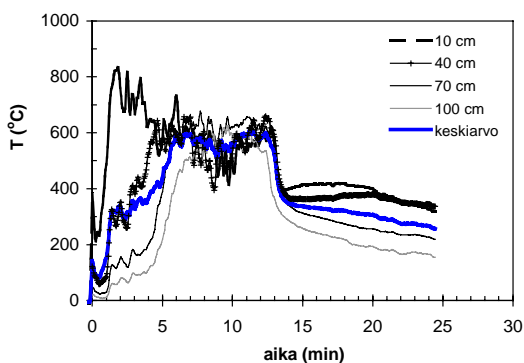


e) palosuojattu vaneri, korkeus 10 cm

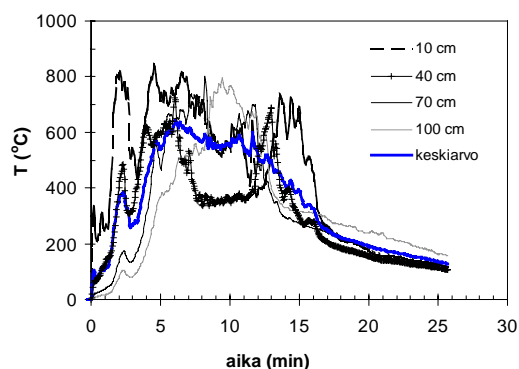


Kuva D4. Palotehot vaneriontelokokeissa (sytytyslähteen palotehon osuus poistettu): a) koe 1, ontelon korkeus 10 cm, palokuorma seinillä ja katossa; b) koe 2, ontelon korkeus 10 cm, palokuorma seinillä, katossa ja lattialla; c) koe 3, ontelon korkeus 20 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 1; d) koe 4, ontelon korkeus 5 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 1 ja e) koe 5, palokuormana palosuojattu vaneri seinillä ja katossa.

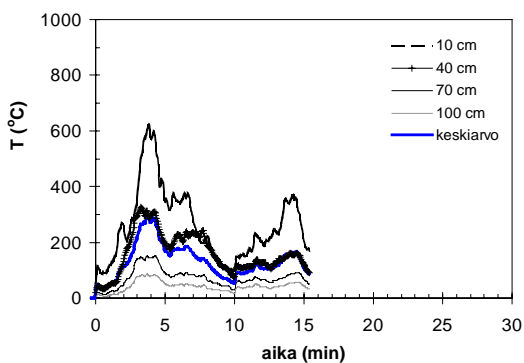
a) korkeus 10 cm



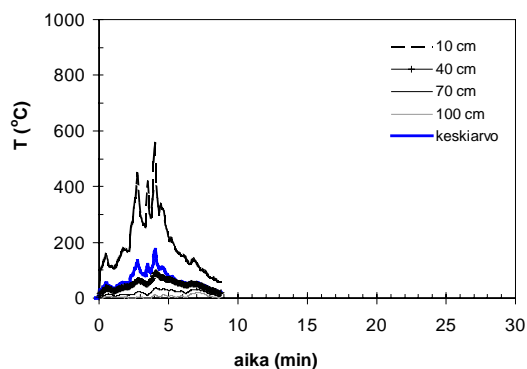
b) korkeus 10 cm, vaneria myös lattialla



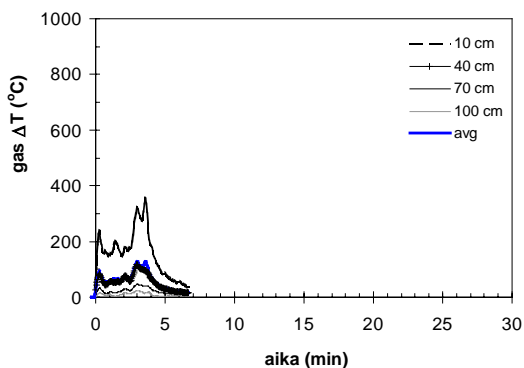
c) korkeus 20 cm



d) korkeus 5 cm

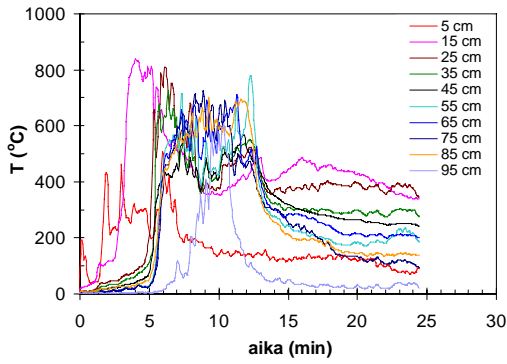


e) palosuojattu vaneri, korkeus 10 cm

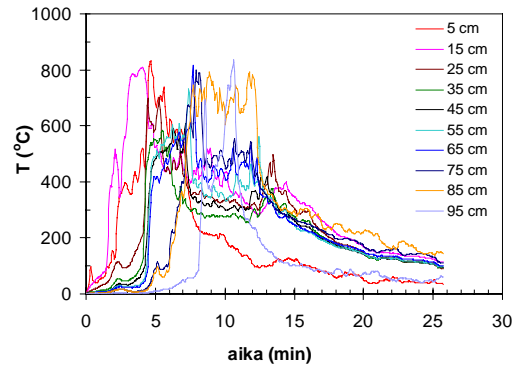


Kuva D5. Kuuman kerroksen lämpötilan nousu vaneriontelokokeissa: a) koe 1, ontelon korkeus 10 cm, palokuorma seinillä ja katossa; b) koe 2, ontelon korkeus 10 cm, palokuorma seinillä, katossa ja lattialla; c) koe 3, ontelon korkeus 20 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 1; d) koe 4, ontelon korkeus 5 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 1 ja e) koe 5, palokuormana palosuojattu vaneri seinillä ja katossa.

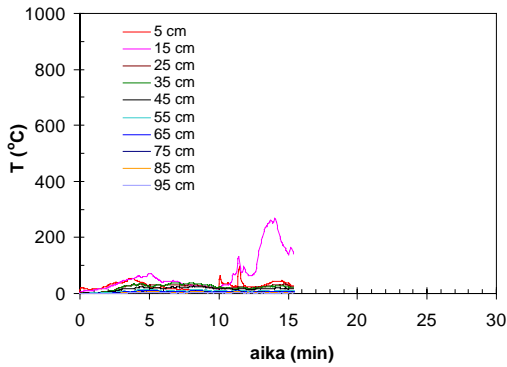
a) korkeus 10 cm



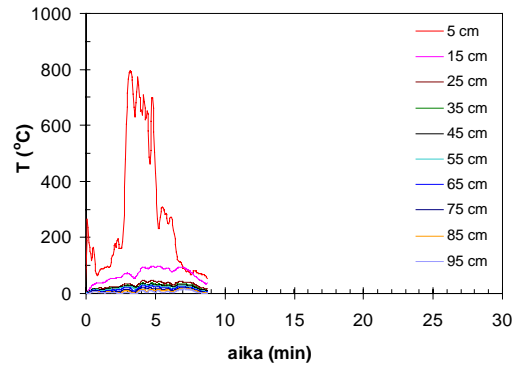
b) korkeus 10 cm, vaneria myös lattialla



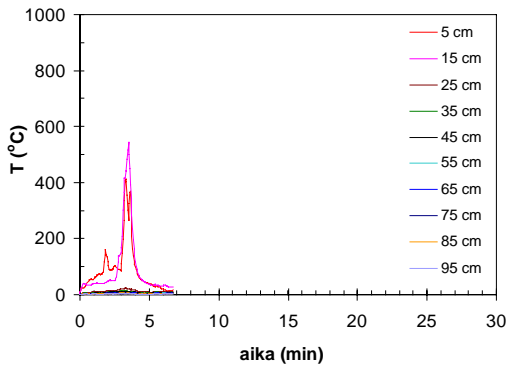
c) korkeus 20 cm



d) korkeus 5 cm



e) palosuojattu vaneri, korkeus 10 cm



Kuva D6. Polttoaineen pinnan lämpötilan nousu vaneriontelokokeissa: a) koe 1, ontelon korkeus 10 cm, palokuorma seinillä ja katossa; b) koe 2, ontelon korkeus 10 cm, palokuorma seinillä, katossa ja lattialla; c) koe 3, ontelon korkeus 20 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 1; d) koe 4, ontelon korkeus 5 cm, sama palokuorma kuin kokeessa 1 ja e) koe 5, palokuormana palosuojattu vaneri seinillä ja katossa.

Liite E: VTT:llä tehtyjen puujulkisivujen palokokeiden tuloksia

Tässä liitteessä on esitetty yhteenveto VTT:n tutkimustuloksista, jotka koskevat liekkien leviämistä puujulkisivuilla. Tarkasteltavana oli palon leviämisenopeus ja siihen liittyvät aikaskaalat sekä palon leviämisen vähentämiseen tarjolla olevien ratkaisujen vaikutus.

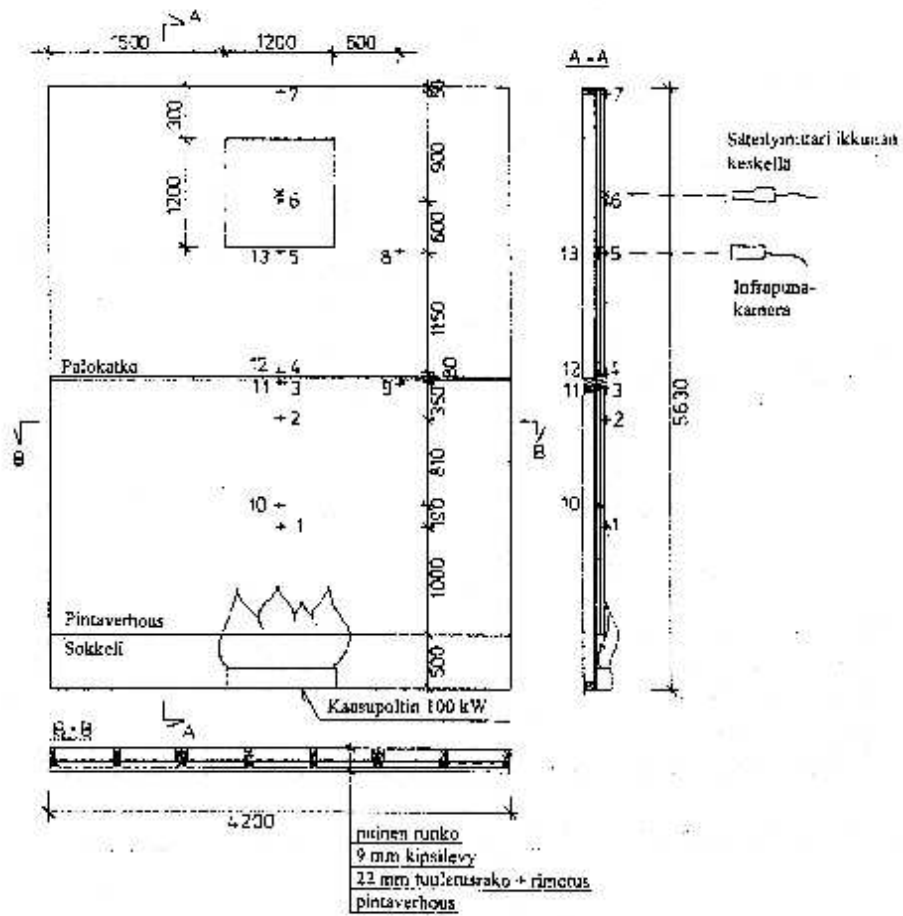
Julkisivun korkeuden vaikutus: palon leviämisenopeus ja aikaskaalat

Liekin leviämistä palavaa materiaalia olevan julkisivun pinnalla on tutkittu aikaisemmin puujulkisivujen paloturvallisuutta käsittelevässä tutkimusprojektissa (Hakkarainen ym. 1996, Hakkarainen ym. 1997 ja Hakkarainen & Oksanen 2001). Kokeita suoritettiin sekä keskisuuressa että täydessä mittakaavassa käyttäen kahta eri palotilannetta (ulkoinen sytytyslähde ja lieskahtanut huonepalo) ja useita erilaisia koekappaleita.

Sprinklatussa rakennuksessa huonepalon lieskahdus, joka johtaa suureen julkisivun palorasitukseen, on epätodennäköinen. Tällöin julkisivu voi altistua vain rakennuksen ulkoiselle sytytyslähteelle, joka voi olla esimerkiksi roska- tai rakennusjätäkasa. Sprinklaamattomien rakennusten tapauksessa lieskahdusmahdollisuus on otettava huomioon.

