

Jukka Hietaniemi

Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus

Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus

Jukka Hietaniemi

ISBN 978-951-38-6971-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2007

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

VTT, Kemistintie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4815

VTT, Kemistvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4815

VTT Technical Research Centre of Finland, Kemistintie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4815

Hietaniemi, Jukka. Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus. Espoo 2007. VTT Tiedotteita – Research Notes 2415. 227 s. + liitt. 144 s.

Avainsanat fire safety, fire safety engineering, fire risk assessment, fire simulation, probabilistic fire simulation, dense residential building, performance based fire design

Tiivistelmä

Julkaisussa tarkastellaan viime aikoina yleistyneen, entistä tehokkaampaan maankäyttöön (tehokkuus jopa 0,5 tai vieläkin korkeampi) perustuvan ns. tiiviin ja matalan pientalorakentamisen paloturvallisuutta. Työssä määritettiin tiiviin ja matalan rakentamisen henkilöturvallisuuden ja omaisuudensuojan kannalta hyväksyttävä paloturvallisuustaso ja siihen vaikuttavat keskeiset tekijät sekä laadittiin vaatimustason täyttäviä periaatteellisia kaavoitukseen ja rakentamistapaan liittyviä ratkaisuja. Tutkimus toteutettiin käyttäen palosimuloinnin ja paloriskien arvioinnin uudenaikaisimpia menetelmiä. Työssä lähdettiin paloturvallisuuteen vaikuttavien osatekijöiden tutkimisesta, jolta pohjalta edettiin tuloksia yleistäen siten, että saatiin muodostettua kattava kuva tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuudesta. Näiden tulosten perustella kehitettiin kaavoituksen ja rakentamistavan ratkaisuja, joita paloturvallisuus näillä alueilla saadaan toteutumaan. Hankkeen toteutti VTT:n paloturvallisuuden tutkimusryhmä yhteistyössä keskeisten viranomais- ja teollisuustahojen kanssa.

Alkusanat

Tässä julkaisussa tarkastellaan viime aikoina yleistyneen, entistä tehokkaampaan maankäyttöön perustuvan pientalorakentamisen paloturvallisuutta. Tässä rakentamistavassa tehokkuusluku eli kerrosalan suhde tontin pinta-alaan on tyypillisesti suuruusluokkaa 0,5. Rakennukset toteutetaan enintään kaksikerroksisina ja siksi tätä rakentamistapaa kutsutaan yleisesti tiiviiksi ja matalaksi rakentamistavaksi.

Työssä määritettiin tiiviin ja matalan rakentamisen henkilöturvallisuuden ja omaisuusuojan kannalta hyväksyttävä paloturvallisuustaso ja siihen vaikuttavat keskeiset tekijät sekä laadittiin vaatimustason täyttäviä periaatteellisia kaavoitukseen ja rakentamistapaan liittyviä ratkaisuja. Tutkimus toteutettiin käyttäen palonsimuloinnin ja paloriskien arvioinnin uudenaikaisimpia menetelmiä. Työssä lähdettiin paloturvallisuuteen vaikuttavien osatekijöiden tutkimisesta, jolta pohjalta edettiin tuloksia yleistäen siten, että saatiin muodostettua kattava kuva tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuudesta. Näiden tulosten perustella kehitettiin kaavoituksen ja rakentamistavan ratkaisuja, joita paloturvallisuus näillä alueilla saadaan toteutumaan. Hankkeen toteutti VTT:n paloturvallisuuden tutkimusryhmä yhteistyössä keskeisten viranomais- ja teollisuustahojen kanssa.

Hankkeen toteuttajat kiittävät rahoittajia, Wood Focus Oy:tä, ympäristöministeriötä, Rakennuspolyuretaaniteollisuutta, Pientaloteollisuus ry:tä, Espoon kaupunkia ja VTT:tä sekä hankkeen johto- ja seurantaryhmää, jonka jäsenet ovat: Hannu Huhtala, Kuntaliitto; Jarkko Häyrinen, Länsi-Uudenmaan pelastuslaitos; Jorma Jantunen, ympäristöministeriö (johtoryhmän puheenjohtaja); Aarne Jussila, Pientaloteollisuus ry.; Pekka Kallioniemi, Inspecta Oy; Teppo Lehtinen, ympäristöministeriö; Jarmo Majamaa, SPEK; Kimmo Markkanen, Länsi-Uudenmaan pelastuslaitos; Esko Mikkola, VTT; Kai Miller, Helsingin kaupungin rakennusvalvontavirasto; Pekka Nurro, Wood Focus (nykyisin Metsäteollisuus ry.); Matti Orrainen, SPEK; Seppo Pekurinen, VAKES (nykyisin Finanssialan keskusliitto); Marja Piimies, Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto; Jaana Pullola, Rakennuspolyuretaaniteollisuus; Jussi Rahikainen, Keski-Uudenmaan pelastuslaitos; Taneli Rasmus, Pelastusopisto ja Helena Säteri, ympäristöministeriö.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Alkusanat.....	4
1. Johdanto.....	11
OSA I: LÄHTÖKOHDAT.....	15
2. Paloturvallisuustavoitteet.....	17
3. Uhkakuvat.....	22
3.1 Luettelo uhkakuvista.....	22
3.2 Uhkakuvien esiintymistodennäköisyydet.....	23
4. Siedettävissä oleva riskitaso.....	26
4.1 Tilastoista pääteltävissä oleva nykyinen palon leviämisen todennäköisyys.....	26
4.2 Välillisesti suoritettu palon leviämisen todennäköisyyden arviointi: esimerkkinä asuinhuoneistoista alkavat palot.....	27
4.3 Tässä työssä käytettävän siedettävää riskiä vastaavan tason valinta.....	30
OSA II: PALOTEKNINEN ANALYYSI.....	33
5. Uhattujen kohteiden syttyminen.....	35
5.1 Kyseeseen tulevat palon leviämisen mekanismit.....	35
5.2 Uhatun kohteen syttyminen säteilyn välityksellä leviävässä palossa.....	36
5.2.1 Suoraan säteilylle altistuvan kohteen syttyminen.....	36
5.2.2 Syttyminen ikkunan läpi menevän säteilyn vaikutuksesta.....	37
5.3 Uhatun kohteen syttyminen liekkikontaktin välityksellä leviävässä palossa.....	38
5.4 Uhatun kohteen syttyminen kipinöiden välityksellä leviävässä palossa.....	40
6. Uhatun kohteen lasien rikkoutuminen ja putoaminen pois paikaltaan.....	43
7. Palonkestoluokkien todennäköisyysperustainen kuvaus.....	44
8. Uhkakuvien määrällinen kuvaus.....	47
8.1 Asuinrakennusten sisältä alkavat palot.....	47
8.1.1 Huoneistopalon voimakkuus ja ajallinen kehittyminen.....	47
8.1.2 Huoneistopalon synnyttämä lämpösäteily.....	50
8.1.2.1 Malli ja sen soveltaminen olohuoneen tulipaloon.....	50
8.1.2.2 Suoraan sivulle suuntautuvan säteilyn määrä.....	57
8.1.2.3 Suunnan vaikutus.....	58

8.1.2.4	Lämpösäteilyn tuottama uhka makuuhuoneen ja keittiön tulipaloissa	63
8.1.3	Yhteenveto huoneistopalon synnyttämän lämpösäteilyn aiheuttamasta uhasta.....	64
8.2	Asuinrakennusten rakennelmien ulkoisten syttymien aiheuttamat palot	68
8.2.1	Seinän viereen tehty avotuli	70
8.2.1.1	Palon voimakkuus ja ajallinen kesto	70
8.2.1.2	Seinän viereen tehdyn avotulen synnyttämä lämpösäteily ...	71
8.2.1.3	Seinäateriaalin syttyminen ja palaminen ja siitä syntyvä lämpövuoto.....	72
8.2.2	Ulkona olevien kalusteiden tulipaloja.....	73
8.2.2.1	Ulkokalusteryhmät	73
8.2.2.2	Ulkona olevat pehmustetut huonekalut.....	77
8.3	Muista rakennuksista ja rakennelmista kuin asuinkohteista alkavat palot	81
8.3.1	Jätteiden keräyskatoksen palo	82
8.3.1.1	Jätteiden keräyskatoksen palon voimakkuus ja ajallinen kesto: neljän astian katos.....	82
8.3.1.2	Jätekatoksen palon aiheuttama lämpösäteily: neljän astian katos	87
8.3.1.3	Jätteiden keräyskatoksen palo: yhden astian katos	93
8.3.1.4	Suunnan vaikutus	94
8.3.1.5	Jätteiden keräyskatoksen palo: palokestävä yhden astian katos	95
8.3.2	Muiden suljettujen piharakennelmien palot.....	96
8.3.2.1	Muiden katosmaisten rakennelmien palon voimakkuus ja ajallinen kehitys	96
8.3.2.2	Muiden katosmaisten rakennelmien palon aiheuttama lämpösäteily	98
8.3.3	Yleinen malli katosten palon voimakkuuden arviointiin	100
8.3.4	Aitojen ja muiden ei-suljettujen kohteiden palot	102
8.3.4.1	Palamisen ja syntyvän lämpövuon malli.....	102
8.3.4.2	Esimerkkejä aidan syttymisestä, palamisesta ja sen ympäristöönsä aiheuttamasta uhasta	107
8.4	Huoneistopalon ja ulkoisen palokuorman palamisen yhdistetty malli	118
8.5	Ajoneuvoista alkavat palot	123
8.5.1	Yleisiä tuloksia palon kehittymisestä ja voimakkuudesta.....	123
8.5.2	Katoksen ulkopuolella palava ajoneuvo.....	126
8.5.3	Kahden auton palo eri taloja yhdistävässä katetussa tilassa.....	129
8.5.4	Autojen paikoituskatoksen tulipalo.....	131
8.6	Yläpohjan ontelon palot	136

8.6.1	Huoneistopalon leviäminen yläpohjan onteloon ja ontelopalon kehittyminen.....	136
8.6.2	Yläpohjan ontelopalon leviäminen muihin tiloihin.....	138
8.7	Hyvin voimakkaiden palojen uhkakuvia, esimerkkinä säiliöauton palaminen	141
8.8	Tuulen ja kasvillisuuden vaikutuksesta.....	143
8.8.1	Tuulen vaikutuksesta.....	143
8.8.2	Pensaiden, puiden ja muun kasvuston vaikutuksesta.....	144
9.	Palon havaitsemisen ja hälytyksen teon mallintaminen.....	145
9.1	Huoneistopalo.....	145
9.1.1	Palovaroittimen tai -ilmaisimen toiminta.....	148
9.1.1.1	Toimintaviive.....	148
9.1.1.2	Laitteen toimintavarmuus.....	149
9.1.2	Öiseen aikaan palovaroittimen tai -ilmaisimen signaaliin havahtumiseen kuluva aika.....	150
9.1.3	Palovaroittimen tai -ilmaisimen signaalin kuulemisesta hälytykseen kuluva aika.....	150
9.1.4	Viive palon kasvamisen alusta palotilan ikkunan rikkoutumiseen....	151
9.1.5	Ulkoisen liekehtimisen havaitsemisaika.....	151
9.1.6	Huoneistopalon havaitsemisen ja hälytyksen teon mallintamisen yhteenveto.....	153
9.2	Muiden kohteiden kuin asuinhuoneistojen palot.....	154
10.	Palokunnan toimintamahdollisuuksien mallintaminen.....	155
10.1	Viive hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen.....	155
10.2	Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle.....	157
OSA III: TULOKSET.....		159
11.	Palon alkukehityksen analysointi ajastariippuvina tapahtumaketjuina.....	161
11.1	Huonepalo ilman ulkoista palokuormaa.....	163
11.2	Ulkoisen palokuorman vaikutus.....	166
11.3	Lasin rikkoutumisen vaara.....	167
11.4	Turvallisen etäisyyden määrittämismenetelmä.....	168
11.4.1	Valitun riskitason, syttymisen todennäköisyyden ja turvallisen etäisyyden välinen riippuvuus.....	168
11.4.2	Turvallisen etäisyydet mitoituskäyrästöt ja eri tekijöihin liittyviä laskentamalleja.....	170
11.4.2.1	Huonepalo, ei ulkoista palokuormaa.....	171
11.4.2.2	Huonepalo ja ulkoinen palokuorma.....	177

12. Turvallisen etäisyyden mitoitushjeet	183
12.1 Huoneistopalo, ei ulkoista palokuormaa	183
12.2 Huoneiston ja ulkoisen palokuorman yhtäaikainen palo.....	185
12.3 Mitoitus silloin, kun huoneiston ulkopuoleinen palokuorma on huonemaisessa tilassa	188
12.4 Katosten palot.....	189
12.4.1 Katos, jota ei ole erityisesti suunniteltu paloa kestäväksi	189
12.4.2 Katos, joka kestää sen sisältämän palokuorman palon	190
12.5 Ajoneuvopalot	191
12.5.1 Erillisen ajoneuvon palo.....	191
12.5.2 Autokatoksen palo.....	192
13. Palonkestoa koskevat ohjeet	193
13.1 Huoneistopalot ml. ulkoinen palokuorma	193
13.2 Katosten palot.....	194
13.3 Ajoneuvojen palot	195
13.3.1 Yksittäisen ajoneuvon palo	195
13.3.2 Kahden auton palo kahta rakennusta yhdistävässä katetussa tilassa..	196
13.3.3 Autokatospalo	197
13.3.3.1 Autokatoksen palonkesto	197
13.3.3.2 Autokatospalon uhkaamien kohteiden palonkesto.....	201
OSA IV: SOVELTAMINEN	203
14. Esimerkki tulosten soveltamisesta tiiviin ja matalan alueen suunnittelussa	205
15. Joitain ohjeita koskien tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuutta	215
OSA V: YHTEENVETO	219
16. Yhteenveto	221
Kiitokset	222
Lähdeluettelo	223
Liite A: Huoneistopaloina alkavien tulipalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien määrällinen mallintaminen	
Liite B: Ulkoisen syttymisen aiheuttamien tulipalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien mallintaminen	

Liite C: Katoksien tulipalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien määrällinen mallintaminen

Liite D: Ajoneuvopalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien määrällinen mallintaminen

Liite E: Palon lieskahtamismahdollisuudesta

Liite F: Uhkakuvien esiintymistodennäköisyyksien arviointi

Liite G: Palokunnan toimien mallintaminen

Liite H: Palovaroittimen tai -ilmaisimen toimintaviive huoneistopalossa

Liite I: Palon havaitsemisen ja siitä tehtävän hälytyksen mallintamisen tulokset

Liite J: Kipinöiden aiheuttaman palovaaran mallintaminen

Liite K: Ulkopuolisen liekehähdinnän yksinkertaistettu laskentamenetelmä eli ns. Law'n malli (SFS-EN 1991, osa 1–2, opastava liite B)

Liite L: Näkyvyystekijän arvoja

1. Johdanto

Tässä raportissa tarkastellaan viime aikoina yleistyneen, entistä tehokkaampaan maankäyttöön perustuvan pientalorakentamista paloturvallisuutta. Tässä rakentamistavassa tehokkuusluku eli kerrosalan suhde tontin pinta-alaan on tyypillisesti suuruusluokkaa 0,5. Rakennukset toteutetaan enintään kaksikerroksisina ja siksi tätä rakentamistapaa kutsutaan yleisesti tiiviiksi ja matalaksi rakentamistavaksi. Tätä nimitystä käytetään myös tässä raportissa.

Hankkeen tavoitteena on määrittää tiiviin ja matalan rakentamisen henkilöturvallisuuden ja omaisuudensuojan kannalta hyväksyttävä paloturvallisuustaso ja siihen vaikuttavat keskeiset tekijät sekä laatia vaatimustason täyttäviä periaatteellisia kaavoitukseen ja rakentamistapaan liittyviä ratkaisuja. Tutkimus toteutetaan käyttäen palonsimuloinnin ja paloriskien arvioinnin uudenaikaisimpia menetelmiä, joisen avulla pyritään muodostamaan varsin kattava kuva tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuudesta ja niistä tekijöistä, jotka siihen vaikuttavat. Hankkeen toteuttaa VTT:n paloturvallisuuden tutkimusryhmä yhteistyössä keskeisten viranomais- ja teollisuustahojen kanssa.

Tutkimus voidaan lähestymistapojensa mukaan jaotella seuraavasti:

- Ensimmäisessä vaiheessa käytiin läpi tiiviistä ja matalaa rakennustapaa käyttäen toteutetun alueen palon alkulähteet eli asunnoissa sisällä syttyvät palot, asuinrakennusten ulkoiset syttymät, autojen palot joka autosuojissa tai -katoksissa, sekä jätekatosten ja muiden aleilla olevien rakennelmien palot (esim. varastointi- ja grillikatokset, lasten leikkimiseen tarkoitetut rakenteet ja erilaiset aidat). Tarkasteluissa otettiin huomioon olennaisten ympäristötekijöiden vaikutus, kuten tuulen ja kasvillisuuden vaikutus.
- Toisessa vaiheessa yleistettiin ensimmäisen vaiheen tulokset käyttäen todennäköisyysperustaista palonsimulointia. Tämä tarkoittaa sitä, että kun ensimmäisessä vaiheessa huoneistopaloa tarkasteltiin virtauslaskentaan perustuvalla kehittyneellä mallinustyökalulla käyttämällä tiettyjä valittuja tyypillisiä arvoja huoneen mitoille (leveys, syvyys, korkeus), ikkuna-aukkojen koolle, palokuormalla (määrä, palavuus, palamisen kehittymisnopeus), niin toisessa vaiheessa laskenta tehtiin käyttäen kuvaten kaikkia olennaisia tekijöitä niitä kuvaavilla jakaumilla, jotka perustuvat joko tilastoihin tai muihin määrällisiin tietoihin. Laskentatyökaluna toisessa vaiheessa käytettiin yksinkertaistettua mallia, joka kalibroitiin ensimmäisessä vaiheessa käytetyllä tarkemmalla mallilla saatuja tuloksia (jotka puolestaan oli osoitettu kelpoiseksi vertaamalla laskentatuloksia kokeisiin).
- Kolmannessa vaiheessa luotiin kuva siitä, miten eri alkupaloista alkavat tapahtumaketjut voivat edetä päämääränä lopulta määrittää, voiko jokin tapahtumaketju jolloin merkittävällä todennäköisyydellä lopulta päätyä aluepaloksi tai edes

sen mahdollisuudeksi. On huomattava, että tapahtumaketjujen ja niiden todennäköisyyden liittäminen on koko asian ydin: jos todennäköisyysulottuvuus jätetään sivuun, niin emme voisi rakentaa ainoatakaan modernia puukaupunkia, koska aina löytyy jokin – vaikkakin todennäköisyydeltään äärimmäisen pieni – tapahtumakulku, joka voi johtaa aluepaloon. Mutta toisaalta tältä pohjalta emme voisi rakentaa – tai ylipäätään tehdä yhtään mitään, koska äärimmäisen pienen todennäköisyyden omaava onnettomuuden siemen piilee kaikessa toiminnassamme. Tarkastelussa otetaan huomioon myös palokunnan vaikutus, koska tehokkaat palokunnat ovat yksi niistä avaintekijöistä, jotka ovat kaupunkipalojen esiintymisen lopettaneet.

Hankkeessa saadut tulokset voidaan jakaa yleisiin ja erityisiin. Yleiset tulokset ovat sellaisia, joita voidaan soveltaa alueiden kaavoituksessa, yleissuunnittelussa ja eri toimintoja vastaavien kohteiden sijoittelussa. Erityiset tulokset ovat laskentamalleja ja sääntöjä, joita voidaan soveltaa tiettyä rakennusta tai rakennetta koskeviin yksityiskohtaisissa suunnittelutehtävissä. Tästä annetaan esimerkki kuvassa 2b, jossa yleistä turvaetäisyyttä koskevaa tulosta tarkennetaan ikkunakokoa koskevalla tarkemmalla analyysillä.

Tämä raportti on erittäin laaja johtuen seuraavista syistä:

- Hankkeen alussa olemassa olleet palonleviämisen ja kohteiden turvallisten välimatkojen arvioinnin menetelmät (ks. esim. liite D) antavat vain karkean, voimakkaasti lähtöoletuksista riippuvan mieluummin kvalitatiivisen kuin kvantitatiivisen kuvan tarvituista turvaetäisyyksistä. Käytännön hyötyjen saavuttamiseksi vaadittava turvaetäisyyksien resoluutio on kuitenkin hyvin tarkka, koska korkean tonttihinnan alueilla, joilla tiivistä ja matalaa rakentamista eniten käytetään, yksikin metri on merkittävä mitta. Jos esim. $8 \times 8 \text{ m}^2 = 64 \text{ m}^2$:n suuruisen alueen pinta-alaa voitaisiin vähentää pudottamalla ko. neliön molempien sivujen mittaa yhdellä metrillä, vähenee pinta-ala 49 m^2 :iin eli yli 20 %. Siksi tässä työssä on luotu aivan uudet, entistä selvästi tarkemmat laskentamenetelmät palonleviämisen ja kohteiden turvallisten välimatkojen arviointiin.
- Eräs paloteknisen laskennan perusvaikeuksista on lähtötietojen määrittäminen. Siksi tämä vaihe monesti kierretään jopa tutkimuksellisissa hankkeissa valitsemalla lähtötiedot niiden määrittämisen sijaan. Lähtötietojen valintaan perustuva lähestymistapa on kuitenkin käytännön suunnittelutyön menettelytapa ja tutkimuksessa tulee mahdollisuuksien mukaan nojautua lähtötietojen määrittämiseen vankkojen kokeellisten tai teoreettisten tulosten perusteella. Tässä työssä annetaan suuri paino lähtötietojen mahdollisimman laaja-alaiseen kvantitatiiviseen määrittämiseen käyttäen teknis-luonnontieteellistä analyysiin perustuvaa metodia [Ritchey 1991]. Tämä vaihe muodostaa työn ensimmäisen vaiheen.

- Analyysi tuottaa paljon yksityiskohtaista tietoa, joka käytännössä sovellettavien tulosten aikaansaamiseksi on syntetisoitava kokonaisuuksiksi. Tämä vaihe muodostaa työn toisen vaiheen.
- Työn viimeisenä vaiheena on tulosten soveltamisen näyttäminen esimerkkien avulla.

Esitys on jaettu viiteen osaan:

- **Lähtökohdat**, luvut 2, 3 ja 4: näissä luvuissa esitetään tutkimuksen peruslähtökohdat.
- **Palotekninen analyysi**, luvut 5–10: näissä luvuissa esitetään uhkakuvien määrällinen analysointi paloteknistä mallintamista käyttäen.
- **Tulokset**, luvut 11–13: näissä luvuissa esitetään uhkakuvien määrällisen mallintamisen tulokset.
- **Soveltaminen**, luvut 14–15: näissä luvuissa esitetään esimerkein ja ohjeiden avulla, miten saatuja tuloksia voidaan soveltaa tiiviin ja matalan pientalorakentamisen paloturvallisuussuunnittelussa.
- **Yhteenveto**, luku 16: tämä luku antaa lyhyt esityksen tutkimusta ja sen olennaisimmista tuloksista.

Raportti on lukuisia liitteitä, joissa esitetään lähinnä paloteknisen analyysin yksityiskohtia.

Raportti on laaja, koska siinä toisaalta pyritään esittämään tiiviin ja matalan pientalorakentamisen paloturvallisuus lähtien sen peruselementeistä, jotta saadaan syntymään mahdollisimman neutraali, ilmiöiden luonteeseen perustuva kriittisenkin teknis-tieteelliseen tarkastelun kestävä tulos ja toisaalta myös painotetaan lähtökohtia ja tuloksia pyrkimyksenä tukea alan viranomaistoimintaa ja muiden kuin palotekniikan alalla toimivien suunnittelijoiden ja muiden toimintaa.

Yleisenä raportin lukuohjeena voidaan todeta, että osat ”lähtökohdat”, ”tulokset”, ”soveltaminen” ja ”yhteenveto” muodostavat kokonaisuuden, josta työn sisältö ja tulokset käyvät selville. Osa ”palotekninen analyysi” sekä liitteet antavat detaljitietoa, jonka läpikäyminen ei ole välttämätöntä. Paloteknisessä analyysissä on arvokasta tietoa etenkin paloteknisille suunnittelijoille ja myös paloviranomaisille.

OSA I: LÄHTÖKOHDAT

2. Paloturvallisuustavoitteet

Tässä luvussa esitetään ne paloturvallisuustavoitteet, joihin tässä tutkimuksessa keskitytään ja joihin tarkastelu rajataan. Erityisesti tämä tarkoittaa linjanvetoa siitä, onko tutkimuksen aiheena aluepalojen tutkimus vai uuden tyyppisen P3-paloluokan rakentamistavan paloturvallisuuden tutkimus.

Tämän tarkastelun pohjaksi havainnollistetaan kuvissa 1 ja 2 huoneistopalona alkavan palon leviämisen mahdollisia tapahtumaketjuja. Niissä palon leviäminen on jaoteltu vaiheisiin, joista ensimmäinen on jonkin kohteen syttyminen (vaihe 1, Kuva 2) ja toinen on palon leviäminen edelleen tästä kohteesta (vaihe 2, Kuva 2). Jo pelkästään ensimmäisen syttymän kehittyminen- ja leviämistapojen määrä on suuri ja em. kuvien monimutkaisuus havainnollistaa tätä varsin hyvin. Kun tähän lisätään toinen syttymä ja sen mahdolliset kehittyminen- ja leviämistavat, kaaviosta tulee erittäin laaja ja monimutkainen. Kuva 3 pyrkii havainnollistamaan sitä, miten toisiinsa liittyvien tapahtumaketjujen tarkastelu, joilla on useita ehdollisia haarautumisvaihtoehtoja, johtaa jo parin etenemiskelen jälkeen hyvin suureen määrään eri vaihtoehtoja¹. Tällaisen uhkakuvamäärän käsittely olisi toisaalta äärimmäisen työlästä² ja toisaalta on kyseenalaista, olisiko tuolla saadulla tiedolla mitään käyttöä.

Kuvassa 4 havainnollistetaan, miten riskin suuruus nousee palon leviämistapojen kasvaessa: riippuvuus voimakkaasti (eksponentiaalisesti) nouseva siten, että jo toisen syttymän kohdalla riskin suuruus noin satakertaistuu ja kymmentuhatkertaistuu kolmannessa syttymisvaiheessa. Tämä esitys on semi-kvalitatiivinen, mutta sen esille tuoma tulos on merkittävä: jos palo leviää useiden kohteiden syttymiin voivat syntyvät seuraukset olla niin suuret, että niitä ei voida pitää kohtuullisina. **Siksi tässä työssä keskitytään ensimmäisen syttymisen estämiseen.**

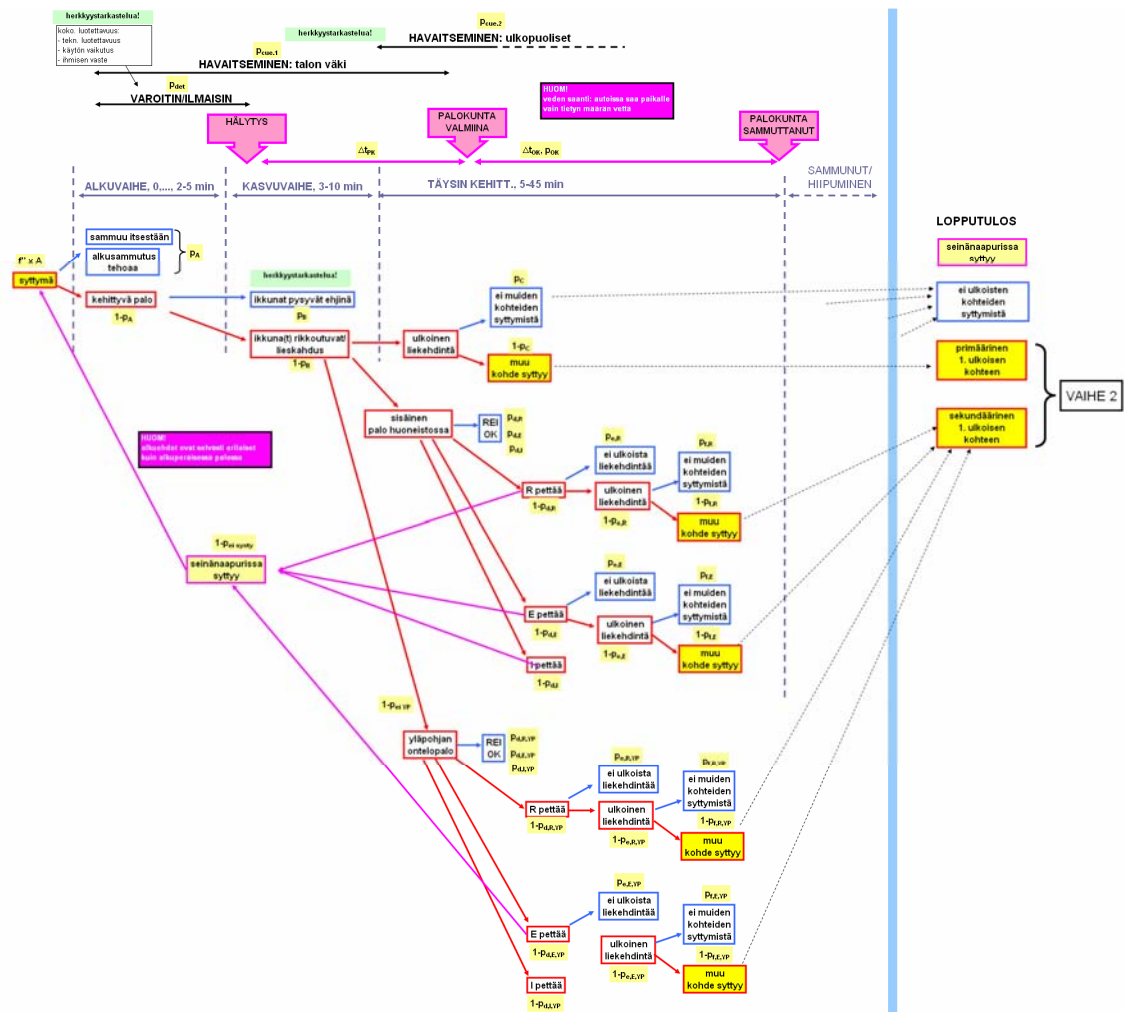
Aluepalon mahdollisuus on todettu hyvin pieneksi Ympäristöministeriön toimeksiantosta suoritetussa selvityksessä, jossa käytiin läpi puuta käyttäen rakennettujen alueiden tulipalojen historiaa ja tänä päivänä lähinnä Pohjoismaiden alueilla sattuneita palotapa-uksia [Heikkilä & Kauppinen 2005]. sekä Suikkarin tutkimuksessa [Suikkari 2007], jossa on selvitetty puurakennusalueiden palotapausten historiaa. Aluepalon vaaran pienuuteen vaikuttavat mm. seuraavat seikat:

¹ Jos vaihtoehtojen määrä on N ja askelien määrä, on tapahtumapolun haarojen määrä n :nellä askeleella N^n . Jos esim. $N = 5$ ja $n = 3$ (Kuva 3), on haarojen määrä 125. Jos kullakin vaihtoehtolla olisi esim. kaksi alivaihtoehtoa, so. $N = 10$, olisi haarojen lukumäärä 3. askelen jälkeen 1000.

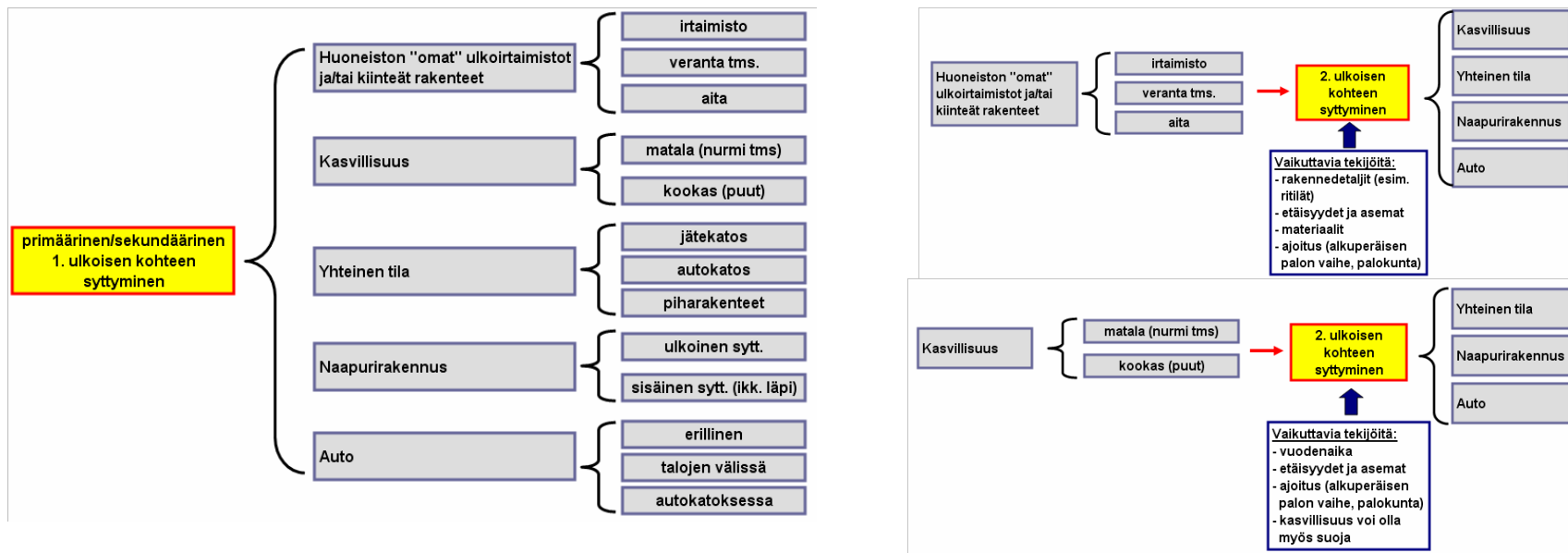
² Kuten tämä raportti osoittaa, käsittely on hyvin laaja, vaikka se rajoitetaankin 1. syttymiseen.

- nykyään palokuntien toimintakyky (laitteet, toimintatavat, hälytysjärjestelmät, jne.) on ratkaisevasti parempi kuin esim. 1800-luvulla, jolloin maassamme viimeiset kaupunkipalot tapahtuivat;
- olennainen merkitys on myös katteiden palokäyttäytymisen parantumiselle, joka estää tehokkaasti kipinöiden välityksellä tapahtuvan palon leviämisen;
- nykyinen rakennustapa on P3-luokassakin selvästi takavuosien pientalorakentamista paloturvallisempaa, esim. vanhoissa puutaloissa esiintyviä moninaisia palon leviämislle reitin tarjoavia rakoja ja onteloita ei uusissa P3-luokan rakennuksissa ole.

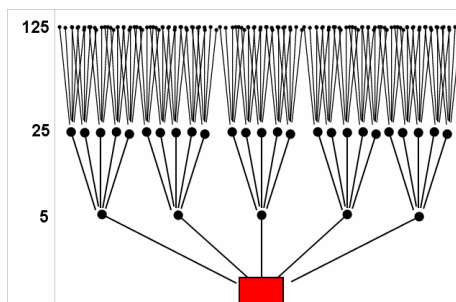
Tutkimus ei siten ole aluepalotutkimus, vaan tutkimus siitä, miten uuden tyyppisessä P3-luokan rakentamistavassa voidaan toteuttaa suomen Rakennusmääräyskokoelman osan E1 [Ympäristöministeriö 2002] luvussa 9 esitetty vaatimus, että ”**Palon leviäminen rakennuksesta toiseen ei saa vaarantaa henkilöturvallisuutta eikä aiheuttaa kohtuuttomana pidettäviä taloudellisia eikä yhteiskunnallisia menetyksiä**”.



Kuva 1. Huoneistopalon leviämisen ensimmäinen vaihe.

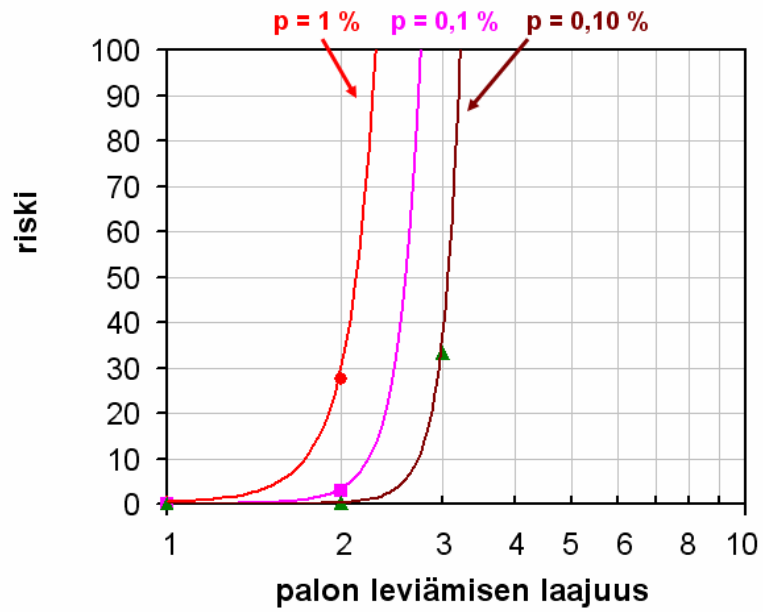


Kuva 2. Huoneistopalon leviämisen toinen vaihe.

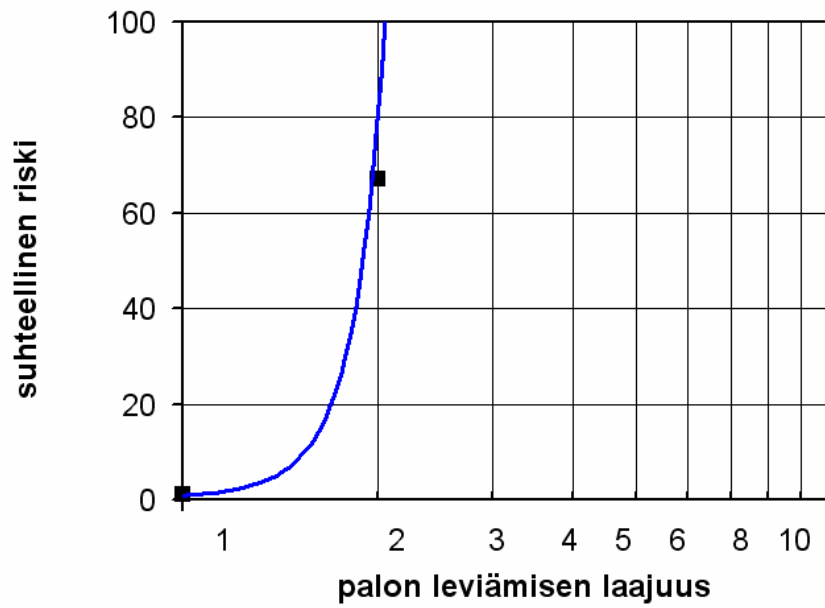


Kuva 3. Esimerkki tapahtumaketjun polkujen lukumäärän eksponentiaalisesta kasvusta.

a)



b)



Kuva 4. Kvalitatiivinen esitys riskin suuruuden kasvamisesta palon leviämisen laajuuden kasvaessa: a) riski eri riskitasoilla ja b) suhteellinen riski.

3. Uhkakuvat

Tässä työssä uhkakuvalla tarkoitetaan palon syttymisen ja syttymispaikassa tapahtuvan palon kehittymisen muodostamaa tapahtumakokonaisuutta. Siten uhkakuva tässä työssä vastaa "alkupaloa". Jos alkupalo ei leviä ympäristöönsä, niin tässä määritelty uhkakuva sisältää palon kehittymisen aina sen loppumiseen asti. Käytännössä palo loppuu useimmiten siihen, että palokunta sammuttaa sen. Tässä työssä käytetään kuitenkin seuraavalaista kaksivaiheista lähestymistapaa:

1. Ensin uhkakuvat käsitellään tapahtumaketjuina, jotka päättyvät vasta palon luonnolliseen loppumiseen, mikä yleensä vastaa palokuorman loppumista.
2. Tarkastelun toisessa vaiheessa uhkakuviin liitetään niiden todennäköisyyteen liittyvät seikat eli
 - a. uhkakuvien esiintymistodennäköisyys
 - b. uhkakuvan ajallisen kehittymisen todennäköisyys, mikä ottaa huomioon sen, että yleensä ottaen mitä kauemmin palon syttymisestä on kulunut, sitä pienempi on todennäköisyys, että palo ylipäänsä jatkuu.

Laskennallinen tekniikka, jota uhkakuvien todennäköisyyksien tarkastelussa käytetään, on Ajasta riippuvien tapahtumapuiden tekniikka [Hietaniemi ym. 2002, Korhonen ym. 2003, Korhonen & Hietaniemi 2003, Korhonen & Hietaniemi 2004, Hietaniemi ym. 2004, Hietaniemi & Korhonen 2005].

3.1 Luettelo uhkakuvista

Uhkakuvat luetellaan taulukossa 1. Ne on valittu hankkeen johtoryhmän ohjaamina seuraavin perustein:

- esiintymistodennäköisyys (esim. huoneistopalot),
- vaara, että palo pääsee kehittymään ilman sen nopeaa havaitsemista (esim. ulkoiset syttymät),
- mahdollisen seuraamuksen suuruuden takia suuren riskin omaavat uhkakuvat (esim. tankkiauton palaminen).

Taulukko 1. Uhkakuvat.

Uhkakuva	Lisätietoja
Asuinrakennusten sisältä alkavat palot: - olohuone - makuuhuone - keittiö	Tätä uhkakuvaa käsitellään tarkemmin kohdassa 8.1 ja liitteessä B.
Asuinrakennusten ulkoiset syttymät	Tätä uhkakuvaa käsitellään tarkemmin kohdassa 8.2.
Muissa rakennuksista ja rakennelmista kuin asuinkehteistä alkavat palot - jäteastioiden keräyskatoksen palo - muiden piharakennelmien palot	Tätä uhkakuvaa käsitellään tarkemmin kohdassa 8.3 ja liitteessä C.
Autosta alkavat palot	Tätä uhkakuvaa käsitellään tarkemmin kohdassa 8.5 ja liitteessä D.
Hyvin voimakkaat palot - tankkiauton palaminen	Tätä uhkakuvaa käsitellään tarkemmin kohdassa 8.7.

3.2 Uhkakuvien esiintymistodennäköisyydet

Uhkakuvien esiintymisen todennäköisyydet muodostavat perustan niihin liittyvien riskien arvioinnille. Nämä todennäköisyydet voidaan arvioida palotilastojen avulla. Yhteen veto näistä todennäköisyyksistä esitetään taulukossa 2. Perustelut esitetään liitteessä E.

Ulkoisten syttymien syitä kartoitettiin käymällä läpi 700 kymmenen vuoden ajanjaksolla 1996–2005 PRONTO-onnettomuustietokantaan kirjattua muita asuinrakennuksia kuin kerrostaloja koskevan tulipalon syttymissyyn kuvausta. Taulukossa 3 esitetään tulipalojen määrän arvio syttymissyyn, kuten sähköinen syy, kulutus, työsuoritus, jne. mukaan jaoteltuna. Nähdään, että sähköiset syyt ja – ehkä hieman yllättäen – tuhkan varomaton käsittely sekä hormeihin, yms. liittyvät syyt ovat kolme tärkeintä syttymissyitä.

Tahallisia sytytyksiä oli kirjattu noin 50 kpl eli 7 % kaikista ulkoisista syttymisistä. Näiden 50 tapauksen tarkempi tarkastelu esitetään taulukossa 3.

Taulukko 2. Uhkakuvien esiintymistodennäköisyydet.

Uhkakuva	Keskimääräinen esiintymistiheys
Rakennuksen sisältä alkavat palot:	0,0018 per rakennus ja vuosi $3 \cdot 10^{-4}$ per asunto ja vuosi
- olohuone	$9 \cdot 10^{-5}$ per asunto ja vuosi
- makuuhuone	$3 \cdot 10^{-5}$ per asunto ja vuosi
- keittiö	$8 \cdot 10^{-5}$ per asunto ja vuosi
Rakennuksen ulkoiset syttymät - seinän viereen tehty avotuli - irtaimet ulkokalusteet	0,0002 per rakennus ja vuosi
Muista rakennuksista ja rakennelmista kuin asuinkehteistä alkavat palot - jäteastioiden keräyskatoksen palo - muiden piharakennelmien palot	60 kpl per vuosi koko maassa $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ per jätekatos ja vuosi ^{a)}
Autosta alkavat palot	$1,4 \cdot 10^{-5}$ per rakennus ja vuosi
Hyvin voimakkaat palot - tankkiauton palaminen	3 kpl per vuosi koko maassa ^{a)}

a) Arvioon liittyy merkittävä epävarmuus, ks. liite E.

Taulukko 3. Otos muiden asuinrakennusten kuin kerrostalojen ulkoisesti syttyneiksi merkittyjen tulipalojen syttymissyistä (700 paloa ajanjaksolla 1996–2005).

Syy	Määrän suuruusluokka	Osuus
sähköiset syyt	100	14 %
varomaton tuhkan käsittely	80	11 %
hormit, piiput, kipinät	80	11 %
katokset, laatikot, astiat	60	9 %
kulutus, roskanpoltto yms.	60	9 %
ukkoseen liittyvä	60	9 %
kynttilätuotteet	60	9 %
tupakointi	60	9 %
tulityöt tai muut työt	50	7 %
lasten leikki	40	6 %
autot, mopot, yms.	30	4 %
grillaus ja muu ruokaan liittyvä	10	1 %

Taulukko 4. Tahalliseksi merkittyjen noin 50 tulipalon sytyttämisen tarkempi analysointi. Otoksena muiden asuinrakennusten kuin kerrostalojen ulkoisesti syttyneiksi merkityt tulipalot ajanjaksolla 1996–2005 (yhteensä 700 paloa).

Syy	Määrä	Osuus kaikista paloista	Osuus tahallisista paloista
palava neste	5	0,7 %	10 %
muu spesifioitu sytytystapa (puu, paperi, muovisanko, matto)	9	1,3 %	18 %
tarkemmin spesifioimaton sytytys	36	5,1 %	72 %
yhteensä	50	7 %	

4. Siedettävissä oleva riskitaso

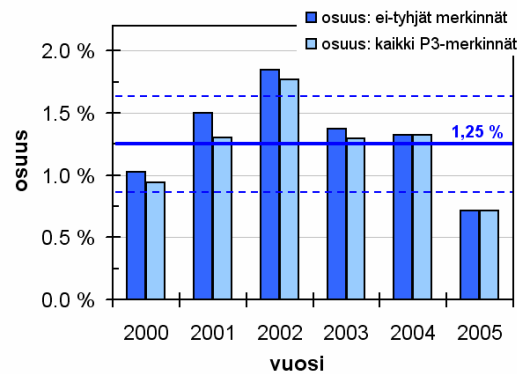
Tässä työssä käytetään todennäköisyysperustaista paloturvallisuuden arviointia. Se toteutetaan siten, että eri uhkakuville lasketaan palotilanteen kehittymisen tapahtumaketjuja, joita kuvataan esim. jonkin kohteen syttymisen todennäköisyytenä tai todennäköisyytenä, että palorasitus ylittää tietyn rakenteellisen palonkeston. Nämä tapahtumaketjuihin liittyvät todennäköisyydet ovat ehdollisia todennäköisyyksiä, joiden ehtotekijänä on se, että jokin kohde alueella on syttynyt ja että palo on tämän lisäksi kehittynyt niin voimakkaaksi, kuin mitä työssä käsitellyt palotapahtumat ovat. Viimeksi mainittu tarkoittaa esim. sitä, että huoneistoissa syttyneistä paloista tässä työssä käsitellään vain niitä, jotka kehittyvät lieskahdukseen saakka tai katosten paloista käsitellään vain sellaisia, joissa katos alkaa palaa kokonaan. Nämä palot muodostavat vain osan kaikista syttymistä, koska osa alkaneista tulipaloista ei kehity suuriksi, vaan ne joko hiipuvat itseksensä esim. hapen tai palavan aineen loppuessa tai tulevat sammutetuiksi tai rajatuiksi ihmisten toimesta.

4.1 Tilastoista pääteltävissä oleva nykyinen palon leviämisen todennäköisyys

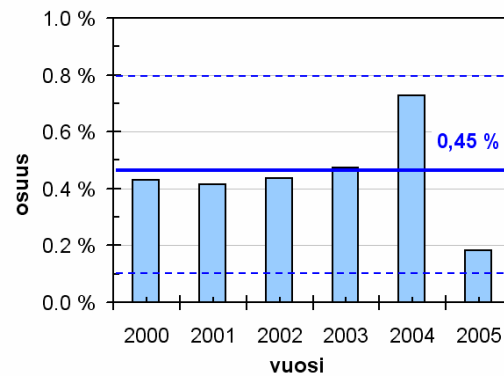
P3-paloluokkaan kuuluvien rakennusten nykyistä palovaarojen tasoa voidaan arvioida palotilastojen perusteella. Vaaraa, että leviää toiseen rakennukseen kartoitettiin käymällä läpi kuuden vuoden ajanjaksolla 2000–2005 PRONTO-onnettomuustietokantaan kirjatut rakennuspalot. Näistä haettiin ensin ne palot, joiden oli merkitty kohdistuneen P3-luokan rakennuksiin ja tämän jälkeen etsittiin kentästä ”*Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa*” koodilla 05 eli ”*Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)*” merkittyjen palojen lukumäärä. Tulokset esitetään yksityiskohtaisesti liitteellä E ja niiden yhteenveto kuvassa 5a. Keskiarvo tarkastellun kuuden vuoden aikana palon leviämisen todennäköisyydelle on $1,25 \% \pm 0,4 \%$. Palon leviäminen toiseen rakennukseen tapahtuu P3-rakentamisen paloturvallisuuden nykytasolla siis noin kerran 80 palossa.

Kun tarkastellaan vain P3-paloluokan asuinrakennusten paloja, tarkastellun kuuden vuoden aikana määritetty palon leviämisen todennäköisyys on noin $0,5 \% \pm 0,2 \%$ (Kuva 5b). Palon on merkitty levinneen toiseen palo-osastoon noin kymmenkertaisessa määrässä paloja: tehdyn tilastokartoituksen mukaan todennäköisyys palon leviämiselle toiseen palo-osastoon P3-paloluokan asuinrakennusten tulipaloissa on noin $4,5 \% \pm 1,0 \%$ (Kuva 6).

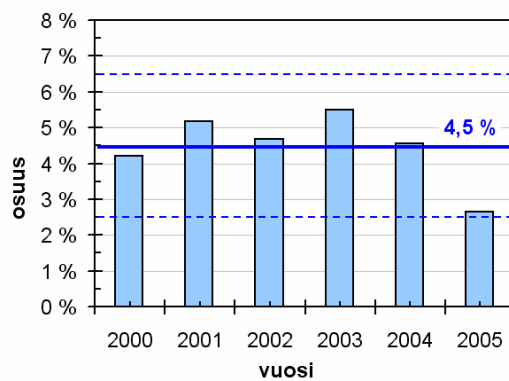
a)



b)



Kuva 5. Palotilastoista määritetty riski palon leviämiselle toiseen rakennukseen:
a) kaikki P3-luokan rakennukset ja b) P3-luokan asuinrakennukset.



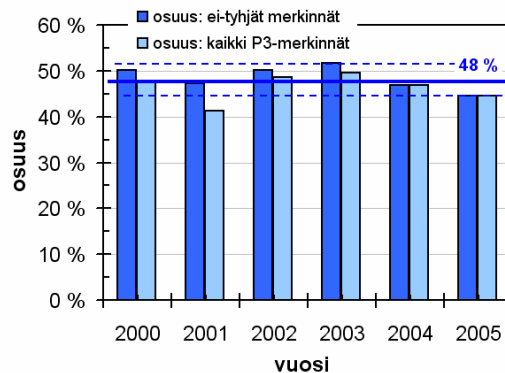
Kuva 6. Palotilastoista määritetty riski palon leviämiselle toiseen palo-osastoon
P3-luokan asuinrakennuksissa.

4.2 Välillisesti suoritettu palon leviämisen todennäköisyyden arviointi: esimerkkinä asuinhuoneistoista alkavat palot

Asuinhuoneistoissa alkavista tulipaloista tässä työssä tarkastellaan lähinnä paloja, jotka kehittyvät niin voimakkaiksi, että ne rikkovat ikkunan ja aiheuttavat siten ulkoisen liekehähdinnän. Käytännössä tämä tarkoittaa lieskahtavia paloja. Myös sitä mahdollisuutta

tarkastellaan, että palo leviää palon alkamishuoneiston sisällä ja muuttuu ulkoiseksi liekehännäksi muuta tietä kuin ikkunan rikkoutumisen kautta esim. siten, että palo leviää yläpohjaan ja muuttuu ulkoiseksi liekehännäksi, kun rakennuksen katto romahtaa.

Osa syttymistä ei johda niin voimakkaaseen paloon, että ne rikkovat ikkunan. Tämän osuuden arvioimiseksi tehtiin liitteellä E esitetyn kaltainen kartoitus vuosina 2000–2005 PRONTO-tietokantaan merkityistä P3-luokan rakennusten paloista. tarkemman tiedon puuttuessa tilastoja tulkittiin siten, että palon katsottiin mahdollisesti olevan niin voimakas, että se voisi rikkoa ikkunan silloin, kun sitä palokunnan paikalle saapuessa on kuvattu koodeilla 02 = "Koko syttymishuone", 03 = "Koko palo-osasto", 04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin" tai 09 = "Koko rakennus". Tulokset esitetään kuvassa 7. Keskiarvo tarkastellun kuuden vuoden aikana "voimakkaan" palon osuudelle palokunnalle ilmoitetuista paloista on $48\% \pm 3\%$. Tässä työssä käytetään arvoa 50% .



Kuva 7. Palotilastoista määritetty palon laajuus palokunnan saapuessa paikalle P3-luokan rakennuksissa.

Korhosen ja Hietaniemen raportin [2004] asuinhuoneistojen syttymistäajuustiheys on noin $8 \cdot 10^{-6} / (\text{m}^2\text{a})$. Jos oletetaan tyypillisen huoneiston pinta-alan olevan noin suuruusluokkaa $100, \dots, 150 \text{ m}^2$ asunnolle $\sim 8, \dots, 12 \cdot 10^{-4}$ per asunto ja vuosi. Tässä työssä tarkasteltavien palojen todennäköisyyden ehtotekijän suuruus on siis

$$p_{\text{asunto}} \approx 50\% \times (8, \dots, 12) \cdot 10^{-4} \text{ per asunto ja vuosi} = (4, \dots, 6) \cdot 10^{-4} \text{ per asunto ja vuosi} \quad (1)$$

tai noin yksi syttymä tuhatta asuntoa kohden.

Paloteknisellä laskennalla ei voida määrittellä täsmällisesti rajaa, jonka alapuolella jonkun tapahtuman todennäköisyyttä voidaan pitää merkityksettömänä. Tällainen rajataso on kuitenkin olemassa, koska absoluuttinen turvallisuus on mahdottomuus. Tuota rajatasoa voidaan etsiä muulta kuin perinteisen rakentamisen piiristä, esim. ydinvoimaloita

koskevassa Säteilyturvakeskuksen ohjeessa [STUK 2003] määritellään ydinvoimaloilta vaadittava turvallisuustaso seuraavasti:

Valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 13 § edellyttää, että suuriin radioaktiivisten aineidenpäästöihin johtavien onnettomuuksien on oltava erittäin epätodennäköisiä. Ydinvoimalaitosta koskevat seuraavat numeeriset suunnittelutavoitteet:

1. Sydänvauriotaajuuden odotusarvo on pienempi kuin 10^{-5} /vuosi.
2. Valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 12 §:ssä tarkoitetun raja-arvon ylittävän päästön taajuus on odotusarvoltaan pienempi kuin $5 \cdot 10^{-7}$ /vuosi.

Aluepalon mahdollisuuden kannalta huoneistopaloihin liittyvä ensisijainen vahinkotodennäköisyys p_1 tarkoittaa käytännössä sitä, että huoneistopalo sytyttää jonkin muun kohteen eli esim. lähellä olevan aidan, muun rakennelman tai rakennuksen seinän. Jotta tilanteesta aiheutuisi vaaraa henkilöille, on tämän syttymän kehityttävä tulipaloksi, johon siihenkin liittyy aikaviiveitä ja tiettyjä kehittymistodennäköisyyksiä. Kyseessä on siis mahdolliseen onnettomuuteen johtavan kehityskulun mahdollistava tekijä, joka varsin luontevasti rinnastuu edellä mainituista ydinvoimalaa koskevista tapahtumista sydänvauriotaajuuteen, joka sinänsä ei välttämättä aiheuta vaaraa ympäristölle, mutta jossa voi piillä katastrofin alku. Jos otamme siedettävän riskin tasoksi arvon 10^{-5} /vuosi, niin turvalliseksi katsottavan vahinkotodennäköisyyden p_1 määrällinen arvio saadaan kaavasta

$$p_1 \times p_{alue} < 1 \cdot 10^{-5} \text{ per vuosi} \quad , \quad (2)$$

joka yhtälön (2) nojalla vastaa

$$p_1 < \frac{1 \cdot 10^{-5} \text{ per vuosi}}{(4, \dots, 6) \cdot 10^{-4} \text{ per vuosi}} = 0,8, \dots, 1,3 \% \quad . \quad (3)$$

Ensimmäisen syttymisen todennäköisyys on siis välillä 0,8–1,3 %. Näiden kahden todennäköisyydestason jää alue, jota englanninkielisen kirjallisuuden perusteella kutsutaan usein ALARP-alueeksi eli *As Low As Reasonably Practicable* -alueeksi, jolla riski on siedettävissä, jos sitä ei voida alentaa käytännössä toteuttamiskelpoisilla keinoilla [Korhonen ym. 2005] (muilla luotettavuustekniikan aloilla sen, mikä on toteuttamiskelpoista ja mikä ei, määräävät rajalliset rahalliset resurssit tai teknisten laitteiden toiminnan rajat).

4.3 Tässä työssä käytettävän siedettävää riskiä vastaavan tason valinta

Edellä kohdassa 4.1 määritettiin P3-paloluokkaan kuuluvien rakennusten toiseen tapahtuvan palon leviämisen nykytasolla olevaksi riskiksi noin 0,5 % ja toiseen palo-osastoon leviämisen riskiksi noin 5 %. Toisaalta kohdassa 4.2 esitetyn välillisen arvioinnin perusteella päädyttiin tasoon 1 %.

Riskissä on kaksi tekijää

- epätoivotun tapahtuman todennäköisyys ja
- tämän tapahtuman vakavuus (so. seuraamukset).

Tässä työssä tarkasteltujen syttymien vakavuutta punnittaessa tulee ottaa huomioon seuraavat seikat:

- Palonsimulointitulokset osoittavat, että tässä tutkimuksessa käsitellyt syttymät pääsääntöisesti aiheuttavat itseään ylläpitävän palon vain siksi aikaa, kun syttymän aiheuttanut palo jatkuu. Syttymä ei siis sinänsä aina johda toisen kohteen ihmishenkiä tai omaisuutta merkittäväällä tavalla uhkaavaan tulipaloon.
- Syttymisen ja lasin rikkoutumisen kriteerinä käytetään tapahtumaa, joka vastaa sitä, että syttymisen tai lasin rikkoutumisen tulee mahdolliseksi. Kriteerin täytyminen ei siis aina tarkoita sitä, että syttyminen tapahtuu tai lasi rikkoutuu, vaan että nämä ei-toivotut tilanteet tulevat mahdollisiksi:
 - Esimerkiksi käytetty syttymiskriteeri (suuruusluokka 10 kW/m²:n suurinen lämpövuoto) vastaa puupinnan syttymistä silloin, kun on olemassa jokin ulkoinen energialähde, joka voi sytyttää pyrolyysikaasut (esim. pieni liekki, kipinä, tms.). Pelkästään lämpövuon vaikutuksesta tapahtuva syttyminen vaatii paljon korkeamman lämpövuon (suuruusluokkaa 30–40 kW/m² [Shields ym. 1993]).
 - Lämpövuon taso 30–40 kW/m² vastaa myös rajaa, jossa ikkunarudun rikkoutuminen tulee hyvin todennäköiseksi
- Olennaisin vaara tässä tutkimuksessa käsitellyissä syttymissä on se, että niistä aiheutuu ulkoinen palo, joka voi levitä yläpohjan onteloon, ellei tätä palon leviämisen reittiä ole katkaistu rakenteellisesti.

Edellä esitetyn perusteella ehdotetaan seuraavaa siedettäväksi katsottavista riskitasoista:

- **Jos palon leviäminen yläpohjan onteloon on katkaistu** esim. tutkimuksessa ”Ontelopalojen etenemisen katkaiseminen” [Hietaniemi ym. 2003] esitetyllä tavalla tai muilla keinoilla, tässä työssä käsiteltyjen syttymien suhteen soveltuva riskitaso on **1–2%**.
- **Jos palon leviämisen mahdollisuutta yläpohjan onteloon ei ole katkaistu**, tässä työssä käsiteltyjen syttymien suhteen soveltuva riskitaso on tilastoista pääteltävissä oleva nykytaso eli **0,5–1,0%**

Herkkyystarkasteluna tässä työssä tutkitaan myös riskitaso 0,1 %.

Sprinklaus tekee tässä työssä käsitellyn syttymän merkityksen erityisen alhaiseksi ja siksi sprinklerein suojatussa kohteessa voidaan riskitasoa nostaa sprinklaamattomiin nähden.

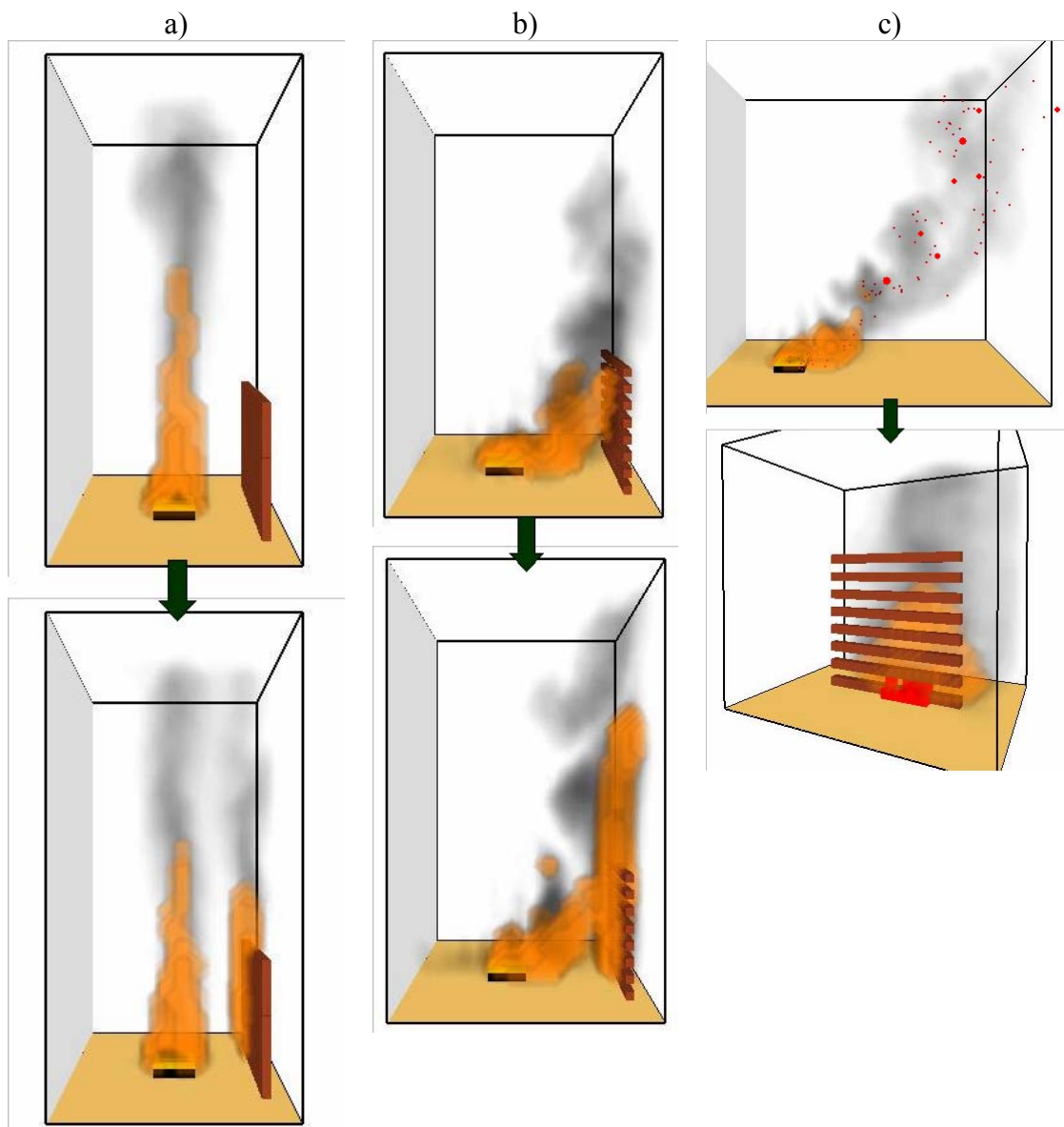
OSA II:
PALOTEKNINEN ANALYYSI

5. Uhattujen kohteiden syttyminen

5.1 Kyseeseen tulevat palon leviämisen mekanismit

Tiiviiseen ja matalaan rakentamistapaan liittyvät palon leviämismekanismit ovat (Kuva 8)

1. palavan kohteen tuottaman lämpösäteilyn aiheuttama syttyminen,
2. palavan kohteen liekkien tai kuumien kaasujen suoran kontaktin aiheuttama syttyminen,
3. palon leviäminen kipinöiden välityksellä.



Kuva 8. Palon leviämismekanismit: a) lämpösäteily, b) liekkikontakti ja c) kipinät.

Tärkeä erityistapaus liekkien ja kuumien kaasujen välityksellä tapahtuvasta palon leviämisestä on palon leviäminen rakennusten ontelotiloissa. Erityisesti yläpohjan ontelon kautta leviävä palo on huomioon otettava palon leviämismekanismi. Sitä tarkastellaan kohdassa 8.6.

Alkupaloon liittyvä palokuorma on rajoitustekijä, joka yhdessä suurimman mahdollisen palotehon kanssa määrää palon ympäristöönsä aiheuttaman lämpörasituksen suuruuden: jos suurin mahdollinen paloteho on alhainen, jatkuu palo pitkään ja jos se on suuri, niin palo on lyhyt, mutta kiivas. Olennaista on

1. kuinka suureksi palosta sen ympäristöön suuntautuva lämpövuoto \dot{q}'' voi kasvaa;
2. kuinka suuren kokonaisenergiämäärän $Q'' = \int_0^T \dot{q}'' dt$ palo sen ympäristöön suuntaa.

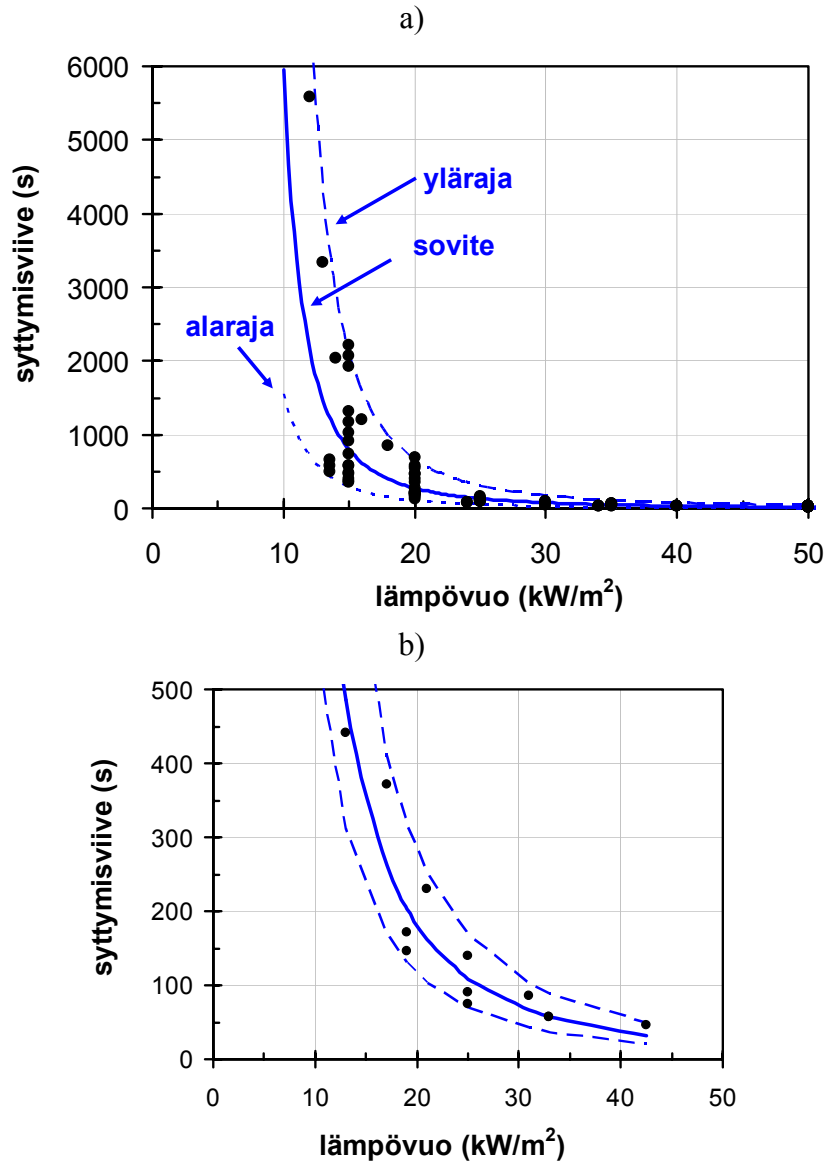
Jos lämpövuoto on koko palon ajan riittävän alhainen, alle suuruusluokkaa 10 kW/m^2 , niin silloin palon leviäminen ympäristöön on epätodennäköistä, koska lämpövuoto ei todennäköisesti ylitä ympäristön materiaalien syttymiseen vaadittavaa lämpövuonon raja-arvoa. Jos lämpövuoto ylittää syttymisen raja-arvon, syttyminen tapahtuu sitä nopeammin, mitä suurempi lämpövuoto on. Suure \dot{q}'' liittyy siis pääasiassa ympäristön kohteiden syttymisen todennäköisyyteen ja syttymisaikaan.

Suure Q'' puolestaan liittyy palonkestävyyteen eli käytännössä siihen, mitä palonkestävyyttä, so. kantavuutta, eristävyttä ja tiiviyyttä, rakenteilta on vaadittava.

5.2 Uhatun kohteen syttyminen säteilyn välityksellä leviävässä palossa

5.2.1 Suoraan säteilylle altistuvan kohteen syttyminen

Lämpösäteilyn uhkaama kohde tiivistä ja matalaa rakentamistapaa noudattaen rakennuksessa ympäristössä on useimmiten puuta. Tämän vuoksi tässä raportissa syttyvänä kohteena tarkastellaan puista kohdetta. Mallintamisen perustana käytetään vedettömän (kosteusprosentti = 0) puun syttymisviiveen mittaustuloksia [Bluhme 1987, Mikkola 1988, Tran & White 1992, Göransson & Omrane 2004], joita esitetään kuvassa 9a. Tuloksiin on sovitettu muotoa $(\dot{q}'' - \dot{q}_c'')^p$ oleva käyrä, missä \dot{q}'' on säteilyn lämpövuoto ja $\dot{q}_c'' = 6 \text{ kW/m}^2$ ja $p = -2,3$ ovat mallin parametrit. Mittaustulosten hajonta on kuvattu mittauspisteiden ääriarvot sisään sulkevilla käyryillä. Kuvassa 9b esitetään vastaavia polypropeenimuovin (herkästi palava polyolefiinimuovi) tuloksia [Drysedale & Thompson 1989]. Ne mahtuvat esitetyn puun syttymismallin virherajojen sisälle eli keskittyminen puukohteeseen syttymismallissa ei rajoita sen yleisyyttä.



Kuva 9. a) Vedettömien puutuotteiden (mänty- ja kuusilauta, kosteus 0 %) syttymisviive, kun niitä kuumennetaan lämpösäteilyllä [Bluhme 1987, Mikkola 1988, Tran & White 1992, Göransson 2005] ja niiden määrällinen kuvaus (yhtenäinen käyrä ja piste- ja katkoviivat) ja b) vastaava polypropeenimuovin tulos [Drysdale & Thompson 1989].

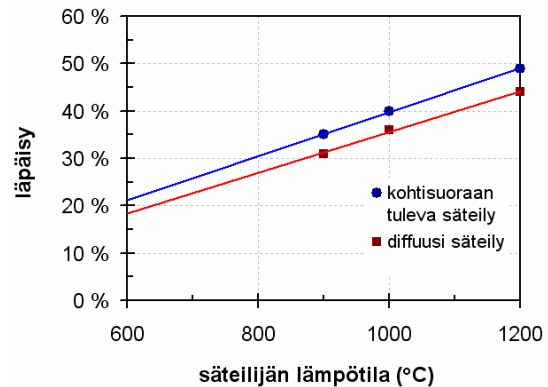
5.2.2 Syttyminen ikkunan läpi menevän säteilyn vaikutuksesta

Tavallisen ikkunalasin voidaan arvioida vaimentavan lämpösäteilyä Babrauskasin [2003] syttymistä käsittelevässä käsikirjassaan esittämällä tavalla (Kuva 10). Nähdään, että yksi ikkunaruuutu (paksuus 3 mm) vaimentaa tyypillistä liekkien lämpötilaa (noin 800 °C) vastaavaa lämpösäteilyä noin 70 % ja suljetun tilan palon lämpötilaa (noin 800–1 200 °C) noin 50–70 %. Jotta syttyminen tulisi mahdolliseksi yhden lasiruudun takana,

edellä esitetyt säteilytasot nousevat noin tekijällä 2–3 eli tasolle 20–30 kW/m². Tällaisilla lämpösäteilytasolla ruudun rikkoutuminen tulee mahdolliseksi ja tällä perusteella tässä työssä ikkunaruuuihin liittyvänä uhkana tarkastellaan ikkunan rikkoutumista ja pois putoamista, jolloin lasin suojaamat kohteet tulevat alttiiksi suoralle säteilyvaikutukselle. Lasin rikkoutumista käsitellään luvussa 6.

Table 25 Transmission of thermal radiation through 3.2 mm thick window glass

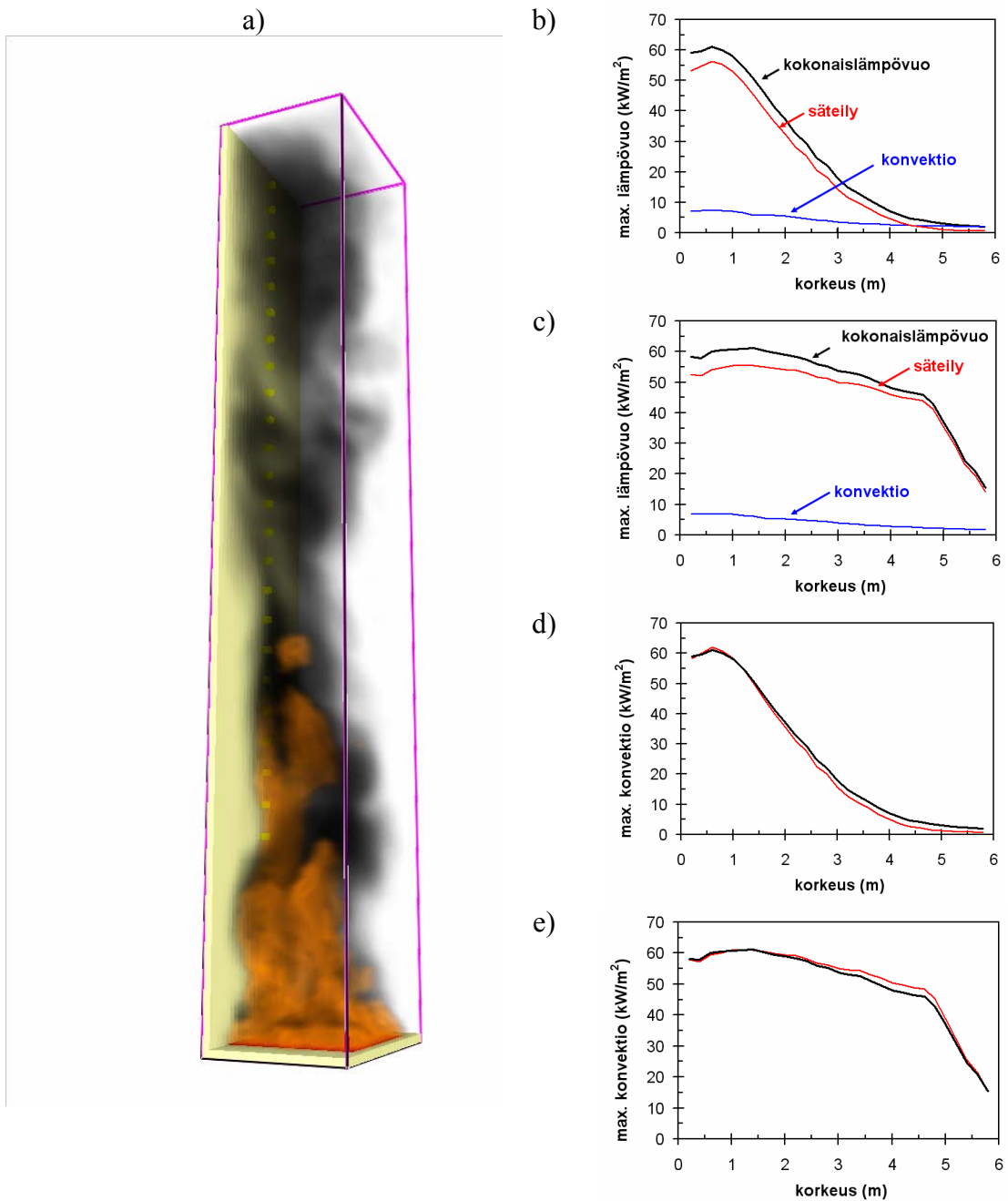
Source temperature (°C)	Transmission (%)	
	Perpendicular incidence	Diffuse radiation
900	35	31
1000	40	36
1200	49	44
2315	55	--
2727	83	--
4727	84	--
5727	85	--



Kuva 10. Lämpösäteilyn vaimennus tavallisessa 3,2 mm paksussa ikkunalasissa [Babrauskas 2003].

5.3 Uhatun kohteen syttyminen liekkikontaktin välityksellä leviävässä palossa

Jos uhkaavan kohteen palo on lähellä uhattua kohdetta, liekit voivat koskettaa uhattua kohdetta ja tällöin siihen kohdistuva lämpövuoto muodostuu säteilyn lisäksi konvektion välityksellä tapahtuvasta lämmönsiirrosta. Palonsimulointi FDS-ohjelmalla (Kuva 11a) tarjoaa oivan työkalun tutkia konvektion ja säteilyn osuuksia, koska siinä voidaan kytkeä säteily pois päältä, jolloin lämmönsiirto tapahtuu siis pelkästään konvektion välityksellä. Palonsimuloinnilla tarkasteltiin kahta tapausta, tapausta, jossa seinä ei osallistu paloon ja tapausta, jossa seinä osallistuu paloon (Kuvat 11b–e). Tuloksena saadaan, että kokonaislämpövuota voidaan kuvata pelkästään säteilyn osuuden avulla, kun säteilyn osuutta kasvatetaan noin 10 % (konvektion osuus on siis noin 10 %).



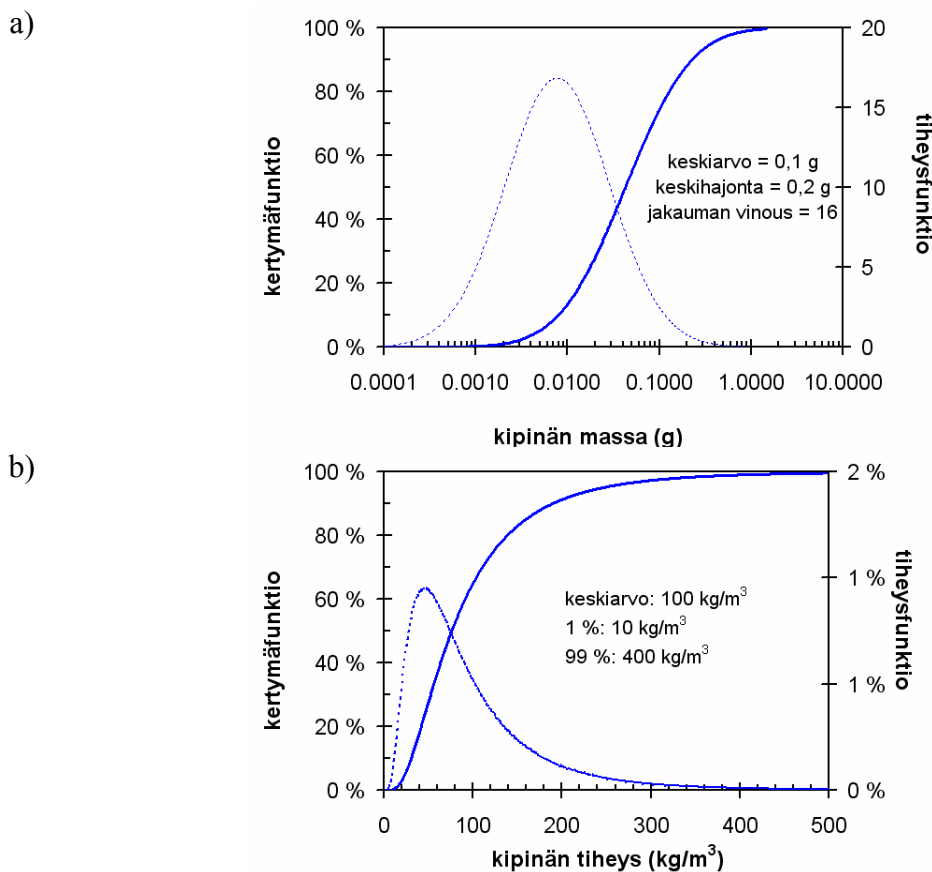
Kuva 11. a) Liekkikontaktissa tapahtuvan lämmönsiirron määrittämisen asetelma. Seinään kohdistuvan kokonaislämpövuon jakautuminen säteilyyn ja konvektioon, kun b) seinä ei osallistu paloon ja c) seinä osallistuu paloon. Kokonaislämpövuon kuvaaminen säteilyn osuuden avulla nostamalla säteilyn osuutta 10 %:lla.

5.4 Uhatun kohteen syttyminen kipinöiden välityksellä leviävässä palossa

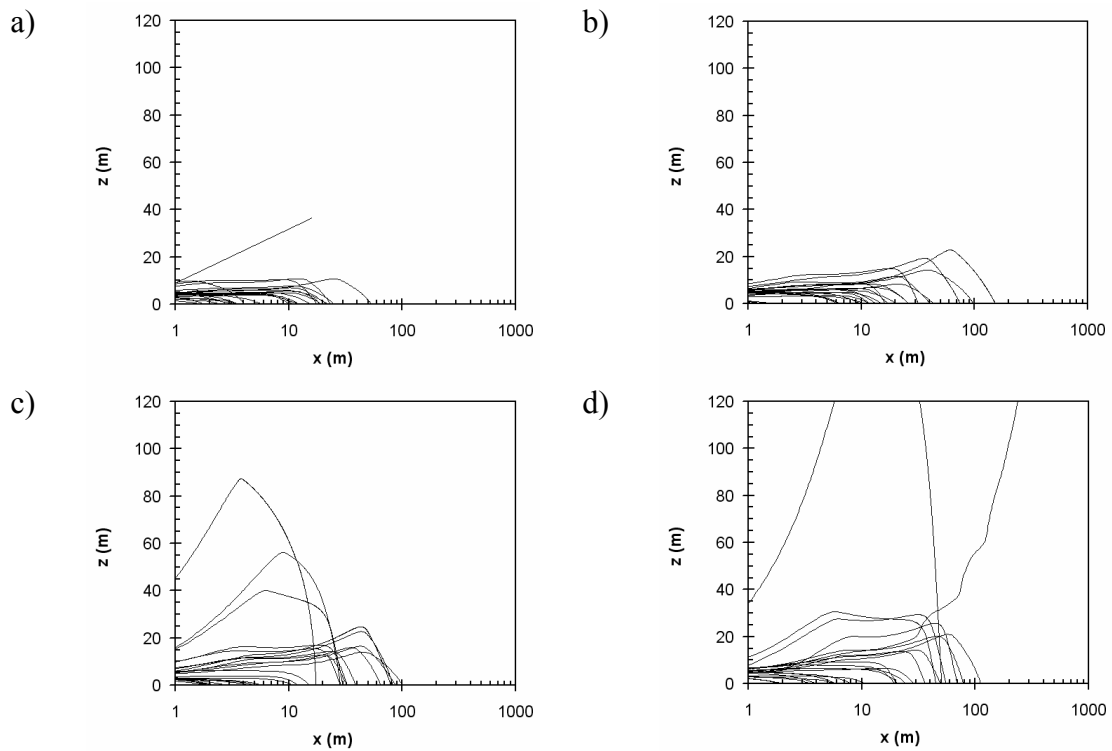
Kipinöiden välityksellä tapahtuvan palon leviämisen mallintaminen on haastavaa siihen liittyvien epävarmuuksien vuoksi. Aihetta on sen käytännön merkityksen vuoksi kuitenkin tutkittu suhteellisen laajasti:

- parhaiten hallitaan palossa syntyvien kipinöiden lentoradan määrittäminen, jota ovat tutkineet esim. Tarifa ym. [1967], Woycheese ja Pagni [1997], Tse ja Fernandez-Pello [1998], Ellis [2000] sekä Anthenien ym. [2005];
- palossa syntyvien kipinöiden laatua ovat tutkineet mm. Yoshioka ym. [2004];
- kipinöiden aiheuttamaa syttymistä ovat tutkineet Tarifa ym. [1967], Waterman ja Takata [1969], Ellis [2000] sekä Manzellon ym. [2005].

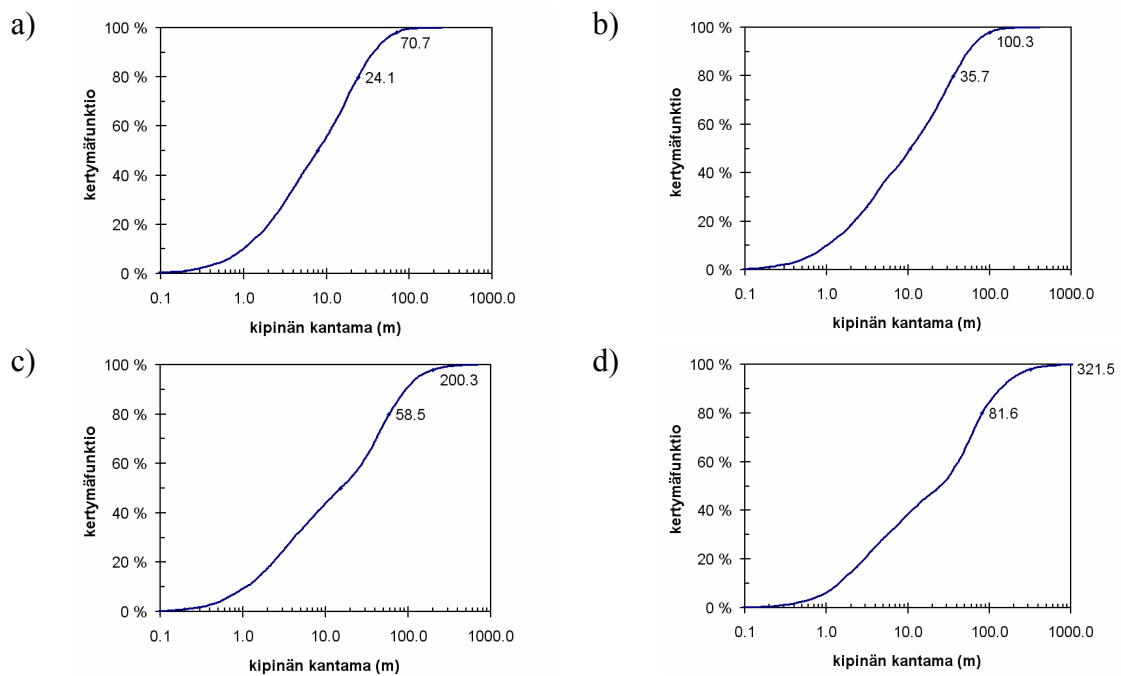
Liitteessä J esitetään em. tutkimuksien tulosten perusteella kehitetyt mallit, joiden avulla voidaan tarkastella määrällisesti kipinöiden välityksellä tapahtuvaa palon leviämistä. Kipinöiden kokoa ja lentämistä koskevia tuloksia esitetään kuvissa 12–14 ja taulukossa 5.



Kuva 12. a) Yoshiokan ym. [2004] tuloksien perustella saatu kipinöiden massan logaritmisesti normaali tilastollinen jakauma ja b) liitteellä E esitetyn tarkastelun tuloksena saatu kipinöiden tiheyden logaritmisesti normaali tilastollinen jakauma.



Kuva 13. Esimerkkejä kipinöiden lentoradoista, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on a) 10 MW, b) 20 MW, c) 50 MW ja d) 100 MW. Kustakin tapauksesta esitetään 25 laskennan tulosten muodostama otos.



Kuva 14. Kipinöiden kantaman jakaumia, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on a) 10 MW, b) 20 MW, c) 50 MW ja d) 100 MW. Kustakin tapauksesta laskettiin 5000 tapauksen Monte Carlo -otos.

Taulukko 5. Kipinöiden kantaman jakaumien tunnuslukuja, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on a) 10 MW, b) 20 MW, c) 50 MW ja d) 100 MW.

Paloteho	Esimerkkitapaus	Odotus- arvo	80 %:n fraktiili	98 %:n fraktiili
10 MW	yksittäisen auton, katoksen tai huoneiston palo	16 m	24 m	71 m
20 MW	kaksi autoa, huoneiston katon osittain puhkaissut palo	23 m	36 m	100 m
50 MW	palo, jossa asuinrakennus on kauttaaltaan liekeissä	39 m	59 m	200 m
100 MW	useita suuria palavia kohteita käsittävä tulipalo	53 m	87 m	303 m
1000 MW	aluepalo (ks. esim. Pagni [1993])	93 m	161 m	795 m

Manzillon ym. [2006] ovat tutkineet kipinöiden aiheuttamaa syttymistä. Heidän tuloksensa esitetään liitteessä J. Tulosten mukaan yksittäinen liekehtivä kipinä aiheuttaa kuivan huokoisen polttoaineen (männyn neulaset tai revitty paperi) syttymisen liekehtivään paloon. Kuivan kiinteän aineen syttyminen (puun rako) liekehtivään paloon seuraa, kun yksittäisen liekehtivän kipinän koko on riittävän suuri (kokoluokka 50 mm). Syttymisen todennäköisyys kasvaa kipinöiden määrän kasvaessa. Näissä kokeissa hehkuva kipinä ei saanut aikaan liekehtivää paloa. Paperisilppu syttyi kytöpalaan jo yhdestä hehkuvasta kipinästä ja männyn neulaset, kun hehkuvia kipinöitä oli useampia. Kiinteä aine ei syttynyt liekehtivään eikä kytöpalaan useillakaan kipinöillä.

6. Uhatun kohteen lasien rikkoutuminen ja putoaminen pois paikaltaan

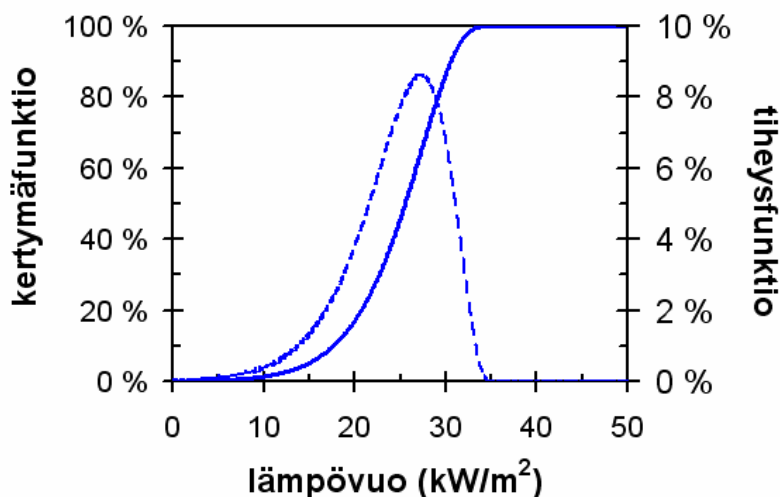
Babrauskasin [2003] tekemän yhteenvedon mukaan ikkunalasin rikkoutumisesta on olemassa seuraavia tietoja:

- ikkunalasi voi (hyvin harvoin) särkyä 9 kW/m^2 :n suuruisen lämpövuon vaikutuksesta
- ikkunalasi voi ei kestä yli 35 kW/m^2 :n suuruista lämpövuota
- keskimääräinen keston raja 25 kW/m^2 :n paikkeilla.

Jatkotarkasteluja varten tämä tieto kuvataan määrällisesti käyttäen sopivaa jakaumaa, jota täyttää seuraavat ehdot:

- 9 kW/m^2 :n suuruinen lämpövuoto vastaa jakauman 1 %:n fraktiilia,
- 35 kW/m^2 :n suuruinen lämpövuoto vastaa jakauman korkeaa fraktiilia (99,9 %),
- 25 kW/m^2 :n suuruinen lämpövuoto vastaa jakauman mediaaniarvoa.

Nämä ehdot täyttävä jakauma esitetään kuvassa 15. Se on muodoltaan 3-parametrinen gammajakauma, jossa argumenttina on $\dot{q}_{max}'' - \dot{q}''$ ja parametreina ovat $\alpha = 3,92$, $b = 2,64 \text{ kW/m}^2$ ja $\dot{q}_{max}'' = 35 \text{ kW/m}^2$.



Kuva 15 Ikkunaruudun rikkoutumista kuvaamaan käytettävä jakauma.

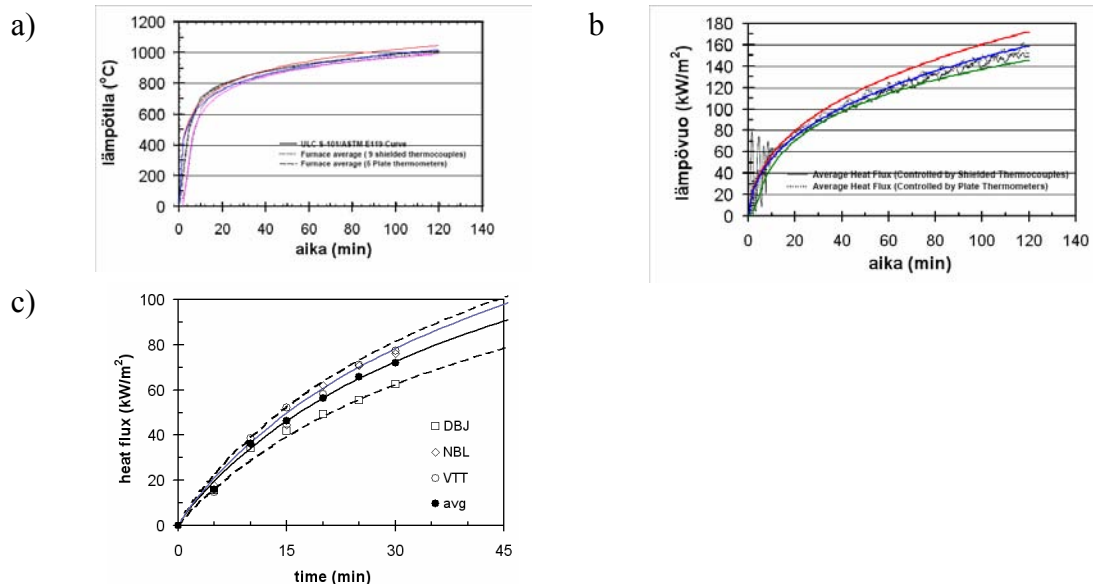
7. Palonkestoluokkien todennäköisyysperustainen kuvaus

Palonkestoä käsitellään yleensä luokkavaatimuksena, kuten EI15, EI30, R30, jne. Se, että jokin tuote luokituu tiettyyn palonkestoluokkaan, merkitsee sitä, että kyseisen tuotteen on osoitettu täyttävän kyseisen luokan vaatimukset standardipalorasituksessa, mikä osastoiville rakenteille yleensä tarkoittaa standardipalotestin läpäisemistä: Kantaville rakenteille vaatimuksen mukaisuus voidaan osoittaa myös laskennallisesti käyttäen perustana standardipalo-olosuhteita ja niihin liittyviä lämmönsiirto-olosuhteita.