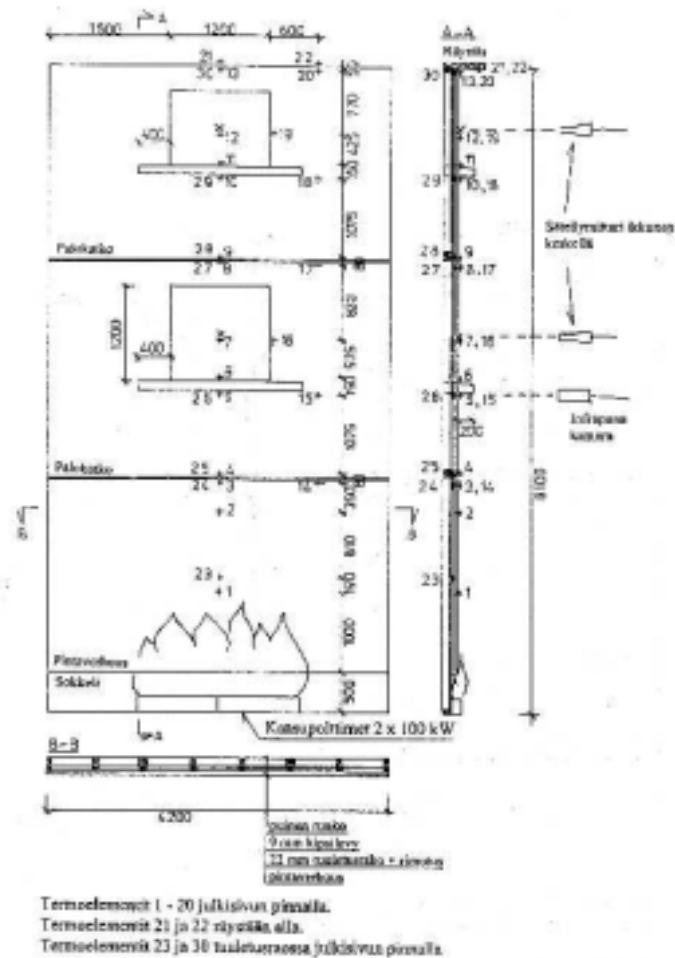
Täyden mittakaavan kokeet: ulkoinen sytytyslähde

Suuressa mittakaavassa testattiin kuusi erilaista julkisivurakennetta. Koekappaleista viisi oli kaksikerroksisia (koko 4,2 m × 5,6 m) ja yksi kolmikerroksinen (koko 4,2 m × 8,1 m). Pintamateriaali kiinnitettiin koekappaleen yläosaan siten, että sen alareuna oli 0,5 m lattiatason yläpuolella. Koekappaleiden mitat ja rakenteet esitetään kuvissa E1 ja E2. Tutkitut rakenteet esitellään taulukossa E1.



Termoelementit 1 - 9 julkisivun pinnalla.
Termoelementit 10 - 13 tuuletusraossa julkisivun pinnalla.

Kuva E1. Kaksikerroksisen koekappaleen rakenne suuren mittakaavan kokeissa ulkoisen sytytyslähteen tapauksessa.



Kuva E2. Kolmikerroksisen koekappaleen rakenne suuren mittakaavan kokeissa ulkoisen sytytyslähteen tapauksessa.

Taulukko E1. Suuren mittakaavan koekappaleet.

No.	Pinta- materiaali	Pak- suus (mm)	Pintäkäsittely	Profiili	Kerros- luku	Huomautuksia
L1	kuusipaneeli	18	maalattu	tasainen	2	
L2	kuusipaneeli	18	palonsuojakäsittely ja maalattu	tasainen	2	
L3	kuusipaneeli	18	maalattu	200 mm uloke kerrosrajalla	2	
L4	kuusipaneeli	18	maalattu	200 mm ulokkeet ikku- noiden alla, pituus 2000 mm	3	
L5	kuusipaneeli	18	maalattu	200 mm uloke kerrosrajalla, sisänurkka	2	seinien leveydet 4,2 ja 2,4 m
L6	vaneri	12	maalattu	tasainen	2	Wisa-SP

Sytytyslähteenä käytettiin kaksikerroksisilla koekappaleilla propaanikaasupoltinta 100 kW:n paloteholla. Kolmikerroksisen julkisivun palokokeessa käytettiin kahta rinnakkaista poltinta, joiden paloteho oli yhteensä 200 kW. Sytytyslähteen kaasunsyöttö suljettiin 30 minuutin kuluttua sytytyksestä. Koe lopetettiin, kun koekappaleen yläreuna liekehti voimakkaasti tai liekit olivat lähes sammuneet itsestään (jos liekkirintama ei edennyt yläreunaan asti).

Kokeiden aikana mitattiin ikkunoiden keskipisteeseen kohdistuvaa lämpösäteilyn intensiteettiä sekä lämpötiloja koekappaleen pinnalla ja tuuletusraossa. Lisäksi havainnoitiin koekappaleen syttymisaika ja liekkirintaman eteneminen julkisivun etupinnalla. Kokeet video- ja valokuvattiin.

Liekkirintaman eteneminen koekappaleiden etupinnalla esitetään taulukossa E2.

Taulukko E2. Liekkirintaman eteneminen suuren mittakaavan kokeissa: saapumisajat mittalinjoille (min:s). Korkeus on mitattu pintamateriaalin alareunasta (50 cm lattiatason yläpuolella).

Näyte	Syttyminen	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	2. krs, alareuna 240 cm	2. krs, ikkunan alareuna 360 cm	3. krs, alareuna 510 cm	3. krs, ikkunan alareuna 630 cm	Koekappaleen yläreuna 510 cm/ 760 cm	Sammutus
L1	0:55	1:50	5:55	9:50	10:55	11:15	14:55	-	-	40:00	46:00
L2	0:50	2:15	6:15	15:20	21:55	34:10	ei	-	-	ei	47:00
L3	0:40	1:50	7:00	9:50	12:05	ei	ei	-	-	ei	35:45
L4	0:40	1:55	4:50	9:40	13:25	20:20	32:00	45:20	52:30	63:10	65:00
L5	0:40	1:40	2:30	5:00	5:20	ei	ei	-	-	ei	40:00
L6	0:50	2:50	4:40	5:20	6:50	9:50	11:40	-	-	51:50	60:00

Täyden mittakaavan julkisivukokeiden perustapaus oli koekappale L1, jonka pintamateriaali oli maalattu kuusipaneeli. Liekit levisivät kaksikerroksisen koekappaleen toiseen kerroksen alareunaan noin 10 minuutissa ja koekappaleen yläreunaan noin 40 minuutissa. Palon leviämisen hidastuminen johtuu ulkoisen sytytyslähteen vaikutuksen vähenemisestä etäisyyden kasvaessa.

Parantamalla julkisivumateriaalin palo-ominaisuuksia, so. palosuojaamalla, liekin leviäminen koekappaleen (L2) yläreunaan saatiin estettyä. Ulokkeiden vaikutusta liekkirintaman etenemiseen käsitellään myöhemmin.

Täyden mittakaavan kokeet: sytytlähteenä huonepalon lieskahdus

Tässä koejärjestelyssä koekappaleet kiinnitettiin kevytbetonista valmistetun kolmikerroksisen testauslaitteiston julkisivuun, jonka koko (leveys \times korkeus) on 5,0 m \times 8,1 m. Kokeen aikana julkisivu altistui laitteiston ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevan palotilan ikkuna-aukosta ulos tuleville liekeille. Palotilan koko (leveys \times korkeus \times syvyys) on 4,0 m \times 2,6 m \times 2,2 m ja ikkuna-aukon koko (leveys \times korkeus) on 3,0 m \times 1,2 m (aukkotekijä $A\sqrt{h} / A_T = 0,079 \text{ m}^{1/2}$) tai 1,2 m \times 1,2 m ($A\sqrt{h} / A_T = 0,032 \text{ m}^{1/2}$). Palotilan seinät ja katto on valmistettu kevytbetonista. Katto on lisäksi päällystetty 50 mm:n paksuisella Kaowool-huovalla.

Palokuorma koostui 184 kg:sta puuritiloita, jotka pinottiin palotilan lattialle, ja 126 kg:sta lastulevyä, joka kiinnitettiin palotilan takaseinälle. Palokuorman tiheys oli siten noin 90 MJ/m² palotilan seinien, katon ja lattian yhteenlaskettua pinta-alaa kohti. Palokuorma sytytettiin puuritilojen alle sijoitetut heptaaniaaltaat sytyttämällä (heptaanin kokonaistilavuus 2 litraa).

Kokeen aikana mitattiin testilaitteiston ylempien kerrosten "ikkunoihin" kohdistuvaa lämpösäteilyä sekä lämpötiloja palotilan sisällä, julkisivun pinnalla, tuuletusraossa ja "räystäällä" koekappaleen yläosassa (ks. kuva E6). Mittaustulokset tallennettiin 10 sekunnin välein tietokoneohjattua tiedonkeruulaitteistoa käyttäen. Koekappaleen käyttäytymistä tarkkailtiin kokeen aikana ja se video- ja valokuvattiin.

Tässä yhteydessä tarkastellaan seuraavia kolmea koetta:

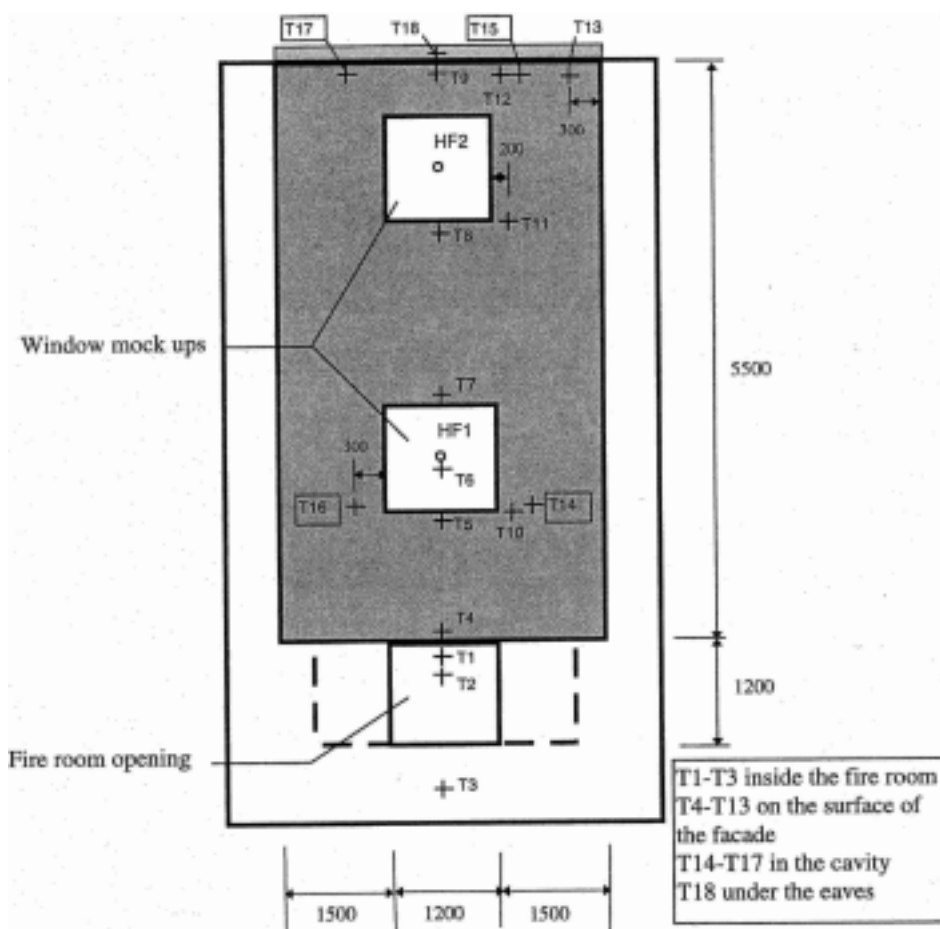
A) Julkisivu koostui puusta (72 % pinta-alasta) ja palamattomasta levystä ikkuna-aukkojen välissä. Palotilan aukon koko oli 3,0 m \times 1,2 m. 22 mm:n levyinen tuuletusrako oli muodostettu pystyrimoituksella. Tuuletusrako oli katkaistu kerrosrajoilta.

B) Julkisivu koostui puusta (76 % pinta-alasta) ja palamattomasta levystä ikkuna-aukkojen välissä. Palotilan aukon koko oli 1,2 m \times 1,2 m. 22 mm:n levyinen tuuletusrako oli muodostettu pystyrimoituksella. Tuuletusrako oli katkaistu kerrosrajoilta.

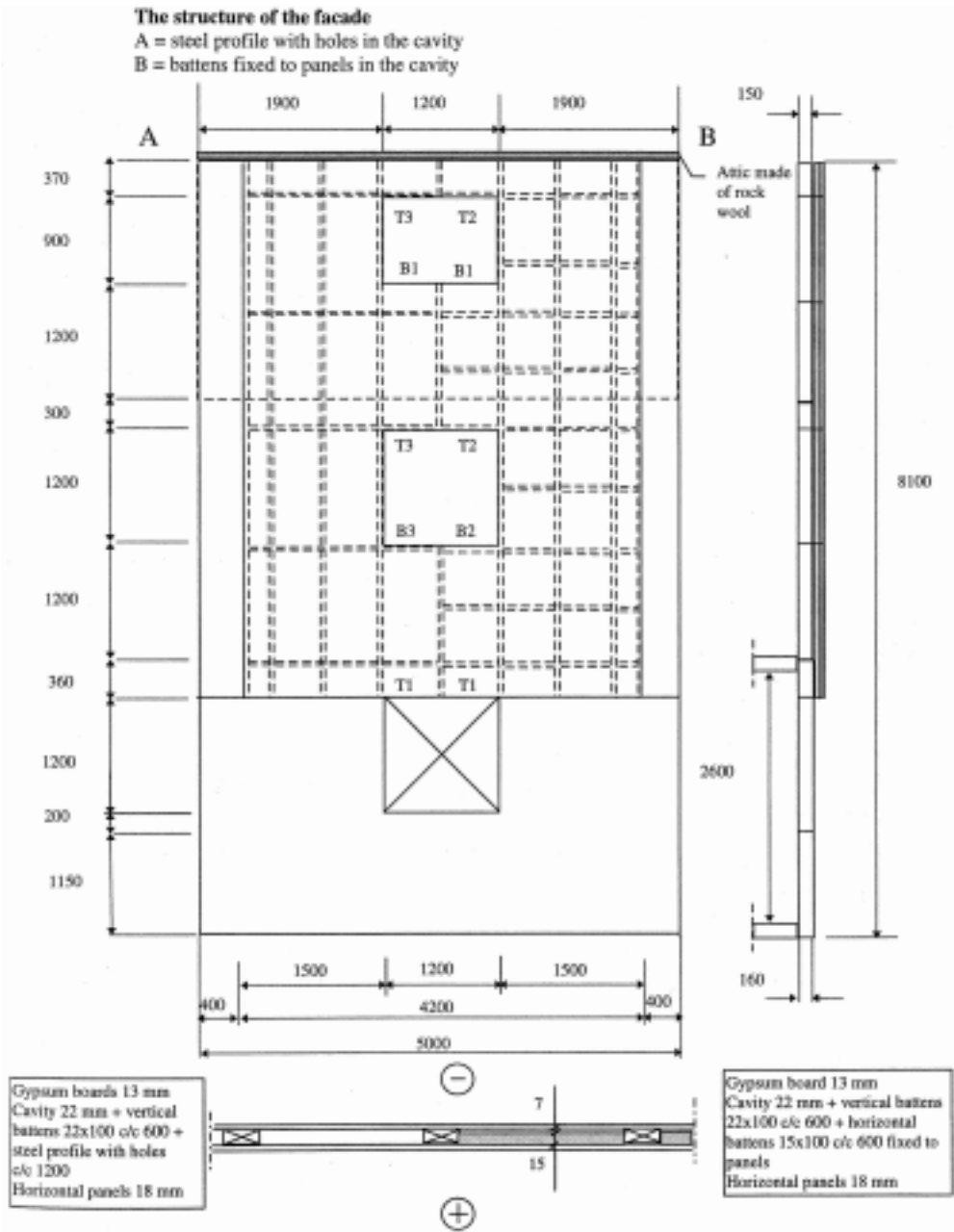
C) Julkisivu koostui puusta. Palotilan aukon koko oli 1,2 m \times 1,2 m. 22 mm:n levyinen tuuletusrako oli muodostettu pystyrimoituksella. Tuuletusrako oli katkaistu 2. ja 3. kerroksen kerrosrajalta. Lisäksi tuuletusrako oli jaettu osiin käyttämällä vaakasuoria rei'itettyjä teräsprofieileja (vasen puoli) tai vaakasuoria puurimoja (oikea puoli).

Koejärjestely esitetään kaavamaisesti kuvassa E3 ja koekappaleen C erityisjärjestelyt kuvassa E4. Kokeissa tarkasteltiin puun sijoittelun vaikutusta julkisivupaloon ja kahta erilaista julkisivuun kohdistuvaa palorasitusta. Palotilan aukon leveyden muuttaminen muuttaa ulos tulevan liekin muotoa, minkä seurauksena julkisivun säteilyaltistus muuttuu.

Koehavainnot esitetään taulukoissa E3 ja E4. Taulukkoon E3 on kerätty kokeiden aikana tehdyt visuaaliset havainnot ja taulukkoon E4 liekkirintaman leviämisestä kertovat ajanhetket. Puupinnan oletetaan syttyvän 350 °C:ssa.



Kuva E3. Täyden mittakaavan koekappaleiden kaavakuva. Sytytyslähteenä lieskahtanut huonepalo.



Kuva E4. Koekappaleen C rakenne.

Taulukko E3. Liekin leviäminen julkisivujen etupinnalla visuaalisiin havaintoihin perustuen (vp = vasen puoli, op = oikea puoli).

Tapahtuma	A	B	C
Lieskahdus	5 min 25 s	3 min 55 s	4 min 10 s
Julkisivun syttyminen	5 min 45 s	7 min 00 s (vp) 8 min 20 s (op)	5 min 10 s (vp) 5 min 10 s (op)
Liekit 2. kerroksen ikkunan alareunassa	6 min 00 s	8 min 00 s (vp) 8 min 30 s (op)	5 min 55 s (vp) 5 min 50 s (op)
Liekit 3. kerroksen ikkunan alareunassa	9 min 10 s	ei havaintoa (vp) 14 min 00 s (op)	ei havaintoa (vp) 12 min 45 s (op)
Liekit räystäällä	9 min 20 s	14 min 20 s (vp) 14 min 00 s (op)	– (vp) – (op)
Liekit vetäytyvät takaisin palotilaan	16 min 40 s	27 min	28 min
Sammutus	30 min	40 min	40 min

Taulukko E4. Ajat, jolloin lämpötilamittaukset saavuttivat 350 °C.

Mittauspiste	A	B	C
T5	5 min 35 s	8 min 35 s	5 min 40 s
T6	5 min 35 s	8 min 45 s	12 min 05 s
T7	5 min 40 s	8 min 55 s	12 min 20 s
T8	9 min 05 s	14 min 10 s	12 min 25 s
T9	9 min 05 s	T9 < 350 °C	T9 < 350 °C
T10	6 min 05 s	8 min 40 s	9 min 55 s
T11	9 min 15 s	13 min 55 s	12 min 35 s
T12	9 min 10 s	39 min 10 s	T12 < 350 °C

Lieskahduksen tapahduttua liekin leviäminen julkisivun pinnalla toisen kerroksen ikkunaan oli nopeampaa kokonaan puisella julkisivulla (C) kuin julkisivulla, jonka pinta ikkunoiden välissä oli tehty palamattomasta levystä (B). Toisen ja kolmannen kerroksen välillä tilanne oli päinvastainen: liekkirintama ei edennyt kokonaan puisen julkisivun yläreunaan.

Lähellä palotilaa julkisivu altistuu erittäin voimakkaalle lämpösäteilylle, joka sytyttää puumateriaalin nopeasti. Palamaton levy ikkuna-aukkojen välissä hidastaa palon etenemistä julkisivun pinnalla. Ylemmässä kerroksessa säteilyaltistus on pienempi. Tällöin tulee merkitseväksi se, palaako materiaali vain toiselta vai molemmilta puolilta. Jos tuuletusraon erityisjärjestelyillä pystytään estämään palon leviäminen tuuletusraossa, se hidastaa myös palon leviämistä julkisivun etupinnalla.

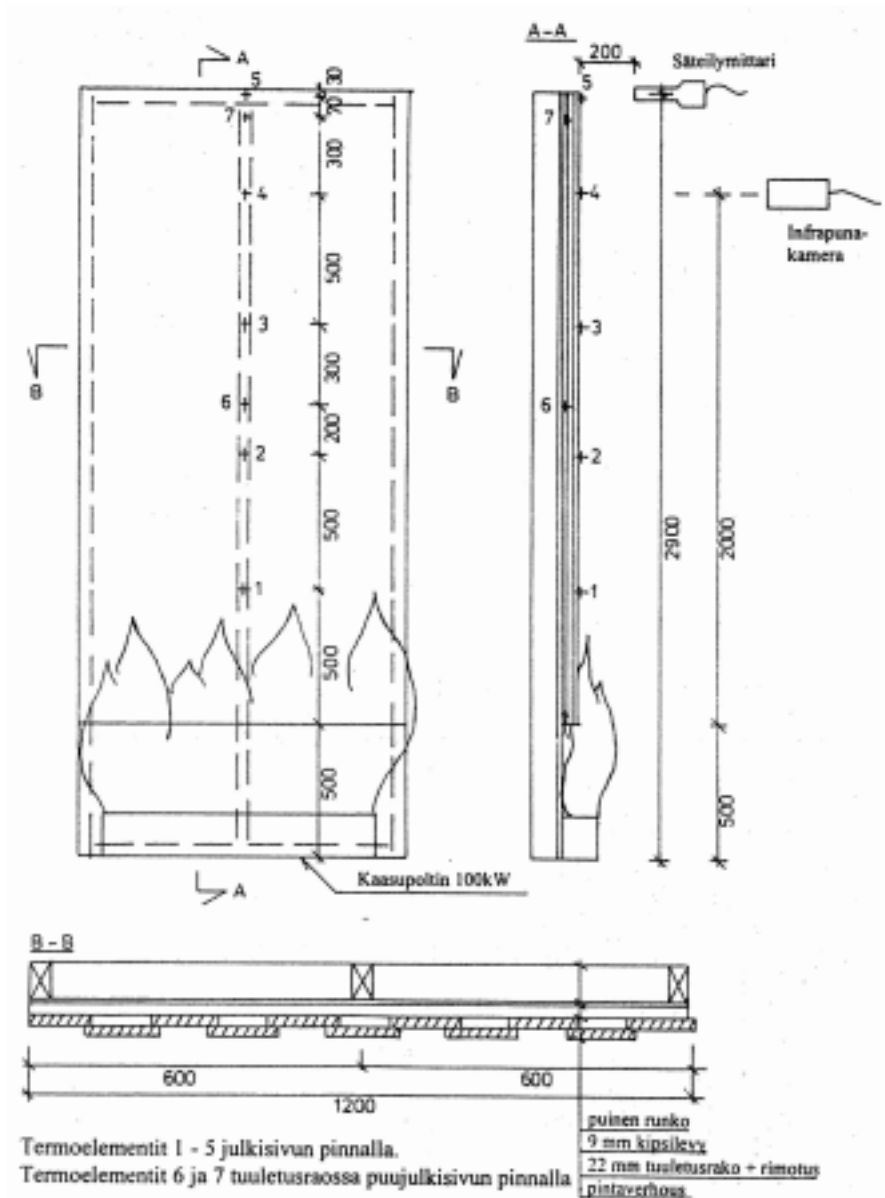
Palokatkojen, ulokkeiden ym. rakenteellisten ratkaisujen vaikutus

Rakenteellisten ratkaisujen vaikutusta liekin leviämiseen julkisivun pinnalla tutkittiin erityisesti keskisuudessa mittakaavassa.

Keskisuuren mittakaavan koejärjestely

Keskisuuren mittakaavan kokeiden suunnitteluperusteena oli tilanne, jossa puujulkisivun pinta syttyy rakennuksen ulkopuolella olevan suhteellisen pienen sytytyslähteen vaikutuksesta. Rakennuksen huoneiston oletettiin olevan sprinklattu, jolloin huonepalo sammuu alkuvaiheessa. Huonepalon lieskahduksen aiheuttamaa suurta palorasitusta ei julkisivuun siis kohdistu.

Keskisuuren mittakaavan koekappaleiden koko oli 1,2 m × 2,9 m. Koekappaleiden mitat ja rakenne esitetään kuvassa E5. Koekappale koostui puurungosta, 9 mm:n paksuisesta Gyproc-levystä ja pintamateriaalista. Tutkittava pintamateriaali kiinnitettiin koekappaleen yläosaan siten, että sen alareuna oli 0,5 m lattiatason yläpuolella. Puuverhouksen kiinnitys tehtiin käyttäen 22 mm:n paksuisia puurimoja pintamateriaalin ja Gyproc-levyn välissä, jolloin näytteen taakse muodostui normaali tuuletusrako. Tuuletusraon puurimoitus oli vaakasuuntainen lomalaudoituksella ja pystysuuntainen vaakalaudoituksella.



Kuva E5. Keskisuuren mittakaavan julkisivukoekappaleiden rakenne.

Palokokeiden sytytylähteenä käytettiin propaanikaasupoltinta, jonka koko oli 1,2 m × 0,1 m × 0,15 m (leveys × syvyys × korkeus). Poltin asetettiin pitkittäin koekappaleen alareunaan. Paloteholla 100 kW polttimen liekin korkeus oli n. 0,6 m ja koekappaleeseen aiheutuva maksimipalorasitus n. 40 kW/m². Kokeen kesto riippui koekappaleen käyttäytymisestä: koe päätettiin, kun koekappaleen yläreuna liekehti voimakkaasti tai viimeistään 30 minuutin kuluttua sytytyksestä.

Kokeiden aikana mitattiin koekappaleen palamisen aiheuttama paloteho hapenkulutuskalorimetriaan perustuen. Liekkien aiheuttama lämpösäteilyn intensiteetti mitattiin 20 cm etäisyydeltä koekappaleesta yläreunan tasolta. Koekappaleen

pintalämpötilaa ja lämpötilaa tuuletusraossa mitattiin termoelementeillä useissa pisteissä. Koekappaleen syttymisestä ja liekkirintaman etenemisestä eri mittalinjoille tehtiin havaintoja. Kokeet video- ja valokuvattiin.

Koesarjassa tehtiin kaikkiaan 29 koetta. Rakenteellisiin ratkaisuihin (so. tuuletusraon katkaisuun, ulokkeisiin ja erkkereihin) liittyvät koekappaleet listataan taulukossa E5. Mukana ovat myös vertailukoekappaleet ilman ko. rakenteellista muutosta. Koekappaleiden numerointi on lähteen (Hakkarainen & Oksanen 2001) mukainen. Taulukossa E6 esitetään liekkirintaman etenemisajat kunkin koekappaleen mittalinjoille.

Taulukko E5. Keskisuuren mittakaavan koekappaleet.