Fysikaalisesti palonkesto tarkoittaa sitä, että tuote ”kestää” – standardissa mainituilla tavoilla sitä lämpövuota, joka siihen standardipalo-olosuhteissa kohdistuu. Vaikka standardilämpötila-aikakehitys on määritelty eksaktisti kaavalla

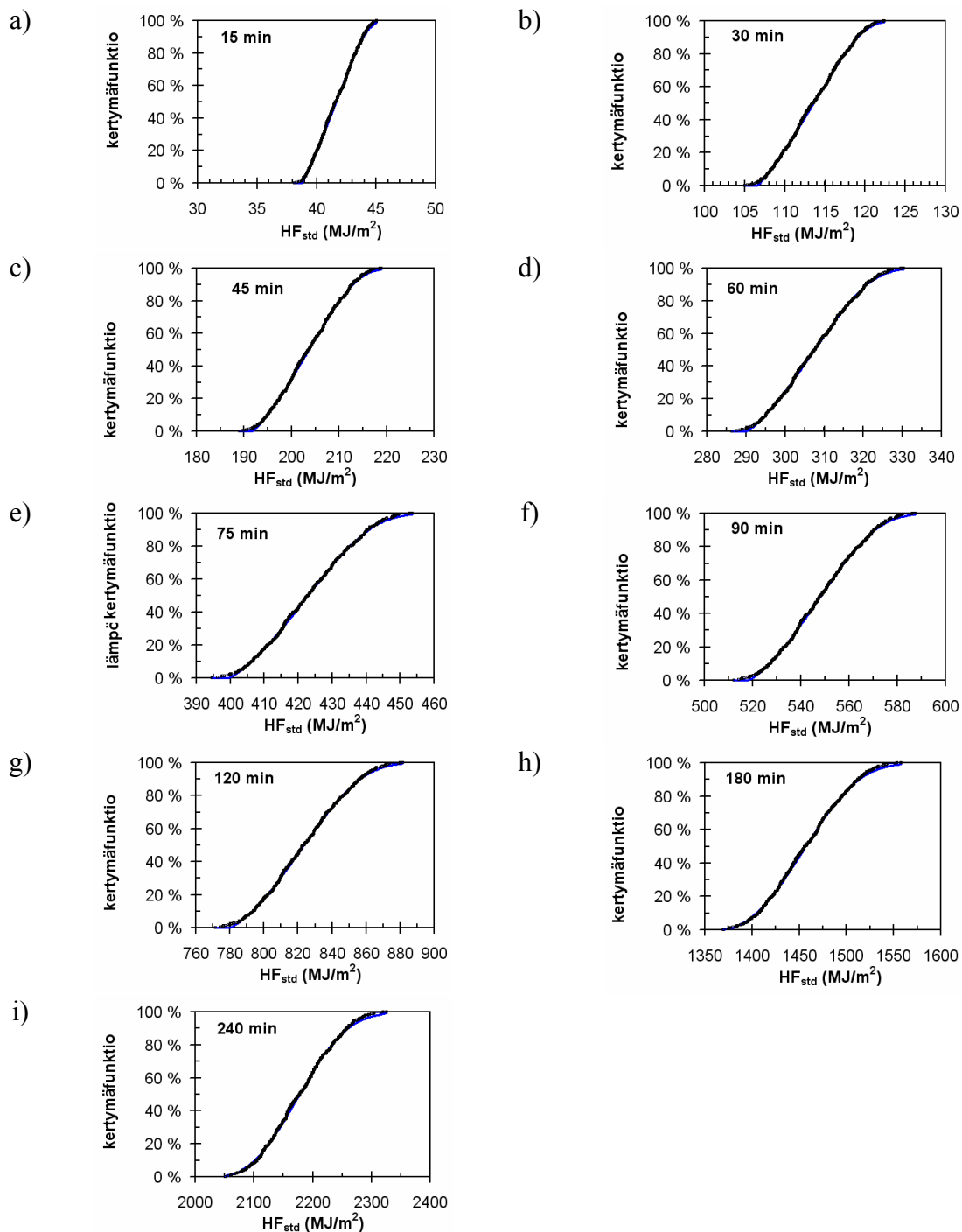
$$T(t) = T_0 + T_1 \cdot \log_{10}[a \cdot t + 1] \quad (4)$$

missä T_0 lämpötila testin alkaessa, $T_1 = 345 \text{ °C}$ ja $a = 8 \text{ min}^{-1}$, sen kokeellinen toteutus sisältää vaihtelua saman laboratorion tekemien eri testien välillä sekä eri laboratorioiden tekemien testien välillä, kuten kuva 16 [Sultan 2006] osoittaa. Myös lämmönsiirron voimakkuuden määräävät parametrit eli konvektion lämmönsiirtokerroin ja lämpösäteilyn emissiviteetti ovat erisuuret ja vaihteleva-arvoiset näytteen palolle altistetulla pinnalla ja ulkopinnalla. Unin sisällä lämmönsiirtokerroin ja emissiviteetti vaihtelevat sekä paikallisesti että ajan mukana.



Kuva 16. a) ja b) Esimerkki standardipalo-olosuhteiden vaihtelevuudesta saman laboratorion sisällä [Sultan 2006]: lämpötila ja lämpövuoto sekä b) esimerkki eri laboratorioiden välisestä vaihtelevuudesta [Holm & Loikkanen 1981].

Tässä työssä analysoitiin palokestouunien tuottamien lämpörasitusten vaihtelevuutta ja tämän perusteella eri määritettiin Monte Carlo -laskentaa soveltaen eri palokestoluokkia vastaavien, kutakin palorasituksen ajallista kestoja vastaavat standardipalossa kertyneen lämpövuon HF_{std} (MJ/m^2) jakaumat. Jakaumat esitetään kuvassa 17 ja niiden parametrit ja tunnuslukuja taulukossa 6. Kertyneen lämpövuon riippuvuus standardipalon ajallisesta keustosta esitetään kuvassa 18.



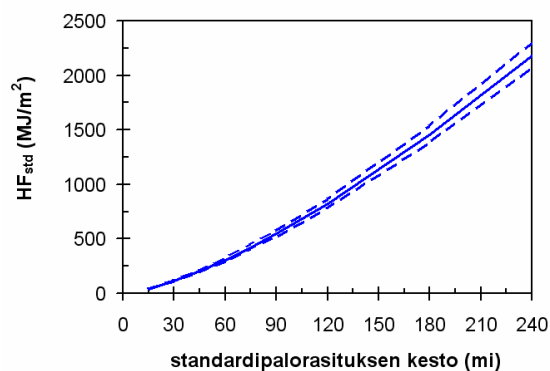
Kuva 17. Standardipalossa kertyvän lämpörasituksen jakaumat.

Taulukko 6. Standardipalossa kertyvän lämpörasituksen (yksikkönä MJ/m²) vaihtelevuutta kuvaavien jakaumien^{a)} parametrit sekä 95 %-varmuusvälit^{b)}.

	15 min	30 min	45 min	60 min	75 min	90 min	120 min	180 min	240 min
α	6.0	5.8	5.0	4.5	4.2	4.0	3.9	3.1	2.9
β (MJ/m ²)	5.4	12.8	21.0	29.9	39.4	49.5	71.1	120.9	179.5
x_{\min} (MJ/m ²)	39	107	192	290	399	518	779	1365	2024
p	0.19	0.20	0.25	0.28	0.31	0.34	0.37	0.66	0.92
1.0 %	38.8	107	192	291	400	520	782	1378	2056
5.0 %	39.1	108	194	293	403	523	788	1393	2083
50.0 %	41.6	114	204	308	423	548	824	1457	2178
2.5 % -	39 -	105 -	190 -	290 -	400 -	520	785	1390	2070
97.5 %	44	120	220	330	450	580	870	1540	2300

a) Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktiona $F(x) = \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - x_{\min}}{\beta} \right)^\alpha \right] \right\}^p$

b) Pyöristetyt luvut.



Kuva 18. Standardipalossa kertyvän lämpörasituksen riippuvuus palorasituksen ajallisesta kestosta. Mediaaniarvo sekä 2,5 %:n ja 97,5 %:n fraktiilit.

8. Uhkakuvien määrällinen kuvaus

Tässä luvussa esitetään määrällisesti eri uhkakuvat. Tuloksena saadaan kuhunkin uhka-kuvaan liittyvä uhkatekijän (useimmiten lämpösäteily) voimakkuus.

8.1 Asuinrakennusten sisältä alkavat palot

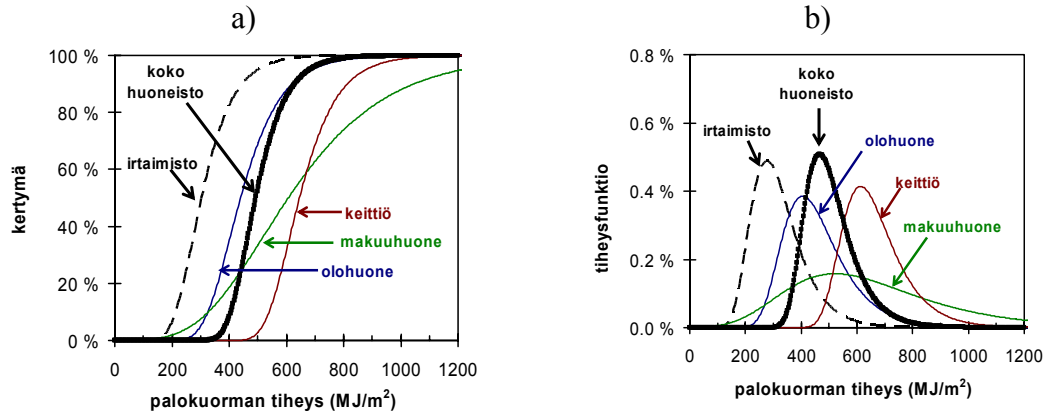
8.1.1 Huoneistopalon voimakkuus ja ajallinen kehittyminen

Liitteessä A tarkastellaan suomalaisten asuinrakennusten huoneistojen palo-ominaisuuksia palokuorman määrän ja palon voimakkuuden suhteen. Palokuorman tiheyttä, palotehon suurinta voimakkuutta ja sen ajallista kehittymistä koskevat päätulokset esitetään kuvissa 19 ja 20. Voidaan havaita, että huoneistopalo on tyypillisesti hapen saannin rajoittama ja siten sen voimakkuus on olohuonepalossa suuremman ikkunapinta-alan vuoksi suurempi kuin keittiön tai makuuhuoneen palossa, joissa palo on tyypillisesti suunnilleen yhtä voimakas. Täysin kehittyneen palon vaihe päättyy tyypillisesti 20–30 minuuttia palon alkamisen jälkeen siten, että kiivaammin palavana olohuonepalon pituus on jonkin verran makuuhuoneen tai keittiön paloa lyhyempi.

Taulukko 7. Palokuorman tiheyttä ja pinta-alaa kohden vapautuvaa palotehoa koskevien tulosten yhteenveto^{a)}.

Huonetila	Palokuorman tiheys	Paloteho per yksikköpinta ($\dot{Q}_{R,\max}''$)
olohuone	keskiarvo = 460 MJ/m ² 80 % fraktiili = 548 MJ/m ²	keskiarvo = 642 kW/m ² 80 % fraktiili = 766 kW/m ²
makuuhuone	keskiarvo = 656 MJ/m ² 80 % fraktiili = 871 MJ/m ²	keskiarvo = 916 kW/m ² 80 % fraktiili = 1 092 kW/m ²
keittiö	keskiarvo = 665 MJ/m ² 80 % fraktiili = 747 MJ/m ²	keskiarvo = 928 kW/m ² 80 % fraktiili = 1 107 kW/m ²
koko huoneisto	keskiarvo = 509 MJ/m ² 80 % fraktiili = 575 MJ/m ²	keskiarvo = 710 kW/m ² 80 % fraktiili = 847 kW/m ²

a) Jakaumana Gumbel-jakauma, jonka kertymäfunktio on $F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right]$



Kuva 19. Palokuorman tiheyden jakaumat: a) kertymä- ja b) tiheysfunktio. Esimerkiksi olohuoneelle keskiarvo on 460 MJ/m² ja 80 % fraktiili on 550 MJ/m².

Huoneistopalon palotehon \dot{Q}_R ajallista kehittymistä voidaan kuvata ajan mukana funktion t^2 - mukaisesti kasvavana palona, joka alkaa hiipua eksponentiaalisesti, kun palokuormasta on palanut 60–80 % (Eurocode 1 [CEN 2002] antaa arvon 70 %):

$$\dot{Q}_R = \begin{cases} \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g}\right)^2, & \text{kun } t \leq t_1 \\ \dot{Q}_{R,\max}, & \text{kun } t_1 < t \leq t_2 \\ \dot{Q}_{R,\max} \cdot \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau}\right), & \text{kun } t > t_2 \end{cases}, \quad (5)$$

missä maksimipaloteho $\dot{Q}_{R,\max}$ saadaan kertomalla $\dot{Q}_{R,\max}''$ lattiapinta-alalla ja kasvuaikatekijä t_g , ajanhetket t_1 , t_2 sekä hiipumisaikavakio esitetään taulukossa 8.

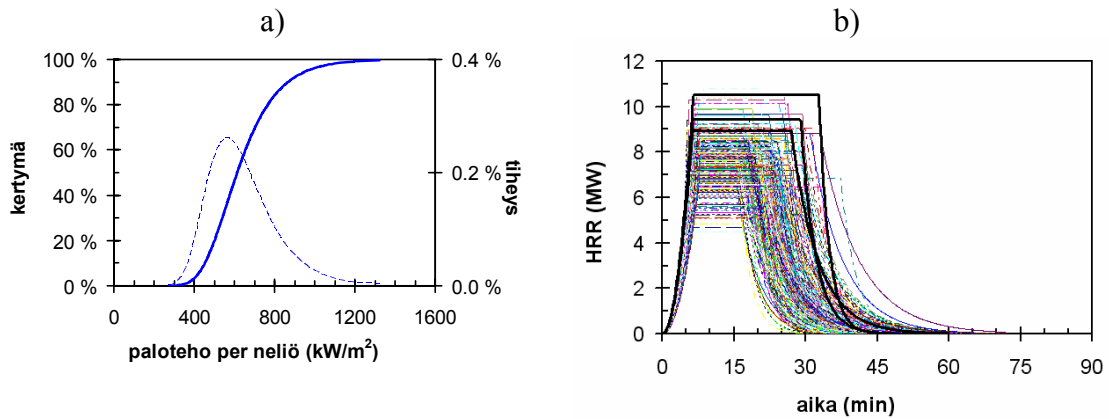
Taulukko 8. Huoneistopalon ajallista kehittymistä koskevat tiedot.

	Olohuone	Makuuhuone tai keittiö
t_1 (min)	$\min\left(t_g \sqrt{\frac{\dot{Q}_{R,\max}}{\dot{Q}_0}}, F_W^{-1}(x; \alpha, \beta, x_{\min})\right)$ $\alpha = 2,7, \beta = 2,8 \text{ min}, x_{\min} = 4,3 \text{ min};$	$\min\left(t_g \sqrt{\frac{\dot{Q}_{R,\max}}{\dot{Q}_0}}, F_W^{-1}(x; \alpha, \beta, x_{\min})\right)$ $\alpha = 2,9, \beta = 2,3 \text{ min}, x_{\min} = 3,1 \text{ min};$
t_2 (min)	$F_W^{-1}(x; \alpha, \beta, x_{\min})$ $\alpha = 1,8, \beta = 7,8 \text{ min}, x_{\min} = 14,7 \text{ min};$	$F_W^{-1}(x; \alpha, \beta, x_{\min})$ $\alpha = 1,6 \text{ min}, \beta = 15,2 \text{ min}, x_{\min} = 10,1 \text{ min};$
t_g (min)	2, ..., 3 min, tasajakauma	2, ..., 3 min, tasajakauma
τ (min)	$C \cdot t_g, C = 1, \dots, 3$, tasajakauma	$C \cdot t_g, C = 1, \dots, 3$, tasajakauma

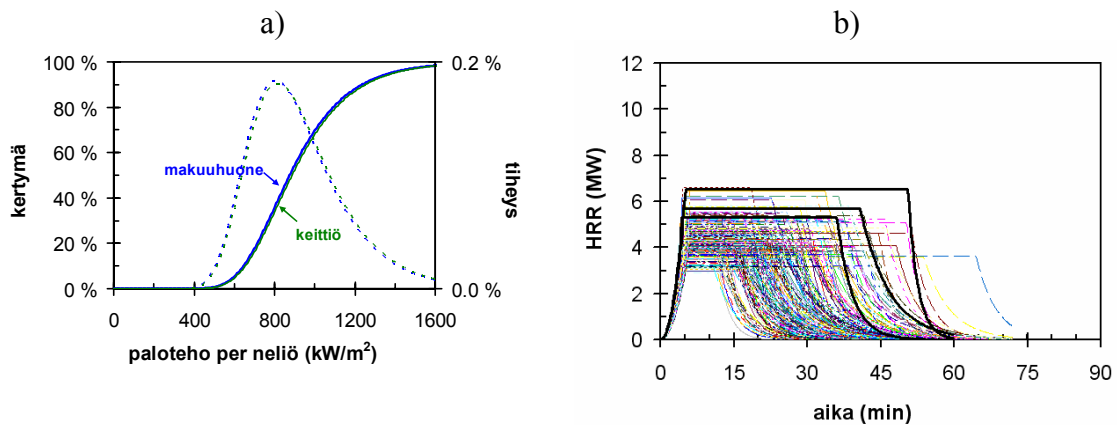
Taulukossa esiintyvä Weibull-jakauman käänteisfunktio on

$$F_W^{-1}(x; \alpha, \beta, x_{\min}) = x_{\min} + \beta[-\ln(1-x)]^{1/\alpha}, \quad (6)$$

josta esim. 95 % prosentin fraktiili lasketaan sijoittamalla x :n paikalle 95 %.



Kuva 20. Olohuoneen tulipalo: a) palon voimakkuuden arviointiin käytettävän suureen, olohuoneen lattiapinta-alaa kohden vapautuva maksimipalotehon, jakauma (keskiarvo on 640 kW/m^2 ja 80 % fraktiili on 770 kW/m^2). b) Esimerkki palotehon ajallisesta kehitymisestä: Monte Carlo -otos (ohuet käyrät) ja syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen lasketut kuvaavat (korostetut käyrät). Kasvuaikatekijälle käytetyt fraktiilit on 10 %, 5 % ja 1 %.

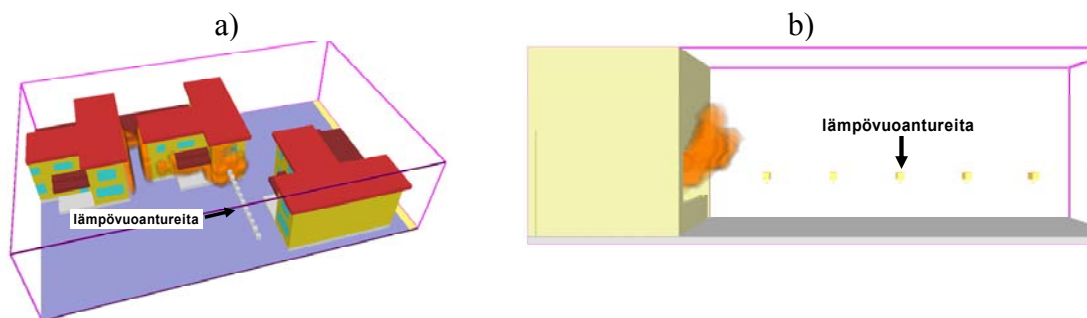


Kuva 21. Makuuhuoneen ja keittiön tulipalo: a) palossa lattiapinta-alaa kohden vapautuva maksimipaloteho ja b) esimerkki palotehon ajallisesta kehitymisestä: Monte Carlo -otos (ohuet käyrät) ja syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen lasketut kuvaavat (korostetut käyrät). Kasvuaikatekijälle käytetyt fraktiilit on 10 %, 5 % ja 1 %.

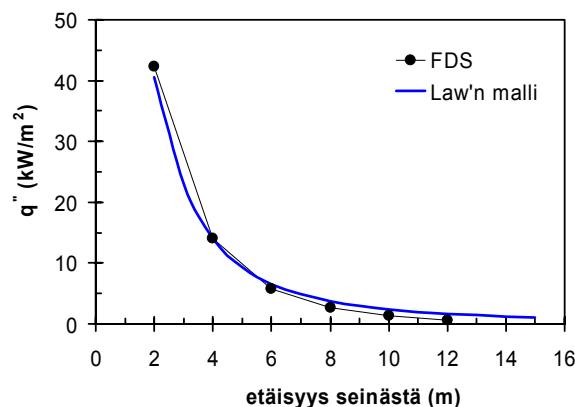
8.1.2 Huoneistopalon synnyttämä lämpösäteily

8.1.2.1 Malli ja sen soveltaminen olohuoneen tulipaloon

Huoneistopalon synnyttämää lämpösäteilyä on määritetty deterministisesti FDS-ohjelmalla kuvassa 20 esitetyn kaltaisissa laskenta-asetelmissä. Eri tekijöiden vaihtelevuuden huomioon ottavat stokastiset tarkastelut tehtiin käyttäen ns. Law'n mallia ulkoiselle liekehännälle [Law & O'Brien 1981]. Tämä malli esitellään lyhyesti liitteellä K. Kuten kuvasta 23 voidaan havaita, yksinkertaisempi malli antaa lyhyillä etäisyyksille hieman tarkempaa mallia alempia arvoja, mutta yli 4 m:n etäisyyksille se puolestaan korkeampia arvoja. Koska juuri pidemmät etäisyydet ovat kiinnostavia tämän hankkeen kannalta, yksinkertaisempi malli on toimiva työkalu huonepalon säteilyn aiheuttaman uhan arviointiin.



Kuva 22. Huonepalon synnyttämän lämpösäteilyn FDS-ohjelmalla tehtyjen määritysten esimerkkejä a) koko rakennuksen tarkastelu ja b) yksityiskohtaisempi tarkastelu yhden ikkunan synnyttämästä säteilystä.



Kuva 23. Huonepalon synnyttämän lämpösäteilyn laskentatapojen (FDS-ohjelma ja Law'n malli) vertailu kuvan 22b tilanteessa.

Olohuoneen palon synnyttämän säteilyn arvioinnin konsepti esitetään kuvassa 24. Law'n malli soveltuu suoraan palamattomista materiaaleista valmistetuille julkisivuille, mutta paloon osallistuvista materiaaleista (Kuva 24a), joista tässä työssä tarkastellaan puumateriaaleja, valmistetuille seinille mallin antamiin tuloksiin tulee lisätä julkisivun liekehähdinnän synnyttämä lämpösäteily (Kuva 24b).

Mallissa ikkunaa (indeksi 1), ulos tulevaa liekkiä (2) ja mahdollisia julkisivun liekkejä (3) kuvataan suorakaiteen muotoisina lämpösäteilyn lähteinä, joiden lähettämän säteilyn voimakkuus \dot{q}'' on

$$\dot{q}_i'' = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4, \quad (7)$$

missä $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ WK}^{-4} \text{ m}^{-2}$ on Stefan-Boltzmanin vakio, ε_i on kohteen i ($i = 1, 2, 3$) emissiviteetti ja T_i sen lämpötila (absoluuttisissa asteissa). Emissiviteetit lasketaan seuraavasti

$$\varepsilon_i = 1 - \exp(-k_i d_i), \quad (8)$$

missä k_i on kohteen i ($i = 1, 2, 3$) säteilyn ominaisemissivisyyttä kuvaava vakio, jolle Law'n mallissa käytetään arvoa

$$k_i = 0,3 \text{ m}^{-1}, \quad (9)$$

ja d_i lämpösäteilyä lähettävän kaasukerroksen paksuus, jolle tässä työssä käytetään seuraavia arvoja

- $d_1 \approx$ palotilan syvyys $\gg 1/k_1$ (Law'n mallin mukaan), (10)
- $k_2 = \frac{2}{3} \times$ ikkunan korkeus (h_{eq} [m]) (Law'n mallin mukaan),
- $k_3 \approx 0,1, \dots, 0,3 \text{ m}$ (FDS-mallin tuloksista määritetty palavan julkisivun lämpöä emittoivan kerroksen paksuus).

Emissiviteettien arvoiksi saadaan siten

- $\varepsilon_1 \approx 1$, (11)
- $\varepsilon_2 = 1 - \exp(-0,1 \cdot h_{eq})$,
- $\varepsilon_3 \approx 0,03, \dots, 0,09$.

Liekkien lämpötiloille käytetään seuraavia arvoja:

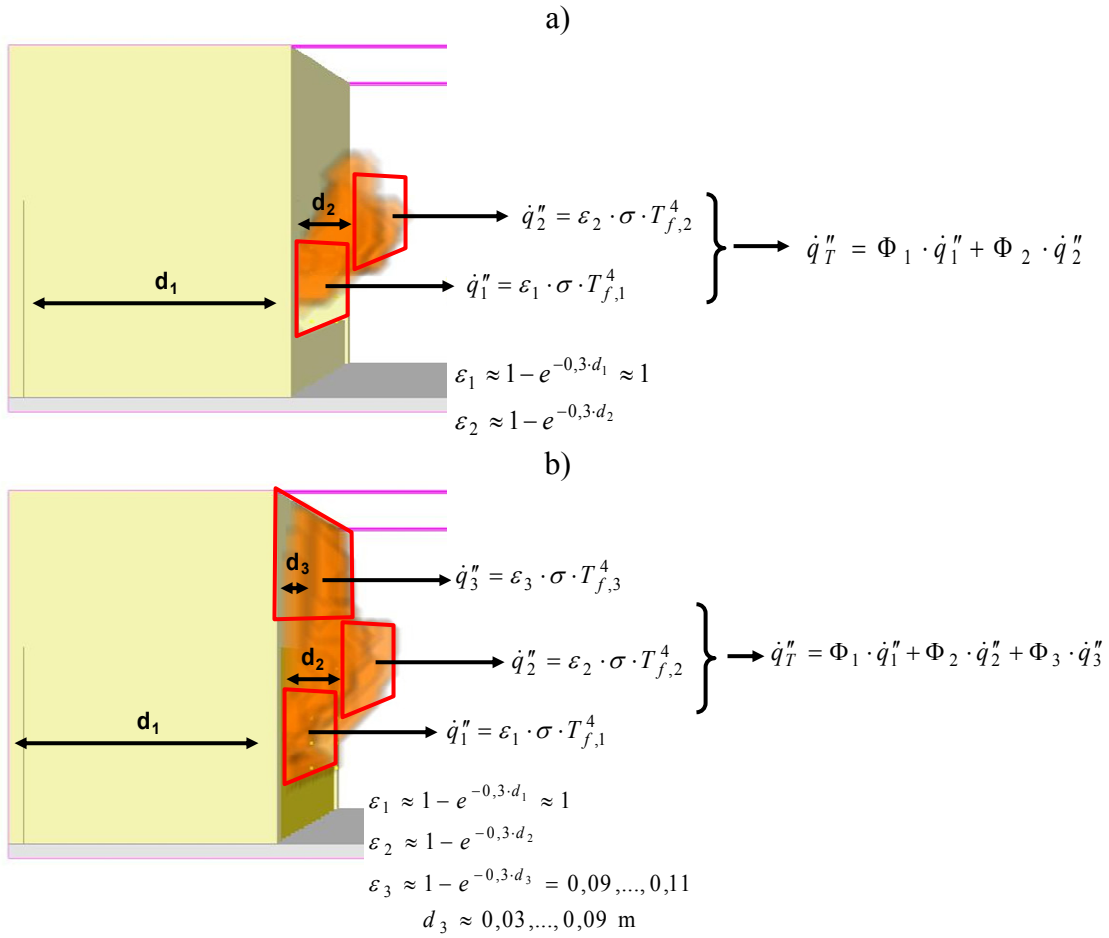
- $T_1 =$ palotilan lämpötila, joka lasketaan Law'n mallin mukaan, ks. liite G, (12)
- $T_2 =$ ulkoisten liekkien lämpötila, joka lasketaan Law'n mallin mukaan, ks. liite G

- $T_3 \approx 750, \dots, 950$ °C (FDS-mallin tuloksista määritetty palavan julkisivun lämpöä emittoivan kerroksen lämpötila).

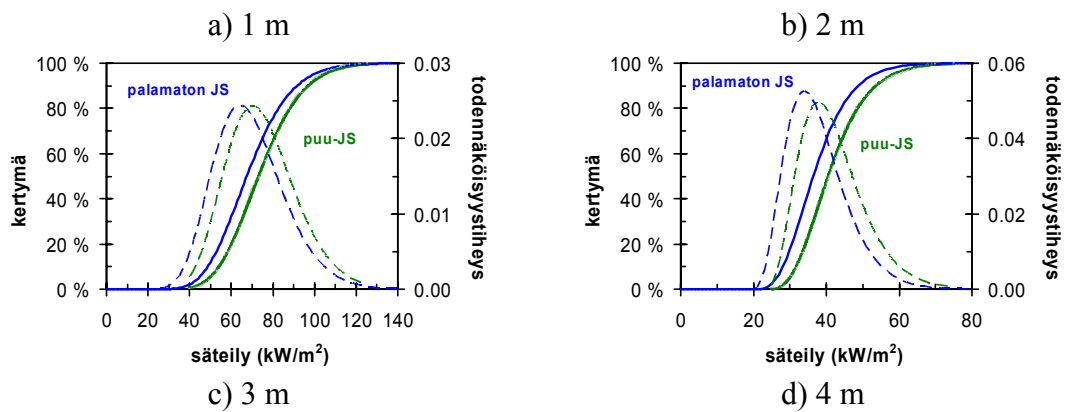
Law'n mallia sovellettaessa tarvitaan huoneiston ja sen aukkojen kokoa ja muotoa koskevia tietoja samoin kuin palo kuvaavia tietoja, so. palokuorman tiheys ja lattiapinta-alaa kohden vapautuva maksimipaloteho ja kasvuaikatekijä. Näitä suureita käsitellään stokastisina (vaihtuva-arvoisina); niiden jakaumat esitetään taulukossa 9.

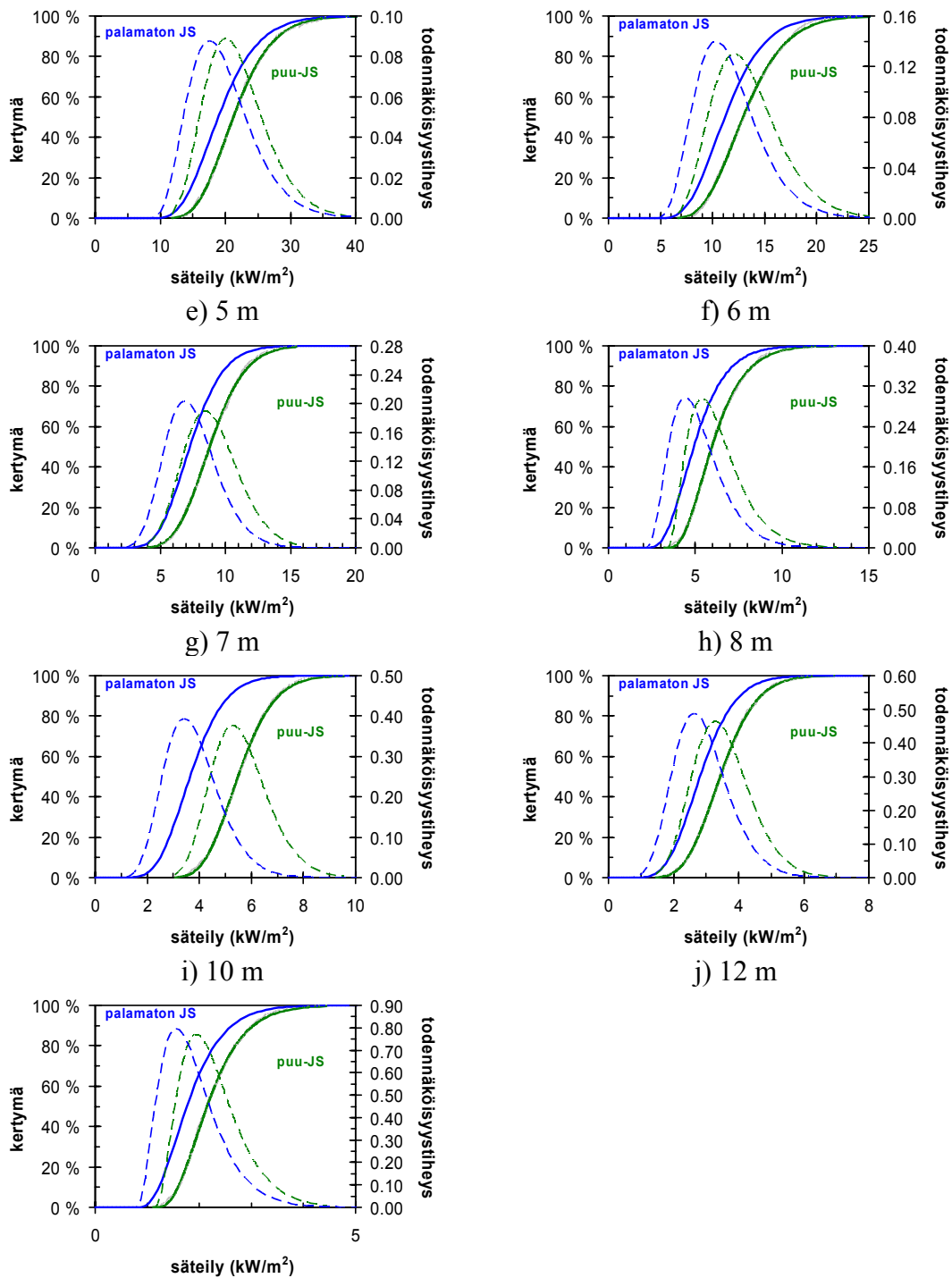
Taulukko 9. Huonepalon synnyttämän säteilyn laskennassa käytetyt tiedot. Olohuone.

Tekijä	Kuvaus
huoneen pinta-ala A_f [m ²]	keskiarvo 20 m ² , vaihteluväli 15 m ² (minimiarvo) -25 m ² (99,9 %:n fraktiili); gammajakauma
huoneen leveys W [m] huoneen syvyys D [m]	$W \cdot D = A_f$ ja W/D vaihtelee gammajakauman mukaisesti keskiarvona 1,0 ja vaihteluväli 0,67 (minimiarvo) – 1,5 (99,9 %:n fraktiili)
huoneen korkeus H [m]	2,6, ..., 2,9 m, tasajakauma
Ikkunan leveys w [m]	$w = (40 \%, \dots, 80 \%) \times W$ (kerroin tasajakautunut)
Ikkunan korkeus h_{eq} [m]	$h_{eq} = (50 \%, \dots, 80 \%) \times H$ (kerroin tasajakautunut)
palokuorman tiheys [MJ/m ²]	Gumbel-jakauma, keskiarvo 460 MJ/m ² , 80 %:n fraktiili 550 MJ/m ² (ks. Taulukko 7)
lattiapinta-alaa kohden vapautuva maksimipaloteho [kW/m ²]	Gumbel-jakauma, keskiarvo 640 kW/m ² , 80 %:n fraktiili 770 kW/m ² (ks. Taulukko 7)
kasvuaikatekijä (s)	150 s ± 20 %
lämpösäteilyä vastaanottavan kohteen korkeus [m]	20 % ikkunan yläreunan alapuolella (vastaa varsin hyvin kuuminta paikkaa), vakioarvo
lämpösäteilyä vastaanottavan kohteen etäisyys [m]	laskujen muuttuja



Kuva 24. Huonepalon synnyttämän lämpösäteilyn laskentakonsepti: a) palamaton julkisivumateriaali ja b) paloon osallistuva julkisivumateriaali.

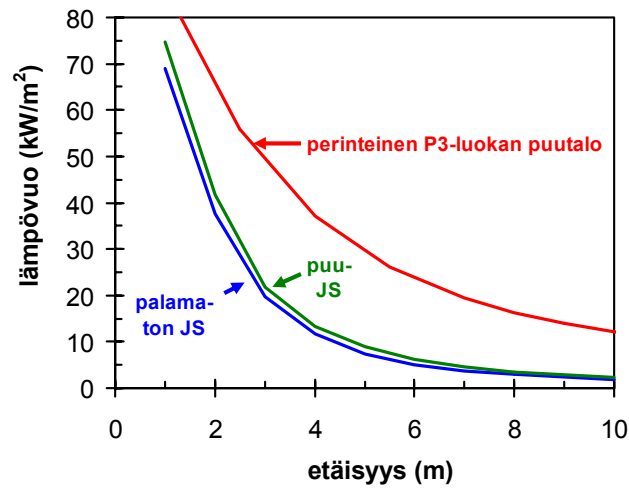




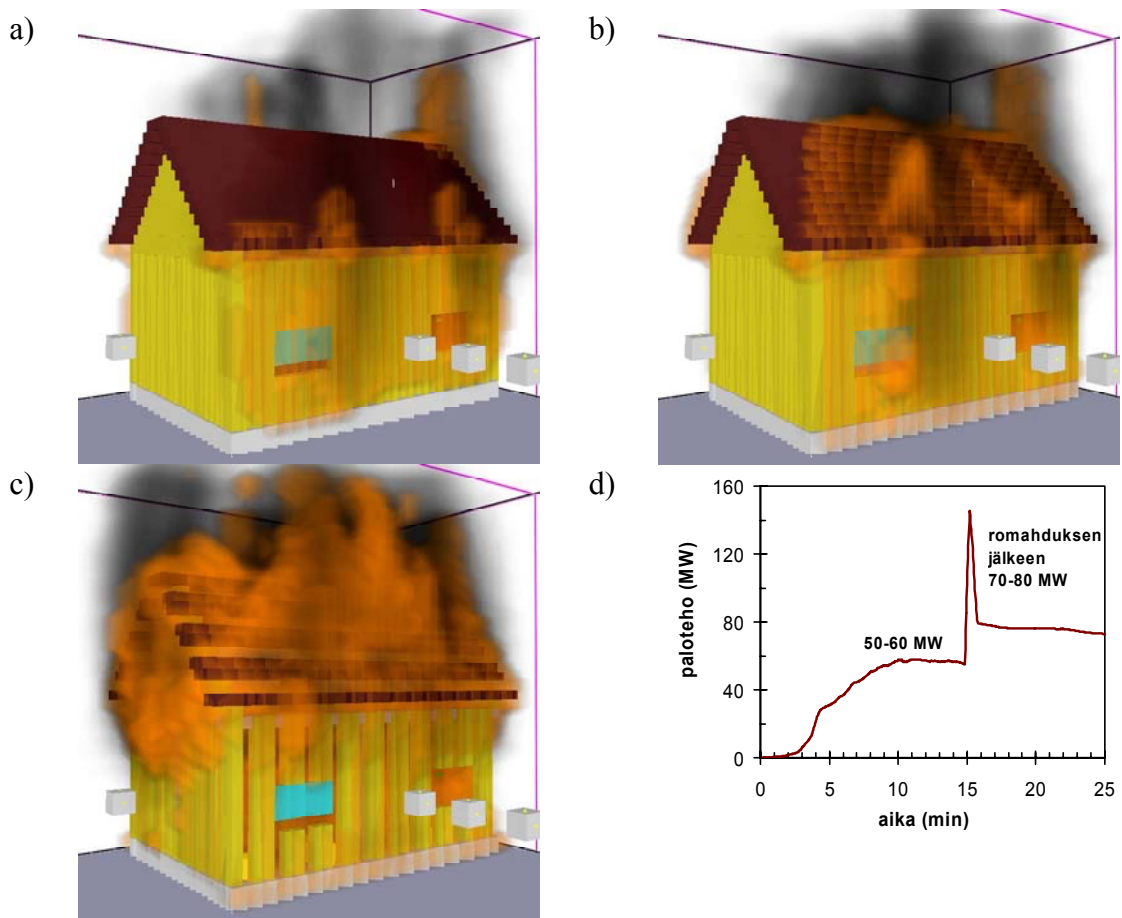
Kuva 25. Huonepalon synnyttämän säteilyn voimakkuus eri etäisyyksillä paloon osallistumattomasta ja paloon osallistuvasta materiaaleista tehdyille julkisivuille: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m, f) 6 m, g) 7 m, h) 8 m, i) 10 m ja j) 12 m.

Taulukko 10. Huonepalon synnyttämän säteilyn voimakkuus eri etäisyyksillä paloon osallistumattomasta ja paloon osallistuvasta materiaaleista tehdyille julkisivuille: kuvassa esitettyjen jakaumien tunnuslukuja.

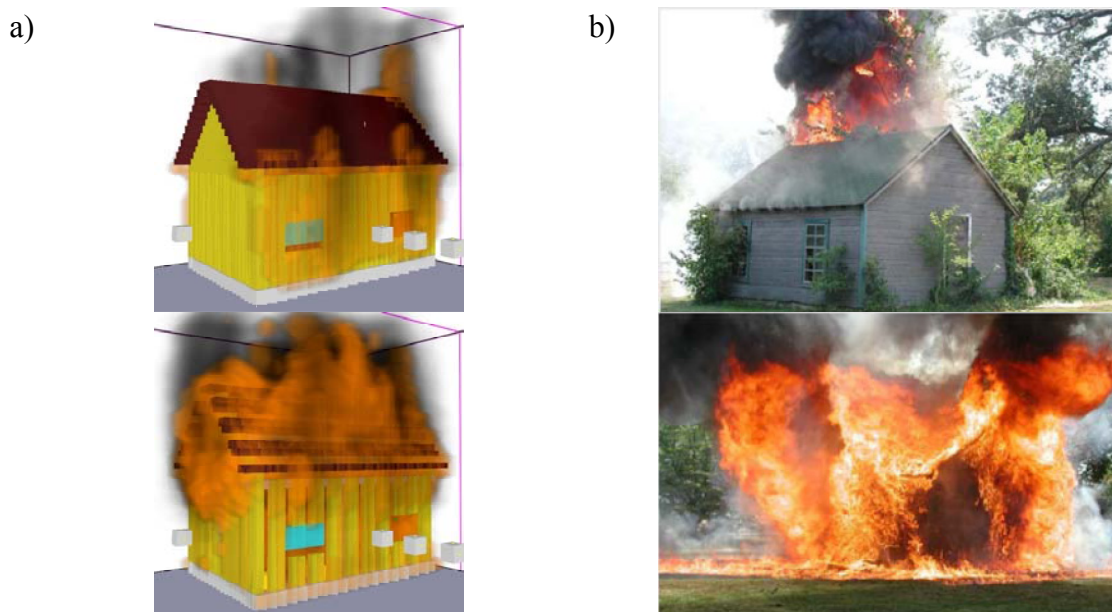
Etäisyys	Paloon osallistumaton julkisivu	Paloon osallistuva julkisivu
1 m	keskiarvo = 69.0 kW/m ² keskihajonta = 16.9 kW/m ² 80.0 % 82.7 kW/m ² 95.0 % 99.4 kW/m ²	keskiarvo = 74.7 kW/m ² keskihajonta = 16.9 kW/m ² 80.0 % 88.3 kW/m ² 95.0 % 104.8 kW/m ²
2 m	keskiarvo = 37.6 kW/m ² keskihajonta = 8.3 kW/m ² 80.0 % 44.0 kW/m ² 95.0 % 53.0 kW/m ²	keskiarvo = 41.8 kW/m ² keskihajonta = 8.8 kW/m ² 80.0 % 48.6 kW/m ² 95.0 % 58.2 kW/m ²
3 m	keskiarvo = 19.6 kW/m ² keskihajonta = 4.9 kW/m ² 80.0 % 23.4 kW/m ² 95.0 % 28.7 kW/m ²	keskiarvo = 21.8 kW/m ² keskihajonta = 4.7 kW/m ² 80.0 % 25.6 kW/m ² 95.0 % 30.6 kW/m ²
4 m	keskiarvo = 11.6 kW/m ² keskihajonta = 3.0 kW/m ² 80.0 % 13.9 kW/m ² 95.0 % 17.2 kW/m ²	keskiarvo = 13.3 kW/m ² keskihajonta = 3.2 kW/m ² 80.0 % 15.9 kW/m ² 95.0 % 19.4 kW/m ²
5 m	keskiarvo = 7.4 kW/m ² keskihajonta = 2.0 kW/m ² 80.0 % 9.1 kW/m ² 95.0 % 11.1 kW/m ²	keskiarvo = 8.9 kW/m ² keskihajonta = 2.1 kW/m ² 80.0 % 10.7 kW/m ² 95.0 % 12.8 kW/m ²
6 m	keskiarvo = 5.1 kW/m ² keskihajonta = 1.5 kW/m ² 80.0 % 6.3 kW/m ² 95.0 % 7.9 kW/m ²	keskiarvo = 6.2 kW/m ² keskihajonta = 1.5 kW/m ² 80.0 % 7.4 kW/m ² 95.0 % 9.1 kW/m ²
7 m	keskiarvo = 3.7 kW/m ² keskihajonta = 1.0 kW/m ² 80.0 % 4.6 kW/m ² 95.0 % 5.6 kW/m ²	keskiarvo = 5.5 kW/m ² keskihajonta = 1.0 kW/m ² 80.0 % 6.4 kW/m ² 95.0 % 7.5 kW/m ²
8 m	keskiarvo = 2.9 kW/m ² keskihajonta = 0.85 kW/m ² 80.0 % 3.5 kW/m ² 95.0 % 4.4 kW/m ²	keskiarvo = 3.5 kW/m ² keskihajonta = 0.88 kW/m ² 80.0 % 4.2 kW/m ² 95.0 % 5.1 kW/m ²
10 m	keskiarvo = 1.8609 keskihajonta = 0.5723 80.0 % 2.2 kW/m ² 95.0 % 2.9 kW/m ²	keskiarvo = 2.2 kW/m ² keskihajonta = 0.58 kW/m ² 80.0 % 2.7 kW/m ² 95.0 % 3.3 kW/m ²



Kuva 26. Olohuoneen tulipalon synnyttämän lämpösäteilyn keskimääräisten arvojen riippuvuus etäisyydestä. Termeillä ”palamaton julkisivu ja paloon osallistuva julkisivu (puu-JS)” on merkitty P3-luokan palotekniset vaatimukset täyttävää rakennustapaa ja punainen käyrä ennen nykyistä paloluokitussysteemiä rakennetun taloa (esim. rintamamiestalo) (ks. Kuva 27).



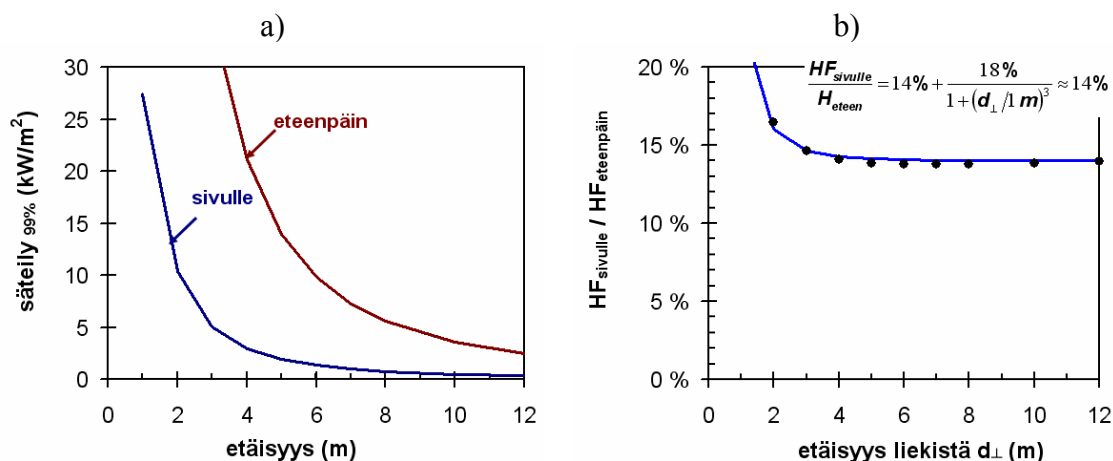
Kuva 27. Esimerkki ennen nykyistä paloluokitussysteemiä rakennetun talon palamisesta.



Kuva 28. Ennen nykyistä paloluokitussysteemiä rakennetun talon palamisen mallintamisen realistisuuden arviointi vertaamalla laskettua tulosta autiotalon polttokokeeseen [Rehm ym. 2003].

8.1.2.2 Suoraan sivulle suuntautuvan säteilyn määrä

Koska ikkunan liekki työntyy seinäpinnan tason ulkopuolelle, osa säteilystä suuntautuu myös sivulle, suoraan seinäpinnan suuntaan. Sivulle ja eteenpäin suuntautuvan säteilyn etäisyysriippuvuus olohuoneen palolle esitetään kuvassa 29a. Näiden suhde on pieniä etäisyyksiä lukuun ottamatta noin 14 % (Kuva 29b).



Kuva 29. a) Sivulle ja eteenpäin suuntautuvan säteilyn etäisyysriippuvuus olohuoneen palolle ja b) näiden suhde.

8.1.2.3 Suunnan vaikutus

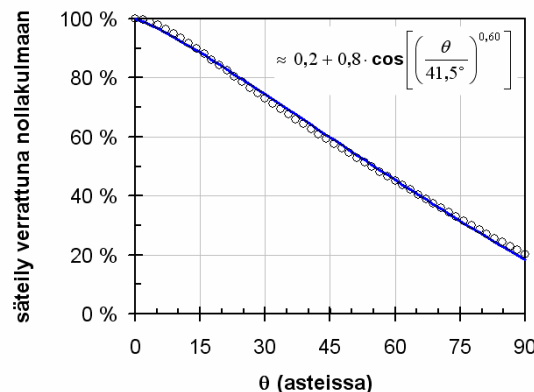
Lämpösäteily on suurimmillaan kohtisuorassa suunnassa säteilevään kohteeseen pinnalle, jonka normaali on säteilevän kohteen ja uhatun kohteen yhdistysjanan suuntainen (Kuva 31a). Uhatun kohteen vastaanottama säteilyn määrä vähenee Lambertin kosinilain mukaisesti, kun uhatun kohteen pinnan suunta poikkeaa tästä kohtisuorasta asemasta (Kuva 31b) ja kun uhatun kohteen paikka siirtyy siten, että sen lähin piste ja säteilylähteen keskikohta muodostavat nollassa poikkeavan kulman ϕ (kuva 31c). Näiden eri kulma-asetelmien analysointi esitetään kuvissa 30 ja 34.

Kulman θ suhteen riittää käytännössä useimmiten tarkastella arvoja 0° , jolloin uhattu pinta samansuuntainen uhkaavan pinnan kanssa tai 90° , jolloin uhattu pinta samansuuntainen uhkaavan pinnan kanssa (Kuva 33). Tässä tapauksessa säteilyn valitun tasavokäyrän (eli valittua riskitasoa vastaava säteilyarvo) riippuvuus kulmasta paikasta ja suunnasta on kuvassa 34 esitetyn kaltainen. Voidaan nähdä, että tämä riippuvuus voidaan riittävällä tarkkuudella mallintaa ellipsillä, jossa pitempi pääakseli on riskitasosta riippuva turvallinen etäisyys suoraan palavasta kohteesta eteenpäin ja lyhyempi pääakseli on vastaava etäisyys kohtisuorassa tätä suuntaa vastaan.

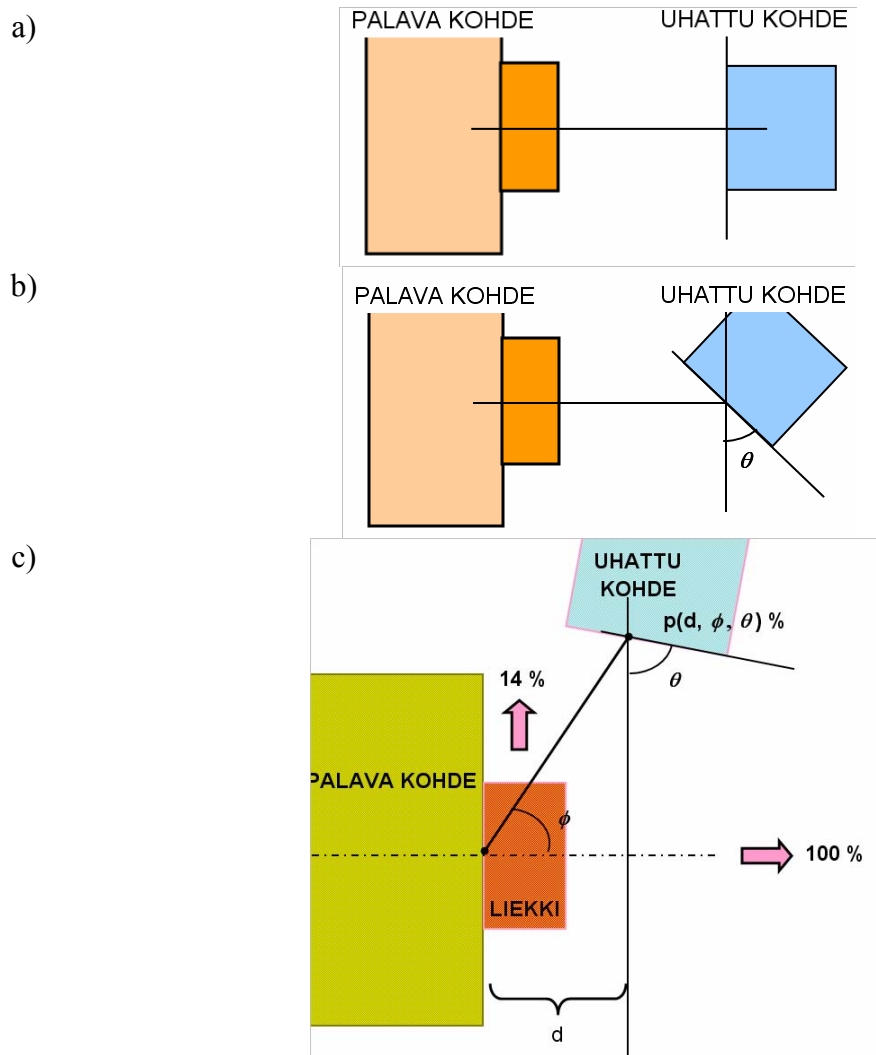
Tilanne	Lauseke
vastaanottava pinta tasossa, joka muodostaa kulman θ säteilevän pinnan suhteen	$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[\arctan(a) - \frac{(1 - b \cos \theta)}{\sqrt{1 + b^2 - 2b \cos \theta}} \arctan \left(\frac{a}{\sqrt{1 + b^2 - 2b \cos \theta}} \right) \right]$ $+ \frac{a \cos \theta}{\sqrt{a^2 + \sin^2 \theta}} \left[\arctan \left(\frac{b - \cos \theta}{\sqrt{a^2 + \sin^2 \theta}} \right) + \arctan \left(\frac{\cos \theta}{\sqrt{a^2 + \sin^2 \theta}} \right) \right]$ (5.6.3)

a) $\arctan(x)$ on tan-funktion käänteisfunktio.

b)

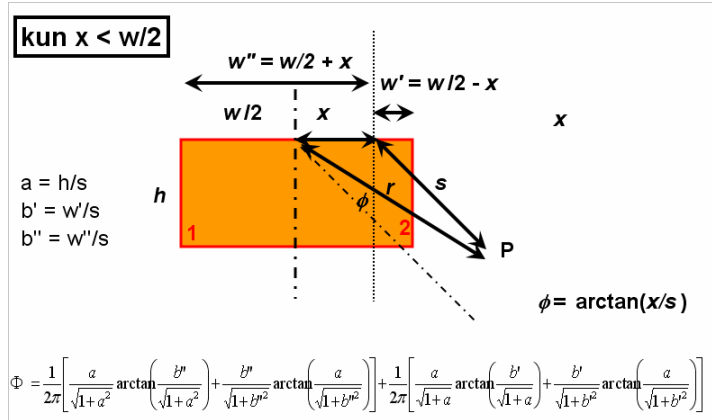


Kuva 30. Näkyvyystekijä, kun säteilyä vastaanottava pinta on tasossa, joka muodostaa kulma θ säteilylähteen suhteen: a) tarkka lauseke ja b) säteilyn vähennystekijän likimääräinen lauseke kosinifunktion avulla esitettyinä.

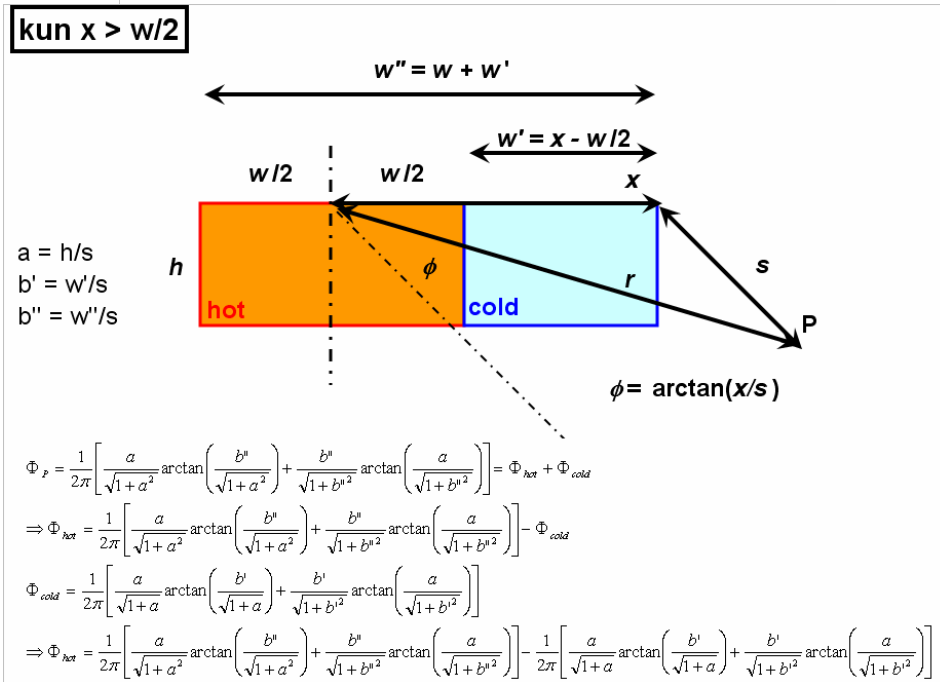


Kuva 31. Suunnan vaikutuksen laskennan asetelmat.

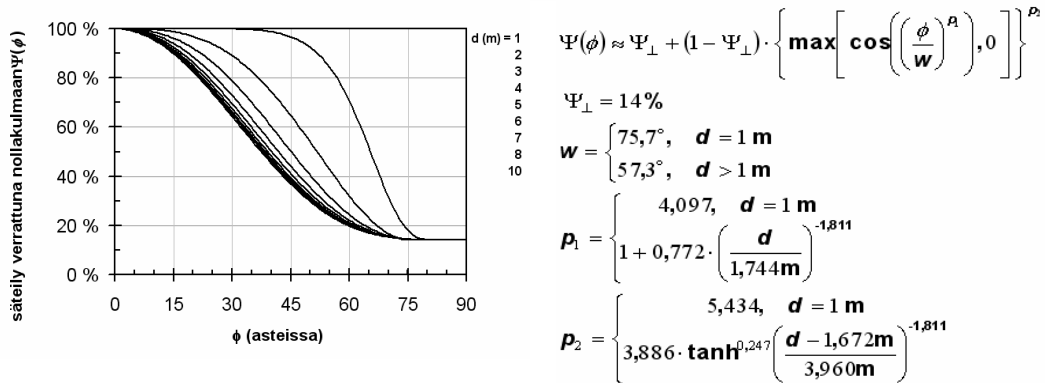
a)



b)

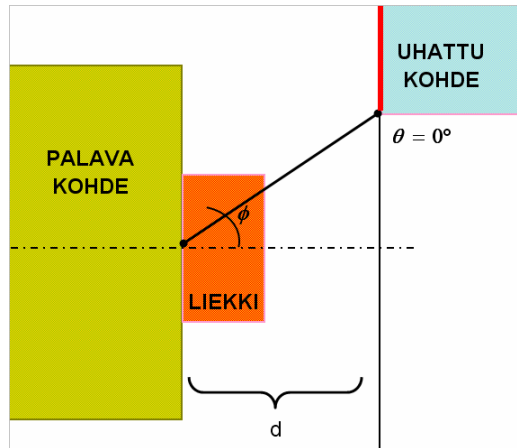


c)

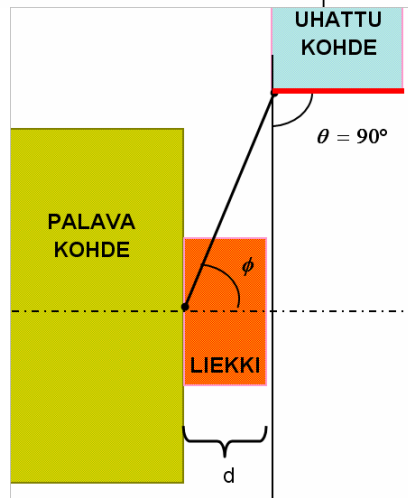


Kuva 32. Näkyvyystekijä, kun uhatun kohteen paikka siirtyy siten, että sen lähin piste ja säteilylähteen keskikohta muodostavat nollasta poikkeavan kulman ϕ : a ja b) tarkat lausekkeet, c) likimääräinen lauseke kosinifunktion avulla esitettynä.

a)

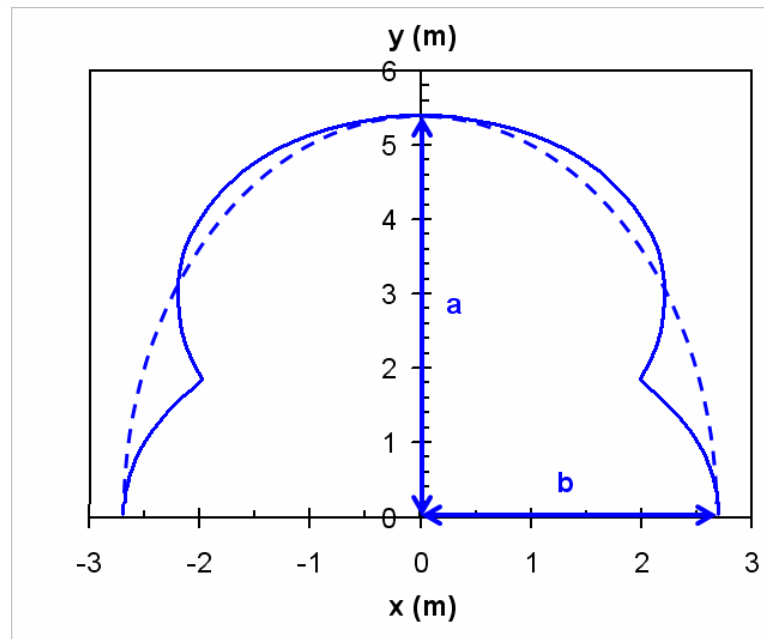
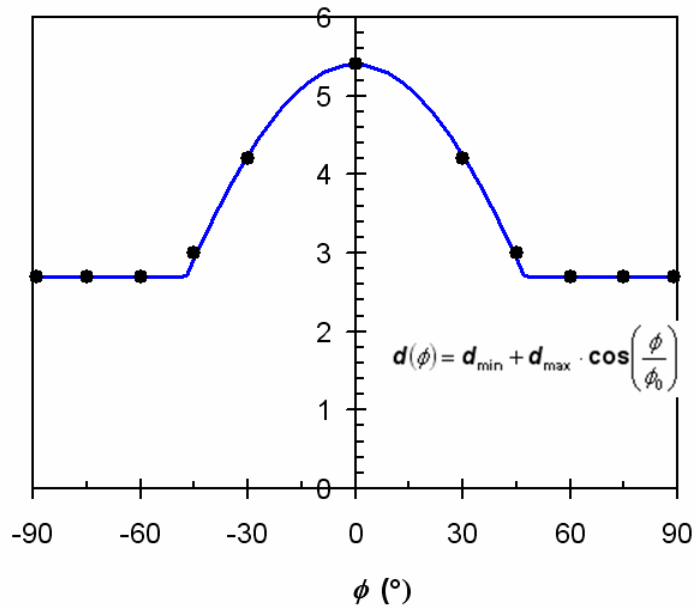


b)



Kuva 33. Kulman θ tavallisemmin käytännössä esiintyvät arvot.

a)



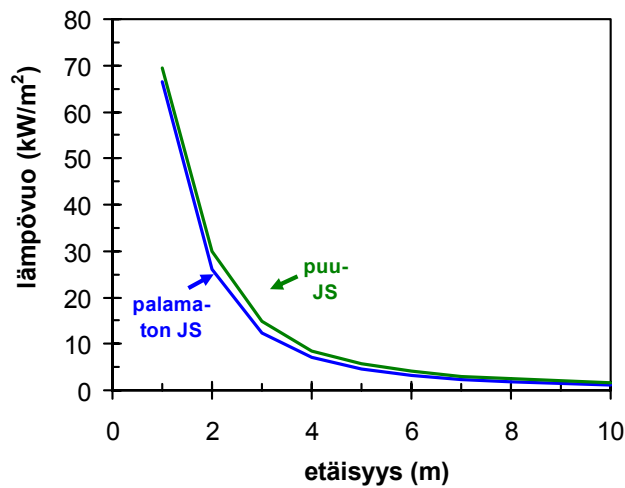
Kuva 34. Esimerkki säteilyn tietyn tasa-arvokäyrän etäisyys- ja suuntariippuudesta: a) esitys napakoordinaateissa ja b) x - y -koordinaatistossa. Katkoviivalla esitetään ellipsimuotoinen approksimaatio, jossa paaakseli a on valittavasta riskitasosta riippuva turvallinen etäisyys suoraan palavasta kohteesta eteenpäin ja pääakseli b on vastaava etäisyys kohtisuorassa tätä suuntaa vastaan.

8.1.2.4 Lämpösäteilyn tuottama uhka makuuhuoneen ja keittiön tulipaloissa

Makuuhuoneen ja keittiön tulipaloja voidaan käsitellä samalla tavalla kuin olohuoneen palot käyttäen kuitenkin erisuuruisia mittoja huoneiden ja aukkojen koolle, palokuorman tiheydelle sekä pinta-alaa kohden vapautuvan palotehon arvolle. Laskennan syöte-tiedot esitetään taulukossa 11 ja tulokset esitetään graafisesti kuvassa 35.

Taulukko 11. Makuuhuoneen tai keittiön palon synnyttämän säteilyn laskennassa käytetyt tiedot.

Tekijä	Kuvaus
huoneen pinta-ala A_f [m ²]	keskiarvo 10 m ² , vaihteluväli 7,5 m ² (minimiarvo) -15 m ² (99,9 %:n fraktiili); gammajakauma
huoneen leveys W [m] huoneen syvyys D [m]	$W \cdot D = A_f$ ja W/D vaihtelee gammajakauman mukaisesti keskiarvona 1,0 ja vaihteluväli 0,67 (minimiarvo) – 1,5 (99,9 %:n fraktiili)
huoneen korkeus H [m]	2,6,..., 2,9 m, tasajakauma
Ikkunan leveys w [m]	$w = (40 \%, \dots, 60 \%) \times W$ (kerroin tasajakautunut)
Ikkunan korkeus h_{eq} [m]	$h_{eq} = (40 \%, \dots, 60 \%) \times H$ (kerroin tasajakautunut)
palokuorman tiheys [MJ/m ²]	Gumbel-jakauma, keskiarvo 660 MJ/m ² , 80 %:n fraktiili 810 MJ/m ² (ks. Taulukko 7)
lattiapinta-alaa kohden vapautuva maksimipaloteho [kW/m ²] =	Gumbel-jakauma, keskiarvo 920 kW/m ² , 80 %:n fraktiili 1100 kW/m ² (ks. Taulukko 7)
kasvuaikatekijä (s)	150 s ± 20 %
lämpösäteilyä vastaanottavan kohteen korkeus [m]	20 % ikkunan yläreunan alapuolella (vastaa varsin hyvin kuuminta paikkaa), vakioarvo
lämpösäteilyä vastaanottavan kohteen etäisyys [m]	laskujen muuttuja



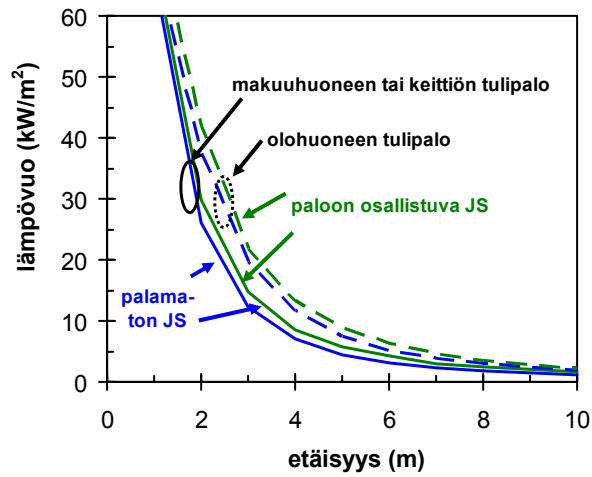
Kuva 35. Makuuhuoneen tai keittiön tulipalon synnyttämän lämpösäteilyn keskimääräisten arvojen riippuvuus etäisyydestä paloon osallistumattomalle julkisivulle ja paloon osallistuvalla julkisivulle.

8.1.3 Yhteenveto huoneistopalon synnyttämän lämpösäteilyn aiheuttamasta uhasta

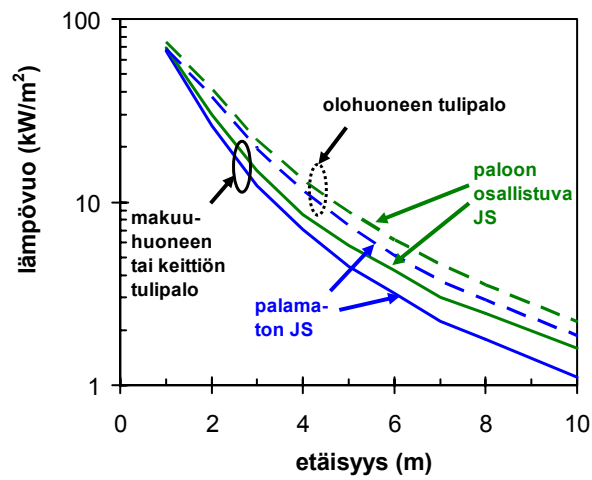
Huoneistopalon aiheuttaman lämpösäteilyn laskennan tulosten yhteenveto esitetään alla olevissa kuvissa:

- Kuva 36 esittää lämpösäteilyn riippuvuuden ikkunasta mitatusta etäisyydestä ikkunan keskikohdalla ikkunalinjaa vasten kohtisuorassa suunnassa (jakaumien keskimääräiset arvot),
- Kuvat 37 ja 38 esittävät karttoina lämpösäteilyn riippuvuuden paikasta, kun origo on ikkunan keskipisteessä mitatusta etäisyydestä (jakaumien 80 %:n fraktiiliarvot).

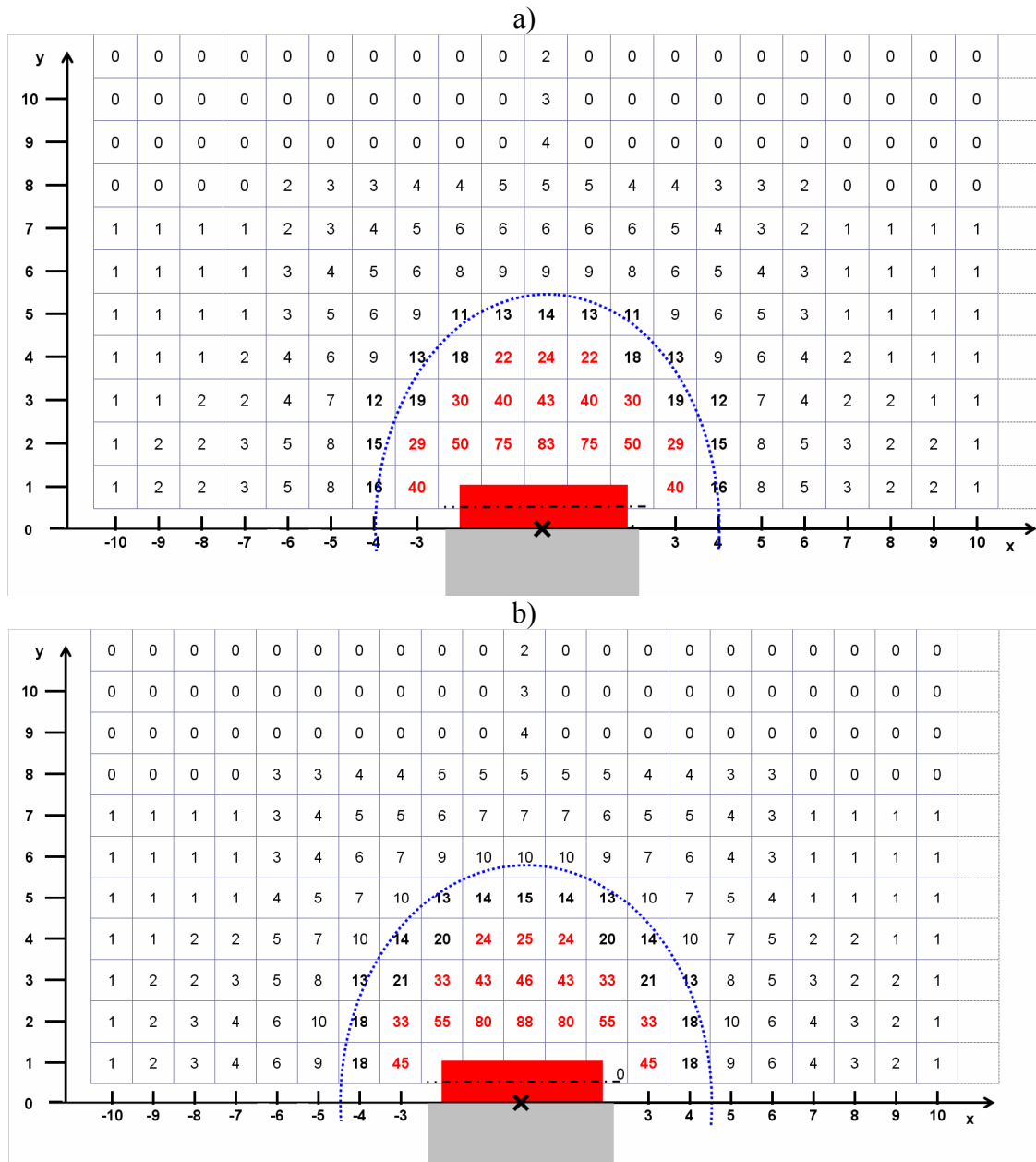
a)



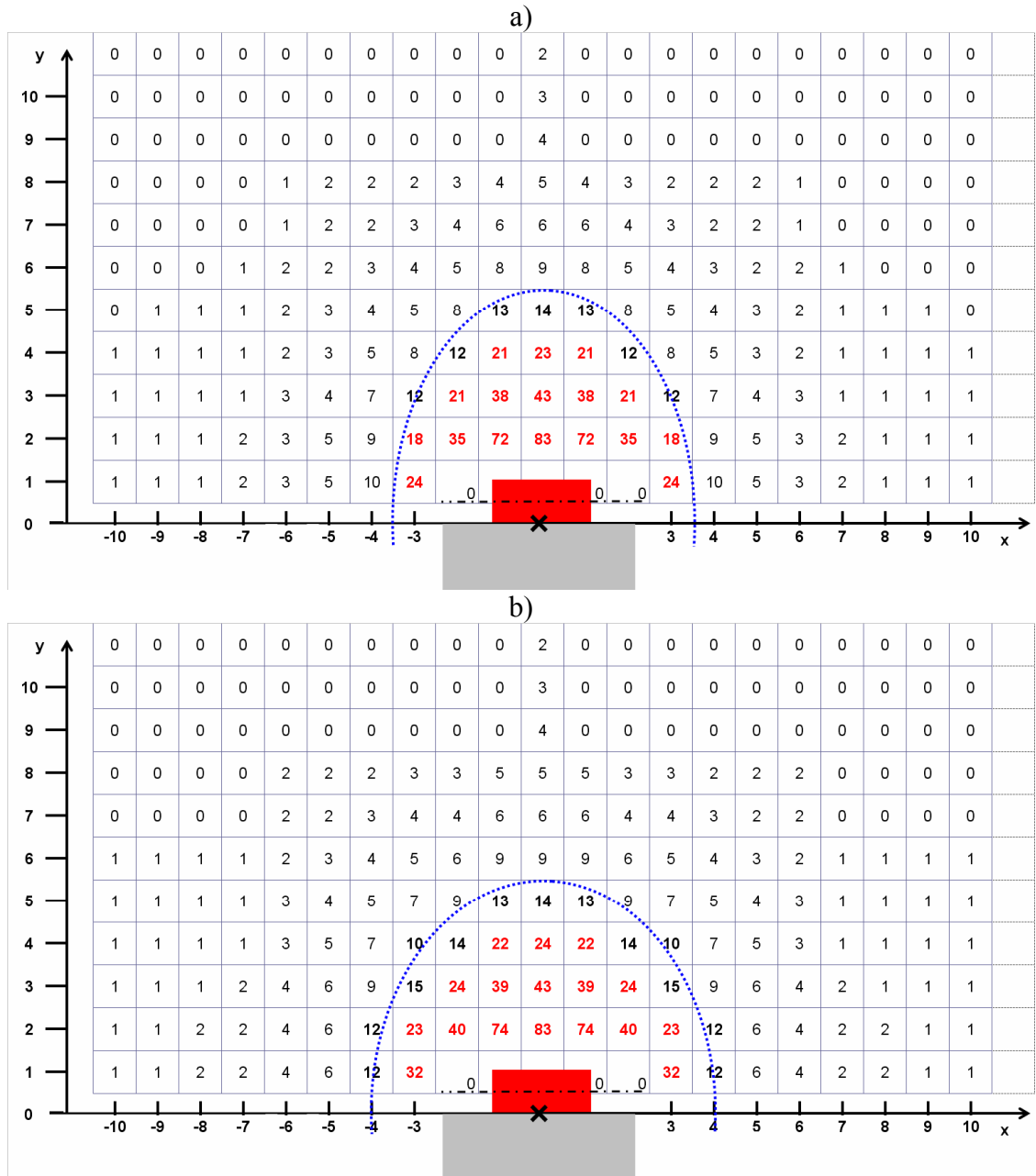
b)



Kuva 36. Olohuoneen ja makuuhuoneen tai keittiön tulipalon synnyttämän lämpösäteilyn keskimääräisten arvojen riippuvuus etäisyydestä paloon osallistumattomalle julkisivulle ja paloon osallistuvalla julkisivulle: a) suoraviivainen ja b) logaritminen pystyasteikko.



Kuva 37. Olohuoneen tulipalon synnyttämä lämpösäteily nykyistä tiiviissä ja matalassa rakentamisessa noudatettavaa paloteknistä rakennustapaa noudatettaessa: a) palamaton julkisivumateriaali ja b) paloon osallistuva julkisivumateriaali. Lukuarvot ovat lämpösäteilyn jakauman 80 %:n fraktiileja yksiköissä kW/m^2 .



Kuva 38. Makuuhuoneen tai keittiön tulipalon synnyttämä lämpösäteily nykyistä tiiviissä ja matalassa rakentamisessa noudatettavaa paloteknistä rakennustapaa noudatettaessa: a) palamaton julkisivumateriaali ja b) paloon osallistuva julkisivumateriaali. Lukuarvot ovat lämpösäteilyn jakauman 80 %:n fraktiileja yksiköissä kW/m^2 .

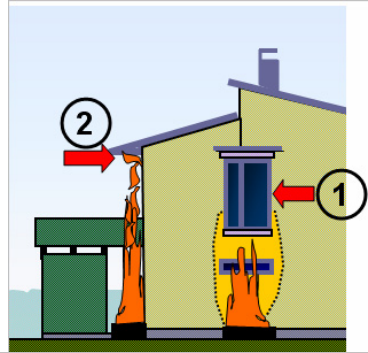
8.2 Asuinrakennusten rakennelmien ulkoisten syttymien aiheuttamat palot

Tässä tarkastelussa on tarkoituksenmukaista käyttää ulkoisille syttymille jaottelua, jossa käsitellään erikseen asuinrakennusten ja muiden rakennuksiin ja rakennelmien ulkoinen syttyminen. Tässä luvussa käsitellään asuinrakennusten ulkoinen syttyminen, joka tarkoittaa mitä tahansa muulta kuin huoneistojen sisältä alkavia paloja eli esim. seinään kohdistuvan tahallisesti tai tahattomasti aiheutetun lämpörasituksen aiheuttama syttymä sekä terassien ja kuistien syttymät. Tällaisia syttymistapoja on lukuisa määrä. Niitä on tarkasteltu kohdassa 3.2 (Taulukot 3 ja 4). Tarkastelun perusteella paha, mutta kuitenkin todennäköinen palon uhkakuva on ulkoinen palo, joka sytytetään palavalla nesteellä, joiden esiintymistodennäköisyys kaikkien tarkasteltujen ulkoisten syttymien joukossa oli noin 1 % ja tahallisesti sytytetyistä paloista noin 10 %.

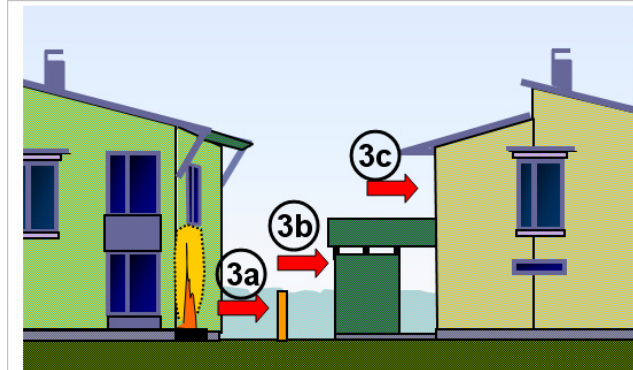
Tarkasteltavat palonleviämiskenaariot esitetään kuvassa 39. Ne ovat:

1. Seinän vieressä olevan ulkoisesti syttyneen palon leviäminen sisälle huoneistoon, missä otetaan huomioon sekä alkupalo että mahdollinen julkisivu materiaalin osallistuminen paloon.
2. Seinän vieressä olevan ulkoisesti syttyneen palon leviäminen yläpohjan onteloon, missä otetaan huomioon sekä alkupalo että mahdollinen julkisivu materiaalin osallistuminen paloon.
3. Seinän vieressä olevan ulkoisesti syttyneen palon leviäminen muihin kohteisiin eli (a) aitoihin yms., (b) muihin rakennuksiin/rakennelmiin kuin asuinrakennuksiin ja (c) muihin asuinrakennuksiin.
4. Ulkokalusteen syttyminen/sytyttäminen: (a) palon leviäminen lähimpänä olevaan asuinrakennukseen ja (b) palon leviäminen johonkin muuhun asuinrakennukseen.
5. Ulkokalusteen syttyminen/sytyttäminen: (a) palon leviäminen muuhun rakennukseen/rakennelmaan kuin asuinrakennukseen tai (b) palon leviäminen autoon.

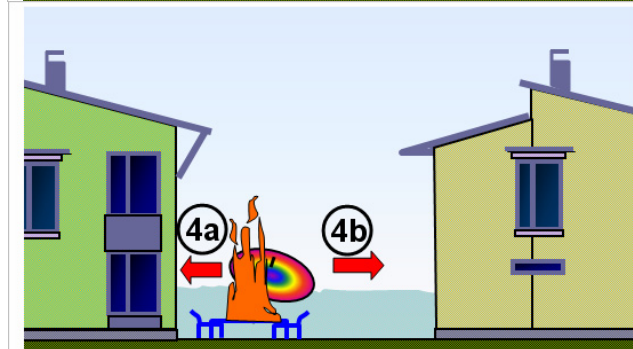
a)



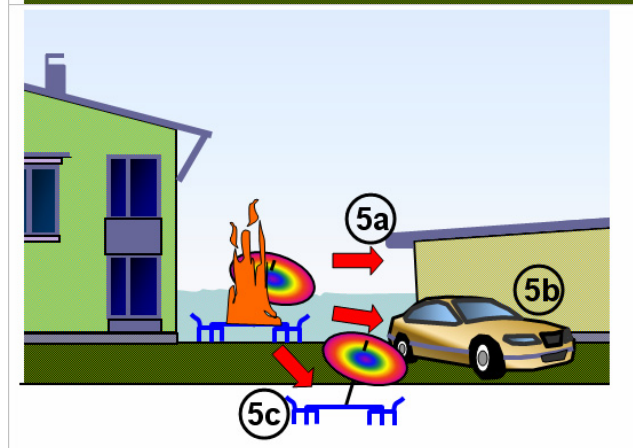
b)



c)



d)



Kuva 39. Tarkastellut asuinrakennusten ulkoisiin syttyisiin liittyvät vaarat: a) seinän viereen tehty avotuli ja (1) palon leviäminen sisälle huoneistoihin, (2) palon leviäminen yläpohjan onteloon; b) (3) ulkoisen syttymän merkitys palon leviämisessä muihin kohteisiin; b) ulkokalusteen syttyminen/sytyttäminen ja palon leviäminen asuinrakennuksiin ja d) ulkokalusteen syttyminen/sytyttäminen ja palon leviäminen muuhun rakennukseen/rakennelmaan tai irtaimeen tavaraan.

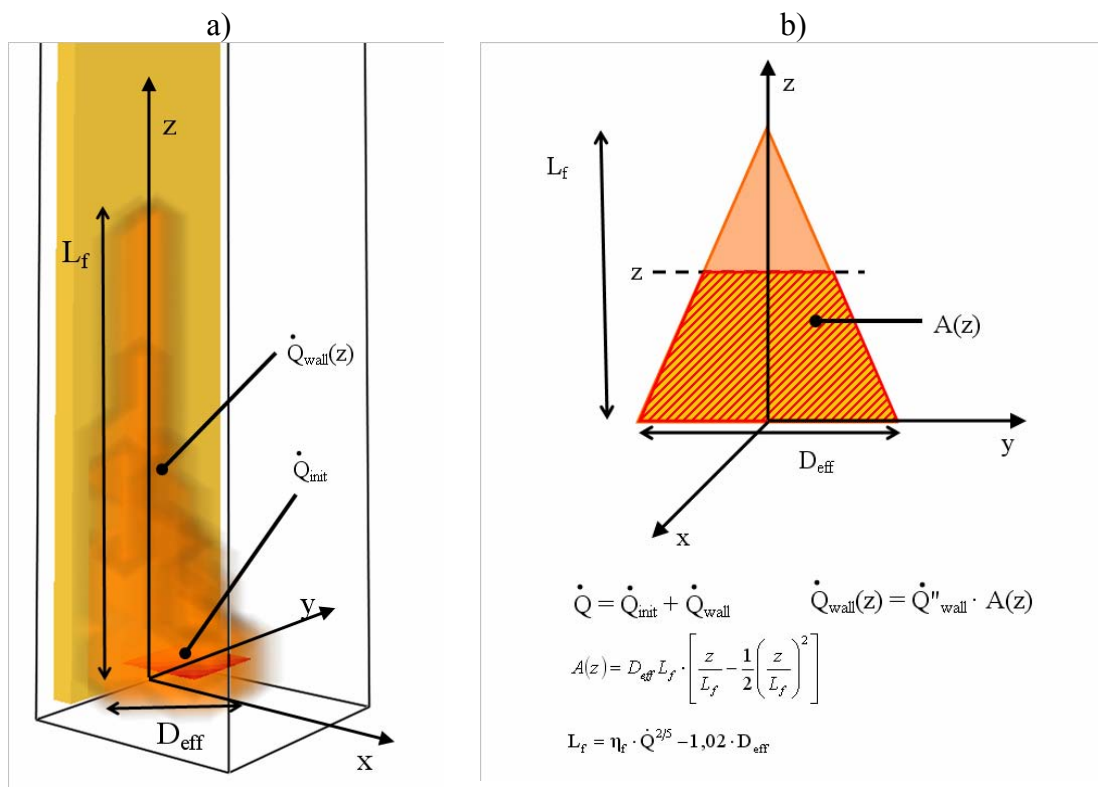
8.2.1 Seinän viereen tehty avotuli

8.2.1.1 Palon voimakkuus ja ajallinen kesto

Ulkoisen palon malli esitetään kuvassa 40. Mallin yksityiskohdat ja mitoittavan palon valinta esitetään liitteessä B. Alkupalot ja niiden todennäköisyydet ovat

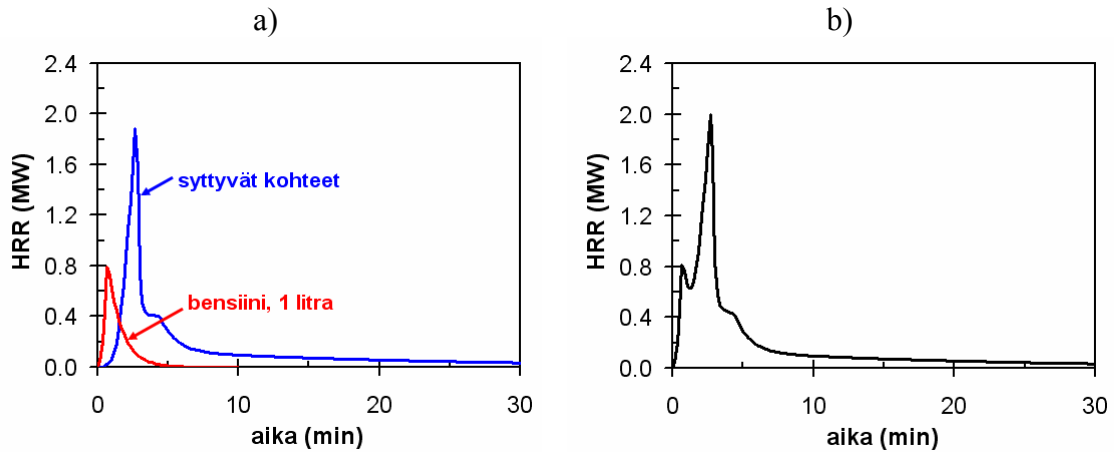
- pelkästään 1 litran suuruisella bensiinimäärällä sytytty palo, todennäköisyys yksi sadasta ulkoisesta palosta;
- 1 litran suuruisella bensiinimäärällä sytytetty palo, joka sytyttää puun., pahvin ja muodin sekoituksesta muodostuvan palokuorman, todennäköisyys yksi tuhannesta ulkoisesta palosta.

Jos julkisivu syttyy, sen osallistuminen paloon ja sen leviämiseen otetaan huomioon liitteessä B kuvatulla tavalla.



Kuva 40. Ulkoisen syttymisen malli: a) asetelma ja paloon osallistuvan seinän vaikutuksen arviointi.

Liitteessä B esitetään yksityiskohtaisesti, miten mahdolliset ulkoisen sytyttämisen palavat kohteet (alkustytysaineina puu-, pahvi- ja muovitavara) palavat. Lopputuksena saatu alkupalon kuvaus esitetään kuvassa 41.



Kuva 41. Alkupalon luovuttaman palotehon ajallinen kehittyminen: a) sytyttävän nesteen ja syttyvien kohteiden palotehot ja b) niiden yhdistelmä.

8.2.1.2 Seinän viereen tehdyn avotulen synnyttämä lämpösäteily

Liitteellä B esitetyn mallin mukaan seinän viereen tehty avotuli kohdistaa seinään lämpövuon \dot{q}''_{wall} , joka riippuu palavasta pinnasta mitatusta korkeudesta z seuraavasti

$$\dot{q}''_{wall} = \begin{cases} \dot{q}''_{max,wall} & z \leq z_c \\ \dot{q}''_{max,wall} \cdot \exp\left(-\left(\frac{z-z_c}{w}\right)^p\right) & z > z_c \end{cases} \quad (13)$$

missä

$$\begin{aligned} \dot{q}''_{max,wall} &= 60 \text{ kW/m}^2 \\ z_c &= 0,00025 \cdot \dot{Q}^{5/4} \\ p &= 1,4 \\ w &= \min\left[1,8 + \left(\frac{\dot{Q}-700}{10000}\right)^{0,3}\right] \end{aligned} \quad (14)$$

missä \dot{Q} on paloteho (kW).

Lämpövuon vaakasuuntaisella jakautumalle käytetään kirjallisuudessa esitettyä mallia [Back ym. 1994, Lattimer 2002], jonka mukaan

$$\dot{q}''_{wall} = \begin{cases} \dot{q}''_{max,wall} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{0,5D}\right)^2\right) & x \leq 0,5D \\ 0,38 \cdot \dot{q}''_{max,wall} \cdot \left(\frac{x}{0,5D}\right)^{-1,7} & x > 0,5D \end{cases} \quad (15)$$

missä x on etäisyys palopatsaan akselilta ja D on palavan alueen teehollinen halkaisija.

Koska noin 10 % seinään kohdistuvasta lämpövuosta on konvektiota, niin ulkoisen palon liekin säteilemä lämpövuoto \dot{q}''_{wall} saadaan edellä esitetystä kaavoista korvaamalla maksimilämpövuon arvo $\dot{q}''_{max,wall}$ arvolla $\dot{q}''_{ext,wall} = 50 \text{ kW/m}^2$.

Seinän viereen tehdyn avotulen muualle kuin seinnän kohdistaman lämpövuon laskentamallina voidaan käyttää edellä esitettyjä malleja.

8.2.1.3 Seinämateriaalin syttyminen ja palaminen ja siitä syntyvä lämpövuoto

Seinämateriaalin oletetaan syttyvän niin korkealle asti, kuin siihen kohdistuva lämpövuoto voi aiheuttaa syttymisen ja pitää yllä palamista. Tämä korkeus määrää seinän liekin korkeuden L_{wf} . Seinämateriaalin syttyminen kuvataan käyttäen edellä kohdassa 5 esitettyä uhattujen kohteiden syttymisen mallia. Jos seinä on puuta, se ei palokokeissa tehtyjen havaintojen mukaan juurikaan levitä paloa vaakasuunnassa. Tässä työssä seinän palon leveyden w_{wf} oletetaan olevan 5, ..., 10 % alkupalon levyttä suurempi liekin molemmin puolin eli seinän liekki on tekijällä 1,1, ..., 1,2 alkupaloa leveämpi, $w_{wf} = (1,1, \dots, 1,2) \times D_{eff}$. Seinän palamisen synnyttämä paloteho \dot{Q}_{wf} saadaan kertomalla liekin mitoista laskettu seinäpalon pinta-ala A_{wf} seinämateriaalin pinta-alayksikköä luovuttamalla paloteholla \dot{Q}''_{wall}

$$\dot{Q}_{wf} = A_{wf} \cdot \dot{Q}''_{wall} \quad (16)$$

Suureen \dot{Q}''_{wall} arvo on puutuotteille tyypillisesti välillä 100, ..., 150 kW/m^2 (kolmiojakauma, huippuarvona 120 kW/m^2).

Kun seinämateriaali palaa, se kohdistaa seinään lämpövuon, jolle esitetään laskentamalli liitteessä B.

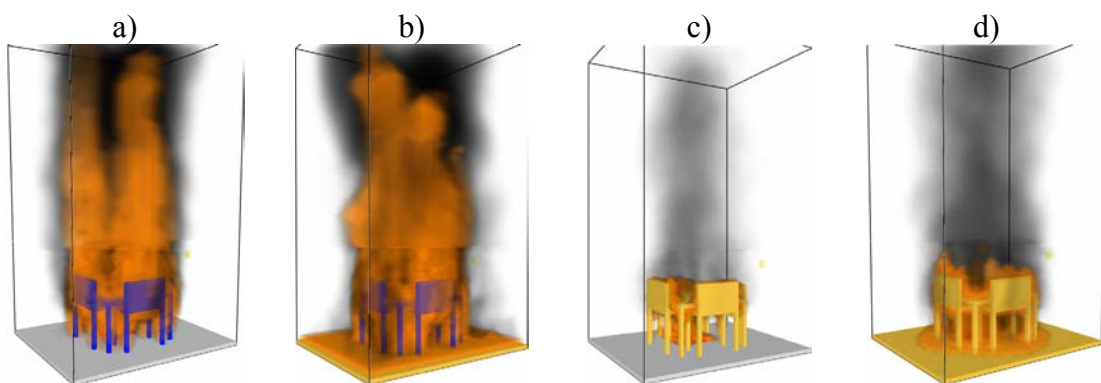
8.2.2 Ulkona olevien kalusteiden tulipaloja

8.2.2.1 Ulkokalusteryhmät

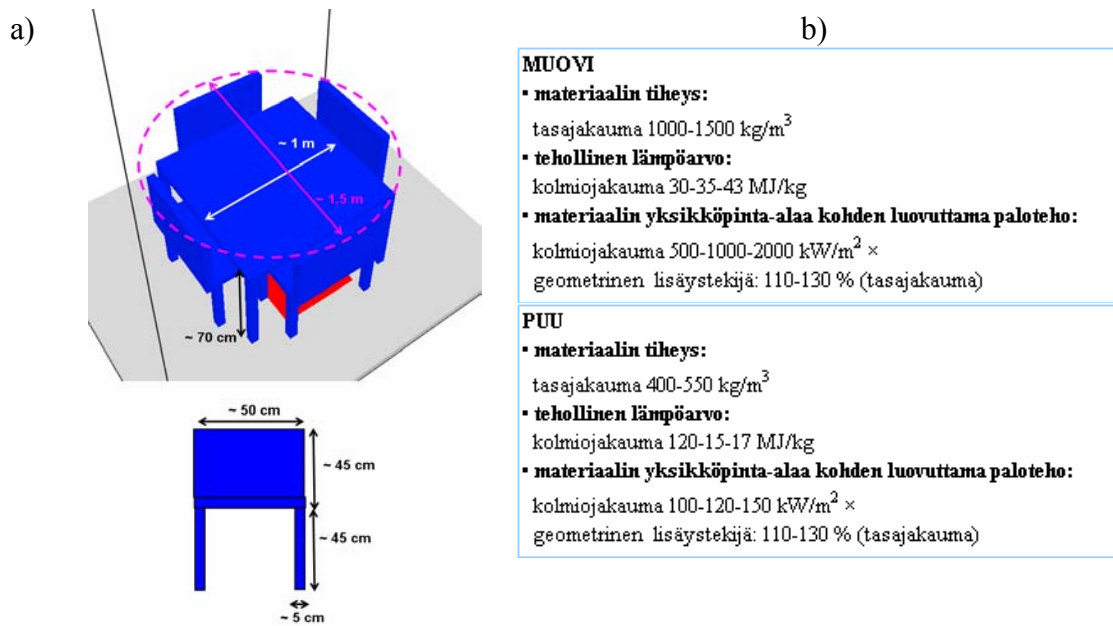
Tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipaloja esitetään kuvassa 42. kalusteryhmän palamisen laskentamalli ja sen olennaiset suureet esitetään kuvassa 43. Mallin avulla laskettuja palotehon kuvaajia kuvassa 44 ja lämpövuon arvoja kuvassa 45. Lämpövuon jakaumien parametrit esitetään taulukoissa 12 ja 13.