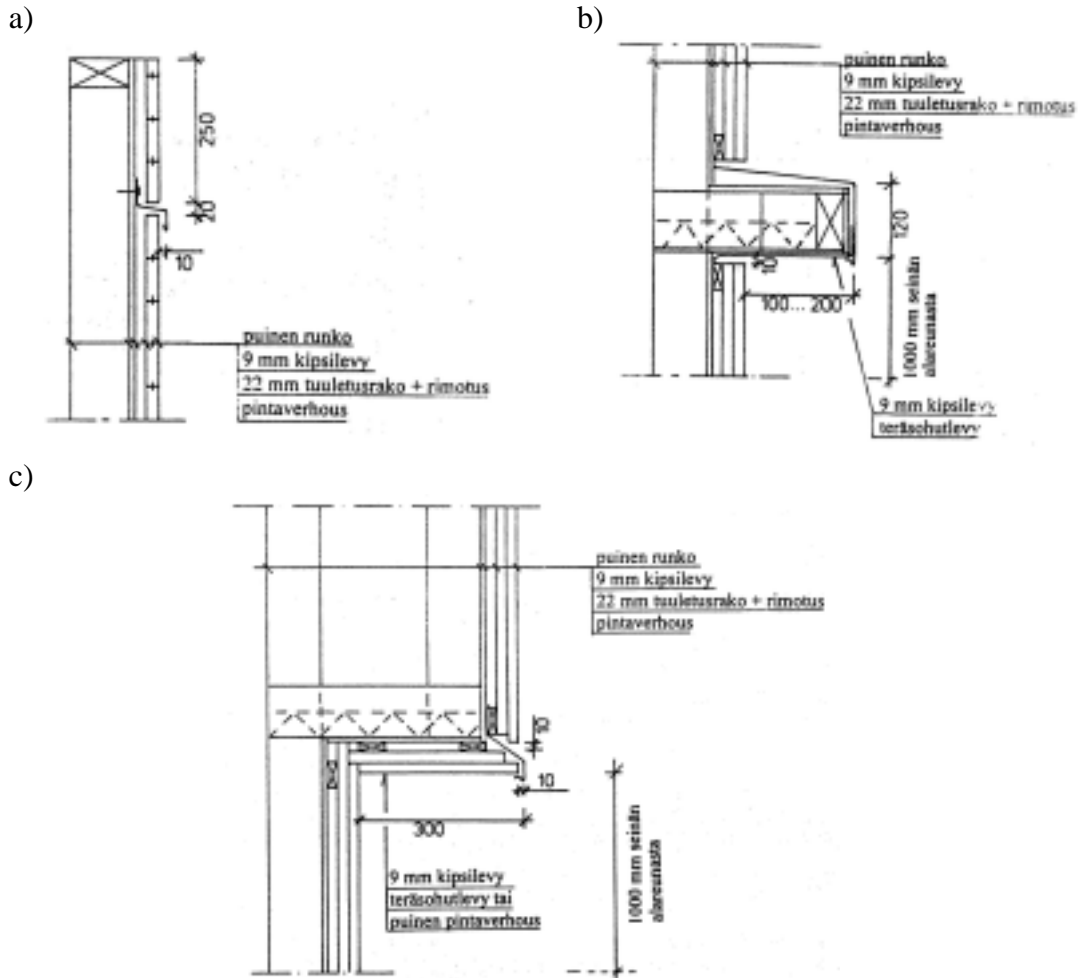
Nro	Pintamateriaali	Paksuus (mm)	Pintakäsittely	Huomautuksia
1	kuusi	23	maalattu	lomalaudoitus
2	mänty	19	maalattu	lomalaudoitus
3	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus
6	mänty	19	palonsuojakäsitelty, maalattu	lomalaudoitus
14	mänty	19	maalattu	lomalaudoitus, tuuletusrako katkaistu
15	mänty	19	palonsuojakäsitelty, maalattu	lomalaudoitus, tuuletusrako katkaistu
16	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus, tuuletusrako katkaistu
17	mänty	19	maalattu	uloke, leveys 100 mm, päällystetty pellillä
18	mänty	19	maalattu	uloke, leveys 200 mm, päällystetty pellillä
19	mänty	19	maalattu	erkkeri, leveys 300 mm, alapinta puuta
20	kuusi	23	maalattu	erkkeri, leveys 300 mm, alapinta peltiä
21	kuusi	23	maalattu	uloke, leveys 200 mm, sisänurkka (seinien leveydet 1,2 ja 0,8 m)
22	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus, ei tuuletusrakoa
26	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus, 30 mm:n palosuojattu teräslevy tuuletusraon palokatkona
27	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus, 100 mm:n palosuojattu teräslevy tuuletusraon palokatkona
28	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus, 10 mm:n teräsverkkopakka tuuletusraon palokatkona
29	kuusipaneeli	16	maalattu	vaakalaudoitus, 20 mm:n teräsverkkopakka tuuletusraon palokatkona

Taulukko E6. Liekkirintaman eteneminen keskisuuren mittakaavan kokeissa: saapumisajat mittalinjoille (min:s). Korkeus on mitattu pintamateriaalin alareunasta (50 cm lattiatason yläpuolella).

Näyte	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	240 cm
1. Maalattu kuusilomalauta	1:30	1:55	2:55	9:15	10:30
2. Maalattu mäntylomalauta	1:10	2:20	5:40	9:30	9:40
3. Maalattu kuusipaneeli	4:20	5:50	7:30	8:30	8:50
6. Palonsuojakäsitelty ja maalattu mäntylomalauta	2:00	8:50	11:00	17:00	18:00
14. Maalattu mäntylomalauta, tuuletusrako katkaistu	2:10	3:10	7:00	8:45	10:40
15. Palonsuojakäsitelty ja maalattu mäntylomalauta, tuuletusrako katkaistu	3:50	8:55	11:20	14:40	22:30
16. Maalattu kuusipaneeli, tuuletusrako katkaistu	4:30	6:10	7:00	10:00	10:20
17. Maalattu mäntylomalauta, 100 mm uloke	1:45	3:30	10:55	11:10	11:25
18. Maalattu mäntylomalauta, 200 mm uloke	1:10	2:20	ei	ei	ei
19. Maalattu mäntylomalauta, 300 mm erkkeri, alapinta puuta	1:40	2:00	12:00	12:15	12:25
20. Maalattu kuusilomalauta. 300 mm erkkeri, alapinta peltiä	1:10	2:00	ei	ei	ei
21. Maalattu kuusilomalauta, 200 mm uloke, sisänurkka	0:45	1:15	ei	ei	ei
22. Maalattu kuusipaneeli, ei tuuletusrakoa	1:45	3:10	22:30	ei	ei
26. Maalattu kuusipaneeli, 30 mm:n teräslevy tuuletusraossa	5:20	7:50	9:30	11:10	16:00
27. Maalattu kuusipaneeli, 100 mm:n teräslevy tuuletusraossa	5:10	7:00	9:40	10:50	13:40
28. Maalattu kuusipaneeli, 10 mm:n teräsverkkopakka tuuletusraossa	6:00	7:40	15:40	26:50	32:10
29. Maalattu kuusipaneeli, 20 mm:n teräsverkkopakka tuuletusraossa	6:30	7:50	15:50	16:40	29:00

Tuuletusraon katkaisu

Tuuletusraon katkaisun vaikutusta tutkittiin maalatulla männyllä palosuojattuna (kokeet nro 6 ja 15) ja palosuojamattomana (nro 2 ja 14) sekä maalatulla kuusipaneelilla (nro 3 ja 16). Tuuletusrako katkaistiin pellillä 250 mm etäisyydeltä koekappaleen yläreunasta kuvassa E6a esitetyllä tavalla.



Kuva E6. Keskisuuren mittakaavan koekappaleiden rakenteet: a) tuuletusraon katkaisu, b) uloke ja c) erkkeri.

Tuuletusraon katkaisulla kuvan E6a osoittamalla tavalla oli vain vähäinen vaikutus liekkirintaman etenemisaikaan koekappaleen yläreunaan asti. Liekin leviäminen viivästyí vain 1–4,5 minuuttia. Katkaisukohdan yläpuolella mitatut lämpötilat alenivat kuitenkin merkittävästi: lämpötilat koekappaleen yläreunassa eivät ylittäneet 100 °C:ta. Ilman tuuletusraon katkaisua maksimilämpötiloiksi mitattiin 200–400 °C.

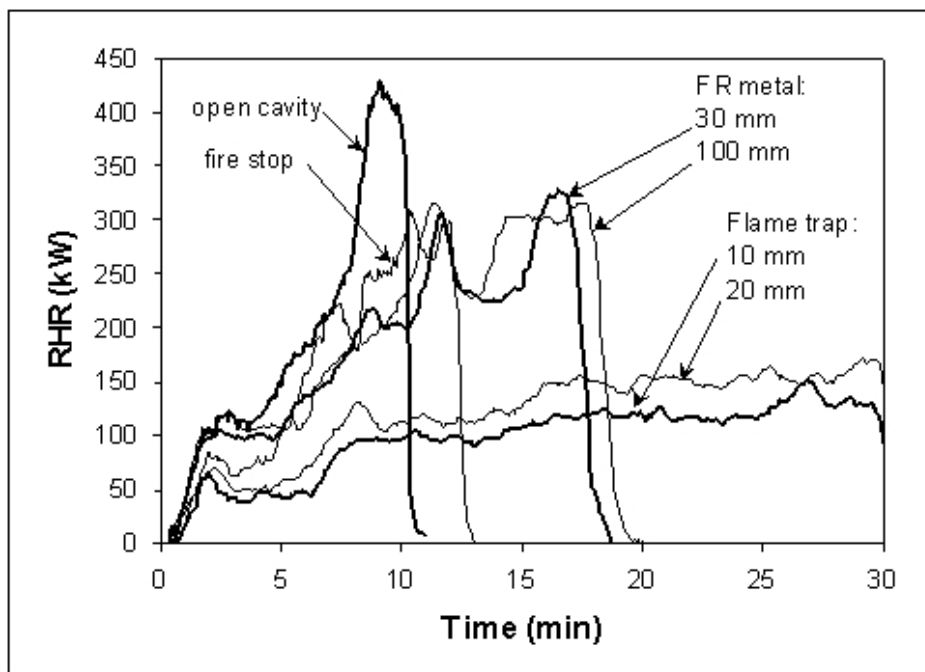
Suuressa mittakaavassa palokatkon vaikutus liekin leviämiseen koekappaleen pinnalla olisi voinut olla merkittävämpi räystäán tasolle ulottuvan pitkán tuuletusraon vuoksi. Vaikutusta ei kuitenkaan määritetty kvantitatiivisesti, koska kaikissa täyden mittakaavan koekappaleissa oli kuvan E6a mukaiset palokatkot kerrosrajoilla.

Ilman tuuletusrakoa olevassa seinärakenteessa (nro 22) oli kuusipaneeli asennettu suoraan vanerin päälle. Vanerin takana oli eristeenä selluvillaa. Liekkirintama ei saavuttanut koekappaleen yläreunaa. Liekit etenivät vain tilapäisesti 150 cm:n korkeudelle. On kuitenkin huomattava, että liekin leviämiseen saattoi vaikuttaa

hidastavasti kuusipaneelin takana olevan vanerin kosteus, joka oli 15–20 %. Muiden materiaalien kosteus oli noin 10 % ilmastoinnin jälkeen. Lisäksi on todettava, että julkisivun rakentaminen ilman tuuletusrakoa ei ole käytännöllinen ratkaisu, koska puutteellinen tuuletus voi aiheuttaa rakenteiden homehtumista.

Tuuletusraon katkaisussa käytettiin myös kahta muuta keinoa: paisuvalla palonsuojamaalilla maalattua teräslevyä ja useista kerroksista koostuvaa teräsverkkopakkaa (langan paksuus 0,6 mm; silmäkoko 1,3 mm). Teräslevy tai teräsverkkopakka kiinnitettiin Gyproc-levyyn koko tuuletusraon leveydeltä 400 mm koekappaleen yläreunan alapuolelle. Teräslevyn korkeus oli 30 mm (nro 26) tai 100 mm (nro 27) ja teräsverkkopakan paksuus 10 mm (nro 28) tai 20 mm (nro 29). Vertailunäytteenä oli koekappale nro 3, jonka tuuletusrako oli avoin. Avoimen tuuletusraon tapauksessa liekit koekappaleen etupinnalla saavuttivat yläreunan noin 9 minuutin kuluessa sytytyksestä. Paisuvalla palonsuojamaalilla maalattu teräslevy kasvatti liekinleviämisaajan 13–16 minuuttiin. Teräsverkkopakoilla saavutettiin merkittävämpi viive: liekkirintama eteni koekappaleen yläreunaan noin 30 minuutissa.

Tuuletusraon katkaisun vaikutus koekappaleiden lämmöntuottoon (RHR) nähdään kuvassa E7. Paisuvalla palonsuojamaalilla maalatut teräslevyt alensivat maksimilämmöntuottoa 430 kW:sta 330 kW:iin. Teräsverkkopakat viivästivät merkittävästi palon kehittymistä ja maksimilämmöntuotto aleni 160 kW:iin.



Kuva E7. Tuuletusraon katkaisun vaikutus lämmöntuottoon.

Ulokkeet ja erkkerit

Testattujen ulokkeiden ja erkkerin (nro 17–21) rakenne esitetään kuvissa E6b ja E6c. Vertailunäytteinä olivat koekappaleet nro 1 ja 2.

200 mm:n syvyiset ulokkeet estivät liekin leviämisen koekappaleen yläosaan sekä suoran seinän (nro 18) että sisänurkan (nro 21) tapauksessa. Kokeet lopetettiin noin 30 minuuttia polttimen sytytyksen jälkeen kun pintamateriaali ulokkeen alapuolella oli lähes loppuun palanut. 100 mm:n syvyinen uloke (nro 17) ei riittänyt pysäyttämään liekkirintaman etenemistä.

300 mm:n syvyinen erkkeri (nro 19) viivästi merkittävästi palon leviämistä koekappaleen yläosaan. Yläosan sytyttyä liekit levisivät kuitenkin nopeasti. Niinpä liekinleviämisaika koekappaleen yläosaan oli erkkerikoekappaleella alle 3 minuuttia pitempi kuin vertailunäytteellä (nro 2). Kun palokuormaa vähennettiin rakentamalla erkkerin alapinta teräslevyistä (nro 20), palo ei levinnyt erkkerin yläpuolelle.

Suuren mittakaavan koetulokset

Taulukoissa E3 ja E4 esitellyissä suuren mittakaavan kokeissa oli mukana myös koekappaleita, joissa oli 200 mm syvä uloke joko kerrosrajalla koko koekappaleen leveydeltä (L3 ja L5) tai ikkuna-aukkojen alla 2000 mm:n leveydeltä (L4). Koko julkisivun levyinen pellillä päällystetty uloke esti liekin leviämisen toiseen kerrokseen sekä suoran seinän että sisäkulman tapauksessa. 2000 mm:n levyinen uloke ei pysäyttänyt liekin leviämistä: liekkirintama eteni koekappaleen yläreunaan asti kiertäen ulokkeen päädyt ulkokautta.

Viitteet liitteeseen E

Hakkarainen, T., Oksanen, T. & Mikkola, E. 1996. Puujulkisivujen paloturvallisuus sprinklatuissa kerrostaloissa. VTT Tiedotteita 1736. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: Espoo 1996. 29 s. + liitt. 16 s.

Hakkarainen, T., Oksanen, T. & Mikkola, E. 1997. Fire behaviour of facades in multi-storied wood-framed houses. VTT Tiedotteita 1823. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: Espoo 1997. 42 s. + liitt. 16 s.

Hakkarainen, T. & Oksanen, T. Fire safety assessment of wooden facades. Julkaistaan Fire and Materials -lehdessä, 2001.

Liite F: Alumiiniprofiililla kehystettyjen ikkunoiden palokokeet

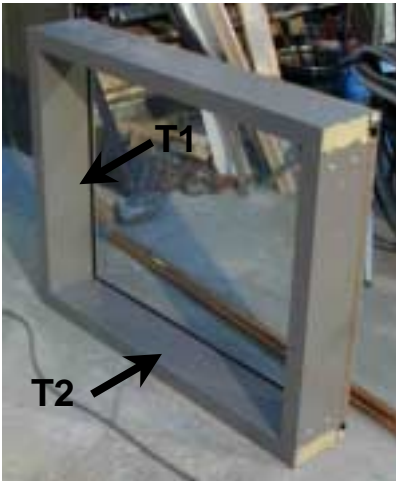
Ontelotilojen paloturvallisuutta tarkastelevan tutkimusprojektin yhdeksi osaongelmaksi on valittu kaksoislasijulkisivujen onteloiden paloturvallisuuden tarkastelu. Kaksoislasijulkisivu on varsin uusi rakennetekninen ratkaisu, ja niinpä ontelopaloprojektissa tehdyssä kirjallisuushaussa ei löydetty ainoatakaan tapauskertomusta kaksoislasijulkisivurakenteeseen liittyvästä tulipalosta. Siksi päädyttiin tutkimaan savun ja lämmön leviämistä kaksoislasijulkisivun ontelossa teoreettisesti virtauslaskennan keinoin. Tarkastelun perusongelma on alkuehto: millä edellytyksillä ja millä mekanismeilla tulipalo voi edetä kaksoislasijulkisivun onteloon. Sen jälkeen on laskennan keinoin mahdollista arvioida lämmön ja savun leviämistä ontelossa sekä arvioida sitä, voiko palo levitä ontelon välityksellä ylempien kerrosten huoneistoihin.

Ontelo itsessään ei sisällä palavia materiaaleja eikä merkittäviä syttymislähteitä. Tarkastelun lähtökohdaksi oletettiin lieskahtanut huoneistopalo kaksoislasijulkisivullisen toimistorakennuksen yhdessä huoneessa. Tavallisesti tällaiset suuret toimistorakennukset on sprinklattu, joten huoneistopalo voi edetä lieskahtaneeksi vain, jos sprinklerijärjestelmä ei toimi tai jos toimivan järjestelmän suorituskyky ei ole riittävä. Tämän vaihtoehdon todennäköisyydeksi arvioidaan 10 % kaikista palotapauksista. Lisäksi on oletettava, että toimistohuoneen ovi on auki, jotta palo ei tukahtuisi hapenpuutteeseen. Lieskahtaneen palon palotehoa rajoittaa tällöin oven pinta-ala. Toinen ikkunan särkymiseen johtava skenaario voi olla paikallinen palo lähellä ikkunaa siten, että liekit ovat kosketuksissa ikkunan kanssa.

Lieskahtaneessa huoneistopalossa kaikkiin huoneiston pintoihin kohdistuu suuri lämpövuoto. Lasiin ikkunoihin kohdistuneena lämpövuoto aiheuttaa lasissa lämpölaajenemista ja tästä aiheutuvia jännityskenttiä. Lasin rikkoutumisen on osoitettu riippuvan lasin materiaaliparametreista (lämpölaajenemiskerroin, murtumislujuus ja kimmokerroin) sekä lämpötilaeroista lasin eri kohtien välillä. Kokeellisesti haluttiin tarkastella sitä, millä mekanismeilla ikkunalasi rikkoutuu, jolloin voidaan arvioida palon leviämistapaa sekä onteloon kuljettuvaa palotehoa ajan funktiona. Erityisesti halutaan selvittää palon aikakehitystä, ts. leviääkö palo äkillisesti ikkunalasin täydellisen hajoamisen ja romahtamisen seurauksena, vai tapahtuuko leviäminen vähitellen ikkunalasin halkeillessa ja pudotessa osina pitkän ajan kuluessa.

Koejärjestely

Kokeet suoritettiin VTT:n palotekniikan laboratorion kuutiouunilla. Koekappaleiksi valittiin kaksi alumiiniprofiililla kehystettyä yksinkertaista ikkunalasia (kuva F1), joista toinen oli tavallista karkaisematonta ikkunalasia ja toinen karkaistua lasia. Kummankin lasin paksuus oli 6 mm, ja koekappaleen mitat olivat 800 mm × 1000 mm. Koekappaleet toimitti Valotila Oy. Kappaleet asennettiin kuutiouuniin siten, että tasainen puoli kappaleesta oli uunin ulkopuolella.



Kuva F1. Palokokeissa käytetty koekappale. Alumiiniprofiilin avoimet päät täytettiin palovillalla ennen koetta. Nuolet osoittavat lämpötilojen T1 ja T2 mittauskohdat profiilin sivun keskellä. Mittaukset T5 ja T6 sijaitsivat vastaavissa kohdissa lasin ja kehyksen liitoskohdassa 5 mm kehyksen sisällä. Kehyksessä on palavina materiaaleina puurimoja sekä kumitiivisteitä.

Kokeissa mitatut suureet on lueteltu taulukossa F1. Instrumentoinnin päätarkoituksena oli määrittää lämpötilaero lasin keskikohdan ja reunojen välillä sekä toissijaisesti pyrkiä arvioimaan lasiin absorboitunutta lämpövuota.

Kuutiouunin lämpötilaa säädettiin kokeissa ISO-käyrän mukaisesti. Ylipaine uunissa oli 10 Pa. Kokeet videoitiin ja niistä otettiin valokuvia.

Taulukko F1. Instrumentointi.

ID	Laite	Kuvaus
T1	TC	Al-profiilin pintalämpötila lyhyen sivu keskellä
T2	TC	Al-profiilin pintalämpötila pitkän sivu keskellä
T3	TC	Lasin pintalämpötila uunin sisäpuolella lasilevyn keskellä
T4	TC	Lasin pintalämpötila uunin ulkopuolella lasilevyn keskellä
T5	TC	Lasin pintalämpötila 5 mm kehyksen sisällä lyhyen sivun keskellä
T6	TC	Lasin pintalämpötila 5 mm kehyksen sisällä pitkän sivun keskellä

T7	Plate thermometer	Uunin katossa, suunta alaspäin
T8	TC	Uunin ohjauslämpötila
T9	TC	Uunin ohjauslämpötila
T10	TC	Uunin ohjauslämpötila
T11	TC	Uunin ohjauslämpötila
R1	Flux meter	Säteilytaso uunin ulkopuolella 50 cm lasista lasin keskinormaalini suuntaisesti

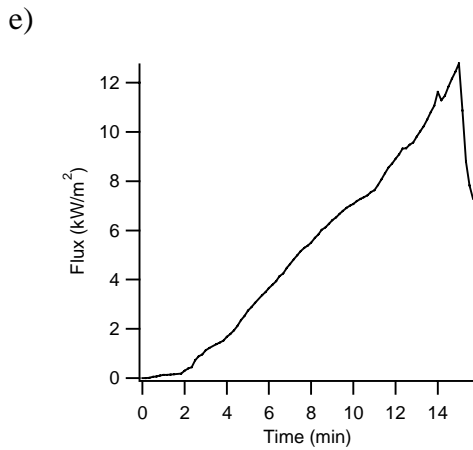
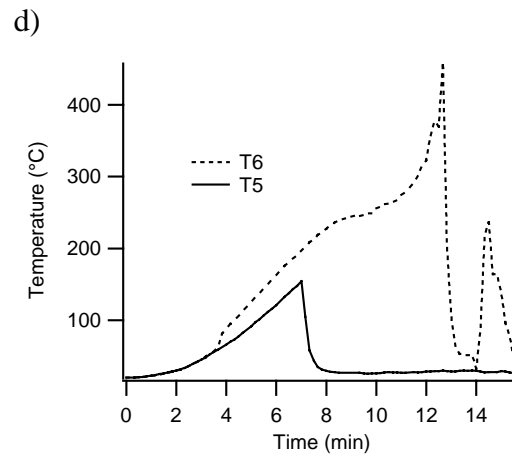
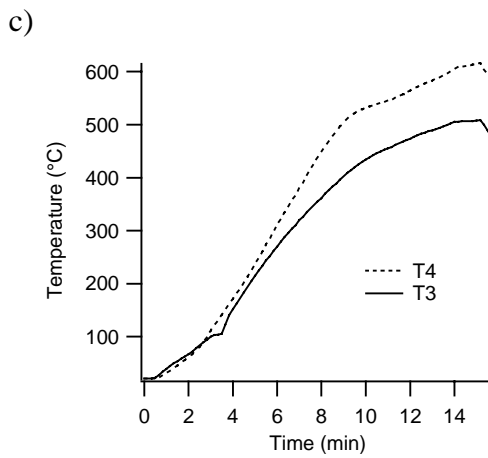
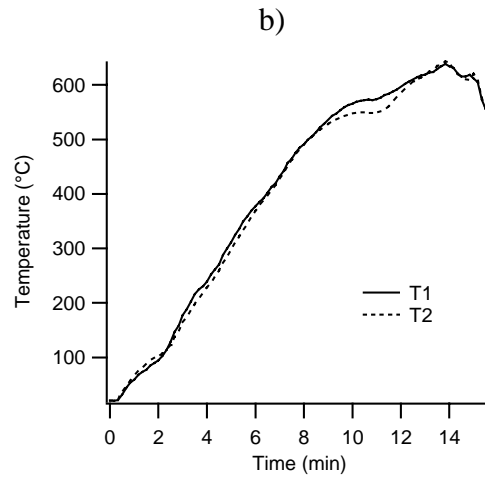
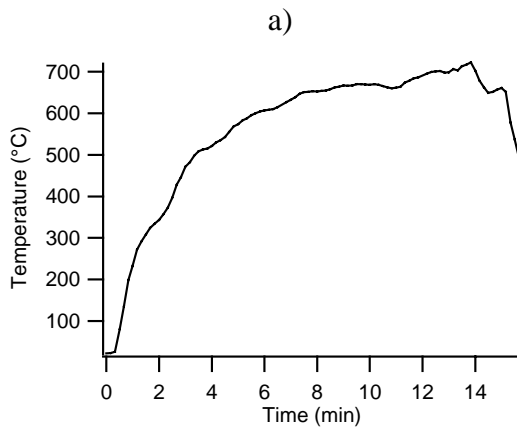
Tulokset

Kokeissa kirjatut tapahtumat on esitetty taulukoissa F2 ja F3. Mitatut lämpötilat ja säteilytasot on esitetty kuvissa F2–F4.

Karkaisematon lasi

Taulukko F2. Koetapahtumat karkaisemattoman lasin kuutiouunikokeessa.