Kuvassa 46 verrataan tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipalon voimakkuutta kuvaavia suureita (yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho ja palokuorman tiheys) olohuoneen vastaaviin arvioihin tapauksessa, jossa ulkona olevan kalustetun alueen pinta-ala on 10 m². Nähdään, että

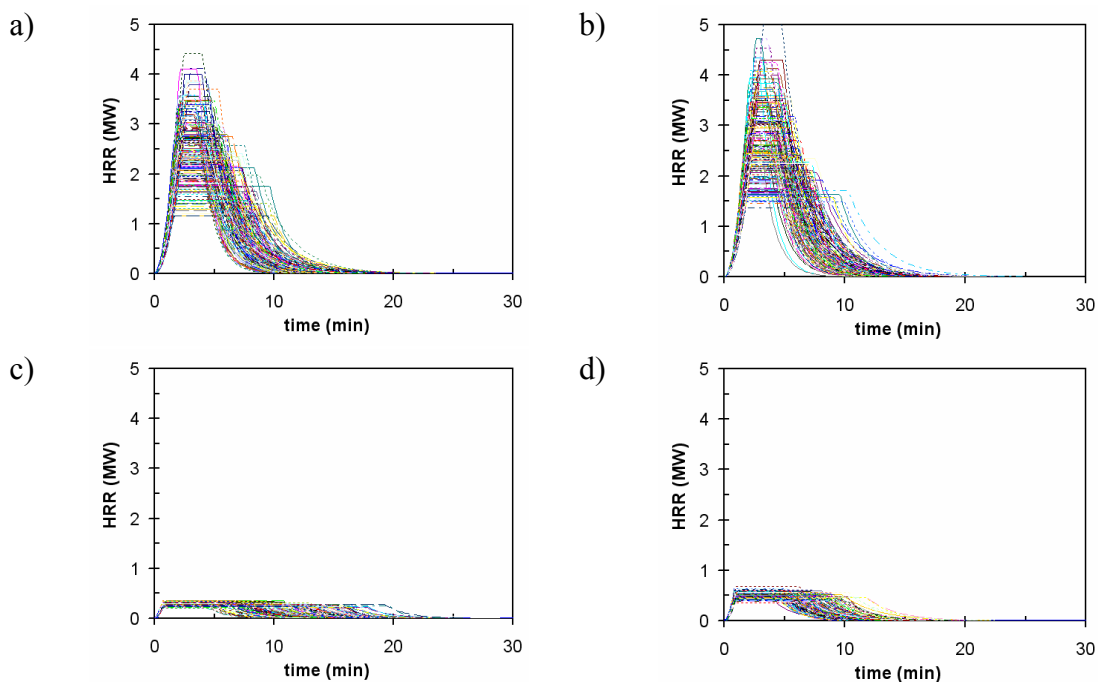
- kun ulkotilan lattiamateriaali ei osallistu paloon, muovisten kalusteiden yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 30–40 % ja palokuorman tiheys noin 15 % olohuoneen vastaavasta arvosta;
- kun ulkotilan lattiamateriaali osallistuu paloon, muovisten kalusteiden yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 70 % ja palokuorman tiheys noin 20 % olohuoneen vastaavasta arvosta;
- puisten kalusteiden yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 4 % ja palokuorman tiheys noin 5 % olohuoneen vastaavasta arvosta sekä paloon osallistuvalla että paloon osallistumattomalle ulkotilan lattiamateriaalille.



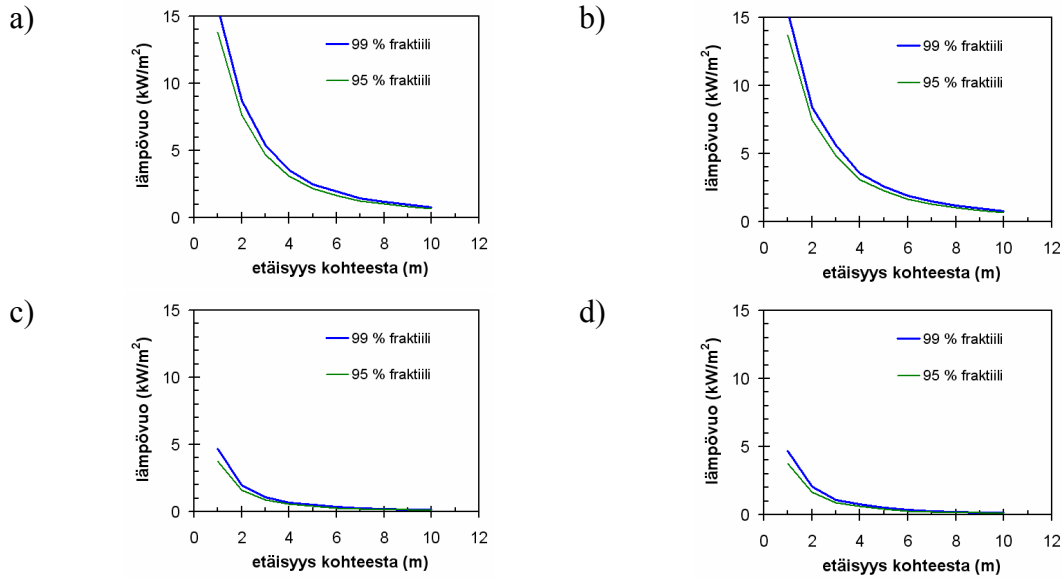
Kuva 42. Tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipaloja: a) muovinen kalusteryhmä, paloon osallistumaton alusta, b) muovinen kalusteryhmä, paloon osallistuva alusta, a) puinen kalusteryhmä, paloon osallistumaton alusta ja b) puinen kalusteryhmä, paloon osallistuva alusta.



Kuva 43. Tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipalon mallintaminen: a) mittoja ja b) palo-ominaisuuksia.



Kuva 44. Tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipalon palotehon kuvaajia: a) muovinen kalusteryhmä, paloon osallistumaton alusta, b) muovinen kalusteryhmä, paloon osallistuva alusta, a) puinen kalusteryhmä, paloon osallistumaton alusta ja b) puinen kalusteryhmä, paloon osallistuva alusta.



Kuva 45. Tyypillisten ulkokalusteryhmien synnyttämän lämpövuon riippuvuus etäisyydestä: a) muovinen kalusteryhmä, paloon osallistumaton alusta, b) muovinen kalusteryhmä, paloon osallistuva alusta, c) puinen kalusteryhmä, paloon osallistumaton alusta ja d) puinen kalusteryhmä, paloon osallistuva alusta.

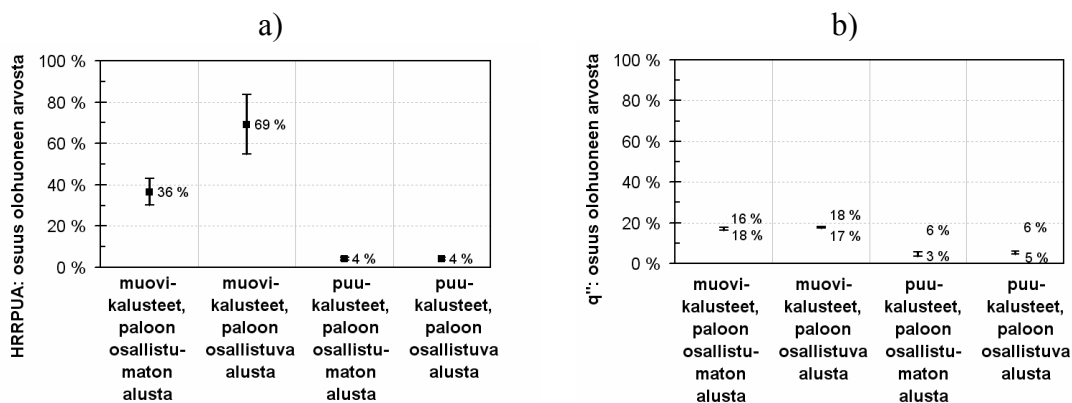
Taulukko 12. Tyypillisten muovisten ulkokalusteryhmien tulipalon ympäristönsä kohdistama lämpövuon eri etäisyyksillä, kun katoksen katto ei osallistu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Muovinen kalusteryhmä (pöytä ja 4 tuolia), paloon osallistumaton alusta						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.4	5.9	4.4	9.5	13.8	15.6
2 m	2.3	3.3	2.4	5.2	7.6	8.7
3 m	2.2	2.0	1.3	3.0	4.7	5.4
4 m	2.8	1.7	0.6	2.1	3.1	3.5
5 m	2.5	1.0	0.6	1.5	2.2	2.5
6 m	2.1	0.7	0.5	1.1	1.7	1.9
7 m	2.5	0.6	0.3	0.8	1.3	1.4
8 m	2.0	0.4	0.3	0.6	1.0	1.2
9 m	2.0	0.3	0.2	0.5	0.8	1.0
10 m	2.4	0.3	0.2	0.4	0.7	0.8
Muovinen kalusteryhmä (pöytä ja 4 tuolia), paloon osallistuva alusta						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.6	6.3	4.1	9.6	13.7	15.4
2 m	2.8	3.9	1.8	5.2	7.5	8.4
3 m	2.2	2.2	1.3	3.1	4.9	5.6
4 m	2.2	1.3	0.9	2.0	3.1	3.5
5 m	2.2	1.0	0.6	1.5	2.3	2.6
6 m	2.2	0.7	0.5	1.1	1.6	1.9
7 m	2.1	0.6	0.4	0.8	1.3	1.5
8 m	2.1	0.5	0.3	0.7	1.0	1.2
9 m	2.0	0.4	0.2	0.5	0.8	1.0
10 m	2.2	0.3	0.2	0.4	0.7	0.8

Taulukko 13. Tyypillisten puisten ulkokalusteryhmien tulipalon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Puinen kalusteryhmä (pöytä ja 4 tuolia), paloon osallistumaton alusta						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	1.53	1.38	0.92	2.00	3.75	4.68
2 m	1.58	0.61	0.37	0.86	1.60	1.98
3 m	1.49	0.30	0.23	0.46	0.86	1.07
4 m	1.51	0.20	0.13	0.29	0.54	0.68
5 m	1.50	0.14	0.09	0.21	0.39	0.49
6 m	1.50	0.10	0.07	0.15	0.28	0.34
7 m	1.47	0.08	0.05	0.11	0.22	0.28
8 m	1.39	0.06	0.04	0.09	0.17	0.22
9 m	1.60	0.05	0.03	0.07	0.13	0.16
10 m	1.47	0.04	0.03	0.06	0.11	0.14
Puinen kalusteryhmä (pöytä ja 4 tuolia), paloon osallistuva alusta						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	1.56	1.42	0.89	2.01	3.76	4.67
2 m	1.57	0.63	0.37	0.87	1.64	2.04
3 m	1.40	0.30	0.22	0.45	0.87	1.11
4 m	1.35	0.20	0.15	0.30	0.60	0.76
5 m	1.43	0.14	0.10	0.21	0.40	0.50
6 m	1.57	0.11	0.07	0.15	0.28	0.35
7 m	1.41	0.07	0.06	0.11	0.21	0.27
8 m	1.53	0.06	0.04	0.09	0.16	0.20
9 m	1.68	0.05	0.03	0.07	0.13	0.16
10 m	1.44	0.04	0.03	0.06	0.11	0.14

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$



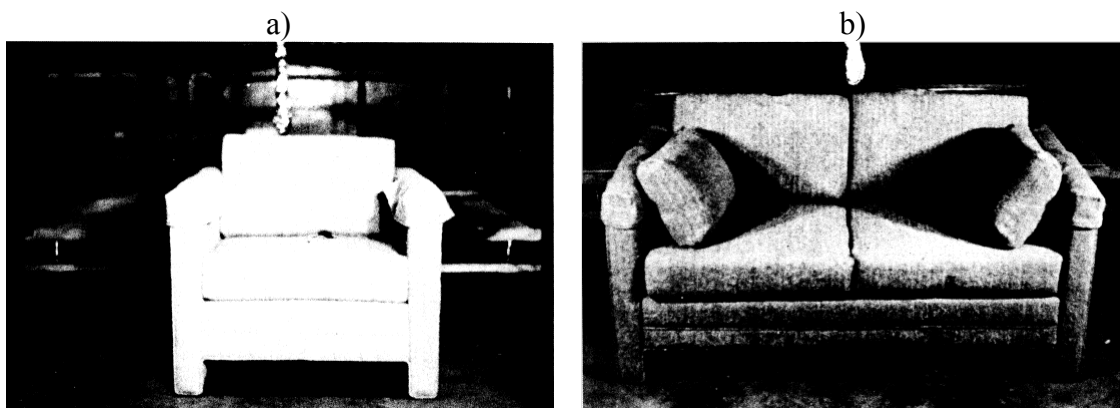
Kuva 46. Tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipalon voimakkuutta kuvaavien suureiden vertaaminen olohuoneen vastaaviin arvioihin, kun ulkona olevan kalustetun alueen pinta-ala on 10 m²: a) yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho ja b) palokuorman tiheys.

8.2.2.2 Ulkona olevat pehmustetut huonekalut

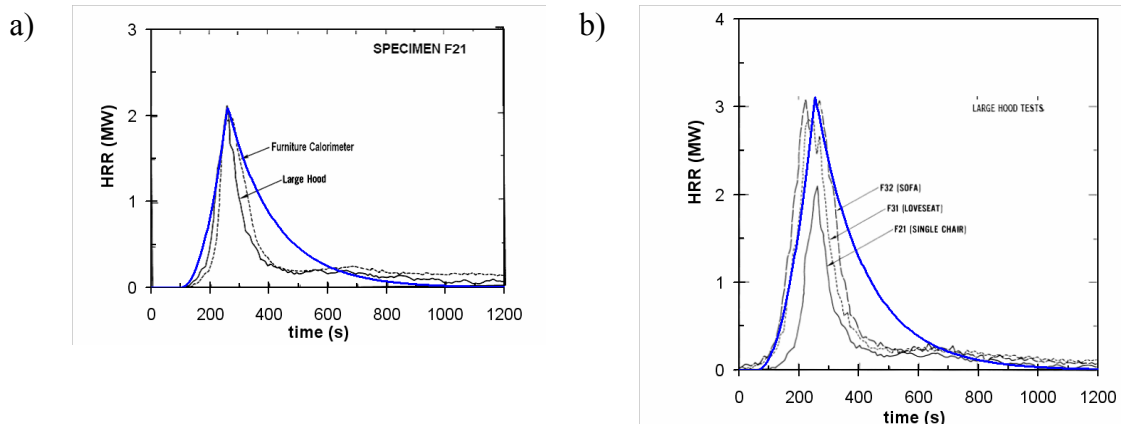
Uhkakuva, jossa ulkona palavat kohteet ovat pehmustettuja huonekaluja, analysoidaan perustuen NISTin tekemään huonekalujen palo-ominaisuuksien tutkimukseen [Babrauskas ym. 1982], jossa näytteinä oli nojatuoleja ja sohvia (Kuva). Tyypillisten palotehon mittaustulosten mallintaminen t^2 -muotoisella aikariippuvuudella esitetään kuvassa 48. Palamisen analysoinnin tulokset esitettynä yksikköpinta-alaa kohden vapautuvana palotehona ja palokuorman tiheytenä esitetään kuvassa 49 ja näihin suureisiin perustuvia stokastisia palotehon kuvaajia esitetään kuvassa 50. Palotehon perusteella lasketut lämpövuon riippuvuudet etäisyydestä esitetään kuvassa 51. Lämpövuon jakaumien parametrit esitetään taulukoissa 14 ja 15.

Kuvassa 52 verrataan tyypillisten ulkokalusteryhmien tulipalon voimakkuutta kuvaavia suureita (yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho ja palokuorman tiheys) olohuoneen vastaaviin arvioihin tapauksessa, jossa ulkona olevan kalustetun alueen pinta-ala on 10 m^2 . Nähdään, että

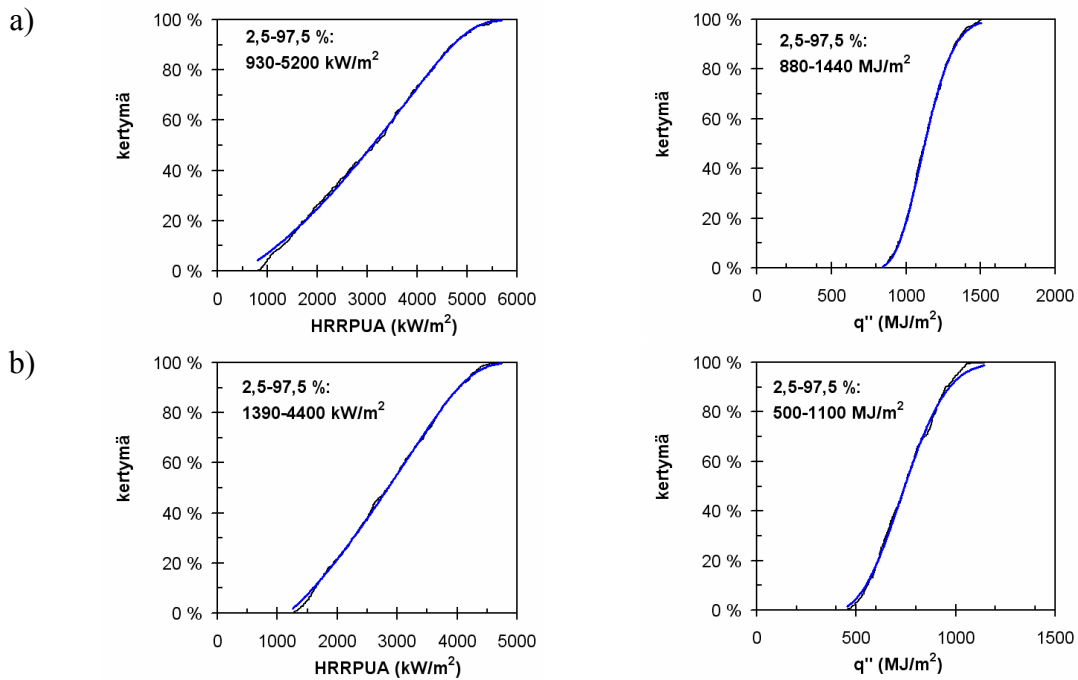
- nojatuolin yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 10–15 % ja palokuorman tiheys noin 10 % olohuoneen vastaavasta arvosta
- kahden istuttavan sohvan yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 20 % ja palokuorman tiheys noin 10 % olohuoneen vastaavasta arvosta
- kolmen istuttavan sohvan yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 30–35 % ja palokuorman tiheys noin 15–20 % olohuoneen vastaavasta arvosta
- kolmen istuttavan sohvan ja kahden nojatuolin muodostaman ryhmän yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho on noin 60 % ja palokuorman tiheys noin 40–45 % olohuoneen vastaavasta arvosta.



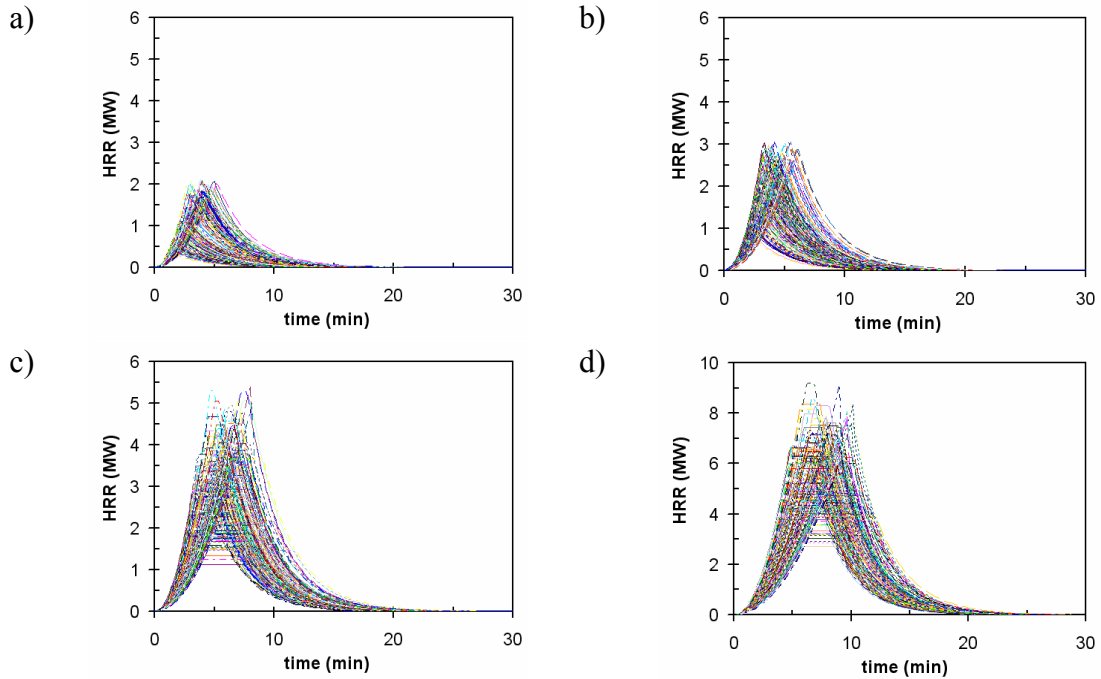
*Kuva 47. NISTin tutkimuksessa [Babrauskas ym. 1982] tutkitut
a) nojatuoli ja b) kahden istuttava sohva.*



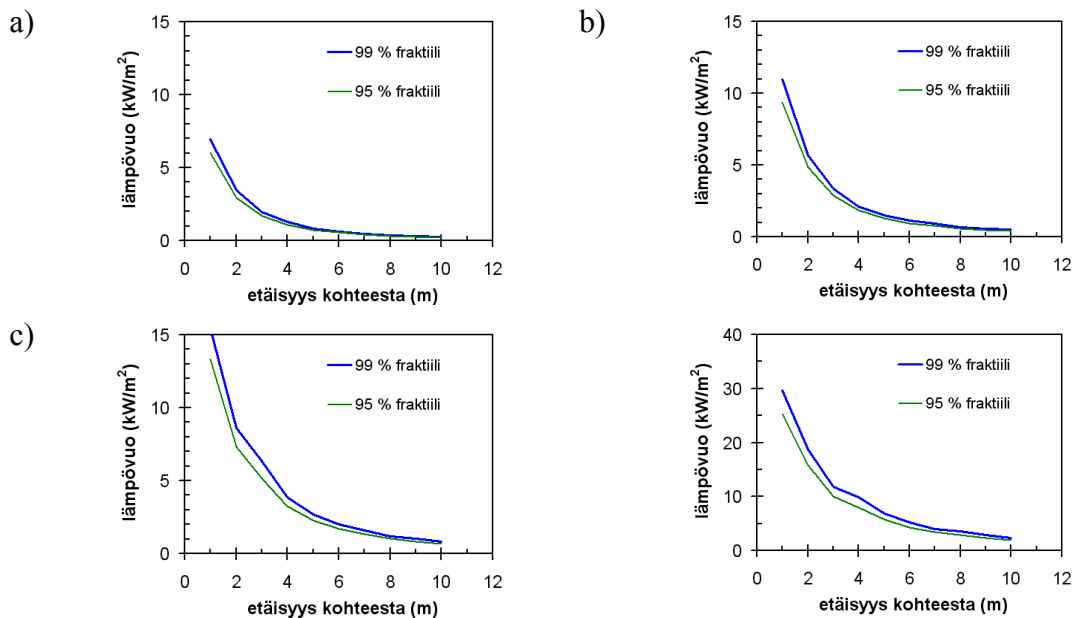
Kuva 48. NISTin tutkimuksessa [Babrauskas ym. 1982] tutkittujen tuotteiden palotehon kuvaajat: a) nojatuli ja b) kahden istuttava sohva. Yhtenäinen paksu viiva esittää palotehon kuvaajan mallintamista t^2 -funktio muodolla.



Kuva 49. NISTin tutkimuksessa [Babrauskas ym. 1982] tutkittujen tuotteiden palamisen analysoinnin tuloksia esitettynä yksikköpinta-alla kohden vapautuvana palotehona (vasemmalla) ja palokuorman tiheytenä (oikealla): a) nojatuli ja b) kahden istuttava sohva.



Kuva 50. NISTin tutkimuksessa [Babrauskas ym. 1982] tutkittujen tuotteiden palotehon t^2 -muotoisen mallin stokastinen soveltaminen käyttäen palotehon maksimiarvon ja palamisessa vapautuvan energian määrille ko. tutkimuksessa esitettyjä tuotteittain vaihtelevia arvoja: a) nojatuli, b) kahden istuttava sohva, c) kolmen istuttava sohva ja d) kolmen istuttava sohva sekä kaksi nojatuolia. Huom. kuvassa d pystyakseli poikkeaa muiden kuvien pystyakselista.



Kuva 51. Ulkona palavien pehmustettujen huonekalujen synnyttämän lämpövuon riippuvuus etäisyydestä: a) nojatuli, b) kahden istuttava sohva, c) kolmen istuttava sohva ja d) kolmen istuttava sohva sekä kaksi nojatuolia. Huom. kuvassa d pystyakseli poikkeaa muiden kuvien pystyakselista.

Taulukko 14. Ulkona palavien pehmustettujen huonekalujen ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä: lämpövuonon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

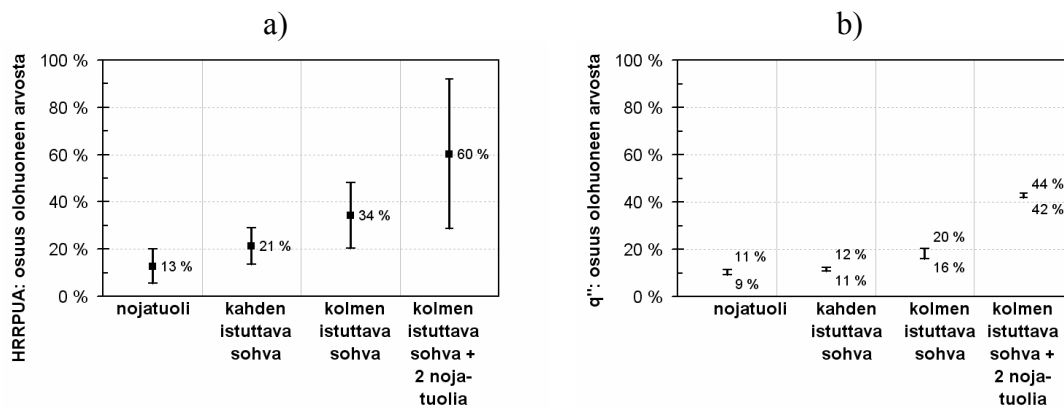
Nojatuoli						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.66	3.37	0.96	3.90	6.05	6.95
2 m	2.47	1.65	0.40	1.82	2.96	3.45
3 m	2.55	0.98	0.18	1.03	1.70	1.97
4 m	2.38	0.61	0.10	0.62	1.07	1.26
5 m	2.82	0.48	0.01	0.43	0.72	0.84
6 m	2.56	0.34	0.03	0.32	0.55	0.64
7 m	2.65	0.27	0.001	0.24	0.41	0.48
8 m	2.33	0.18	0.027	0.18	0.32	0.38
9 m	2.52	0.15	0.015	0.15	0.25	0.30
10 m	2.37	0.13	0.010	0.12	0.21	0.25
Kahden istuttava sohva						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	1.89	3.40	3.32	6.13	9.40	10.95
2 m	1.79	1.69	1.70	3.08	4.83	5.68
3 m	2.23	1.36	0.66	1.82	2.89	3.37
4 m	2.46	0.96	0.33	1.16	1.84	2.12
5 m	2.32	0.65	0.26	0.81	1.30	1.51
6 m	2.01	0.42	0.22	0.57	0.94	1.12
7 m	1.92	0.33	0.176	0.45	0.76	0.90
8 m	1.80	0.23	0.156	0.34	0.58	0.69
9 m	1.77	0.19	0.133	0.29	0.49	0.58
10 m	1.79	0.17	0.103	0.24	0.41	0.49
Kolmen istuttava sohva						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	1.94	4.85	4.84	8.86	13.38	15.49
2 m	1.80	2.60	2.52	4.64	7.31	8.60
3 m	1.46	1.65	1.64	2.93	5.13	6.32
4 m	1.66	1.14	1.04	1.95	3.24	3.89
5 m	1.88	0.92	0.64	1.39	2.28	2.70
6 m	1.90	0.70	0.44	1.02	1.69	2.00
7 m	1.61	0.47	0.390	0.77	1.32	1.61
8 m	2.03	0.45	0.250	0.63	1.02	1.20
9 m	1.88	0.35	0.218	0.51	0.85	1.01
10 m	1.59	0.23	0.213	0.40	0.67	0.82

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 15. Ulkona palavien pehmustettujen huonekalujen ryhmän ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Kolmen istuttava sohva ja kaksi nojatuolia						
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	1.78	8.80	8.96	16.13	25.23	29.67
2 m	1.74	5.51	5.40	9.87	15.76	18.66
3 m	1.79	3.54	3.49	6.38	10.03	11.80
4 m	1.34	2.22	2.90	4.58	7.94	9.85
5 m	1.73	2.09	1.76	3.45	5.71	6.83
6 m	1.67	1.53	1.35	2.58	4.30	5.17
7 m	1.70	1.20	1.080	2.05	3.37	4.04
8 m	1.52	0.96	0.911	1.67	2.89	3.53
9 m	1.51	0.81	0.709	1.34	2.38	2.93
10 m	1.55	0.64	0.598	1.10	1.89	2.30

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$



Kuva 52. Ulkona palavien pehmustettujen huonekalujen tulipalon voimakkuutta kuvaavien suureiden vertaaminen olohuoneen vastaaviin arvioihin, kun ulkona olevan kalustetun alueen pinta-ala on 10 m²: a) yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho ja b) palokuorman tiheys.

8.3 Muista rakennuksista ja rakennelmista kuin asuin-kohteista alkavat palot

Muihin kuin asuntoihin ja autokatosrakennelmiin liittyvistä tiiviin ja matalan rakentamistavan tyypillisen pihapiirin palolähteistä voimakkain on jätekatoksen palo sen tyypillisesti suuren palokuorman ja mahdollisesti voimakkaan palavuuden vuoksi.

Muiden pihan rakennelmien palaminen on jätekatoksia vähäisempää: ne voidaan palokäyttötymisensä perusteella jakaa vielä kahteen luokkaan:

- rakennelmat, jotka muodostavat suljetun tilan ja joissa palo voi lieskahtaa,
- muut rakennelmat, jotka eivät muodosta suljettua tilaa, kuten aidat, yms.

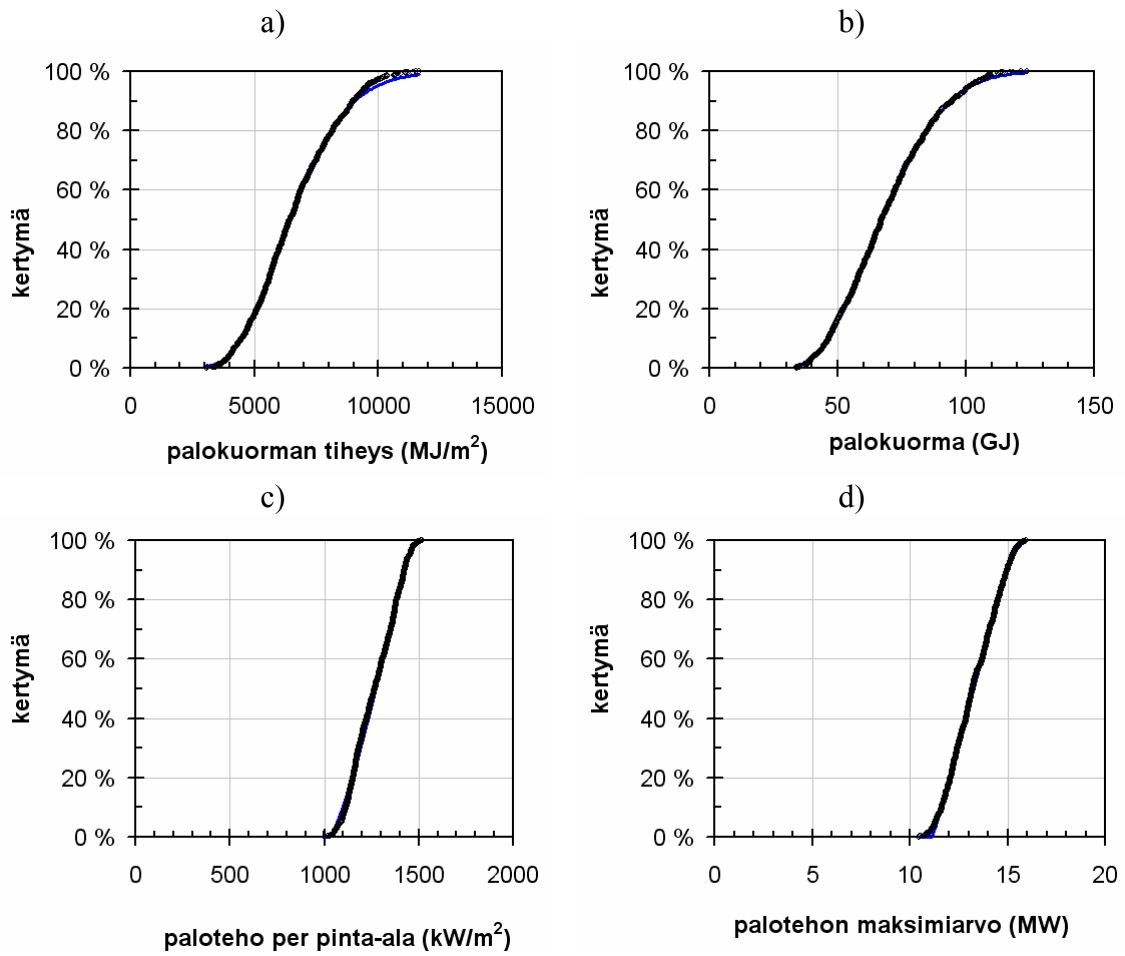
Palavien katosmaisten rakennelmien ympäristöönsä lämpösäteily lasketaan käyttäen liitteessä C esitettyä mallia.

8.3.1 Jätteiden keräyskatoksen palo

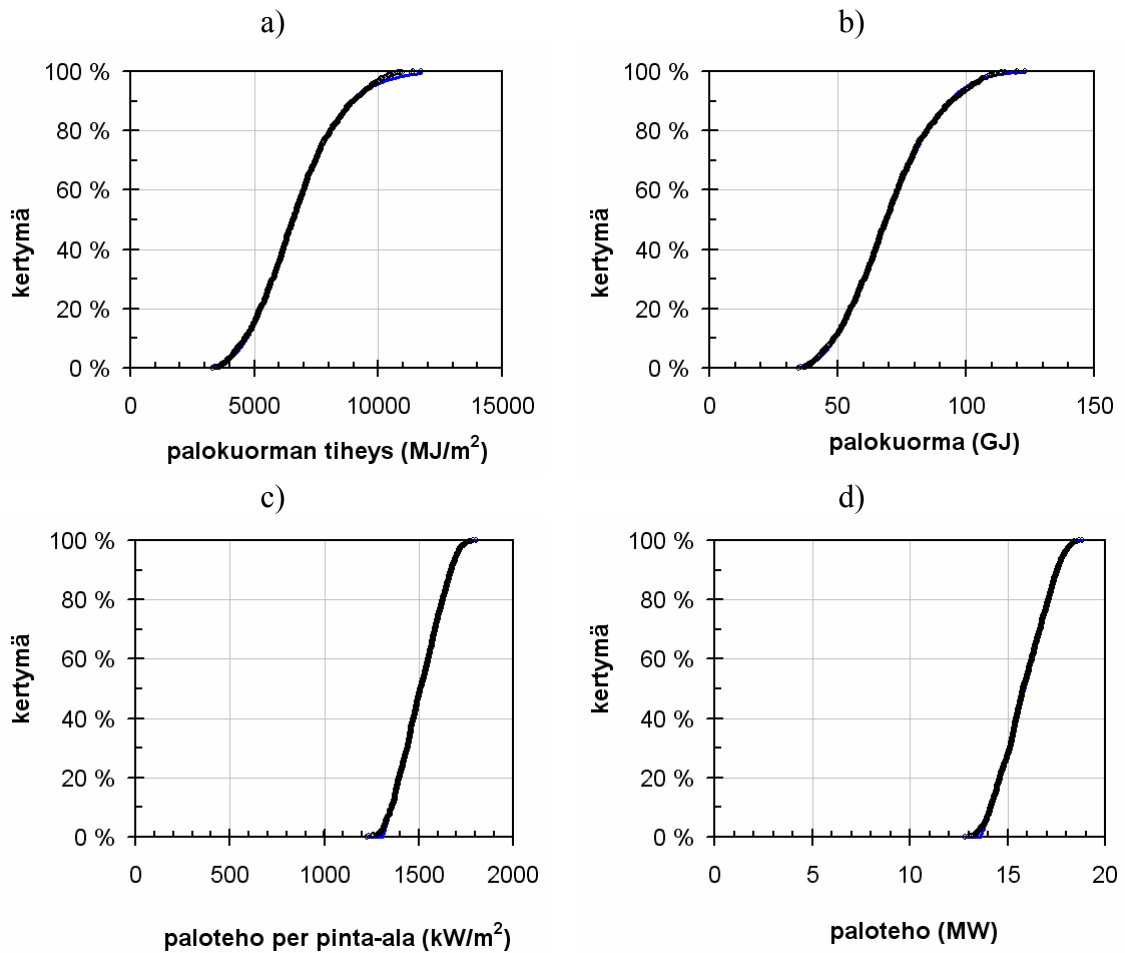
Eri alueilla olevat katokset vaihtelevat kooltaan ja muilta ominaisuuksiltaan. Siksi luonteva niiden paloa kuvaava malli on stokastinen eli malli, joka ottaa huomion vaihtelevuuden. Liitteessä C esitetään yksityiskohtaisesti tällaisen mallin johtaminen ja tässä esitetään palotehoa, palokuorman määrää ja palon ajallista kestoa koskevat tulokset sekä näiden tulosten perusteella arvioitu jätekatoksen palon ympäristöönsä aiheuttama lämpösäteily, suoran liekkikontaktin mahdollisuus ja kipinöiden syntyminen ja leviäminen.

8.3.1.1 Jätteiden keräyskatoksen palon voimakkuus ja ajallinen kesto: neljän astian katos

Tyypillisen, neljä jätteastiaa käsittävän jätteiden keräyskatoksen palokuorma määrää ja palamisessa vapautuvan palotehoa koskevat tulokset esitetään kuvassa 53 (katoksen katto ei osallistu paloon) ja kuvassa 54 (katoksen katto ei osallistu paloon) sekä taulukossa 16 (katoksen katto ei osallistu paloon) ja taulukossa 17 (katoksen katto ei osallistu paloon). Palamisen kestoaikaa voidaan arvioida jakamalla täyden palamisen vaiheessa vapautuva lämpöenergian määrä, noin 60–80 % koko palokuormasta, palotehon maksimi-arvolla. Palon alkukehitystä kuvataan mallilla $(t/t_g)^2$, missä t on aika ja $t_g = 60, \dots, 90$ s on kasvuaikatekijä (erittäin nopeasti kasvava palo, jonka kasvuaikatekijä on $75 \text{ s} \pm 20 \%$).



Kuva 53. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio 4 jäteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto ei osallistu paloon: a) palokuorman tiheys, b) palokuorma, c) palotehon maksimiarvon tiheys, d) palotehon maksimiarvo e) palon ajallinen kesto.



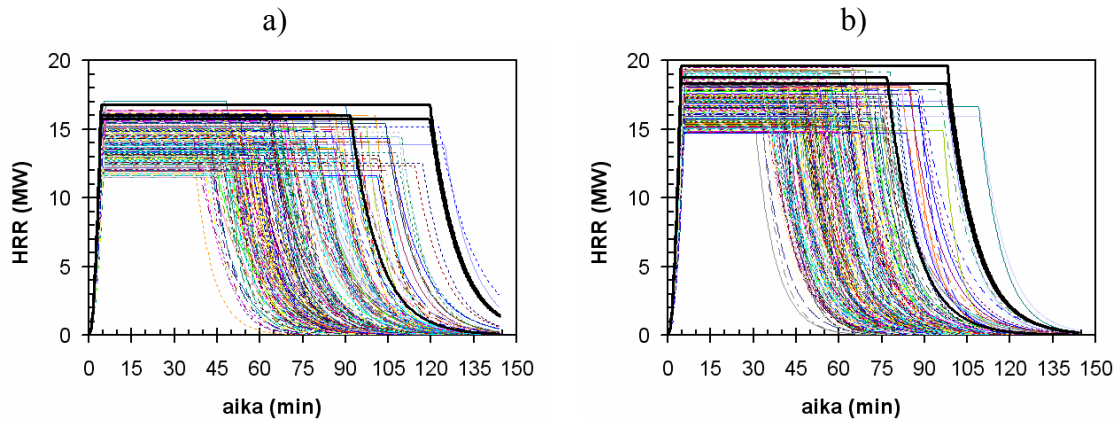
Kuva 54. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio 4 jäteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto osallistuu paloon kuten puumateriaali: a) palokuorman tiheys, b) palokuorma, c) palotehon maksimiarvon tiheys, d) palotehon maksimiarvo e) palon ajallinen kesto.

Taulukko 16. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio neljän jäteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto ei osallistu paloon: palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja.

Suure	Jakauma	Jakauman parametrit ja tunnuslukuja
palokuorman tiheys	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrisen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 8,9$ $\beta = 632 \text{ MJ/m}^2$ $x_{\min} = 448 \text{ MJ/m}^2$ $p = 1,48$ mediaani: 6 500 MJ/m ² 80 %: 8 090 MJ/m ² 99 %: 11 800 MJ/m ²
palokuorma	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrisen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 31,3$ $\beta = 2,3 \text{ GJ}$ $x_{\min} = 27 \text{ GJ/}$ $p = 0,11$ mediaani: 67 GJ 80 %: 85 GJ 99 %: 116 GJ
palotehon maksimi-arvon tiheys	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 9,0$ $\beta = 420 \text{ kW/m}^2$ $x_{\min} = 1 025 \text{ kW/m}^2$ $p = 0,14$ mediaani: 1 270 kW/m ² 80 %: 1 380 kW/m ² 99 %: 1 490 kW/m ²
palotehon maksimiarvo	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 7,8$ $\beta = 4,1 \text{ kW}$ $x_{\min} = 11,1 \text{ kW}$ $p = 0,14$ mediaani: 13,3 kW 80 %: 14,5 kW 99 %: 15,8 kW

Taulukko 17. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio neljän jätteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto osallistuu paloon: palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja.

Suure	Jakauma	Jakauman parametrit ja tunnuslukuja
palokuorman tiheys	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrisen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 10,3$ $\beta = 553 \text{ MJ/m}^2$ $x_{\min} = 450 \text{ MJ/m}^2$ $p = 1,48$ mediaani: 6 600 MJ/m ² 80 %: 8 090 MJ/m ² 99 %: 11 800 MJ/m ²
palokuorma	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrisen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 37,6$ $\beta = 1,8 \text{ GJ}$ $x_{\min} = 27 \text{ GJ/}$ $p = 0,11$ mediaani: 69 GJ 80 %: 85 GJ 99 %: 116 GJ
palotehon maksimi-arvon tiheys	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 7,6$ $\beta = 384 \text{ kW/m}^2$ $x_{\min} = 1 307 \text{ kW/m}^2$ $p = 0,14$ mediaani: 1 510 kW/m ² 80 %: 1 630 kW/m ² 99 %: 1 750 kW/m ²
palotehon maksimiarvo	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 8,3$ $\beta = 4,2 \text{ kW}$ $x_{\min} = 13,6 \text{ kW}$ $p = 0,14$ mediaani: 15,9 kW 80 %: 17,1 kW 99 %: 18,3 kW

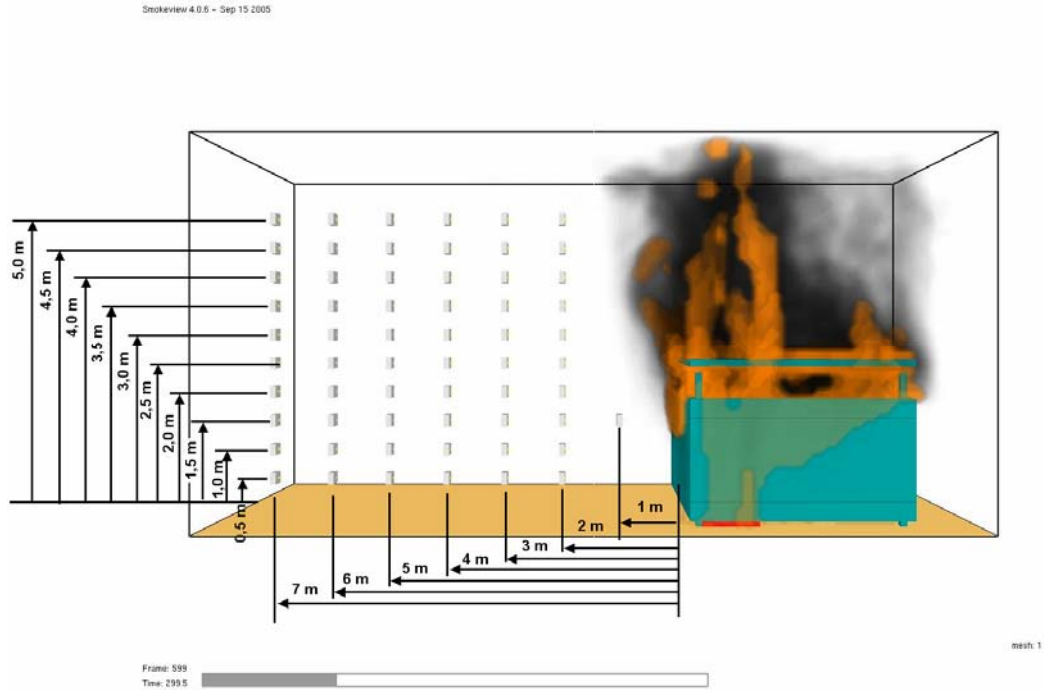


Kuva 55. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ajallinen kehitys, kun katoksen katto a) ei osallistu paloon ja b) osallistuu paloon. Ohuet käyrät kuvaavat Monte Carlo -otosta ja korostetut käyrät syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen laskettuja tuloksia. Kasvuaikatekijälle käytetyt fraktiilit on 10 %, 5 % ja 1 %.

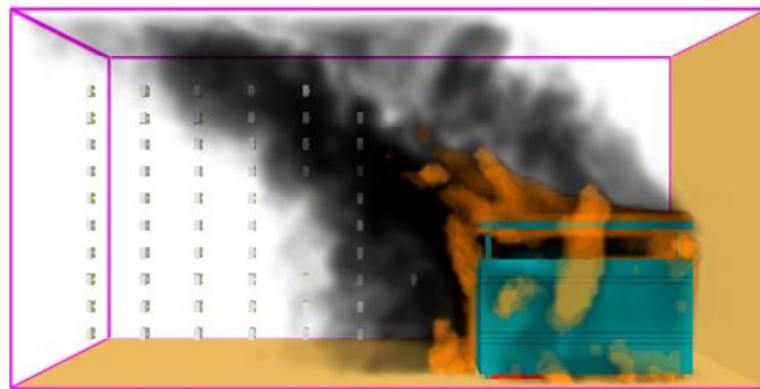
8.3.1.2 Jätekatoksen palon aiheuttama lämpösäteily: neljän astian katos

Katoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpösäteily määrittäminen tehdään kuvissa 56 ja 57 esitetyillä järjestelyillä. Deterministinen tarkastelu (Kuva 56) käsittää kaksi tuuliolosuhdetta: tyynen tilanteen ja tilanteen, jossa tuulen nopeus maan pinnalla on 5 m/s. Lämpösäteilyn voimakkuus määritetään kuvassa esitetyllä virtuaalisten lämpövuointurien hilalla. Näin saadaan selville tiettyä palotehoa ja palon kestoa vastaavat lämpösäteilyn voimakkuudet eri etäisyyksillä ja korkeuksilla. Yleistetty, stokastinen kuva määritetään käyttäen yksinkertaistettua lämpösäteilyn suuruuden laskentamallia (Kuva), jonka tulokset kalibroidaan käyttäen deterministisellä mallilla saatuja tuloksia.

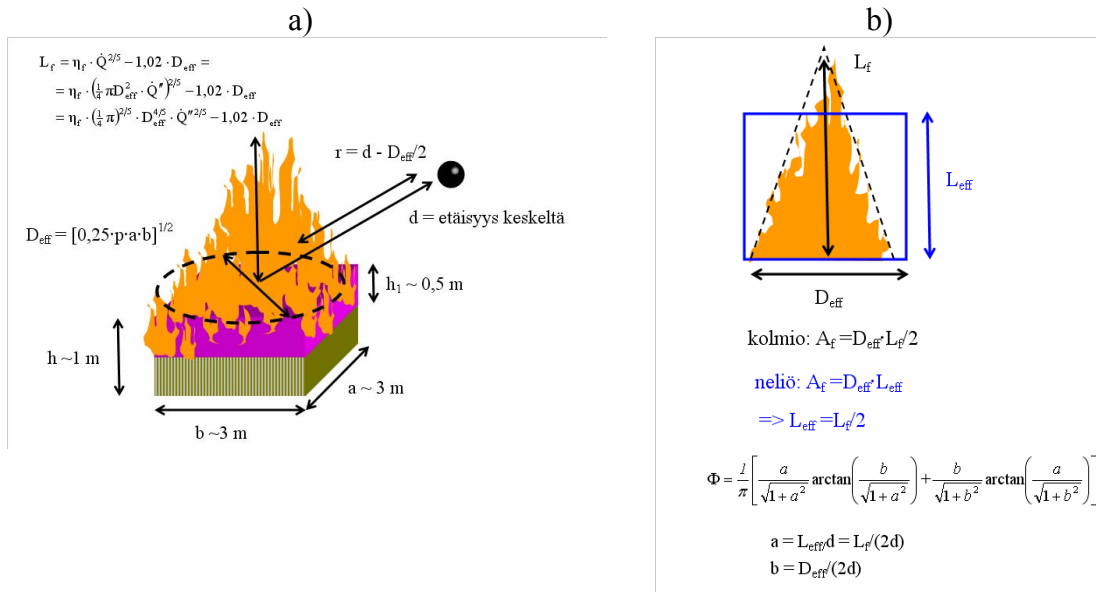
a)



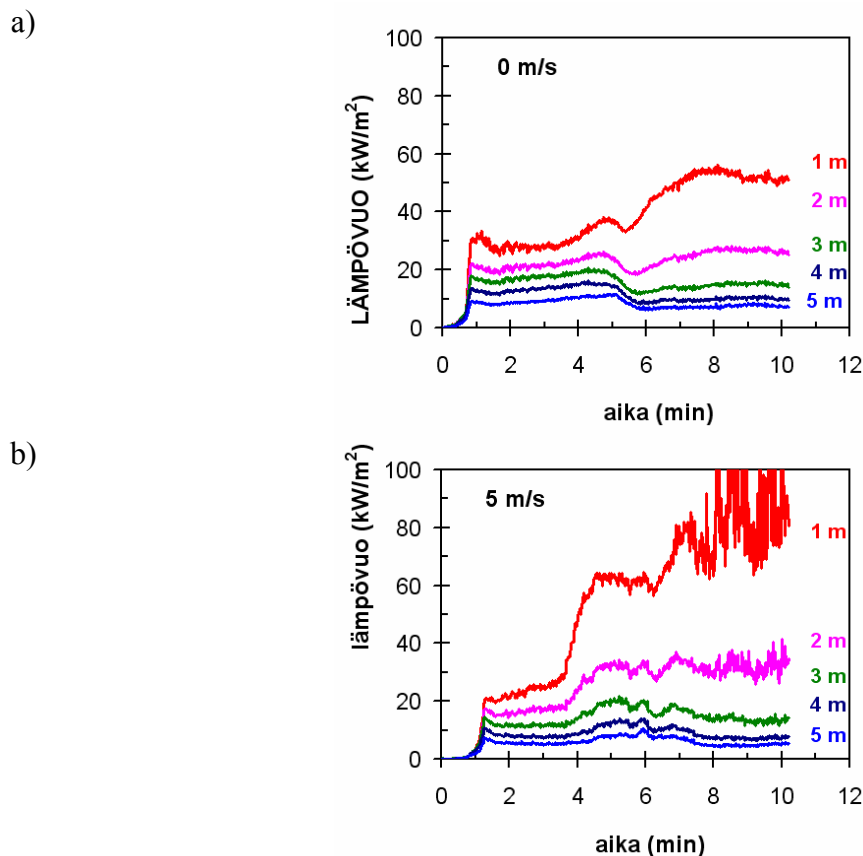
b)



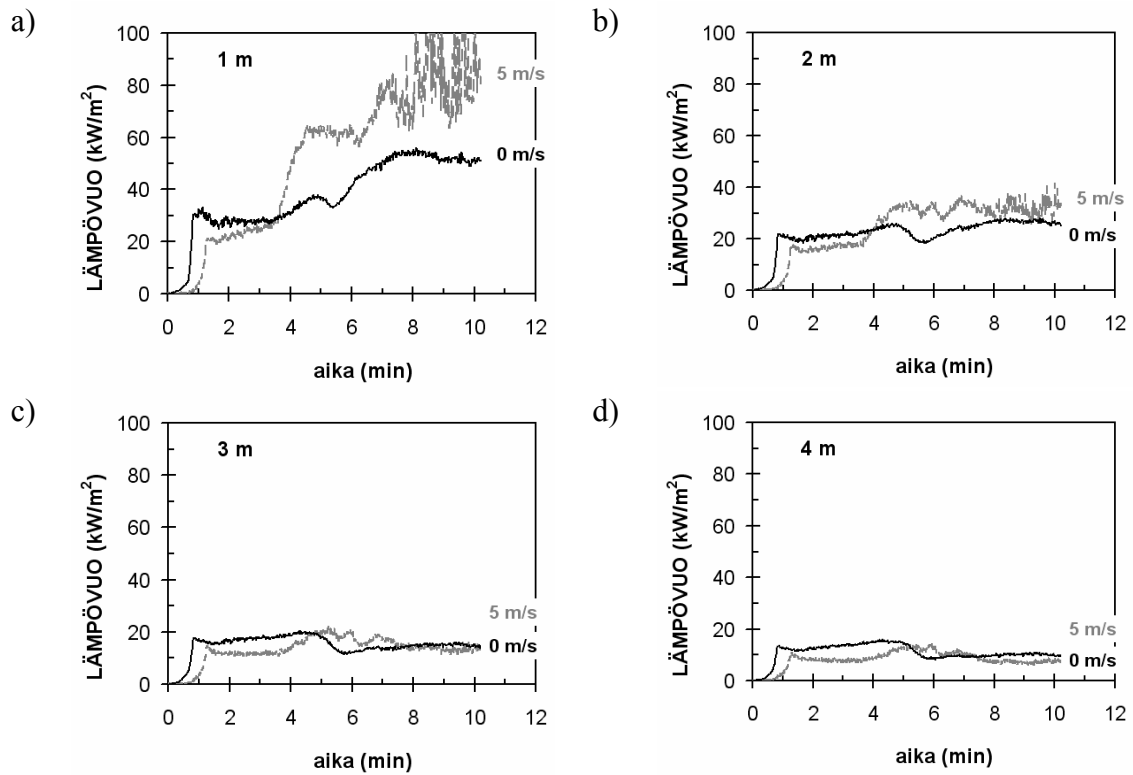
Kuva 56. Jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen deterministinen laskenta FDS4-ohjelmalla: a) ei tuulta ja b) tuulen nopeus 5 m/s. Mitat osoittavat virtuaalisten lämpövuotantureiden sijainnin.



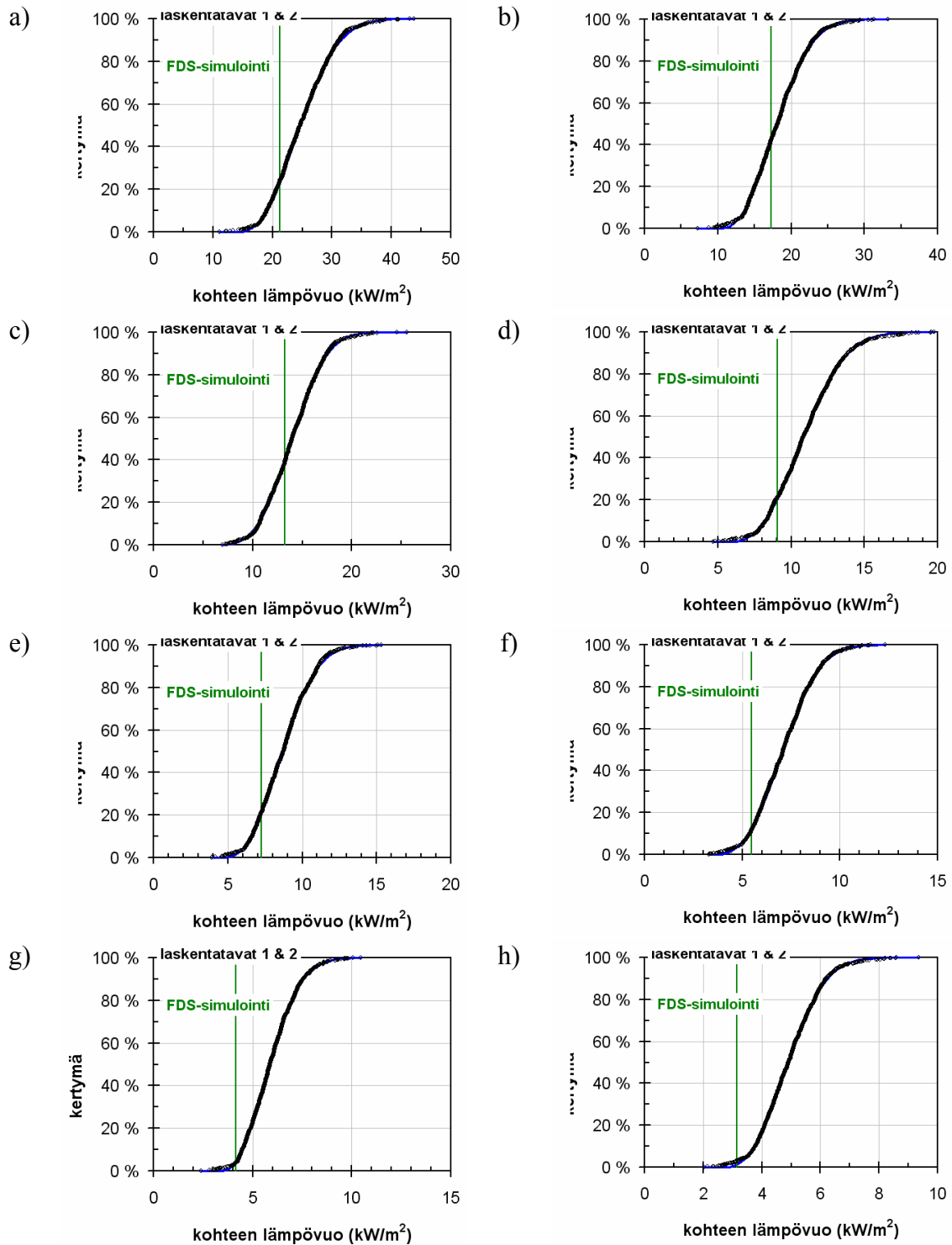
Kuva 57. Jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen stokastisen laskennan malli: a) mallin yleiskuvaus ja b) liekin käsittely lämpösäteilyä lähettävänä pintana.



Kuva 58. Jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen ajallinen kehitys eri etäisyyksillä katoksesta, deterministinen tarkastelu, esimerkki 1,5 m:n korkeudella määritetyistä arvoista: a) ei tuulta ja b) tuulen nopeus 5 m/s.



Kuva 59. Jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen ajallinen kehitys eri etäisyyksillä katoksesta, deterministinen tarkastelu, esimerkki 1,5 m:n korkeudella määritetyistä arvoista: a) ei tuulta ja b) tuulen nopeus 5 m/s.



Kuva 60. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä: a) 2 m, b) 3 m, c) 4 m, d) 5 m, e) 6 m, f) 7 m, g) 8 m ja h) 9 m. Katoksen katto osallistuu paloon palaen puumateriaalin tavoin. Pystyviivat osoittavat vastaavan deterministisen simulointilaskennan tuloksen.

Taulukko 18. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto ei osallistu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

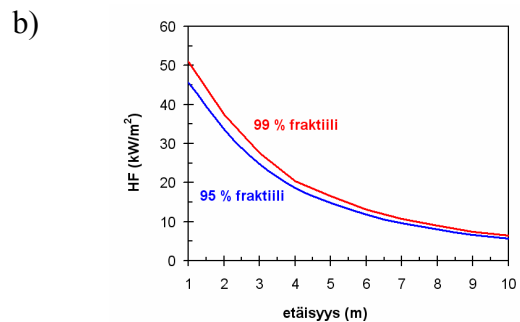
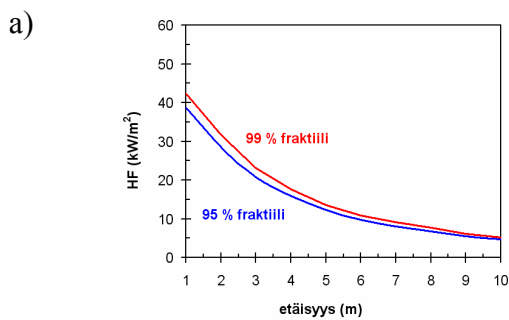
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	3.4	19.6	11.6	29.2	38.7	42.3
2 m	2.5	11.1	11.2	20.8	28.4	31.7
3 m	2.8	9.4	7.1	15.3	20.8	23.1
4 m	2.6	6.7	5.7	11.5	15.9	17.7
5 m	3.3	6.3	3.4	9.1	12.2	13.5
6 m	3.1	4.8	3.0	7.2	9.8	10.9
7 m	2.3	3.0	3.2	5.8	8.1	9.1
8 m	2.1	2.5	2.7	4.7	6.8	7.7
9 m	2.7	2.5	1.9	4.0	5.6	6.2
10 m	2.8	2.1	1.6	3.4	4.7	5.2

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 19. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto osallistuu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.3	16.1	19.6	33.3	45.6	51.0
2 m	2.4	12.1	14.3	24.7	33.6	37.5
3 m	2.4	9.1	10.3	18.1	24.7	27.6
4 m	3.2	8.7	6.3	14.0	18.6	20.4
5 m	2.5	5.8	5.8	10.9	14.8	16.5
6 m	2.5	4.7	4.7	8.7	11.8	13.2
7 m	2.7	4.0	3.6	7.1	9.7	10.7
8 m	2.3	2.9	3.4	5.9	8.1	9.0
9 m	2.5	2.5	2.7	4.9	6.7	7.4
10 m	2.3	2.0	2.5	4.2	5.7	6.4

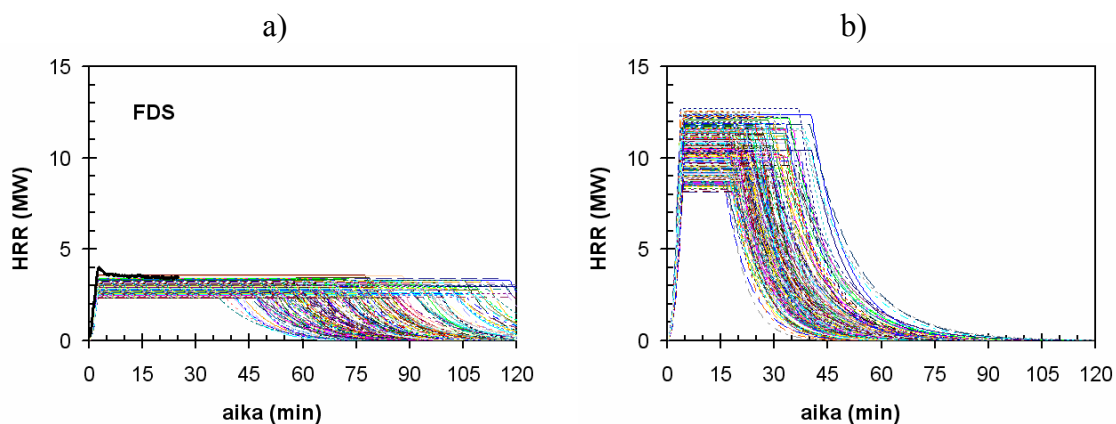
a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$



Kuva 61. Jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen riippuvuus etäisyydestä: a) katoksen katto ei osallistu paloon ja b) katoksen katto osallistuu paloon.

8.3.1.3 Jätteiden keräyskatoksen palo: yhden astian katos

Pienempi, yhden jäteastian katos voidaan käsitellä samalla tavalla kuin neljän astian katos. Katoksen pinta-alan oletetaan olevan $1,8 \text{ m}^2$. Tulokset esitetään alla olevissa kuvissa ja taulukoissa.



Kuva 62. Yhden (1) jäteastian jätekatoksen palon ajallinen kehitys, kun katoksen katto a) ei osallistu paloon ja b) osallistuu paloon. Ohuet käyrät kuvaavat Monte Carlo -otosta ja korostetut käyrät syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen laskettuja tuloksia. Kasvuaikekiäjälle käytetyt fraktiilit on 10 %, 5 % ja 1 %.

Taulukko 20. Yhden (1) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto ei osallistu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

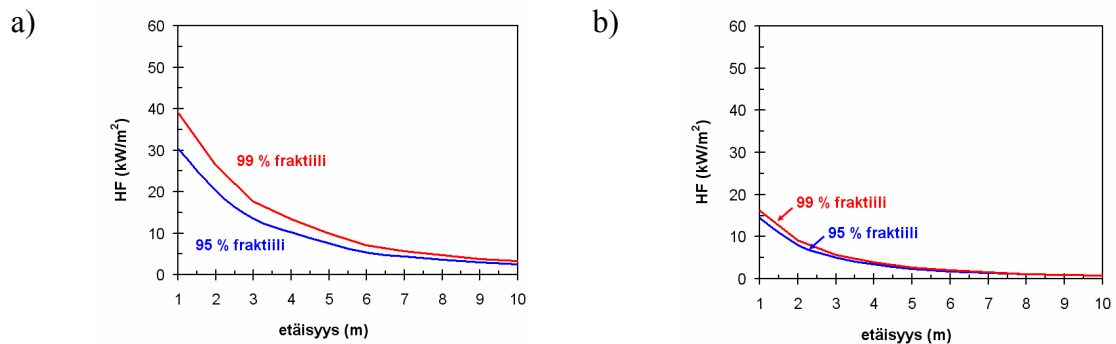
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.23	5.14	6.06	10.42	14.47	16.25
2 m	2.23	2.85	3.42	5.84	8.09	9.08
3 m	2.33	1.88	1.99	3.59	5.00	5.61
4 m	2.06	1.18	1.40	2.39	3.41	3.88
5 m	2.20	0.87	0.97	1.70	2.39	2.70
6 m	2.06	0.62	0.73	1.24	1.77	2.02
7 m	2.11	0.45	0.58	0.97	1.35	1.52
8 m	2.68	0.44	0.38	0.77	1.05	1.17
9 m	2.11	0.30	0.36	0.61	0.87	0.99
10 m	2.38	0.27	0.29	0.52	0.71	0.80

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 21. Yhden (1) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto osallistuu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	1.27	9.19	8.54	15.43	30.33	39.11
2 m	1.21	5.92	5.43	9.81	20.10	26.36
3 m	1.25	4.18	3.54	6.66	13.57	17.68
4 m	1.20	3.03	2.63	4.87	10.17	13.41
5 m	1.20	2.23	1.95	3.60	7.50	9.88
6 m	1.23	1.59	1.54	2.72	5.43	7.06
7 m	1.22	1.29	1.19	2.14	4.36	5.69
8 m	1.15	1.00	0.97	1.70	3.55	4.72
9 m	1.31	0.96	0.77	1.49	2.99	3.85
10 m	1.22	0.74	0.67	1.21	2.49	3.25

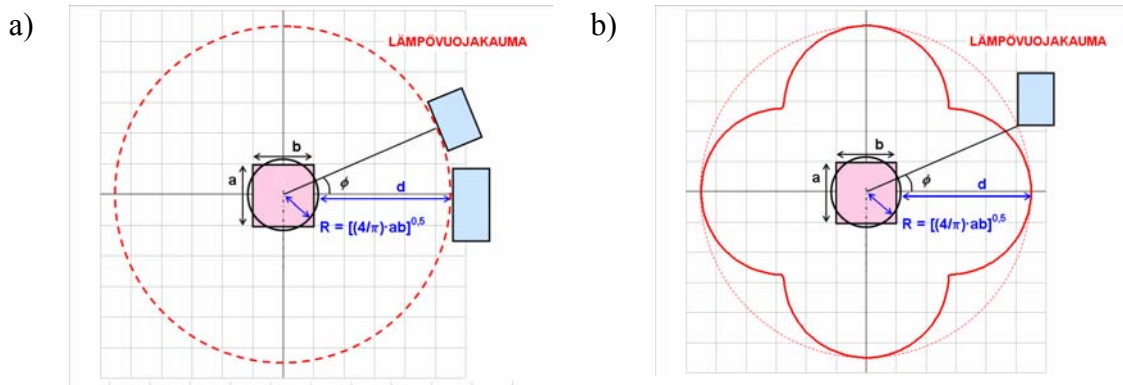
a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$



Kuva 63. Jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen riippuvuus etäisyydestä: a) katoksen katto ei osallistu paloon ja b) katoksen katto osallistuu paloon.

8.3.1.4 Suunnan vaikutus

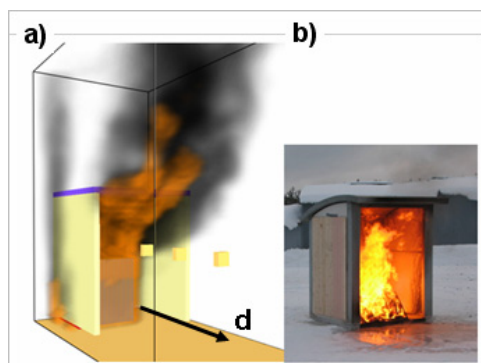
Lämpösäteily on suurimmillaan, kun uhatun kohteen pinnan normaali on katoksen ja uhatun kohteen yhdistysjanan suuntainen (Kuva a). Uhatun kohteen vastaanottama säteilyn määrä vähenee, kun uhatun kohteen paikka siirtyy siten, että sen lähin piste ja säteilylähteen keskikohta muodostavat nollasta poikkeavan kulman ϕ (Kuva b).



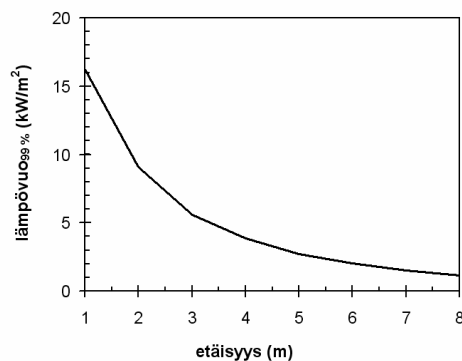
Kuva 64. Suunnan vaikutus katoksen palossa ympäröiviin kohteisiin kohdistuvaan lämpövuohon.

8.3.1.5 Jätteiden keräyskatoksen palo: palokestävä yhden astian katos

Suomessa on kehitetty myös yhden astian jätekatostyyppi, jonka seinät ja katto kestävät romahtamatta tai palamatta puhki tyypillisen yhden jäteastian palon (Kuva). Tällaisen synnyttämä lämpövuoto esitetään kuvassa 66.



Kuva 65. Palokestävän yhden astian jätekatoksen palaminen: a) FDS-malli ja b) kuva Pelastusopistolla tehdystä polttokokeesta.



Kuva 66. Palokestävän yhden astian jätekatoksen palamisen synnyttämä lämpövuoto: suoraan eteenpäin suuntautuvan lämpövuon riippuvuus etäisyydestä.

8.3.2 Muiden suljettujen piharakennelmien palot

8.3.2.1 Muiden katosmaisten rakennelmien palon voimakkuus ja ajallinen kehitys

Muiden katosmaisten rakennelmien palon voimakkuus ja ajallinen kehitys mallinetaan samalla tavalla kuin jätekatoksen palaminen, mutta tässä tapauksessa:

- palokuorman ja palotehon maksimin tiheys ovat pienempiä; tämän suhteen tarkastellaan kahta tapausta:
 - toinen, jossa katoksessa olevan irtaimen palokuorman määrä on vähäinen,
 - toinen, jossa irtaimen palokuorman määrä on kohtalainen (tätä tilannetta on katoksen sisällä olevan yksittäisen kohteen palamisella, jonka maksimipaloteho on 500 kW).
- palon kehittyä hieman hitaammin, kasvuaikatekijällä 110 s (± 20 s).
- mallia kehitettäessä katoksen koon annettiin vaihdella välillä 9 m² (3 m \times 3 m) – 32 m² (4 m \times 8 m).

Tulokset esitetään taulukoissa 22–25 ja kuvassa 67.

Taulukko 22. Vähän palokuormaa sisältävän katoksen palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja. Katoksen katto ei osallistu paloon.

Suure	Jakauma	α	β	x_{\min}	Mediaani	95 %	99 %
palokuorman tiheys (MJ/m ²)	gammajakauma	8.5	17.8	165.6	312.2	412.7	464.8
palokuorma (GJ)	gammajakauma	8.4	0.48	2.0	5.9	8.5	9.9
maksimipalotehon tiheys (kW/m ²)	Weibull-jakauma	2.4	194.1	385.4	552.1	691.7	751.6
palon tehollinen halkaisija (m)	Weibull-jakauma	2.9	6.4	4.6	10.3	14.0	15.5
maksimipaloteho (MW)	Weibull-jakauma	5.0	2.8	1.3	3.9	4.8	5.1
palon ajallinen kesto (min)	Weibull-jakauma	1.8	5.9	4.9	9.7	15.9	19.0

Taulukko 23. Kohtalaisesti palokuormaa sisältävän katoksen palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja. Katoksen katto ei osallistu paloon.

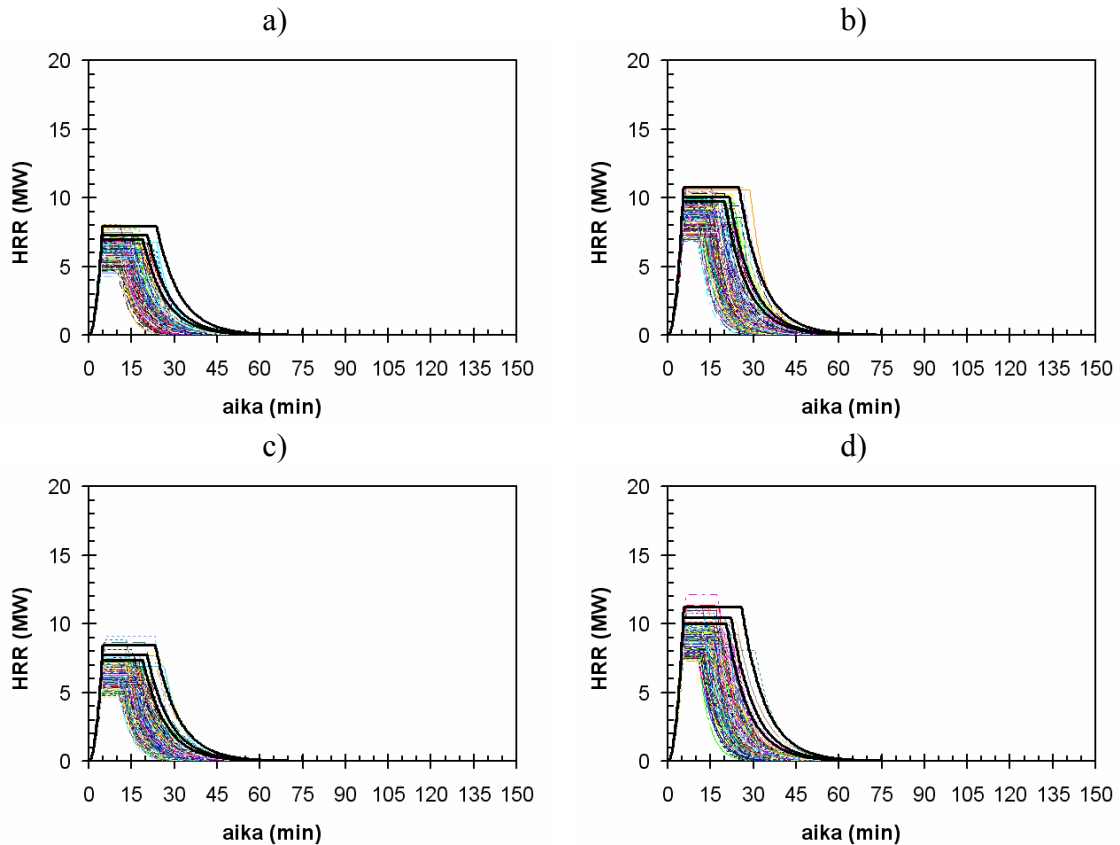
Suure	Jakauma	α	β	x_{\min}	Mediaani	95 %	99 %
palokuorman tiheys (MJ/m ²)	gammajakauma	8.8	23.0	151.0	345.3	476.5	544.2
palokuorma (GJ)	gammajakauma	14.1	0.38	1.2	6.4	9.1	10.4
maksimipalotehon tiheys (kW/m ²)	Weibull-jakauma	2.2	187.8	419.3	577.7	732.0	801.2
palon tehollinen halkaisija (m)	Weibull-jakauma	2.4	5.3	6.2	10.8	14.6	16.3
maksimipaloteho (MW)	Weibull-jakauma	3.6	2.2	1.9	3.8	4.8	5.2
palon ajallinen kesto (min)	Weibull-jakauma	1.9	6.1	5.0	10.0	15.7	18.4

Taulukko 24. Vähän palokuormaa sisältävän katoksen palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja. Katoksen katto osallistuu paloon.

Suure	Jakauma	α	β	x_{\min}	Mediaani	95 %	99 %
palokuorman tiheys (MJ/m ²)	gammajakauma	25.8	12.9	130.9	459.6	578.6	635.1
palokuorma (GJ)	gammajakauma	13.7	0.63	0.0	8.5	12.9	15.1
maksimipalotehon tiheys (kW/m ²)	Weibull-jakauma	2.3	198.1	634.0	802.7	954.5	1 020.9
palon tehollinen halkaisija (m)	Weibull-jakauma	3.2	11.8	4.7	15.2	21.3	23.7
maksimipaloteho (MW)	Weibull-jakauma	5.0	2.9	1.2	3.9	4.8	5.1
palon ajallinen kesto (min)	Weibull-jakauma	1.8	6.5	4.2	9.5	16.2	19.5

Taulukko 25. Kohtalaisesti palokuormaa sisältävän katoksen palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja. Katoksen katto osallistuu paloon.

Suure	Jakauma	α	β	x_{\min}	Mediaani	95 %	99 %
palokuorman tiheys (MJ/m ²)	gammajakauma	19.9	15.9	177.1	488.4	618.9	682.0
palokuorma (GJ)	gammajakauma	11.0	0.68	1.9	9.1	13.4	15.5
maksimipalotehon tiheys (kW/m ²)	Weibull-jakauma	1.9	171.5	681.5	823.0	986.9	1 064.3
palon tehollinen halkaisija (m)	Weibull-jakauma	3.4	12.2	4.9	15.9	21.9	24.2
maksimipaloteho (MW)	Weibull-jakauma	5.0	2.9	1.2	3.9	4.8	5.1
palon ajallinen kesto (min)	Weibull-jakauma	1.7	6.4	4.7	9.9	16.8	20.2



Kuva 67. Pinta-alaltaan noin 10 m^2 suuruisen katoksen palon ajallinen kehitys, kun a) katoksen katto ei osallistu paloon ja palokuorma on vähäinen, b) katoksen katto osallistuu paloon ja palokuorma on vähäinen, c) katoksen katto ei osallistu paloon ja palokuorma on kohtalainen ja d) katoksen katto osallistuu paloon ja palokuorma on kohtalainen. Ohuet käyrät kuvaavat Monte Carlo -otosta ja korostetut käyrät syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen laskettuja tuloksia. Kasvuaike-tekijälle käytetyt fraktiilit on 10 %, 5 % ja 1 %.

8.3.2.2 Muiden katosmaisten rakennelmien palon aiheuttama lämpösäteily

Katoksen palo-ominaisuudet jaotellaan alla kvalitatiivisella jaolla ”vähän” tai ”kohtalaisesti” palokuormaa sisältäviin katoksiin. Vähäisenä palokuorman määränä voidaan pitää esim. grillikatoksen puisia penkkejä ja pöytää ja kohtalaisena varastona käytettävää tilaa, jossa voi olla muovisia esineitä.

Taulukko 26. Vähän palokuormaa sisältävän katoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto ei osallistu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	Mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.2	9.1	10.7	18.4	25.5	28.7
2 m	2.2	6.6	6.9	12.5	17.7	20.0
3 m	2.0	4.4	5.0	8.6	12.6	14.4
4 m	2.1	3.3	3.5	6.3	9.1	10.3
5 m	2.1	2.5	2.6	4.7	6.8	7.7
6 m	2.1	2.0	2.0	3.7	5.3	6.1
7 m	2.3	1.8	1.5	3.0	4.3	4.9
8 m	2.2	1.3	1.3	2.4	3.4	3.9

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 27. Kohtalaisesti palokuormaa sisältävän katoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto ei osallistu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	Mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.2	9.1	10.4	18.1	25.5	28.8
2 m	2.7	7.6	5.6	12.2	16.9	18.8
3 m	2.2	4.8	4.5	8.5	12.3	14.0
4 m	2.0	3.2	3.6	6.3	9.1	10.4
5 m	2.3	2.7	2.4	4.7	6.6	7.5
6 m	2.5	2.3	1.7	3.7	5.3	5.9

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 28. Vähän palokuormaa sisältävän katoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto osallistuu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	Mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	3.1	14.7	10.3	23.3	31.1	34.2
2 m	2.2	7.9	9.1	15.7	22.2	25.0
3 m	2.3	5.6	6.6	11.3	15.7	17.6
4 m	2.6	4.6	4.4	8.4	11.4	12.7
5 m	2.5	3.4	3.5	6.4	8.7	9.7
6 m	2.8	3.1	2.3	5.0	6.8	7.6
7 m	2.5	2.2	2.1	4.0	5.5	6.1
8 m	2.5	1.8	1.7	3.3	4.5	5.1

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 29. Kohtalaisesti palokuormaa sisältävän katoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto osallistuu paloon: lämpövuon jakauman^{a)} parametrit ja tunnuslukuja.

Etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	Mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.3	11.2	14.4	24.0	32.4	36.1
2 m	2.1	7.5	10.3	16.6	22.9	25.8
3 m	2.5	6.4	6.4	11.9	16.1	17.9
4 m	2.2	4.1	5.2	8.7	12.0	13.5
5 m	2.3	3.4	3.8	6.7	9.3	10.4
6 m	2.2	2.5	3.1	5.2	7.2	8.1
7 m	2.2	2.1	2.4	4.2	5.9	6.7
8 m	2.2	1.6	2.1	3.5	4.8	5.4

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

8.3.3 Yleinen malli katosten palon voimakkuuden arviointiin

Sunnittelussa jostain katoksesta helpoimmin määritettävissä oleva tekijä on palokuorman tiheys q'' (MJ/m²), joka lasketaan summalla kaikki rakenteissa ja irtaimessa tavassa oleva lämpöenergia määrä ja jakamalla se katoksen lattia-pinta-alalla A_{katos} (m²)

$$q'' = \frac{Q_{rakenteet} + Q_{irtaimisto}}{A_{katos}},$$

$$Q_{rakenteet} = \Delta H_{eff,rak} \cdot M_{rakenteet} \quad (17)$$

$$Q_{irtaimisto} = \Delta H_{eff,irt} \cdot M_{irtaimisto}$$

missä $\Delta H_{eff,rak}$ ja $\Delta H_{eff,irt}$ (MJ/kg) ovat rakenteiden ja irtaimiston materiaalien teholliset lämpöarvot sekä $M_{rakenteet}$ ja $M_{irtaimisto}$ ovat rakenteiden ja irtaimiston massat (kg). Palomitoituksessa tulee tietää paloteho ja edellä esitetyistä tuloksista voidaan johtaa malli, jolla voidaan arvioida katoksen paloteho sen palokuorman tiheyden perusteella. Kun tuloksia analysoidaan, havaitaan, että pinta-alayksikköä kohden vapautuvan palotehon maksimi-arvo \dot{Q}_{\max}'' riippuu palokuorman tiheydestä kuvissa 68a ja 68b esitetyllä tavalla. Matemaattisesti tämä riippuvuus voidaan ilmaista seuraavasti:

$$\dot{Q}''_{\max} = \begin{cases} \dot{Q}''_{wood} & q'' \leq q''_{\min} \\ \dot{Q}''_{peak} \cdot \frac{[(q'' - q''_{\min})/w]^p}{1 + [(q'' - q''_{\min})/w]^p} & q'' > q''_{\min} \end{cases} \quad (18)$$

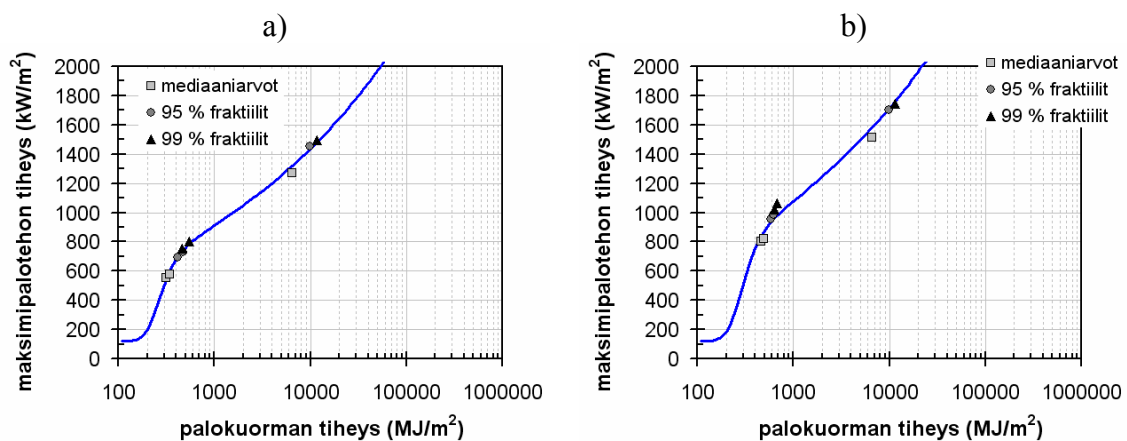
$$\dot{Q}''_{\max} = \begin{cases} \dot{Q}''_{wood} & q'' \leq q''_{\min} \\ \dot{Q}''_{peak} \cdot \frac{[(q'' - q''_{\min})/w]^r}{1 + [(q'' - q''_{\min})/w]^r} & q'' > q''_{\min} \end{cases}$$

missä

- $q''_{\min} = 100 \text{ MJ/m}^2$,
- $\dot{Q}''_{wood} = 120 \text{ kW/m}^2$ (puumateriaalille tyypillinen arvo)
- $p = 3,643$ ja $r = 3,432$,
- kun katoksen katto ei osallistu paloon: $\dot{Q}''_{peak} = 553 \text{ kW/m}^2$ ja $w = 163 \text{ MJ/m}^2$,
- kun katoksen katto osallistuu paloon: $\dot{Q}''_{peak} = 690 \text{ kW/m}^2$ ja $w = 187 \text{ MJ/m}^2$.

Kun pinta-alayksikköä kohden vapautuvan palotehon maksimiarvo \dot{Q}''_{\max} tunnetaan, voidaan katoksen paloteho laskea seuraavasti:

- jos katos on tyhjä, palotehon maksimiarvon arvio saadaan kertomalla suure \dot{Q}''_{wood} paloon osallistumaan pystyvän puumateriaalin kokonaispinta-alalla (ml. seinät ja katto),
- jos katoksessa irtainta palokuormaa, palotehon maksimiarvon arvio saadaan kertomalla suure \dot{Q}''_{\max} katoksen lattiapinta-alalla.



Kuva 68. Pinta-alaa kohden vapautuvan palotehon maksimiarvon riippuvuus katoksen palokuorman tiheydestä, kun a) katoksen katto ei osallistu paloon ja b) kun katoksen katto osallistuu paloon.

8.3.4 Aitojen ja muiden ei-suljettujen kohteiden palot

8.3.4.1 Palamisen ja syntyvän lämpövuon malli

Puiset aidat ja muut ei-suljetut kohteet (joita seuraavassa käsittelyssä kutsutaan lyhyiden vuoksi ”aidoiksi”) voivat syttyä palaa vaaraa aiheuttavalla tavalla silloin, kun niihin kohdistuu jonkin toisen kohteen synnyttämä lämpösäteily. Sen lisäksi, että aidan syttyminen vaatii, että siihen kohdistuu tietyn rajan ylittä lämpövuoto riittävän pitkän ajan, aidan palamisen ylläpitäminen vaatii tiettyä lämpövuotasoa.

Aitojen ja muiden ei-suljettujen rakennelmien palamista mallinnetaan kuvassa 69 esitetyn mallin mukaan, jossa aidan palon korkeus H_f on sama kuin aidan korkeus, palavan osan leveys L_f riippuu aitaan lämpösäteilylle altistavan kohteen leveydestä W_s seuraavasti:

$$L_f = C_f \cdot H_s, \quad (19)$$

missä $C_f = 1,4 \pm 0,2$. Aidan pituusyksikköä kohden vapautuva paloteho \dot{Q}'_f riippuu siitä, miten voimakas aitaan kohdistuva lämpövuoto \dot{q}''_f on:

$$\dot{Q}'_f = F(\dot{q}''_f) \cdot \dot{Q}'_{f, \text{teoreettinen maksimi}}, \quad (20)$$

missä funktio $F(\dot{q}''_f)$, joka kuvaa aidan pituusyksikköä kohden vapautuvan palotehon riippuvuutta aitaan kohdistuvasta lämpövuosta \dot{q}''_f (kuva Kuva b). Sen lauseke on

$$F(\dot{q}''_f) = \left[\frac{((\dot{q}''_f - \dot{q}''_{\min})/w)^p}{1 + ((\dot{q}''_f - \dot{q}''_{\min})/w)^p} \right]^r, \quad (21)$$

missä $\dot{q}''_{\min} = 6 \text{ kW/m}^2$ (3, ..., 10 kW/m², -3 kW/m²), $w = 0,4 \text{ kW/m}^2$, $p = 0,8$ ja $r = 20$ (16, ..., 27), missä vaihteluvälin ala- ja ylärajat vastaavat 10 %:n ja 90 %:n fraktiileja. Aidan pituusyksikköä kohden vapautuvan palotehon teoreettinen maksimi on

$$\dot{Q}'_{f, \text{teoreettinen maksimi}} = \dot{Q}''_{f, \text{teoreettinen maksimi}} \cdot H_f, \quad (22)$$

missä aidan (projisoitua) pinta-alaa A_f kohden vapautuva teoreettinen paloteho $\dot{Q}''_{f, \text{teoreettinen maksimi}}$ on määritetty VTT:llä tehtyjen kokeiden [VTT 2003] perusteella. Tulokset esitetään taulukossa 30. Mallin muut tekijät on määritetty FDS-simulointien tulosten perusteella. Aitaan kohdistuva lämpövuoto \dot{q}''_f riippuu aitaan uhkaavan kohteen synnyttämästä lämpövuosta \dot{q}''_s seuraavasti

$$\dot{q}_f'' = \Phi_{s-f} \cdot \dot{q}_s'' , \quad (23)$$

missä aitaan uhkaavan kohteen ja aidan välinen näkyvyystekijä on

$$\Phi_{s-f} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{a_s}{\sqrt{1+a_s^2}} \arctan \left(\frac{b_s}{\sqrt{1+a_s^2}} \right) + \frac{b_s}{\sqrt{1+b_s^2}} \arctan \left(\frac{a_s}{\sqrt{1+b_s^2}} \right) \right] \quad (24)$$

$$a_s = \frac{H_s}{2d}, b_s = \frac{W_s}{2d} ,$$

missä H_s ja W_s ovat aitaa lämpösäteilylle altistavan kohteen korkeus ja leveys W_s ja d on tämän kohteen etäisyys aidasta. Näkyvyystekijän arvoja eri a :n ja b :n arvoilla esitetään liitteessä M. Lämpösäteilyn \dot{q}_s'' määrittämistä eri kohteille on käsitelty edellä.

Aidan palaminen synnyttää lämpövuon, jonka suuruus $\dot{q}_{f,s}''$ voidaan laskea aidan palotehon perusteella

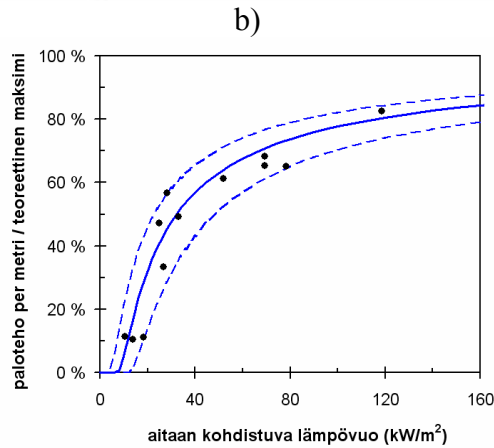
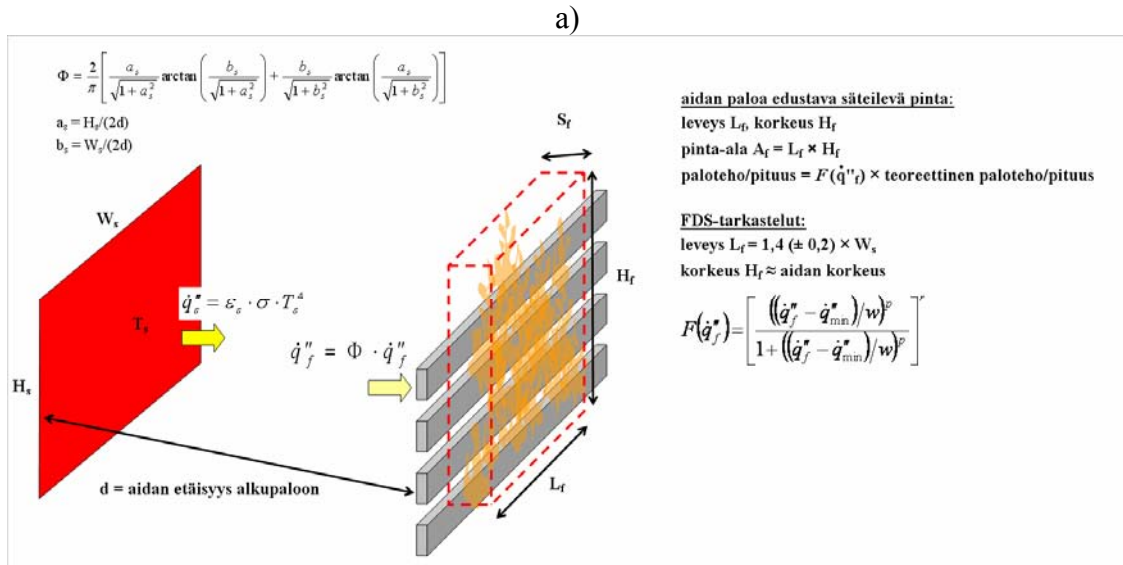
$$\dot{q}_{f,s}'' = \chi_r \cdot \dot{Q}_f' / H_f , \quad (25)$$

missä $\chi_r \approx 33\%$ on palon säteilevä osuus. Aidan muille kohteille aiheuttama uhka eli aidan niihin kohdistama lämpövuoto on

$$\dot{q}_{f,t}'' = \Phi_{f-t} \cdot \dot{q}_{f,s}'' . \quad (26)$$

Aidan palotehon ajallinen kehittyminen kuvataan t²-muotoisella mallilla³, jossa kasvu-aikatekijä t_g määritetään VTT:n aitamaisten puurakenteiden palotehon mittaustuloksien perusteella (Kuva): $t_g = 300 \text{ s}, \dots, 450 \text{ s}$, todennäköisin arvo 330 s.