Kellonaika (min:s)	Tapahtuma
0:00	Koe alkaa
0:15	1. poltin syttyy kuutiouunissa
1:49	2. poltin syttyy kuutiouunissa
2:14	Räsähtävä ääni (ks. kuva F3a)
2:40	Runsaasti säröjä ikkunassa
3:02–6:53	Räsähdyksiä epäsäännöllisin välein
8:50	Savua koekappaleen vasemmasta yläkulmasta
9:27	Yläpoka liekeissä
9:47	Savua koko koekappaleen yläreunasta
10:19	Pala lasia putoaa
10:30	Pala lasia putoaa
10:55	Kilahtava ääni
11:08	L liekki koekappaleen vasemmassa yläkulmassa ulkopuolella; vasen sivupoka palaa n. 20 cm alakulmasta
11:36	Alapoka palaa vasemmasta reunasta
12:33	Liekkejä ajoittain koko alapokassa
13:13	Liekkejä jatkuvasti koko alapokassa
13:25	Liekkejä ulos koko yläpokan matkalta
13:49	Iso pala lasia putoaa (ks. kuva F3b)
13:56	Iso pala lasia putoaa
14:35	Lisää lasinpaloja putoaa
15:04	Koe keskeytetään
16:51	Lasinpala putoaa
17:01	Koko jäljellä oleva ikkuna romahtaa
18:40	Sammutus paloletkulla



Kuva F2. a) Unin lämpötilä (mittausten T8–T11 keskiarvo, b) alumiiniprofiilin pintalämpötilat, c) Pintalämpötilat lasilevyn keskellä ja d) lämpötilat lasilevyn ja kehyksen liitoskohdassa 5 mm kehyksen sisällä ja e) säteilytaso 50 cm ikkunan ulkopuolella ikkunan keskinormaalilla.

a)



b)

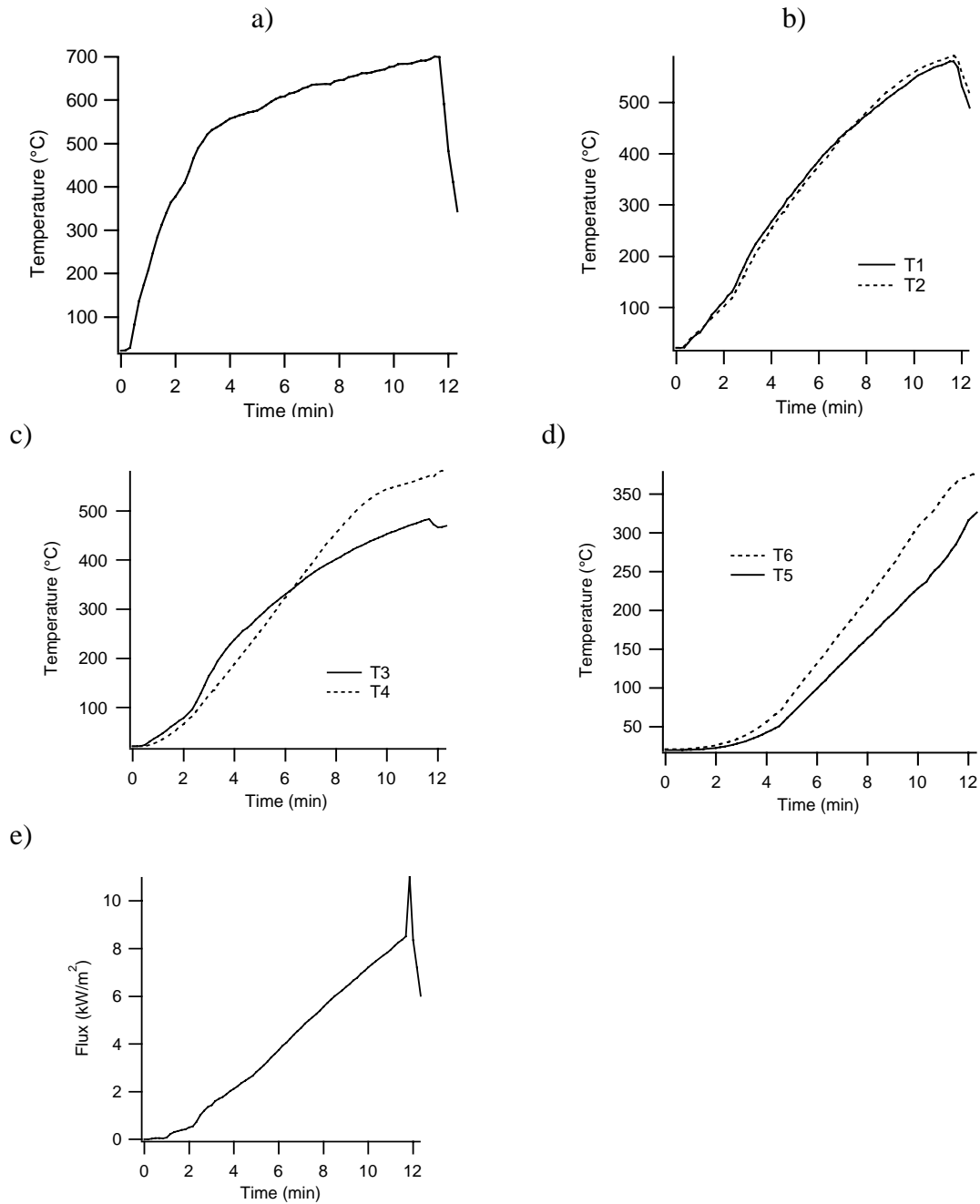


Kuva F3. Karkaisemattoman lasin koe. a) Ensimmäiset halkeamat karkaisemattomassa ikkunassa. b) Ikkunan vasemmasta yläkulmasta on irronnut suurehko pala. Pienempi pala on irronnut oikeasta yläkulmasta.

Karkaistu lasi

Taulukko F3. Koetapahtumat karkaistun lasin kuutiouunikokeessa 22.2.2001.

Kellonaika (min:s)	Tapahtuma
0:00	Koe alkaa
0:13	1. poltin syttyy kuutiouunissa
1:00	2. poltin syttyy kuutiouunissa
3:35	Lasin taipuminen silmin havaittavissa (ks. kuva F5a)
4:25	Lasi säröytyy kauttaaltaan pieniksi rakeiksi mutta yhtään palaa ei putoa (ks. kuva F5b)
6:10	Savua koekappaleen vasemmasta yläkulmasta
7:05	Savua koekappaleen vasemmasta reunasta
8:12–11:39	Pieniä kilahduksia epäsäännöllisin väliajoin
8:30	Melko paljon savua kaikkialta kehyksestä
11:27	Liekkejä kehyksen ulkopuolella (ks. kuva F5c)
11:39	Koko ikkuna romahtaa
11:45	Koe keskeytetään, sammutus paloletkulla



Kuva F4. a) Unin lämpötilä (mittausten T8–T11 keskiarvo, b) alumiiniprofiilin pintalämpötilat, c) Pintalämpötilat lasilevyn keskellä, d) lämpötilat lasilevyn ja kehyksen liitoskohdassa 5 mm kehyksen sisällä ja e) säteilytaso 50 cm ikkunan ulkopuolella ikkunan keskinormaalilla.

a)



b)



c)



Kuva F5. Karkaistun lasin koe. a) Kaareva heijastus lasin pinnassa kertoo lasin taipumisesta. b) Karkaistu lasilevy hajoaa kerralla kauttaaltaan pieniksi rakeiksi. c) Koekappale juuri ennen lasin romahtamista (romahdus 11:39).

Johtopäätökset ikkunoiden palokokeista

Keski-Rahkosen (Fire and Materials, Vol. 15(1991), s. 11) mukaan kynnysheito ikkunan hajoamiselle on $\beta\Delta T = \frac{\sigma_b}{E}$, missä β on lasin lämpölaajenemiskerroin, ΔT on lämpötilaero lasilevyn keskikohdan ja reunan välillä, σ_b on murtumislujuus ja E kimmokerroin. Teoreettiset arvot ΔT :n arvolle saadaan sijoittamalla kaavaan

ikkunalasin kimmokerroin $E = 70 \text{ GPa}$ ja lämpölaajenemiskerroin $\beta = 9 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$, sekä karkaisemattomalle lasille $\sigma_b = 50 \text{ MPa}$ ja karkaistulle $\sigma_b = 150 \text{ MPa}$. Tällöin saadaan

karkaisematon lasi $\Delta T = 79 \text{ C}$

karkaistu lasi $\Delta T = 238 \text{ C}$

olettaen, että kimmokerroin ja lämpölaajenemiskerroin ovat kummallekin materiaalille samat. Näitä arvoja voidaan verrata koetuloksiin. Vertailuluvut voidaan muodostaa usealla tavalla, sillä sekä lasilevyn keskellä että reunoilla oli kaksi lämpötilamittausta. Taulukossa F4 on esitetty nämä vaihtoehdot sekä karkaisemattomalle että karkaistulle lasille perustuen mittaustuloksiin ao. lasin hajoamishetkellä.

Taulukko F4. Lämpötilaero lasin keskikohdan ja reunan välillä hajoamishetkellä.

Lämpötilaero	Karkaisematon (°C)	Karkaistu (°C)
T3–T5	41,9	209,5
T3–T6	42,0	191,9
T4–T5	37,7	166,1
T4–T6	37,7	148,5

Taulukosta nähdään, että teoreettisiin arvoihin nähden koetulosten antamat arvot ovat systemaattisesti n. 40 °C alempia. Erotus karkaistun ja karkaisemattoman lasin kriittisen lämpötilaeron välillä vastaa kuitenkin varsin hyvin teoreettista. Lämpötilamittauksen T4 avulla lasketut lämpötilaerot ovat todennäköisesti liian pieniä johtuen siitä, että tämä anturi näki uunista tulevan säteilylämmön.

Kokeiden perusteella voidaan todeta, että karkaisemattoman lasin hajoamismekanismi poikkeaa oleellisesti karkaistun lasin hajoamismekanismista. Karkaisematon lasi säröytyi kokeessa varsin nopeasti, mutta säröytyminen johti suurten toisissaan kiinniolevien alueiden muodostumiseen, ja tätä seuraavaan hitaaseen säröytymisen jatkumiseen. Kokeen edetessä vaihtelevan kokoisia palasia lasia putosi useiden minuuttien aikana. Julkisivun sisäpuolella olevasta karkaisematonta lasia olevasta ikkunasta palo siis etenee onteloon vähitellen, ts. onteloon tulevalle paloteholle on oletettava jokin äärellinen aikakehitys. Karkaistua lasia oleva ikkuna taas hajosi säröiksi kerralla, ja kokeen edetessä oli kyse ainoastaan siitä, koska koko ikkuna romahtaa kerralla alas. Jos siis toimistohuoneen ikkuna on karkaistua lasia, palo etenee onteloon äkillisesti ja suurena.

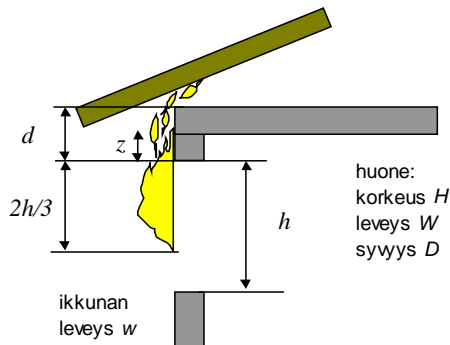
Todettakoon vielä, että aikataulun kireyden vuoksi tässä kokeessa käytettiin yksinkertaisesta lasista tehtyjä koekappaleita. Todellisessa rakennuksessa sisäpuolen ikkunat ovat tyypillisesti kolminkertaisia, joten tässä kokeessa havaittuja aikaskaaloja ei

voi suoraan soveltaa. Särkymisaikaa ei kuitenkaan voi kertoa suoraan kolmella, sillä ulommat ikkunaruuat absorboivat koko ajan sisemmistä läpimennyttä lämpösäteilyä. Todellinen kolminkertaisen lasin hajoamisaika on siis lyhyempi kuin kolme kertaa yksinkertaisen lasin hajoamisaika.

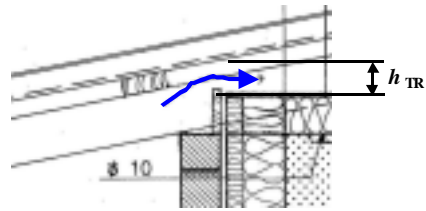
Liite G: Tarkastelu tulen leviämisestä pientalon ullakolle räystäään kautta

Suomessa sattuu vuosittain useita vakavia tulipaloja, joissa tuli on levinnyt välipohjan yläpuoliseen ontelotilaan alapuolella sijaitsevassa huoneistossa syttyneen palon vuoksi. Nämä palot vaativat usein ihmishenkiä.

a)



b)



Kuva G1. a) Hahmotelma tyypillisestä tilanteesta, jossa palo pääsee leviämään alapuolisesta huoneistosta välipohjan yläpuoliseen ontelontilaan sekä tilanteen laskennallisessa kuvauksessa käytetyt mitat. Tulen kulkutie onteloon.

Tällaisen palon tyypillistä asetelmaa on hahmoteltu kuvassa G1a. Kuvassa G1b on esitetty liekkien reitti onteloon yksityiskohtaisemmin. Tyypilliset lukuarvot kuvassa esitetuille mitoille on esitetty taulukossa G1.