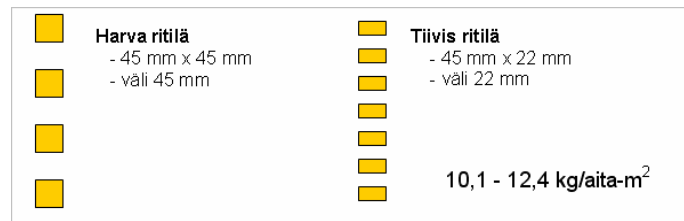
³ Paloteho kasvaa maksimipalotehoon saakka ajan mukana verrannollisena ajan t toiseen potenssiin: paloteho $\propto (t/t_g)^2$.



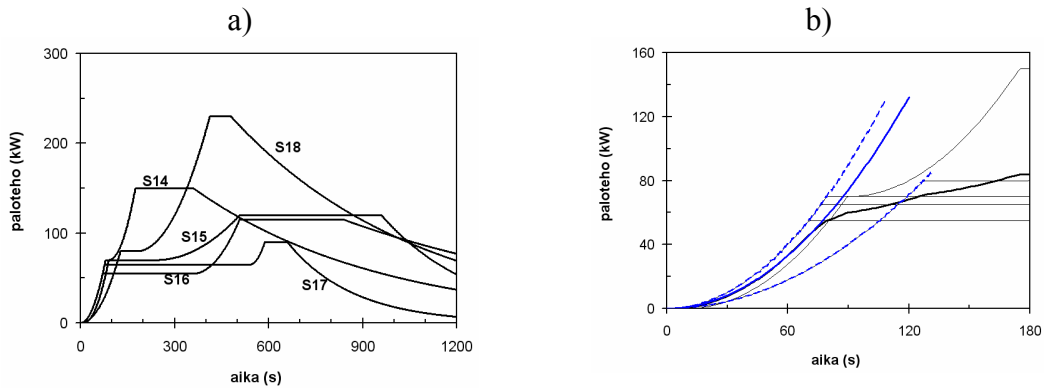
Kuva 69. a) Aidan ja muun ei-suljetun kohteen palamisen malli. b) Funktio $F(\dot{q}''_f)$, joka kuvaa aidan pituusyksikköä kohden vapautuvan palotehon riippuvuutta aitaan kohdistuvasta lämpövuosta \dot{q}''_f (pisteet ovat FDS-simulointien tuloksia ja yhtenäinen käyrä on sovite pistejoukkoon ja katkoviivoin esitetyt käyrät kuvaavat pistejoukkojen ala- ja ylärajoja).

Taulukko 30. Aidan ja muun ei-suljetun kohteen teoreettinen paloteho.

Aidan tyyppi	Altistuva pinta-ala per aita- m^2	Teoreettinen paloteho per altistuva pinta-ala	Teoreettinen paloteho per aitapinta-ala
Tiivis paksu (45 mm) lankkuaita	1 m^2	100 kW/m^2	100 kW/m^2
• palo yhdeltä puolelta	1 m^2	150 kW/m^2	150 kW/m^2
• palo molemmin puolin			
Harva ritilä (ks. Kuva)	2 m^2	150 kW/m^2	300 kW/m^2
Tiivis ritilä (ks. Kuva)	3 m^2	150 kW/m^2	450 kW/m^2



Kuva 70. Esimerkki tiiviin ja harvan ritilän muodostamista aitatyypeistä.



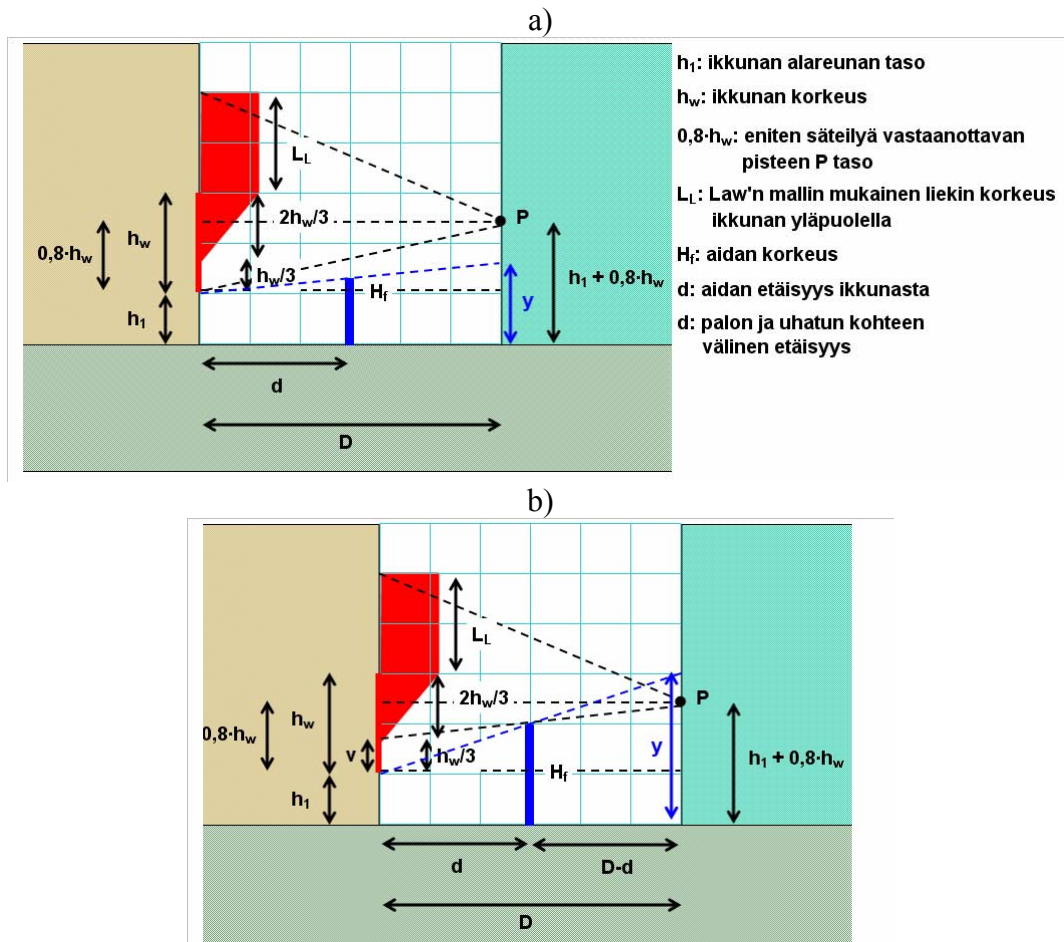
Kuva 71. Aidan ja muun ei-suljetun kohteen palamisen ajallinen kehittyminen:
a) VTT:n aitamaisten puurakenteiden palotehon mittaustuloksia t^2 -riippuvuuteen perustuvalla mallilla kuvattuna ja b) näşiden tulosten keskimääräistä kasvunopeutta (yhtenäinen korostettu käyrä) ja sen vaihteluväliä kuvaavat käyrät (katkoviivoilla esitetyt käyrät).

Jos aita on tiettyä rajakorkeutta $H_{f,c}$ korkeampi, niin se varjostaa uhattua alkuperäisen kohteen (esim. huoneisto tai katos) palolta. Kuvan 75 merkinnöillä varjostus voidaan laskea seuraavasti:

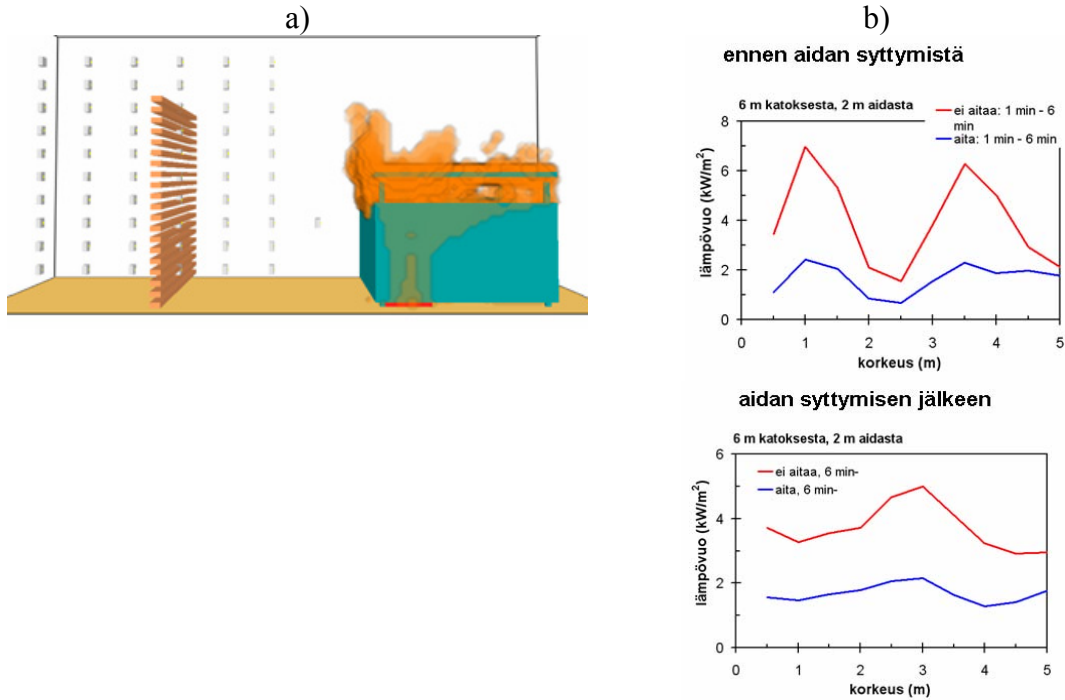
$$\text{kun } H_f > H_{f,c} : \text{varjostus} = \frac{v}{\text{säteilylähteen korkeus}} = \frac{d[(H_f - h_1) \cdot (D/d) - 0,8 \cdot h_w] / (D-d)}{h_w + L_L} \quad (27)$$

$$H_{f,c} = h_1 + 0,8 \cdot h_w \cdot (d/D),$$

Kun esim. $h_1 = 0,6$ m, $h_w = 2$ m, $L_L = 2$ m, $D = 6$ m, $d = 3$ m, $H_{f,c} = 1,4$ m. Jos aidan korkeus on 1,5 m, varjostus on 5 % ja jos aidan korkeus on 2 m, varjostus on 30 %.



Kuva 72. Aidan ja muun ei-suljetun kohteen uhattua kohdetta varjostava vaikutus:
 a) ei varjostusta ja b) aita varjostaa uhattua kohdetta palaavan kohteen säteilyltä.



Kuva 73. FDS-palonsimulointiohjelmalla laskettu ritilämäisen aidan varjostusvaikutus: a) asetelma: 1,5 m korkea ritilämäinen aita, joka avoimen ja suljetun pinta-alan suhde on 50 %: 50 %, 4 metrin päässä palavasta jätekatoksesta. b) Lämpövuoto aidan takana ennen aidan syttymistä ja sen jälkeen.

8.3.4.2 Esimerkkejä aidan syttymisestä, palamisesta ja sen ympäristönsä aiheuttamasta uhasta

Tässä jaksossa näytetään esimerkkien avulla, miten edellä esitettyjä malleja sovelletaan.

Esimerkki 1. Harva 1,5 m korkea aita, joka on tietyn etäisyyden päässä palavasta olohuoneesta, jonka ikkunan korkeus on 2 m ja leveys 3 m.

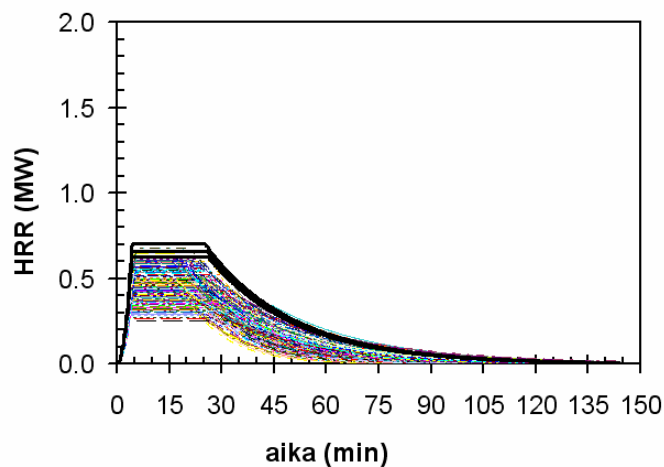
Olohuoneen palon saavuttaa täyden palamisen vaiheen noin 5 min (2,5 %:n fraktiili) sen jälkeen, kun palo on alkanut kasvaa ja täyden palamisen vaihe kestää noin 22,5 min (97,5 %:n fraktiili). Olohuoneen palon täyden palamisen vaiheessa aitaan kohdistama lämpövuon arvo (tässä 80 % fraktiiliarvo $\dot{q}''_{f,80\%}$), aidan syttymisaika Δt_{ign} , aidan maksimipaloteho $\dot{Q}_{f,max}$ ja aidan palon synnyttämä lämpövuoto $\dot{q}''_{f,s}$ eri aidan etäisyyksillä ovat

- aidan etäisyys palosta 2 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 49 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 0,33 \text{ min}$ (0,13, ..., 0,80 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 1130 \text{ kW}$ (760, ..., 1470 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 59 \text{ kW/m}^2$ (46, ..., 67 kW/m²);

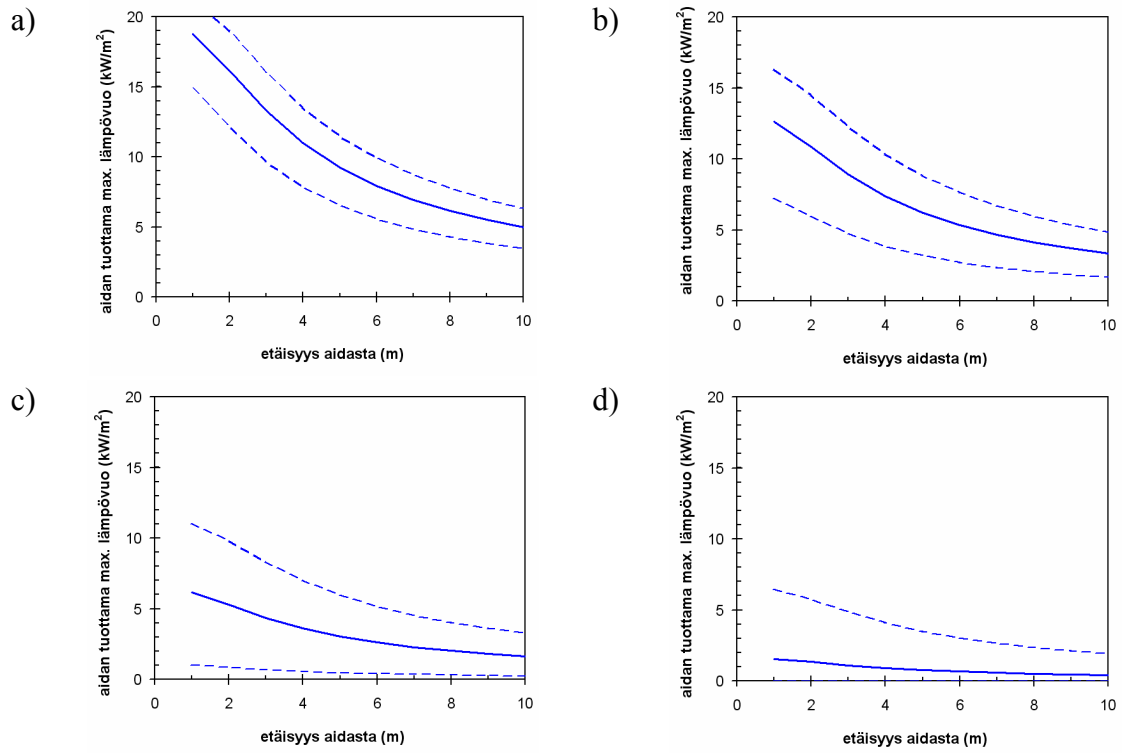
- aidan etäisyys palosta 3 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 26 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 2,1 \text{ min}$ (0,8, ..., 4,8 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 720 \text{ kW}$ (330, ..., 1100 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 38 \text{ kW/m}^2$ (20, ..., 50 kW/m²);
- aidan etäisyys palosta 4 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 15 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 13 \text{ min}$ (5, ..., 35 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 330 \text{ kW}$ (30, ..., 730 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 18 \text{ kW/m}^2$ (2, ..., 33 kW/m²);
- aidan etäisyys palosta 5 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 10 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 100 \text{ min}$ (26, ..., 530 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 100 \text{ kW}$ (0, ..., 460 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 5 \text{ kW/m}^2$ (0, ..., 21 kW/m²).

Havaitaan, että etäisyydellä 5 m aita ei syty (syttymisviive on niin pitkä) ja vaikka syttyisi aitaan kohdistuva lämpövuoto on niin pieni, että se ei välttämättä ylläpidä paloa.

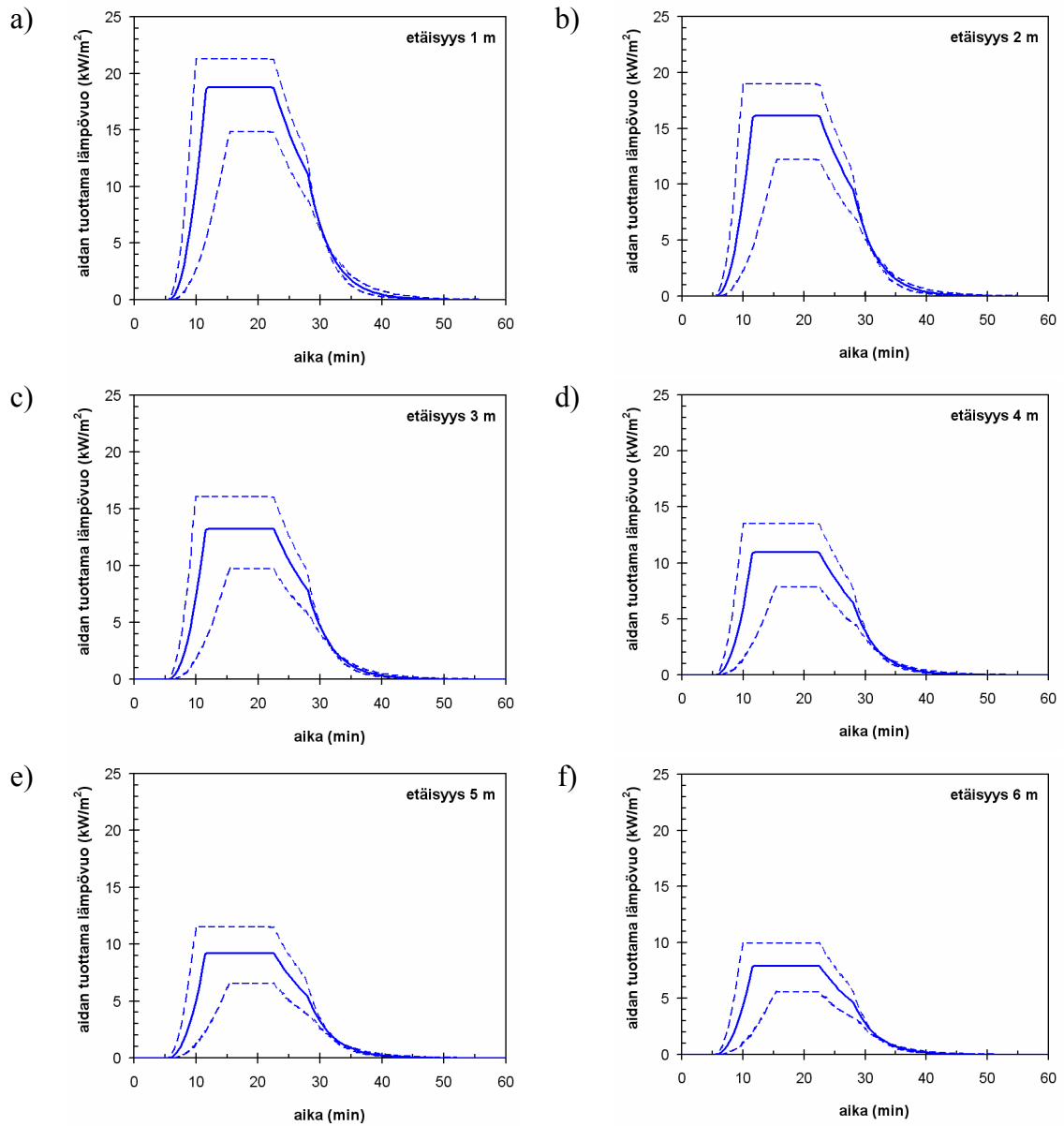
Aidan paloteho tapauksessa, jossa se on 3 metrin päässä palohuoneesta esitetään kuvassa 74. Kuvassa 75 esitetään aidan ympäristöönsä kohdistaman lämpövuonon riippuvuus uhatun kohteen etäisyydestä aidasta ja kuvissa 76–78 esitetään lämpövuonon ajallinen kehitys etäisyyksillä 2 m, 3 m ja 4 m aidasta.



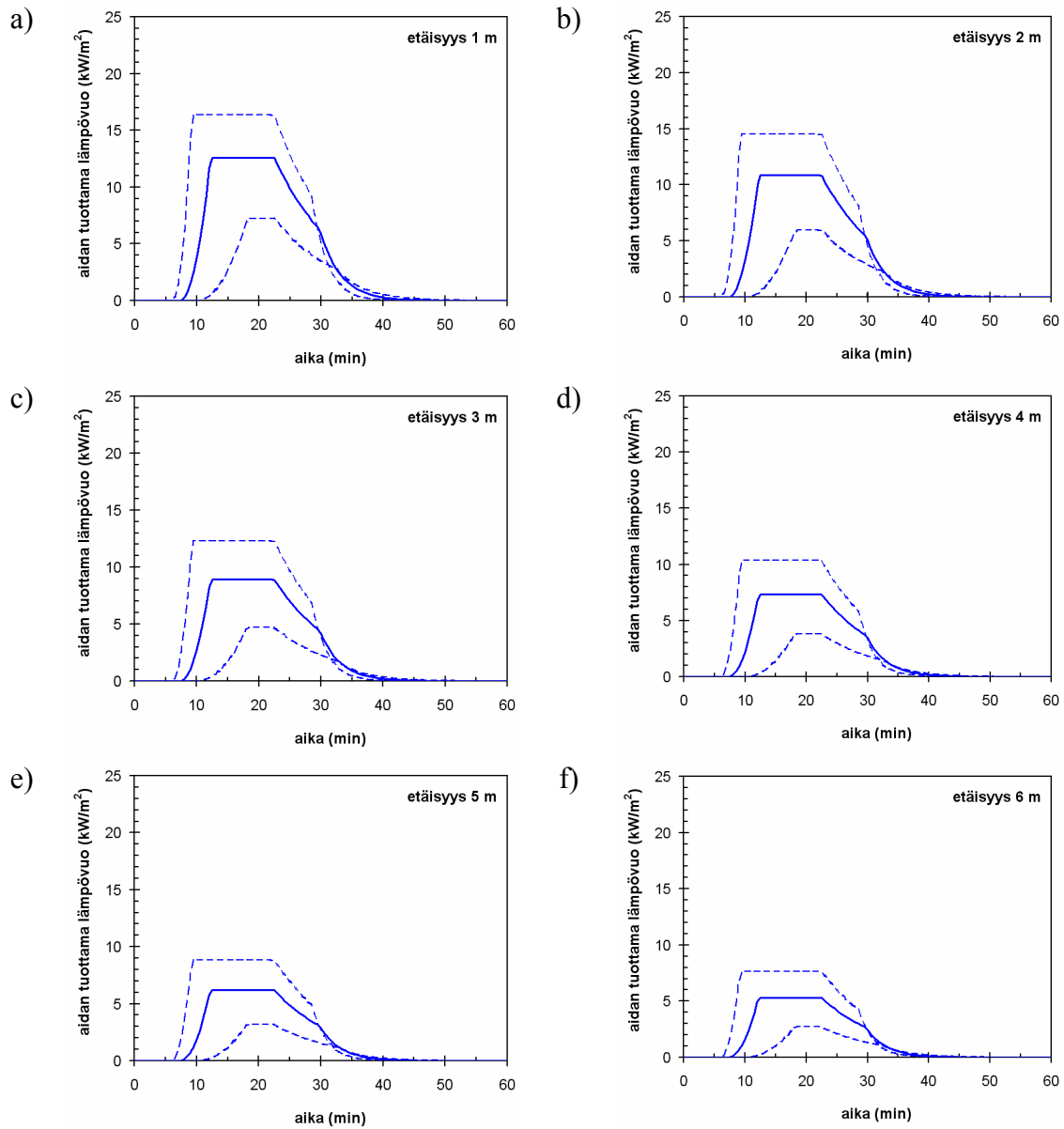
Kuva 74. Esimerkin 1 aidan paloteho, kun aita on 3 metrin päässä olohuoneen palosta: ohuet käyrät kuvaavat Monte Carlo -otosta ja korostetut käyrät syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen laskettuja tuloksia. Kasvuaikatekijälle käytetyt fraktiilit ovat 10 %, 5 % ja 1 %.



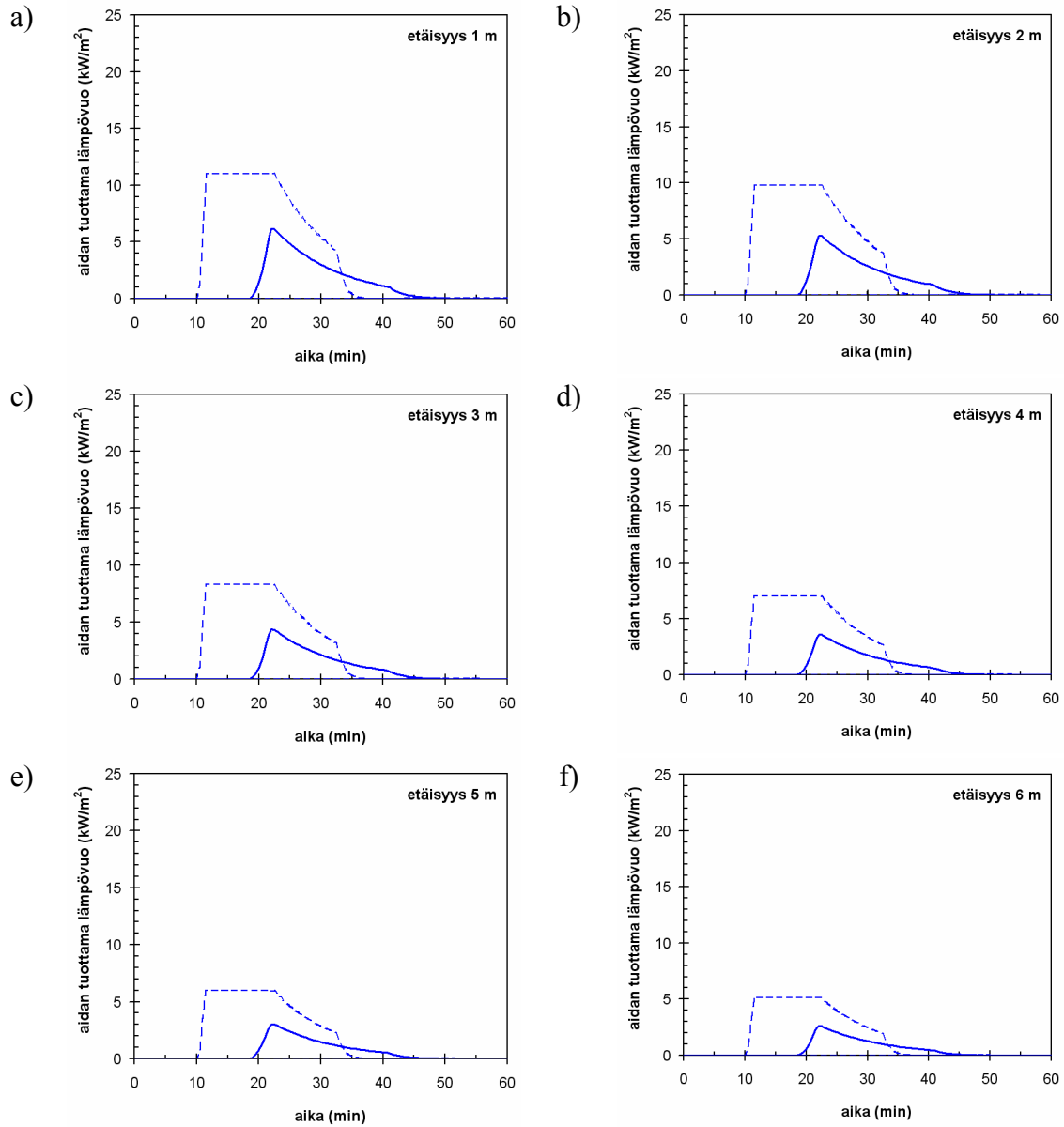
Kuva 75. Esimerkki 1: aidan ympäristöönsä kohdistaman lämpövuon maksimiarvon riippuvuus kohteen etäisyydestä aidasta. Etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on a) 2 m, b) 3 m, c) 4 m ja d) 5 m.



Kuva 76. Esimerkki 1: aidan ympäristönsä kohdistaman lämpövuon ajallinen kehittyminen eri etäisyydestä aidasta: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m ja f) 6 m. Aidan etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on 2 m.



Kuva 77. Esimerkki 1: aidan ympäristönsä kohdistaman lämpövuon ajallinen kehittyminen eri etäisyydestä aidasta: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m ja f) 6 m. Aidan etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on 3 m.



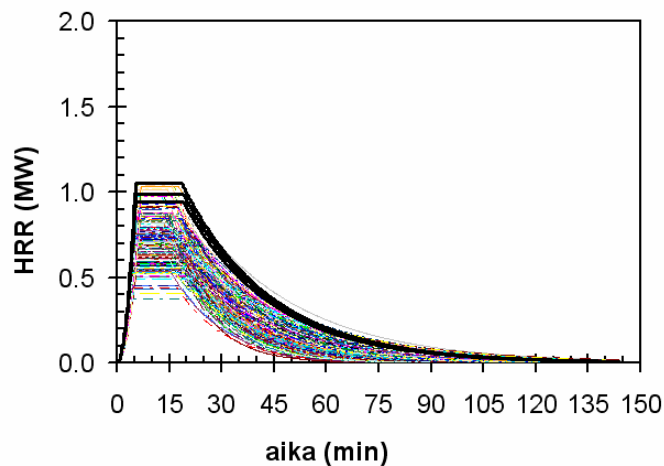
Kuva 78. Esimerkki 1: aidan ympäristöönsä kohdistaman lämpövuon ajallinen kehittyminen eri etäisyydestä aidasta: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m ja f) 6 m. Aidan etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on 4 m.

Esimerkki 2. Tiheä 1,5 m korkea aita, joka on tietyn etäisyyden päässä palavasta olohuoneesta, jonka ikkunan korkeus on 2 m ja leveys 3 m.

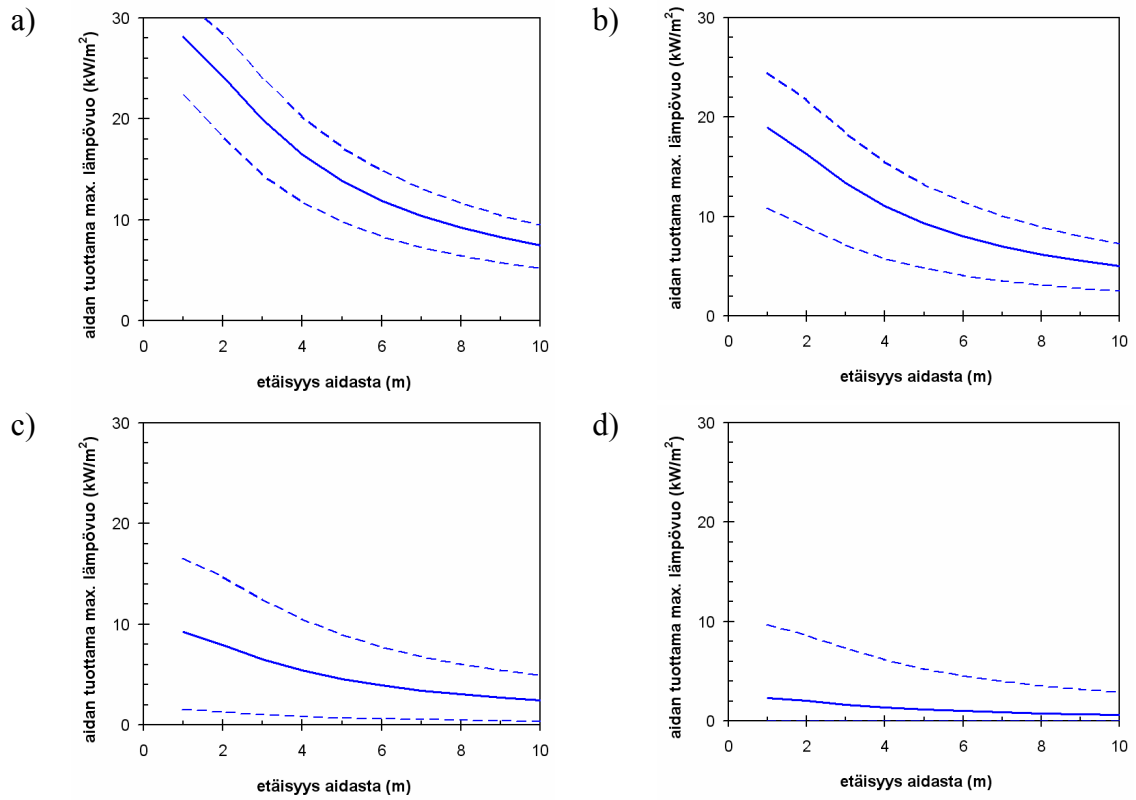
Olohuoneen palon ominaisuuksiin liittyvät tekijät $\dot{q}_{f,80\%}''$ ja Δt_{ign} ovat samat kuin esimerkissä 1. Aidan maksimipaloteho $\dot{Q}_{f,max}$ ja aidan palon synnyttämä lämpövuoto $\dot{q}_{f,s}''$ eri aidan etäisyyksillä ovat

- aidan etäisyys palosta 2 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 49 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 0,33 \text{ min}$ (0,13,..., 0,80 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 1770 \text{ kW}$ (1220,...,2260 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 93 \text{ kW/m}^2$ (74,..., 104 kW/m²);
- aidan etäisyys palosta 3 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 26 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 2,1 \text{ min}$ (0,8,..., 4,8 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 1190 \text{ kW}$ (600,...,1740 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 62 \text{ kW/m}^2$ (36,..., 80 kW/m²);
- aidan etäisyys palosta 4 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 15 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 13 \text{ min}$ (5,..., 35 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 580 \text{ kW}$ (90,...,1170 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 30 \text{ kW/m}^2$ (5,..., 45 kW/m²);
- aidan etäisyys palosta 5 m:
 $\dot{q}''_{f,80\%} = 10 \text{ kW/m}^2$, $\Delta t_{ign} = 100 \text{ min}$ (26,..., 530 min),
 $\dot{Q}_{f,max} = 150 \text{ kW}$ (0,..., 690 kW), $\dot{q}''_{f,s} = 8 \text{ kW/m}^2$ (0,..., 32 kW/m²).

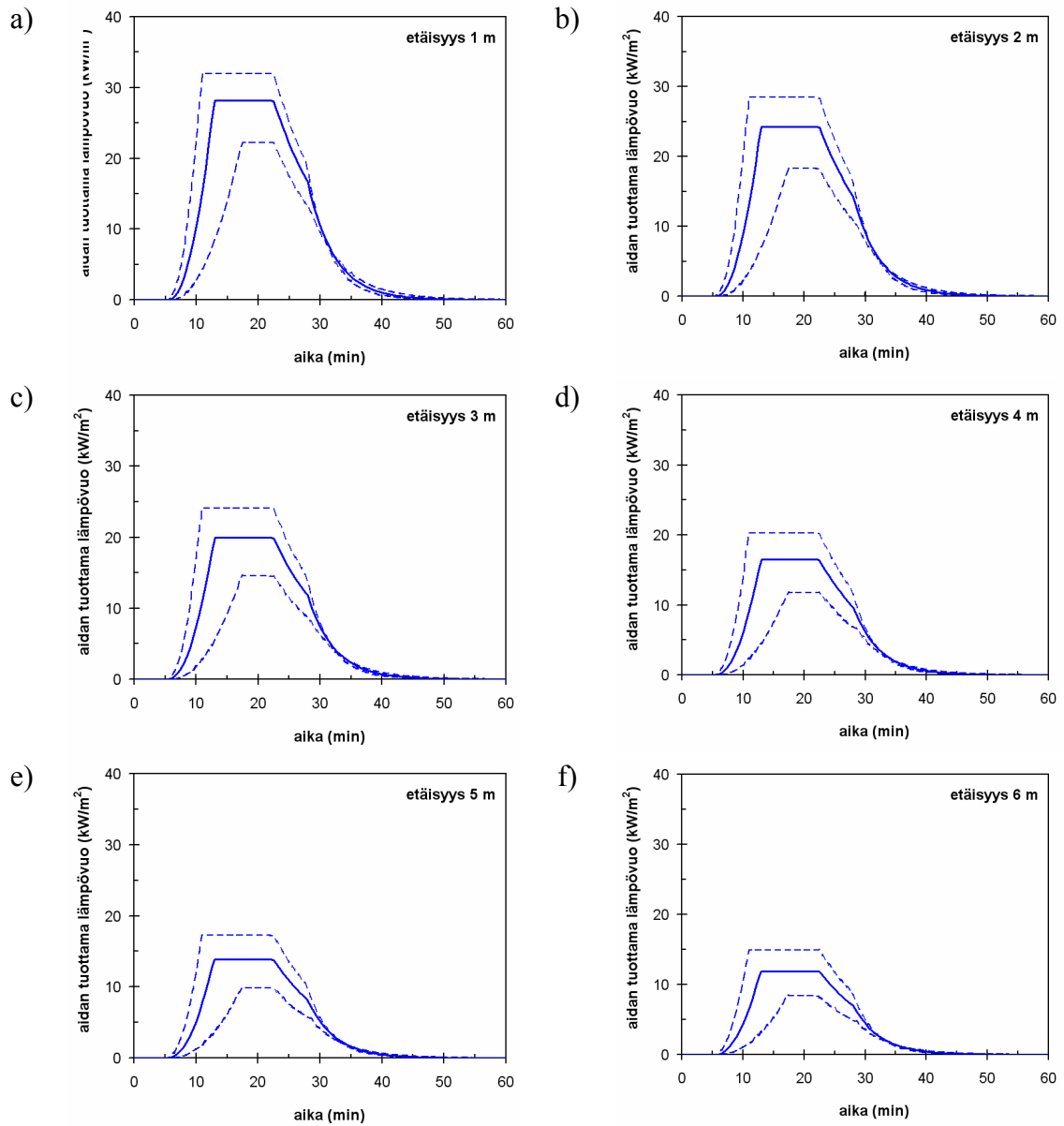
Tässäkin esimerkissä etäisyydellä 5 m aita ei syty (syttymisviive on niin pitkä) ja vaikka syttyisi, aitaan kohdistuva lämpövuoto on niin pieni, että se ei välttämättä ylläpidä paloa. Aidan paloteho tapauksessa, jossa se on 3 metrin päässä palohuoneesta, esitetään kuvassa 79. Kuvassa 75 esitetään aidan ympäristöönsä kohdistaman lämpövuonon maksimiarvon riippuvuus uhatun kohteen etäisyydestä aidasta ja kuvissa 80–82 esitetään lämpövuonon ajallinen kehitys etäisyyksillä 2 m, 3 m ja 4 m aidasta.



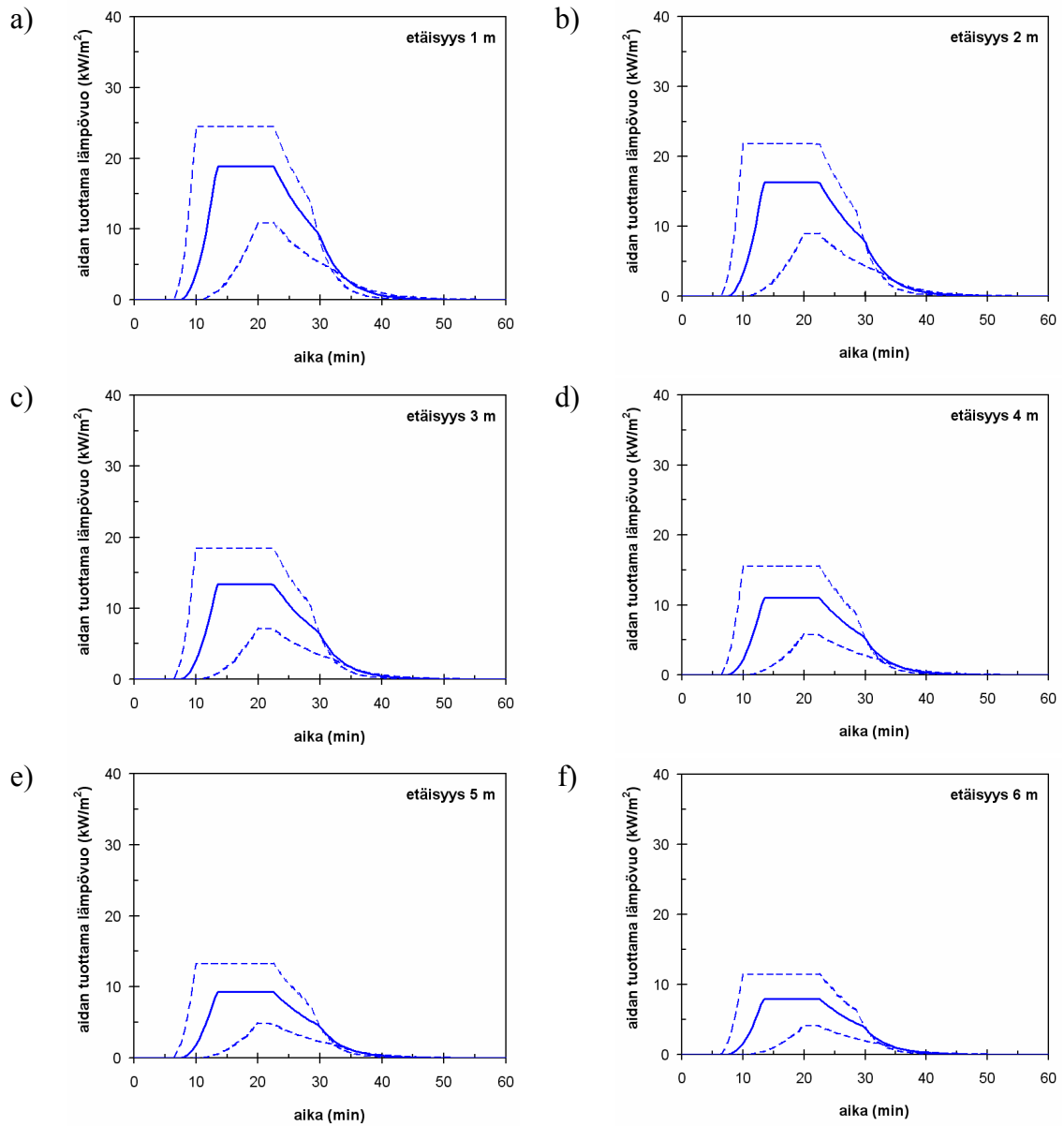
Kuva 79. Esimerkin 2 aidan paloteho, kun aita on 3 metrin päässä olohuoneen palosta: ohuet käyrät kuvaavat Monte Carlo -otosta ja korostetut käyrät syöteparametrien 90 %:n, 95 %:n ja 99 %:n fraktiileja käyttäen laskettuja tuloksia. Kasvuaikatekijälle käytetyt fraktiilit on 10 %, 5 % ja 1 %.



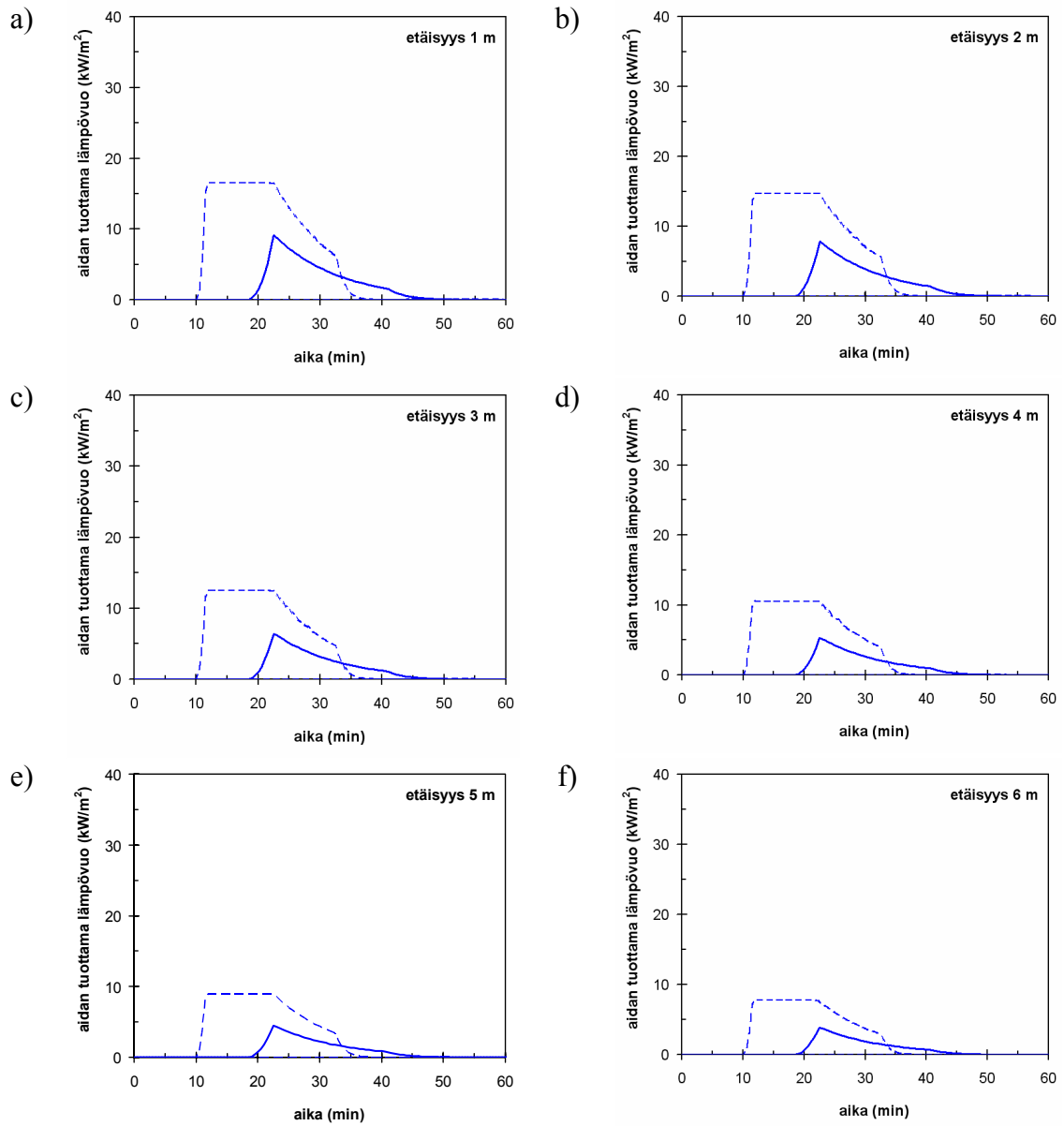
Kuva 80. Esimerkki 2: aidan ympäristöönsä kohdistaman lämpövuon maksimiaron riippuvuus kohteen etäisyydestä aidasta. Etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on a) 2 m, b) 3 m, c) 4 m ja d) 5 m.



Kuva 81. Esimerkki 2: aidan ympäristönsä kohdistaman lämpövoion ajallinen kehittyminen eri etäisyydestä aidasta: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m ja f) 6 m. Aidan etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on 2 m.



Kuva 82. Esimerkki 2: aidan ympäristönsä kohdistaman lämpövuon ajallinen kehittyminen eri etäisyydestä aidasta: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m ja f) 6 m. Aidan etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on 3 m.



Kuva 83. Esimerkki 2: aidan ympäristönsä kohdistaman lämpövuon ajallinen kehittyminen eri etäisyydestä aidasta: a) 1 m, b) 2 m, c) 3 m, d) 4 m, e) 5 m ja f) 6 m. Aidan etäisyys palavan olohuoneen ikkunasta on 4 m.

8.4 Huoneistopalon ja ulkoisen palokuorman palamisen yhdistetty malli

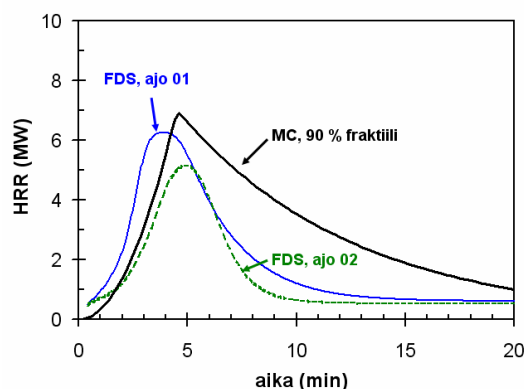
Ulkoisen palokuorma voi muodostua hyvin erilaisista esineitä ja materiaaleista ja sen määrä voi vaihdella. Ulkoinen tila mallinnetaan sellaisena avoimena tilana, joka ei lieskahda eli käytännössä tilan palo ei kehity huonepalon kaltaiseksi. Sitä, voiko tila lieskahtaa, käsitellään liitteessä E. Jos tila on sellainen, että sen palo voi kehittyä huonepalomaiseksi, tilaa tulee paloteknisesti käsitellä huonetilana.

Palokuorman määrää arvioidaan osuutena olohuoneen palokuormasta seuraavasti:

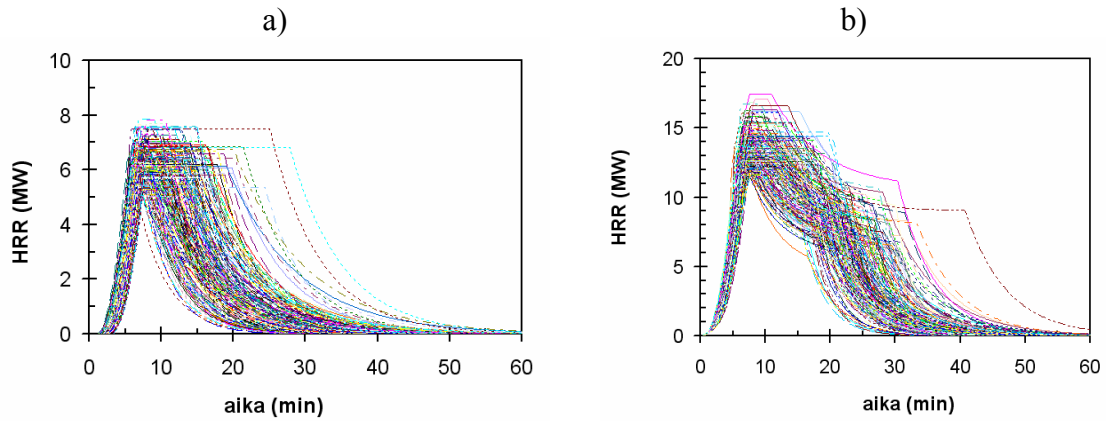
- ulkotilan palokuorman tiheys on vähäinen (oleellisesti 0 %),
- ulkotilan palokuorman tiheys on 20 % olohuoneen palokuorman tiheydestä,
- ulkotilan palokuorman tiheys on 50 % olohuoneen palokuorman tiheydestä,
- ulkotilan palokuorman tiheys on 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä.

Tässä työssä ulkotilan lattiapinta-alaksi oletetaan 10 m^2 . Poikkeamat tästä arvosta voidaan ottaa huomioon muuttamalla palokuorman tiheyttä.

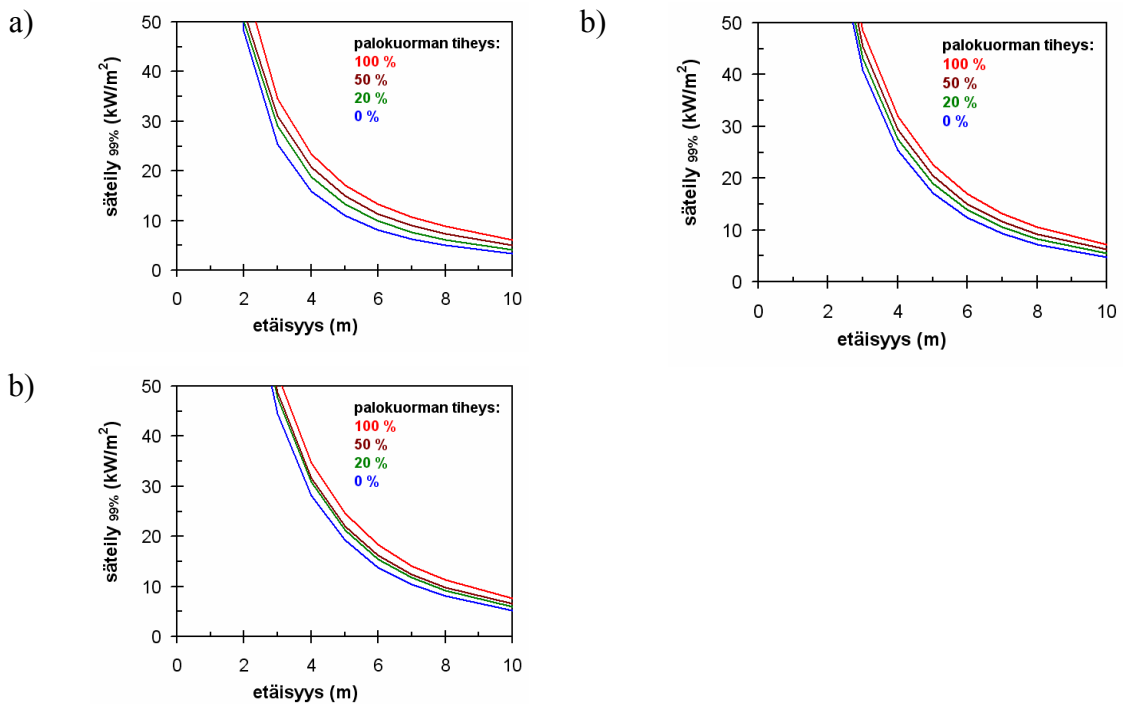
Paloteho lasketaan käyttäen kohdassa 8.3.3 esitettyä katosten palotehon ja palokuorman riippuvuutta. Esimerkki palotehon kuvaajista esitetään kuvassa 85. Lämpövuon riippuvuus etäisyydestä eri palokuorman määriille ja palossa ikkunaan syntyvien aukkojen koon kombinaatiolle esitetään kuvassa 86. Jatkolaskennassa tarvittavat lämpövuon jakaumien parametrit esitetään taulukoissa 31, 32 ja 33.



Kuva 84. Rakennuksen ulkoisen tilan palo, kun tila on tyhjä: FDS:llä laskettujen palotehon kuvaajien vertaaminen yksinkertaisen mallin tuloksiin.



Kuva 85. a) Esimerkki rakennuksen ulkoisen tilan palotehon stokastisesta kuvaajasta, palokuorman tiheys 50 % olohuoneen palokuorman tiheydestä. b) Olohuoneen ja ulkoisen palokuorman yhdistetty palo (ulkoisen palokuorman tiheys 50 %). Ulkoisen tilan pinta-alaksi oletetaan 10 m².



Kuva 86. Huoneen ja ulkoisen palokuorman palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun ulkoisen palokuorman tiheys on 0 %, 20 %, 0 % tai 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä, huoneen lattiapinta-ala on 20 ± 5 m² ja ikkunan särkyessä syntyvän aukon koko on a) 10 %, b) 20 % ja c) 30 % lattiapinta-alasta.

Taulukko 31. Huoneen ja ulkoisen palokuorman palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuon jakauman^{a)} parametrit. Huoneen lattiapinta-ala on $20 \pm 5 \text{ m}^2$ ja palossa ikkunan rikkoutuessa syntynvä aukko 10 % lattiapinta-alasta.

Ulkoisen palokuorman tiheys 0 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	2.44	2.84	2.58	3.61	2.70	2.30	2.12	2.70
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	24.78	15.94	7.67	6.43	3.72	2.26	1.59	1.72
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	46.27	21.59	11.51	5.47	4.53	3.77	3.04	1.92
Ulkoisen palokuorman tiheys 20 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	2.12	2.23	2.07	2.89	2.63	2.37	2.58	2.65
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	23.67	12.46	7.46	6.27	4.34	3.08	2.65	2.17
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	51.26	27.87	13.59	7.29	5.39	4.09	2.93	2.25
Ulkoisen palokuorman tiheys 50 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	2.25	2.92	2.81	2.37	2.37	2.41	2.15	2.09
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	27.22	17.05	10.77	6.23	4.73	3.63	2.75	2.33
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	49.30	24.95	12.13	8.48	5.97	4.25	3.52	2.67
Ulkoisen palokuorman tiheys 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	2.46	2.39	2.50	2.38	2.46	3.09	2.13	2.01
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	28.07	15.29	10.68	6.76	5.86	5.02	3.44	2.50
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	52.26	30.35	14.64	10.07	6.66	4.55	4.13	3.48

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 32. Huoneen ja ulkoisen palokuorman palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuon jakauman^{a)} parametrit. Huoneen lattiapinta-ala on $20 \pm 5 \text{ m}^2$ ja palossa ikkunan rikkoutuessa syntyvä aukko 20 % lattiapinta-alasta.

Ulkoisen palokuorman tiheys 0 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.86	1.94	1.96	2.02	2.11	1.96	2.43	2.06
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	35.43	17.60	11.00	7.11	4.65	3.05	2.90	2.06
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	60.03	36.29	17.61	10.61	7.09	5.43	3.58	3.07
Ulkoisen palokuorman tiheys 20 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.93	1.86	2.23	1.94	2.42	2.45	2.76	2.28
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	33.68	17.46	12.49	6.98	6.20	4.50	3.64	2.62
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	63.51	39.23	18.41	12.15	7.00	5.30	3.79	3.25
Ulkoisen palokuorman tiheys 50 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.93	2.09	2.47	2.49	2.03	2.00	2.18	2.59
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	34.53	19.56	14.34	9.18	5.66	4.67	3.68	3.08
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	65.41	38.56	17.86	11.69	8.47	5.85	4.41	3.28
Ulkoisen palokuorman tiheys 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.72	2.49	2.70	2.50	2.29	2.23	2.63	2.15
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	32.38	25.37	15.42	9.63	7.01	5.29	4.87	3.20
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	70.43	37.10	19.36	13.02	9.22	6.97	4.59	4.38

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

Taulukko 33. Huoneen ja ulkoisen palokuorman palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuon jakauman^{a)} parametrit. Huoneen lattiapinta-ala on $20 \pm 5 \text{ m}^2$ ja palossa ikkunan rikkoutuessa syntyvä aukko 30 % lattiapinta-alasta.

Ulkoisen palokuorman tiheys 0 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.58	1.86	1.96	1.71	1.89	1.77	1.77	2.07
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	29.14	17.42	10.45	6.69	5.45	3.50	2.67	2.19
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	60.05	37.57	19.59	12.11	7.49	5.77	4.27	3.21
Ulkoisen palokuorman tiheys 20 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.79	1.67	1.77	1.92	2.06	1.80	2.26	2.29
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	29.24	17.62	10.59	7.82	6.09	4.01	3.48	2.87
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	62.92	39.65	22.05	13.00	8.48	6.28	4.51	3.38
Ulkoisen palokuorman tiheys 50 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.64	1.86	1.86	1.91	2.38	2.12	2.78	2.51
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	29.95	17.26	11.60	8.55	6.87	4.65	4.88	3.52
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	65.43	42.18	22.55	13.64	8.49	6.42	3.95	3.27
Ulkoisen palokuorman tiheys 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä								
etäisyys	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
α	1.69	1.91	1.95	2.37	2.09	2.51	2.33	2.16
$\beta \text{ (kW/m}^2\text{)}$	30.74	19.90	13.64	10.37	7.01	5.84	4.61	3.49
$x_{\min} \text{ (kW/m}^2\text{)}$	67.85	43.69	23.47	13.77	10.05	7.07	5.36	4.33

a) Weibull- jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$

8.5 Ajoneuvoista alkavat palot

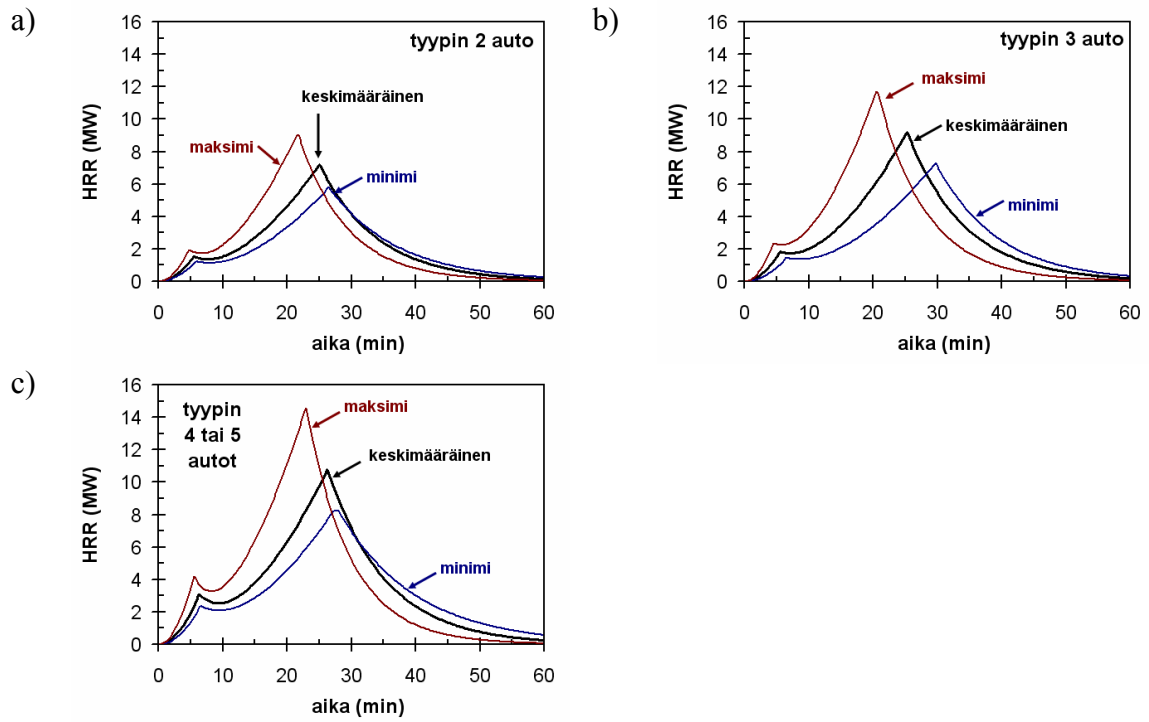
Ajon3uvopalot ovat eräs merkittävä alkupaloryhmä. Niiden paloteknistä mallintamista esitellään liitteellä D. Tässä luvussa esitetään kootut tulokset ja niiden soveltaminen ajoneuvopalojen aiheuttamien palon leviämisen uhkien määrällisessä arvioinnissa. Tar- kastellut tapaukset ovat

- muista kohteista erillään olevan ajoneuvon palo (kohta 8.5.2)
- tapaus, jossa eri taloja yhdistävää katettua tilaa käytetään autojen paikoituspaik- kana, joka on tiivistä ja matalaa puutalorakentamista toteuttaen rakennutuissa kohteissa usein tavattava ratkaisu (kohta 8.5.3).
- Autopaikoituskatoksen palo (kohta 8.5.4).

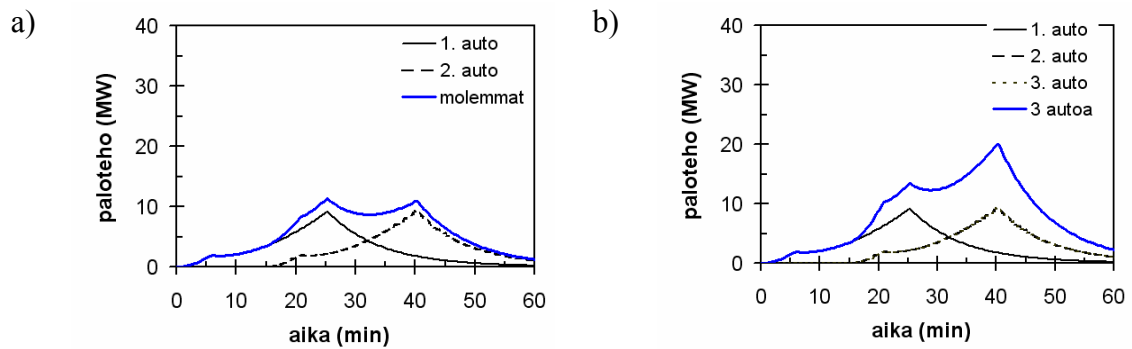
Ensin esitetään ajoneuvopalojen kehittymistä ja voimakkuutta koskevia tuloksia (kohta 8.5.1).

8.5.1 Yleisiä tuloksia palon kehittymisestä ja voimakkuudesta

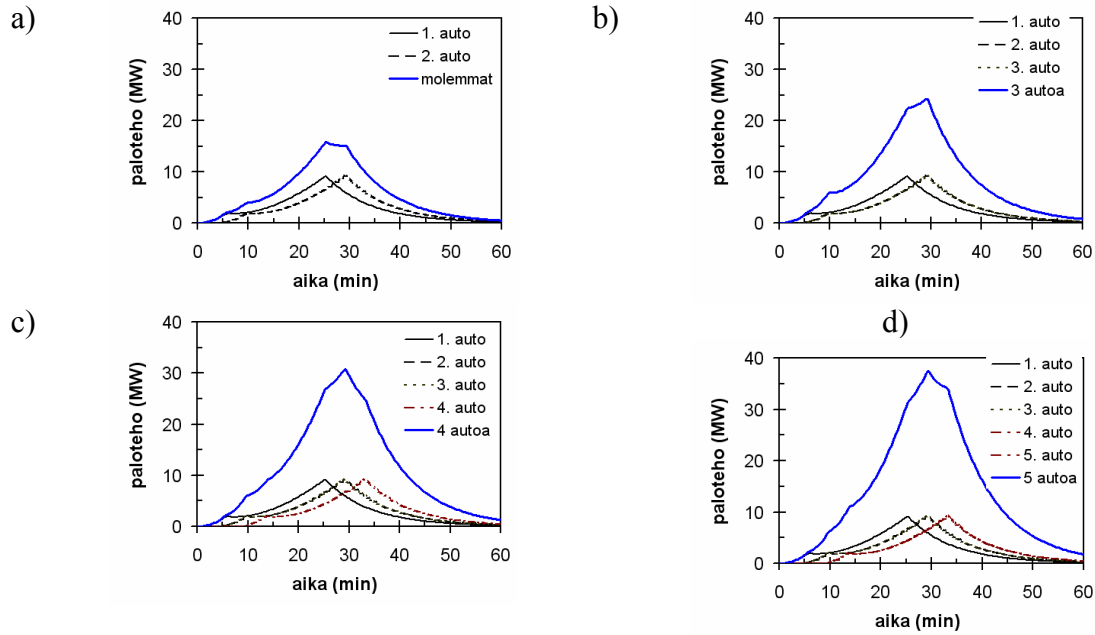
Henkilöautopalojen kehittymistä ja voimakkuutta esitellään kuvissa 87–89. Henkilöau- topalon stokastisen mallintamisen tiedot annetaan taulukossa 34.



Kuva 87. Erityyppisten (ks. liite E) henkilöautojen palotehon kuvaajia.



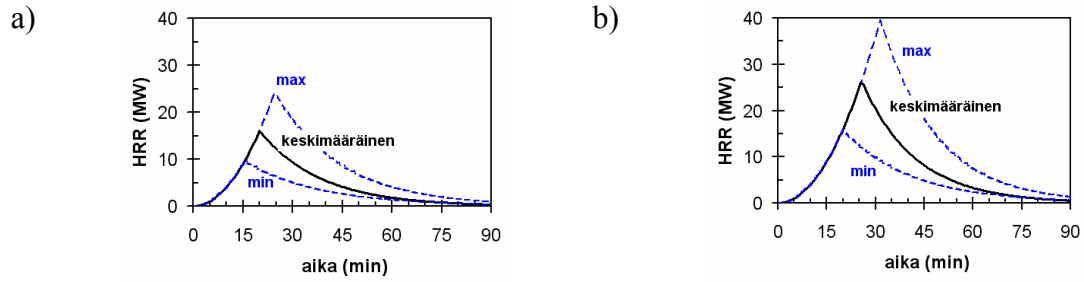
Kuva 88. Useita ulkopaikoitusalueella olevia henkilöautoja käsittävän palon palotehon kuvaajia (tyypin 3 autot). Palon leviämisaikana autosta toiseen on käytetty arvoa 15 minuuttia.



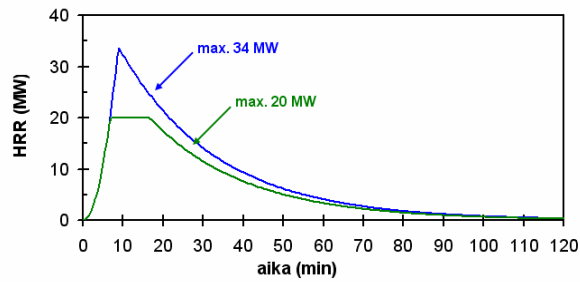
Kuva 89. Useita katoksessa olevia henkilöautoja käsittävän palon palotehon kuvaajia (tyypin 3 autot). Palon leviämisaikana autosta toiseen on käytetty arvoa 4 minuuttia.

Taulukko 34. Erityyppisten henkilöautojen palotehon laskentamallien yhteenveto. Symboli $\Delta(a;c;b)$ tarkoittaa kolmiojakaumaa, jonka minimi(maksimi)arvo on a , maksimi(minimi)arvo b ja todennäköisin arvo c .

	tyypin 2 auto	tyypin 3 auto	tyypin 4 tai 5 auto
1. t^2 -termi:			
• t_g (s)	$\Delta(354; 300; 230)$	$\Delta(370; 280; 202)$	$\Delta(285; 240; 180)$
• max. HRR (kW)	$\Delta(967; 1\ 200; 1\ 525)$	$\Delta(1\ 111; 1\ 400; 1\ 796)$	$\Delta(1\ 898; 2\ 500; 3\ 391)$
• t_1 (s)	$\Delta(348; 329; 284)$	$\Delta(390; 331; 270)$	$\Delta(393; 379; 331)$
• τ (s)	$\Delta(284; 240; 200)$	$\Delta(322; 300; 250)$	$\Delta(320; 240; 182)$
2. t^2 -termi:			
• t_g (s)	$\Delta(660; 560; 430)$	$\Delta(660; 500; 360)$	$\Delta(285; 480; 360)$
• max. HRR (kW)	$\Delta(5\ 800; 7\ 200; 9\ 150)$	$\Delta(7\ 300; 9\ 200; 11\ 800)$	$\Delta(1\ 898; 10\ 800; 14\ 650)$
• t_1 (s)	$\Delta(1\ 589; 1\ 503; 1\ 301)$	$\Delta(1\ 783; 1\ 517; 1\ 237)$	$\Delta(393; 1\ 577; 1\ 378)$
• τ (s)	$\Delta(640; 540; 450)$	$\Delta(580; 540; 450)$	$\Delta(320; 540; 410)$
palokuorma (GJ)	$\Delta(7,0; 7,9; 8,5)$	$\Delta(8,9; 9,8; 10,7)$	$\Delta(11,2; 12,6; 13,7)$
max. paloteho (MW)	$\Delta(5,8; 7,4; 9,1)$	$\Delta(7,3; 9,5; 11,8)$	$\Delta(8,1; 11,4; 14,6)$
palokuorman tiheys ajoneuvon vaakasuuntaisen leikkauksen pinta-alaa kohden (MJ/m^2)	Weibull: $\alpha = 1,80, \beta = 200 \text{ MJ}/\text{m}^2$, min = $916 \text{ MJ}/\text{m}^2$; ka. = $1095 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 2,5-97,5 %: $940\text{-}1330 \text{ MJ}/\text{m}^2$	Weibull: $\alpha = 2,32, \beta = 259 \text{ MJ}/\text{m}^2$, min = $967 \text{ MJ}/\text{m}^2$; ka. = $1200 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 2,5-97,5 %: $1020\text{-}1420 \text{ MJ}/\text{m}^2$	Weibull: $\alpha = 2,62, \beta = 475 \text{ MJ}/\text{m}^2$, min = $1338 \text{ MJ}/\text{m}^2$; ka. = $1760 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 2,5-97,5 %: $1455\text{-}2120 \text{ MJ}/\text{m}^2$
vaakasuuntaisen leikkauksen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho (kW/m^2)	Weibull: $\alpha = 4,49, \beta = 694 \text{ kW}/\text{m}^2$, min = $442 \text{ kW}/\text{m}^2$; ka. = $1075 \text{ kW}/\text{m}^2$ 2,5-97,5 %: $750\text{-}1370 \text{ kW}/\text{m}^2$	Weibull: $\alpha = 4,80, \beta = 815 \text{ kW}/\text{m}^2$, min = $442 \text{ kW}/\text{m}^2$; ka. = $1200 \text{ kW}/\text{m}^2$ 2,5-97,5 %: $800\text{-}1500 \text{ kW}/\text{m}^2$	Weibull: $\alpha = 5,33, \beta = 1276 \text{ kW}/\text{m}^2$, min = $528 \text{ kW}/\text{m}^2$; ka. = $1700 \text{ kW}/\text{m}^2$ 2,5-97,5 %: $1170\text{-}2160 \text{ kW}/\text{m}^2$
palon leviämisaika viereiseen autoon	<ul style="list-style-type: none"> • ulkopaikoitusalueella olevat autot: 10–20 minuuttia • katoksessa olevat autot: 4–5 minuuttia 		



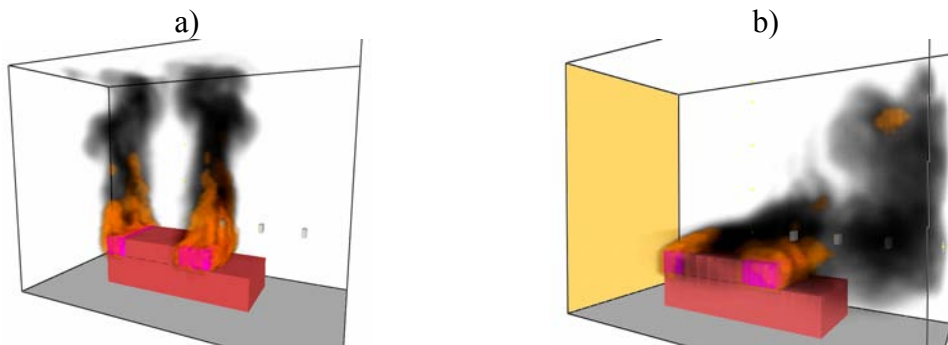
Kuva 90. Matkailuajoneuvon palotehon kuvaajia: a) korin leveys 2,3 m ja pituus 7 m ja b) korin leveys 2,4 m ja pituus 11 m.



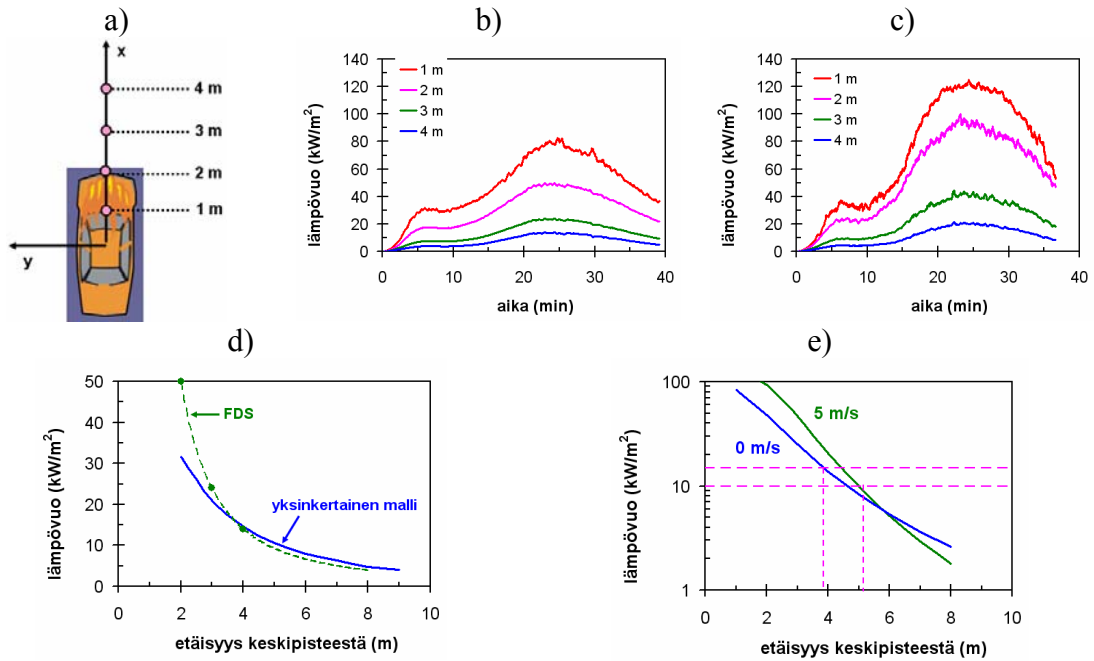
Kuva 91. Linja-auton mitattuja palotehon kuvaajia [Ingason 2001, Ingason 2004, Pålsson 2004].

8.5.2 Katoksen ulkopuolella palava ajoneuvo

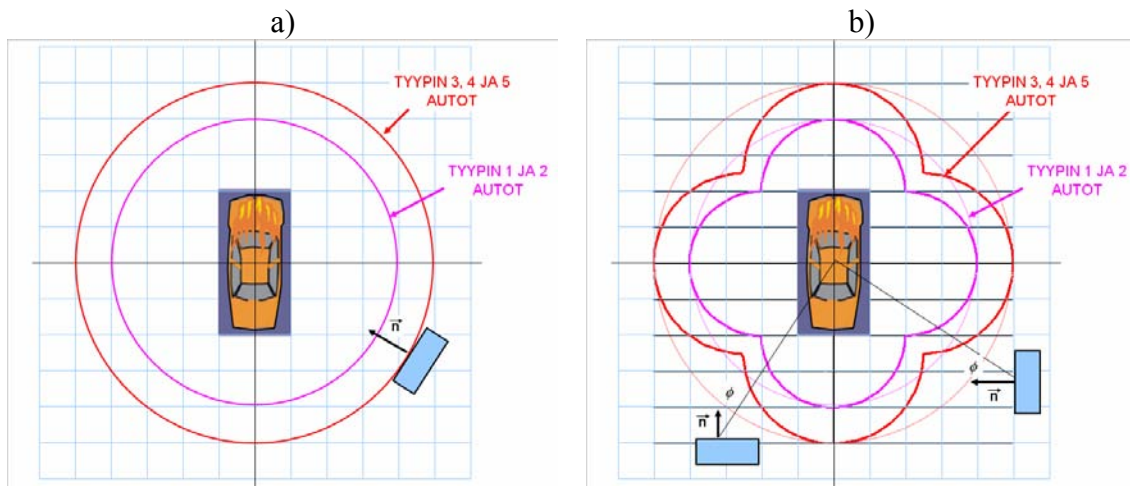
Yhden henkilöauton palon FDS-mallinnusta havainnollistetaan kuvassa 92. FDS-ohjelmalla lasketut lämpövuon arvot esitetään kuvassa 93. Lämpövuon perusteella määritetyt turvaetäisyydet esitetään kuvassa 94.



Kuva 92. Yhden henkilöauton palaminen (liitteessä D kuvatun tyyppin 3 auto): a) ei tuulta ja b) tuuli 5 m/s.



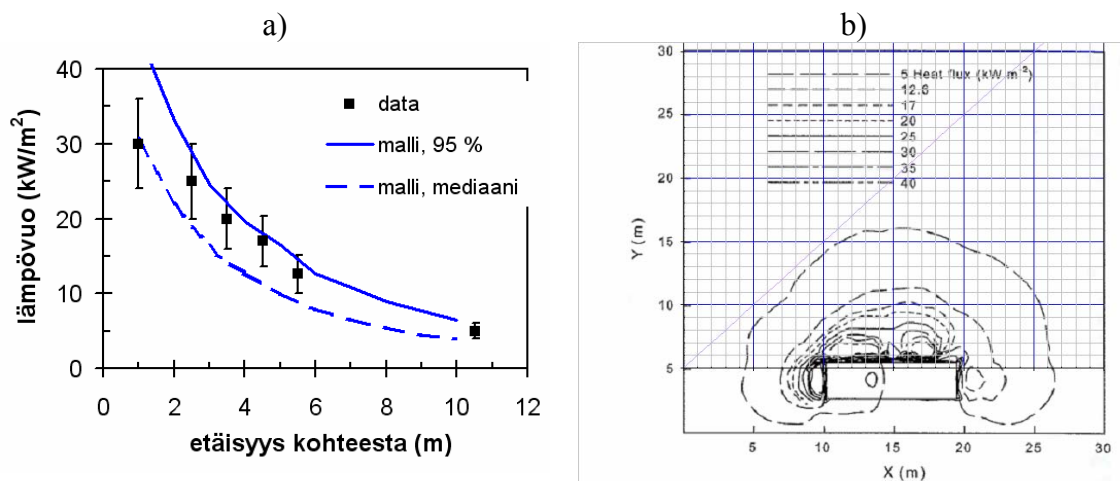
Kuva 93. Yhden henkilöauton palaminen (liitteessä D kuvatun tyyppin 3 auto): a) FDS-mallin lämpövuon määrittämissä pisteissä, b) lämpövuon ajallinen kehitys ilman tuulta ja c) lämpövuon ajallinen kehitys, kun tuulee 5 m/s, d) lämpövuon riippuvuus etäisyydestä: FDS-mallin ja yksinkertaisen laskentamallin 99 %-fraktiilin vertaaminen ja e) lämpövuon riippuvuus etäisyydestä, tuuli 0 m/s tai 5 m/s.



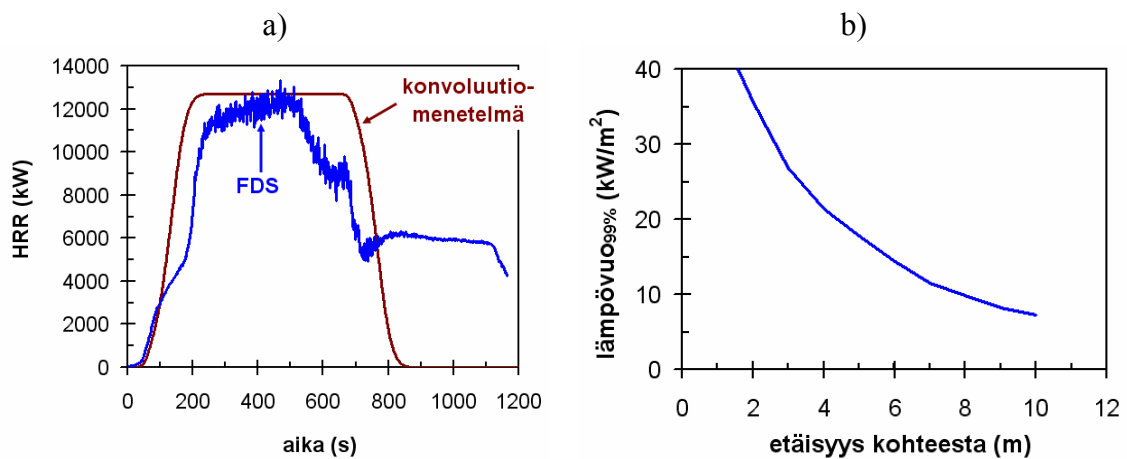
Kuva 94. Yhden henkilöauton palamisen turvaetäisyys: a) kun uhatun pinnan normaalin suunta on suoraan auton suuntaan ja b) kun uhatun pinnan normaali muodostaa kulman ϕ auton keskipisteen ja pinnan yhdistysjanan suhteen.

Matkailuauton tai -vaunun tyypillisten mittojen ja palotehon avulla lasketut ympäristöön kohdistuvat lämpövuon arvot esitetään kuvassa 95. Esimerkki veneen palamisesta ja sen synnyttämästä lämpövuosta esitetään kuvassa 96.

Suunnan vaikutus on periaatteessa samankaltainen kuin yhden henkilöauton tapaukses-
sa, mutta palavan kohteen pitkänomainen muoto tulee ottaa huomioon.



Kuva 95. Matkailuajoneuvon ympäristöönsä kohdistaman lämpövuon riippuvuus
etäisyydestä: a) tässä työssä kehitetyn yksinkertaisen laskentamallin tulokset ja niiden
vertaaminen Babrauskasin [2003] esittämiin mittaustietoihin, jotka esitetään
tarkemmin kuvassa b.



Kuva 96. a) 6 m pitkän ja 3 metriä leveän muoviveneen paloteho, joka on määritetty
sekä FDS-ohjelmalla että soveltaen Baroudin konvoluutiomenetelmää pienen mittakaavan
kartiokalorimetritulosten käyttöön täyden mittakaavan palotulosten ennustamiseen
[Babrauskas ym. 1997]. b) Veneen ympäristöönsä kohdistaman lämpövuon
(99 % fraktiili) riippuvuus etäisyydestä.

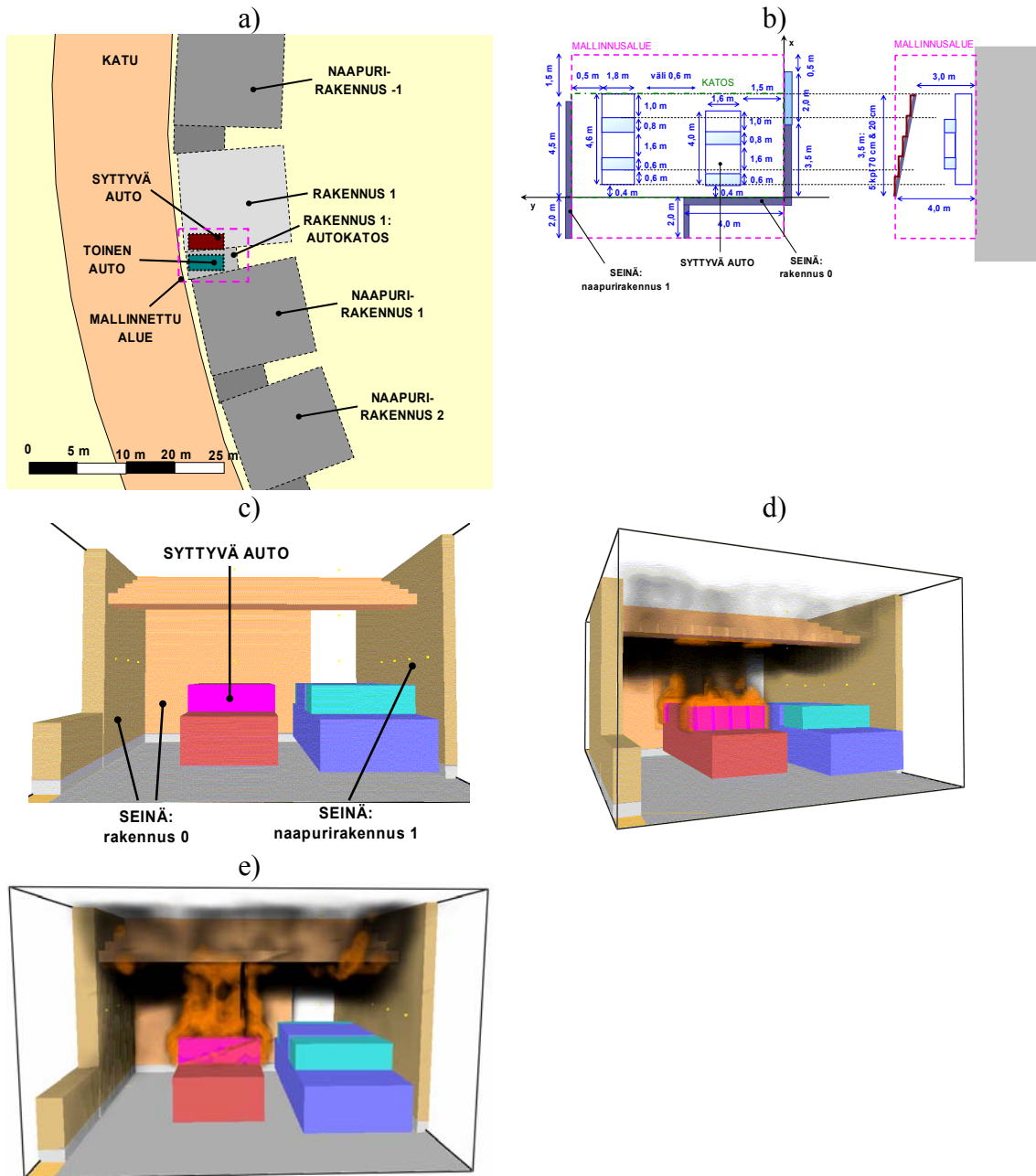
8.5.3 Kahden auton palo eri taloja yhdistävässä katetussa tilassa

Tiivistä ja matalaa puutalorakentamista toteuttaen rakennetuissa kohteissa usein tavattavaa eri taloja yhdistävää katetuilla tilaa voidaan käyttää autojen paikoituspaikkana (Kuva).

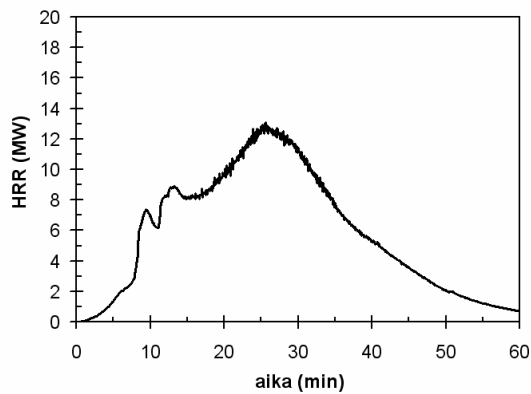
Palon kehittymistä havainnollistetaan kuvassa 98 ja paloteon kuvaaja esitetään kuvassa 99. Katetun tilan seiniin ja kattoon kohdistuvan lämpövuon ajallinen kehitys esitetään kuvassa 100.



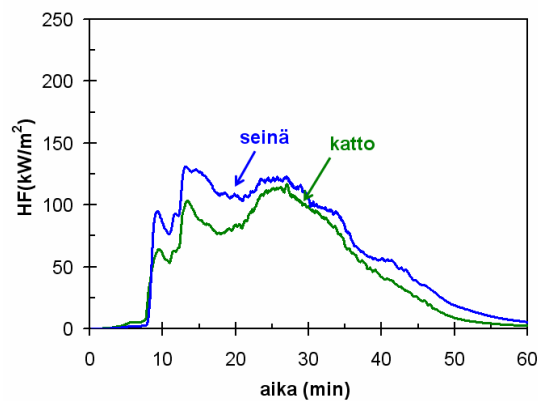
Kuva 97. Esimerkki rakennuksia yhdistävän katoksen käytöstä autojen paikoituspaikkana [Sundsberg 2005].



Kuva 98. Esimerkki autopalosta toisiinsa yhdistettyjen talojen autopaikoitustilassa: a) yleiskuva, b) mallin geometrian yksityiskohdat, c) FDS-ohjelman asetelma alussa ja d) tilanne, kun auto on syttynyt, josta voidaan nähdä kuuman kerroksen muodostuminen katokseen; e) esittää tilannetta 10 minuutin kuluttua: osa seinästä (vasemmalla) on jo hiiltynyt eikä enää osallistua paloon.



Kuva 99. Paloteho, kun kaksi autoa palaa rakennuksia yhdistävässä katoksessa.

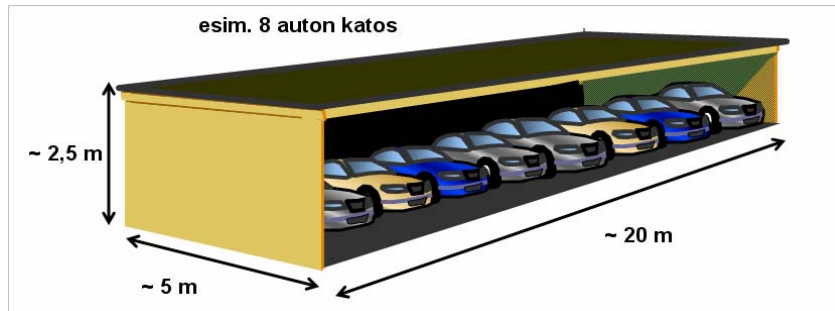


Kuva 100. Seiniin ja kattoon kohdistuva lämpövuoto, kun kaksi autoa palaa rakennuksia yhdistävässä katoksessa.

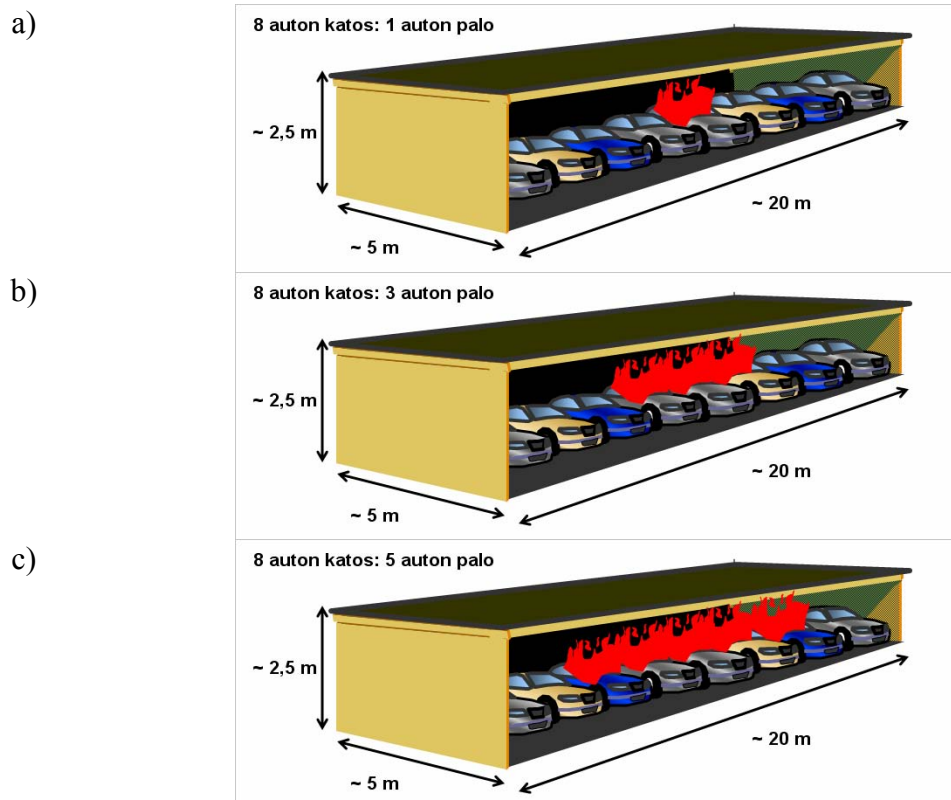
8.5.4 Autojen paikoituskatoksen tulipalo

Tarkasteltava autopaikoituskatos esitetään kuvassa 101, uhkakuvat kuvassa 102 ja havainnollistus autokatoksen tulipalosta kuvassa 103. Esimerkki palotehon ajallisesta kehityksestä esitetään kuvassa 104.

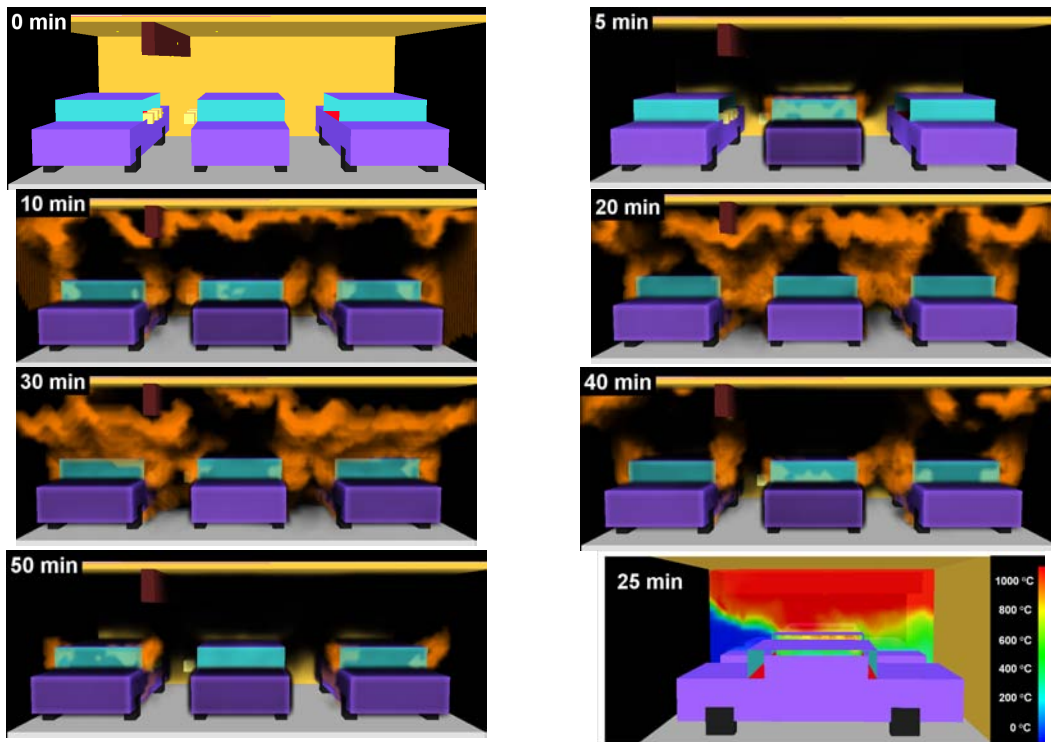
Lämpötilakenttä ja säteilyn lähdetermin kenttä esitetään kuvissa 105 ja 106. Lämpösäteilykentän lähdetermin riippuvuus korkeudesta ja katoksen ympäristöönsä kohdistaman lämpösäteilykentän laskentamalli esitetään kuvassa 107 ja mallia käyttäen saadut tulokset esitetään kuvissa 108 ja 109.



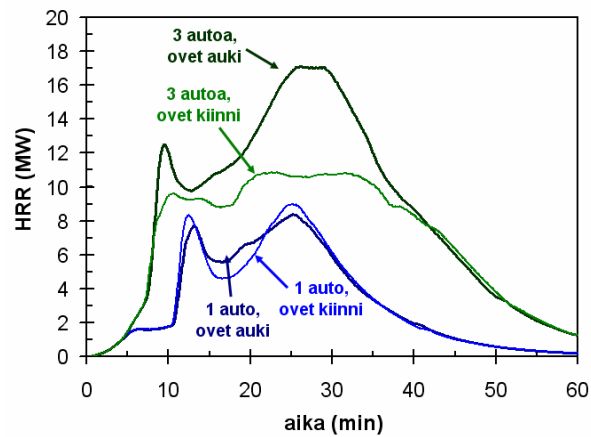
Kuva 101. Esimerkki autojen paikoituskatoksesta.



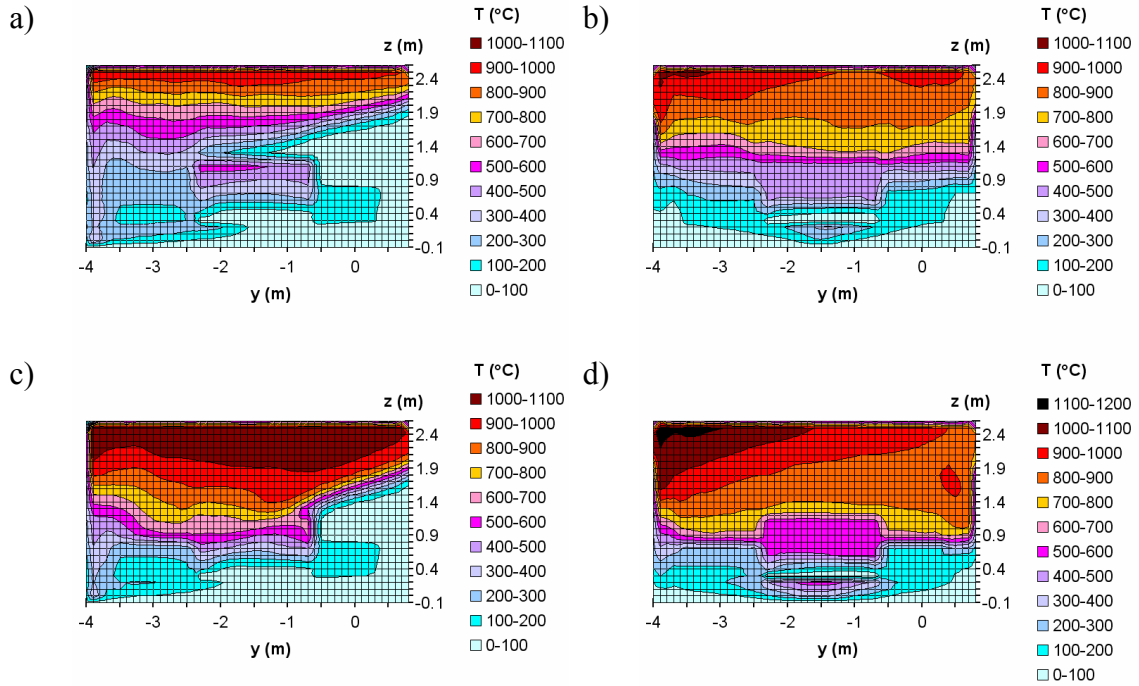
Kuva 102. Autojen paikoituskatoksen palossa yksityiskohtaisesti tarkastellut palotapaukset: a) yhden, b) kolmen ja c) viiden auton palo.



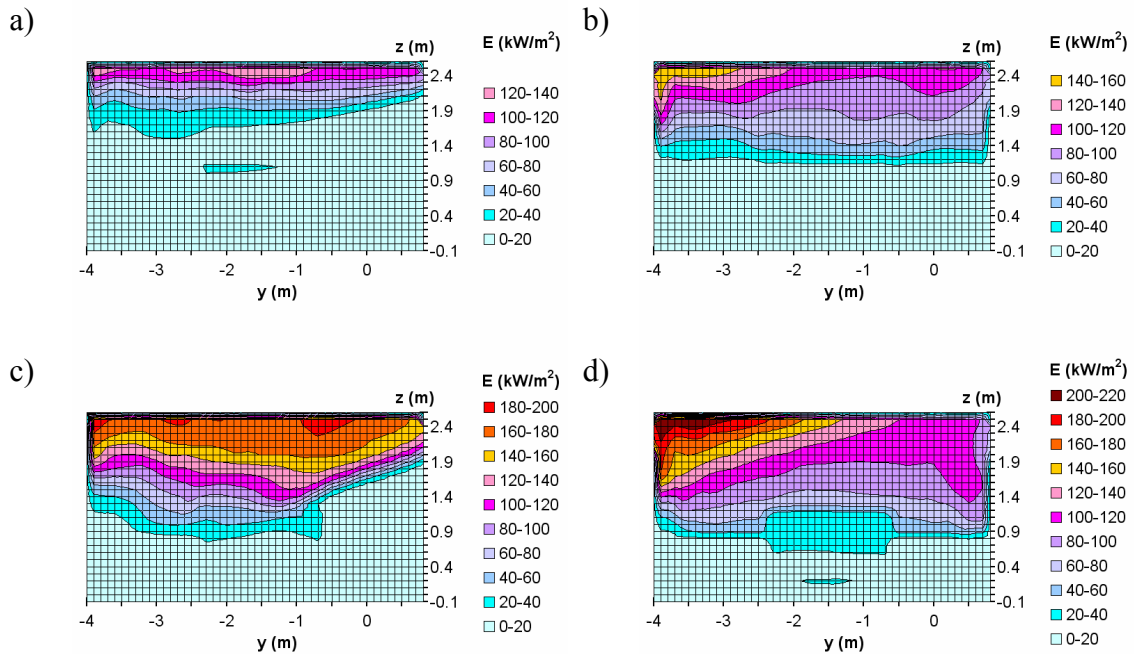
Kuva 103. Esimerkki autojen paikoituskatoksen palonkehityksestä.



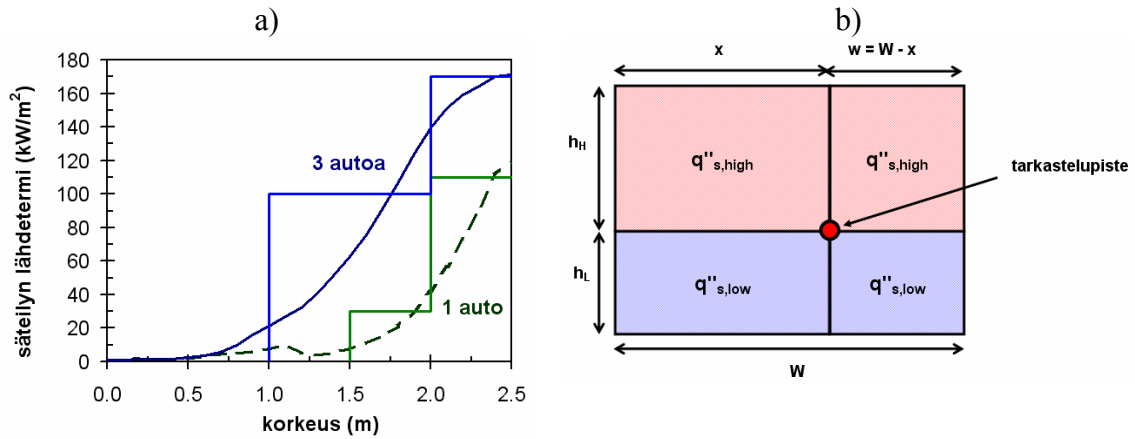
Kuva 104. Paloteho katoksessa olevien autojen palossa (esimerkkinä yksi tai kolme autoa).



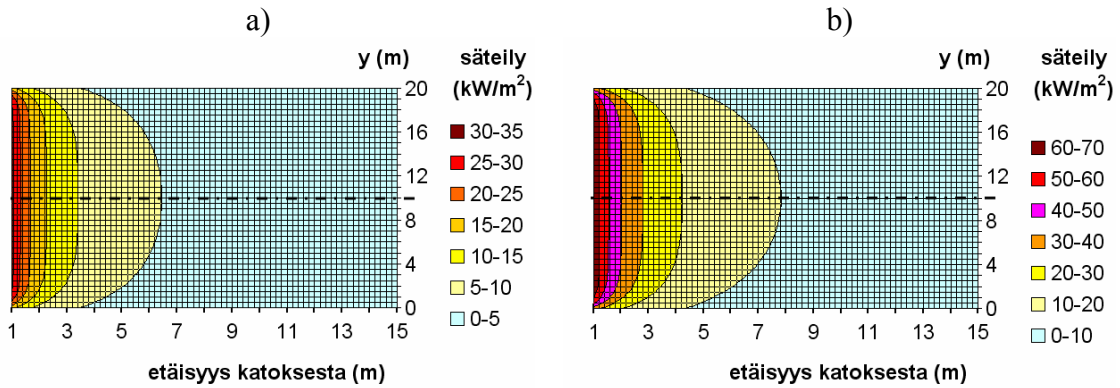
Kuva 105. Esimerkkejä lämpötilakentän poikkileikkauksista täyden palamisen vaiheessa: a) yksi auto, ovet auki, b) yksi auto, ovet kiinni, c) kolme autoa, ovet auki ja d) kolme autoa, ovet kiinni.



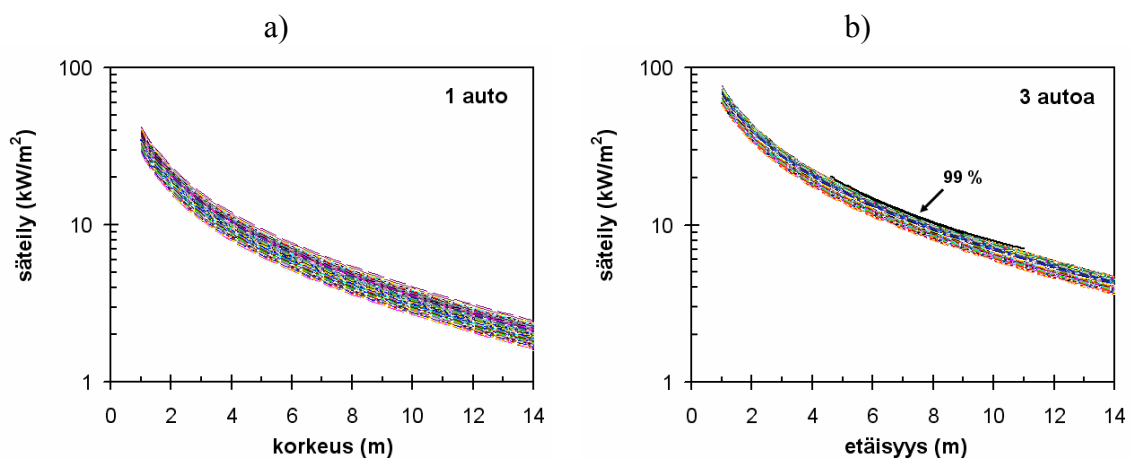
Kuva 106. Esimerkkejä lämpösäteilykentän lähdetermistä täyden palamisen vaiheessa: a) yksi auto, ovet auki, b) yksi auto, ovet kiinni, c) kolme autoa, ovet auki ja d) kolme autoa, ovet kiinni.



Kuva 107. a) Lämpösäteilykentän lähdetermin riippuvuus korkeudesta ja katoksen ympäristöön kohdistaman lämpösäteilykentän laskentamalli.



Kuva 108. Lämpösäteilykenttä a) yhden auton palolle ja b) kolmen auton palolle.

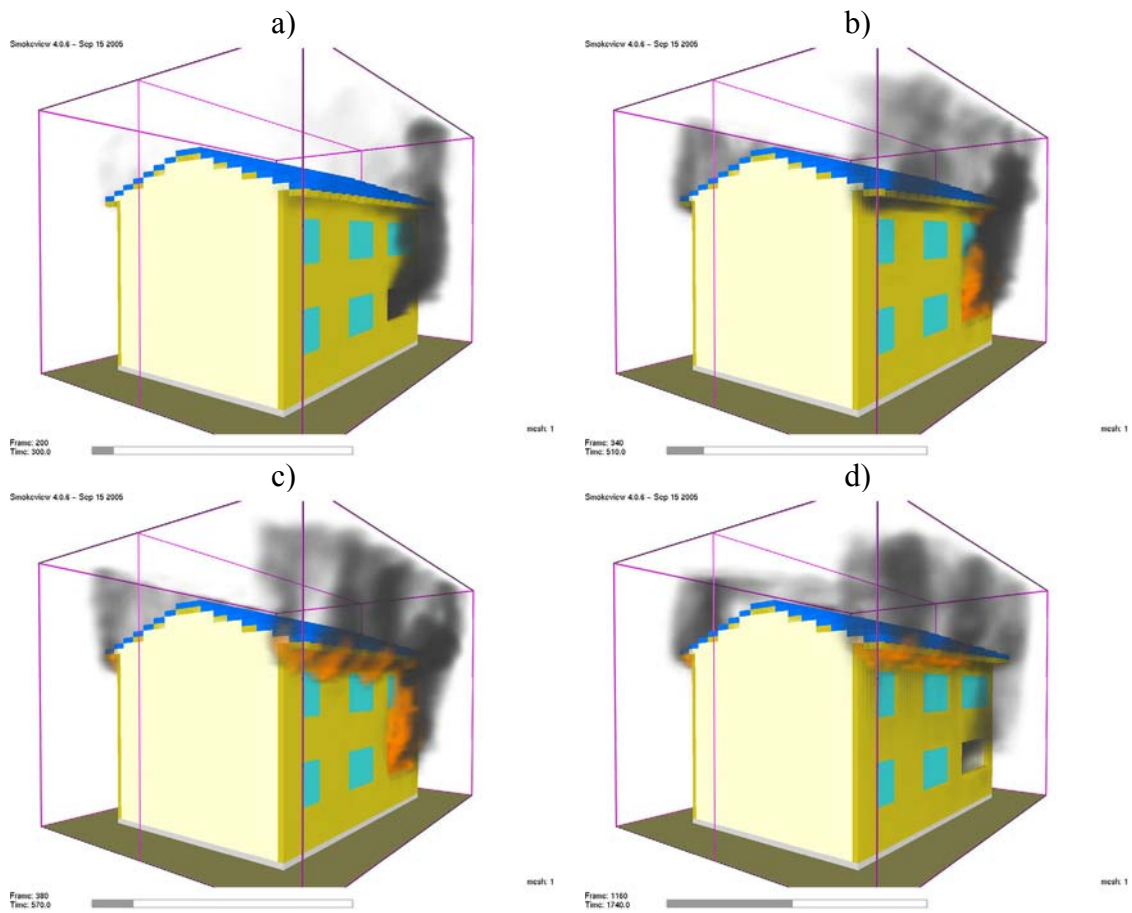


Kuva 109. Lämpösäteilykentän arvo katoksen keskellä sen etusivun normaalin suunnassa: a) yhden auton palolle ja b) kolmen auton palolle.

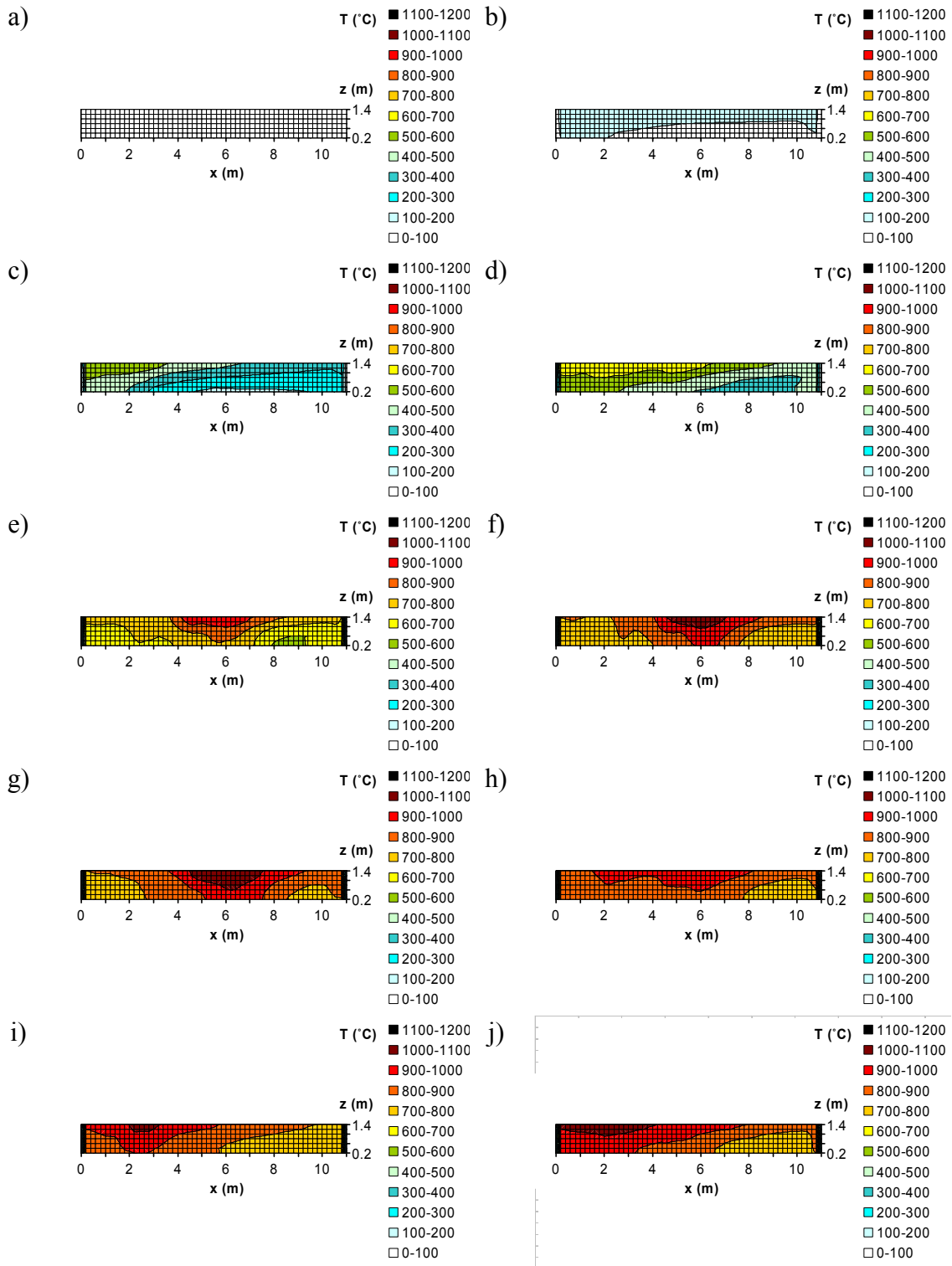
8.6 Yläpohjan ontelon palot

8.6.1 Huoneistopalon leviäminen yläpohjan onteloon ja ontelopalon kehittyminen

Jos huoneistopalo rikkoo palohuoneen ikkunan, niin palo leviää lähes varmasti yläpohjan onteloon, ellei sitä ole erikseen asianmukaisilla rakenneratkaistuilla estetty. Alla olevassa kuvassa 110 esitetään esimerkki huoneistopalon leviämisestä yläpohjan onteloon ja kuvassa 111 esitetään, miten ontelopalon lämpötila kehittyy ajallisesti sekä vaihtelee paikallisesti.



Kuva 110. Esimerkki huoneistopalon leviämisestä yläpohjan onteloon: a) palohuoneen ikkuna rikkoutuu, b) liekit lyövät ulos palohuoneen ikkunasta ja kulkeutuvat yläpohjan onteloon aiheuttaen sen rakenteiden pyrolysoitumisen, c) ontelon syntyneet palamiskyiset kaasut syttyvät ja d) ontelopalo jatkuu vielä huoneistopalon hiivuttua.

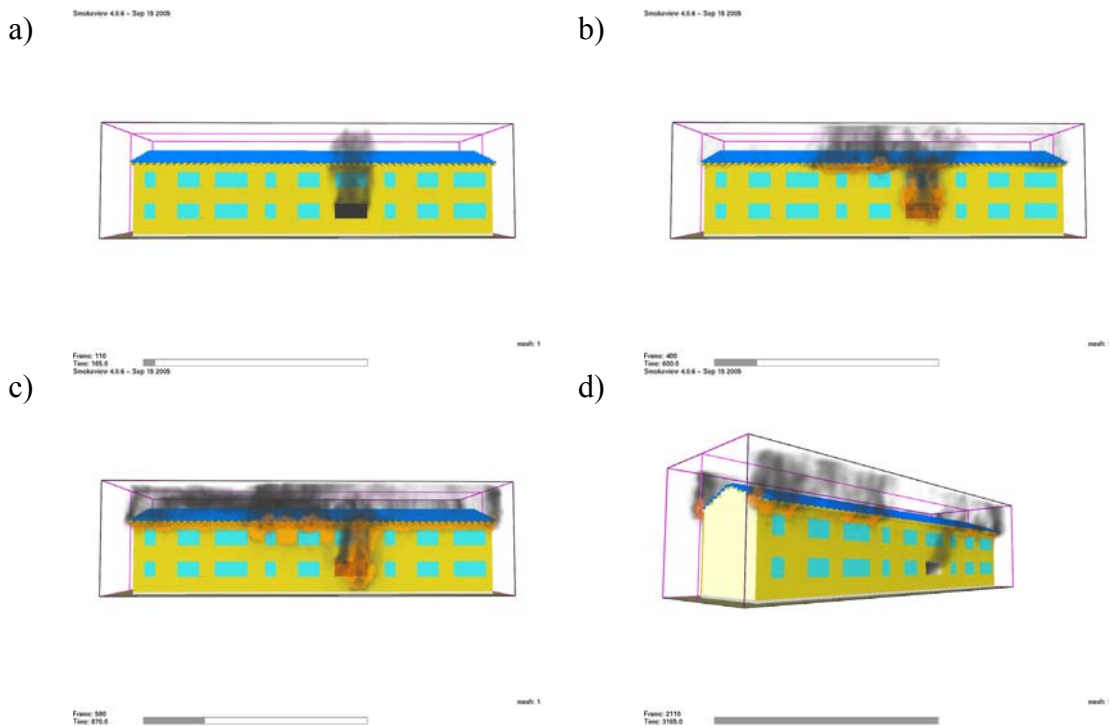


Kuva 111. Esimerkki yläpohjan ontelopalon lämpötilan ajallisesta kehitymisestä ja paikallisesta jakautumisesta: a) 0–6 min, b) 6–8 min, c) 8–10 min, d) 10–12 min, e) 12–14 min, f) 14–16 min, g) 16–18 min, h) 18–20 min, i) 20–22 min ja j) 22–24 min. Paikallisesti lämpötilajakauma on varsin epähomogeeninen vaihdellen täysin kehittyneessä palossa noin välillä 600–1100 °C.

8.6.2 Yläpohjan ontelopalon leviäminen muihin tiloihin

Jos yläpohjan onteloita ei ole osastoitu, niin tällöin yläpohjan onteloon levinnyt palo voi levitä nopeasti koko rakennuksen pituudelle. Tämä ei kuitenkaan ole relevantti uhkakuva nykyaikaisissa rakennuksissa, koska niissä yläpohjan ontelo on osastoitu huoneistoitain vesikattoon asti. Pelkkä ontelon osastointi ei kuitenkaan vielä riitä ontelopalon leviämisen estämiseen, ks. kuva 112, joka esittää, miten ontelopalopalo pääsee etenemään viereisiin onteloihin räystäään kautta kiertäen. Siksi räystäään kautta tapahtuvan palon etenemisen estäminen on yhtä tärkeää kuin onteloiden välisen osastoivan rakenteen huolellinen toteuttaminen.

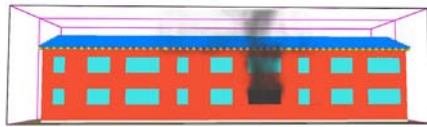
Kuva 7 esittää puuverhoiltua rakennusta, mutta on huomattava, että palo leviää oleellisesti samalla tavalla myös palamattomasta verhoilumateriaalista tehdyssä rakennuksessa, ks. kuva 113. Tuulen vaikutus näyttää sen sijaan olevan toisarvoinen tekijä, ks. kuva 114.



Kuva 112. Esimerkki yläpohjan ontelopalon leviämisestä, D-luokan materiaalilla verhoiltu rakennus: a) palohuoneen ikkuna rikkoutuu, b) palohuoneiston yläpohjan ontelossa palaa, c) ontelopalopalo on levinnyt viereisiin onteloihin huolimatta onteloiden välisestä osastoinnista ja d) onteloiden palot jatkuvat pitkään huoneistoplaan sammumisen jälkeen.

a)

Smokeview 4.8.4 - Sep 18 2005



b)

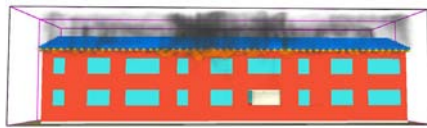
Smokeview 4.8.4 - Sep 18 2005



c)

Frame: 1000
Time: 1620.0
Smokeview 4.8.4 - Sep 18 2005

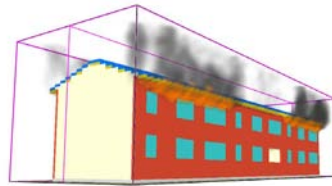
mesh: 1



d)

Frame: 2040
Time: 3010.0
Smokeview 4.8.4 - Sep 18 2005

mesh: 1

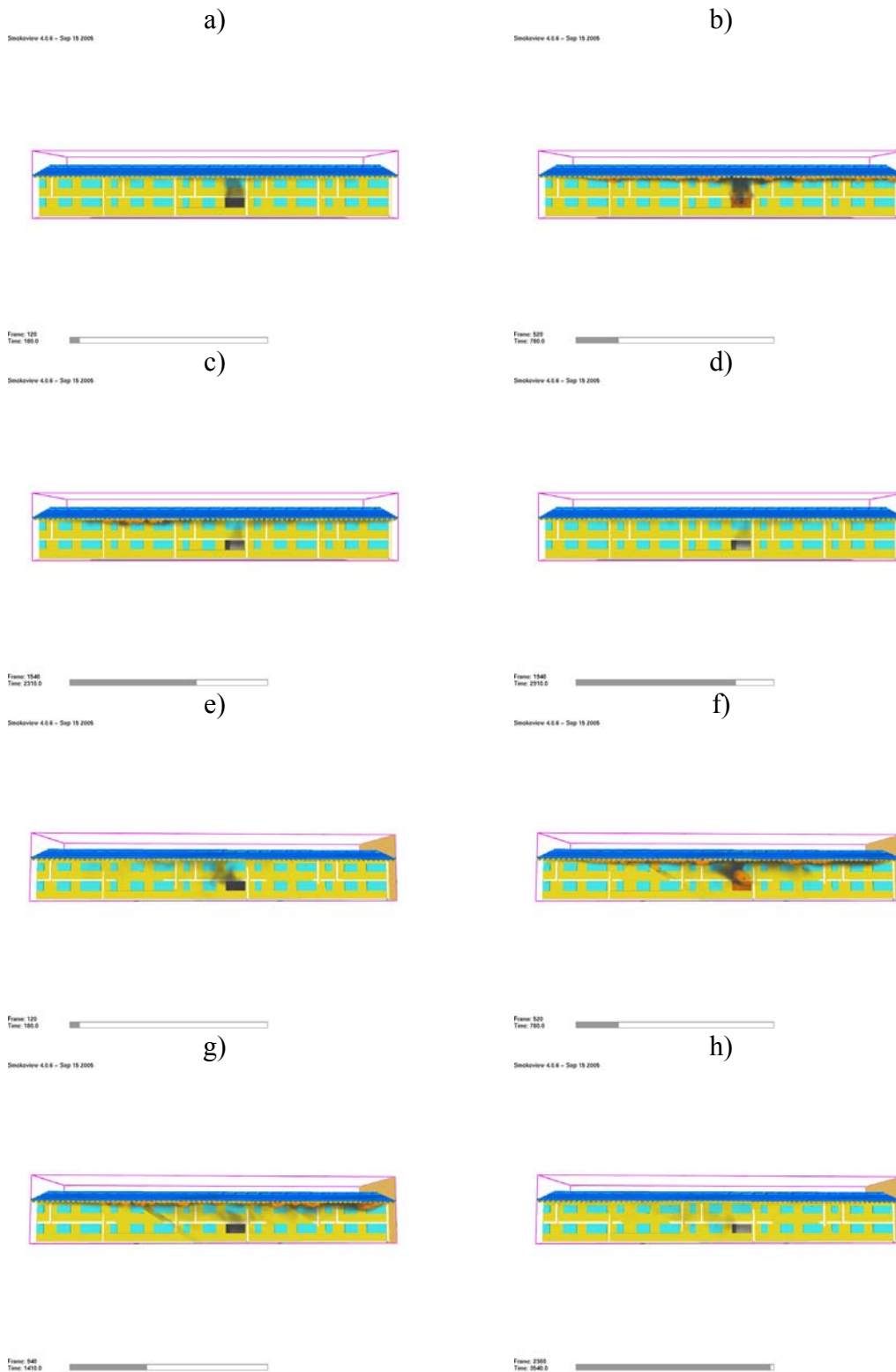
Frame: 1000
Time: 1620.0

mesh: 1

Frame: 2040
Time: 3010.0

mesh: 1

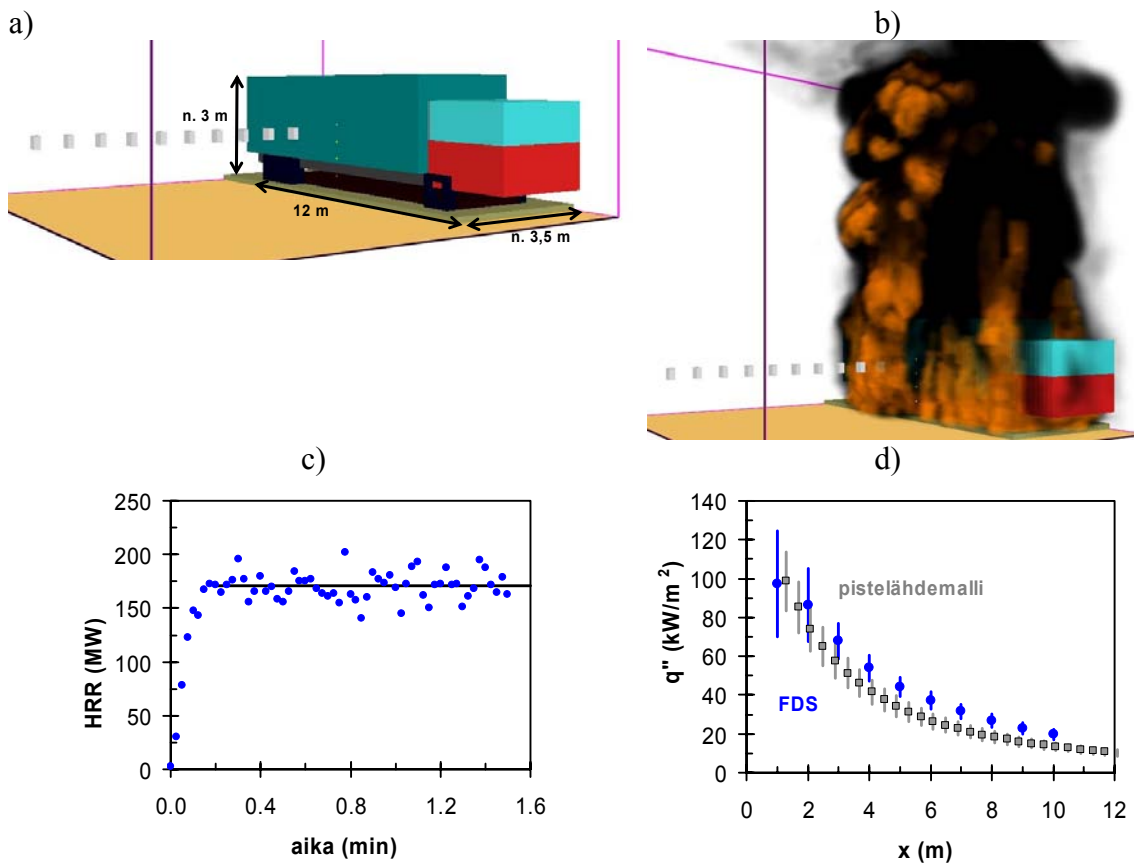
Kuva 113. Esimerkki yläpohjan ontelopalon leviämisestä, $\geq B$ -luokan materiaalilla verhoiltu rakennus: a) palohuoneen ikkuna rikkoutuu, b) palohuoneiston yläpohjan ontelossa palaa, c) ontelopalo on levinnyt viereisiin onteloihin huolimatta onteloiden välisestä osastoinnista ja d) onteloiden palot jatkuvat pitkään huoneistopalon sammumisen jälkeen.



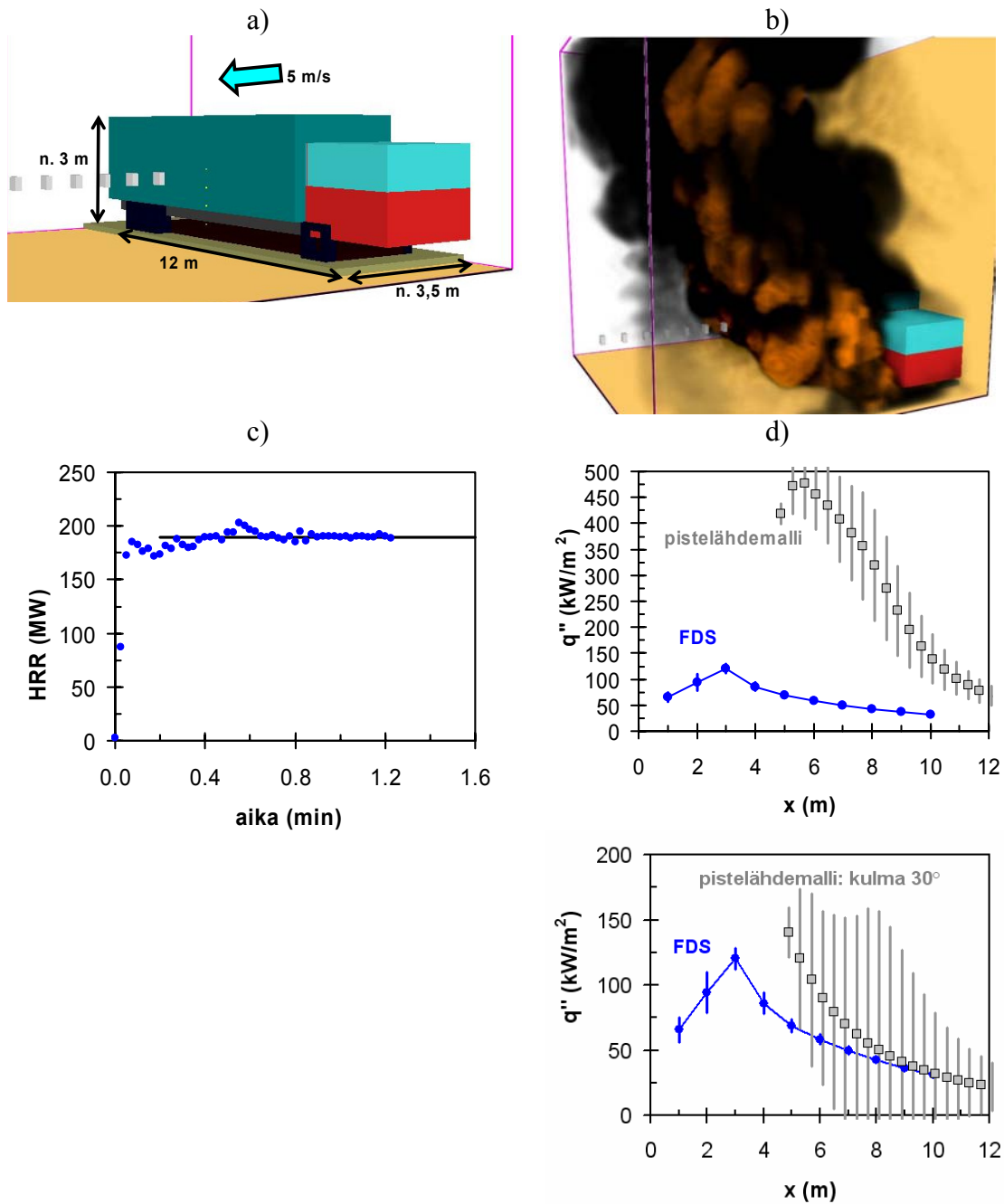
Kuva 114. Tuulen vaikutuksesta yläpohjan ontelopalon leviämiseen: a)–d) ontelopalon leviäminen tyynellä säällä ja e)–h) ontelopalon leviäminen, kun tilanteessa puhaltaa tuuli 5 m/s kuvassa oikealta.

8.7 Hyvin voimakkaiden palojen uhkakuvia, esimerkkinä säiliöauton palaminen

Esimerkkinä hyvin voimakkaasta tulipalon uhkakuvasta tarkastellaan säiliöauton palamista. Tällainen uhkakuva on hyvä esimerkki tapahtumasta, joka on mahdollinen, joskin äärimmäisen pienellä todennäköisyydellä. Kuten alla olevat kuvat esittävät, tällaisen tapahtuman seuraamukset voivat olla vakavat ja siihen varautuminen vaatisi hyvin pitkiä turvaetäisyyksiä, tuulisella säällä tuulen alapuolella jopa 15–20 m. Pienen todennäköisyytensä takia tällainen tapahtuma ei kuitenkaan ole sopiva mitoitustapahtuma, koska se riskin kannalta (todennäköisyys \times seuraamus) kuitenkin on pieni.



Kuva 115. Tankkiauton paloskenaario, ei tuulta: a) tankkiauton FDS-malli, b) havainnollistus palamisesta, c) paloteho, kun palon oletetaan aiheutuvan säilöistä noin nopeudella 5 L/s vuotavan polttonesteen palamisesta ja d) kohteen ympäristönsä lähettämän lämpösäteilyn suuruuden riippuvuus auton kyljestä mitatun etäisyyden.



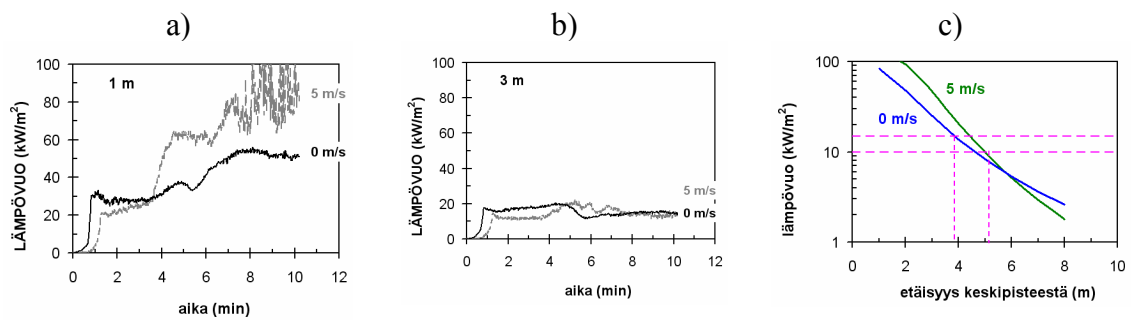
Kuva 116. Tankkiauton paloskenaario, tuuli: a) tankkiauton FDS-malli, b) havainnollistus palamisesta, c) paloteho, kun palon oletetaan aiheutuvan säilöistä noin nopeudella 5 L/s vuotavan polttonesteen palamisesta ja d) kohteen ympäristöön lähettämän lämpösäteilyn suuruuden riippuvuus auton kyljestä mitatun etäisyyden (kaksi eri pistelähdemallia on laskettu käyttäen liekin kallistuskulmalle kahta eri arvoa, 5 m/s:n tuulta vastaavaa kulma 63° ja 30° kulmaa).

8.8 Tuulen ja kasvillisuuden vaikutuksesta

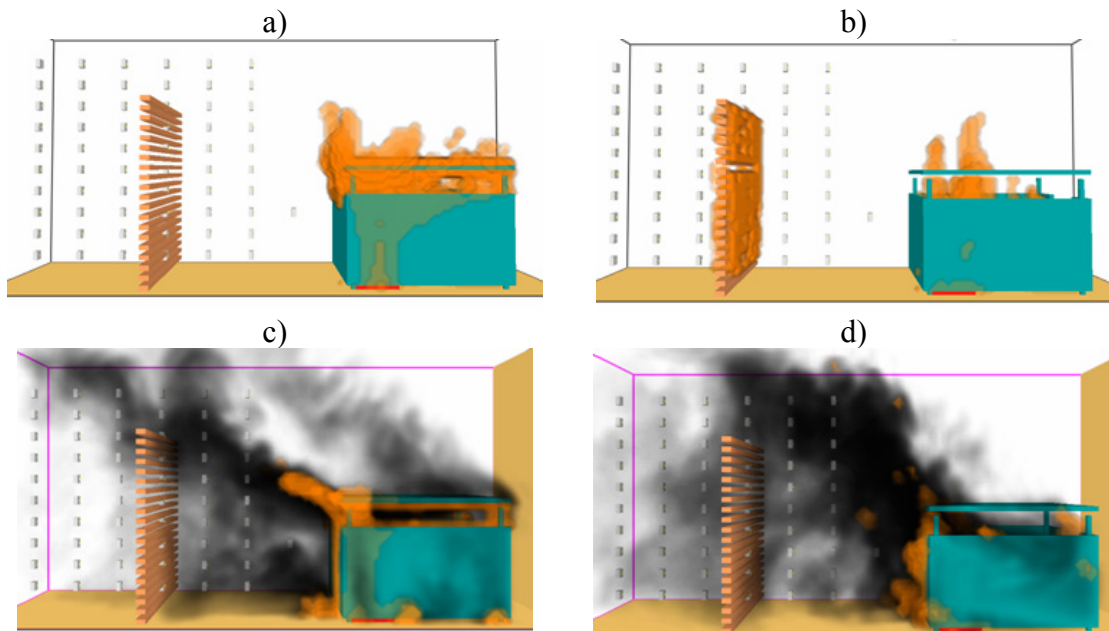
8.8.1 Tuulen vaikutuksesta

Tuulen vaikutusta on jo käsitelty jätekatosten ja autojen tulipalojen yhteydessä. Näitä tuloksia on vedetty yhteen kuvassa 117. Niistä voidaan havaita, että tuuli nostaa lämpövuota lähellä palavaa kohdetta, mutta kauempana tuulen vaikutus pienenee merkityksettömäksi.

Tuuli saattaa myös alentaa palovaaroja, koska sen jäähdyttävä vaikutus saattaa vähentää kohteiden syttymistä. Tästä esitetään esimerkki kuvassa 118.



Kuva 117. Esimerkki tuulen vaikutuksesta palon ympäristönsä kohdistaman lämpörasituksen: a) jätekatos, ei tuulta ja b) jätekatos, tuulen nopeus 5 m/s ja c) yksittäisen henkilöauton palo, tuuli 0 tai 5 m/s.



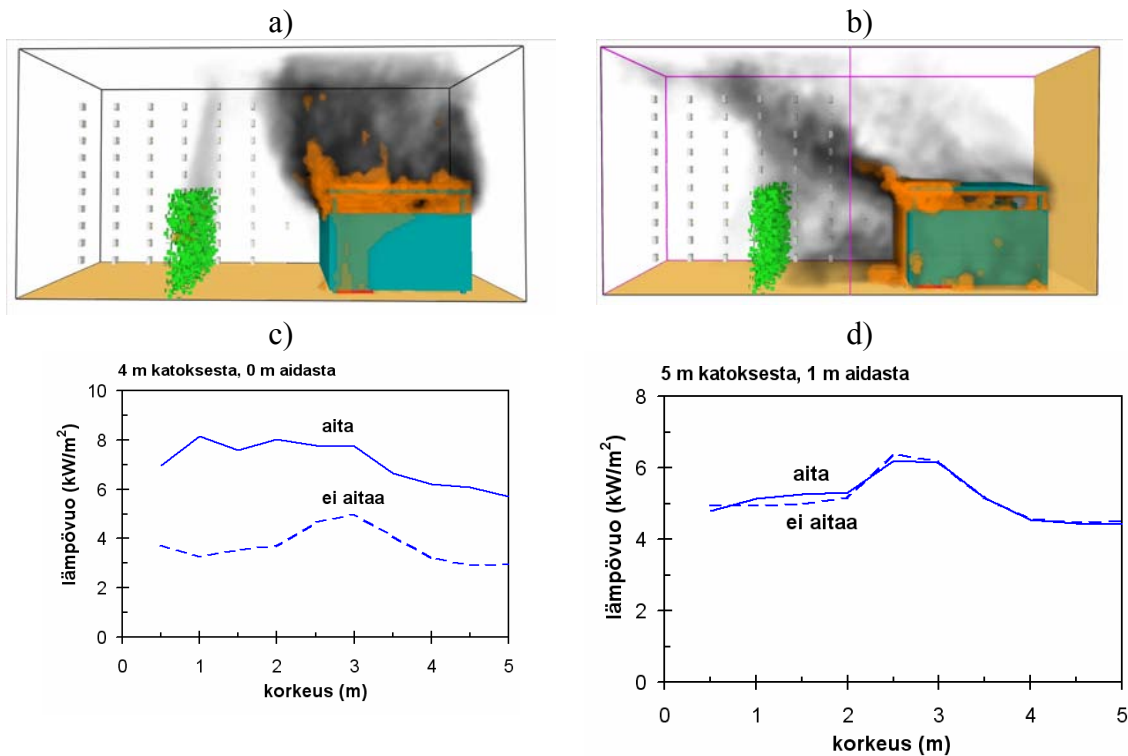
Kuva 118. Tuulen vaikutus uhatun kohteen syttymiseen: a) ja b) tilanne, jossa ei tuule: katosta lähellä oleva aita syttyy; c) ja d) tilanne, jossa tuulee 5 m/s: katosta lähellä oleva aita ei syty.

8.8.2 Pensaiden, puiden ja muun kasvuston vaikutuksesta

Alla olevassa kuvassa tarkastellaan, miten lehtiaita vaimentaa palavasta kohteesta tulevaa lämpösäteilyä. Aidan ominaisuudet ovat seuraavat:

- paksuus 0,5 m
- korkeus 2,5 m (n. katoksen korkeus)
- lehtien tilavuusosuus 0,5 %
- lehtien tiheys $3,6 \text{ kg/m}^3$.

Voidaan todeta, että ainakaan tässä tarkastelussa pensasaita ei vaikuta oleellisesti lämpösäteilyyn (Kuva b). Pensaan kohdalla sen palaminen nostaa lämpövuon arvoja (Kuva a).



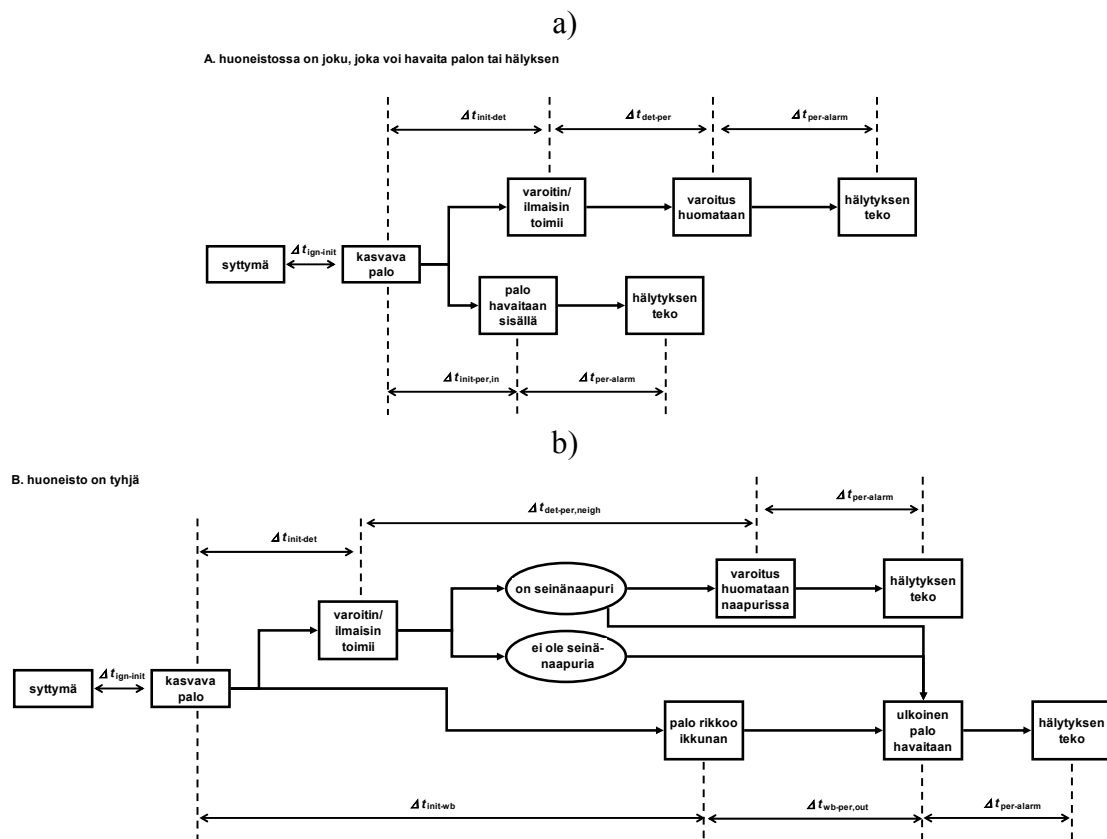
Kuva 119. Lehtiaidan vaikutuksen deterministinen laskenta FDS4-ohjelmalla. Esimerkkitapauksena jätekatoksen palo, kun a) ei tuule ja b) tuulee nopeudella 5 m/s. c) Lämpövuoto aidan kohdalla ja d) lämpövuoto 1 m päässä aidasta varjon puolella.

9. Palon havaitsemisen ja hälytyksen teon mallintaminen

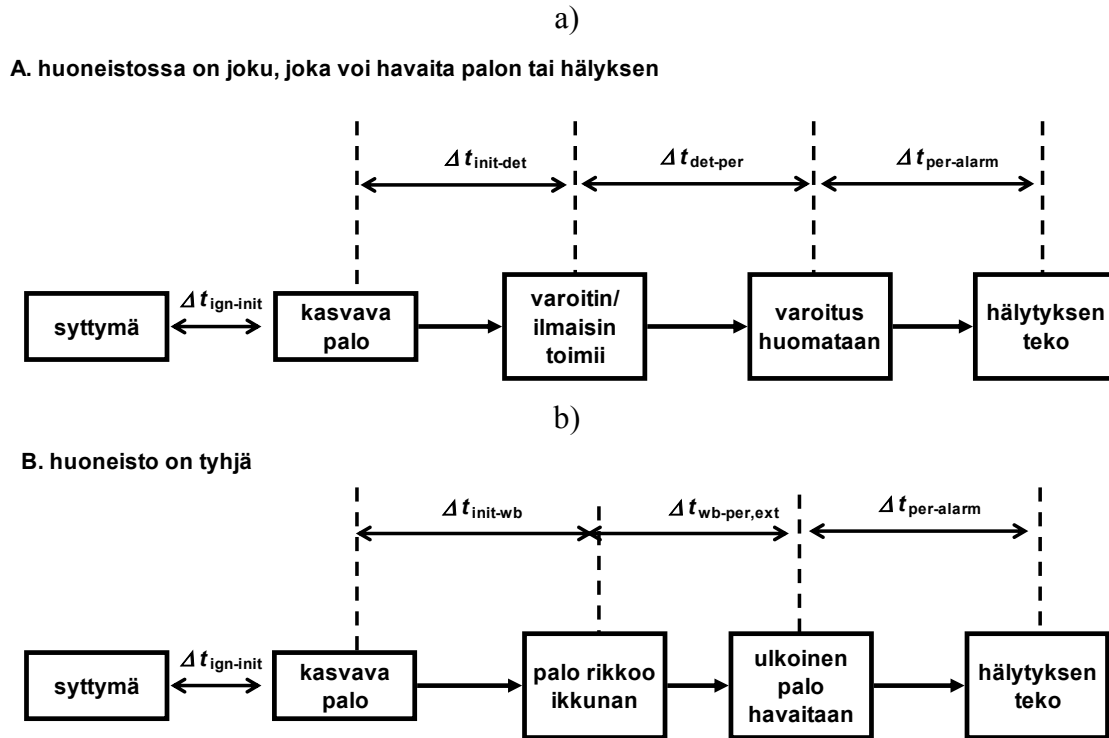
Palon havaitseminen voi tapahtua usealla eri tavalla uhkakuvasta ja useasta muusta tekijästä riippuen. Määrällisen kuvauksen luominen palon havaitsemiselle vaatii yksinkertaistaviin oletuksiin perustuvan mallin käyttöä. Seuraavassa esitetään oletukset ja niihin perustuva malli, joka soveltuvin osin noudattelee Korhosen ja Hietaniemen esitystä [Korhonen & Hietaniemi 2004].

9.1 Huoneistopalo

Palo voi tulla havaituksi silloin, kun se on vielä palohuoneiston sisällä palovaroittimen tai -ilmaisimen hälytyksen kautta siten, että varoitussignaali havaitaan joko palohuoneistossa tai seinänaapurissa tai vasta silloin, kun palo rikkonut palohuoneiston ja liekit löyvät ulos ikkunasta (Kuva 120).



Kuva 120. Palon havaitsemisen eri tapoja.



Kuva 121. Palon havaitsemisen yksinkertaistettu malli:

- a) palon alkamishuoneistossa on joku, joka voi tehdä havainnon ja hälytyksen ja
b) palon alkamishuoneistossa ei ole ketään.*

Tässä työssä palon havaitsemista tarkastellaan käyttäen kuvassa 121 esitettyä yksinkertaistettua mallia, jossa palo havaitseminen on jaoteltu sen mukaan, onko palon alkamishuoneistossa henkilöitä, jotka voivat havaita palovaroittimen tai -ilmaisimen hälytyksään ja tehdä hälytyksen palokunnalle vai ei. Tilannetta on yksinkertaistettu siten, että tarkasteltavaksi otetaan vain tilanteet, jossa palon alkamishuoneistossa palo havaitaan savuilmaisimen toimiessa ja lisäksi mahdollinen palovaroittimen signaalin havaitseminen naapurihuoneistossa jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Nämä molemmat johtavat turvallisella puolella olevaan arvioon palon havaitsemiseen kuluva ajasta. Tähän samaan suuntaan vaikuttaa myös se, että palon syttymisestä palon kasvamiseen mahdollisesti kuluva viive (esim. kytevän palon vaihe) jätetään ottamatta huomioon. Myös se mahdollisuus, että ulkopuoleiset henkilöt voivat nähdä tulen loimotusta sisällä huoneistossa jätetään käsittelemättä. Mallissa viive hälytyksen tekoon muodostuu seuraavista tekijöistä:

- $\Delta t_{\text{init-det}}$: palon kasvamisen alkamisesta palon ilmaisuun (detectio) kuluva aika;
- $\Delta t_{\text{det-per}}$: ilmaisimen toiminnasta laitteen antaman signaalin havaitsemiseen (perceptio) kuluva aika, esim. öiseen aikaan heräämiseen kuluva aika;

- $\Delta t_{\text{per-alarm}}$: viive palon ilmaisimen antaman signaalin havaitsemisesta siihen, että tehdään hälytyssoitto (alarm) palokuntaan;
- $\Delta t_{\text{init-wb}}$: palon kasvamisen alkamisesta palohuoneen ikkunan rikkoutumiseen (window breakage) kuluva aika;
- $\Delta t_{\text{wb-per,ext}}$: aika, jonka kuluessa havaitaan ikkunasta ulos lyövät liekit (perception of external flaming).

Nämä aikaviiveet voivat riippua vuorokauden ja vuodenajasta. Tässä työssä tarkastellaan erikseen ajanjaksoa elokuusta toukokuuhun, jolloin aikuiset ovat päiväsaikaan pääasiallisesti töissä ja lapset koulussa tai päiväkodissa sekä lomakautta (kesä- ja heinäkuu), jolloin ihmiset voivat olla lomailun vuoksi pitempiäkin aikoja poissa kotoa. Lomakausina ihmisten oletetaan olevan pois kotoa keskimäärin 50 % ajastaan ja lapsiperheissä lomakausien ulkopuolella 0,5–2 päivää kuukaudessa riippuen lapsien iästä ja lapsettomien aikuisten ja eläkeläisten kotitalouksissa 2 päivää kuukaudessa.

Vuorokaudenajat jaotellaan seuraavasti:

- aamuyö, klo 02–08: tämä on aika, jolloin todennäköisyys sille, että ihmiset ovat kotona on suurin ja todennäköisyys sille, että ulkona on kulkijoita, jotka voisivat havaita ulkoisen palon on pienin;
- aamupäivä, klo 08–12: aika, jolloin aikuiset ovat pääasiallisesti töissä ja lapset koulussa tai päiväkodissa;
- iltapäivä, klo 12–17: aika, jolloin kouluikäiset lapset palailevat kotiin;
- ilta ja alkuyö, klo 17–02: ainakin joku perheenjäsen on pääasiallisesti kotona.

Arvio sille, että joku henkilö on kotona lasketaan käsittelemällä edellä annettuja tietoja satunnaismuuttujina ja suorittamalla tilanteen Monte Carlo -tarkastelu. Tuloksena saadaan taulukossa esitetyt todennäköisyydet. Samalla tavalla laskettiin myös arvio todennäköisyydelle, että tiiviille ja matalalle rakentamistavalle tyypillisessä monen kotitalouden muodostamassa pihapiirissä kaikki huoneistot ovat yhtä aikaa tyhjinä. Osoittautuu, että tämä todennäköisyys on käytännössä nolla.

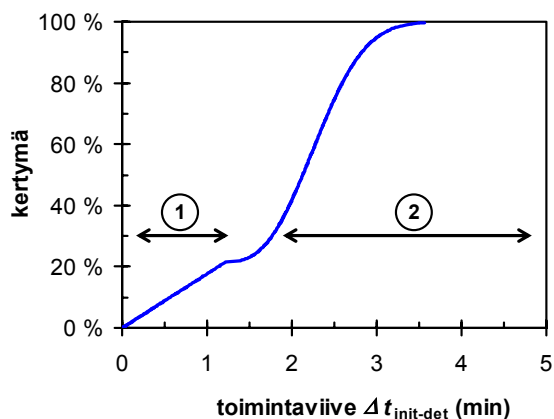
Taulukko 35. Palon havaitsemisen yksinkertaistetun mallin tekijöitä.

Tekijä	elo–toukokuu	kesä- ja heinäkuu
Todennäköisyys, että joku on kotona	<ul style="list-style-type: none"> • klo 02–08: 95 % • klo 08–12: 18 % • klo 12–17: 31 % • klo 17–02: 92 % 	<ul style="list-style-type: none"> • klo 02–08: 80 % • klo 08–12: 14 % • klo 12–17: 27 % • klo 17–02: 77 %
$\Delta t_{\text{init-det}}$	Ei riipu vuorokauden tai vuoden ajasta. Malli esitetään kohdassa 9.1.1.	
$\Delta t_{\text{det-per}}$	Ei riipu vuoden ajasta. <ul style="list-style-type: none"> • klo 02–08: heräämiseen kuluva aika, ks. kohta 9.1.2 • klo 08–12: 0 min • klo 12–17: 0 min • klo 17–22: 0 min • klo 22–02: heräämiseen kuluva aika, ks. kohta 9.1.2 	
$\Delta t_{\text{per-alarm}}$	Ei riipu vuorokauden tai vuoden ajasta. Malli esitetään kohdassa 9.1.3	
$\Delta t_{\text{init-wb}}$	Ei riipu vuorokauden tai vuoden ajasta. Malli esitetään kohdassa 9.1.4	
$\Delta t_{\text{wb-per,ext}}$	Riippuu vuorokauden ja vuoden ajasta. Malli esitetään kohdassa 9.1.5	

9.1.1 Palovaroittimen tai -ilmaisimen toiminta

9.1.1.1 Toimintaviive

Palovaroittimen (tai mahdollisen savuilmaisimen) toimintaa mallinnetaan käyttäen kuvassa 122 esitettyä laitteen toimintaviiveen jakaumana esitettyä tulosta (jakauman johtaminen esitetään liitteessä G). Tämä viive on se aika, joka kuluu ilmaisimen toimintaan siitä hetkestä, kun palo alkaa kehittyä voimakkaasti.



Kuva 122. Palovaroittimen tai -ilmaisimen toimintaviiveen tilastollinen malli: aikaväli (1) vastaa sitä, että palo alkaa samassa huoneessa, jossa ilmaisin on, ja (2) vastaa sitä, että palo alkaa eri huoneessa, kuin missä ilmaisin on. Aika lasketaan hetkestä, jolloin palo alkaa kehittyä voimakkaasti.

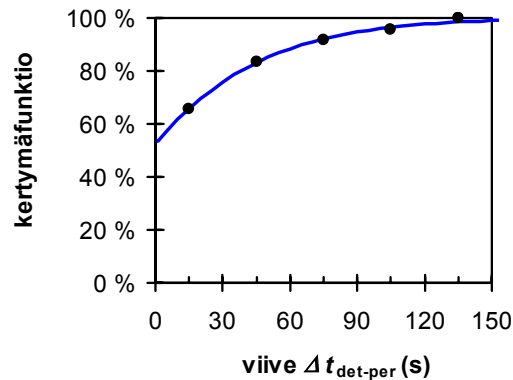
9.1.1.2 Laitteen toimintavarmuus

Palovaroittimien ja -ilmaisimien luotettavuus on rajallinen eli jossain tapauksissa laite ei hälytä, vaikka kohteessa onkin tulipalo. Laite ei myöskään voi hälyttää, jos sellaista ei kohteessa ole lainkaan, mutta tässä työssä pidetään lähtökohtana sitä, että tiiviit ja matalat pientaloalueet ovat uutta rakentamista ja siellä jokaisessa huoneistossa on vähintään patterikäyttöinen palovaroitin. Palovaroittimien ja -ilmaisimien oletetaan olevan savuilmaisimia. Palovaroittimien toimintavarmuudelle käytetään Törmäsen ja Raition [2002] kyselytutkimuksen tulosta, jonka mukaan palovaroitin ei toimi 7 %:ssa kotitalouksia. Paloilmaisimien toimintavarmuudelle käytetään Nyysösen ym. [2005, Table 7] määrittämää kriittisten virheiden esiintymistodennäköisyyttä 1,5–2,0 %, missä kriittinen virhe vastaa OREDAn [1992] mukaisessa virheiden luokittelu sitä, että laite ei toimi niin kuin sen pitäisi toimia⁴.

⁴ Kirjallisuudessa esitetään usein paljon alhaisempia savuilmaisimen toimintavarmuuden arvoja: esim. Hallin [1995] mukaan toimintavarmuus on noin 69 %, mutta tämä tulos on USA:ssa 1970–1980-luvuilla määritetty kotitalouksien savuvaroittimien toimintavarmuus, joka kertoo lähinnä toimivien pattereiden määrästä, ei laitteiden toimintavarmuudesta. Jos kyseinen luku kuvaisi laitteiden toimintavarmuutta, olisivat laitteet varsin kelvottomia, koska sen mukaan noin joka kolmas laite ei toimisi!

9.1.2 Öiseen aikaan palovaroittimen tai -ilmaisimen signaaliin havahtumiseen kuluva aika

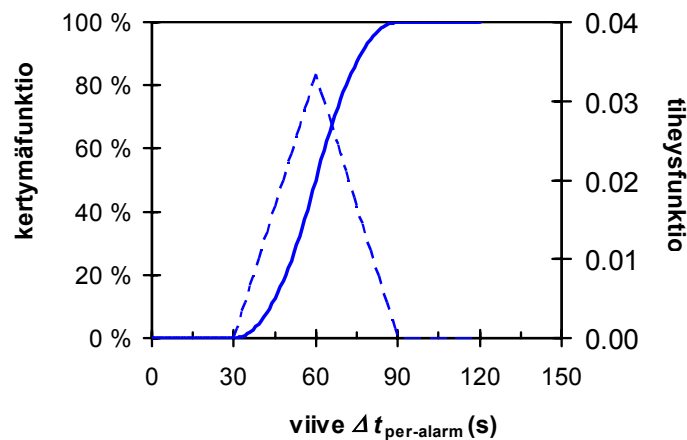
Hasofer [2001] on analysoinut Bruckin ja Horasanin [1995] tekemien palovaroittimen ääneen heräämistä koskevien kokeiden tuloksia. Nämä tulokset ja niille soveltuva tilastollinen malli (Weibull-jakauma) esitetään kuvassa 123.



Kuva 123. Ilmaisimen toiminnasta laitteen antaman signaalin havaitsemiseen kuluva aika, esim. öiseen aikaan heräämiseen kuluva aika.

9.1.3 Palovaroittimen tai -ilmaisimen signaalin kuulemisesta hälytykseen kuluva aika

Viiveestä palovaroittimen tai -ilmaisimen signaalin kuulemisesta hälytyksen tekemiseen ei ole saatavilla määrällistä tilasto- tai koeaineistoa. Tässä työssä tämän viiveen oletetaan olevan 30 s:sta 90 s:iin. Jakauma käytetään kolmiojakaumaa, jonka huippu on 60 s:n kohdalla (Kuva 124).



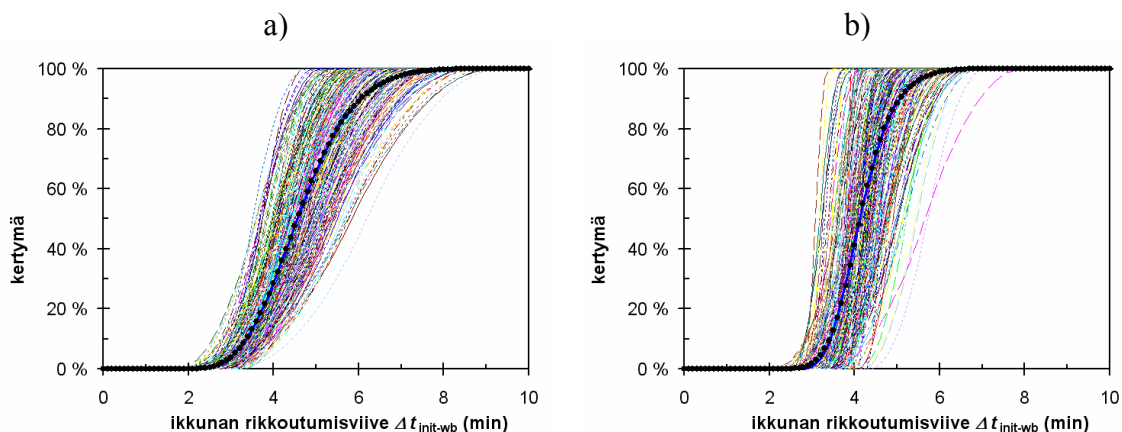
Kuva 124. Ilmaisimen antaman signaalin havaitsemisesta hälyttämiseen kuluva aika.

9.1.4 Viive palon kasvamisen alusta palotilan ikkunan rikkoutumiseen

Ikkunan särkymistä arvioidaan seuraavasti:

- ikkunan rikkoutuminen tulee mahdolliseksi, kun palotilan lämpötila nousee 400 °C:seen,
- ikkunan rikkoutumisen ajoituksen takaraja on hetki, jolloin palo saavuttaa täysin kehittyneen palon vaiheen.

Kun edellä mainittuja aikoja käsitellään kolmiojakauman (asiantuntija-arviolle sopiva jakauma) minimi- ja maksimiarvoina sekä asetetaan kolmiojakauman huippu näiden kahden ajan keskiarvon kohdalle, saadaan kuvassa 125 esitetyt tulokset olohuoneen ja makuuhuoneen tai keittiön tulipaloille. Jakaumien otoksien keskiarvot voidaan kuvata 3-parametrisella gammajakaumilla, joiden keskiarvot ja 80 % fraktiilit ovat 4,7 min ja 5,5 min (olohuoneen tulipalo) sekä 4,2 min ja 4,7 min (makuuhuoneen tai keittiön tulipalo).



Kuva 125. Palon kasvamisen alkamisesta palohuoneen ikkunan rikkoutumiseen kuluva aika: a) olohuonepalo ja b) makuuhuoneen tai keittiön tulipalo.

9.1.5 Ulkoisen liekehtimisen havaitsemisaika

Jos paloa ei havaita siinä vaiheessa, kun se on rajoittunut palohuoneiston sisälle, niin silloin se lopulta joko hiipuu ja sammuu itsestään kenenkään huomaamatta, jolloin kyseessä ei ole aluepalo tai sitten se särkee palohuoneen ikkunan, jolloin se voidaan havaita aistein avulla: naapurit ja muut ulkopuoleiset henkilöt voivat nähdä ulos rikkoutuneesta ikkunasta lyövät liekit tai niiden aiheuttaman valoa tai kuulla tulen rätinää. Vaikka liekkejä tai niiden tuottamaa valoa ei nähtäisikään, niin päiväsaikaan rikkoutuneesta

ikkunasta lyövät liekit tulevat havaituksi ennen pitkää niin muodostaman savupatsaan vuoksi. Öiseen aikaan savun havaitseminen on vaikeampaa, mutta toisaalta silloin liekkien synnyttämä valo näkyy paljon päiväaikaa pidemmälle.

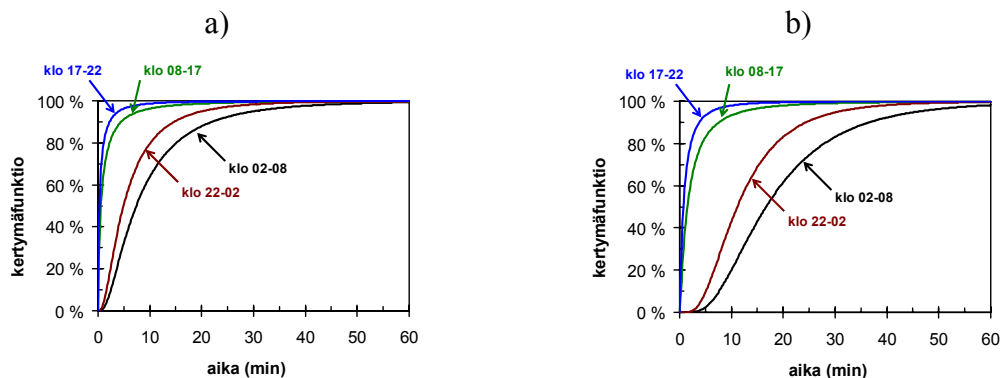
Ulkoisen liekehähdinnän aistinvaraisesta havainnoinnista ei ole tilasto- tai koetietoja. Sille käytetään taulukossa esitettyä heuristista mallia, jonka määrällinen kuvaus käyttäen logaritmista normaalijakaumaa esitetään kuvassa .

Taulukko 36. Ulkoisen palon havaitsemisen malli.

Aika	palon havaitsemistodennäköisyys ja siihen liittyvä aika ^{a),b)}	
	elokuu–toukokuu	kesäkuu tai heinäkuu
• klo 02–08	50 %: 7.5 min 80 %: 15 min 95 %: 30 min	50 %: 15 min 80 %: 30 min 95 %: 45 min
• klo 08–12 & 12–17	50 %: 1 min 80 %: 2 min 95 %: 8 min	50 %: 2 min 80 %: 4 min 95 %: 12 min
• klo 17–22	50 %: 0.5 min 80 %: 1 min 95 %: 4 min	50 %: 1 min 80 %: 2 min 95 %: 6 min
• klo 22–02	50 %: 5 min 80 %: 10 min 95 %: 20 min	50 %: 10 min 80 %: 20 min 95 %: 30 min

a) Käytetty merkintätapa tarkoittaa, että esim. aikavälillä 02–08 puolet paloista havaittaisiin 7,5 minuutin kuluessa, neljä viidestä 15 minuutin kuluessa ja yksi kahdestakymmenestä palosta ei tulisi huomatuksi vielä puolenkaan tunnin kuluttua.

b) Lähtökohdaksi on otettu, että aikavälillä 17–22 palo havaitaan suhteellisen nopeasti, aikavälillä 08–17 havaitsemisen todennäköisyys on tekijällä kaksi pienempi, aikavälillä 22–02 havaitsemisen todennäköisyys on vielä pienempi eli palon alussa tekijällä 5 pienempi ja pitemmän ajan kuluttua tekijällä 2,5 pienempi ja aamuyöstä vielä tekijällä 1,5 ajanjakson 22–02 todennäköisyyttä pienempi.



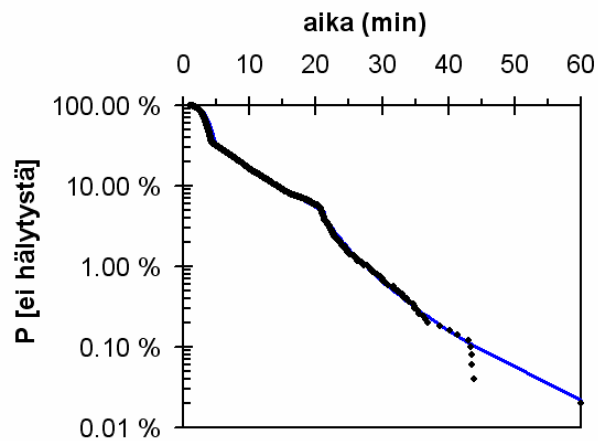
Kuva 126. Ulkoisen liekehähdinnän aistinvaraisen havaitsemisen malli:
a) elokuu–toukokuu ja b) kesäkuu tai heinäkuu.

9.1.6 Huoneistopalon havaitsemisen ja hälytyksen teon mallintamisen yhteenveto

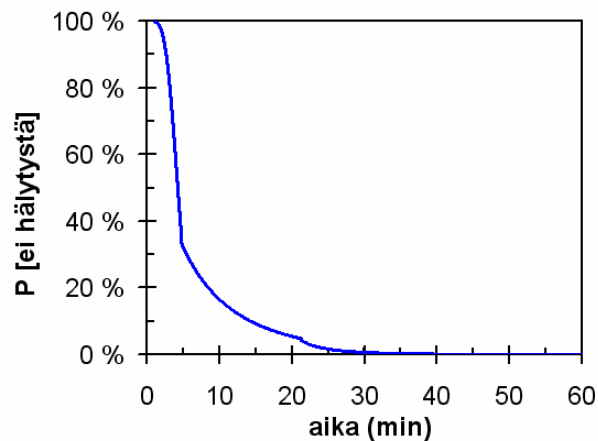
Huoneistopalon havaitsemisen ja hälytyksen teon analysoinnin yksityiskohdat esitetään liitteessä I. Mallin lopputulos esitetään kuvassa 127. Havaitsemisen jakaumaa luonnehtivat seuraava keskimääräinen (mediaani) arvo ja fraktiiliarvot:

- mediaani: 3,8 min
- 5 %:n fraktiiliarvo: 21 min
- 1 %:n fraktiiliarvo: 28 min
- 0,1 %:n fraktiiliarvo: 43 min.

a)



b)



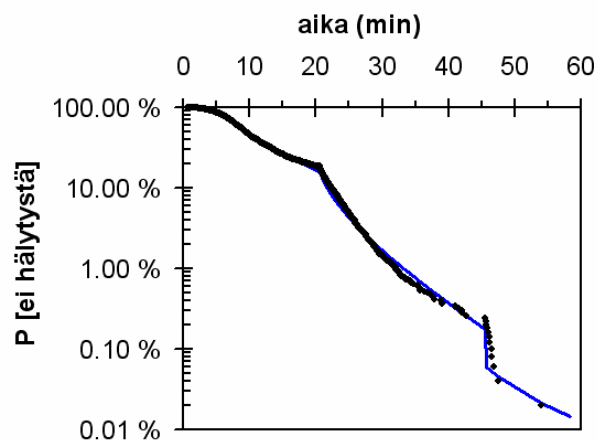
Kuva 127. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulos:
a) logaritminen ja b) lineaarinen todennäköisyysasteikko.

9.2 Muiden kohteiden kuin asuinhuoneistojen palot

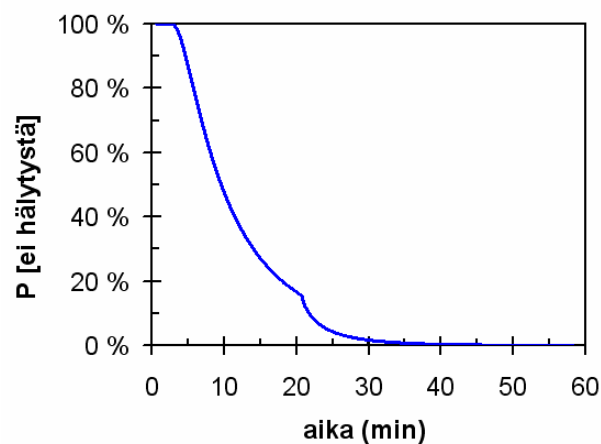
Muiden kohteiden kuin asuinhuoneistojen palojen havaitseminen perustuu liekkien tai syntyvän savun tai muun ilmiön kuten äänen havaitsemiseen. Se voidaan mallintaa käyttäen samaa mallia kuin huoneistopalon havaitsemisessa tilanteessa, jossa siellä ei ole paloon reagoimaan kykenevää henkilöä. Jakauma esitetään kuvassa 128.

- mediaani: 9,5 min
- 5 %:n fraktiiliarvo: 24 min
- 1 %:n fraktiiliarvo: 32 min
- 0,1 %:n fraktiiliarvo: 47 min.

a)



b)



Kuva 128. Muun kohteen palon kuin huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulos: a) logaritminen ja b) lineaarinen todennäköisyysasteikko.

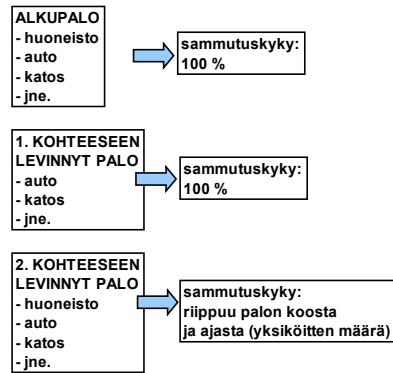
10. Palokunnan toimintamahdollisuuksien mallintaminen

Tässä työssä arvioidaan palokunnan toimintaa sen sammutusmahdollisuuksien kannalta. Niihin vaikuttaa se, milloin palokunta pääsee aloittamaan palon sammuttamisen ja miten suuri palo tuolla hetkellä on.

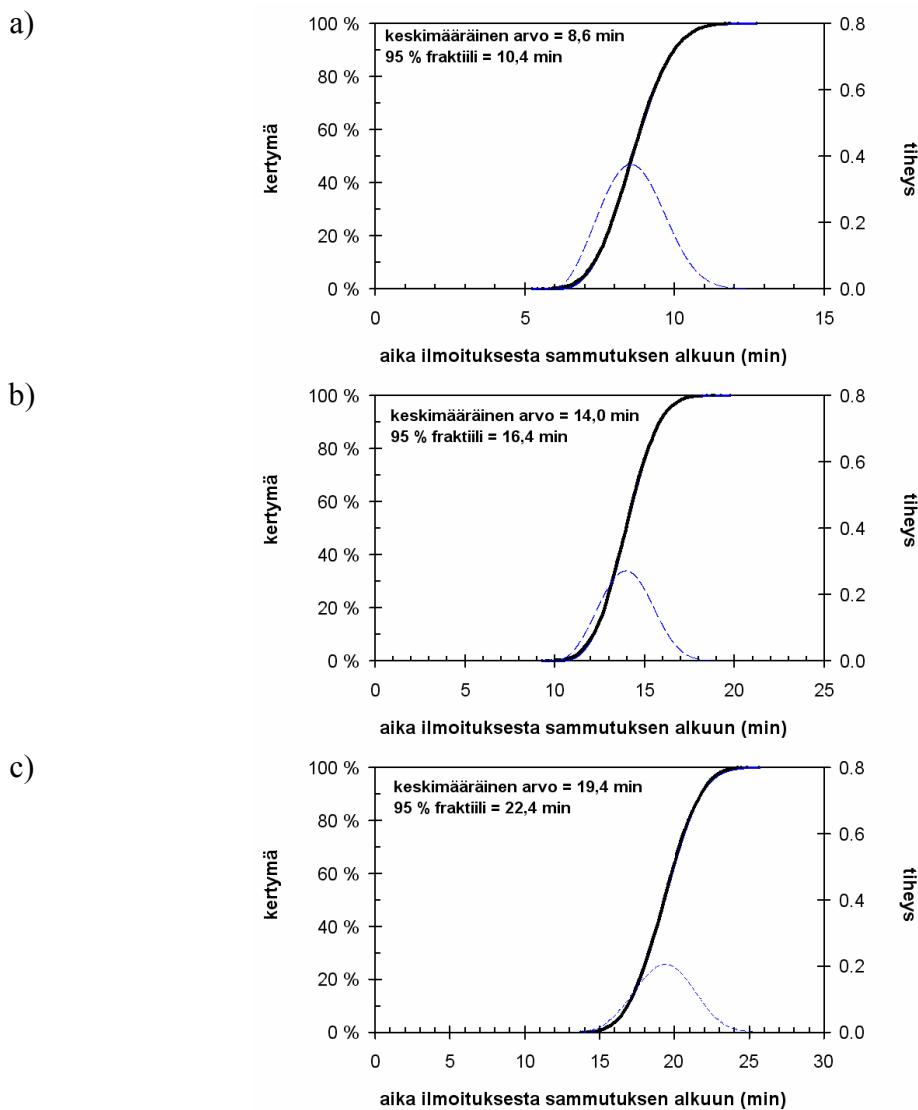
Palokunnan arvioidaan kykenevän sammuttamaan alkupalot, jotka liittyvät huoneistojen, autojen, katosten, jne. paloihin samoin kuin palot, joissa kyseinen alkupalo on levinnyt johonkin lähellä olevaan kohteeseen, kuten verantarakenne, aita, katos, auto, jne. (Kuva 129). Jos palo etenee vielä tästä eteenpäin eli esim. toiseen huoneistoon, katokseen, jne., palon voimakkuus voi olla niin suuri, että palokunta ei saa sitä sammumaan ennen lisäyksikköjen saapumista ja siten palokunnan sammutuskyky riippuu palon voimakkuudesta ja ajasta. Erittäin voimakkaiden alkupalojen uhkakuvissa palokunnan arvioidaan kuitenkin olevan voimaton alkupalon sammuttamiseen (ainakin ennen lisävoimien saamista paikalle).

10.1 Viive hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen

Palokunnan toiminta-aikaa arvioidaan yksityiskohtaisesti liitteellä G. Saadut tulokset esitetään kolmelle eri palokunnan ja palopaikan väliselle etäisyydelle kuvassa 130. Niiden mukaan hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen kuluu etäisyydestä riippuen keskimäärin 9–19 minuuttia. Tässä työssä tehtävässä mallintamisessa käytetään kuitenkin koko jakaumia, ei vain keskimääräisiä arvoja, joten joissa tarkasteltavissa tapauksissa sammuttamisen alkuun voi kestää varsin pitkä aika (joskin se on varsin epätodennäköistä). Kuvassa 130 esitetyt arvot liittyvät palokunnan toimet hälytyksestä laskettuun aikaan. Palon leviämismahdollisuuksien kannalta on olennaista kuitenkin se, miten kauan aikaa kuluu suhteessa palon kehittymiseen ja tässä tulee ottaa huomioon palon havaitsemisen vaiheet, jota tarkastellaan seuraavassa.



Kuva 129. Arvio palokunnan sammutuskyvystä palon leviämisen eri vaiheissa: muut paitsi erittäin voimakkaat alkupalot.



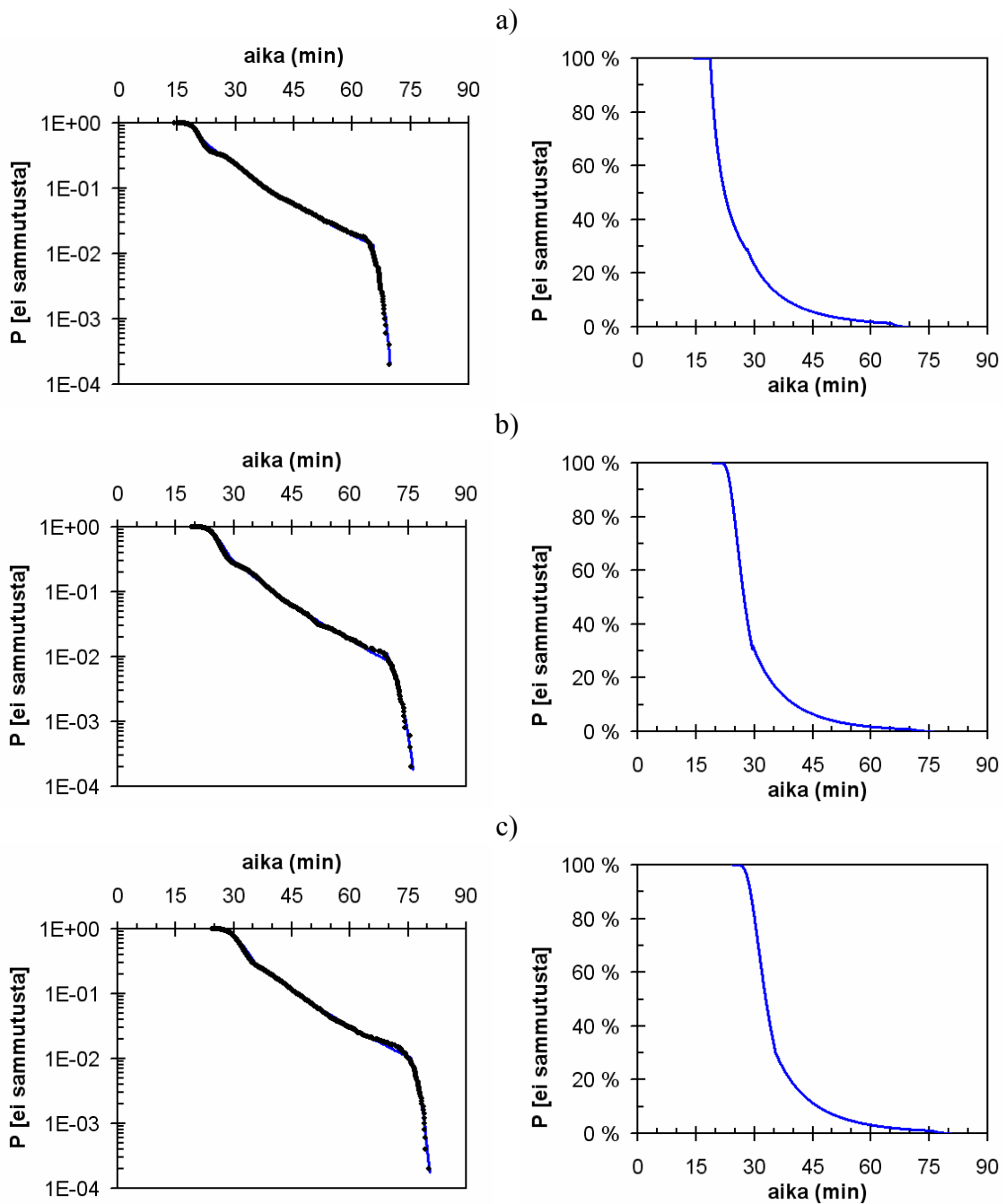
Kuva 130. Arvio hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen kuluvalle ajalle, kun palokunnan etäisyys palopaikalta on: a) 5 km, b) 10 km ja c) 15 km. Huom: eri kuvien aika-akselit ovat erilaiset.

10.2 Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle

Kun tässä luvussa esitetyt palokunnan toiminta-aikaa kuvaavat mallit yhdistetään hälytysajan mallin (luku 9) antamiin tuloksiin, saadaan kuvassa 263 esitetty tulos. Tähän tulokseen johtaneet tarkastelut esitetään yksityiskohdissaan liitteessä F. Käyrät esittävät todennäköisyyttä sille, että palon sammuttaminen ei ole vielä alkanut. Jakaumia luonnehtivat taulukossa 37 esitetyt tunnusluvut.

Taulukko 37. Palon kasvamisen alkamisesta sammuttamisen aloittamiseen kuluva aikaa kuvaavien kuvassa 131 esitettyjen todennäköisyysjakaumien tunnuslukuja.

Todennäköisyys, että sammutus <u>ei ole</u> alkanut			
aika	palokunnan ajo- matka 5 km	palokunnan ajo- matka 10 km	palokunnan ajo- matka 15 km
10 minuuttia	100 %	100 %	100 %
15 minuuttia	99,97 %	100 %	100 %
20 minuuttia	73 %	100 %	100 %
30 minuuttia	23 %	30 %	80 %
45 minuuttia	5,6 %	6,5 %	11 %
60 minuuttia	1,9 %	1,9 %	3,1 %
75 minuuttia	~ 0 %	0,04 %	1 %



Kuva 131. Arvio palon kasvamisen alkamisesta sammuttamisen aloittamiseen kuluvalle ajalle, kun palokunnan etäisyys palopaikalta on: a) 5 km, b) 10 km ja c) 15 km. Käyrät esittävät todennäköisyyttä sille, että palon sammuttaminen ei ole vielä alkanut. Vasemman puoleisissa kuvissa käytetään logaritmista todennäköisyysasteikkoa ja oikeanpuoleisissa lineaarista todennäköisyysasteikkoa.

OSA III: TULOKSET

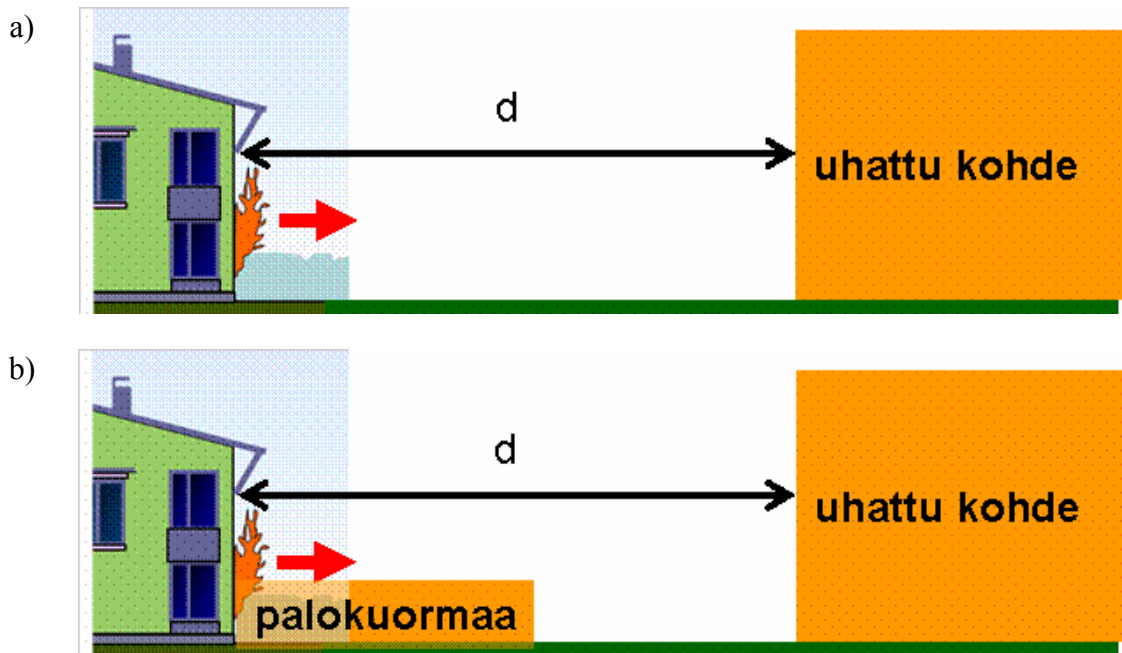
11. Palon alkukehityksen analysointi ajastariippuvina tapahtumaketjuina

Tässä luvussa sovelletaan ajastariippuvien tapahtumaketjujen menetelmää ensimmäisen syttymisen todennäköisyyden määrittämiseksi. Tarkasteltu tilanne on olohuonepalon leviäminen (Kuva 132a). Olohuoneen aukkojen suhteen tarkastellaan yleistettyä tilannetta, jossa aukkojen osuus vaihtelee satunnaisesti välillä 10–40 % lattiapinta-alasta. Vertailuissa perustapauksena on tapaus, jossa rakennuksen julkisivu on paloluokkaa B tai parempi, palokunnan etäisyys on 10 km ja riskitaso 0,5 %.

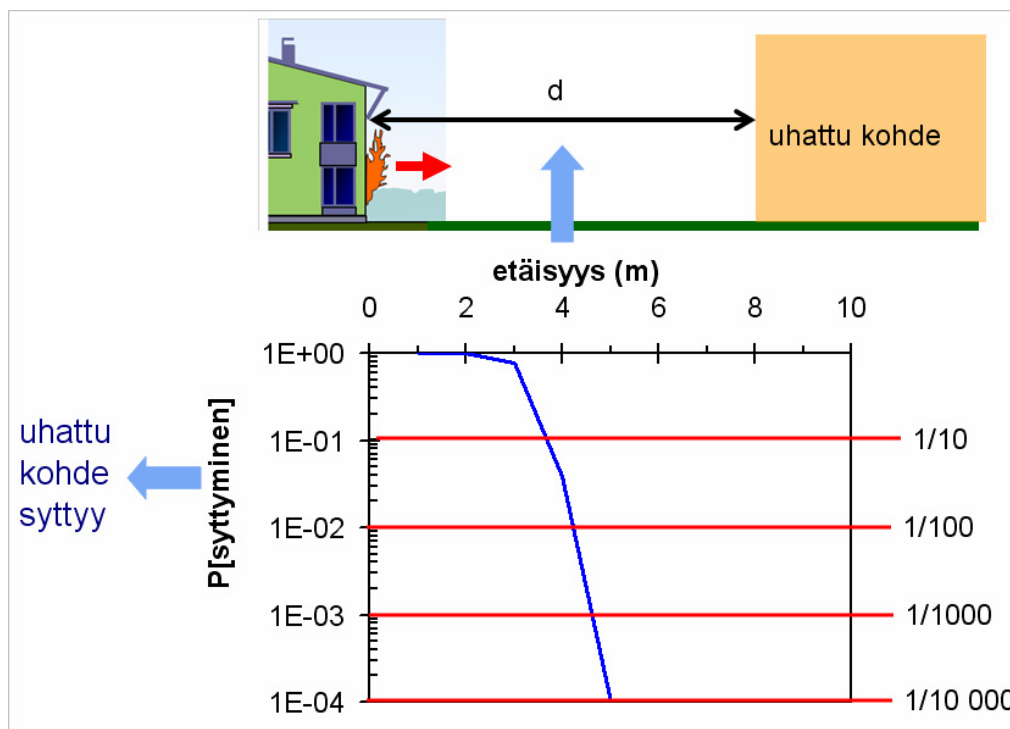
Tarkastelujen tavoitteena on

- selvittää seuraavien paloturvallisuuden vaikuttavien tekijöiden vaikutus turvalliseen etäisyyteen:
 - riskitaso,
 - julkisivun paloluokka,
 - aukkojen koko,
 - huoneen koko,
 - sprinklaus,
 - paloilmotitimet,
 - palokunnan etäisyys,
 - ulkoisen palokuorma (Kuva 132b),
- valitun riskitason, syttymisen todennäköisyyksien ja turvallisen etäisyyden riippuvuuden määrittäminen luvussa 12 esitettävän turvallisten etäisyyksien laskentamenetelmän perustaksi.

Esitettävien graafien lukemisohe esitetään kuvassa 133.



Kuva 132. Tarkastellut tilanteet: a) palon leviäminen tapauksessa, jossa ei ole ulkoista palokuormaa (perustapaus) ja b) tapaus, jossa on ulkoista palokuormaa.



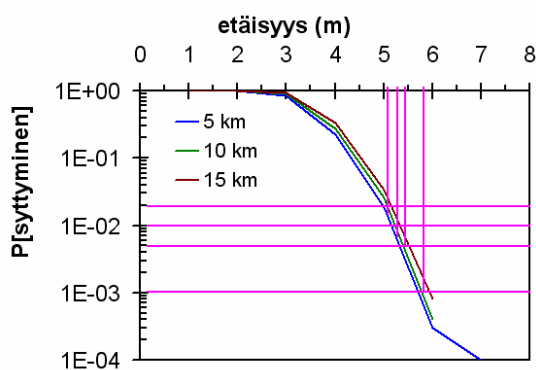
Kuva 133. Esitettyjen graafien lukemisohe.