Taulukko G1. Kuvan 1 mittojen lukuarvot ja niistä johdettuja suureita.

mitta	arvo
huoneen korkeus H	2,60 m
huoneen leveys W	4,00 m
huoneen syvyys D	5,00 m
ikkunan korkeus h	1,40 m
ikkunan leveys w	3,00 m
lattiapinta-ala A_{floor}	20 m ²
ikkunan pinta-ala A_w	4,2 m ²
$A_T = 2A_{\text{floor}} + 2H(D + H) - A_w$	82,6 m ²
ulos tulevan liekin korkeus $2h/3$	0,93 m
matka ikkunan yläpielestä seinän yläosaan d	0,50 m
tuuletusaukon korkeus h_{TR}	0,07 m

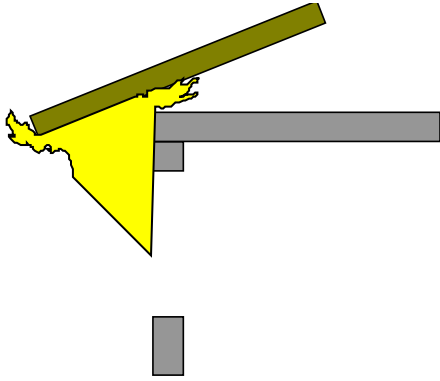
Huoneessa on oletettu olevan palavaa materiaalia n. 625 kg. Tämä arvo perustuu Simonsonin ym. raportissa (Simonson ym. 2000) esitettyyn arvioon, että 16 m² suuruudessa huoneessa voidaan arvioida olevan noin 500 kg palavaa materiaalia. Tässä käsitellyssä esimerkissä on kyseessä 20 m²:n huone, joka antaa yo. 625 kg arvion. Jos oletetaan palavan materiaalin keskimäärin vastaavan palo-ominaisuuksiltaan puuta, voidaan sen lämpöarvona käyttää 15 MJ/kg ja huoneen palokuormalle (lattiapinta-ala kohden) saadaan arvio 470 MJ/m².

Suurinta mahdollista palotehoa, joka huoneessa voisi kehittyä, jos hapen saanti olisi rajaton, voidaan arvioida seuraavasti. Jos oletetaan palavan materiaalin keskimäärin edustavan noin 16 mm paksua puuta, jonka tiheys on 560 kg/m³ (mänty), niin suurin mahdollinen palava pinta-ala olisi $625 \text{ kg} / (560 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,016 \text{ m}) = 70 \text{ m}^2$. Puun palaessa tasaisesti, sen pinta-alayksikköä kohden luovuttama paloteho RHR'' on noin 120 kW/m². Kertomalla palava pinta-ala suureella RHR'' saadaan arvio huoneen suurimmalle paloteholle $RHR_{\text{room,max}} = 8400 \text{ kW}$.

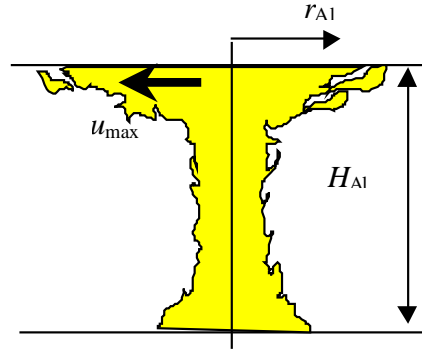
Todellisuudessa hapen saanti rajoittaa huoneen palamisen voimakkuutta. Law ja O'Brien (Law & O'Brien 1981) ovat esittäneet tavan arvioida palavan aineen massan kulutusnopeutta R happirajoitteisessa palossa lähtien huoneen aukkotekijästä $A_w h^{1/2} / A_T$. Näin saadaan arvio $R = 0,360 \text{ kg/s}$. Koska paloteho on massan kulutusnopeuden ja tehollisen lämpöarvon (15 MJ/kg) tulo, saadaan happirajoitteisen palon palotehoksi 5400 kW. Hapen saannin rajoittava vaikutus näkyy siinä, että tämä paloteholukema on pienempi kuin edellä laskettu suurin mahdollinen paloteho (8400 kW). Näiden kahden paloteholukeman erotuksen, 3000 kW, voidaan arvioida vastaavan huoneen ulkopuolella palavan liekin palotehoa, koska täyden palamisen aikana voidaan arvioida (lähes) kaikkien palavien pintojen tuottavan palavia kaasuja. Se osa kaasuista, joka ei pala huoneessa, palaa huoneen ulkopuolella ja tuottaa palotehoa huoneen ulkopuolella.

Myös ulostyöntyvän liekin muotoa ja korkeutta voidaan arvioida Law:n ja O'Brienin kehittämää lähestymistapaa käyttäen. Kun tätä lähestymistapaa sovelletaan kuvassa G1 esitettyyn esimerkkitapaukseen, saadaan kuvassa G2 havainnollistettu tilanne. Ikkunan yläpuolella liekkien vaakasuora ulottuvuus alkaa seinästä ja ulottuu noin etäisyyden 90 cm päähän seinästä. Lähellä räystästä liekkien ulompi laita poikkeaa lisää pois päin seinästä. Vapana ilman räystästä ulostulevan liekki ylettyisi $z = 1,70 \text{ m}$ ikkunan yläpuolelle. Koska räystäs on kuitenkin vain 0,50 m ikkunan yläpuolella tämä merkitsee sitä, että liekit löisivät räystään ja liekki taipuisi tällä kohdalla kuvassa G2 havainnollistetulla tavalla. Liekkien lämpötila räystään kohdalla olisi noin $T_R = 760 \text{ }^\circ\text{C}$. Lähestymistavan mukaan liekin leveytenä voidaan pitää ikkunan leveyttä w , eli 3 m.

a)



b)



Kuva G2. a) Law'n ja O'Brienin mallin ennustaman liekin koon havainnollistaminen. b) Yksinkertainen kattosuihkumalli onteloon kulkeutuvan lämpövirran arvioimiseksi. Mallin liekin paloteho, \dot{Q}_{flame} , vastaa huoneistosta ulostulevan liekin palotehoa (3000 kW) ja H_{A1} kuvaa liekin alkupään ja räystään välistä etäisyyttä sekä r_{A1} kuvaa kohtisuoraa etäisyyttä liekin kuvitteellisesta keskiakselista.

Sitä, miten paljon huoneistosta ulostulevan liekin palotehosta päätyy ontelotilaan voidaan arvioida mallintamalla lämmönsiirtoa liekin lämpötilassa olevan kaasun sisältämän lämpövirtana sisään tuuletusraosta. Tuuletusraon pinta-ala A_{TR} voidaan laskea raon korkeuden h_{TR} ja liekin leveyden w tulona $A_{TR} = h_{TR} \cdot w = 0,07 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 0,21 \text{ m}^2$.

Virtauksen nopeutta voidaan arvioida käyttämällä apuna Alpertin kaavoja (Alpert 1972) kuvassa G2b esitettyssä tilanteessa. Liekin keskiakselin voidaan arvioida olevan noin $(90 \text{ cm})/2 = 45 \text{ cm}$ päässä seinästä. Tuuletusraon paikka noin 45 cm päässä liekin keskiakselilta vastaa kuvan G2b mallissa sitä, että $r_{A1} = 0,45 \text{ m}$. Pystysuuntaisena matkana voidaan käyttää arviota $H_{A1} = 0,50 \text{ m} + 2h/3 = 1,40 \text{ m}$ (laskettu liekin "tyvestä"). Kun paloteho on 3000 kW, Alpertin kaava (ks. liite A).

$$u_{\text{max}} = \frac{0,195 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}}, \quad (\text{G1})$$

antaa arvion $u_{\text{max}} = 6,5 \text{ m/s}$. Nopeuden u_{max} avulla lämpövirta onteloon voidaan lausua muodossa

$$\dot{Q}_{in} \approx \frac{1}{2} c_p \rho(T_R) u_{\text{max}} A_{TR} (T_R - T_\infty), \quad (\text{G2})$$

missä c_p on kaasun ominaislämpö, $1 \text{ kJK}^{-1}\text{kg}^{-1}$, $\rho(T_R) \approx 0,34 \text{ kgm}^{-3}$ on kaasun tiheys lämpötilassa $T_R = 760 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_∞ on ympäristön normaali lämpötila, noin $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Tekijä 1/2 ottaa huomioon sen, että osa kaasusta virtaa toiseen suuntaan (räystään reunan ohi).

Sijoittamalla arvot saadaan tulos $\dot{Q}_{in} \approx 170$ kW. Koska laskelma sisältää oletuksia ja epävarmoja suureita, voidaan lasketun tuloksen perusteella arvioida onteloon kulkeutuvan palotehon olevan esimerkkitapauksessamme suuruusluokkaa 100 kW – 200 kW.

Viitteet liitteeseen G

Alpert, R. L. 1972. Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors. Fire Technology, Vol. 8, s. 181–195.

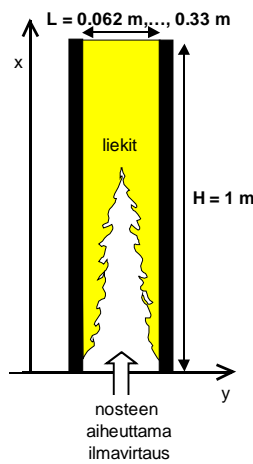
Law, M. & O'Brien, T. 1981. Fire safety of bare external structural steel. Croydon, UK: Constructional Steel Research and Development Organisation (Constrado). 87 s. ISBN 0 86200 026 2

Simonson, M., Blomqvist, P., Boldizar, A., Möller, K., Rosell, L., Tullin, C., Stripple, H. & Sundqvist, J. O. 2001. Fire-LCA Model: TV case study. Swedish National Testing and Research Institute, Borås. 54 s. (SP Report 2000:13)

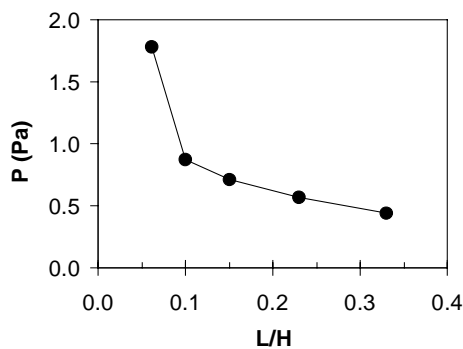
Liite H: Wangin ym. tutkimus pystysuorien lähekkäin olevien pintojen palamisesta

Wang ym. 1999 ovat tutkineet, miten palavien seinien etäisyys toisistaan L vaikuttaa kuvassa H1a esitetyn kaltaisessa palotilanteessa esiintyviin virtaus- ja lämpötekniisiin tekijöihin. Tulokset systeemissä virtauksia ajavan paineen ja lämpövirran tiheyksien (säteilevä ja konvektiivisesti kuljettava osuus) riippuvuuksista seinien välimatkasta on esitetty kuvassa H1b ja c. Nähdään, että välimatkan muuttuminen 33 cm:stä noin 6 cm:iin muuttaa eniten painetta, joka lähes nelinkertaistuu. Lämpövirran tiheyksien arvot muuttuvat selvästi vähemmän kuin paine: konvektiivinen osuus pienenee noin 10 % ja säteilynä siirtyvä osuus kasvaa noin 40 %.

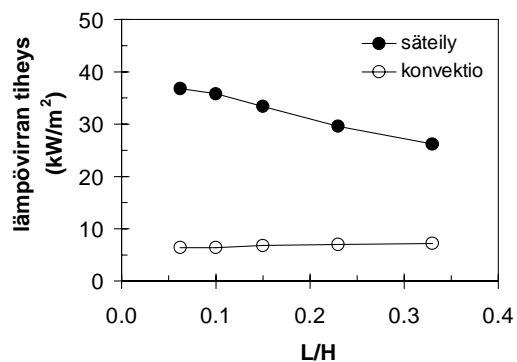
a)



b)



b)



Kuva H1. a) Palotilanne, b) systeemissä kulkevia virtauksia ajava paine ja b) säteilevän ja konvektiivisen lämpövirran suuruus seinien välimatkan funktiona.

Viitteet liitteeseen H

Wang, H. Y., Joulain, P. & Most, J. M. 1999. Modeling on burning of large-scale vertical parallel surfaces with fire-induced flow. Fire Safety Journal, Vol. 32, s. 241–271.

Liite I: Kattorakenteiden ontelojen palovaaroista

Teollisuusrakennusten kattojen useita kerroksia ja niiden välisiä onteloita käsittävät katteet

VTT:n vuonna 2000 tekemän haastattelututkimuksen yhteydessä huomattava osa noin 100 haastatellusta palolaitoksen edustajasta ilmoitti monikerroksiset katteet erityisen ongelmallisiksi sammutustyön kannalta. Toinen tähän läheisesti liittyvänä ongelmatyyppinä mainittiin korjausrakentamisen yhteydessä kattorakenteisiin muodostuvat laajat yhtenäiset ontelotilat, jotka syntyvät, kun uusi katto rakennetaan vanhan päälle ilman, että vanha rakenne poistetaan. Myös muutettaessa tasakatto harjakatoksi tai muutettaessa vesikaton kallistusta muodostuu uuden ja vanhan kattorakenteen väliin suuria, usein täysin osastoimattomia ontelotiloja.