11.1 Huonepalo ilman ulkoista palokuormaa

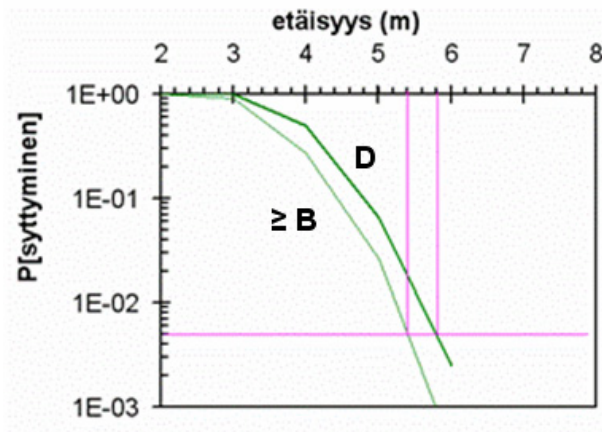
Kuvissa 135–140 esitetään valitun riskitason, julkisivun paloluokan, tilan ja sen aukkojen koon, sprinklauksen, paloilmottimien ja palokunnan etäisyyden vaikutus turvalliseen etäisyyteen. Tulokset vedetään yhteen taulukossa 38.

Taulukko 38. Riskitason, julkisivun paloluokan, tilan aukkojen koon, sprinklauksen, paloilmottimien ja palokunnan etäisyyden vaikutus turvalliseen etäisyyteen. ”+” merkitsee, että turvaetäisyysvaatimus kasvaa ja ”-”, että se pienenee.

Tekijä	Vaikutus
riskitaso	2 % → 0,1 %: +17 %
julkisivun paloluokka,	+ 7 %
aukkojen koko	- 20 %
huoneen koko	-17 %
sprinklaus	-20 – -55 %
paloilmottimet	-11 %
palokunnan etäisyys	5 km → 10 km %: +2 % 10 km → 15 km %: +2 %

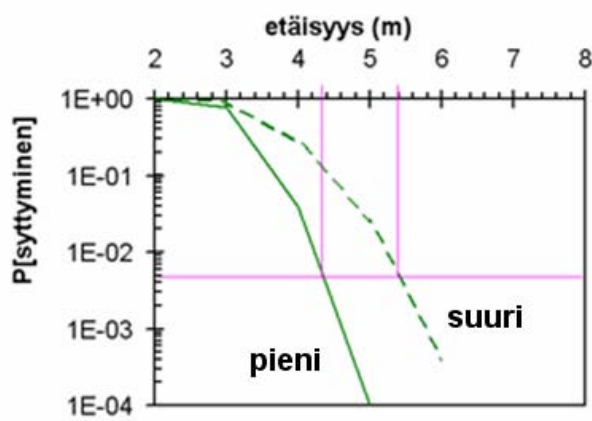


Kuva 134. Olohuonepalo: syttymistodennäköisyyden riippuvuus syttyvän kohteen etäisyydestä palavan huoneen ikkunasta erilaisille palavan kohteen julkisivun palokäyttäytymisille. Aukkojen osuus lattiapinta-alasta on 10–40 % (keskimääräinen arvo noin 25 %).



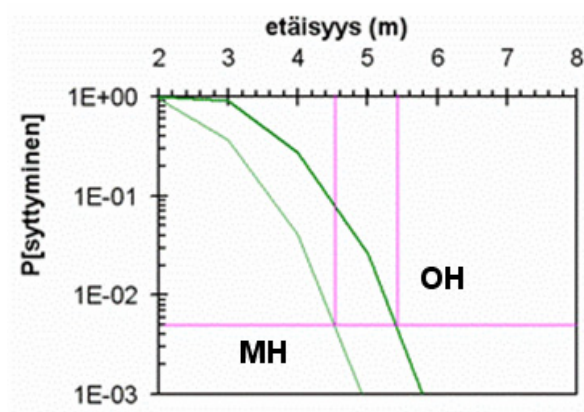
Ero ~ +40 cm = +7 %

Kuva 135. Olohuonepalo: julkisivun paloluokan vaikutus turvaetäisyyteen.



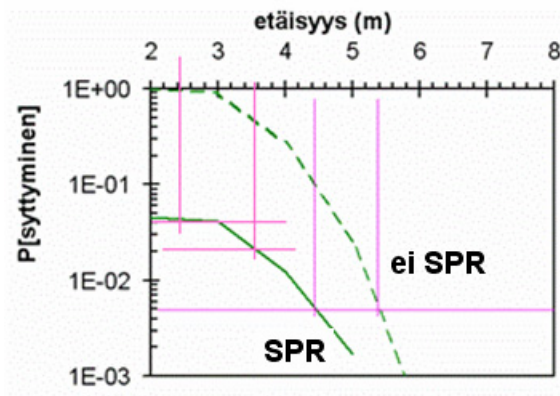
Ero ~ -100 cm = -20 %

Kuva 136. Olohuonepalo: aukon koon vaikutus turvaetäisyyteen.



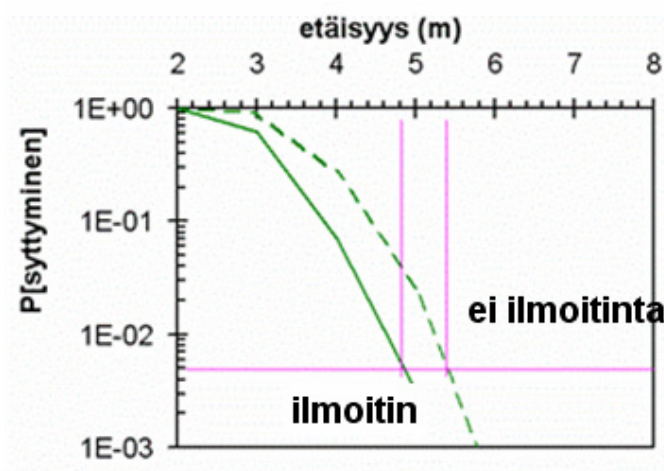
Ero ~ -90 cm = -17 %

Kuva 137. Huonepalo: huoneen koon vaikutus turvaetäisyyteen (OH = olohuone $20 \pm 5 \text{ m}^2$, MH = makuuhuone $10 \text{ m}^2 \pm 20 \%$).



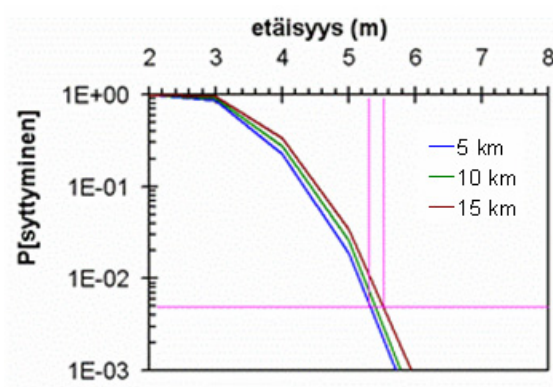
Ero eri riskitasoilla:
 0,5 %: ~ -100 cm = -20 %
 2 %: ~ -180 cm = -33 %
 4 %: ~ -300 cm = -55 %

Kuva 138. Olohuonepalo: sprinklauksen vaikutus turvaetäisyyteen.



Ero ~ -60 cm = -11 %

Kuva 139. Olohuonepalo: paloilmotimen (lämpöilmaisus) vaikutus turvaetäisyyteen.



Ero ~ 20 cm = ±2 % (5–10–15 km)

Kuva 140. Olohuonepalo: palokunnan etäisyyden vaikutus turvaetäisyyteen.

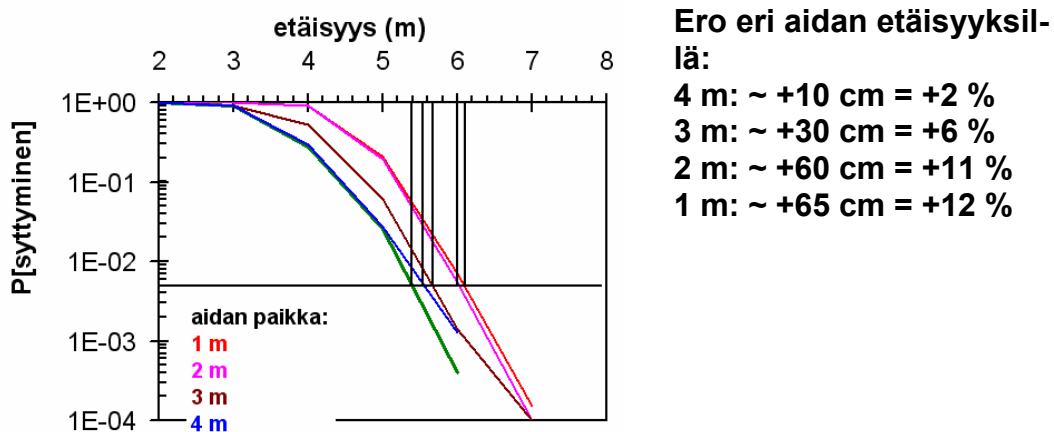
11.2 Ulkoisen palokuorman vaikutus

Kuvissa 141 ja 142 tarkastellaan syttymisen todennäköisyyden etäisyysriippuvuutta, kun ulkoisena palokuormana on aita. Voidaan havaita, että

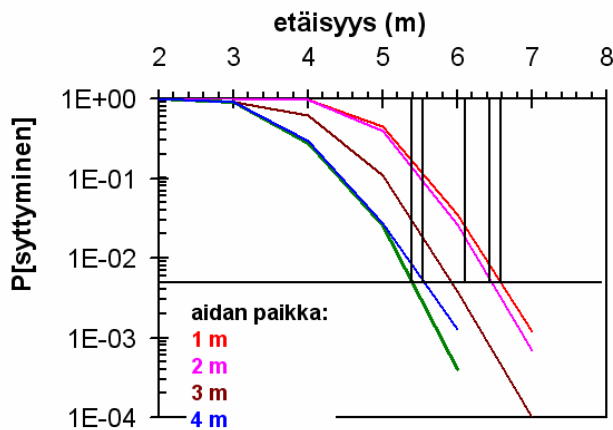
- jo aidan muodostama ulkoinen palokuorma on merkittävä syttymisen todennäköisyyttä nostava tekijä
- aidan rakenteella on suuri merkitys: tiheää aitaa vastaavat syttymisen todennäköisyyden ovat noin kaksinkertaisia harvaan aitaan nähden
- koska aidan palamisen voimakkuus riippuu varsin merkittävästi siitä, miten korkea lämpövuoto aitaan kohdistuu, on aidan aiheuttama syttymisvaara suurin silloin, kun aita on lähellä palavaa kohdetta.

Koska pahin uhkakuva on tilanne, jossa aita on lähellä palavaa kohdetta, aidon vaikutus voidaan huoneistopalojen leviämiskaavaa tarkasteltaessa kuvata siten, että ne sisällytetään huoneistopaloon osallistuvaan palokuormaan kasvattamalla ulkoisen palokuorman tiheyttä aidan palokuormaa vastaavalla määrällä.

Huonepaloon osallistuvan ulkoisen palokuorman vaikutusta tarkastellaan kuvassa 143. Huonepalona on olohuonepalo (lattiapinta-ala $20 \pm 5\text{m}^2$), jossa ikkunan särkyessä on syntynyt aukko, jonka suuruus on 10 % lattiapinta-alasta, mikä tuo ulkoisen palokuorman palamisen esille korostetusti. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että ulkoisen palon turvaetäisyyttä kasvattava vaikutus on suuri, jopa yli 200 %. Se on siis merkittävin tässä työssä tarkastelluista syttymistodennäköisyyteen vaikuttavista tekijöistä.



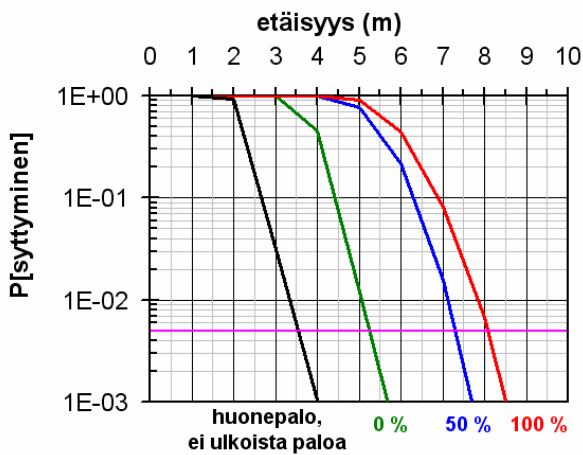
Kuva 141. Olohuonepalo: ulkoisena palokuormana olevan harvan aidan (ks. kohta 8.3.4) vaikutus turvaetäisyyteen.



Ero eri aidan etäisyyksillä:

- 4 m: ~ +20 cm = +4 %
- 3 m: ~ +65 cm = +12 %
- 2 m: ~ +100 cm = +19 %
- 1 m: ~ +120 cm = +22 %

Kuva 142. Olohuonepalo: ulkoisena palokuormana olevan tiheän aidan (ks. kohta 8.3.4) vaikutus turvaetäisyyteen.



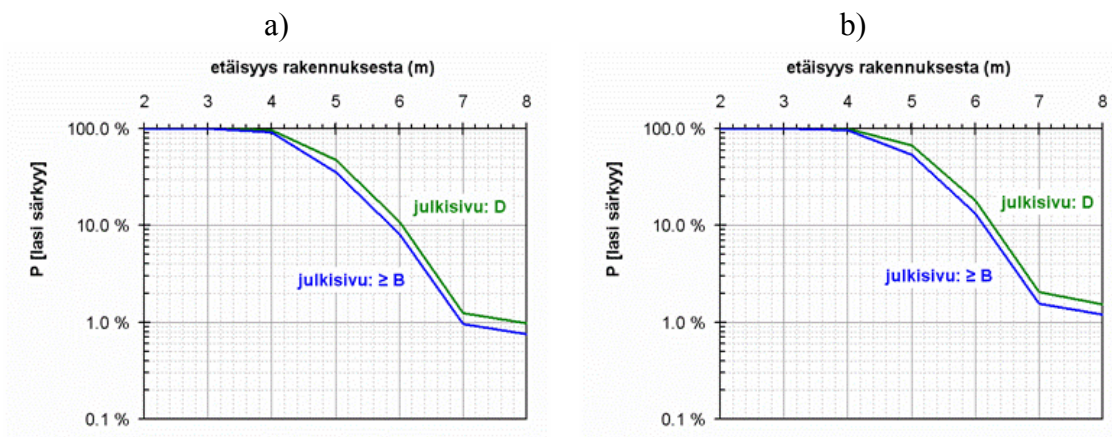
Ero eri ulkoisen palokuorman määrillä:

- 0 %: ~ +1,8 m = +150 %
- 50 %: ~ +3,8 m = +210 %
- 100 %: ~ +4,5 m = +230 %

Kuva 143. Olohuonepalo: ulkoisena palokuormana olevan tiheän aidan (ks. kohta 8.3.4) vaikutus turvaetäisyyteen.

11.3 Lasin rikkoutumisen vaara

Edellä on tarkasteltu syttymiseen liittyvää vaaraa. Tässä jaksossa luodaan katsaus ikkunan rikkoutumiseen liittyvään uhkaan. Kuvassa 144 esitetään esimerkki ikkunan rikkoutumisen todennäköisyyden riippuvuudesta etäisyydestä olohuoneen ja ulkoisen palokuorman palotilanteessa. Voidaan havaita, että lasin rikkoutumisen vaara on merkittävästi korkea aina 6–7 metriin saakka. Tämä vastaa suunnilleen samaa vaaraetäisyyttä kuin syttymiseen liittyvän uhan vaaraetäisyys ja siksi on riittävää tarkastella vain toista näistä uhista: tässä työssä keskitytään syttymiseen liittyvään uhkaan.



Kuva 144. Ikkunan rikkoutumisen todennäköisyyden riippuvuus etäisyydestä olohuoneen ja ulkoisen palokuorman palotilanteessa: ulkoisen palokuorman tiheyden suhde olohuoneen palokuorman tiheyteen a) 50 % olohuoneen ja b) 100 %.

11.4 Turvallisen etäisyyden määrittämismenetelmä

11.4.1 Valitun riskitason, syttymisen todennäköisyyden ja turvallisen etäisyyden välinen riippuvuus

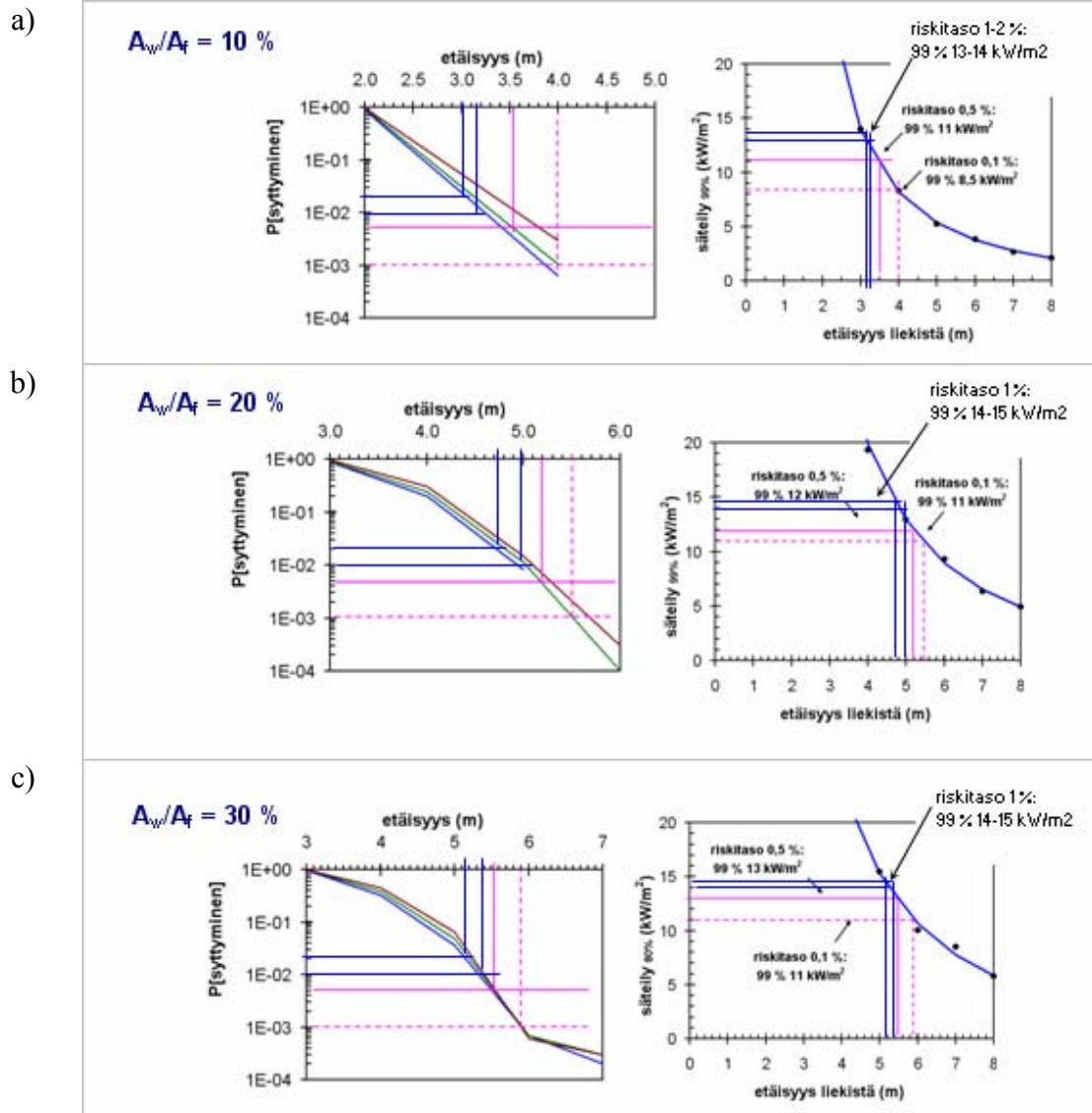
Turvallisen etäisyyden määrittäminen suoraan käyttäen ajastariippuvia tapahtumaketjuja on laskennallisesti hyvin raskas prosessi, ja siksi tässä luvussa kehitetään lämpövuon etäisyysriippuvuuden fraktiilikäyrien käyttöön perustuva yksinkertaistettu turvallisen etäisyyden määrittämiseen. Menettelytapa on seuraava:

- Perustana käytetään uhatun kohteen syttymää (vaarallisina pidettävien lämpövuotasojen samankaltaisuuden vuoksi tämä käsittely kattaa myös lasin rikkoutumisen uhkakuvan).
- Ajastariippuvien tapahtumaketjujen tuloksia tarkasteltaessa käytetään luvussa 4 määritettyjä riskitasoja:
 - 1–2 %, jos yläpohjan ontelo suojattu ulkoista palon leviämistä vastaan,
 - 0,5–1,0 %, jos palon leviämisen mahdollisuutta yläpohjan ontelo ei ole estetty,
 - 0,1 %: herkkyysanalyysinä tarkasteltava riskitaso.
- Tällä perusteella voidaan mitoitusetäisyys kohtisuorassa suunnassa uhatusta kohteesta valita tiettyä lämpövuon etäisyysriippuvuuden fraktiilikäyrää käyttäen (ks. seuraava sivu); suuntariippuvuus voidaan määrittää edellä esitettyjä tuloksia käyttäen.

- Eri tekijät (julkisivun paloluokka, spriklaus, paloilmaisimet, jne.) voidaan ottaa huomioon käyttäen edellä esitettyjä lisäys- tai vähennysmatkoja.
- Mitoitusperusteena käytetään palokunnan etäisyyttä 10 km.

Menettelyä havainnollistetaan kuvassa 145. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että kun käytetään lämpövuon 99 %:n fraktiilikäyrää, niin turvallisen etäisyyden arvot voidaan määrittää käyttäen seuraavia lämpövuon mitoitusarvoja:

- riskitaso 1–2 %: lämpövuon mitoitusarvo = 13–15 kW/m²
- riskitaso 0,5–1,0 %: lämpövuon mitoitusarvo = 11–13 kW/m²
- riskitaso 0,1 %: lämpövuon mitoitusarvo = 9–11 kW/m².



Kuva 145. Turvallisen etäisyyden yksinkertaistetun mitoitusmenettelyn määrittäminen huoneistopalolle.

11.4.2 Turvallisen etäisyydet mitoituskäyrästä ja eri tekijöihin liittyviä laskentamalleja

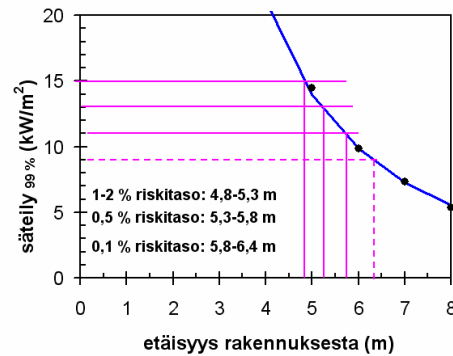
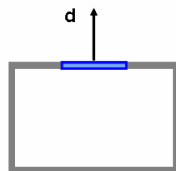
Seuraavassa esitetään turvallisen etäisyyden määrittäminen edellä esitettyä menettelytapaa käyttäen sekä laskentakaavoja ero tekijöiden huomioon ottamiseen.

11.4.2.1 Huonepalo, ei ulkoista palokuormaa

11.4.2.1.1 Olohuone, julkisivun luokka $\geq B$, ei ulkoista palokuormaa

Olohuone:

- lattiapinta-ala $A_f = 15-25 \text{ m}^2$
- ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_{sv} = 10-40 \% \times A_f$ (keskiarvo 25 %)
- ei ulkoista palokuormaa
- julkisivun paloluokka $\geq B$

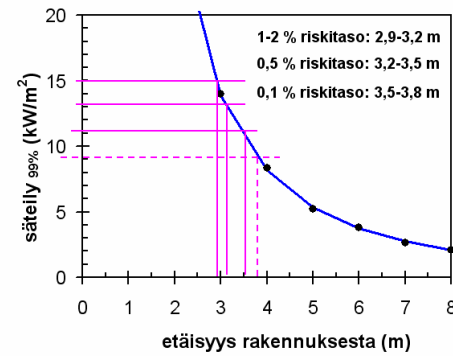
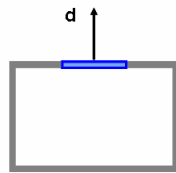


Kuva 30. Olohuone: aukon koko 10–40 % lattiapinta-alasta.

a)

Olohuone:

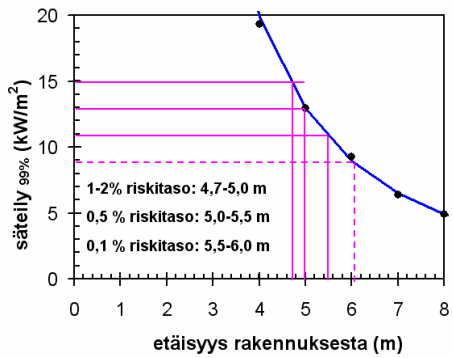
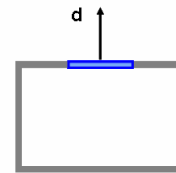
- lattiapinta-ala $A_f = 15-25 \text{ m}^2$
- ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_{sv} = 10 \% \times A_f$
- ei ulkoista palokuormaa
- julkisivun paloluokka $\geq B$



b)

Olohuone:

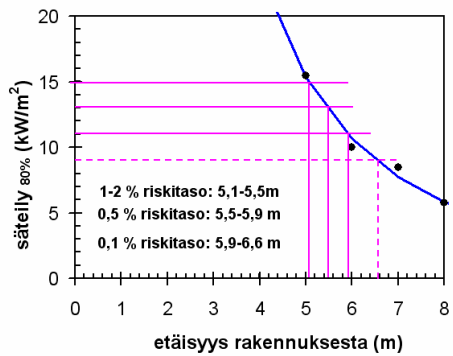
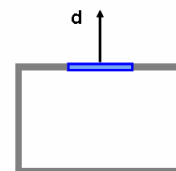
- lattiapinta-ala $A_f = 15-25 \text{ m}^2$
- ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_{sv} = 20 \% \times A_f$
- ei ulkoista palokuormaa
- julkisivun paloluokka $\geq B$



c)

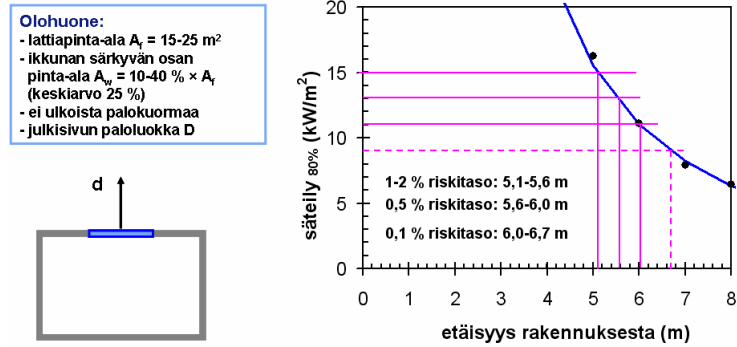
Olohuone:

- lattiapinta-ala $A_f = 15-25 \text{ m}^2$
- ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_{sv} = 30 \% \times A_f$
- ei ulkoista palokuormaa
- julkisivun paloluokka $\geq B$

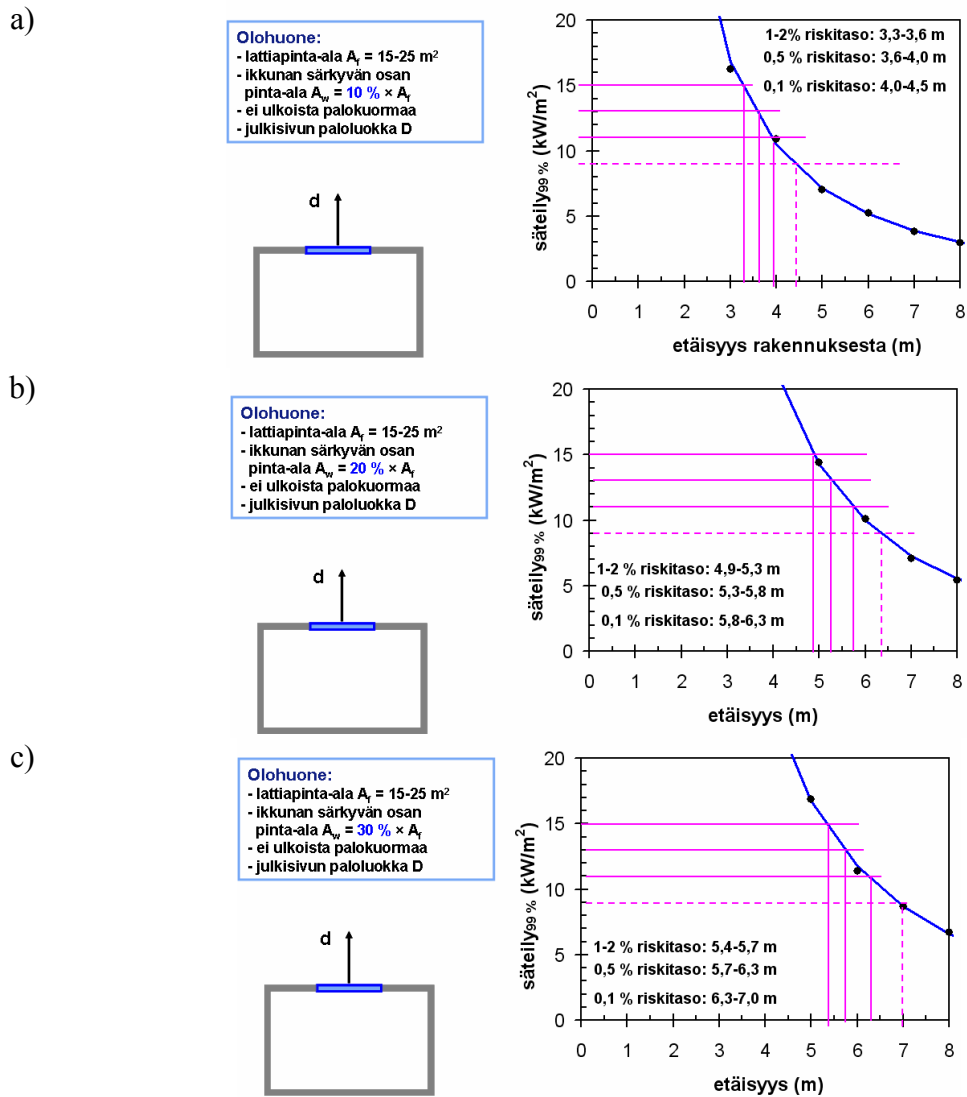


Kuva 147. Olohuone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.1.2 Olohuone, julkisivun luokka D, ei ulkoista palokuormaa

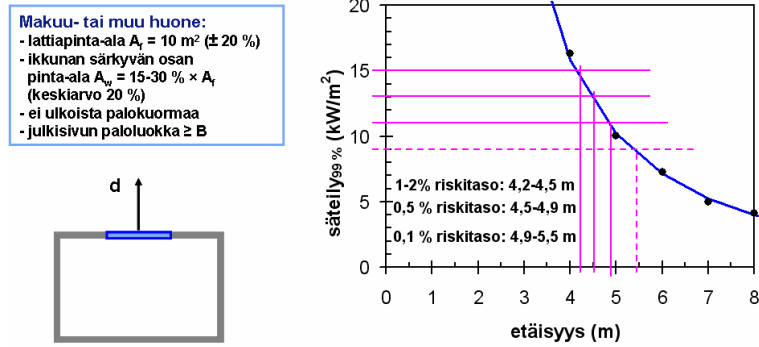


Kuva 148. Olohuone: aukon koko 10–40 % lattiapinta-alasta.

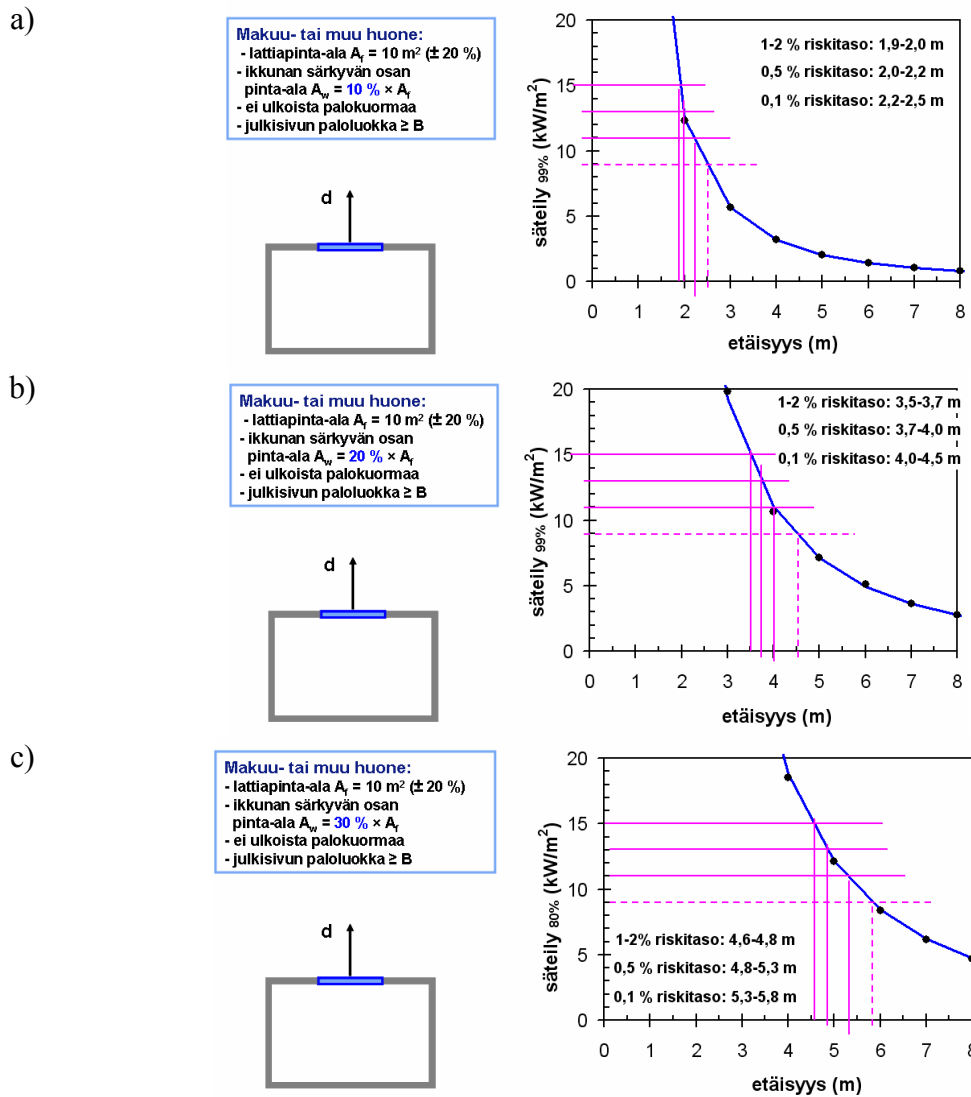


Kuva 149. Olohuone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.1.3 Muu huone, julkisivun luokka $\geq B$, ei ulkoista palokuormaa

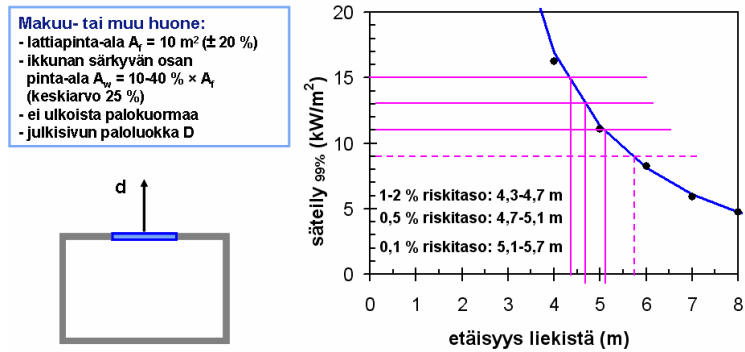


Kuva 150. Muu huone: aukon koko 15–30 % lattiapinta-alasta.

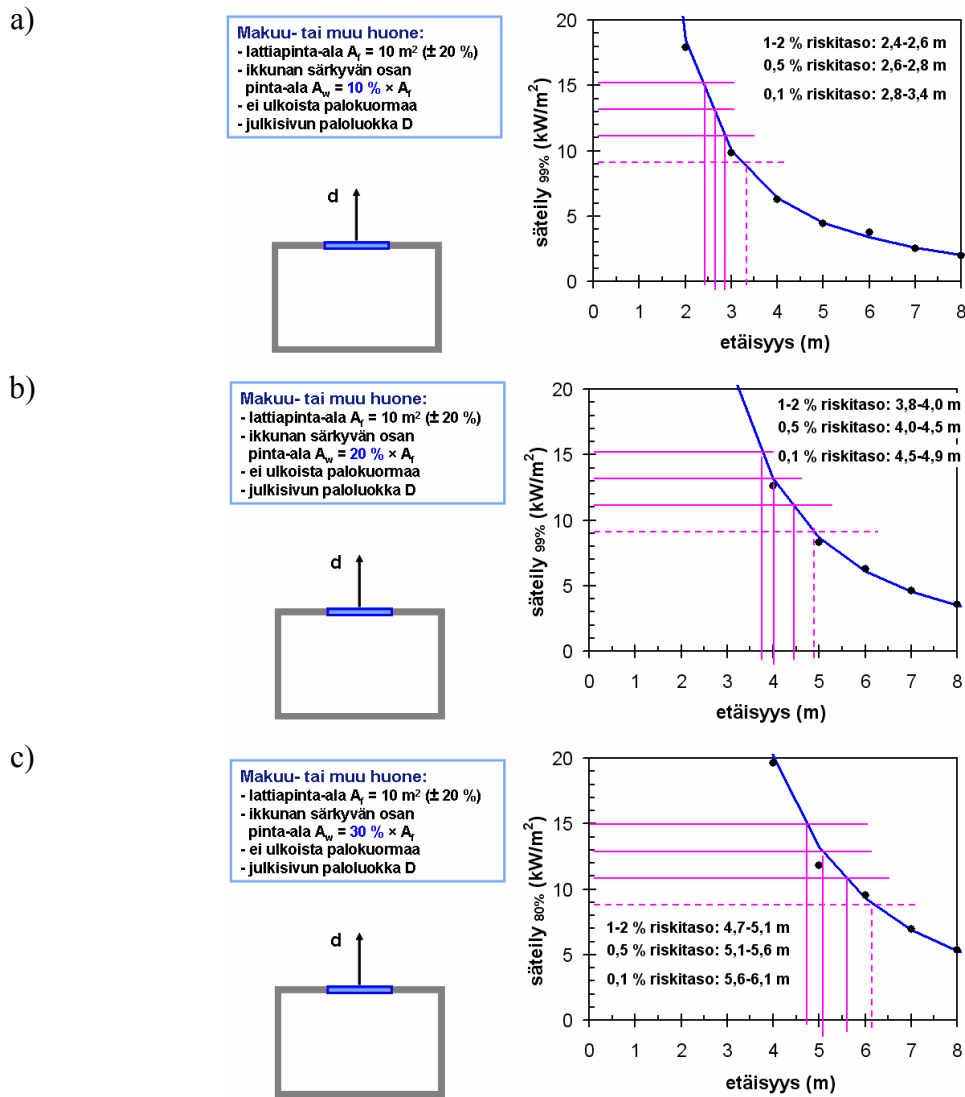


Kuva 151. Muu huone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.1.4 Muu huone, julkisivun luokka D, ei ulkoista palokuormaa



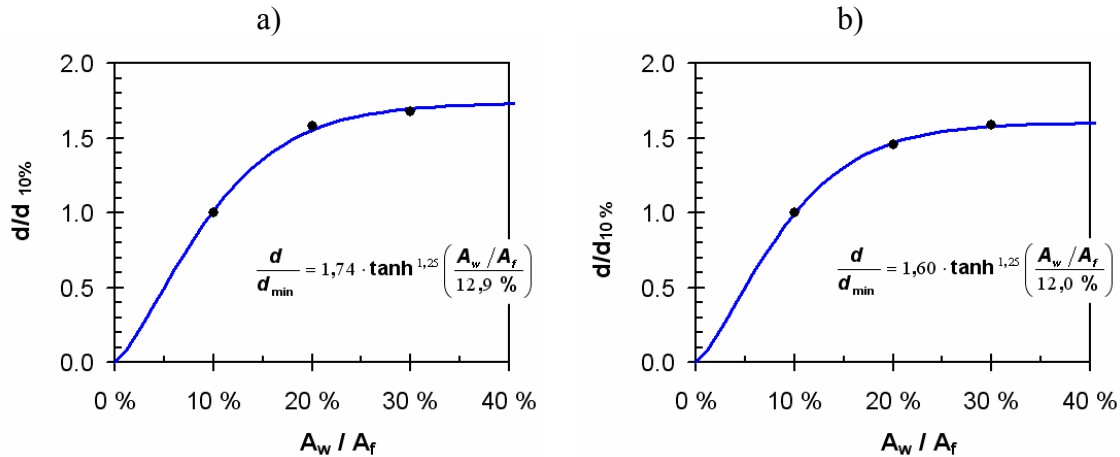
Kuva 152. Muu huone: aukon koko 15–30 % lattiapinta-alasta.



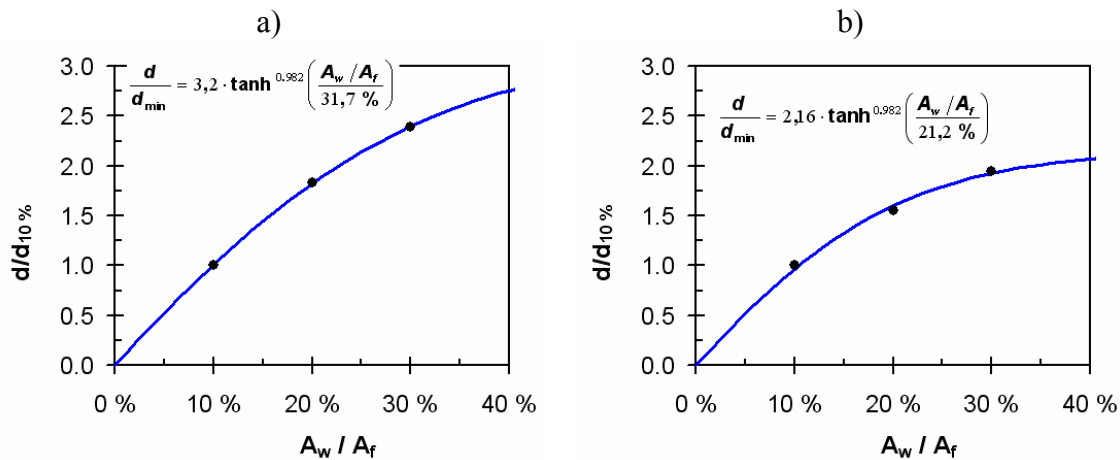
Kuva 153. Muu huone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.1.5 Eri tekijöiden vaikutusta kuvaavia malleja

Turvallisen etäisyyden riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta esitetään kuvissa 154 (olohuone) ja 155 (muu huone).

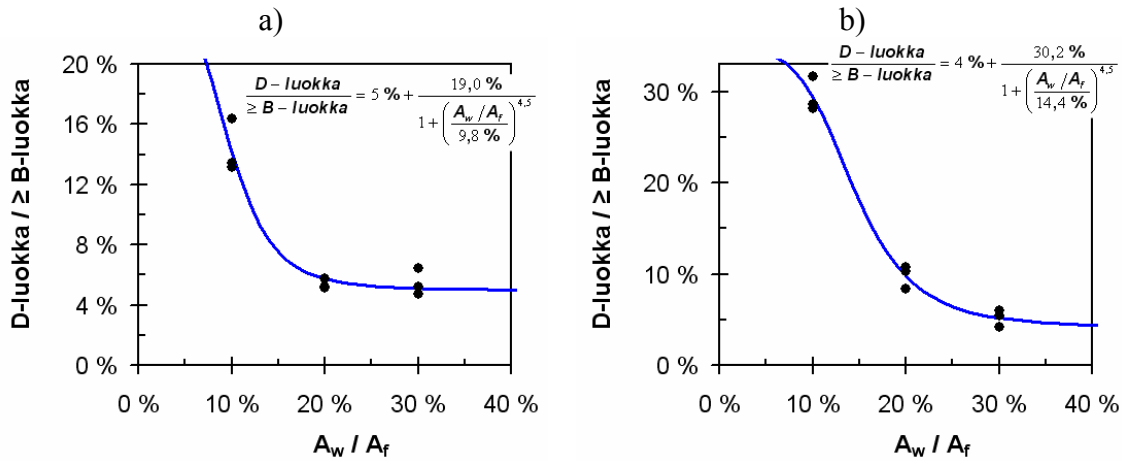


Kuva 154. Turvallisen etäisyyden riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta, olohuone: a) julkisivun luokka $\geq B$ ja b) julkisivun luokka D.



Kuva 155. Turvallisen etäisyyden riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta, olohuone: a) julkisivun luokka $\geq B$ ja b) julkisivun luokka D.

D-luokan julkisivumateriaalia ja $\geq B$ -luokan julkisivumateriaalia vastaavien turvallisten etäisyyksien suhteen riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta esitetään kuvassa (olohuone ja muut huoneet).



Kuva 156. D-luokan julkisivumateriaalia ja $\geq B$ -luokan julkisivumateriaalia vastaavien turvallisten etäisyyksien suhteen riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta: a) olohuone ja b) muu huone.

Sivulle suuntautuvan lämpövuon suhde suoraan eteenpäin suuntautuvaan lämpövuon arvoon ($\dot{q}''_{\text{sivulle}} / \dot{q}''_{\text{eteen}}$) sekä tästä suhteesta määritetty sivulle ja eteenpäin suuntautuvan turvallisen etäisyyden suhde ($d_{\text{sivulle}} / d_{\text{eteen}}$) esitetään kaavoissa (28) ja (29)

$$\dot{q}''_{\text{sivulle}} / \dot{q}''_{\text{eteen}} \approx 14\% \quad (28)$$

$$d_{\text{sivulle}} / d_{\text{eteen}} \approx 40\% \quad (29)$$

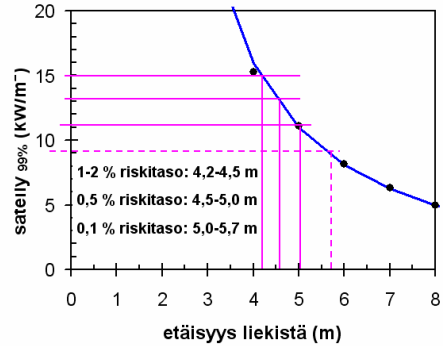
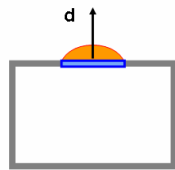
Nämä kaavat pätevät sekä olohuoneille että muille huoneille.

11.4.2.2 Huonepalo ja ulkoinen palokuorma

11.4.2.2.1 Olohuone, julkisivun luokka $\geq B$, ulkoinen palokuorma 0 %

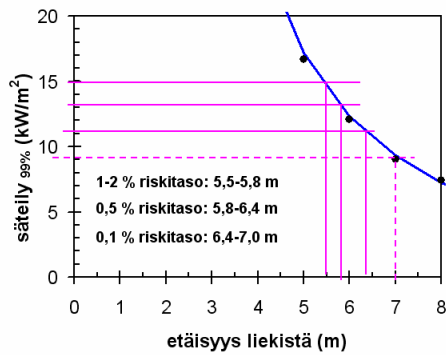
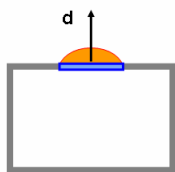
a)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 10 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuormaa:
 veranta 10 m^2 +
 vähän palokuormaa verannalla
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



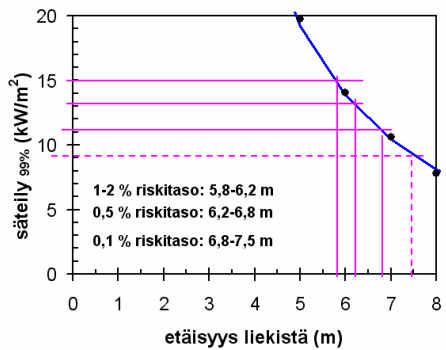
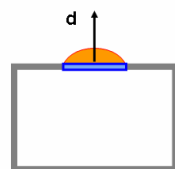
b)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 20 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuormaa:
 veranta 10 m^2 +
 vähän palokuormaa verannalla
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



c)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 30 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuormaa:
 veranta 10 m^2 +
 vähän palokuormaa verannalla
 - julkisivun paloluokka $\geq B$

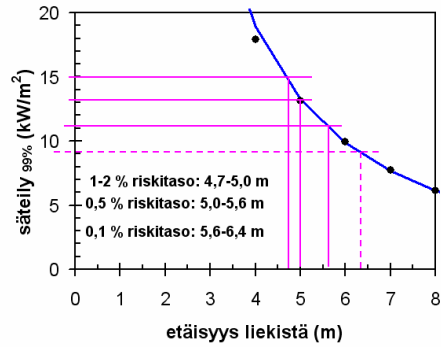
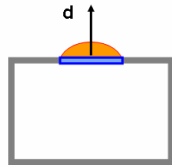


Kuva 157. Olohuone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.2.2 Olohuone, julkisivun luokka $\geq B$, ulkoinen palokuorma 20 %

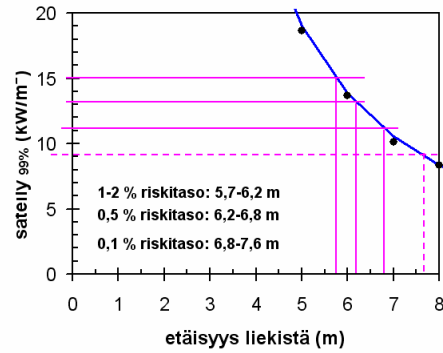
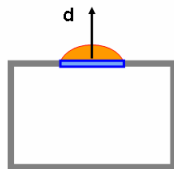
a)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 10 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuormaa:
 veranta 10 m^2 + palokuormaa 20 %
 olohuoneen palokuorman tiheydestä
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



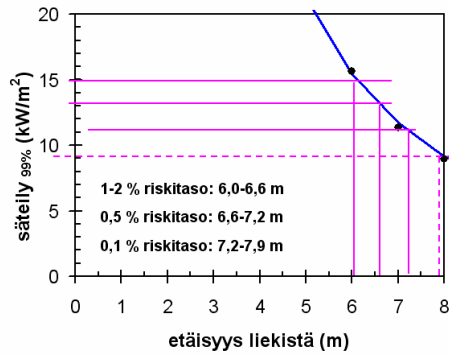
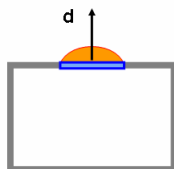
b)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 20 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuormaa:
 veranta 10 m^2 + palokuormaa 20 %
 olohuoneen palokuorman tiheydestä
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



c)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 30 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuormaa:
 veranta 10 m^2 + palokuormaa 20 %
 olohuoneen palokuorman tiheydestä
 - julkisivun paloluokka $\geq B$

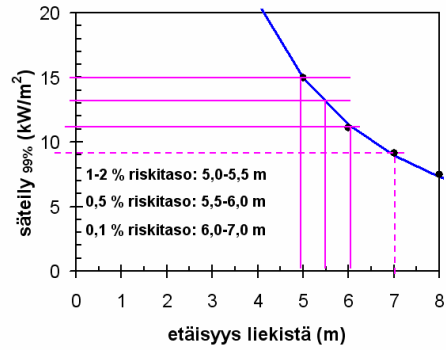
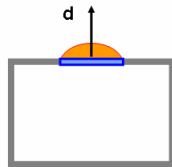


Kuva 158. Olohuone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.2.3 Olohuone, julkisivun luokka $\geq B$, ulkoinen palokuorma 50 %

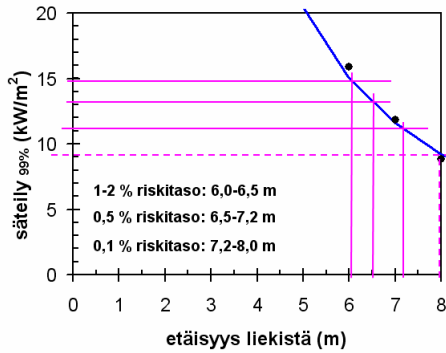
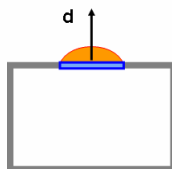
a)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 10 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuorma:
 veranta 10 m^2 + palokuormaa 50 %
 olohuoneen palokuorman tiheydestä
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



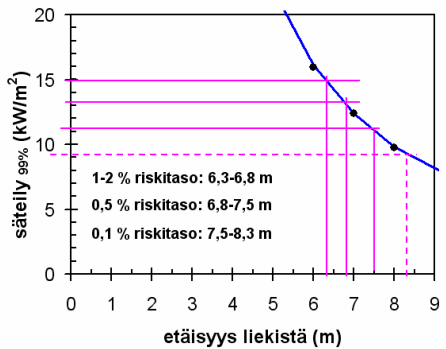
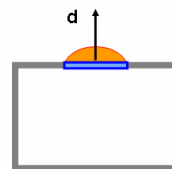
b)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 20 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuorma:
 veranta 10 m^2 + palokuormaa 50 %
 olohuoneen palokuorman tiheydestä
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



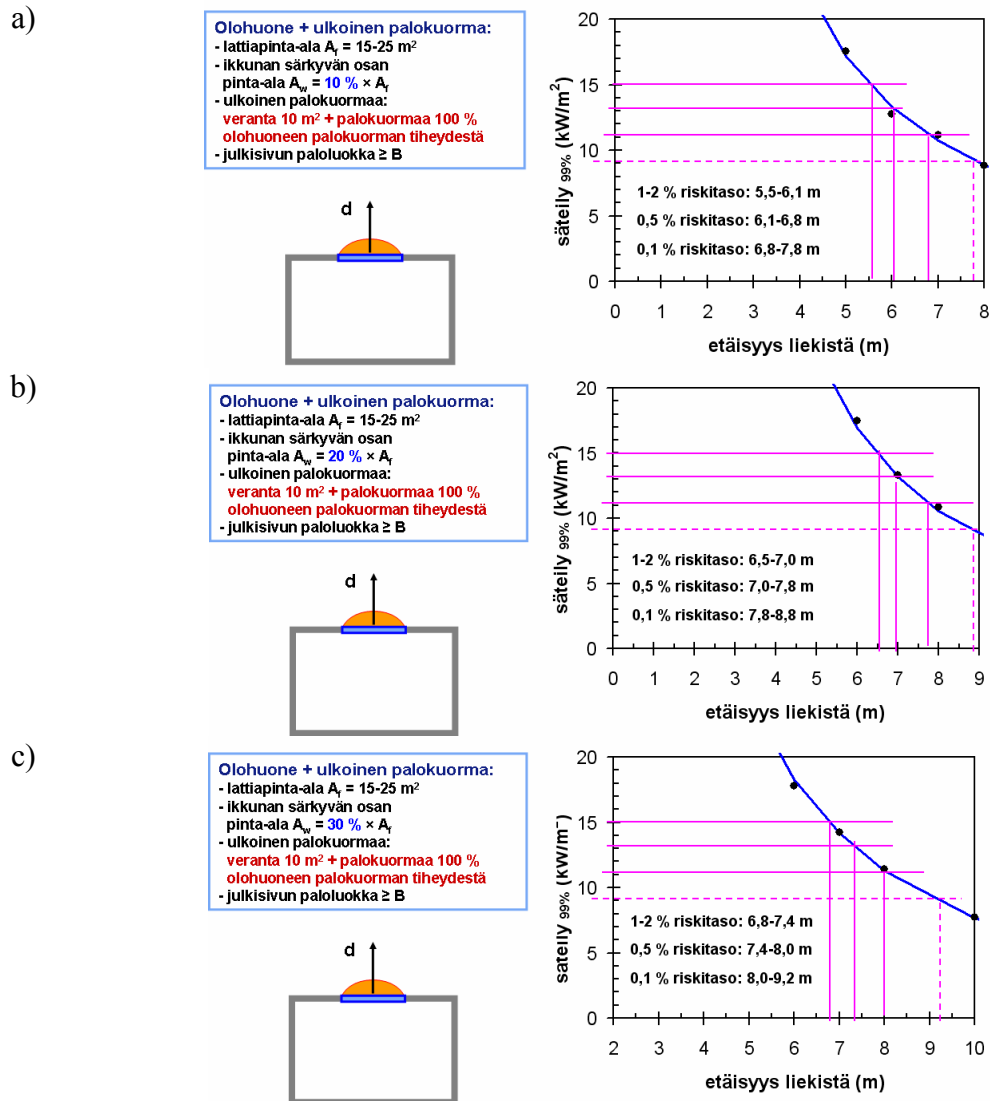
c)

Olohuone + ulkoinen palokuorma:
 - lattiapinta-ala $A_f = 15\text{-}25 \text{ m}^2$
 - ikkunan särkyvän osan pinta-ala $A_w = 30 \% \times A_f$
 - ulkoinen palokuorma:
 veranta 10 m^2 + palokuormaa 50 %
 olohuoneen palokuorman tiheydestä
 - julkisivun paloluokka $\geq B$



Kuva 159. Olohuone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

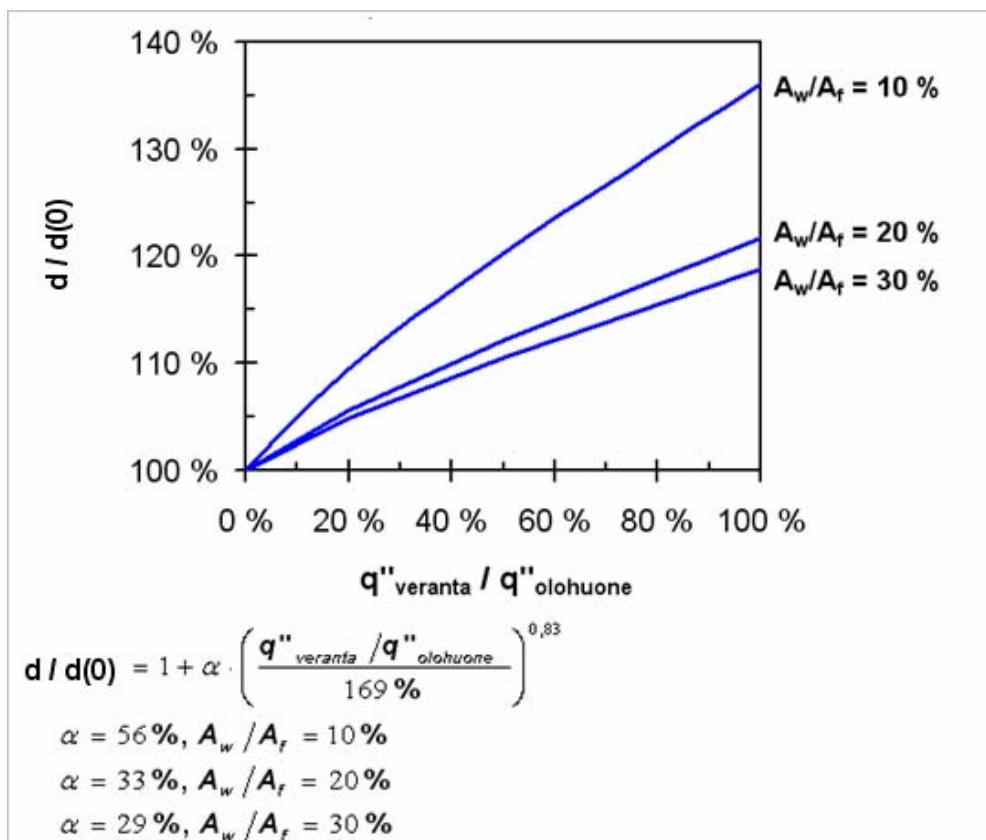
11.4.2.2.4 Olohuone, julkisivun luokka $\geq B$, ulkoinen palokuorma 100 %



Kuva 160. Olohuone: aukon koko 10 %, 20 % tai 30 % lattiapinta-alasta.

11.4.2.2.5 Eri tekijöiden vaikutusta kuvaavia malleja

Turvallisen etäisyyden kasvaminen ulkoisen palokuorman tiheyden kasvaessa esitetään kuvassa 155.



Kuva 161. Turvallisen etäisyyden riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta, olohuone: a) julkisivun luokka $\geq B$ ja b) julkisivun luokka D.

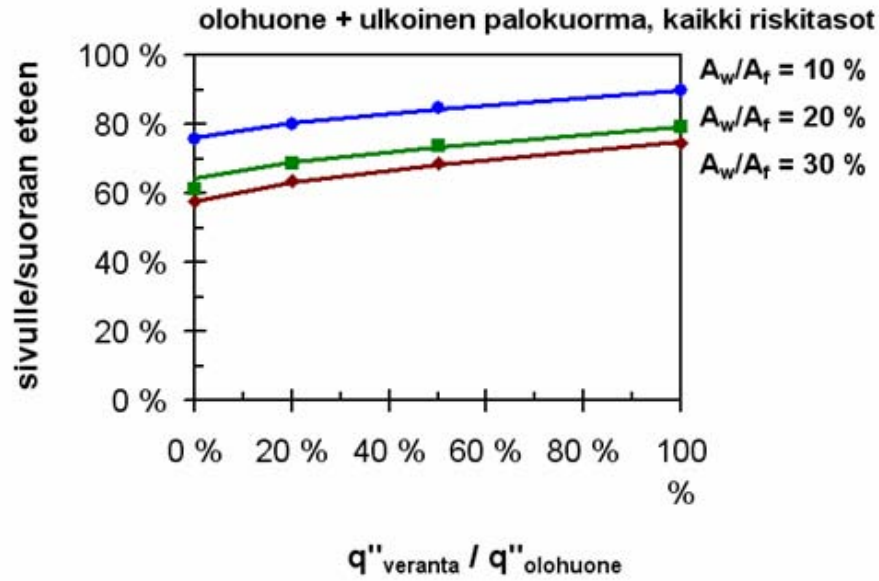
D-luokan julkisivumateriaalia ja $\geq B$ -luokan julkisivumateriaalia vastaavien turvallisten etäisyyksien suhteen riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta esitetään kuvassa (olohuone ja muut huoneet).

$$d_{D\text{-luokka}}/d_{\geq B\text{-luokka}} = 5\% + \frac{19\%}{1 + \left(\frac{A_w/A_f}{9,8\%} \right)^{4,5}} \quad (30)$$

tai, kun $A_w/A_f > 15\%$

$$d_{D\text{-luokka}}/d_{\geq B\text{-luokka}} \approx 5\%. \quad (31)$$

Sivulle ja eteenpäin suuntautuvan turvallisen etäisyyden suhde esitetään kuvassa 162.



$$\frac{d_{\text{sivulle}}}{d_{\text{eteen}}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{q''_{\text{veranta}} / q''_{\text{olohuone}}}{192\%} \right)^{0,73}$$

$$\beta_0 = 76\%, \beta_1 = 22\%, A_w / A_f = 10\%$$

$$\beta_0 = 64\%, \beta_1 = 22\%, A_w / A_f = 20\%$$

$$\beta_0 = 58\%, \beta_1 = 28\%, A_w / A_f = 30\%$$

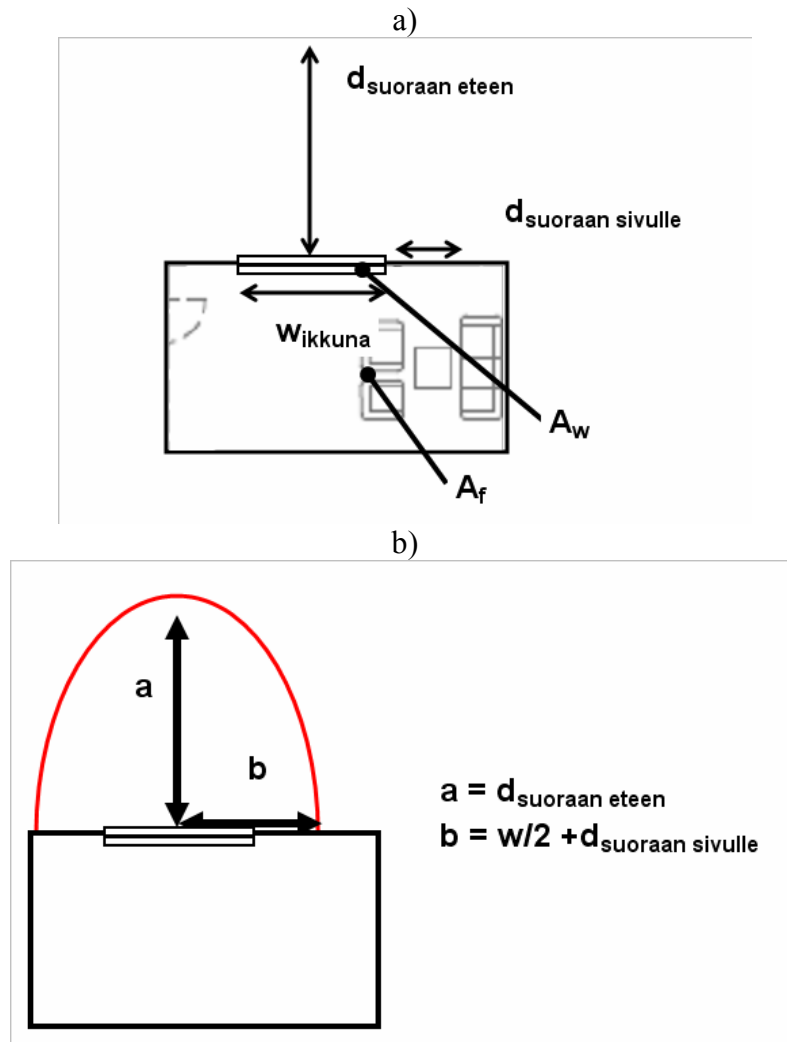
Kuva 162. Turvallisen etäisyyden riippuvuus ikkunaan palossa syntyvän aukon koosta, olohuone: a) julkisivun luokka $\geq B$ ja b) julkisivun luokka D.

Edellä esitettyjä kaavoja voidaan soveltaa sekä olohuoneille että muille huoneille.

12. Turvallisen etäisyyden mitoitusohjeet

12.1 Huoneistopalo, ei ulkoista palokuormaa

Mitoitustilanne esitetään kuvassa 163a. Lämpösäteilyn vaara-alueita voidaan kohdan 8.1.2.3 perusteella kuvata ellipsillä (Kuva b), jonka pääakselit ovat a = turvallinen etäisyys suoraan eteenpäin mitattuna rakennuksen seinästä ja b = turvallinen etäisyys sivusuuntaan mitattuna liekin reunasta (mikä käytännössä tarkoittaa ikkunan reunaa) lisätynä ikkunan leveyden puolikkaalla. Mitoituksessa tarvittavat lukuarvot annetaan taulukoissa 39 ja 40.



Kuva 163. Turvallisen etäisyyden mitoitus huonepalossa: a) fyysiset mitat ja b) mitoitusellipsi.

Taulukko 39. Turvallinen etäisyyden mitoitusarvot olohuoneen palossa, ei ulkoista palokuormaa.

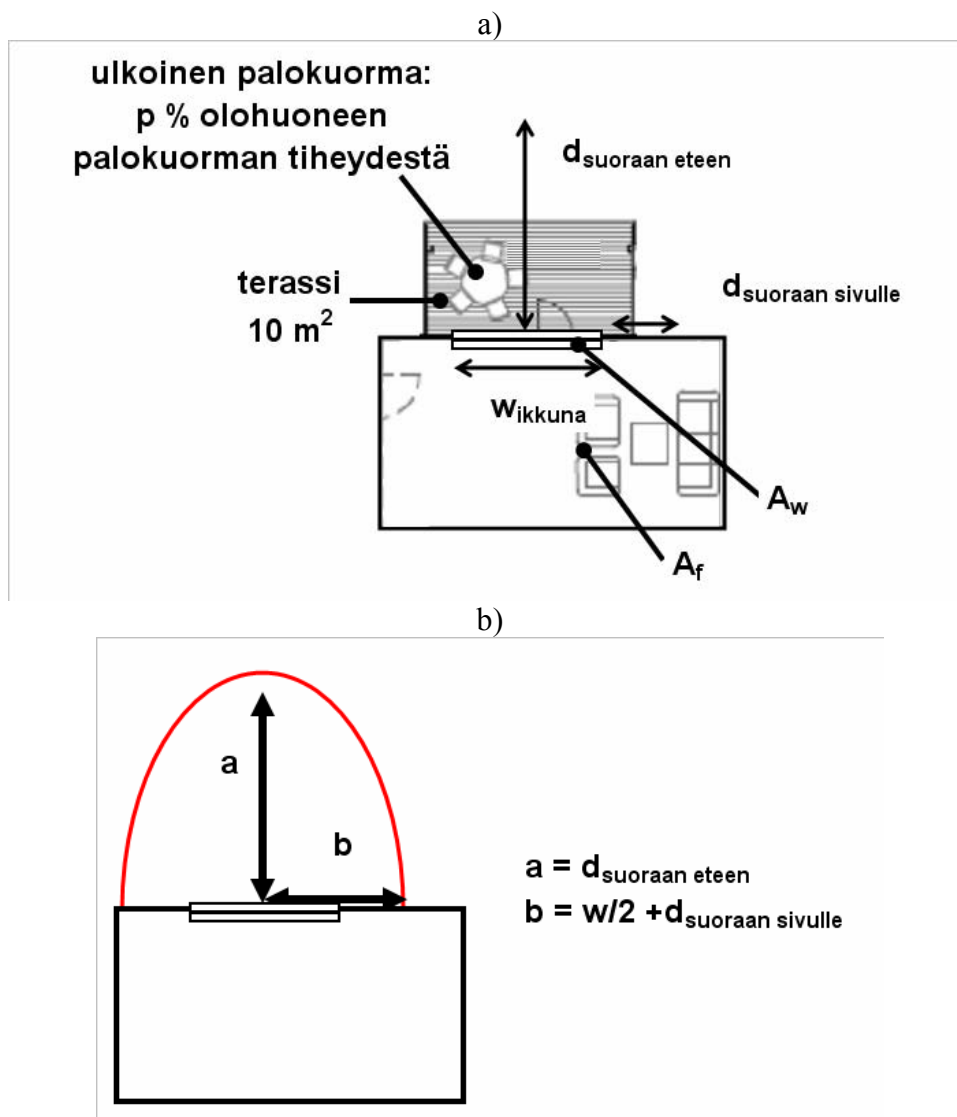
huone	A_f (m ²)	A_w / A_f	ulkoinen palokuorma	julkisivu	ETÄISYYSTARVE SUORAAN ETEENPÄIN						ETÄISYYSTARVE SUORAAN SIVULLE					
					riskitaso 1 % — 2 %		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %		riskitaso 1 % — 2 %		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %	
					d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)
OH	20 (avg)	10-40 %	-	B	4.8	5.3	5.3	5.8	5.8	6.4	1.70	2.10	2.10	2.60	2.60	3.30
OH	15-25	10 %	-	B	2.9	3.2	3.2	3.5	3.5	3.8	1.10	1.25	1.25	1.45	1.45	1.60
OH	15-25	20 %	-	B	4.7	5.0	5.0	5.5	5.5	6.0	1.70	1.80	1.80	2.00	2.00	2.20
OH	15-25	30 %	-	B	5.1	5.5	5.5	5.5	5.5	6.6	1.80	1.90	1.90	2.00	2.00	2.30
OH	20 (avg)	10-40 %	-	D	5.1	5.6	5.6	6.0	6.0	6.7	1.80	2.20	2.20	2.70	2.70	3.45
OH	15-25	10 %	-	D	3.3	3.6	3.6	4.0	4.0	4.5	1.25	1.40	1.40	1.65	1.65	1.90
OH	15-25	20 %	-	D	4.9	5.3	5.3	5.8	5.8	6.3	1.75	1.90	1.90	2.10	2.10	2.30
OH	15-25	30 %	-	D	5.4	5.7	5.7	6.3	6.3	7.0	1.90	1.95	1.95	2.30	2.30	2.45

Taulukko 40. Turvallinen etäisyyden mitoitusarvot muun kuin olohuoneen palossa, ei ulkoista palokuormaa.

huone	A_f (m ²)	A_w / A_f	ulkoinen palokuorma	julkisivu	ETÄISYYSTARVE SUORAAN ETEENPÄIN						ETÄISYYSTARVE SUORAAN SIVULLE					
					riskitaso 1 % — 2 %		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %		riskitaso 1 % — 2 %		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %	
					d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	d_2 (m)
MH	10 (±20%)	15-30 %	-	B	4.2	4.5	4.5	4.9	4.9	5.5	1.70	2.10	2.10	2.60	2.60	3.30
MH	10 (±20%)	10 %	-	B	1.9	2.0	2.0	2.2	2.2	2.5	0.60	0.70	0.70	0.90	0.90	1.10
MH	10 (±20%)	20 %	-	B	3.5	3.7	3.7	4.0	4.0	4.5	1.50	1.60	1.60	1.80	1.80	2.00
MH	10 (±20%)	30 %	-	B	4.6	4.8	4.8	5.3	5.3	5.8	1.80	1.90	1.90	2.00	2.00	2.30
MH	10 (±20%)	15-30 %	-	D	4.3	4.7	4.7	5.1	5.1	5.7	1.75	2.20	2.20	2.70	2.70	3.40
MH	10 (±20%)	10 %	-	D	2.4	2.6	2.6	2.8	2.8	3.4	0.75	0.90	0.90	1.15	1.15	1.50
MH	10 (±20%)	20 %	-	D	3.8	4.0	4.0	4.5	4.5	4.9	1.65	1.75	1.75	2.05	2.05	2.20
MH	10 (±20%)	30 %	-	D	4.7	5.1	5.1	5.6	5.6	6.1	1.85	2.00	2.00	2.10	2.10	2.40

12.2 Huoneiston ja ulkoisen palokuorman yhtäaikainen palo

Mitoitustilanne esitetään kuvassa 164a. Tässäkin tapauksessa lämpösäteilyn vaara-alueita voidaan kuvata ellipsillä. Kuten edellisessä kohdassa, tämän ellipsin toinen pääakselit on a = turvallinen etäisyys suoraan eteenpäin mitattuna rakennuksen seinästä: Toinen pääakseli on b = turvallinen etäisyys sivusuuntaan mitattuna liekin reunasta, mikä tässä tapauksessa voi tarkoittaa ikkunan reunaa tai sen alueen reunaa, jolla ulkoista palokuormaa voi olla, lisättynä ikkunan leveyden puolikkaalla. Mitoituksessa tarvittavat lukuarvot annetaan taulukoissa 41 ja 42.



Kuva 164. Turvallisen etäisyyden mitoitus huoneen ja ulkoisen palokuorman yhtäaikaisesta palosta: a) fyysiset mitat ja b) mitoitusellipsi.

Taulukko 41. Turvallisen etäisyyden mitoitusarvot huoneiston ja ulkoisen palokuorman yhtäaikaisessa palossa, julkisivun paloluokka $\geq B$.

					ETÄISYYSTARVE SUORAAN ETEENPÄIN						ETÄISYYSTARVE SUORAAN SIVULLE					
					riskitaso 1 % — 2 % —		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %		riskitaso 1 % — 2 % —		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %	
huone	A_f (m ²)	A_w / A_f	ulkoinen palokuorma	julkisivu	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)
OH	15-25	10 %	0 %	B	4.2	4.5	4.5	5.0	5.0	5.7	3.00	3.40	3.40	3.80	3.80	4.50
OH	15-25	10 %	20 %	B	4.7	5.0	5.0	5.6	5.6	6.4	3.60	4.00	4.00	4.50	4.50	5.30
OH	15-25	10 %	50 %	B	5.0	5.5	5.5	6.0	6.0	7.0	4.00	4.60	4.60	5.20	5.20	6.10
OH	15-25	10 %	100 %	B	5.5	6.1	6.1	6.8	6.8	7.8	4.80	5.50	5.50	6.10	6.10	7.10
OH	15-25	20 %	0 %	B	5.5	5.8	5.8	6.4	6.4	7.0	3.20	3.50	3.50	4.00	4.00	4.50
OH	15-25	20 %	20 %	B	5.7	6.2	6.2	6.8	6.8	7.6	3.80	4.20	4.20	4.70	4.70	5.50
OH	15-25	20 %	50 %	B	6.0	6.5	6.5	7.2	7.2	8.0	4.30	4.70	4.70	5.40	5.40	6.00
OH	15-25	20 %	100 %	B	6.5	7.0	7.0	7.8	7.8	8.8	5.00	5.50	5.50	6.20	6.20	7.20
OH	15-25	30 %	0 %	B	5.8	6.2	6.2	6.8	6.8	7.5	3.20	3.50	3.50	4.00	4.00	4.50
OH	15-25	30 %	20 %	B	6.0	6.6	6.6	7.2	7.2	7.9	3.80	4.00	4.00	4.60	4.60	5.40
OH	15-25	30 %	50 %	B	6.3	6.8	6.8	7.5	7.5	8.3	4.20	4.60	4.60	5.20	5.20	6.00
OH	15-25	30 %	100 %	B	6.8	7.4	7.4	8.0	8.0	9.2	4.90	5.40	5.40	6.10	6.10	7.00

Taulukko 42. Turvallisen etäisyyden mitoitusarvot huoneiston ja ulkoisen palokuorman yhtäaikaisessa palossa, julkisivun paloluokka D.

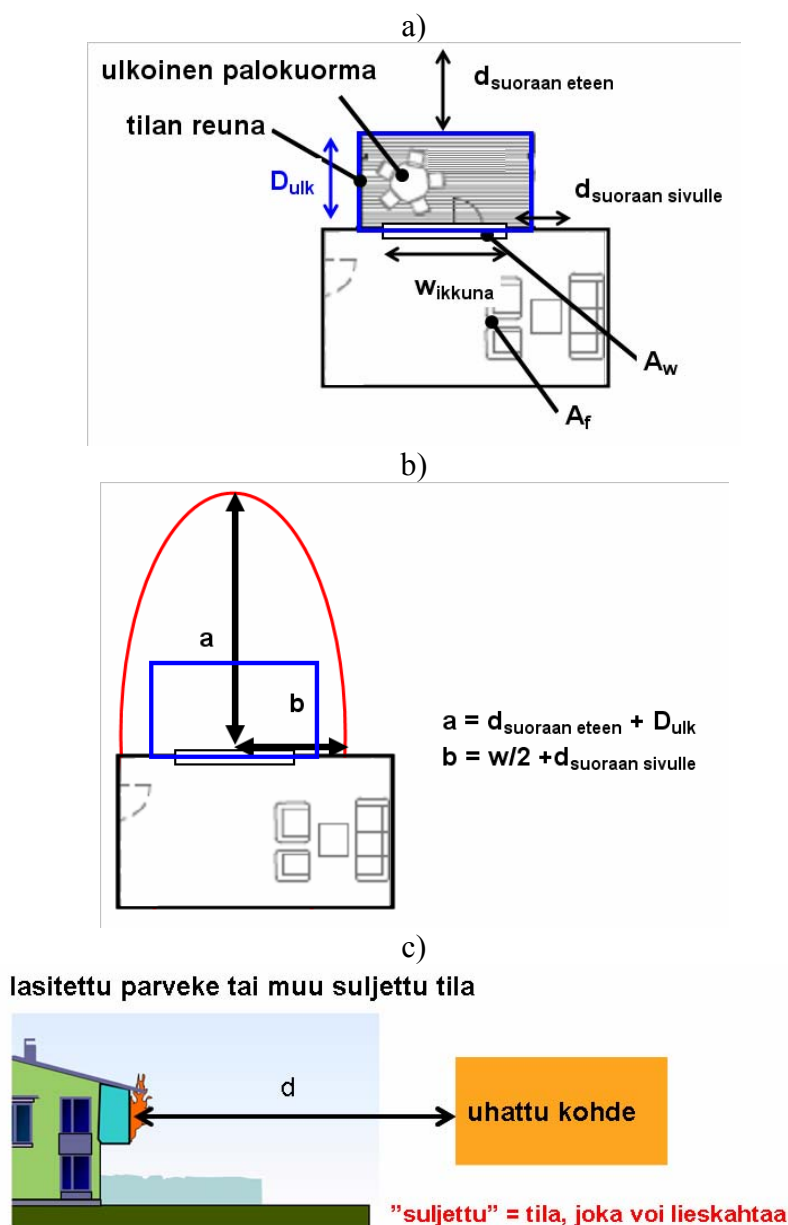
huone	A _f (m ²)	A _w / A _f	ulkoisen palokuorma	julkisivu	ETÄISYYSTARVE SUORAAN ETEENPÄIN				ETÄISYYSTARVE SUORAAN SIVULLE							
					riskitaso 1 % — 2 %		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %		riskitaso 1 % — 2 %		riskitaso 0.5 %		riskitaso 0.1 %	
					d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)
OH	15-25	10 %	0 %	D	4.8	5.1	5.1	5.7	5.7	6.5	3.40	3.90	3.90	4.30	4.30	5.10
OH	15-25	10 %	20 %	D	5.4	5.7	5.7	6.4	6.4	7.3	4.10	4.60	4.60	5.10	5.10	6.00
OH	15-25	10 %	50 %	D	5.7	6.3	6.3	6.8	6.8	8.0	4.60	5.20	5.20	5.90	5.90	7.00
OH	15-25	10 %	100 %	D	6.3	7.0	7.0	7.8	7.8	8.9	5.50	6.30	6.30	7.00	7.00	8.10
OH	15-25	20 %	0 %	D	5.8	6.1	6.1	6.8	6.8	7.4	3.40	3.70	3.70	4.20	4.20	4.80
OH	15-25	20 %	20 %	D	6.0	6.6	6.6	7.2	7.2	8.0	4.00	4.40	4.40	5.00	5.00	5.80
OH	15-25	20 %	50 %	D	6.3	6.9	6.9	7.6	7.6	8.5	4.50	5.00	5.00	5.70	5.70	6.30
OH	15-25	20 %	100 %	D	6.9	7.4	7.4	8.2	8.2	9.3	5.30	5.80	5.80	6.60	6.60	7.60
OH	15-25	30 %	0 %	D	6.1	6.5	6.5	7.1	7.1	7.9	3.40	3.70	3.70	4.20	4.20	4.70
OH	15-25	30 %	20 %	D	6.3	6.9	6.9	7.6	7.6	8.3	4.00	4.20	4.20	4.80	4.80	5.70
OH	15-25	30 %	50 %	D	6.6	7.1	7.1	7.9	7.9	8.7	4.40	4.80	4.80	5.50	5.50	6.30
OH	15-25	30 %	100 %	D	7.1	7.8	7.8	8.4	8.4	9.7	5.20	5.70	5.70	6.40	6.40	7.40

Taulukko 43. Ohjeita ulkoisen palokuorman määrän arvioimiseksi. Jos kyseeseen tulee useita eri tekijöitä, niiden osuudet summataan.

ulkoisen palokuorman tiheys on vähäinen (oleellisesti 0 %)	puukalusteryhmä (5 %), harva aita (0 %), umpinainen aita (0 %)
ulkoisen palokuorman tiheys on < 20 % olohuoneen palokuorman tiheydestä	muovinen ulkokalusteryhmä (15–20 %), kaksi nojatuolia (10 %/tuolia, yht. 20 %); kahden istuttava sohva (10–15 %); kolmen istuttava sohva (10–15 %); tiheä aita (0 %)
ulkoisen palokuorman tiheys on < 50 % olohuoneen palokuorman tiheydestä	kolmen istuttava sohva + kaksi nojatuolia (40–45 %)
ulkoisen palokuorman tiheys on ≤ 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä	harvinainen tapaus

12.3 Mitoitus silloin, kun huoneiston ulkopuoleinen palokuorma on huonemaisessa tilassa

Jos huoneiston ulkopuoleinen palokuorma sijaitsee huonemaisessa tilassa, turvallinen etäisyys tulisi mitata tämän tilan reunasta (Kuva 165). Termi ”huonemainen” tarkoittaa tässä tilan paloteknistä käyttäytymistä: tila on ”huonemainen”, jos sen palo voi kehittyä lieskahduksen kautta koko tilan kattavaan täyden palon vaiheeseen (ks. myös liite E).



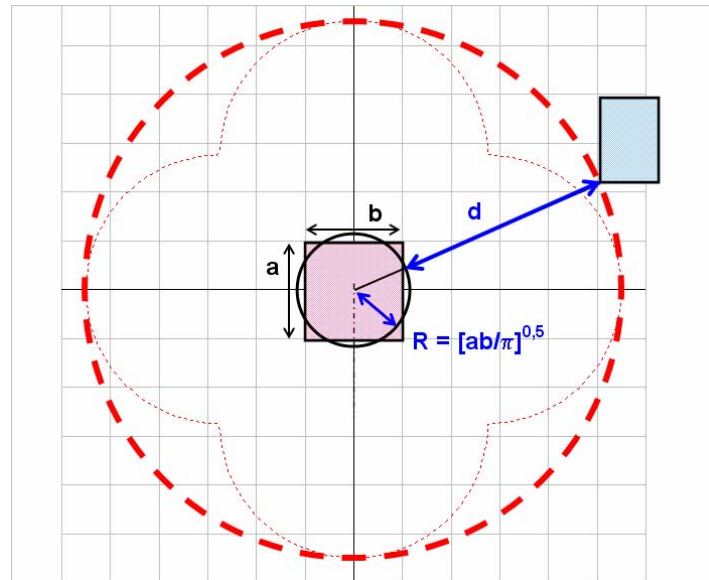
Kuva 165. Turvallisen etäisyyden mitoitus huoneen ja siihen liittyvässä huonemaisessa tilassa tapahtuvan ulkoisen palokuorman yhtäaikaisessa palossa: a) fyysiset mitat, b) mitoitusellipsi ja c) esimerkki.

12.4 Katosten palot

12.4.1 Katos, jota ei ole erityisesti suunniteltu paloa kestäväksi

Jos katosta ei ole suunniteltu kestävään tyyppillistä sen sisältämän palokuorman paloa, turvallisella puolella oleva lähtökohta on mitoitaa turvaetäisyys kaikkiin suuntiin. Mitoitustilanne esitetään kuvassa 166. Turvallinen etäisyys mitataan kohdetta kuvaavan ellipsin reunalta, mikä tarkoittaa, että turvallinen etäisyys kohteen keskeltä mitattuna $d_c = d + R$, missä suureen d arvoja esitetään taulukossa 42 ja kohteen tehollinen säde R on

$$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} . \quad (32)$$



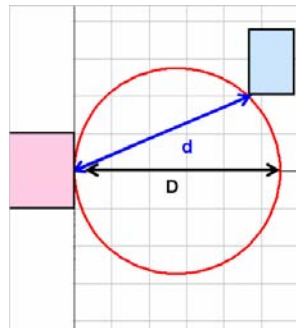
Kuva 166. Turvallisen etäisyyden mitoitus katoksen palossa, kun etäisyys mitoitetaan joka suuntaan.

Taulukko 44. Mitoitusarvot d (kohta 12.4.1) tai D (kohta 12.4.2) katoksen palossa.

Katoksen tyyppi	Riskitaso 1–2 %	Riskitaso 0,5–1,0 %	Riskitaso 0,1 %
jätekatos 10 m ² , 4 astiaa, katto osallistuu paloon	5,5–6,0 m	6,0–6,8 m	6,8–8,0 m
jätekatos 10 m ² , 4 astiaa, katto ei osallistu paloon	4,6–5,2 m	5,2–6,0 m	6,0–7,0 m
jätekatos 1,8 m ² , 1 astia, katto osallistuu paloon	3,6–4,1 m	4,1–4,7 m	4,7–5,4 m
jätekatos 1,8 m ² , 1 astia, katto ei osallistu paloon	< 1,5 m	1,5–2,0 m	2,0 m
muu katos 10 m ² , vähän palokuormaa, katto osallistuu paloon	3,5–3,9 m	4,5–3,9 m	3,9–5,3 m
muu katos 10 m ² , vähän palokuormaa, katto ei osallistu paloon	2,9–3,3 m	3,3–3,8 m	3,8–4,5 m
muu katos 10 m ² , kohtalaisesti palokuormaa, katto osallistuu paloon	3,7–4,2 m	4,2–4,8 m	4,8–5,6 m
muu katos 10 m ² , kohtalaisesti palokuormaa, katto ei osallistu paloon	2,8–3,8 m	3,8–4,5 m	4,5–5,3 m

12.4.2 Katos, joka kestää sen sisältämän palokuorman palon

Jos katos on suunniteltu siten, että kestää siellä tyypillisesti olevan palokuorman palon, voidaan turvaetäisyys mitoittaa vain katoksen oviaukon suuntaan. Mitoitustilanne esitetään kuvassa 167. Turvallinen etäisyys määritetään käyttäen oviaukon keskikohtaa sivuavaa ympyrää, jonka halkaisijan D arvoja esitetään taulukossa 42.

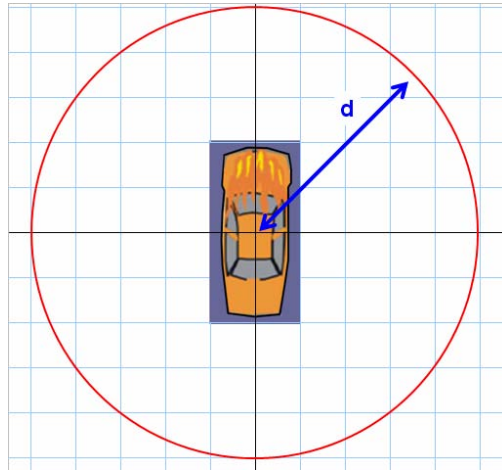


Kuva 167. Turvallisen etäisyyden mitoitus katoksen palossa, kun mitoituksessa voidaan rajoittua vain yhteen suuntaan.

12.5 Ajoneuvopalot

12.5.1 Erillisen ajoneuvon palo

Mitoitustilanne esitetään kuvassa 168. Turvallinen etäisyys d mitataan kohteen keskeltä. Suureen d arvoja esitetään taulukossa 42.



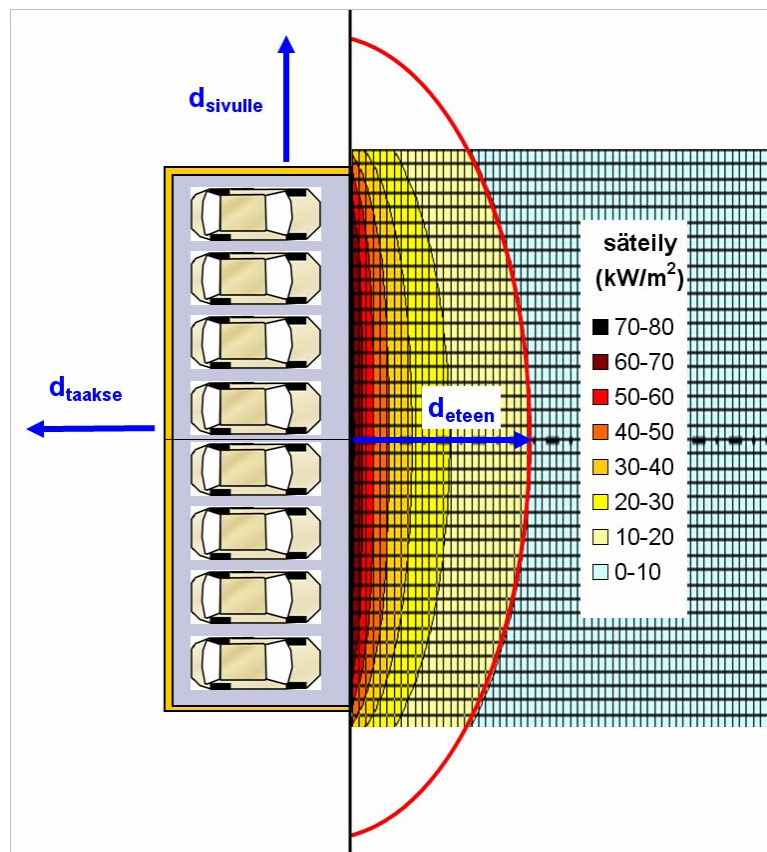
Kuva 168. Turvallisen etäisyyden mitoitus ajoneuvopalossa.

Taulukko 45. Turvallisen etäisyyden mitoitusarvot d ajoneuvopalossa.

Ajoneuvo	Riskitaso 1–2 %	Riskitaso 0,5–1,0 %	Riskitaso 0,1 %
henkilöauto, tyyppi 3 (liitteessä D esitetyn jaottelun mukaan)	3,0–3,4 m	3,4–4,0 m	4,0–4,6 m
henkilöauto, tyyppi 1 tai 2 (liitteessä D esitetyn jaottelun mukaan)	2,6–2,9 m	2,9–3,4 m	3,4–3,9 m
henkilöauto, tyyppi 4 tai 5 (liitteessä D esitetyn jaottelun mukaan)	4,1–4,9 m	4,9–5,5 m	5,5–6,3 m
matkailuauto tai -vaunu	6,0–7,0 m	7,0–7,8 m	7,8–8,6 m
esimerkki veneestä (muovivene, pituus 6 m, leveys 3 m)	5,8–6,5 m	6,5–7,3 m	7,3–9,0 m

12.5.2 Autokatoksen palo

Mitoitustilanne esitetään kuvassa 169. Suoraan eteenpäin (d_{eteen}) sekä sivulle ($d_{sivulle}$) ja taaksepäin (d_{taakse}) suuntautuvaan lämpövuohon liittyvän turvallisen etäisyyden arvot esitetään taulukossa 42. On huomattava, että etäisyydet $d_{sivulle}$ ja d_{taakse} riippuvat katoksen palonkestosta.



Kuva 169. Turvallisen etäisyyden mitoitus autokatoksen palossa.

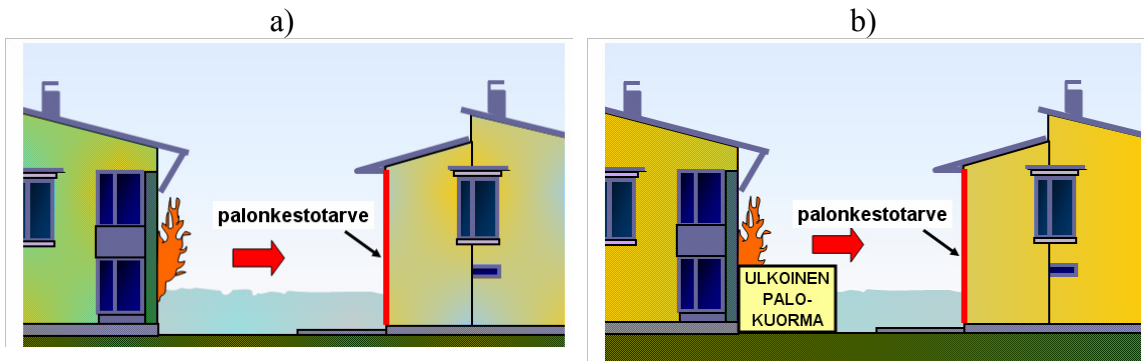
Taulukko 46. Turvallisen etäisyyden mitoitusarvot d_{eteen} , $d_{sivulle}$ ja d_{taakse} autokatoksen palossa. Minuuttimäärät viittaavat aikaan, jonka katos kestäisi standardipaloo palamatta puhki tai romahtamatta.

Suure	Riskitaso 1–2 %	Riskitaso 0,5–1,0 %	Riskitaso 0,1 %
d_{eteen}	6,0–6,6 m	6,6–7,6 m	7,6–9,0 m
d_{taakse}	<ul style="list-style-type: none"> • > 45 min: < 2 m • 30 min: 4 m • 15 min: $d_{taakse} = d_{eteen}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • > 45 min: < 2 m • 30 min: 4,5 m • 15 min: $d_{taakse} = d_{eteen}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • > 45 min: < 3 m • 30 min: 5 m • 15 min: $d_{taakse} = d_{eteen}$
$d_{sivulle}$	$d_{sivulle} = d_{taakse}$	$d_{sivulle} = d_{taakse}$	$d_{sivulle} = d_{taakse}$

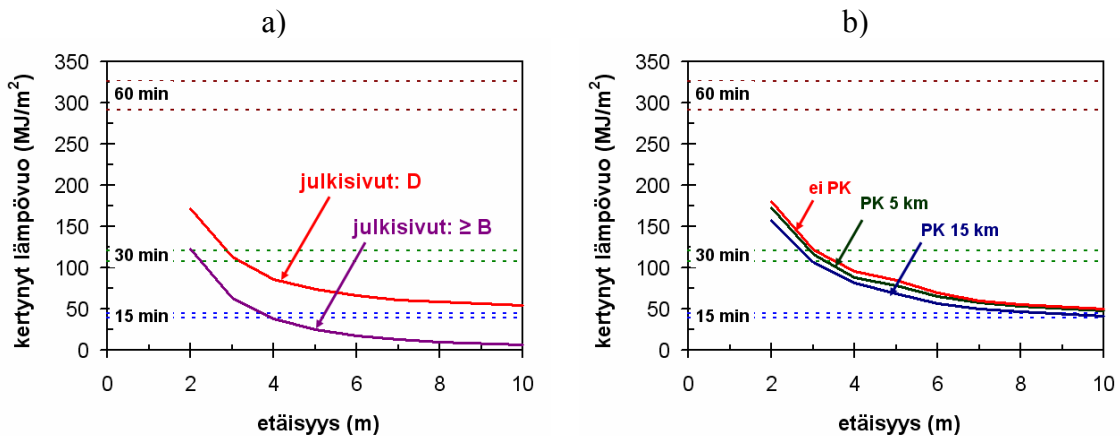
13. Palonkestoja koskevat ohjeet

13.1 Huoneistopalot ml. ulkoinen palokuorma

Tässä kohdassa tarkastellaan uhatun kohteen palonkestotarvetta, kun sitä uhkaa asuinrakennuksen palo (Kuva 170). Kuvasta 171 voidaan nähdä, että palorasitus on pienempi kuin 30 minuutin standardipalon tuottama palorasitus varsin lähelläkin palavaa rakennusta: ilman ulkoista palokuormaa 30 minuutin standardipalon tuottamaa palorasitusta vastaava etäisyys on noin 3 m eikä se olennaisesti kasva tästä, vaikka otetaan huomioon runsaastikin ulkoista palokuormaa, etenkin, kun otetaan huomioon palokunnan vaikutus.



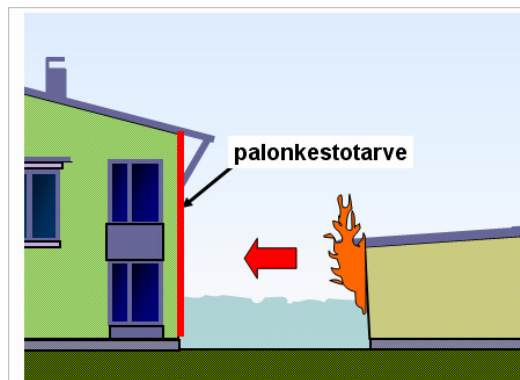
Kuva 170. Tarkasteltavat tilanteet.



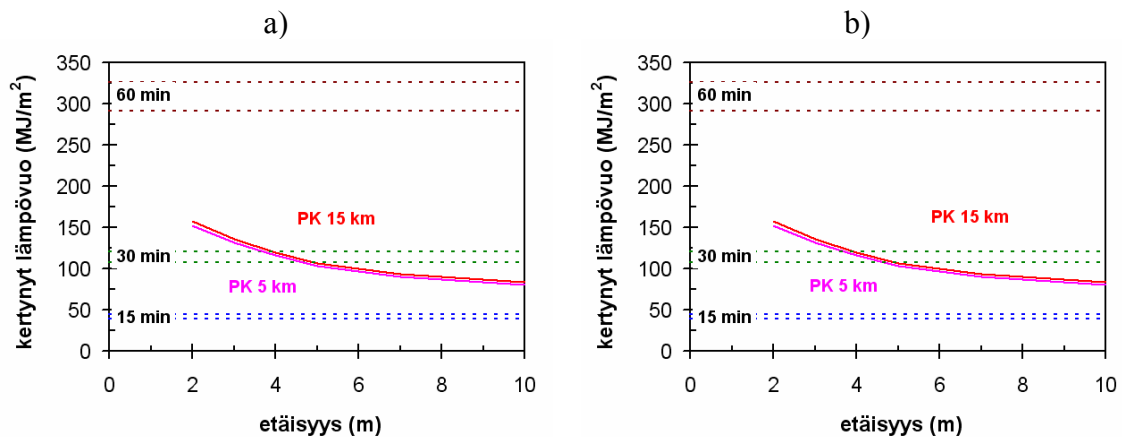
Kuva 171. Huoneistopalo. Palonkestotarve verrattuna standardipalorasitukseen (minuuttiarvot), olohuonepalo, aukon koko 10–40 % lattiapinta-alasta: a) molempien rakennusten julkisivut ovat joko $\geq B$ -luokan tai D-luokan tarviketta, ei ulkoista palokuormaa (palokuntaa ei ole otettu huomioon) ja b) molempien rakennusten julkisivut ovat D-luokan tarviketta, ulkoinen palokuorma on 100 % olohuoneen palokuorman tiheydestä ml. palokunnan vaikutus. Käyrät ovat 99 % fraktiiliarvoja.

13.2 Katosten palot

Tässä kohdassa tarkastellaan uhatun palonkestotarvetta, kun sitä uhkaa katoksen palo (Kuva 172). Kuvasta 173 voidaan nähdä, että palorasitus on pienempi kuin 30 minuutin standardipalon tuottama palorasitus varsin lähelläkin palavaa katosta eli noin 4–5 m:n etäisyydestä lähtien. Etenkin pitemmällä etäisyyksillä uhatun kohteen julkisivun palon tuottama lämpösäteily on dominoiva tekijä ja siksi yhden ja neljän jäteastian katokselle saadut tulokset ovat varsin samanlaiset. Jos uhatun kohteen paloluokka on $\geq B$, niin palonkesto tarve pienenee suunnilleen edellisen kohdan kuvassa 171a esitetyllä tavalla.



Kuva 172. Tarkasteltava tilanne.

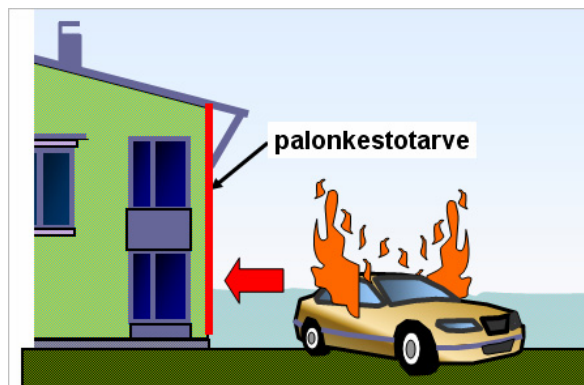


Kuva 173. Katoksen palo. Palonkestotarve verrattuna standardipalorasitukseen (minuuttiarvot), jätekatospalo, uhatun kohteen julkisivumateriaali D-luokan tarviketta, palokunnan etäisyys 5 km tai 15 km: a) yhden jäteastian katos ja b) neljän jäteastian katos. Käyrät ovat 99 % fraktiiliarvoja.

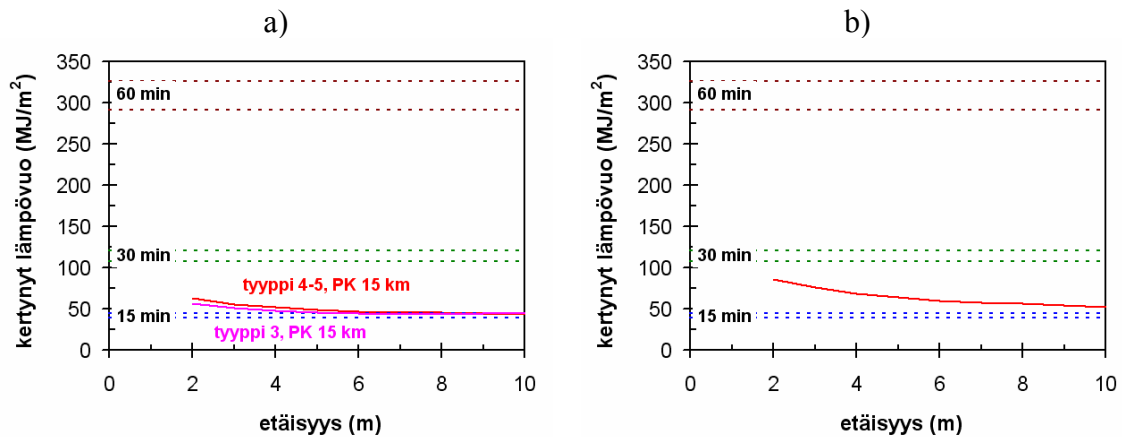
13.3 Ajoneuvojen palot

13.3.1 Yksittäisen ajoneuvon palo

Tässä kohdassa tarkastellaan uhatun palonkestotarvetta, kun sitä uhkaa yksittäisen ajoneuvon palo (Kuva 174). Kuvasta 175 voidaan nähdä, että palorasitus on pienempi kuin 30 minuutin standardipalon tuottama palorasitus aina, kun etäisyys on yli 2 m.



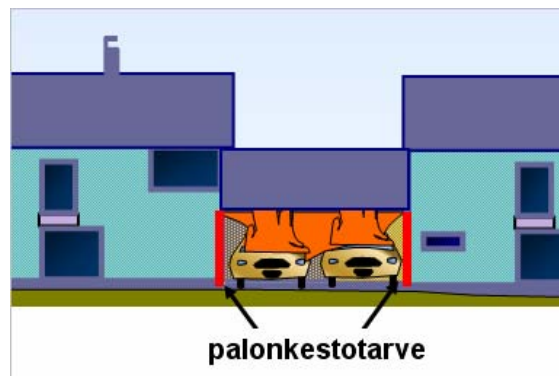
Kuva 174. Tarkasteltava tilanne.



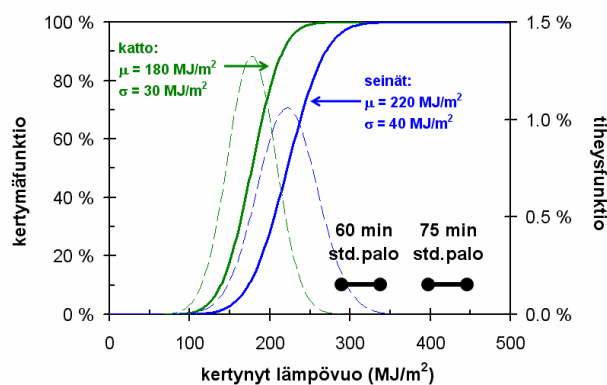
Kuva 175. Ajoneuvopalo. Palonkestotarve verrattuna standardipalorasitukseen (minuuttiarvot), uhatun kohteen julkisivumateriaali D-luokan tarviketta, palokunnan etäisyys 15 km: a) henkilöauton palo (tyyppi 3 tai 4–5) ja b) matkailuauton tai -vaunun palo. Käyrät ovat 99 % fraktiiliarvoja.

13.3.2 Kahden auton palo kahta rakennusta yhdistävässä katetussa tilassa

Tässä kohdassa tarkastellaan palonkestotarvetta kuvassa 176 havainnollistetussa tilanteessa, jossa kahta rakennusta yhdistävää katosta käytetään autojen paikoittamiseen. Kertynyttä lämpörasitusta verrataan standardipalon kertyneeseen lämpörasitukseen kuvassa 177. Voidaan havaita (Kuva 178), että siinäkin tapauksessa, että palokunnan toimien vaikutus otetaan huomioon, katetun tilan synnyttämä kertynyt lämpörasitus ylittää varsin todennäköisesti (noin 10 %:n todennäköisyydellä) 45 minuutin pituisen standardipalon synnyttämän lämpörasituksen. Toisaalta todennäköisyys, että tilan synnyttämä kertynyt lämpörasitus ylittää 60 minuutin pituisen standardipalon synnyttämän lämpörasituksen on pieni (suuruusluokkaa yksi miljoonasta). **Katettuun tilaan rajautuvien rakenteiden palokestovaatimus on täten REI60.**

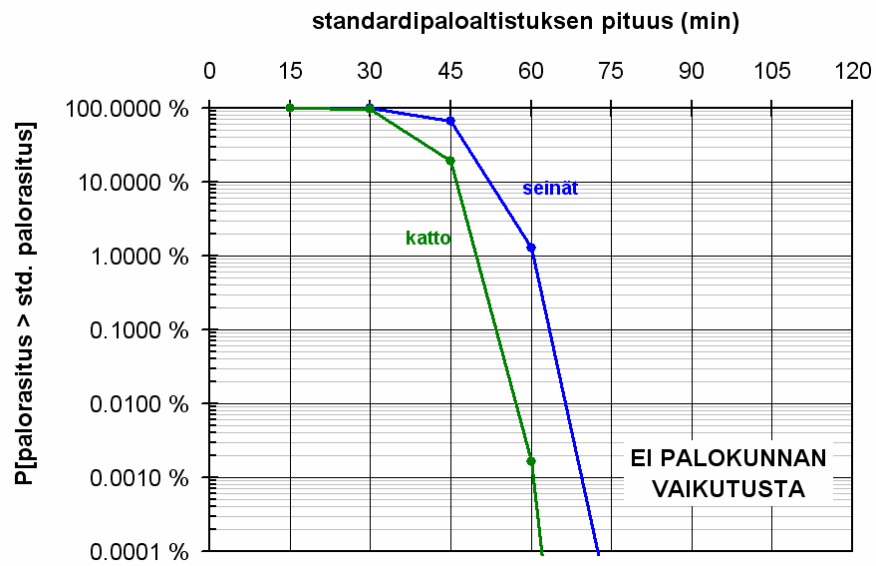


Kuva 176. Tarkasteltava tilanne.

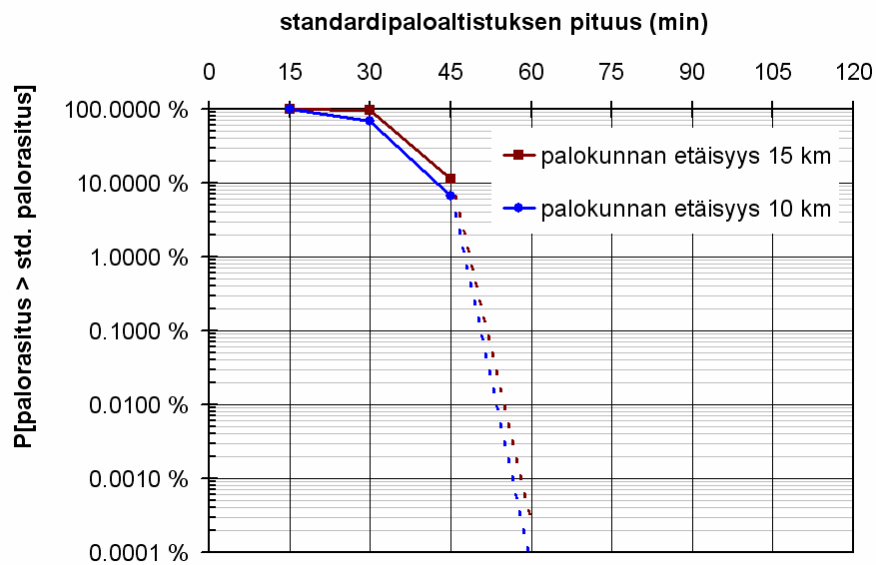


Kuva 177. Seiniin ja kattoon kohdistuvan lämpövuonon kumuloitu arvo normaalijakamalla mallinnettuna, kun kaksi autoa palaa rakennuksia yhdistävässä katoksessa.

a)



b)

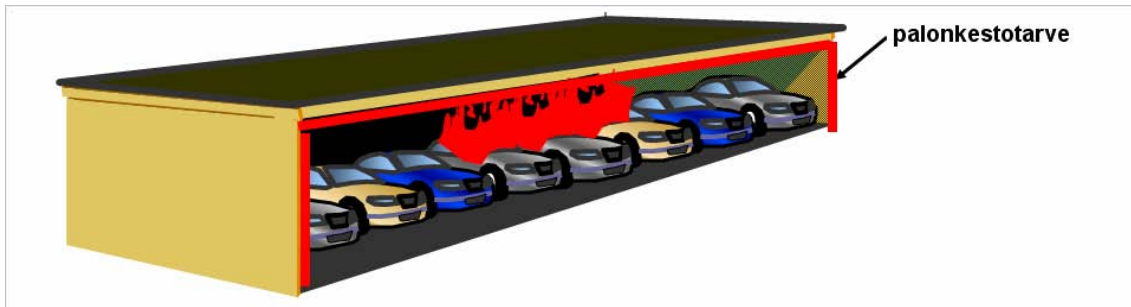


Kuva 178. Seiniin kohdistuvan lämpövuon kumuloituneen arvon vertaaminen standardipalorasituksessa kumuloituvaa lämpövuohon: a) palokunnan vaikutusta ei ole otettu huomioon ja b) palokunnan vaikutus on otettu huomioon.

13.3.3 Autokatospalo

13.3.3.1 Autokatoksen palonkesto

Tässä kohdassa tarkastellaan autopaikoituskatoksen omien rakenteiden palonkestotarvetta kuvassa 179 havainnollistetussa tilanteessa.

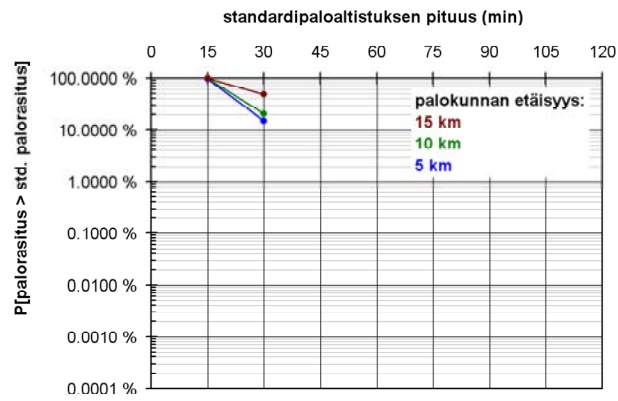


Kuva 179. Tarkasteltava tilanne.

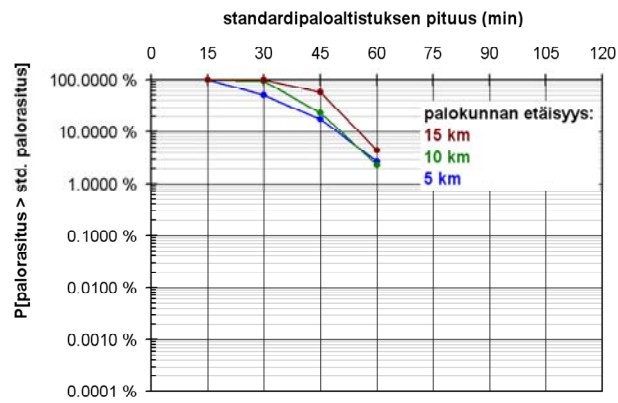
Katokseen kohdistuvan lämpösäteilyn kertynyt määrä verrattuna standardipalorasitukseen esitetään kuvissa 180 ja 181. Lämpösäteilyn kertynyt määrä riippuu etenkin palavien autojen lukumäärästä. Kuvassa 182 esitetään yhteenveto lämpösäteilyn kertyneestä määrästä verrattuna standardipalorasitukseen kahdelle eri palavien autojen määrän skenaariolle, joissa molemmissa yhden auton palojen osuus on 90 % (tämä on esim. Joyeuxin ym. [2001] tilastotutkimuksessa määritetty arvo) ja toisessa kolmen auton ja viiden auton palojen osuudet ovat 9 % ja 1 % ja toisessa 9,9 % ja 0,1 %.

Voidaan nähdä, että katokseen kohdistuva palorasitus voi vastata 60 minuutin standardipalorasitusta, mutta on syytä huomata, että tämä ei vastaa palokestostandardien mukaista REI-luokituksien palokestoa, vaan tässä palonkestotarve liittyy katokseen ”puhki palamiseen” tai romahtamiseen palossa. Jos katos ei täytä näitä vaatimuksia, tulee sen sivulle ja taakse varata etäisyyttä muihin kohteisiin (ks. kohta 12.5.2).

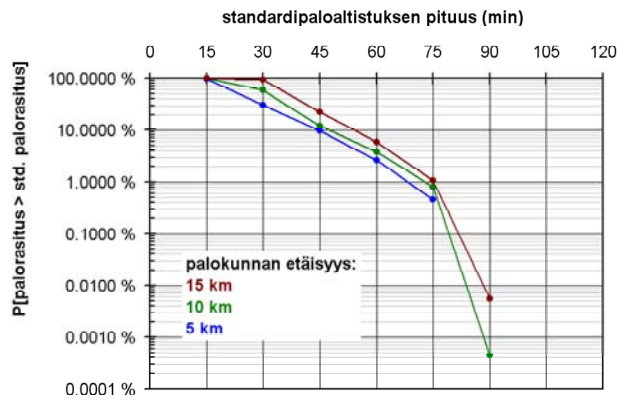
a)



b)

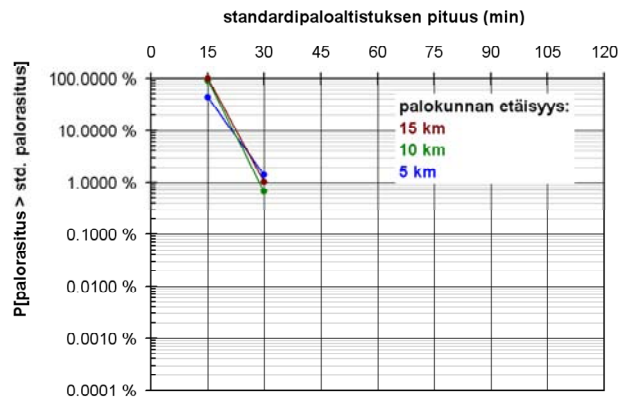


c)

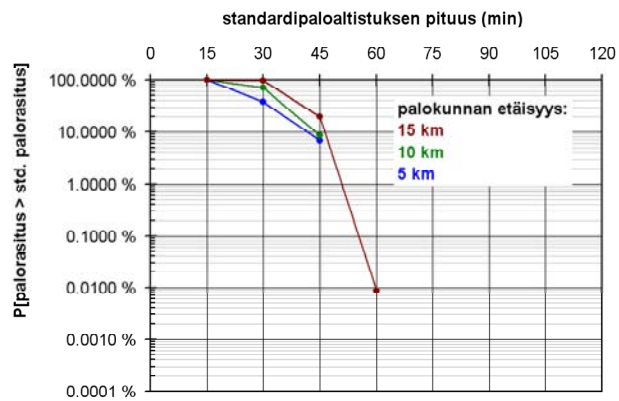


Kuva 180. Katokseen kohdistuvan lämpösäteilyn kertynyt arvo standardipalorasituksena tulkittuna, kun katoksen ovet ovat auki: a) yhden auton palo, b) kolmen auton palo ja c) viiden auton palo.

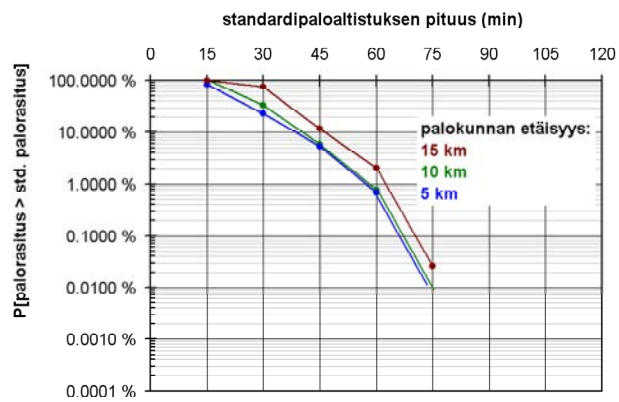
a)



b)



c)



Kuva 181. Katokseen kohdistuvan lämpösäteilyn kertynyt arvo standardipalorasituksena tulkittuna, kun katoksen ovet ovat kiinni: a) yhden auton palo, b) kolmen auton palo ja c) viiden auton palo.

a)

Osuudet:

- 1 auto: 90 %
- 3 autoa: 9 %
- 5 autoa: 1 %



b)

Osuudet:

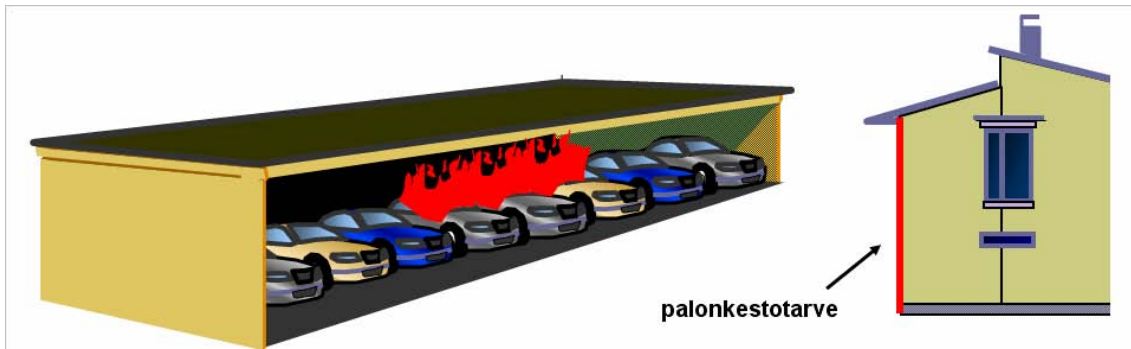
- 1 auto: 90 %
- 3 autoa: 9,9 %
- 5 autoa: 0,1 %



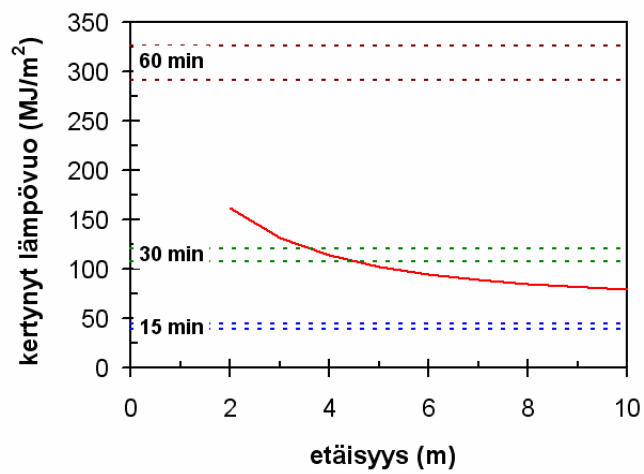
Kuva 182. Katokseen kohdistuvan lämpösäteilyn kertynyt arvo standardipalorasituksena tulkittuna, yhteenveto käyttäen kahta eri palavien autojen osuuden skenaarioita: a) yksi auto 90 %, kolme autoa 9 % ja viisi autoa 1 % sekä b) yksi auto 90 %, kolme autoa 9,9 % ja viisi autoa 0,1 %.

13.3.3.2 Autokatospalon uhkaamien kohteiden palonkesto

Tässä kohdassa tarkastellaan autopaikoituskatoksen tulipalon uhkaamien kohteiden palonkestotarvetta kuvassa 183 havainnollistetussa tilanteessa. Kuvasta 184 voidaan nähdä, että palorasitus on pienempi kuin 30 minuutin standardipalon tuottama palorasitus aina, kun etäisyys ylittää n. 4 m.



Kuva 183. Tarkasteltava tilanne.



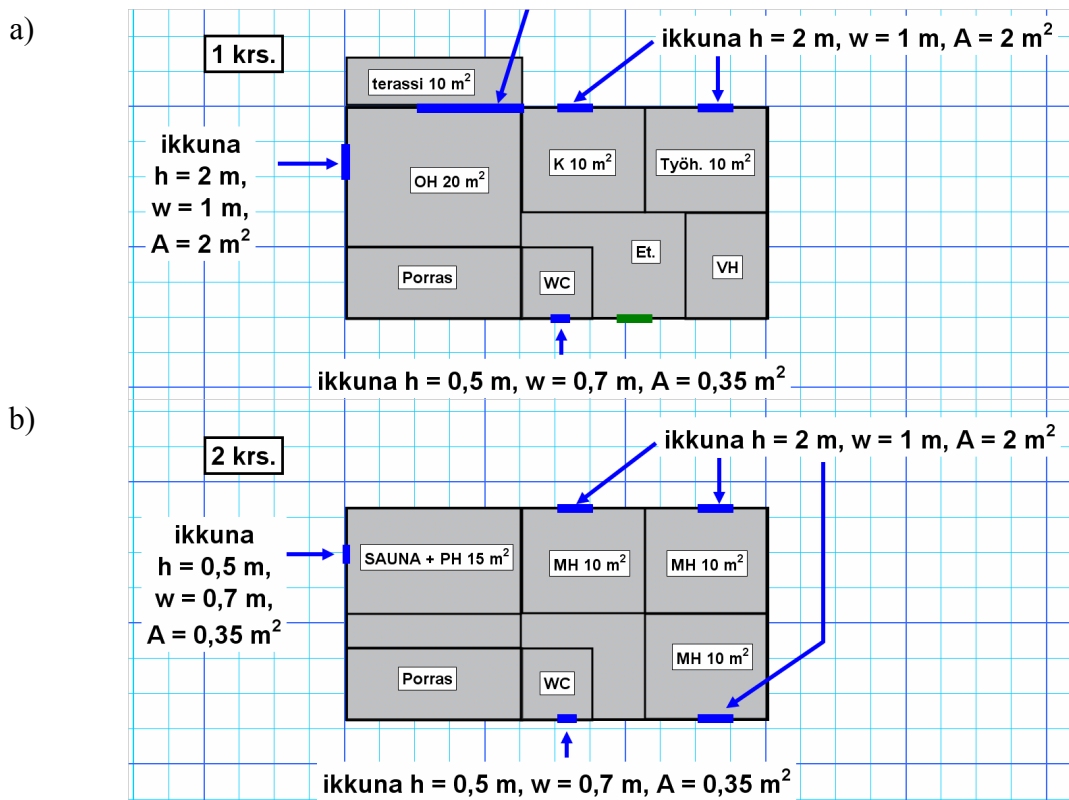
Kuva 184. Ajoneuvokatoksen palo. Palonkestotarve verrattuna standardipalorasitukseen (minuuttiarvot), uhatun kohteen julkisivumateriaali D-luokan tarviketta, palokunnan etäisyys 15 km. Käyrät ovat 99 % fraktiiliarvoja.

OSA IV: SOVELTAMINEN

14. Esimerkki tulosten soveltamisesta tiiviin ja matalan alueen suunnittelussa

Tässä luvussa esitetään esimerkin avulla, miten edellä esitettyjä tuloksia voidaan soveltaa tiivistä ja matalaa rakennustapaa noudattavan alueen suunnittelussa.

Tarkastellaan kuvassa 185 esitettyä (fiktiivistä) asuinrakennusta, jonka pinta-ala on $2 \times 72 \text{ m}^2 = 144 \text{ m}^2$. Talon julkisivut ovat paloluokkaa D.



Kuva 185. Esimerkki: tarkasteltavan talotyypin pohjat.

A. Turvallisten etäisyyksien määrittäminen tarkasteltavalle talotyypille:

1. Riskitason määrittäminen: Oletetaan, että alueen rakennuksissa palon leviäminen yläpohjan onteloon on estetty, joten sopiva riskitaso on luvun 2 mukaan 1–2 %.
2. Ulkoisen palokuorman määrän arviointi: Arvioidaan, että alueelle tehtävät tilat rajaavat aidat toteutetaan kohdassa 8.3.4 esitetyllä tavalla ”harvarakenteisina”, mikä taulukon 43 mukaan ei kasvata ulkoisen palokuorman määrää) ja että terassilla voi olla palokuormaa tyypillisesti muovisen puutarhakaluston verran, mikä taulukon 43 mukaan vastaa 20 % olohuoneen palokuorman tiheyden arvos-

ta. Ulkoinen palokuorma on siis $0\% + 20\% = 20\%$ olohuoneen palokuorman tiheyden arvosta.

3. Palossa mahdollisesti rikkoutuvan ikkunapinta-alan koko:

Olohuone: Oletetaan, että olohuoneen suuri ikkuna ei todennäköisesti rikkoudu kokonaan, vaan suurimmillaan palossa syntyvä aukko on noin $A_w \approx 4 \text{ m}^2$, jolloin siis aukon suhde lattiapinta-alaan on $4 \text{ m}^2/20 \text{ m}^2 = 20\%$. Olohuoneen pienen ikkunan oletetaan voivan särkyä kokonaan, jolloin aukon suhde lattiapinta-alaan keittiössä sekä työ- ja makuuhuoneissa on $2 \text{ m}^2/20 \text{ m}^2 = 10\%$. Muut huoneet: Muiden huoneiden ikkunoiden oletetaan voivan särkyä kokonaan, jolloin aukon suhde lattiapinta-alaan keittiössä sekä työ- ja makuuhuoneissa on $2 \text{ m}^2/10 \text{ m}^2 = 20\%$. Saunan ja vessojen ikkunat ovat niin pieniä, että niihin liittyvä turvaetäisyys ei ole merkityksellinen.

4. Luetaan tarvittavat etäisyydet taulukoista 39, 40 ja 42:

Olohuone:

suuri ikkuna: tarvittava etäisyys eteenpäin on 6,0–6,6 m ja sivulle 4,0–4,4 m,

pieni ikkuna: tarvittava etäisyys eteenpäin on 3,3–3,6 m ja sivulle 1,3–1,4 m

Muut huoneet: tarvittava etäisyys eteenpäin on 3,8–4,0 m ja sivulle 1,7 m

5. Määritetään turvallisen etäisyyden mitoitusellipsin pääakselit:

Olohuone:

suuri ikkuna: $a = 6,6 \text{ m}$ (valittu korkeampi yo. arvoista), $b = 4,4 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 6,9 \text{ m}$ (valittu korkeampi yo. arvoista + puolet terassin leveydestä),

pieni ikkuna: $a = 3,6 \text{ m}$ (valittu korkeampi yo. arvoista), $b = 1,4 \text{ m} + 1,0 \text{ m} = 2,4 \text{ m}$ (valittu korkeampi yo. arvoista + puolet ikkunan leveydestä),

Muut huoneet: $a = 4,0 \text{ m}$ (valittu korkeampi yo. arvoista), $b = 1,7 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 2,2 \text{ m}$.

Tulokset esitetään kuvassa 186.

6. Autosuojat ja jätekatokset:

a) Tarkastellaan ensin 6 kotitalouden yksikköä. Näille 1 jäteastia tarjonnee riittävän jätehuoltokapasiteetin. Kun tämän katoksen katto tehdään paloon osallistumattomasta tarvikkeesta, on sen tarvitsema turvaetäisyys alle 1,5 m (Taulukko 44). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että katoksen sijoittelu ei ole paloteknisten seikkojen määräämä. Seuraavassa käytetään arvoa 4 m. Autopaikkoja tarvittaneen vähintään 6; tässä käytetään arvoa 8. Jos autokatos toteutetaan siten, että sen rakenteellista palonkestoa ei ole erityisrakentein korotettu, on katoksen joka puolelle varattava tilaa vähintään 6,6 m (Taulukko 46). Tässä käytetään arvoa 7 m. Huom! Koska jätekatokselle varattiin tilaa selvästi enemmän kuin palotek-

ninen turvaetäisyys edellyttäisi, voidaan jätekatoksen sallia olevan autokatoksen vaara-alueen sisäpuolella.

Tulokset esitetään kuvassa 186.

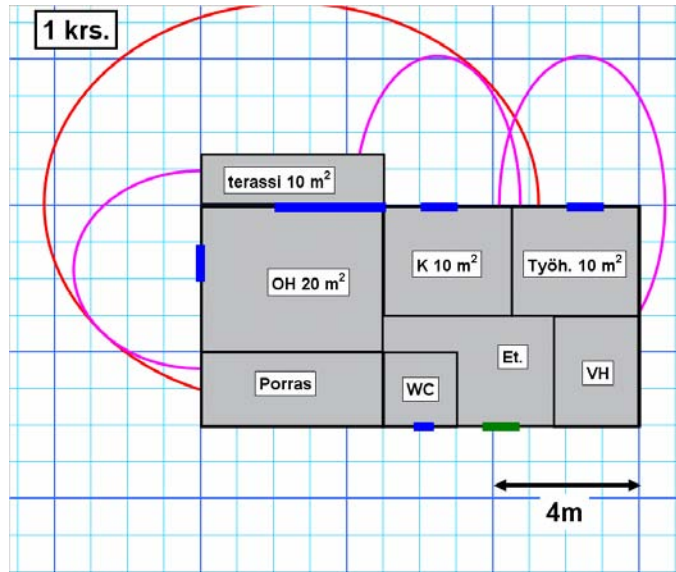
b) Jos kotitalouksia on 8, niin jätekatostarve ehkä lisääntyy ja toisessa tarkastelussa oletetaan tätä yksikköä palvelevan 2 yhden jäteastia katosta. Autojen määrää kasvatetaan vastaavasti kymmeneen.

B. Rakennusten sijoittelu alueelle:

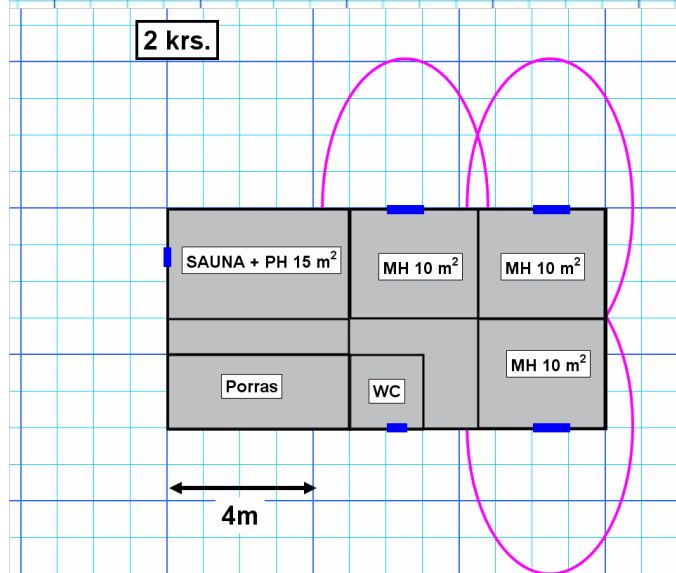
Maankäytön tehokkuuden yläraja-arvio saadaan, kun tarkastellaan pelkästään asuinrakennuksia. Kuvissa 187 ja 188 esitetään eräs edellä määritettyjen turvaetäisyyksien puitteissa toteutettavissa oleva asuinrakennusten sijoittelutapa. Tehokkuudeksi tulee 0,62–0,65.

Tehokkuus alenee, kun otetaan huomioon muut maata tarvitsevat kohteet, kuten jätekatokset ja autojen paikoitustilat. Näitä tapauksia tarkastellaan kuvissa 189–192 (tapaus a) ja 193–195 (tapaus b). Tehokkuus vaihtelee rakennusten sijoittelusta ja autopaikoituksen toteuttamistavasta riippuen välillä 0,38–0,53.

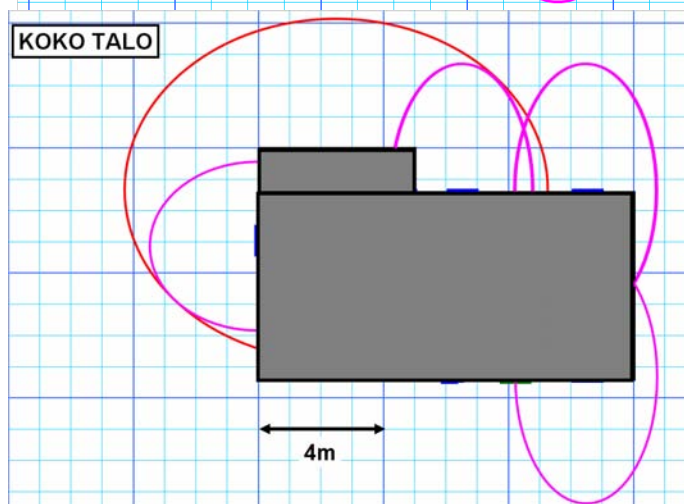
a)



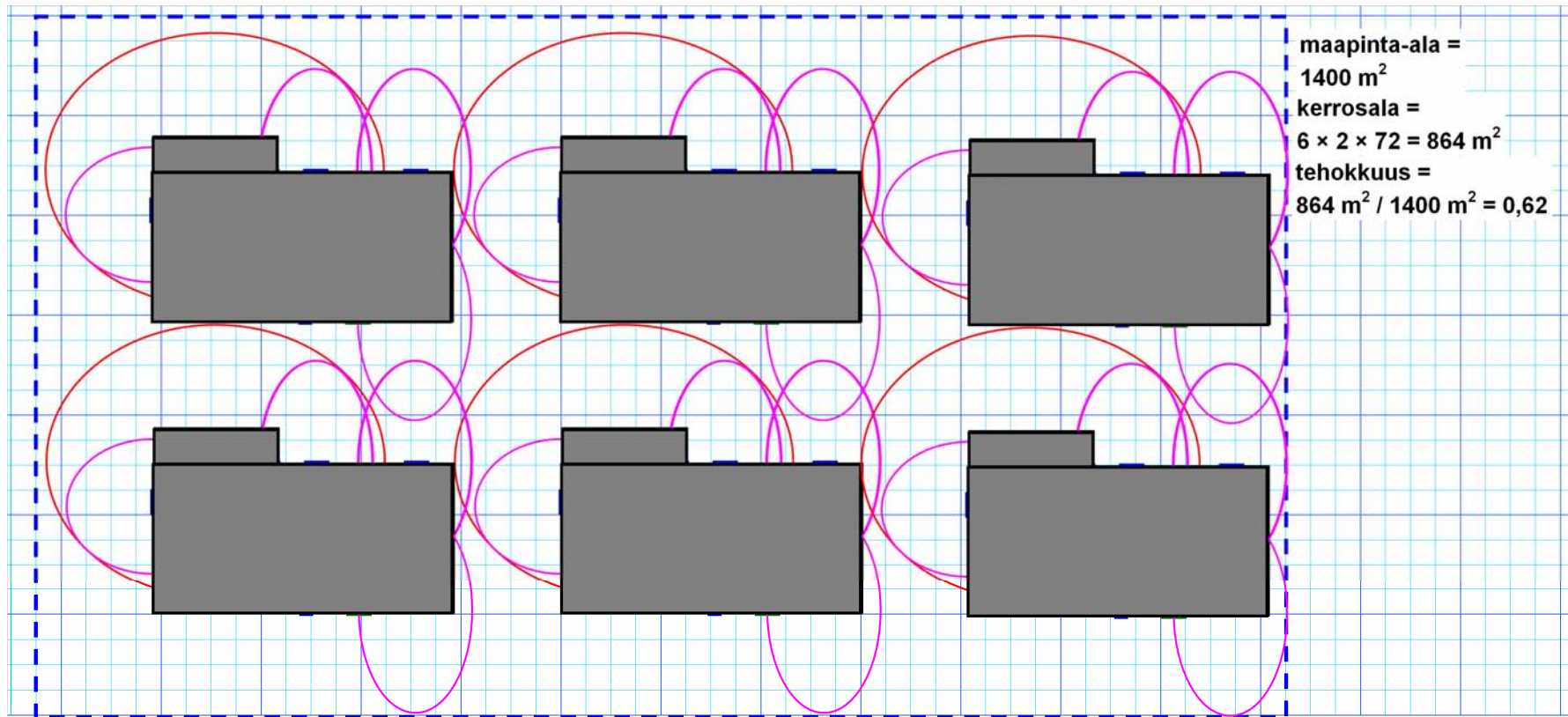
b)



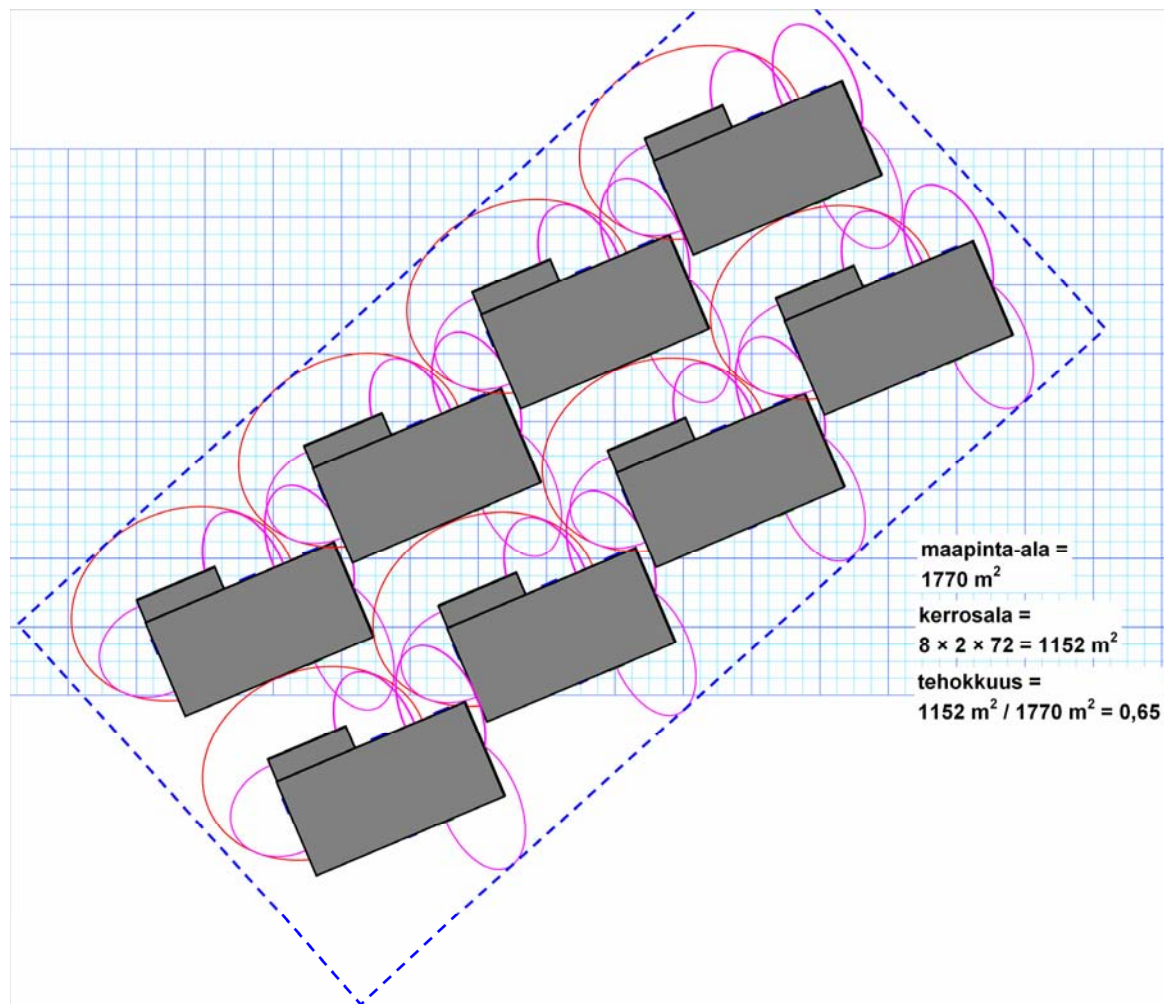
c)



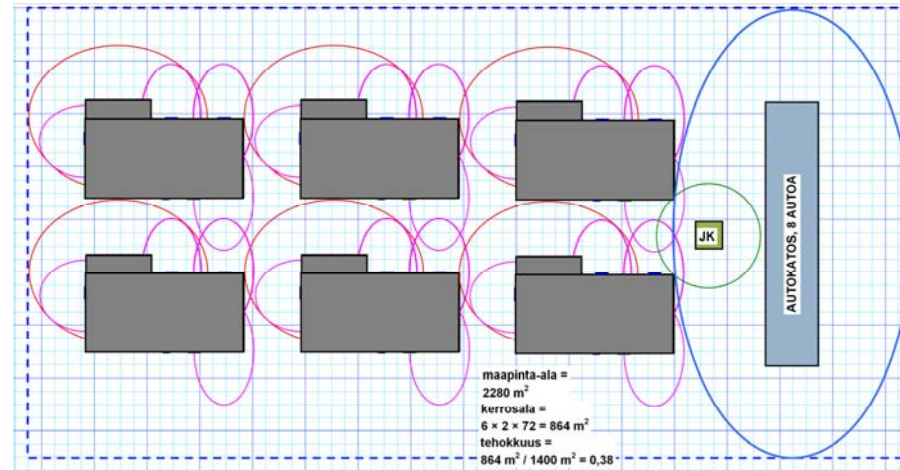
Kuva 186. Esimerkki: tarkasteltavan talotyypin turvaetäisyydet.
a) 1. kerros, b) 2. kerros ja c) koko rakennus.



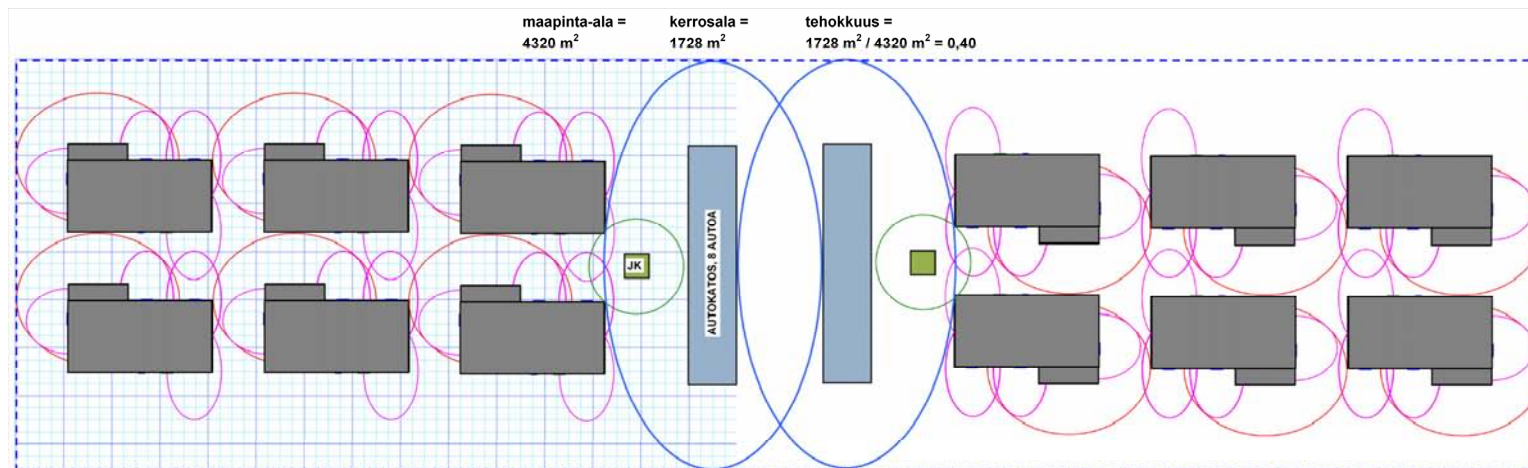
Kuva 187. Esimerkki: pelkästään asuinrakennuksia käsittelevä sijoitteluvaihtoehto, tapaus a. Tehokkuus = 0,62.



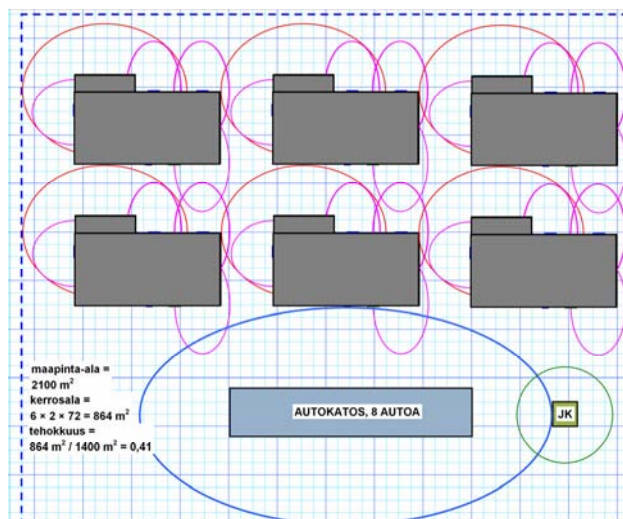
Kuva 188. Esimerkki: pelkästään asuinrakennuksia käsittelevä sijoitteluvaihtoehto, tapaus b. Tehokkuus = 0,65.



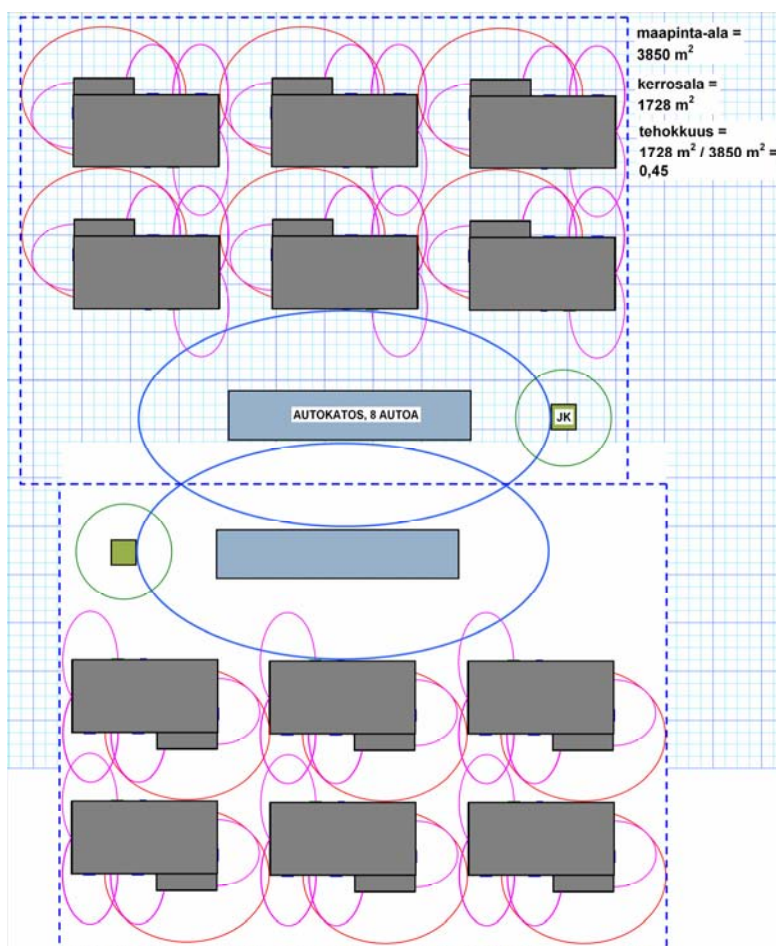
Kuva 189. Esimerkki: asuinrakennuksia ja muita kohteita käsittelevä sijoitteluvaihtoehto, tapaus a. Tehokkuus = 0,38.



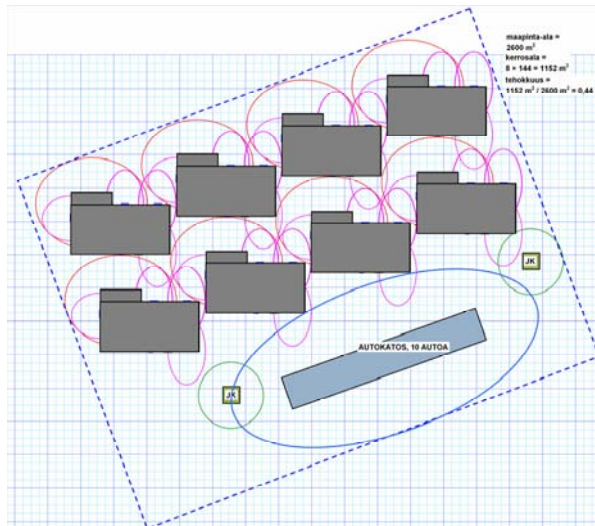
Kuva 190. Esimerkki: edellisessä kuvassa esitetyn tilanteen tarkastelu laajemmassa mittakaavassa. Tehokkuus = 0,40.



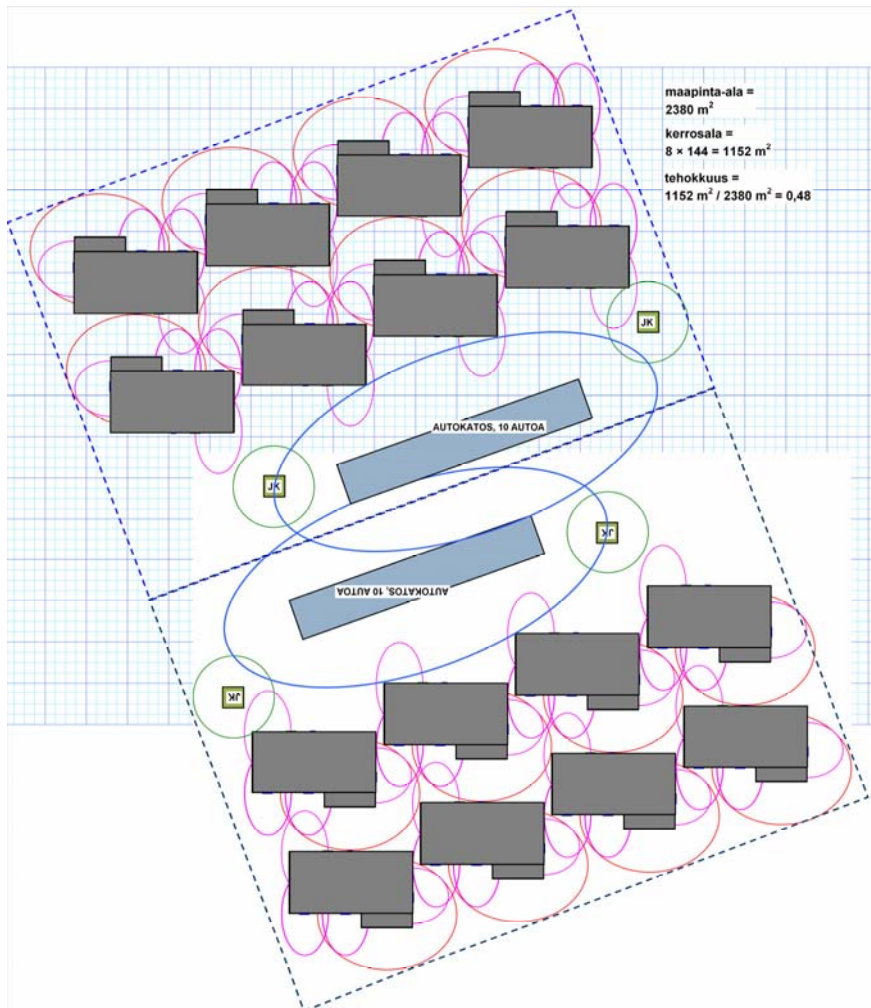
Kuva 191. Esimerkki: asuinrakennuksia ja muita kohteita käsittelevä sijoitteluvaihtoehto, tapaus a. Tehokkuus = 0,41.



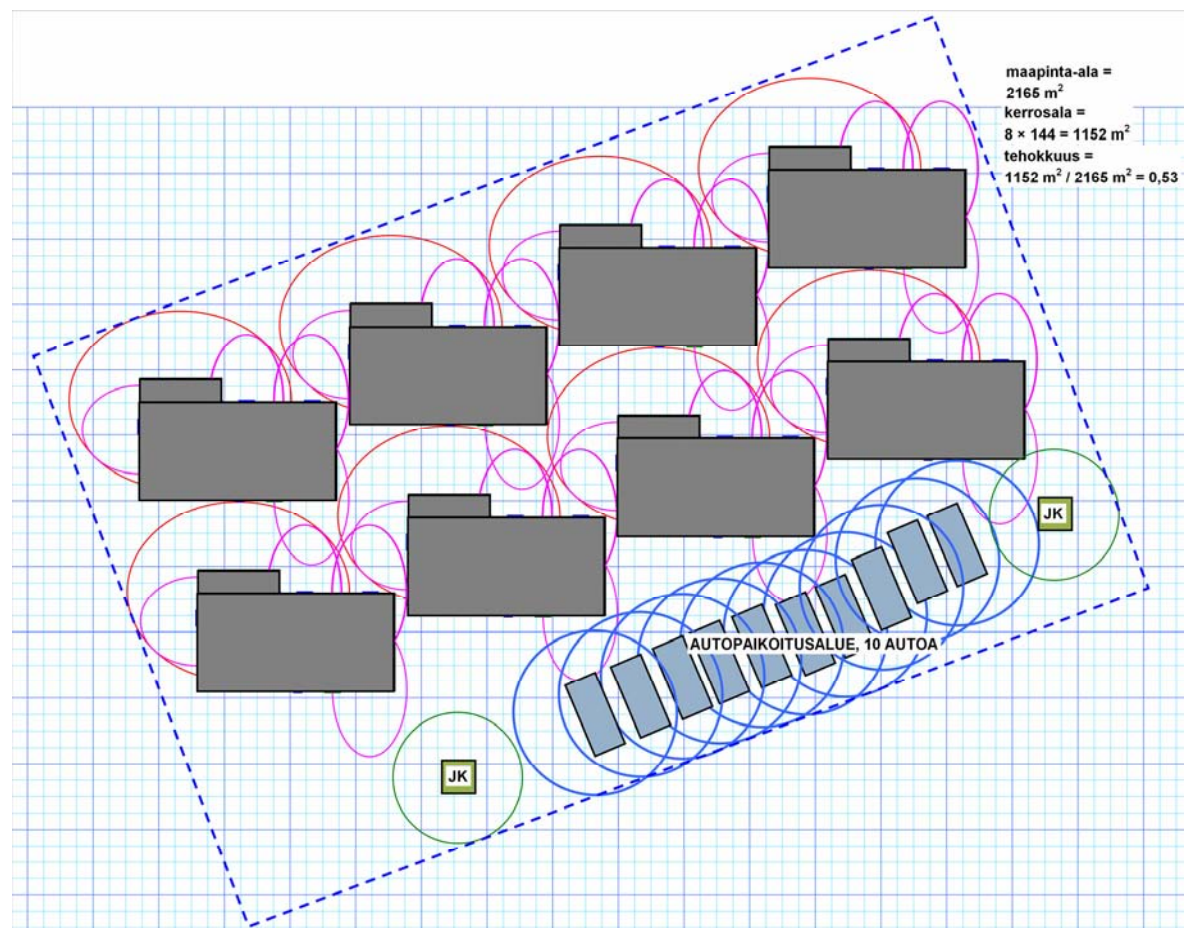
Kuva 192. Esimerkki: edellisessä kuvassa esitetyn tilanteen tarkastelu laajemmassa mittakaavassa. Tehokkuus = 0,45.



Kuva 193. Esimerkki: asuinrakennuksia ja muita kohteita käsittelevä sijoitteluvaihtoehto, tapaus b. Tehokkuus = 0,44.



Kuva 194. Esimerkki: edellisessä kuvassa esitetyn tilanteen tarkastelu laajemmassa mittakaavassa. Tehokkuus = 0,48.



Kuva 195. Esimerkki: asuinrakennuksia ja muita kohteita käsittelevä sijoitteluvaihtoehto, tapaus b. Tehokkuus = 0,53.

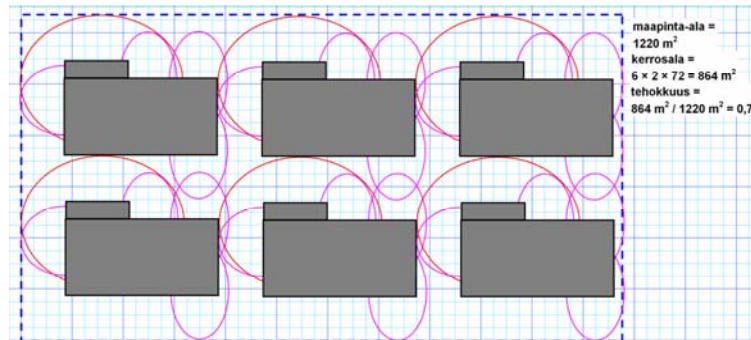
15. Joitain ohjeita koskien tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuutta

Tässä luvussa annetaan edellä esitettyä esimerkkiä täydentäviä sekä yleisluontoisia ohjeita koskien tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuutta.

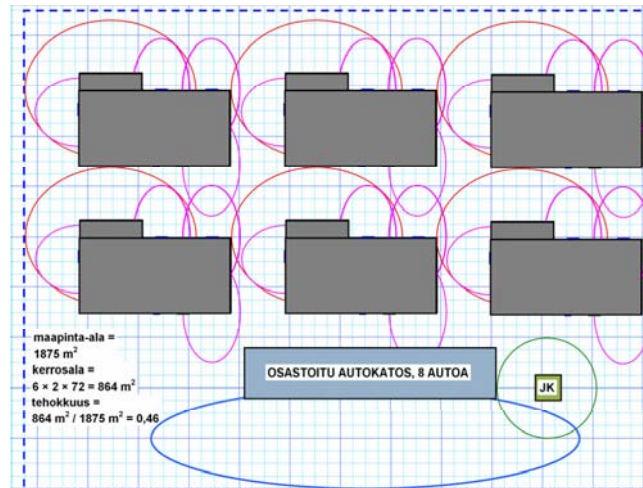
- Alueiden tehokkuutta voidaan nostaa käyttämällä aktiivisia tai passiivisia palosuojelumenetelmiä:
 - Sprinklauksella voidaan taulukon 38 mukaan päästä 20–50 % suuruisiin pienennyksiin turvaetäisyydessä verrattuna sprinklaamattomaan tilanteeseen. Käytännössä tällöin voidaan usein löytää rakennusten sijoittelussa ratkaisu, jossa paloturvallisuuden vaatimat etäisyysvaatimukset eivät ole mitoittava tekijä.
 - Paloilmoituksen antavat paloilmaisimet voivat nostaa tehokkuutta karkeasti ottaen 10–20 %, ks. kuva 196 (tarkempi tapauskohtainen arvo saadaan selville soveltamalla edellä esitettyä menettelytapaa käyttäen taulukossa 38 esitettyjä turvaetäisyyden vähennystekijöitä).
 - Kohteiden palonkestoa parantamalla voidaan tehokkuutta saada nostettua yli 10 % (esimerkkinä autokatos kuvassa 197).
 - Muita rakenteellisia keinoja ovat mm.
 - Jättää jokin asuinrakennuksen julkisivuista ilman aukkoja (tämä voi olla esim. seinä, johon rajautuu eteis- tai varastotiloja), jolloin – edellyttäen, että palon leviäminen yläpohjan onteloon on katkaistu – tällaisen seinän syttyminen siinä mielessä kuin tässä työssä on tarkasteltu ei ole kriittistä ja etäisyysvaatimuksia voidaan tällaisessa tapauksessa alentaa (käytännössä esim. toimivuusnäkökohdat yms. asettavat tietyn rajaetäisyyden).
 - Runsaasti palokuormaa sisältävät varastot, esim. puu- tai pellettivarastot, tulisi osastoida kaikkiin mahdollisiin palonleviämisseuranteisiin, ei vain huoneiston suuntaan. Palon leviämisen rajoittaminen muihin rakennuksiin ei kuitenkaan vaadi standardien mukaista REI-palonkestoa, vaan sitä, että mahdollinen varaston palokuorman palo ei pääse murtautumaan varaston ulkopuolelle ennen kuin palokunta on paikalla. Suljetussa varastotilassa (pieni ikkuna jos sitäkään ja itsestään sulkeutuva ovi) palo on tyypillisesti hapen saannin rajoittama, eikä siten pala kovin kuumana ja asiantuntija-arviona voidaan arvioida 30 minuutin standardipalon toimivan soveltuvana mitoituksen lähtö-

kohtana. Palotekninen asiantuntija voi tarvittaessa määrittää palonkestotarpeen tarkemmin.

- Toteuttaa alueelle tehtävät aidat mieluummin tiiviinä rakenteina, jotka vähentävät palon leviämisen vaaraa, kuin ritilämäisinä rakenteina, jotka kasvattavat palon leviämisen vaaraa (ja jotka siksi on otettava huomioon turvaetäisyyksien mitoituksessa).
- Edellä esitetyt mitoitusohjeet, -taulukot ja -kaavat eivät kata kaikkia mahdollisia tilanteita: tarkastellut huonetilojen koot ovat noin 10 m^2 tai noin 20 m^2 ja tarkasteltu ulkoisen palokuorman kattama alue on 10 m^2 . Tilanteet, joissa nämä arvot eivät ole soveltuvia voidaan käsitellä lineaarisella inter- tai ekstrapoloinnilla. Tämä tarkoittaa käytännössä seuraavaa:
 - jos huonekoko on esim. 30 m^2 , käytetään 20 m^2 :n suuruiselle huoneelle määritettyjä turvaetäisyyksiä kerrottuna tekijällä $30/20 = 1,5$. Aukkosuhde laskeaan käyttäen todellista lattiapinta-alaa eli 30 m^2 ;
 - jos ulkoisen palokuorman alue on $7,5\text{--}12,5 \text{ m}^2$, voidaan käyttää suoraan edellä esitettyjä 10 m^2 :n pinta-alalle määritettyjä tuloksia; mutta jos tämä alue on esim. 5 m^2 , niin käytetään 10 m^2 :n pinta-alalle määritettyjä palokuorman tiheyksiä kerrottuna tekijällä $5/10 = 0,5$; jos tämä alue on esim. 20 m^2 , niin käytetään 10 m^2 :n pinta-alalle määritettyjä palokuorman tiheyksiä kerrottuna tekijällä $20/10 = 2$.



Kuva 196. Esimerkki paloilmaisimien vaikutuksesta, sama tapaus kuin kuvassa Kuva , mutta rakennuksissa on paloilmoituksen antavat ilmaisimet. Tehokkuus kasvaa 0,62:sta 0,71:een eli n. 15 %.



Kuva 197. Esimerkki autokatoksen palonkeston parantamisen vaikutuksesta, sama tapaus kuin kuvassa Kuva , mutta autokatos kestäisi standardipaloa 60 minuuttia romahtamatta tai puhki palamatta. Tehokkuus kasvaa 0,41:sta 0,46:een eli n. 12 %.

OSA V: YHTEENVETO

16. Yhteenveto

Tässä raportissa esitetään tutkimus siitä, miten ns. tiiviissä ja matalassa P3-luokan pien-talorakentamisessa voidaan toteuttaa suomen Rakennusmääräyskokoelman osassa E1 [Ympäristöministeriö 2002] luvussa 9 esitetty vaatimus, että ”Palon leviäminen rakennuksesta toiseen ei saa vaarantaa henkilöturvallisuutta eikä aiheuttaa kohtuuttomana pidettäviä taloudellisia eikä yhteiskunnallisia menetyksiä”.

Kysymystä on käsitelty perusteellisesti lähtien – aina kun se on ollut mahdollista – relevanttien tulipalon kehittymistä ja leviämistä koskevien perusilmiöiden selvittämisestä. Näin saaduista tuloksista on edetty paloturvallisuutta koskeviin tuloksiin, jotka on olennaisimpien tekijöiden eli etäisyys- ja palonkestotarpeiden osalta tiivistetty ohjeiksi suunnittelussa käytettävistä lukuarvoista ja menettelytavoista. Myös yleisemmällä tasolla olevia ohjeita annetaan.

Turvallisia etäisyyksiä koskevat tulokset ovat monisyisempiä kuin nykymääräyksissä annettu yksinkertainen ohje, mutta tämä heijastaa vain sitä tosiseikkaa, että palon leviäminen monimuotoisella asuinalueella on hyvin monisyinen ongelma. Tuloksien soveltaminen on nykykäytäntöä työläämpää, mutta toisaalta tuloksia soveltamalla voidaan päästä hyvinkin korkeisiin maankäytön tehokkuuksiin (0,5–0,6), mikä enemmän kuin kompensoi niiden soveltamisen vaatiman tarkemman suunnittelun vaatiman panostuksen.

Palonkeston osalta tulokset pääsääntöisesti osoittavat, että rakenteellista turvaetäisyyden kompensointia tarvitaan vain hyvin lähelle rakennettaessa: rakenne, joka kestää 30 minuutin standardipalon riittää aina 3–4 m:iin saakka. Tältä osin tulokset puoltavat nykykäytäntöä selkeästi lievempää linjanvetoa. Etenkin vaatimukset A-luokan tarvikkeista tehdyistä palomuureista ovat tulosten valossa selvästi ylimitoitettuja. Näihin pääsääntöisiin tuloksiin on kuitenkin eräs merkittävä poikkeus: jos autojen paikoitukselle varataan tilaa kahta asuinrakennusta yhdistävään katettuun tilaan, niin tällöin saatujen tulosten mukaan tähän tilaan rajautuvien seinien tulisi täyttää EI60-luokan vaatimukset.

Kiitokset

Tekijä kiittää tekn. tri Kati Tillanderia avusta tilastoanalyysissä ja hankkeen johto- ja seurantaryhmää erittäin asiantuntevasta ohjauksesta sekä rahoittajia, Wood Focus Oy:tä, ympäristöministeriötä, Rakennuspolyuretaaniteollisuutta, Pientaloteollisuus ry:tä, Espoon kaupunkia ja VTT:tä.

Lähdeluettelo

Anthenien, R. A., Tse, S. D. & Fernandez-Pello, A. C. 2005. On the trajectories of embers initially elevated or lofted by ground fire plumes in high winds. Submitted to Fire Safety Journal.

Babrauskas, V., Lawson, J. R., Walton, W. D. & Twilley, W. H. 1982. Upholstered Furniture Heat Release Rates Measured With A Furniture Calorimeter. Washington, DC 20234: National Bureau of Standards, National Engineering Laboratory, Center for Fire Research. 78 s. (NBSIR 82-2604)

Babrauskas, V., Baroudi, D, Myllymäki, J. & Kokkala, M. 1997. The Cone Calorimeter Used for Predictions of the Full-scale Burning Behaviour of Upholstered Furniture. Fire and Materials, Vol. 21, s. 95–105.

Babrauskas, V. 2003. Ignition Handbook. Issaquah, USA: Fire Science Publishers. 1116 s. ISBN 0-9728111-3-3

Bluhme, D. A. 1987. ISO Ignitability Test and Proposed Criteria. Fire and Materials, Vol. 11, No. 4, s. 195–199.

Bruck, D. & Horasan, M. 1995. Non-Arousal and Non-Action of Normal Sleepers in Response to a Smoke Detector Alarm. Fire Safety Journal, Vol. 25, s. 125–139.

CEN 2002. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2: General Actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN. 59 s. (EN 1991-1-2:2002 E.)

Ellis, P. F. 2000. The aerodynamic and combustion characteristics of eucalypt bark – a firebrand study. Ph.D. Dissertation, Australian National University, Canberra.

Göransson, U. & Omrane, A. 2004. Surface Temperature Measurements in the Cone Calorimeter Using Phosphorescence. Edinburgh, Scotland: Interflam 2004. (Interflam '04). International Interflam Conference, July 5–7, 2004. 10th Proceedings. Volume 2. London, England: Interscience Communications Ltd. S. 1431–1442.

Hall, J. R. Jr. 1995. U.S. Experience With Smoke Detectors and Other Fire Detectors: Who Has Them? How Well Do They Work? When Don't They Work? National Fire Protection Assoc., Quincy, MA. 42 s.

Hasofer, A. M. 2001. A Stochastic Model for the Time to Awaken in Response to a Fire Alarm. Journal of Fire Protection Engineering. Vol. 11, August, s. 151–163.

Arkkitehtitoimisto Heikkilä & Kauppinen Oy. Tiivis-matala-aluepaloriskit. Helsinki, 2005.

Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M. & Lappi, E. 2002. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. Espoo: VTT. 95 s. + liitt. 51 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2123.) ISBN 951-38-5935-5; 951-38-5136-3.

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Jumppanen, U. M., Kouhia, I., Vaari, J. & Weckman, H. 2003. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen. Espoo: VTT. 168 s. + liitt. 52 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2202.) ISBN 951-38-6156-2; 951-38-6157-0

Hietaniemi, J., Korhonen, T., Joyeux, D. & Ayme, N. 2004. Risk-based Fire Safety Engineering Approach to Obtain Balanced Structural Fire Resistance Requirements. Teoksessa: Bradley, D., Drysdale, D. & Molkov, V. Fire and Explosion Hazards, Proceedings of the Fourth International Seminar. Londonderry, Northern Ireland, UK, September 8–12, 2003. Belfast, Northern Ireland, UK: University of Ulster. S. 505–514. ISBN 85923 186 1

Hietaniemi, J. & Korhonen, T. 2005. Risk-Based Attestation of Fire Safety of Wooden Façades in Concrete-Framed Residential Multi-Storey Buildings. Fire Safety Science. Proceedings of the Eighth International Symposium, 18–23 September 2005, Beijing, China. International Association for Fire Safety Science. (Painossa.)

Holm, C. & Loikkanen, P. 1981. Joint Investigation of vertical Furnaces in Nordic Countries. Espoo: VTT Research Notes 56/1981. 52 s. + liitt. 6 s. ISBN 951-38-1361-4.

Ingason, H. 2001. Tunnelkonferensen 2001 – Nordisk sikkerhetskonferanse for underjordiske anlegg. Varfor får ulykkene så katastrofale følger? [Online]. Available: <http://www.sp.se/fire/Nyheter/PPresentation-TunnelkOsloAug2001-filer/frame.htm>. [2003, July 25]

Ingason, H. 2004. Fire Dynamics in Tunnels. Chapter 13. Fire Safety Handbook. Heriot-Watt University.

Joyeux, D., Kruppa, J., Cajot, L.-G., Schleich, J.-B., van de Leur, P. & Twilt, L. 2001. Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings. Saint-Remy-Les-Chevreuse Cedex, France: CTICM. Final Report. ECSC Contract nro. 7215 PP 025. 156 s. + liitt. 11 s.

Korhonen, T., Hietaniemi, J., Baroudi, D. & Kokkala, M. 2003. Time-dependent event-tree method for fire risk analysis: tentative results. *Fire Safety Science. Proceedings of the Seventh International Symposium, Worcester, Massachusetts, USA, 16–21 June 2002*. Boston, MA: International Association for Fire Safety Science. S. 321–332. ISBN 0-9545348-0-8.

Korhonen, T. & Hietaniemi, J. 2003. Riskianalyysiin perustuva paloturvallisuussuunnittelu: Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen (Fire safety design based on risk assessment using Time-Dependent Event-Tree model). *Palontorjuntatekniikka*. Vol. 33, No: 3–4, s. 17–22.

Korhonen, T. & Hietaniemi, J. 2004. Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa. Espoo: VTT. 58 s. + liitt. 36 s. (VTT Tiedotteita – Research Notes 2253.) ISBN 951-38-6482-0; 951-38-6483-9

Korhonen, T., Hostikka, S. Keski-Rahkonen, O. ja Hietaniemi, J. 2005. Tulipalojen henkilöriskin siedettävän tason arviointi. *Palontorjuntatekniikan erikoisnumero*, s. 102–105.

Lattimer, B. Y. 2002. Heat fluxes from fires to surfaces. In: DiNenno, P. J., Drysdale, D., Beyler, C. L. & Walton, W. D. (toim.). *SFPE Handbook for Fire Protection Engineering*. 3. p. S. 2/269–296.

Law, M. & O'Brien, T. 1981. *Fire Safety of Bare External Structural Steel*. Croydon: Constrado. ISBN 0862000262

Manzella, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R. & Yang, J. C. 2005. On the ignition of fuel beds by firebrands. *Fire and Materials*. (Painossa.)

Mikkola, E. 1989. Puupinnan syttyminen. Espoo: VTT Tiedotteita – Research Notes 1057. 48 s. ISBN 951-38-3589-8

Nyyssönen, T., Rajakko, J. & Keski-Rahkonen, O. 2005. On the reliability of fire detection and alarm systems. Exploration and analysis of data from nuclear and non-nuclear installations. Espoo: VTT. 62 s. + liitt. 6 s. (VTT Working Papers 18) 951-38-6569-X (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

OREDA 1992. *Offshore Reliability Data Handbook*, OREDA Participants, Høvik. 2. p. 614 s.

Pagni, P. J. 1993. Causes of the 20 October 1991 Oakland Hills Conflagration. *Fire Safety Journal*, Vol. 21, s. 331–339.

- Pálsson, G. I. 2004. Risk Management in Hvalfjörður Tunnel. Lund: Lund University. Report 5136. 134 s. ISSN: 1402-3504, ISRN: LUTVDG/TVBB--5136-SE
- Rehm, R., Evans, D., Mell, W., Hostikka, S., McGrattan, K. Forney, G., Bouldin, C. & Baker, E. Neighborhood-Scale Fire Spread. Orlando, Florida: 5th Symposium on Fire & Forest Meteorology, 16–20 November 2003. J6.7
- Ritchey, T. 1991. Analysis and Synthesis – On Scientific Method – Based on a Study by Bernhard Riemann. Systems Research, Vol. 8, No. 4, s. 21–41. Thesis Publishers.
- Shields, T. J., Silcock, G. W. & Murray, J. J. 1993. Fire and Materials 17, s. 25–32 .
- Suikkari, R. 2007. Paloturvallisuus ja kaupunkipalot Suomen puukaupungeissa – historiasta nykypäivään. Oulu: Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin osasto A 42, Oulu 2007. ISSN 0357-8704 ISBN 978-951-42-8389-5
- Sultan, M. A. 2006. Incident heat flux measurements in floor and wall furnaces of different sizes. Fire and Materials, Vol. 30, s. 383–396.
- STUK. 2003. Todennäköisyyspohjaiset turvallisuusanalyysit (PSA) ydinvoimalaitosten turvallisuuden hallinnassa. Helsinki: Säteilyturvakeskus. ISBN 951-712-705-7 (nid.) ISBN 951-712-706-5 (pdf) ISBN 951-712-707-3 (html) ISSN 0783-2338
- Sundsberg. 2005. Sundsberg [verkkodokumentti]. Espoo: EKE-yhtiöt. [Viitattu 1.9.2005]. Saatavissa: <http://www.sundsberg.com>.
- Tarifa, C. S., Del Notario, P. P., Moreno, F. G. & Villa, A. R. 1967. Transport and combustion of firebrands. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Final Report of Grants FGSP-114 and FG-SP-146. Madrid, May 1967.
- Tran, H. C. & White, R. H. 1992. Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter. Fire and Mater 16, s. 197–206.
- Tse, S. D. & Fernandez-Pello, A. C. 1998. On the Flight Paths of Metal Particles and Embers Generated by Power Lines in High Winds – a Potential Source of Wildland Fires. Fire Safety Journal, Vol. 30, s. 333–356.
- Törmänen, M. & Raitio, R. 2002. Palovaroitimien toiminta ja luotettavuus. Helsinki: Turvatekniikan keskus. 40 s. (TUKES-julkaisu 7/2002)

VTT 2003. Additional fire tests of wooden grating according to the EN13823:2002 (SBI) procedure. Research report RTE4148/03. 35 s.

Waterman, T. E, Takata, A. N. 1969. Laboratory study of ignition of host materials by firebrands. Project J6142}OCD Work Unit 2539A, IIT Research Institute, Chicago.

Woycheese, J. P. & Pagni, P. J. 1997. Brand Lofting Above LargeScale Fires. Teok-sessa: Proceedings of the Second International Conference on Fire Research and Engi-neering, Gaithersburg, MD, 10–15 August, 1997. National Institute of Standards and Technology & Society of Fire Protection Engineers.

Ympäristöministeriö 2002. E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma – Rakennusten paloturvallisuus. Helsinki: Ympäristöministeriö. 40 s.

Yoshioka, H., Hayashi, Y., Masuda, H. & Noguchi, T. 2004. Real-scale fire wind tunnel experiment on generation of firebrands from house on fire. Fire Science and technology, Vol. 23, No. 2, s. 142–150.

Liite A: Huoneistopaloina alkavien tulipalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien määrällinen mallintaminen

Palokuorman tiheys

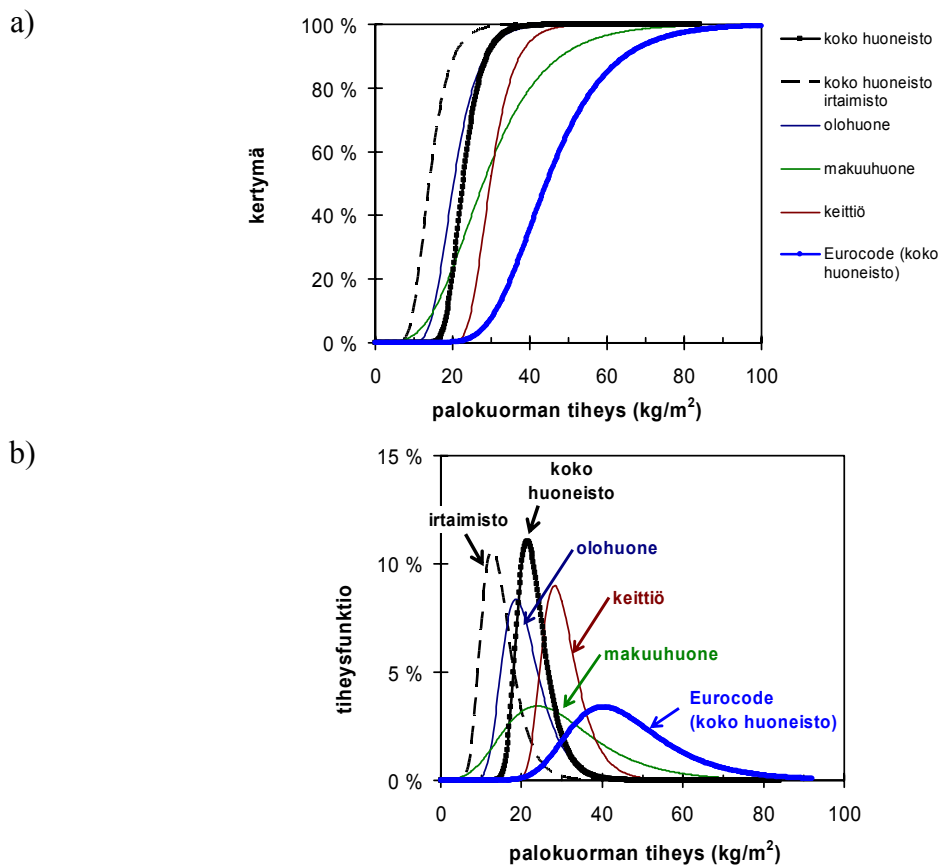
Holm ja Oksanen [1970] julkaisivat vuonna 1970 tuloksia suomalaisten asuinkerrostalojen palokuorman määrästä. Kohteena oli 62 huoneistoa vuonna 1966 valmistuneissa taloissa. Tuonaikaisen käytännön mukaan he raportoivat palokuorman tiheyden samaa energiasisältöä vastaavana vedettömän puun määränä lattiapinta-alaa kohden. Näin ilmaistu palokuorman tiheys voidaan muuntaa nykykäytännön mukaisiin yksikköihin kertomalla se vedettömän puun lämpöarvolla, jonka oli sovittu olevan 4 000 kcal/kg eli 16,7 MJ/kg.

Alla tarkastellaan Holmin ja Oksasen tuloksia tarkemmin. Mainitaan tässä kaksi heidän löydöstään: 1) huoneistotyyppien välillä ei ollut merkittäviä eroja palokuorman tiheyden suhteen ja 2) irtaimiston osuus palokuormasta vaihteli eri tiloissa seuraavasta: koko huoneisto 60 %, olohuoneet 85 %, makuuhuoneet 64 % ja keittiöt 13 %.

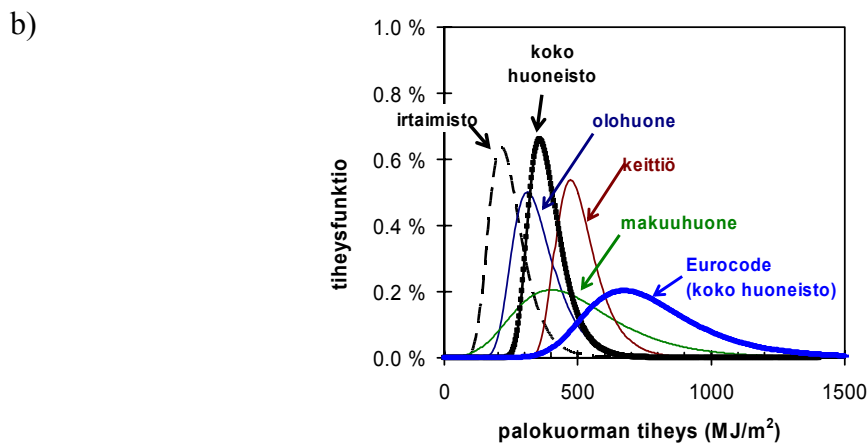
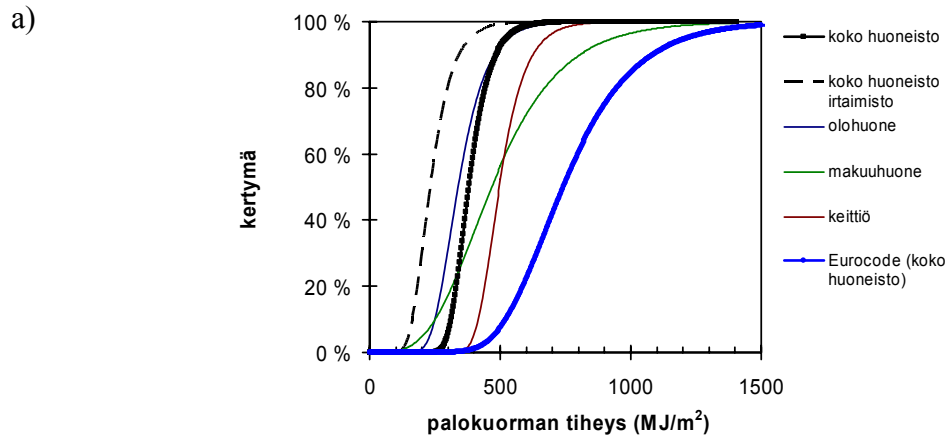
Tässä työssä analysoitiin Holmin ja Oksasen tuloksia käyttämällä niille samaa tilastollista mallia kuin Eurocode 1:ssä [CEN 2002] eli Gumbel-jakaumaa. Kuvassa 198 esitetään Holmin ja Oksasen tulokset näin analysoituina sekä verrataan niitä Eurocode 1:n [CEN 2002] mukaiseen palokuorman tiheyden jakaumaan, kun palokuorman tiheyden mittana on vedettömän puun määrä lattiapinta-alaa kohden. Kuva 199 esittää samat tulokset, kun palokuorman tiheyden mittana on energiamäärä per lattiapinta-ala (MJ/m²). Palokuorman tiheyden jakaumien tunnuslukuja (keskiarvo ja 80 %:n fraktiili) esitetään taulukossa 47.

Nähdään, että Eurocodessa esitetty palokuorman tiheys on selvästi suurempi (tunnuslukujen mukaan noin tekijällä 2 suurempi) kuin Holmin ja Oksasen vuonna 1970 raportoidut tulokset. Mikä selittää tämän eron? Ensimmäisenä voisi tulla mieleen, että Euroopan vaurauden kasvaessa huoneistoissa olevan palokuorman määrä on kasvanut ja tämän vuoksi 2000-luvulla julkaistujen Eurocode-normien palokuorman tiheyden arvot olisivat suurempia kuin 1970-luvulla julkaistut olennaisesti 1960-luvun asumistasoa heijastelevat arvot. Vaurauden kasvamisen suhteen tilanne ilmeisesti onkin edellä esitetyn kaltainen, mutta se ei selitä Eurocoden arvojen ja Holmin ja Oksasen raportoimien arvojen eroa yksinkertaisesti siitä syystä, että myös Eurocodessa esitetyt arvot perustuvat 20–30 vuotta vanhoihin palokuorman määrän selvityksiin: perusdatana Eurocoden arvoja määritettäessä on ollut Ruotsissa 1970 tehty selvitys asuntojen palokuormasta [Nilsson 1970, Kersken-Bradley 1983] ja Sveitsissä 1975 tehty selvitys korkeiden ra-

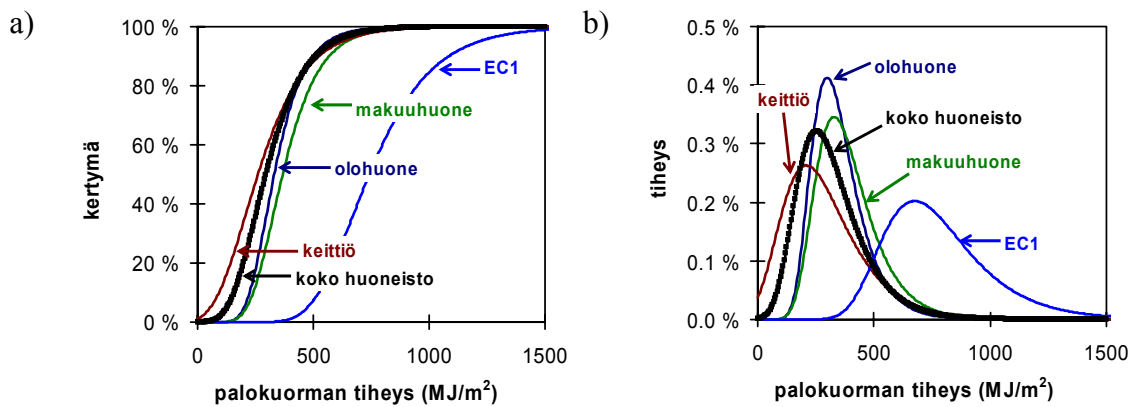
kennusten palokuormasta [Bryl 1975, Kersken-Bradley 1983]. Molemmissa selvityksissä palokuorman tiheys raportoitiin koko huoneiston sisäpintaa kohden (lattia + seinät + katto) ja nämä arvot on esim. Eurocodessa muunnettu lattiapinta-alaa kohden oleviksi palokuorman tiheyden arvoiksi kertomalla ne tekijällä 5,2, joka vastaa huoneiston kokonaispinta-alan suhdetta lattiapinta-alaan huoneessa, jonka korkeus on 2,9 m ja lattian pinta-ala on $3,2 \times 4,3 \text{ m}^2$ (14 m^2). Tekijän 5,2 käyttö perustuu siis mielivaltaisesti valittuun huoneen kokoon. Jos korkeudeksi olisi valittu esim. 2,6 m ja lattian pinta-alaksi $4 \times 5 \text{ m}^2$ (20 m^2), olisi päädytty tekijään 4,3, mikä puolestaan olisi vastannut palokuorman tiheyden keskiarvoa 645 MJ/m^2 . Eurocodeen valittu palokuorman tiheys on valittu palotekniikassa usein käytettyä lähestymistapaa noudattaen, jossa käytetään tarkasteltavan suureen turvattominta mahdollista arvoa (tässä suuri arvo).



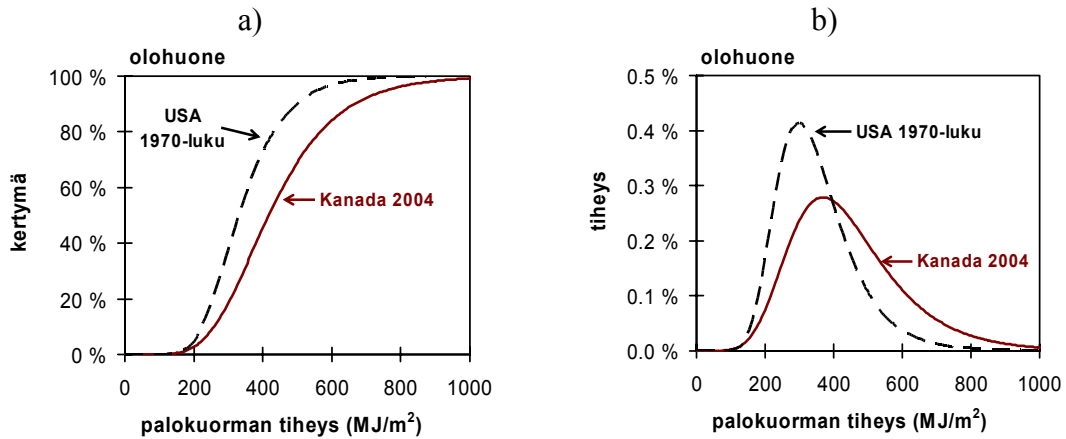
Kuva 198. Holmin ja Oksanen [1970] vuonna 1970 raportoimat suomalaisten asuinkerrostalojen palokuorman tiheyden jakaumat sekä niiden vertaaminen Eurocode 1:ssä [2002] esitettyyn jakaumaan: a) kertymäfunktio ja b) vastaavat tiheysfunktio. Yksikkönä kg kuivaa puuta per lattia-m^2 .



Kuva 199. Holmin ja Oksasen [1970] tulokset esitettynä yksiköissä MJ/m^2 .



Kuva 200. USA:ssa 1970-luvulla mitattuja asuntohuoneistojen palokuorman tiheyden arvoja (vertailun vuoksi on esitetty myös Eurocoden tulos).



Kuva 201. Kanadassa 2000-luvulla mitattu olohuoneen palokuorman tiheys ja sen vertaaminen USA:ssa 1970-luvulla mitattuun olohuoneen palokuorman tiheyteen (vertailun vuoksi on esitetty myös Eurocoden tulos): a) kertymä- ja b) tiheysfunktiot.

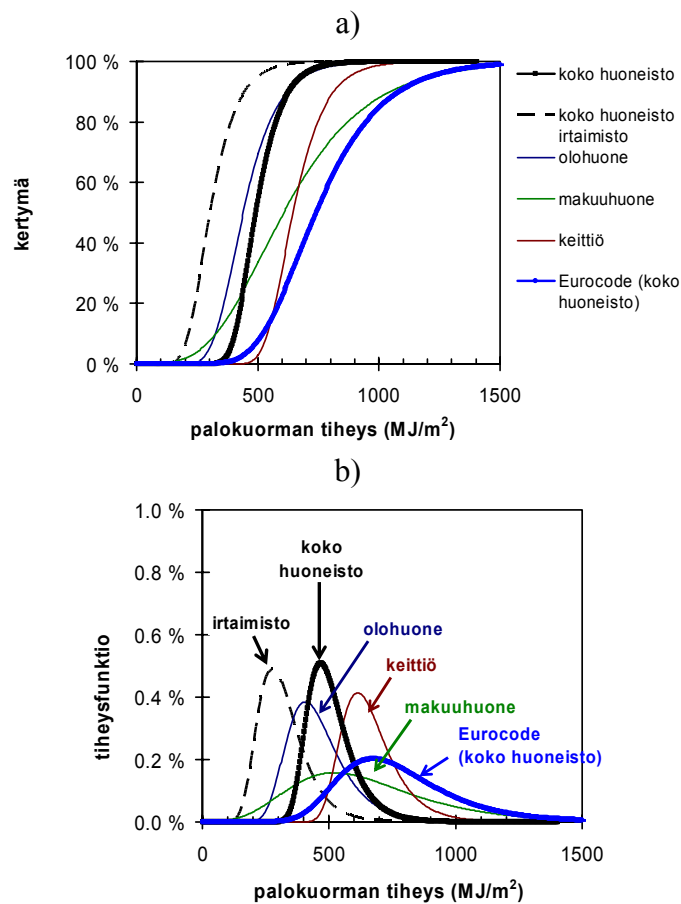
Taulukko 47. Palokuorman tiheyden jakaumien tunnuslukuja.