Sammutustyön kannalta laajat kattorakenteiden ontelotilat ovat ongelmallisia monista syistä. Palaminen sekä palamiskaasut leviävät ontelotiloissa usein odottamattomalla tavalla pitkiäkin matkoja alkuperäisestä syttymiskohdasta. Koska palo etenee piilossa kattorakenteiden sisällä vaikeutuu palon paikallistaminen ulkopuolelta esimerkiksi rajoituslinjojen tekemistä varten. Onteloita sisältävät kattorakenteet on yleensä tehty palavista ja ohuista rakennustarvikkeista, mikä myös hankaloittaa sammutustyötä, koska katon romahtamisvaara pienentää katon avaamiseen ja sammuttamiseen käytettävissä olevaa aikaa. Ulkopuolelta ei myöskään usein voida päätellä missä ontelotilan mahdolliset osastoinnit sijaitsevat. Ontelot ovat lisäksi yleensä hyvin tuuletettuja ja matalia, jolloin tila voi lieskahtaa varsin nopeasti, mikä puolestaan edistää palon leviämistä entistä laajemmalle alueella.

Erityisenä ongelmana monet haastatelluista ilmoittivat sammutteen saamisen perille palopesäkkeisiin monimutkaisia rakenteita sisältävissä matalissa katto-onteloissa. Tehokkaana sammutusmenetelmänä tällaisessa palossa monet pitivät pistosuihkuputkijärjestelmää, jossa katteen ja rakenteen läpi lyötävillä suihkuputkillä jäädytetään ontelotilaa.

Nykyisten rakentamismääräysten mukaan tehdyissä uudisrakennuksissa ovat ontelotiloista johtuvat paloriskit varsin pienet. Varsinaisen ongelman muodostavatkin vanhat rakennukset ja erityisesti niihin tehtävät korjaus- ja muutostyöt, jolloin rakennuksiin helposti syntyy uusia ontelotiloja, kuten edellä on esitetty. Korjauksia ja muutoksia tehtäessä tulisi erityisesti kiinnittää huomio ontelotilojen tehokkaaseen osastointiin ja onteloihin rajoittuvien pintakerrosten syttymisherkkyyteen ja palonlevittämisen

ominaisuuksiin. Näillä toimenpiteillä vähintäänkin vaikeutetaan palon syttymistä ontelotiloissa sekä rajoitetaan ontelotilaan päässeen palon leviämistä edelleen.

Teollisuuslaitosten laajoja yhtenäisiä ontelotiloja sisältäviä kattoja varten tulisi laatia kohdekohtaiset sammutussuunnitelmat ja näiden kohteiden sammuttamista tulisi myös harjoitella. Yleisenä sammutusperiaatteena on ontelotilaan palon takia muodostuneen ylipaineen purkaminen palopesäkkeen läheisyydessä sekä korvausilma-aukkojen tekeminen siten, että kaasuvirtaukset saadaan suunnatuksi palopesäkettä kohti. Palon leviämisen estämiseksi tehdään rajoituslinjoja tarkoituksenmukaisesti kohtiin. Erityisen ongelmallisiin kohteisiin saattaisi olla aiheellista asentaa paloposteja tai kuivanousuputkia ja sammutusvälinekaappeja. Sammutteena voisi harkita myös typpeä, hiilidioksidia tai vesihöyryä silloin, kun niitä on riittävässä määrin ja riittävän nopeasti saatavissa.

Teollisuusrakennuksissa kattorakenteiden alkupalot

Tarkasteltaessa sattuneita yläpohjan onteloiden palojen syitä nousevat erilaiset tulityöt ylivoimaisesti tavallisimmaksi syttymissyiksi. Yleisin sytytyslähde on katon korjaustöissä käytettävä nestekaasupoltin, joka sytyttää palamaan aluksi joko bitumin, pien, kattohuovan tai alusrakenteet, joista palo pääsee leviämään edelleen katon ontelotiloihin. Myös kulmahiomakoneen kipinöiden tai polttoleikkauskipinöiden tiedetään aiheuttaneen paloja, kun ne ovat joutuneet yläpohjan onteloihin. Tyypillistä näille tulitöiden yhteydessä syntyneille paloille on, että palo jää kytemään pitkiksi ajoiksi ennen, kuin se syttyy palamaan avoliekeillä.

Myös muualla kuin katolla tehtävät tulityöt ovat aiheuttaneet lukuisia pieniä palonalkuja esimerkiksi pölykertymissä. Vaikka palot eivät useinkaan saa alkunsa hormeissa, voi muualla alkanut palo levitä niiden kautta laajalle alueelle. Mikäli hormit eivät ole tiiviitä palo voi levitä hormeja ympäröiviin onteloihin.

Tulitöiden riskialttius on tiedostettu jo pitkään, ja vakuutusyhtiöt ovat julkaisseet tulitöitä ja kattotulitöitä koskevia suojeluohjeita. Ohjeissa määritellään yksityiskohtaisesti sekä työn aikana että sen jälkeen tarvittavat varotoimet, jotka tarkoin noudatettuina estäisivät useimpien tulipalojen syttymisen.



Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka			
Nimeke Ontelotilojen paloturvallisuus Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla			
Tiivistelmä Rakennusten suljetut ja usein piilossa olevat tilat, ontelotilat, muodostavat merkittävän tulipalovaaran. Tässä työssä on tutkittu ontelotilojen paloja sekä kokeellisesti että mallinnuksella. On luotu perusteet ontelotilojen paloturvallisuuden parantamiseksi muuttamalla tilojen teknisiä ratkaisuja paloturvallisemmiksi tunnistamalla ja kuvaamalla ne ontelotilojen ominaispiirteet, jotka ovat kriittisiä ontelotilojen palojen kehittymisen ja leviämisen suhteen. Hankkeen tuloksena saadut tiedot ja mallinnuskeinot ovat riittävän perusteellisia ja toimivia, että niitä voidaan käyttää työn jatko-osissa, joissa selvitetään yksityiskohtaisesti, miten ontelopaloja voidaan ehkäistä tai lieventää tilojen asianmukaisen osastoinnin ja liekkien leviämisreittien katkomisen tai aktiivisten sammutusmenetelmien avulla. Tutkimustyön tulokset luovat edellytykset myös syvälliselle suljetun tilan paloilmioiden perustutkimukselle. Työssä on selvitetty, miten ontelon eri ominaisuudet, kuten koko, palavan aineen määrä ja laatu, tilaa reunustavat rakenteet sekä tilassa kulkevat virtaukset, vaikuttavat tulipalon kehittymisen ja etenemiseen ontelotiloissa. Tutkitut tapaukset liittyvät pääasiassa seuraaviin ontelotilojen tulipalotapausten kartoituksen perusteella tunnistettuihin tyyppitapauksiin: yläpohjan ontelot, alaslaskettujen kattojen tai nostettujen lattioiden ontelotilat, julkisivujen ja seinärakenteiden ontelot sekä kaksoislasijulkisivujen muodostamat ontelotilat. Tuloksia voidaan soveltaa myös rakennusten muiden ontelotilojen, kuten kanavistojen tai tiettyjen kattorakenteiden onteloiden, palotapausten tarkasteluun. Vaakasuuntaisia ontelotiloja koskevat tulokset tekevät mahdolliseksi kuvata kvantitatiivisesti, miten ontelon koko, palokuorma, reunojen laatu ja virtaukset vaikuttavat tilan paloturvallisuuteen. Pystysuuntaisista ontelotiloista tutkittiin ontelon suunnan ja tilan syvyyden vaikutusta. Julkisivuista selvitettiin tuuletusilmaraon merkitystä palon leviämiselle. Kaksoislasijulkisivujen tutkimus toi esille mm. ilmiön, jossa tila täyttyy savulla, koska savu leviää alaspäin, sekä tarpeen säädellä ontelon syvyyttä, jotta ulompi lasi tai rakenteet eivät pääse lämpenemään liikaa.			
Avainsanat fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, experimentation, simulation, compartments, ceilings, models, attics, roof structures, facades			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5953-3 (nid.) 951-38-5954-1 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero ROSU00512	
Julkaisu-aika Maaliskuu 2002	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivu-ja 125 s. + liitt. 63 s.	Hinta D
Projektin nimi Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen ominaispiirteet		Toimeksiantaja(t) Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati ry, Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto, ympäristöministeriö (YM)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Author(s) Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka			
Title Fire safety of cavity spaces Experimental and simulation study of fires in cavities			
Abstract <p>Hidden cavity spaces and voids in buildings constitute a significant fire hazard. In this work, fires in such spaces have been investigated experimentally and using fire simulation and modelling. Using these methods, the most important features of the cavity spaces with respect to fire growth and spread have been identified and quantified. The results obtained lay the foundation to technical solutions aimed at improving the fire safety of the cavity spaces. Most importantly the knowledge and methods achieved are sufficiently thorough and practicable so that they can be directly utilised in the future work on the fire safety of the cavity spaces, namely, studies aimed at establishing practical and sufficiently efficient ways for compartmentation of the void spaces and sealing potential routes of flame spread as well as suppression of cavity-space fires. The results provide material also for in-depth research of dynamics of fires in cavity-spaces.</p> <p>The study addresses the role that different properties of the cavity spaces play in fire growth and spread. The factors examined include the size, the amount and combustibility of the combustibles in the space, properties of boundaries of the cavity and potential forced flow through the space. The fire scenarios studied are related principally to the following typical cavity spaces which according survey made on fires of cavity spaces have been found very hazardous either with respect to frequency or severity of fires: voids in roof structures, including above-ceiling cavities and attics; cavities formed by suspended ceilings and under-floor voids and cavities in walls and facades. Also the fire hazards related to the cavity spaces made up by the inner and outer glass wall in double-skin facades have been studied. The results are applicable also beyond the specific cases listed above, e.g., to fire spread in channels in buildings.</p> <p>Concerning horizontal cavities, the results obtained make it possible to evaluate quantitatively how the size, fuel load, properties of the boundaries and potential flows in the space influence the fire safety. Concerning vertical cavities it was established how strongly the direction and depth of the void space influence the fire development. The studies of facade fires give information on the role of the ventilation cavity in fire spread. The investigation of fires in the cavity spaces of double-skin facades revealed, e.g., a novel phenomenon of smoke filling via downward smoke movement as well as a distinct need to regulate the cavity depth to avoid excessive heating of the outer glass or the structures of the facade.</p>			
Keywords fire safety, fire prevention, cavity spaces, buildings, experimentation, simulation, compartments, ceilings, models, attics, roof structures, facades			
Activity unit VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5953-3 (soft back ed.) 951-38-5954-1 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R0SU00512	
Date March 2002	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 125 p. + app. 63 p.	Price D
Name of project Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen ominaispiirteet		Commissioned by Palosuojelurahasto, Palotutkimusraati ry, Federation of Finnish Insurance Companies, Ministry of the Environment (YM)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT –
VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 2104 Hostikka, Simo, Kokkala, Matti & Vaari, Jukka. Experimental Study of the Localized Room Fires. NFSC2 Test Series. 2001. 49 p. + app. 46 p.
- 2106 Anttila, Virpi & Luoma, Juha. Turvavöiden käyttökokeilu junissa. Käyttö ja matkustajien mielipiteet. 2001. 27 s. + liitt. 9 s.
- 2108 Vares, Sirje. Kerrostalon ympäristövaikutukset. LVIS-2001-tyyppikerrostalo. 2001. 49-s.
- 2109 Ranta-Maunus, Alpo, Fonselius, Mikael, Kurkela, Juha & Toratti, Tomi. Reliability analysis of timber structures. 2001. 102 p. + app. 3 p.
- 2110 Anttila, Virpi. Talvijalankulku, liukastumistapaturmat ja kelitiedottamisen kehittäminen. 2001. 51 s. + liitt. 11 s.
- 2112 Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebbar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. 2001. 53 s. + liitt. 9 s.
- 2113 Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapito-järjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti. 2001. 75 s. + liitt. 15 s.
- 2116 Ryytänen, Tiia, Kallonen, Raija & Ahonen, Eino. Palosuojatut tekstiilit. Ominaisuudet ja käyttö. 2001. 101 s.
- 2118 Kärki, Otto. Alkolukko rattijuopumuksen ehkäisyssä. Esiselvitys. 2001. 85 s. + liitt. 3 s.
- 2119 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Rakennusten syttymistäajuudet PRONTO-tietokannasta 1996–1999. 2001. 66 s. + liitt. 16 s.
- 2120 Koota, Jaana. Construction site safety. Case United States. 2001. 39 p. + app. 3 p.
- 2121 Tervonen, Juha & Räsänen, Jukka. Environmental assessment of strategic transport actions. SEA in CODE-TEN. 2001. 25 p. + app. 7 p.
- 2123 Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebbar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. 2002. 95 s. + liitt. 51 s.
- 2124 Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. 2002. 51 s. + liitt. 13 s.
- 2125 Riihimäki, Markku & Siekkinen, Heidi. Asiakatarpeet kiinteistöliiketoiminnassa. Liike- ja toimistokiinteistöt. 2002. 74 s. + liitt. 10 s.
- 2126 Kauppinen, Anna-Kaisa, Pietilä, Paula, Sundbäck, Liisa & Kaleva, Hanna. Kiinteistöjohtamisen tehostaminen – vaihtoehtona ulkoistaminen. Ulkoistamisen edellytykset ja päätöksenteon mallintaminen. 2002. 73 s. + liitt. 4 s.
- 2128 Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. 2002. 125 s. + liitt. 63 s.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU	VTT INFORMATIONSTJÄNST	VTT INFORMATION SERVICE
PL 2000	PB 2000	P.O.Box 2000
02044 VTT	02044 VTT	FIN-02044 VTT, Finland
Puh. (09) 456 4404	Tel. (09) 456 4404	Phone internat. + 358 9 456 4404
Faksi (09) 456 4374	Fax (09) 456 4374	Fax + 358 9 456 4374