		Koko huoneisto	Koko huoneiston irtaimisto	Olohuone	Makuuhuone	Keittiö
Holm ja Oksanen [1970]						
q" (MJ/m ²)	keskiarvo	391	247	354	505	511
	80 %:n fraktiili	443	300	422	670	574
Eurocode 1 [CEN 2002]						
q" (MJ/m ²)	keskiarvo	780	-	-	-	-
	80 %:n fraktiili	948	-	-	-	-
USA, 1970-luku [Cambell 1981]						
q" (MJ/m ²)	keskiarvo	320	-	350	390	290
	80 %:n fraktiili	425	-	430	485	415
Kanada 2004 [Bwalya 2004]						
q" (MJ/m ²)	keskiarvo	445	-	-	-	-
	80 %:n fraktiili	565	-	-	-	-

Vaurauden kasvu lienee kasvattanut huoneistoissa olevaa palokuorman määrää. Suomesta eikä muulta Euroopasta ei löytyne aineistoa, josta voitaisiin päätellä, miten suuri tämä kasvu on. Erään tiedonlähdeparin, joka voi antaa suuntaviivoja nykyhetken palokuorman määrän suhteesta 20–30 vuotta sitten mitattuihin arvoihin, on USA:ssa 1970-

luvulla tehty selvitys asuntojen palokuorman tiheydestä [Cambell 1981] ja Kanadassa vastikään vuonna 2004 julkaistu selvitys olohuoneiden palokuorman määrästä [Bwalya 2004] (Kuvat 200 ja 201). Jakaumien tunnuslukujen perusteella Kanadassa 2000-luvulla mitatut palokuorman tiheyden arvot ovat noin 30–40 % korkeampia kuin USA:ssa Kanadassa 1970-luvulla arvot.

Jos Holmin ja Oksasen tuloksia päivitetään 30 % ylöspäin, päädytään kuvassa 202 ja taulukossa 48 esitettyihin tuloksiin. Niitä voidaan – paremman puutteessa – pitää karkeana arviona nykyhetkeä vastaaville todellisille suomalaisten asuinhuoneistojen palokuorman tiheyden jakaumille ja tunnusarvoille.



Kuva 202. Holmin ja Oksasen tulokset 30 %:lla kasvattamalla saadut palokuorman tiheyden jakaumat: a) kertymä- ja b) tiheysfunktiot.

Taulukko 48. Arvio⁵ suomalaisten asuinkerrostalojen palokuorman tiheyden nykyarvosta.

		Koko huoneisto	Koko huoneiston irtaimisto	Olohuone	Makuuhuone	Keittiö
q'' (MJ/m ²)	keskiarvo	509	321	460	656	665
	80 %:n fraktiili	575	390	548	871	747

Palotehon määrittäminen

Palokuorman luovuttamaa palotehoa ei voida selvittää tilastojen perusteella, vaan se täytyy arvioida yksittäisiä kohteita (esim. sisusteet ja muu irtaimisto) koskevien palokoetulosten ja niihin perustuvan mallintamisen avulla.

Tässä työssä palokuorman luovuttama paloteho lasketaan kahdella eri tavalla:

- Palokuorman määrän perusteella käyttämällä suhteellisen yksinkertaisia malleja ja palotehon ja palokuorman määrän välillä [Babrauskas 1986, Babrauskas & Walton 1986]. Mallien epävarmuustekijät otetaan huomioon käsittelemällä niitä stokastisesti.
- Palokuorman määrän perusteella käyttämällä palonsimulointia, jossa eri aineiden palamista kuvaavat suureet on määritetty vertaamalla niitä käyttäen tehtyjen eri palotestilaitteiden (kartiokalorimetri, SBI-laite ja palokammio) palonsimulointien tuloksia mitattuihin tuloksiin [Hietaniemi ym. 2004].

Ensimmäinen palotehon voimakkuuden arvioinnin lähestymistapa on asiantuntija-arvio, joka perustuu kirjallisuudessa esitettyihin tietoihin ja malleihin sekä koetuloksiin.

Tarkastelussa otetaan huomioon vain muutamia olennaisimpia esineitä, joista tarkastellun huoneen palokuorma tyypillisesti muodostuu. Esimerkiksi olohuonetta tarkasteltaessa otetaan huomioon pehmustetut huonekalut (sohvat ja tuolit), hyllystöt, lattia/matot sekä viihde-elektronikka (TV).

⁵ Painotamme, että nämä arvot ovat tekstissä kuvatulla tavalla arvioituja lukuja, joihin liittyy merkittävä epävarmuus. Asuinrakennusten ja muidenkin kohteiden palokuorman tiheyksien arvojen päivittäminen vastaamaan nykytilannetta onkin eräs olennaisen tärkeäksi tutkimusaihe, joka tulisi toteuttaa mitä pikimmin.

Näille esineille arvioidaan niiden tyypillinen massa (ei yhtä arvoa, vaan vaihteluväli) sekä lämpöarvo (tämäkin otetaan huomioon vaihteluvälinä). Kertomalla massa lämpöarvolla saadaan arvio esineiden palamisessa vapaumiskykyisestä energiasisällöstä.

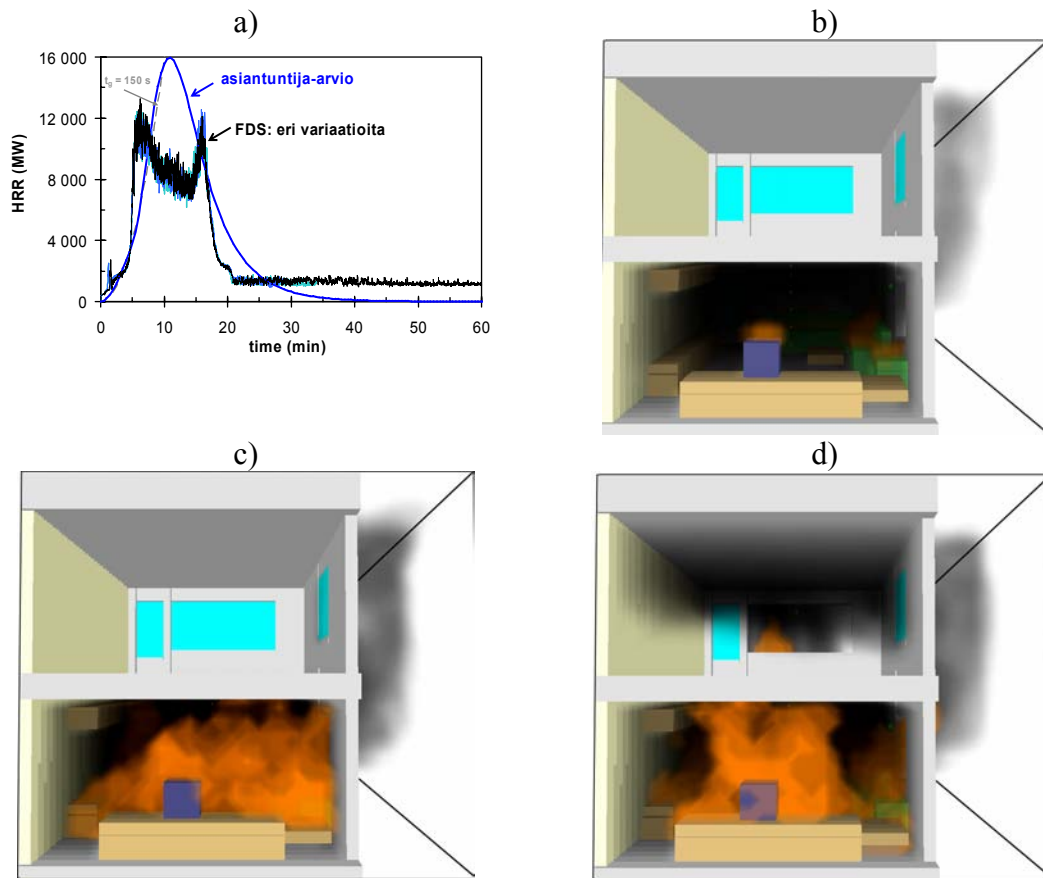
Kun energiasisältö jaetaan tarkastellun huoneen tyypillisellä pinta-alalla, saadaan arvio palokuorman tiheydelle, joka toisaalta tunnetaan tilastotietojen perusteella (ks. edellä). Esineiden määrää säädetään siten, että laskettu palokuorman tiheys vastaa tilastollista arvoa.

Kun ko. huoneen esineiden laatu ja määrä on näin saatu selville, sovelletaan yksinkertaisia malleja eri esineiden palotehon arvioimiseen.

Arvio koko huoneen paloteholle saadaan yhdistämällä eri esineiden palotehot ottaen lisäksi huomioon suljetun tilan paloa kiihdyttävä vaikutus, jolle voidaan laskea määrällisiä arvioita koeaineistosta, jossa on tehty polttokokeita samoille esineille sekä vapaassa tilassa että huoneen sisällä [Denize 2000].

Toinen lähestymistapa on huoneiden sisällön määrittämisen suhteen sama kuin ensimmäinen lähestymistapa, mutta palotehon määrittäminen tehdään suoraan käyttämällä FDS4-palonsimulointiohjelmaa. FDS-ohjelman kelpoisuuden todentamiseksi on tehty paljon laskettujen tulosten ja vastaavien koetulosten vertailuja. Näitä tutkimuksia on tehty VTT:llä [Hietaniemi ym. 2004, Hietaniemi ym. 2002, Hostikka & Axelsson 2003, Korhonen & Hietaniemi 2004, liite C], NIST:ssä [Friday & Mowrer. 2001, Hamins ym. 2004 a ja b, Floyd 2002, Hamins & McGrattan 2003, McGrattan & Hamins 2003] samoin kuin muissa tutkimuslaitoksissa [Floyd ym. 2001, Piergiorgio ym. 2001, D'Souza ym. 2001, Xin ym. 2002, Kashef ym. 2002, Cochard 2003, Zhang ym. 2002]. Kuten lukuisat referenssit osoittavat, FDS-ohjelma on erittäin perusteellisesti validoitu ja siksi se täyttää Rakennusmääräyskokoelman osassa E1 esitetyt laskentaohjelmille esitetyt vaatimukset [Ympäristöministeriö 2002].

Näitä kahta lähestymistapaa käyttäen saatuja arvioita paloteholle tyypillisessä huonepalossa verrataan kuvassa 203. Nähdään, että tulokset ovat hyvin samanlaisia, joten mallin valinnalla ei ole olennaista vaikutusta lopputuloksiin. Tässä työssä käytetäänkin yksinkertaisiin malleihin perustuvaa lähestymistapaa, koska sitä käyttäen palotehon arviointiin liittyvät epävarmuudet voidaan laskea suoraviivaisesti ja ”läpinäkyvällä” tavalla.



Kuva 203. a) Kahta eri lähestymistapaa käyttäen tehdyn huoneistopalon palotehon arvioinnin vertaaminen. b)–d) Huoneistopalon kehittymisen esimerkki.

Yksinkertaisiin malleihin perustuva palotehon arviointi

Babrauskas [Babrauskas 1986, Babrauskas & Walton 1986] on esittänyt seuraavan yksinkertaisen mallin vapaana palavien (ei huoneessa) pehmustettujen huonekalujen luovuttaman maksimipalotehon \dot{Q} arviointiin niiden massan m ja tiettyjen ominaisuuksien perusteella:

$$\frac{\dot{Q}}{\text{kW}} = 210 \cdot FF \cdot PF \cdot SF \cdot FC \cdot \frac{m}{\text{kg}}, \quad (33)$$

missä tekijät FF , PF , SF ja FC riippuvat huonekalun kankaan, pehmusteiden ja rungon materiaaleista sekä huonekelun muodosta. Babrauskas on määrittänyt niille seuraavat numeeriset arvot:

Factors	Description	Values for specific materials
FF	Fabric factor	1.00 for thermoplastic fabrics (e.g., polyolefin) 0.40 for cellulosic fabrics (e.g, cotton) 0.25 for PVC or polyurethane film-type coverings
PF	Padding factor	1.00 for polyurethane foam, latex foam or mixed materials 0.40 for cotton batting or neoprene foam
CM	Combustion mass (kg)	User's input
SF	Style factor	1.5 for ornate convoluted shapes 1.25 for intermediate shapes
		1.0 for plain, primarily rectilinear construction
FC	Frame combustibility factor	1.66 for non-combustible frames 0.58 for melting plastic 0.30 for wood 0.18 for charring plastic

Tässä työssä näitä arvoja sovellettiin stokastisesti seuraavasti:

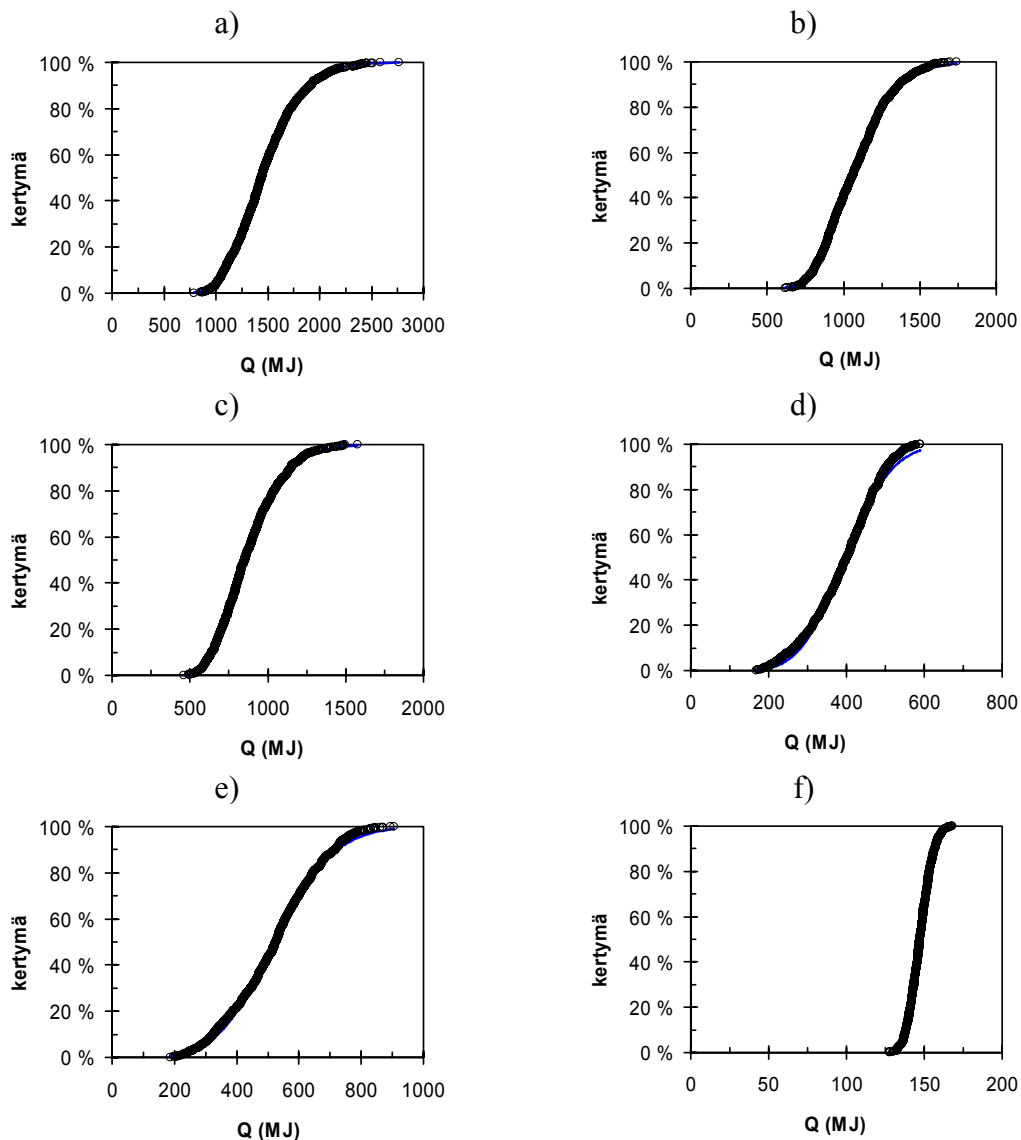
Kullekin tekijälle arvottiin arvo sille valitun esiintymistodennäköisyyden mukaan. Käytännössä tämä tarkoittaa seuraavaa: Tekijälle *FF* käytettiin arvoa 1,0 10 %:ssa tapauksista, arvoa 0,4 70 %:ssa tapauksista ja arvoa 0,25 20 %:ssa tapauksista (suomalaiset kankaat ovat harvoin termoplastista muovia). Puuvilla tai neopreenipehmusteet katsottiin selvästi polyuretaanipehmusteita harvinaisemmiksi ja siksi tekijälle *PF* käytettiin arvoa 1,0. Suomalaiset huonekalut ovat useimmiten muodoltaan varsin asiallisia ja siksi tekijälle *SF* käytettiin vain arvoja 1,25 tai 1,0 (50 % todennäköisyys molemmille). Rungon oletettiin olevan puuta, joten tekijälle *FC* käytettiin arvoa 0,3.

Massaa lukuunottamatta kaikkiin kaavan 33 tekijöihin oletettiin liittyvän 10 %:n suuruisen epävarmuuden, jota kuvattiin kertomalla kukin tekijä normaalijakautuneella suureella, jonka keskiarvo on 1 ja keskihajonta 0,1.

Myös lattian oletetaan osallistuvan paloon. Sen paksuudeksi arvioidaan 5–20 mm. Lämpöarvona käytetään paksuuden mukaan joko PVC-muoville tyypillisiä arvoja 10–20 MJ/kg (paksuus alle 10 mm) tai puulle tyypillisiä arvoja 12–18 MJ/kg (paksuus yli 10 mm). Lattian palamisen voimakkuuden arvioinnissa käytetään yksikköpinta-alaa kohden vapautuvaa tehoa, joka vaihtelee välillä 120–240 kW/m², joka kattaa puulle ja PVC-muoville tyypilliset arvot.

Se, montako kappaletta erityyppisiä huonekaluja irtaimistoa kuvaavassa paloteknisessä mallissa tulee ottaa huomioon, määritettiin siten, että malliin sisällytettävien huonekalujen ja muun irtaimiston energiasisältö vastaa huoneen pinta-alan ja palokuorman tiheyden avulla saatavaa arvoa. Irtaimistolle käytetyt painot ja lämpöarvot (tarkemmin: eri huonekalujen massoille ja lämpöarvoille käytetyt tilastolliset jakaumat) esitetään taulukossa 49. Tiedot perustuvat pääosin viitteeseen [Bwalya 2004] sekä siinä esitettyjen tietojen asiantuntija-arvioperustaiseen punnintaan. On huomattava, että malli ei pyri huoneiden sisustuksen yksityiskohtaiseen kuvaamiseen, vaan se kuvaa irtaimiston pa-

lamiseen vaikuttavat päätekijät. Taulukon 49 tietojen perusteella lasketut irtaimiston energiamäärän jakaumat esitetään kuvassa 204.



Kuva 204. Taulukossa Taulukko 49 esitettyjen tietojen perusteella laskettuja irtaimiston energiasisällön jakaumia: a) kolmen istuttava sohva, b) kahden istuttava sohva, c) nojatuoli, d) sohvapöytä, e) kirjahylly ja f) TV.

Olohuoneen irtaimiston koostumusta koskeva tulos esitetään kuvassa 205: varsin hyvin aiemmin tässä liitteessä esitettyä palokuorman tiheyden jakaumaa vastaava jakauma saadaan siten, että irtaimistoon oletetaan kuuluvan taulukossa 49 ja kuvassa 204 esitetyt esineet siten, että nojatuoleja on kaksi kappaletta. Soveltamalla irtaimiston palokuorman ja siitä vapautuvan palotehon välistä riippuvuutta, saadaan tuloksena tämän lisäysoosan lopputulos, joka osoittaa lattian yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon määrän

(Kuva 205). Tämän jaukauman perusteella voidaan arvioida, miten voimakkaasti tietyn kokoinen huone palaa: esim. 20 m^2 :n huoneelle palotehon huippuarvo on keskimäärin arvo on $20 \text{ m}^2 \times 640 \text{ kW/m}^2 \approx 13\,000 \text{ kW}$ ja sen palotehon 80 %:n fraktiili⁶ on $20 \text{ m}^2 \times 770 \text{ kW/m}^2 \approx 15\,500 \text{ kW}$.

Palonsimuloinnissa tarvitaan palotehon huippuarvon lisäksi myös palotehon ajallinen kehitys. Sille käytettiin seuraavaa mallia (Kuva):

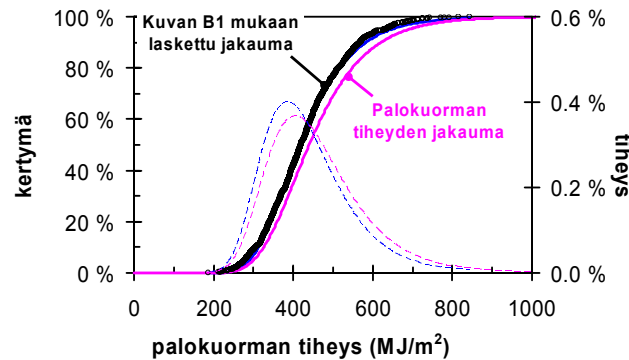
- Kasvuvaiheessa paloteho kehittyy neliöllisesti ajan mukana siten, että 1000 kW saavutetaan 150 s:ssä⁷.
- Kasvuvaiheen paloteho saavuttaa huippuarvonsa ja alkaa hiipua kuvan Kuva esittämällä tavalla siten, että palotehokäyrän rajaama pinta-ala vastaa palossa vapautuvaa kokonaisenergiaa.

⁶ Tietty prosenttifraktiili tarkoittaa sellaista arvoa, jonka satunnaisesti valittu lukuarvo alittaa ko. prosentin ilmaisevalla todennäköisyydellä: palotehon 80 %:n fraktiili on siis palotehoarvo, jota pienempiä paloja esiintyy 80 %:n todennäköisyydellä ja jota suurempia paloja siis esiintyy 20 %:n todennäköisyydellä.

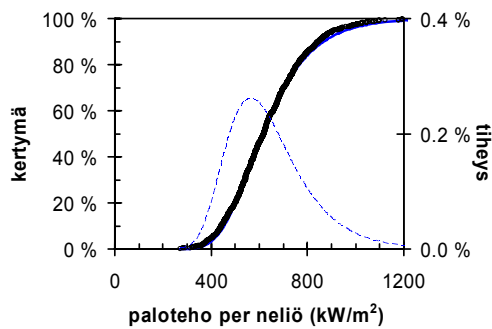
⁷ Alla esitettävässä kelpoisuuden arvioinnissa käytetään kuitenkin kasvuaikatekijänä arvoa 75 s, koska se vastaa paremmin tarkastelluissa kokeissa havaittua palon kasvamista.

Taulukko 49. Irtaimiston palotekniseen mallintamiseen liittyviä ominaisuuksia.

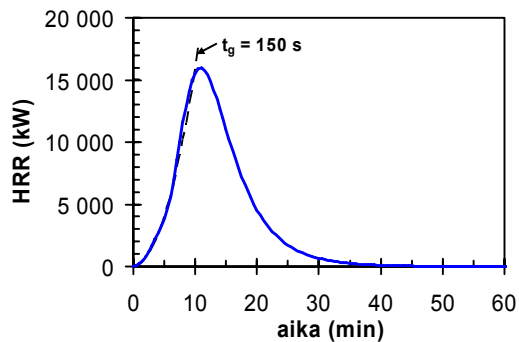
Huonekalu	Massan jakautumisen tilastollinen mailli	Lämpöarvon jakautumisen tilastollinen mailli
kolmen istuttava sohva	kolmiojakauma: minimi = 46 kg maksimi = 91 kg yleisin arvo = 65 kg	kolmiojakauma: minimi = 15 MJ/kg maksimi = 33 MJ/kg yleisin arvo = 18 MJ/kg
kahden istuttava sohva	kolmiojakauma: minimi = 38 kg maksimi = 60 kg yleisin arvo = 48 kg	kolmiojakauma: minimi = 15 MJ/kg maksimi = 33 MJ/kg yleisin arvo = 18 MJ/kg
nojatuoli	kolmiojakauma: minimi = 27 kg maksimi = 53 kg yleisin arvo = 41 kg	kolmiojakauma: minimi = 15 MJ/kg maksimi = 33 MJ/kg yleisin arvo = 18 MJ/kg
sohvapöytä	kolmiojakauma: minimi = 9 kg maksimi = 32 kg yleisin arvo = 24 kg	kolmiojakauma: minimi = 16 MJ/kg maksimi = 18 MJ/kg yleisin arvo = 20 MJ/kg
kirjahylly	kolmiojakauma: minimi = 10 kg maksimi = 48 kg yleisin arvo = 30 kg	kolmiojakauma: minimi = 16 MJ/kg maksimi = 18 MJ/kg yleisin arvo = 20 MJ/kg
TV	kolmiojakauma [Hietaniemi ym. 2002]: minimi = 4,5 kg maksimi = 5,5 kg yleisin arvo = 5,0 kg	kolmiojakauma [Hietaniemi ym. 2002]: minimi = 27,5 MJ/kg maksimi = 31,5 MJ/kg yleisin arvo = 29,5 MJ/kg



Kuva 205. Olohuoneen irtaimistoon kuuluvien huonekalujen ja muun irtaimiston määrän arviointi: kun irtaimistoon oletetaan kuuluvan taulukossa Taulukko 49 ja kuvassa 204 esitetyt esineet siten, että nojatuoleja on kaksi kappaletta, saadaan varsin hyvin edellä esitettyä palokuorman tiheyden jakaumaa vastaava jakauma.



Kuva 206. Olohuoneen tulipalon voimakkuuden arviointiin käytettävä tulos: lattia-pinta-alaa kohden vapautuu tehoa kuvassa esitetyn jakauman mukaisesti (keskiarvo on 640 kW/m^2 ja 80 % fraktiili on 770 kW/m^2).

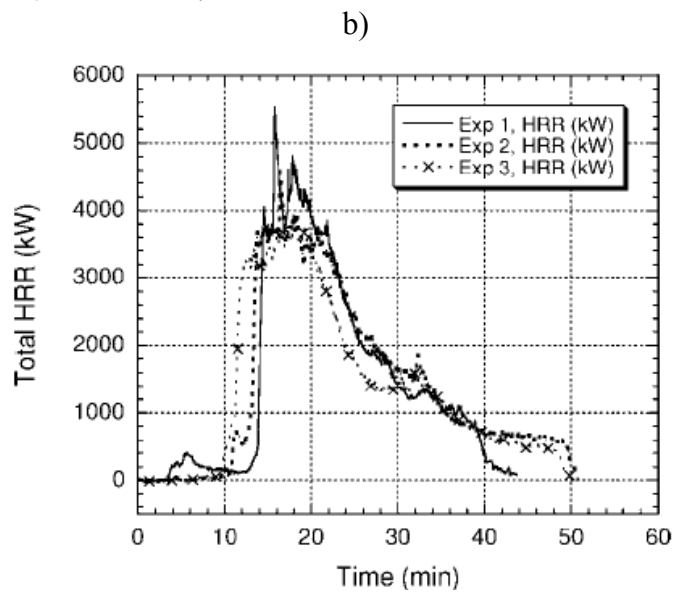
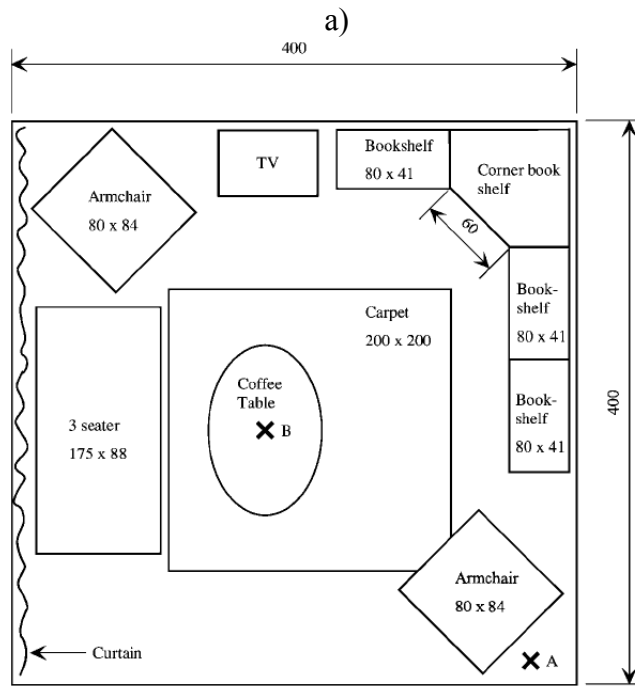


Kuva 207. Esimerkki palotehon ajallisesta kehitymisestä.

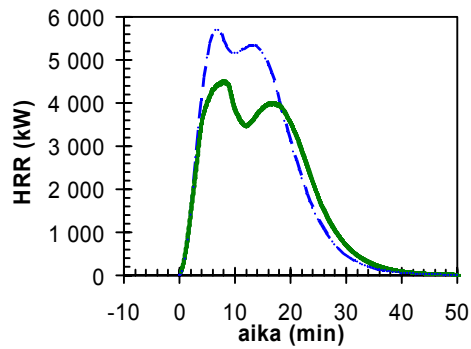
Mallin kelpoisuuden arviointi

Tässä tarkastellaan edellä esitetyn mallin kelpoisuutta vertaamalla sen avulla arvioitua huonepalon palotehoa mitattuun palotehoon. Koeaineistoina käytetään Blomqvistin ym. [2004] tekemää huonepalokoesarjaa, jossa tehtiin kolme toistokoetta käyttäen 16 m^2 :n suuruista sisustettua huonetta kuvaavaa fysikaalista palomallia.

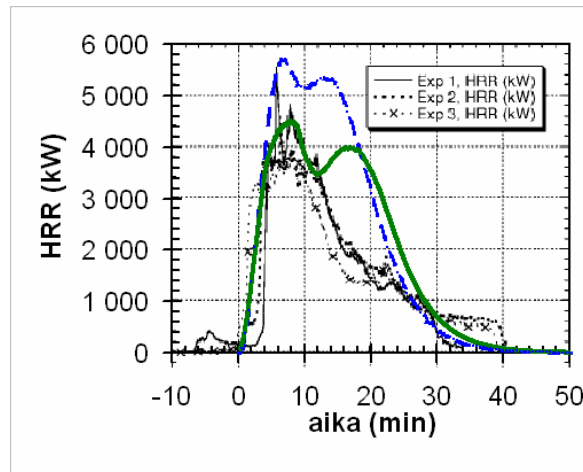
Huone ja sen sisustus esitetään kuvassa 208a ja mitatut palotehokäyrät kuvassa 208b. Mallintamisen tuloksena saadut palotehokäyrät (ilman hapen saannin rajoitusta ja hapen saannin rajoittama paloteho) esitetään kuvassa 209. Mitattuja ja mallintamalla saatuja palotehokäyriä verrataan toisiinsa kuvassa 210: yhteensopivuus on hyvä.



Kuva 208. a) Blomqvistin ym. [2004] tekemän huonepalokoesarjan palohuoneen sisustus ja b) mitatut palotehokäyrät.



Kuva 209. Blomqvistin ym. [2004] tekemän huonepalokoesarjan palotehon mallintamisen tulokset: edellä kuvatulla menetelmällä arvioitu palotehokäyrä (katkoviiva) ja kokeessa vallinneen rajoitetun hapen saannin rajoittama palotehokäyrä (yhtenäinen viiva).



Kuva 210. Blomqvistin ym. [2004] tekemän huonepalokoesarjassa mitattujen palotehokäyrien ja mallintamisen tuloksena saatujen palotehokäyrien vertaaminen.

Yhteenveto liitteen A tuloksista

Taulukossa 50 esitetään tässä liitteessä esitettyjä palokuorman tiheyttä ja pinta-alaa kohden vapautuvaa palotehoa koskevien tulosten yhteenveto. Tässä jakaumat on mallinnettu käyttäen palokuorman tiheydelle soveltuvaa Gumbel-jakaumaa [CEN 2002], jonka tiheysfunktio $f(x)$ ja kertymätuntio $F(x)$ ovat

$$f(x) = \frac{\exp[-(x-a)/b - \exp[-(x-a)/b]]}{b} \quad (34)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right]. \quad (35)$$

ja taulukossa esitetyt parametrit a ja b ovat Gumbel-jakauman parametrit.

Taulukko 50. Palokuorman tiheyttä ja pinta-alaa kohden vapautuvaa palotehoa koskevien tulosten yhteenveto.

Huonetila	Palokuorman tiheys	Paloteho per yksikköpinta ^{a)}
olohuone	$a = 405 \text{ MJ/m}^2$ $b = 95,6 \text{ MJ/m}^2$ keskiarvo = 460 MJ/m^2 80 % fraktiili = 548 MJ/m^2	$a = 565 \text{ kW/m}^2$ $b = 134 \text{ kW /m}^2$ keskiarvo = 642 kW/m^2 80 % fraktiili = 766 kW/m^2
makuuhuone	$a = 522 \text{ MJ/m}^2$ $b = 233 \text{ MJ/m}^2$ keskiarvo = 656 MJ/m^2 80 % fraktiili = 871 MJ/m^2	$a = 805 \text{ kW/m}^2$ $b = 191 \text{ kW /m}^2$ keskiarvo = 916 kW/m^2 80 % fraktiili = 1092 kW/m^2
keittiö	$a = 613 \text{ MJ/m}^2$ $b = 88,9 \text{ MJ/m}^2$ keskiarvo = 665 MJ/m^2 80 % fraktiili = 747 MJ/m^2	$a = 816 \text{ kW/m}^2$ $b = 194 \text{ kW /m}^2$ keskiarvo = 928 kW/m^2 80 % fraktiili = 1107 kW/m^2
koko huoneisto	$a = 467 \text{ MJ/m}^2$ $b = 72,4 \text{ MJ/m}^2$ keskiarvo = 509 MJ/m^2 80 % fraktiili = 575 MJ/m^2	$a = 624 \text{ kW/m}^2$ $b = 148 \text{ kW /m}^2$ keskiarvo = 710 kW/m^2 80 % fraktiili = 847 kW/m^2

a) Olohuoneen palotehon per yksikköpinta \dot{Q}'' jakauma on laskettu tässä liitteessä esitetyllä tavalla ja muiden tilojen paloteho per yksikköpinta on määritetty olohuoneen \dot{Q}'' -jakauman ja palokuorman jakauman avulla siten, että tarkastellulle huoneella parametreja a ja b käyttäen lasketut \dot{Q}'' -jakauman keskiarvo ja 80 %:n fraktiili ovat samat kuin palotehon tiheyksiä perustuna käyttäen saadut skaalatut arvot (sovitesuureina keskimääräinen arvo ja 80 %:n fraktiiliin ja keskiarvon suhde).

Liitteen A lähdeluettelo

Babrauskas, V. & Walton, W. D. 1986. A Simplified Characterization of Upholstered Furniture Heat Release Rates. *Fire Safety Journal*, Vol. 11, s.181–192.

Back, G., Beyler, C.L., DiNenno, P. & Tatem, P. 1994. Wall Incident Heat Flux Distributions Resulting from an Adjacent Fire. Teoksessa: Kashiwagi, T. (toim.). *Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium*. Ottawa, Canada, July 13–17, 1994. Boston, USA: International Association for Fire Safety Science. S. 241–252.

- Babrauskas, V. 1986. Free burning fires. *Fire Safety Journal*, Vol. 11, s. 33–51.
- Blomqvist, P., Rosell, L. & Simonson, M. 2004. Emissions from Fires Part II: Simulated Room Fires. *Fire Technology*, Vol. 40, s. 59–73.
- Bryl, S. 1975. Brandbelastung in Hochbau. *Schweizerische Bauzeitung*, special reprint from Jahrgang93, Heft 17.
- Bwalya, A. C. 2004. An Extended Survey of Combustible Contents in Canadian Residential Living Rooms. Ottawa, Canada: National Research Council Canada. (Research Report No. 176)
- Cambell, J. A. 1981. Confinement of Fire in Buildings. *Fire Protection Handbook*. NFPA Handbook, USA.
- CEN 2002. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2: General Actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN. 59 s. (EN 1991-1-2:2002 E.)
- Cochard, S. 2003. Validation of Fire Dynamics Simulator (Version 2.0) Freeware. *Tunnel Management International Journal*, 6(4), December.
- Denize, H. 2000. The Combustion Behaviour of Upholstered Furniture Materials in New Zealand. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury. 107 s. + liitt. 28 s. (Master's Thesis)
- Drysdale, D. D. & Thomson, H. E. 1989. Flammability of Plastics. Part 2. Critical Mass Flux at the Firepoint. *Fire Safety Journal*, Vol. 14, s. 179–188.
- Floyd, J. 2002. Comparison of CFAST and FDS for Fire Simulation with the HDR T51 and T52 Tests. NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- Floyd, J. E., Wieczorek, C. & Vandsburger, U. 2001. Simulations of the Virginia Tech Fire Research Laboratory Using Large Eddy Simulation with Mixture Fraction Chemistry and Finite Volume Radiative Heat Transfer. In *Proceedings of the Ninth International Interflam Conference*. Interscience Communications.
- Friday, P. & Mowrer, F. W. 2001. Comparison of FDS Model Predictions with FM/SNL Fire Test Data. NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

Hamins, A. & McGrattan, K. B. 2003. Reduced-Scale Experiments on the Water Suppression of a Rack-Storage Commodity Fire for Calibration of a CFD Fire Model. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*. International Association for Fire Safety Science. S. 457–468.

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

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

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Korhonen, T., Siiskonen, J. & Vaari, J. 2002. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. Espoo: VTT. 125 s. + liitt. 63 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2128.) ISBN 951-38-5953-3; 951-38-6'5954-1

Hietaniemi, J., Hostikka, S. & Vaari, J. 2004. FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2004. 45 p. + App. 6 p. (VTT Working Papers 4) ISBN 951-38-6556-8

Holm, C. & Oksanen, P. 1970. Palokuorman määrä kerrostalojen asuinhuoneistoissa. *Palon-torjuntatekniikka*, Nro. 2, s. 1–4.

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

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

Kersken-Bradley, M. (toim.). 1983. A Conceptual Approach Towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire safety. *Fire Safety Journal*, Vol. 6, s. 1–79.

Korhonen, T. & Hietaniemi, J. 2004. Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa. Espoo: VTT. 58 s. + liitt. 36 s. VTT Tiedotteita – Research Notes 2253. ISBN 951-38-6482-0; 951-38-6483-9

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

Nilsson, L. 1970. Brandbelastning/Bostadslagenheter/Fire Loads in Flats, Statens Institut for Byggnadsforskning; Stockholm, Rapport R 34. Svensk Byggtjänst, Stockholm. National Swedish Building Research Summaries R 34.

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

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

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

Ympäristöministeriö. 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. 40 s.

Zhang, W., Hamer, A., Klassen, M., Carpenter, D. & Roby, R. 2002. Turbulence Statistics in a Fire Room Model by Large Eddy Simulation. Fire Safety Journal.

Liite B: Ulkoisen syttymisen aiheuttamien tulipalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien mallintaminen

Mallin yleiset piirteet

Ulkoisen syttymiseen alkupalon kokoa kuvataan palon halkaisijalla D_{eff} (yksikkönä m) ja alkupalon pinta-alayksikköä kohden luovuttama paloteholla \dot{Q}''_{init} , jolloin alkupalon paloteho on

$$\dot{Q}_{\text{init}} = \dot{Q}''_{\text{init}} \cdot A_{\text{init}} = \frac{1}{4} \pi \cdot \dot{Q}''_{\text{init}} \cdot D_{\text{eff}}^2. \quad (36)$$

Tekijöiden D_{eff} ja \dot{Q}''_{init} , määrittämistä kuvataan jäljempänä. Jos julkisivu osallistuu paloon, sen oletaan syttyvän julkisivuun kohdistuman lämpövuon määrällä aikaviivellä luvussa 5 esitetyllä tavalla. Julkisivun luovuttama paloteho on

$$\dot{Q}_{\text{wall}} = \dot{Q}''_{\text{wall}} \cdot A(z) = \dot{Q}''_{\text{wall}} \cdot L_f \cdot D_{\text{eff}} \cdot \left[\frac{\zeta}{L_f} - \left(\frac{\zeta}{L_f} \right)^2 \right], \quad (37)$$

missä \dot{Q}''_{wall} on julkisivun pinta-alayksikköä kohden luovuttama paloteho ja

$$\zeta = \min(z, L_f). \quad (38)$$

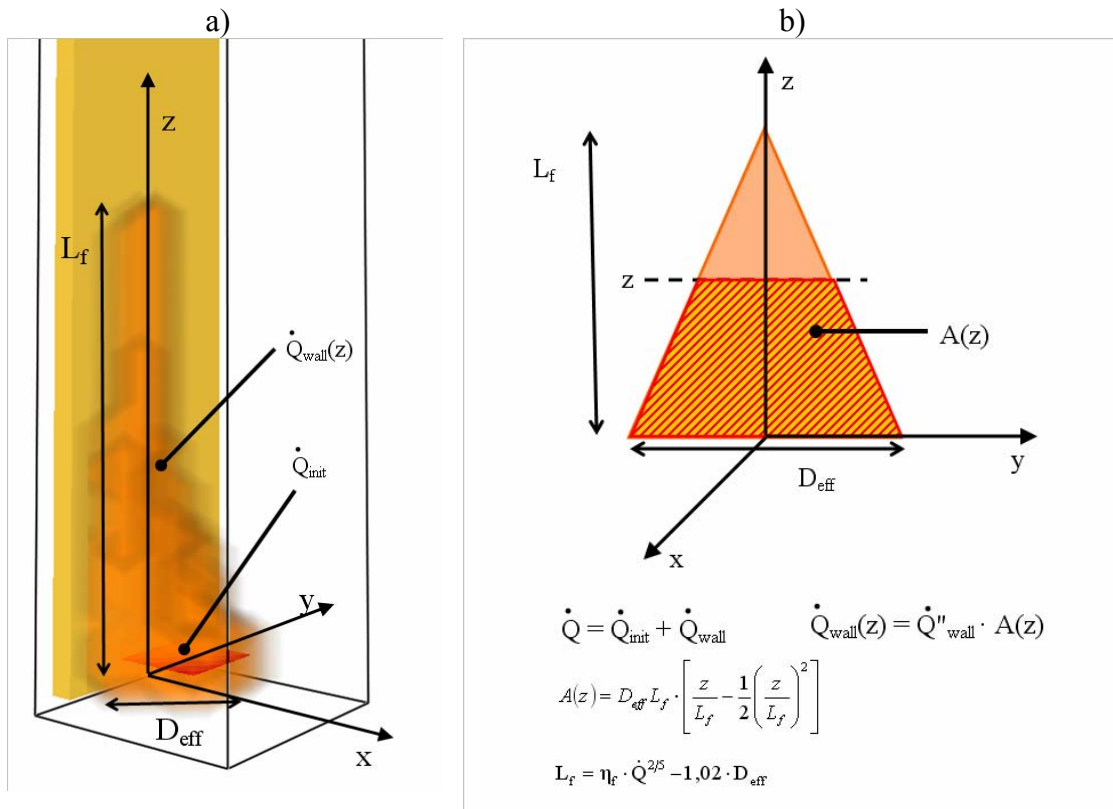
missä L_f Heskestadin palopatsasmallia käyttäen määritettävä liekin korkeus

$$L_f = 0.23 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D_{\text{eff}}, \quad (39)$$

Suurelle \dot{Q}''_{wall} käytetään tyypillistä puumateriaalia kuvaavaa arvoa 120 kW/m².

Kokonaispaloteho \dot{Q} (yksikkönä kW) on alkupalon osuuden \dot{Q}_{init} ja julkisivun tuottaman palotehon \dot{Q}_{wall} summa:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{init}} + \dot{Q}_{\text{wall}}. \quad (40)$$



Kuva 211. Ulkoisen syttymisen malli: a) asetelma ja paloon osallistuvan seinän vaikutuksen arviointi.

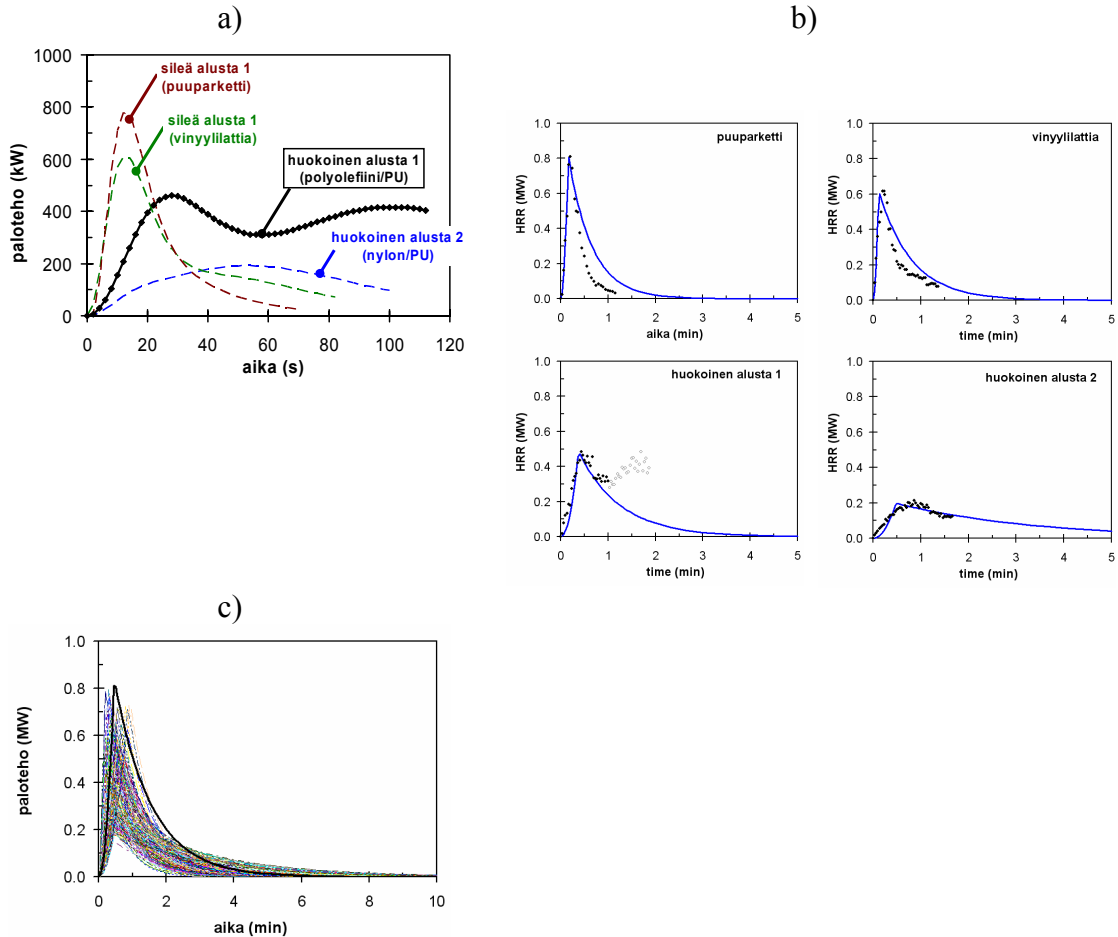
Alkupalon palotehon ajallinen kehitys

Alkupaloa kuvataan palavan nesteellä (benssiini) sytyttävänä palona, johon osallistuu puuta, paperitavaraa ja muovia.

Palavan nesteen palaminen

Palavaa nesteen palamista kuvataan benssiinin palamisella. Putorti ym. [2001] ovat tutkineet, millainen palo syntyy, kun vaakasuoralle alustalle kaadettu benssiini syttyy. He tutkivat eri alustojen (kaksi sileäpintaista alustaa: puuparketti ja vinylilattia sekä kaksi huokoista alustaa: polyolefiini-PU-matto ja nylon-PU-matto) ja kaadetun benssinimäärän vaikutusta. Kokeissa käytetyt alustat olivat kaksi sileäpintaista alustaa, puuparketti ja vinylilattia, sekä kaksi huokoista alustaa, polyolefiini-PU-matto ja nylon-PU-matto. Kaadettu benssinimäärä oli 0,25 litraa, 0,5 litraa tai 1,0 litraa. Kuvassa 212a a esitetään

yhden bensiinilitran palamisessa vapautuvan palotehon ajallinen kehitys. Palotehon kuvaajien mallintaminen käyttäen t^2 -muotoisesti kasvavaa ajallista kehitystä esitetään kuvassa 212b.



Kuva 212. a) Mitattu paloteho erilaiselle alustoille kaadetun palavan yhden litran suuruisen bensiinimäärän palaessa (käyrät perustuvat Putortin ym. [2001] mittaamiin palotehokäyriin. b) Bensiinin palotehon mallintaminen t^2 -muotoisella kuvaajalla ja c) mallin vaihtelevuutta kuvaava Monte Carlo -tekniikkaa käyttäen laskettu otos.

Kuvan 212a palotehokäyrät osoittavat, että sileäpintaiselle alustalle kaadettu bensiini palaa hyvin nopeasti siten, että bensiinin palaminen ei mahdollisesti ehdi sytyttää alustaa eikä seinää, johon palo kohdistuu. Huokoiseen materiaaliin kaadettu bensiini palaa selvästi pitempään, mutta vastaavasti alemmalla paloteholla, jolloin myös on mahdollista, että alusta- tai seinämateriaali ei ehdi syttymään. Todellisesta paloa kuvattaessa ”alustan” laatua ei voida rajata ja siksi mitoittavan palon määrittämisessä käytetään kaikkea koemateriaalia kuvassa 212c esitetyllä tavalla. Korostettu käyrä kuvaa paloa,

joka luovuttaa 60 MJ, mikä itse asiassa on vähintään⁸ tekijällä kaksi 1 litran suuruisen bensiinimäärän palaessa syntyvää lämpöenergiämäärää suurempi. Tämä valinta on tehty toisaalta siksi, että näin korostettu palotehon kuvaaja muodostaa eri palotehokäyrän jokseenkin hyvin verhoavan käyrän ja toisaalta on haluttu kuvata tilannetta ”varman päälle”. Tämän lisäksi on tehty herkkyyksianalyysyjä käyttäen 2 litran suuruisista bensiinimäärää kuvaavaa paloa, jossa paloteho on laskettu kertomalla kuvassa 212c esitetty kuvaaja kahdella.

Alkupaloon osallistuvan puumateriaalin palaminen

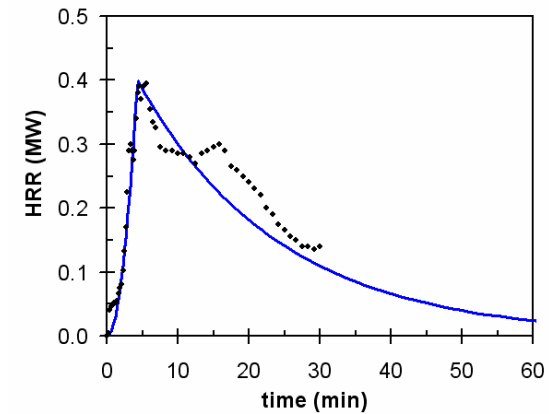
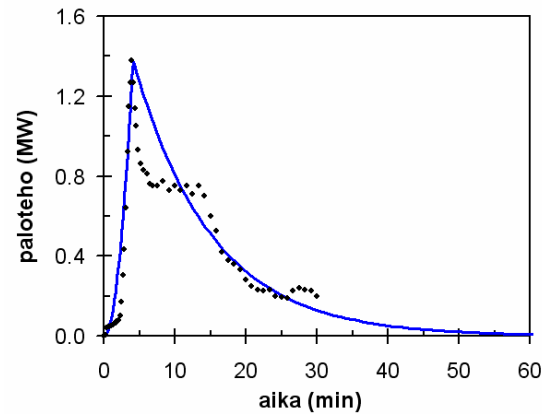
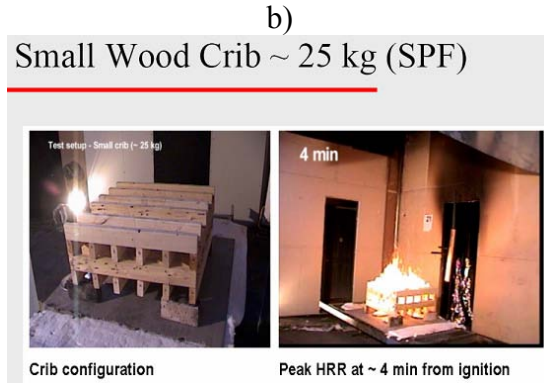
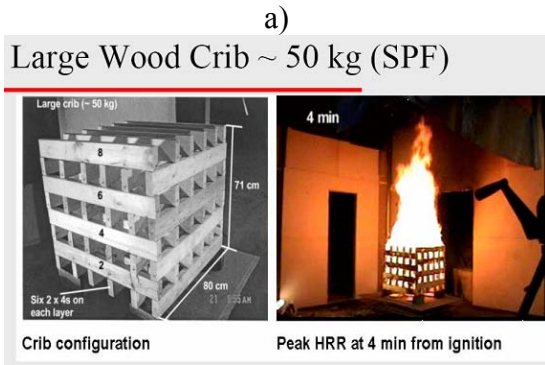
Tässä jaksossa kuvataan alkupaloon osallistuvan puumateriaalin palamisen mallintaminen seuraavasti:

1. määritetään alkupaloon osallistuvan puumateriaalin määrä,
2. käytetään koetuloksia tyypillisen hyvin palavaan muotoon so.o. suhteellisen ohuen puutavaran muodostamaksi puutapuliksi kootun puutavaran luovuttaman palotehon mallintamiseen,
3. sovelletaan koetulosten perusteella laadittua mallia kuvaamaan alkupaloon osallistuvan suuruisen puumäärän palamisen kuvaamiseen.

Liitteessä F tehdyn ulkoisten palojen syttymissyiden kartoituksessa esille tulleet tapaukset olivat tyypillisesti sen luonteisia, että palava materiaali oli paikan päältä saatua, ei sinne mukana tarkoituksellisesti vietyä. Tiiviissä ja matalassa rakentamisessa tyypillinen saatavilla oleva puutavara voi olla esim. ulkokalusteiden tuoli tai pöytä. Jotta tästä poltettavaksi valitusta kohteesta saataisiin yhtä tehokkaasti palava kohde kuin puutapuli, se pitää rikkoa ja kasata nuotioksi. Koska tällainen toiminta tuottaa ääntä ja tekijä useimmiten haluaa välttää kiinnijäämisen, tehdään tässä arvio, että nuotioon joutuvan materiaalin todennäköinen määrä on alle viiden kilogramman. Mitoitusarvona käytetään arvoa 5 kg, jota vastaa noin 70–80 MJ:n suuruisen palossa vapautuvan energian määrä.

Palon voimakkuuden mallintamisen lähtökohtana puutapulien palotehomittauksissa saadut tulokset [Bwalya & Bounagui 2005], jotka mallinnetaan käyttäen mallia, jossa paloteho kasvaa ajan mukana neliöllisesti, kunnes se saavuttaa huippuarvonsa, minkä jälkeen palo hiipuu eksponentiaalisesti (Kuva 213).

⁸ Putortin ym. [2001] kokeissa bensiinin tehollinen lämpöarvo jäi jopa alle arvon 30 MJ/kg. Kun bensiinin tiheys on noin 700–800 kg/m³, on laskennallinen lämpöenergian määrä < 24 MJ, johon verrattuna mitoituspalon luovuttama lämpöenergian määrä on 2,5-kertainen.



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

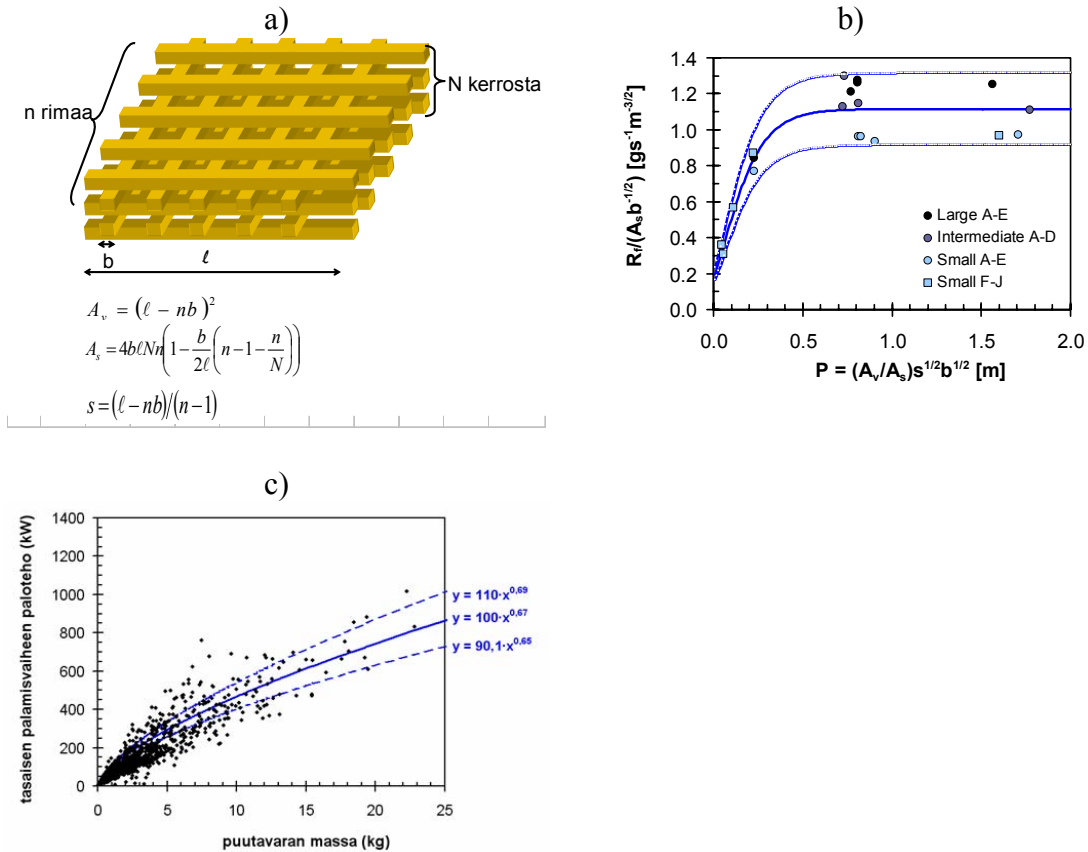
- kasvuaikatekijä $t_g = 400$ s
- max. paloteho = 0,4 MW
- vapautuva lämpö = 500 MJ
- hiipumisen aikavakio $\tau = 20$ min

Kuva 213. Puutavaran palon voimakkuuden arviointi kuvaamalla NRC:ssä tehdyissä kokeissa [Bwalya & Bounagui 2005] saadut palotehon mittaustulokset t^2 -muotoisella funktiolla: a) 50 kg painava puutapuli ja b) 25 kg painava puutapuli.

Palon voimakkuus on luontevaa sitoa palavan materiaalin massaan, koska se on helposti ymmärrettävissä oleva konkreettinen suure, jonka suuruutta voidaan arvioida asiantuntija-arvioinnin avulla. Tämä voidaan tehdä käyttäen Crocen ja Xinin [2005] esittämää puutapulin palamisen mallia. Tässä mallissa kuvataan puutapulin palamisnopeutta R_f (kg/s) tapulin ominaisuuksien avulla kuvissa 214a ja b esitetyllä tavalla.

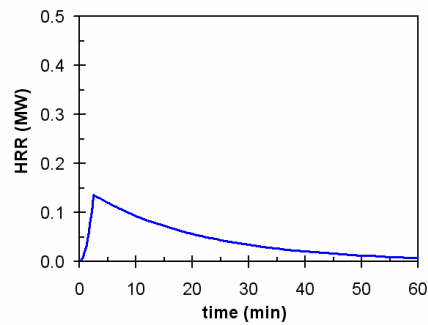
Palamisnopeus R_f voidaan muuntaa palamisen voimakkuudeksi eli palotehoksi käyttämällä tehollista lämpöarvoa $\Delta H_{c,eff}$ (materiaalin lämpöarvo kerrottuna palamisen epätäydellisyyttä kuvaavalla tekijällä). Tässä käytetään puulle ominaista vaihteluväliä, $\Delta H_{c,eff} = 12, \dots, 18$ MJ/kg.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

$n = 2, \dots, 10$ ja kerrosten määrä $N = 2, \dots, 10$ ⁹, saadaan tuloksena kuvassa 214c esitetty tapulin muotoon asetellun puutavaran palotehon riippuvuus tapulissa olevan puutavan massasta. Tätä riippuvuutta hyväksikäyttäen voidaan esittää kuvan 215 arvio 5 kg:n suuruisen puutavaran palamisen paloteholle. Kuvassa esitetyn käyrän ja aika-akselin välillä jäävä pinta-ala vastaa 130 MJ:n energiamäärää, mikä on noin tekijällä 1,7 suurempi kuin 5 kg:n suuruisen puumäärän palamisessa todennäköisesti vapautuva lämpöenergia.



Kuva 214. Crocen ja Xinin [2005] malli puutapulin palamisnopeudelle: a) tapulin kuvaus, b) palamisnopeuden malli ja c) Monte Carlo -otokseen perustuen määritetty puutapulin palotehon riippuvuus puutavaran massasta (välillä 0–25 kg).

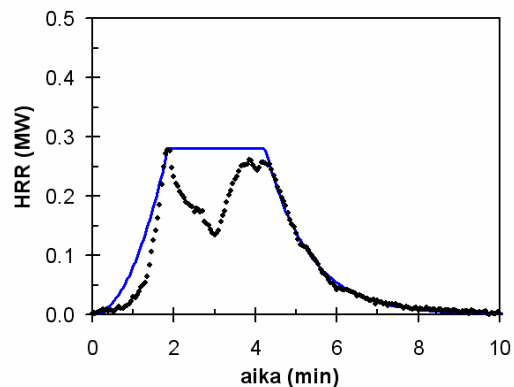
⁹ Arvot on valittu siten, että puutapulin suurimmaksi massaksi tulee noin 25 kg, joka vastaa pienemmän mitatun [Bwalya & Bounagui 2005] puutapulin massaa.



Kuva 215. Puutapulin palo-ominaisuuksiin perustuva arvio palotehon ajalliselle kehitymiselle, kun puun massa on 5 kg.

Alkupaloon osallistuvan paperimateriaalin palaminen

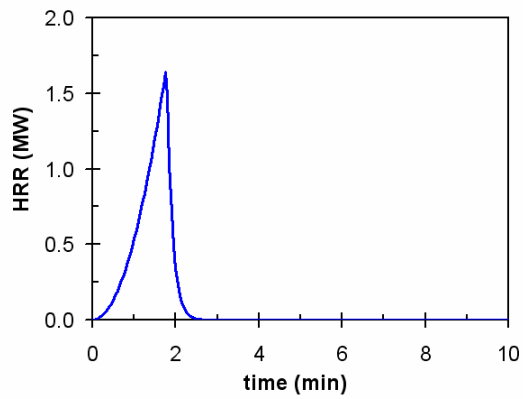
Alkupaloon osallistuvaa paperimateriaalia pahvilaatikkona, jolle on olemassa palotehon mittaustieto [Hietaniemi & Mangs 2000]. Mitattu palotehon ajallinen kehitys ja siihen sovitettu t²-muotoa oleva kuvaaja esitetään kuvassa 216.



Kuva 216. Pahvilaatikon luovuttaman palotehon ajallinen kehittyminen.

Alkupaloon osallistuvan muovimateriaalin palaminen

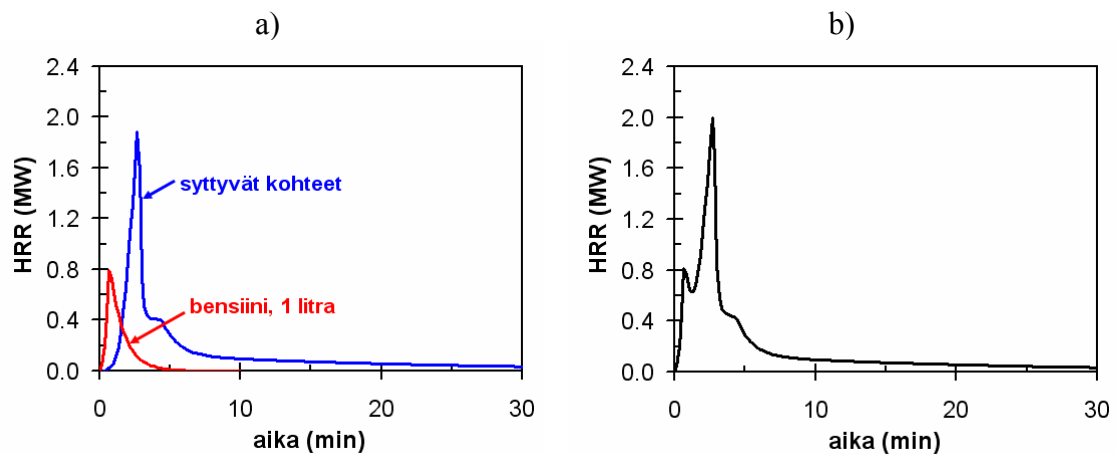
Alkupaloon osallistuvan muovimateriaalin palamista kuvataan yhden tuolin palamisena, jonka malli on johdettu Paloposken esittämistä muovituolinon palamista koskevista tiedoista [Paloposki 2000]. Palotehon ajallinen kehitys esitetään kuvassa 217.



Kuva 217. Muovituolin luovuttaman palotehon ajallinen kehittyminen.

Bensiinillä sytyttävän puu-, paperi- ja muovitavaran muodostaman alkupalon malli

Kun edellä esitetyt palotehon kuvaajat yhdistetään summaamalla siten, että pahvin oletetaan syttyvän 10–20 s:n, puun puolen minuutin ja muovin minuutin viiveellä bensiinin jälkeen, saadaan kuvassa 218 esitetyt tulokset.



Kuva 218. Alkupalon luovuttaman palotehon ajallinen kehittyminen: a) sytyttävän nesteen ja syttyvien kohteiden palotehot ja b) niiden yhdistelmä.

Alkupalon seinään kohdistaman lämpövuon laskentamalli

Ulkoisen palon liekin seinään kohdistaman lämpövuon pystysuuntaisen jakautuman lasketaan käyttäen FDS-palonsimuloinnilla kehitettyä mallia¹⁰ (Kuva 219).

Mallin mukaan lämpövuon \dot{q}'' riippuu palavasta pinnasta mitatusta korkeudesta z seuraavasti

$$\dot{q}'' = \begin{cases} \dot{q}_{\max}'' & z \leq z_c \\ \dot{q}_{\max}'' \cdot \exp\left(-\left(\frac{z-z_c}{w}\right)^p\right) & z > z_c \end{cases} \quad (41)$$

missä

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\max}'' &= 60 \text{ kW/m}^2 \\ z_c &= 0,00025 \cdot \dot{Q}^{5/4} \\ p &= 1,4 \\ w &= \min\left[1,8 + \left(\frac{\dot{Q}-700}{10000}\right)^{0,3}\right] \end{aligned} \quad (42)$$

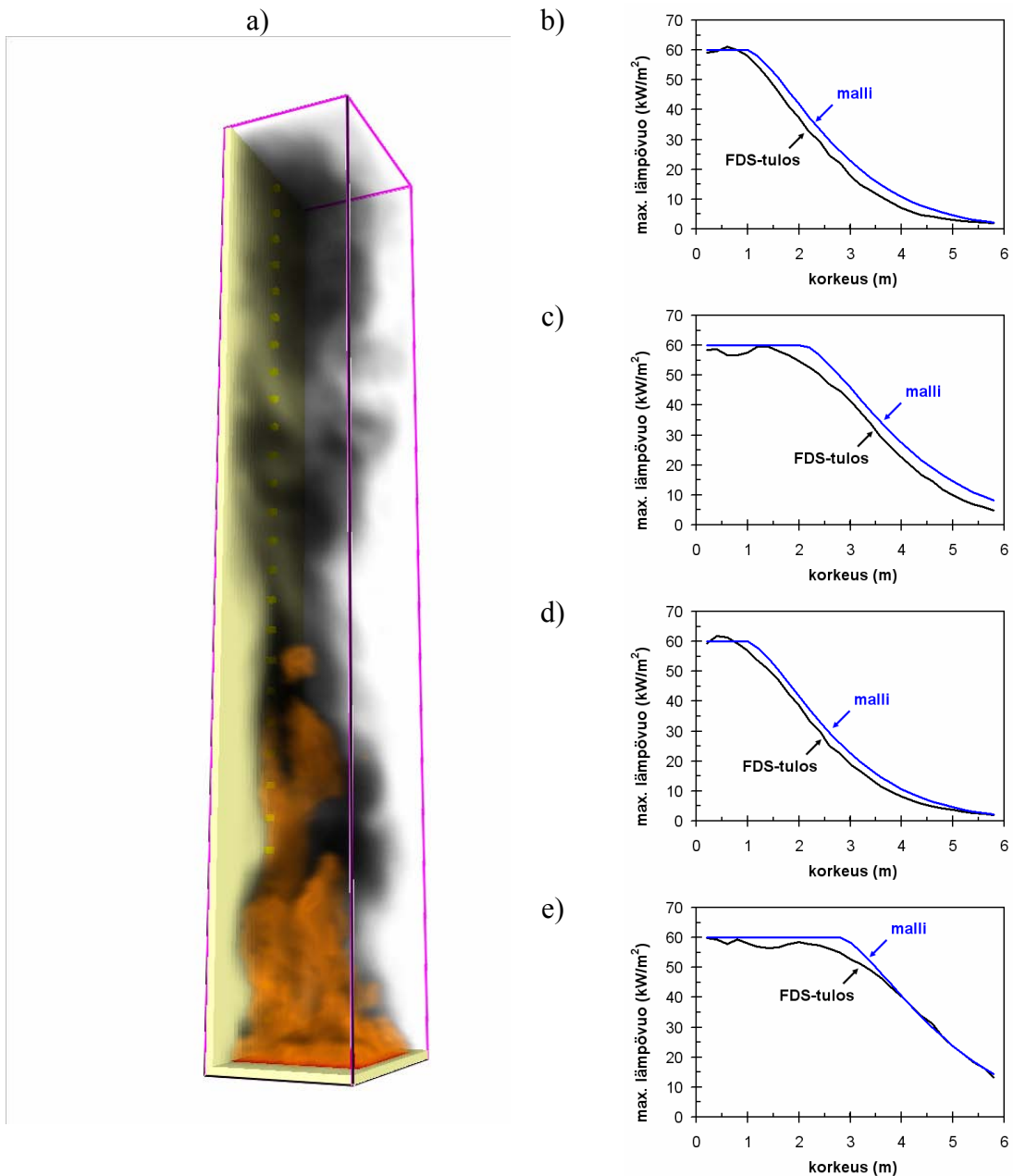
missä \dot{Q} on paloteho (kW).

Lämpövuon vaakasuuntaiselle jakaumalle käytetään kirjallisuudessa esitettyä mallia [Back ym. 1994, Latimer 2002], jonka mukaan

$$\dot{q}'' = \begin{cases} \dot{q}_{\max}'' \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{0,5D}\right)^2\right) & x \leq 0,5D \\ 0,38 \cdot \dot{q}_{\max}'' \cdot \left(\frac{x}{0,5D}\right)^{-1,7} & x > 0,5D \end{cases} \quad (43)$$

missä x on etäisyys palopatsaan akselilta ja D on palavan alueen tehollinen halkaisija.

¹⁰ Kirjallisuudessa [esim. Back ym. 1994 ja Latimer 2002] esitetyt malleja ei käytetä siksi, että a) niissä on käytetty kaasupoltinta, b) niiden perustana olevissa kokeissa palotehot ovat tyypillisesti olleet alle 500 kW ja c) saadut tulokset ovat hyvin kohinaisia (mittauskohina jopa 50 %).



Kuva 219. a) Seinään kohdistuvan lämpövuon määrittämisen asetelma ja b)–e) kehitetyn mallin vertaaminen FDS-tuloksiin eri palotehojen paloilla, b) bensiinipalo max. paloteho 770 kW, c) bensiinipalo max. paloteho 1 390 kW, d) bensiinin puu-, pahvi- ja muovitavaran palo max. paloteho 770 kW ja e) bensiinin puu-, pahvi- ja muovitavaran palo max. paloteho 1 740 kW).

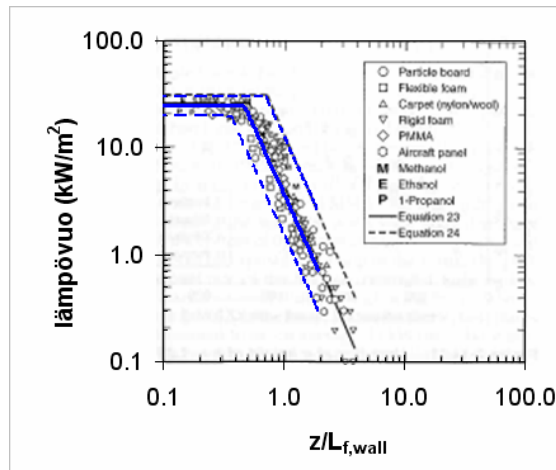
Paloon osallistuvan seinämateriaalin palamisen seinään kohdistaman lämpövuon laskentamalli

Paloon osallistuvan seinämateriaalin palamisen seinään kohdistaman lämpövuon \dot{q}''_{wall} laskentamallina käytetään SFPE:n käsikirjassa [Lattimer 2002.] esitetyn mallin mukaisista käsittelytapaa. Sen mukaan lämpövuon \dot{q}''_{wall} riippuu palavasta pinnasta mitatusta korkeudesta z seuraavasti

$$\begin{cases} \dot{q}''_{wall} = \dot{q}''_{wall,max} & z \leq \gamma \cdot L_{f,wall} \\ \dot{q}''_{wall} = \gamma^{2,5} \dot{q}''_{wall,max} \cdot \left(\frac{L_{f,wall}}{z} \right)^{2,5} \text{ kW/m}^2 & z > \gamma \cdot L_{f,wall} \end{cases} \quad (1)$$

$$L_{f,wall} = L_{0,wall} \cdot \left(\frac{\dot{Q}'}{\text{kW/m}} \right)^{2/3}$$

missä liekein korkeuden laskennassa käytettävä suure \dot{Q}' on paloteho palavan seinäalueen leveyttä kohden. Laskettu lämpövuon on yhteensopiva kuvassa 220 esitettyjen mittauksien kanssa, kun $L_{0,wall} = 0,052 \text{ m}$, $\dot{q}''_{wall,max} = 20, \dots, 30 \text{ kW/m}^2$ (kolmiojakauma huippuarvona 25 kW/m^2) ja $\gamma = 1,7, \dots, 2,8$ (kolmiojakauma huippuarvona 1,7).



Kuva 220. Paloon osallistuvan seinämateriaalin palamisen seinään kohdistaman lämpövuon laskentamalli.

Liitteen B lähdeluettelo

Back, G., Beyler, C. L., DiNenno, P. & Tatem, P. 1994. Wall Incident Heat Flux Distributions Resulting from an Adjacent Fire. In: Kashiwagi, T. (toim.). *Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium*. Ottawa, Canada, July 13–17, 1994. Boston, USA: International Association for Fire Safety Science. S. 241–252.

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

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

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

Lattimer, B. Y. 2002. Heat fluxes from fires to surfaces. In: DiNenno, P. J., Drysdale, D., Beyler, C. L. & Walton, W. D. (toim.). *SFPE Handbook for Fire Protection Engineering*. 3. p. S. 2/269–296.

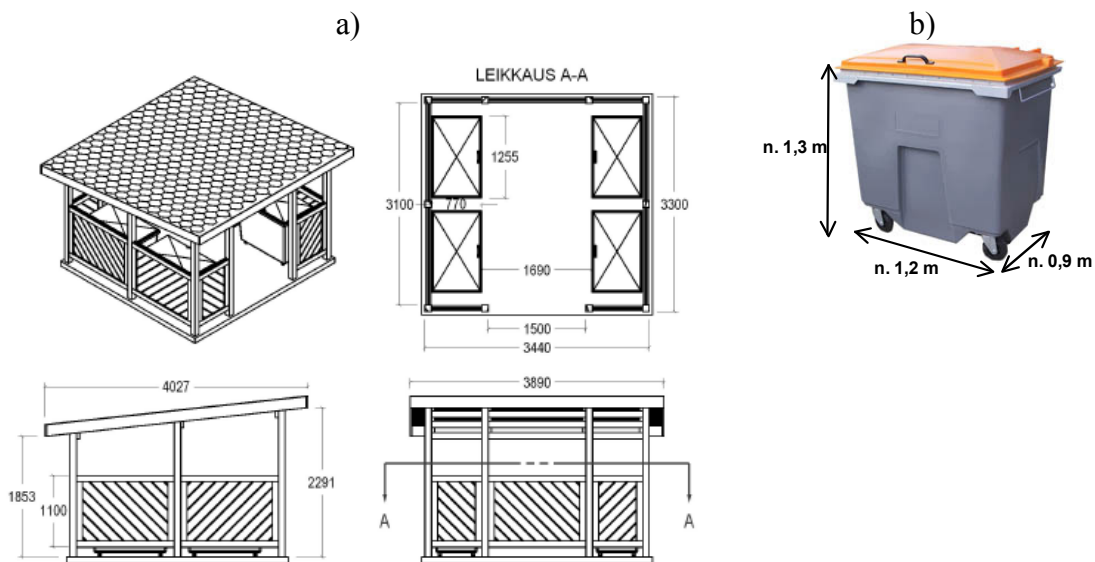
Paloposki, T. 2000. *Urheiluhallien teräsrakenteet*. VTT, Tutkimusselostus nro. RTE3425/00. 53 s.

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

Liite C: Katoksien tulipalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien määrällinen mallintaminen

Lähtötiedot

Jäteastioiden keräyskatosten paloja käsitellään tässä työssä siten, että ensin tutkitaan determinististä palosimulointia käyttäen, millainen on tyypillisen jäteastiatatoksen palo ja näin saadut tulokset yleistetään antamalla saatujen tulosten vaihdella järkeväksi katsottavissa olevissa rajoissa. Tyypillisenä jäteastiatatoksena tarkastellaan kuvassa 221a esitettävää katosta, jossa on neljä kappaletta kuvassa 221b esitetyn kaltaisia jäteastioita. Katoksen rakenteet ovat puuta ja jäteastian on polyeteeni- tai polypropylenimuovia. Neljän (4) jäteastian tapauksen tulokset voidaan yleistää muuttamalla jäteastioiden määrää ja tekemällä vastaava muutos katoksen kokoon.



Kuva 221. a) Esimerkki tyypillisestä jäteastioiden säilytyskatoksesta [Iso-Antti-katos, Koskelan Saha 2005] ja b) tyypillisestä jäteastiasta (paino 45 kg ja vetoisuus 770 litraa) [Melaja 2005].

Palokuorman ja palotehon määrittäminen: neljän jäteastian katos

Jos puutavaran paksuudeksi oletetaan 25 mm, kosteudeksi 10 % ja lämpöarvoksi 15 MJ/kg, niin katoksen puutavaran sisältämä lämpöenergia on noin 10 000 MJ. Jos jäteastian massan oletetaan koostuvan kokonaan PE- tai PP-muovista, jonka lämpöarvo

on noin 40 MJ/kg, on yhden astian palokuorma vajaat 2000 MJ ja neljän astian palokuorma noin 8000 MJ. Jos astia on täynnä, on siinä suuruusluokkaa 1000 kg jätettä. Jos jätteen lämpöarvoksi oletetaan 20 MJ/kg ja kosteudeksi 10 %, niin jätteiden palokuorma on siis noin 17 500 MJ. Jos kaikki neljä astiaa ovat täynnä, on niiden palokuorma siis noin 70 000 MJ. Jos siis kaikki astiat olisivat täynnä ja kaikki aineet palaisivat 100 %:sti, voisi katoksen, jäteastioiden ja jätteiden palossa vapautua siis noin $10\,000\text{ MJ} + 8000\text{ MJ} + 70\,000\text{ MJ} = 88\,000\text{ MJ}$. Toisaalta, jos astiat ovat lähes tyhjä tai niissä oleva aine on hyvin kosteaa, palokuorma on noin 18 000 MJ. Seuraavassa tarkastelussa palokuorman ja palokuorman tiheydet määritetään olettamalla, että palavan jätteen määrä on ainakin 50 %.

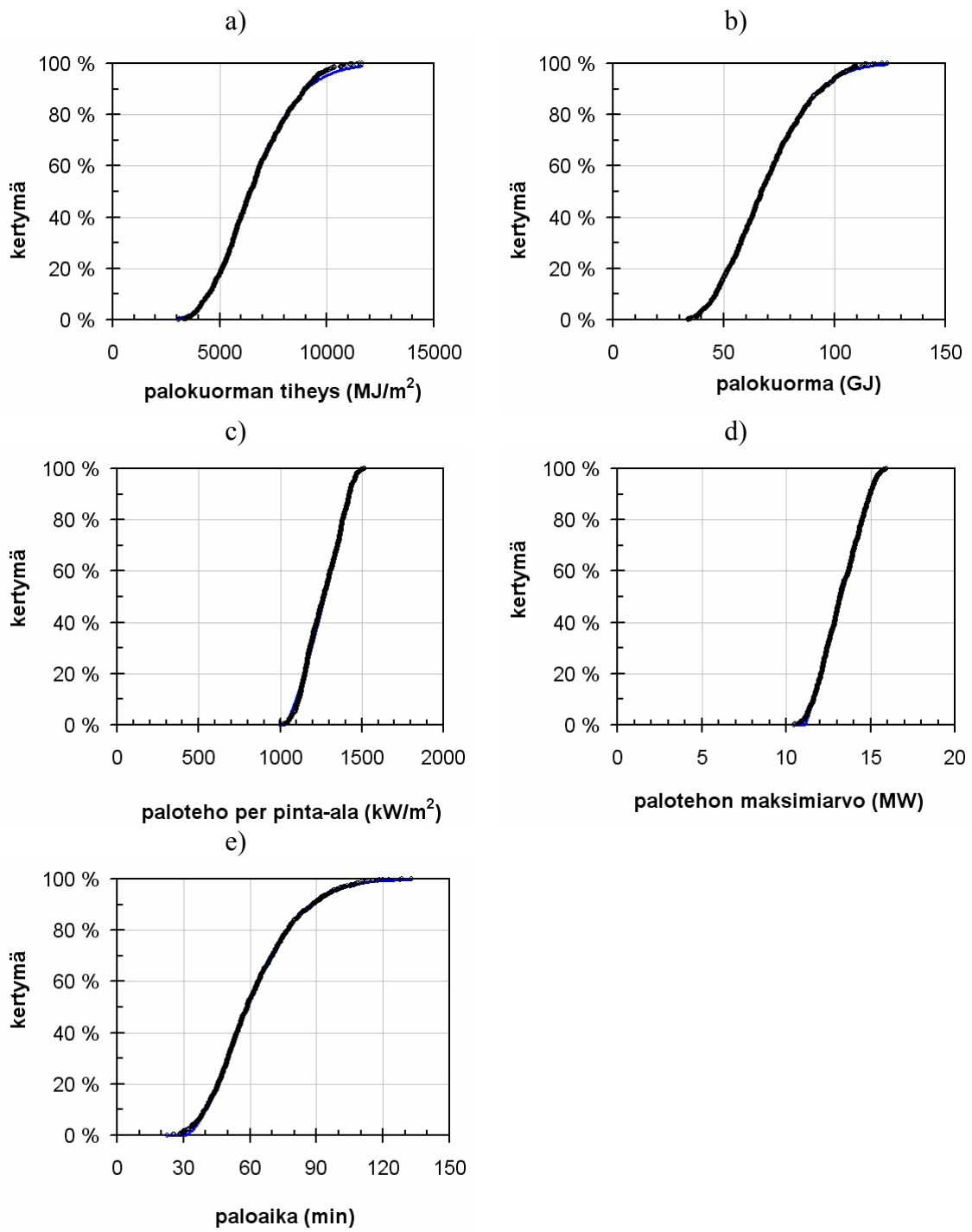
Jätekatoksen palotehon arvioinnissa käytetään kahta eri lähestymistapaa, jotka ovat

- asiantuntija-arvio huipputeholle
- FDS4-ohjelmalla laskettu paloteho.

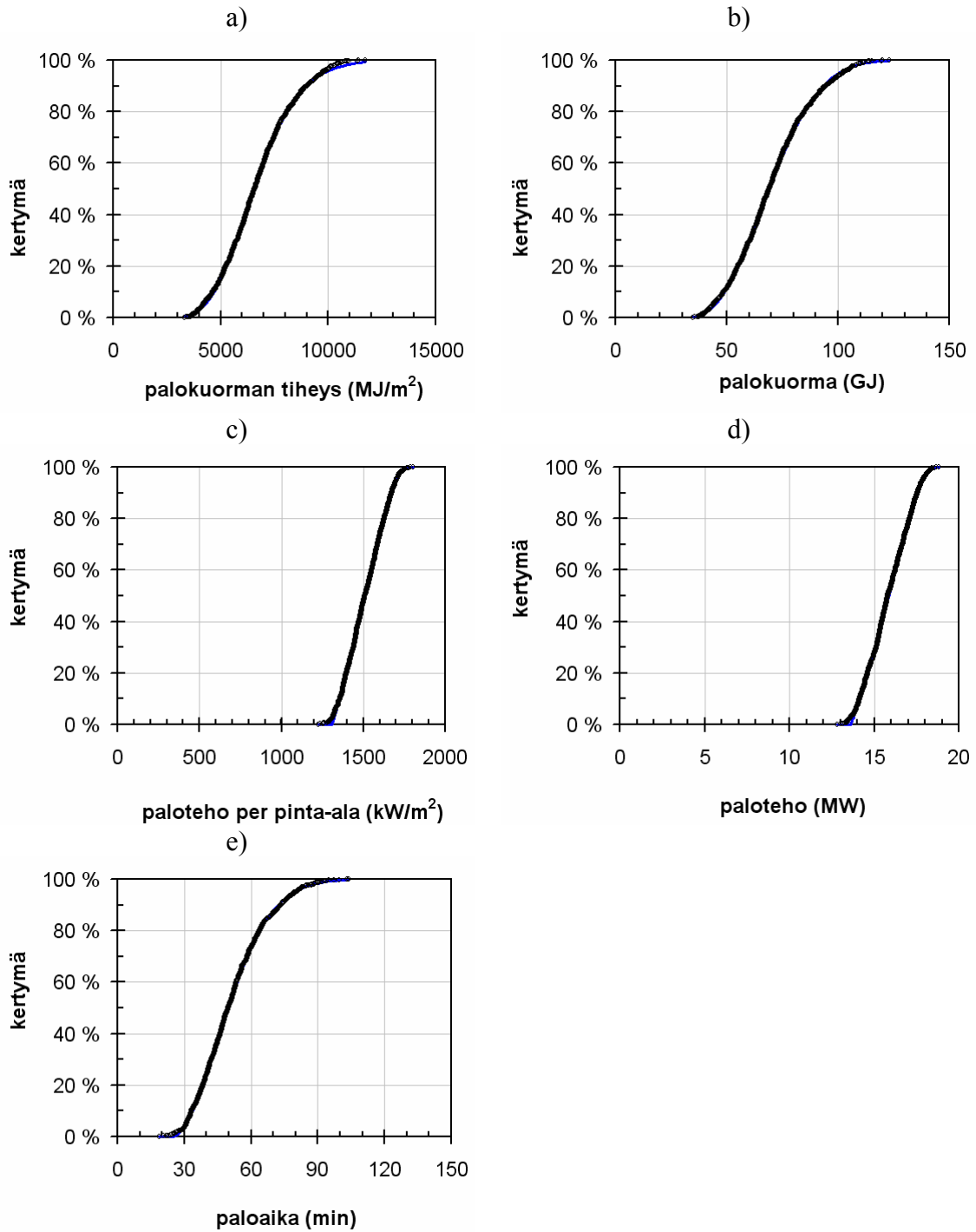
Asiantuntija-arviossa määritetään jätekatoksen suurin paloteho sen eri komponenttien, katos, jäteastiat ja jätteet, maksimipalotehon arvioinnin perusteella. Nämä maksimipalotehot puolestaan arvioidaan niiden yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon koe-tuloksiin [esim. Babrauskas & Grayson 1992] sekä pinta-alajen perusteella. Koska nämä suureet samoin kuin muutkin tilanteessa vaikuttavat tekijät ovat vaihtelevia, käytetään stokastista (vaihtelevuuden huomioon ottavaa) mallintamista [Hietaniemi 2005]. Puulle yksikköpinta-alaa kohden vapautuvana palotehona käytetään arvoa $100\text{--}150\text{ kW/m}^2$; stokastisessa mallintamisessa tämän suureen oletetaan vaihtelevan tällä välillä tasajakautuneesti. Muoviastialle ja jätteille käytetyt arvot ovat $300\text{--}500\text{ kW/m}^2$ ja $200\text{--}400\text{ kW/m}^2$, jakaumana tasajakauma. Näihin arvoihin perustuvan laskun tulos maksimipalotehon jakaumalle katokselle, jossa 2–6 jäteastiaa, esitetään kuvassa C1a. Voimakkaan (oleellisesti liekashtunut täyden palon vaihe) palon ajalliselle kestolle voidaan muodostaa arvio jakamalla ennen palon hiipumisvaihetta palava palokuorma palotehon maksimiarvolla. Tässä oletetaan, että palon hiipumisvaiheessa vapautuva energiamäärä on noin 20–40 %, joka vastaa Eurocode 1:ssä [CEN 2002] esitettyä 30 %:n arvoa. Tuloksena saatava paloajan jakaumasta tulee hyvin leveä, mikä on ominaista kahden saattunaismuuttujan osamääränä saatavalle suurelle.

Tarkastelemme erikseen katoksen, jonka katto osallistuu paloon ja jonka katto ei olennaisesti osallistu paloon (esim. peltikatto). Kun katto osallistuu paloon, sen palamista kuvataan puumateriaalina.

Tulokset esitetään kuvissa 222 ja 223 sekä taulukoissa 51 ja 52.



Kuva 222. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio neljän jätteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto ei osallistu paloon: a) palokuorman tiheys, b) palokuorma, c) palotehon maksimiarvon tiheys, d) palotehon maksimiarvo e) palon ajallinen kesto.



Kuva 223. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio neljän jäteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto osallistuu paloon kuten puumateriaali: a) palokuorman tiheys, b) palokuorma, c) palotehon maksimiarvon tiheys, d) palotehon maksimiarvo e) palon ajallinen kesto.

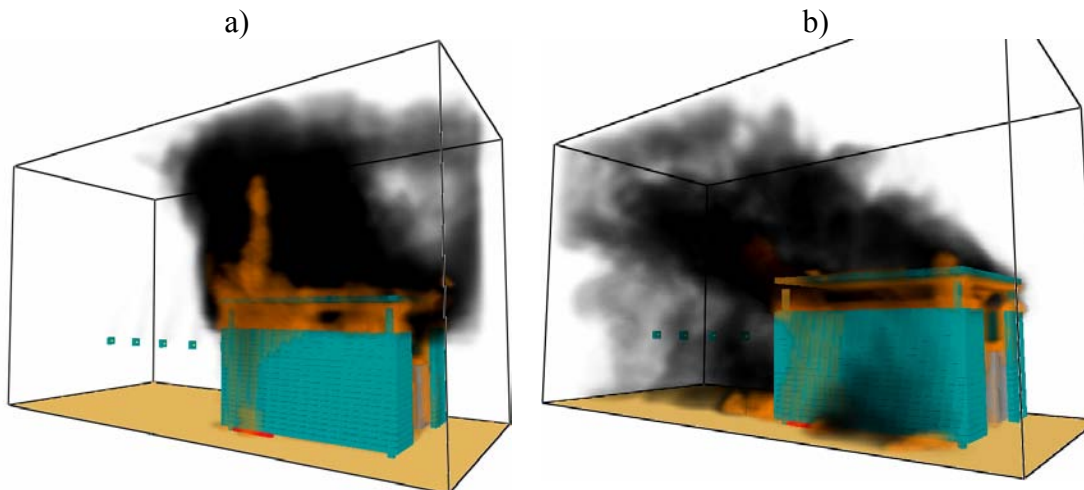
Taulukko 51. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio neljän jäteastian jätekatoksen paloa kuvaaville suureille, katto ei osallistu paloon: palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja.

Suure	Jakauma	Jakauman parametrit ja tunnuslukuja
palokuorman tiheys	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrisen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 8,9$ $\beta = 632 \text{ MJ/m}^2$ $x_{\min} = 448 \text{ MJ/m}^2$ $p = 1,48$ mediaani: 6 500 MJ/m ² 80 %: 8 090 MJ/m ² 99 %: 11 800 MJ/m ²
palokuorma	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrisen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 31,3$ $\beta = 2,3 \text{ GJ}$ $x_{\min} = 27 \text{ GJ/}$ $p = 0,11$ mediaani: 67 GJ 80 %: 85 GJ 99 %: 116 GJ
palotehon maksimi-arvon tiheys	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 9,0$ $\beta = 420 \text{ kW/m}^2$ $x_{\min} = 1 025 \text{ kW/m}^2$ $p = 0,14$ mediaani: 1 270 kW/m ² 80 %: 1 380 kW/m ² 99 %: 1 490 kW/m ²
palotehon maksimiarvo	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 7,8$ $\beta = 4,1 \text{ kW}$ $x_{\min} = 11,1 \text{ kW}$ $p = 0,14$ mediaani: 13,3 kW 80 %: 14,5 kW 99 %: 15,8 kW

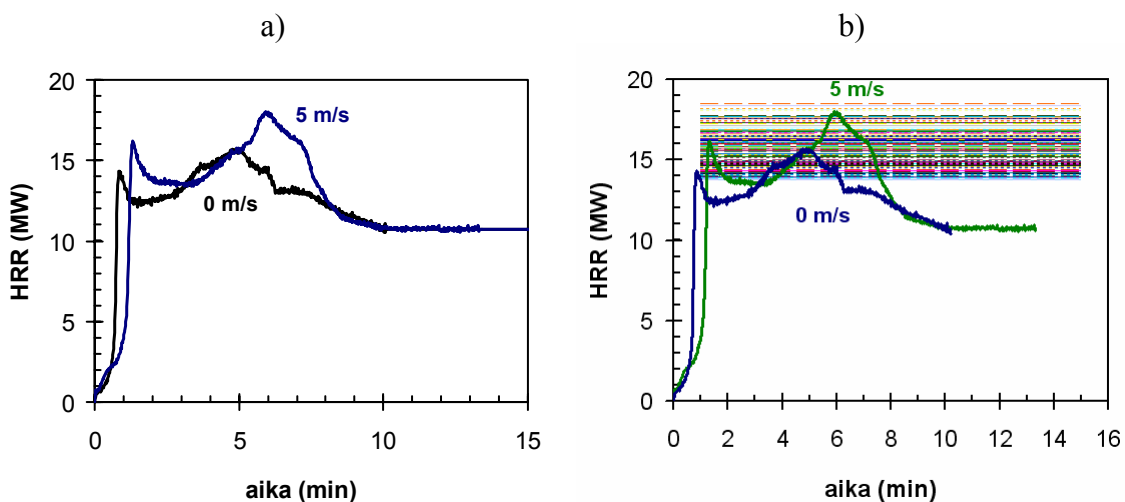
Taulukko 52. Asiantuntija-arvioon perustuva arvio neljän jätteen jätteen jätteen paloa kuvaaville suureille, katto osallistuu paloon: palamista kuvaavien suureiden jakaumat ja niiden tunnuslukuja.

Suure	Jakauma	Jakauman parametrit ja tunnuslukuja
palokuorman tiheys	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrinen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 10,3$ $\beta = 553 \text{ MJ/m}^2$ $x_{\min} = 450 \text{ MJ/m}^2$ $p = 1,48$ mediaani: 6 600 MJ/m ² 80 %: 8 090 MJ/m ² 99 %: 11 800 MJ/m ²
palokuorma	Muunneltu gammajakauma, kertymäfunktio $F(x) = [G(x)]^p$, missä $G(x)$ on 3-parametrinen gammajakauman tiheysfunktio $G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^x d\xi (\xi - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\xi - x_{\min}}{\beta}\right)$	$\alpha = 37,6$ $\beta = 1,8 \text{ GJ}$ $x_{\min} = 27 \text{ GJ/}$ $p = 0,11$ mediaani: 69 GJ 80 %: 85 GJ 99 %: 116 GJ
palotehon maksimi-arvon tiheys	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 7,6$ $\beta = 384 \text{ kW/m}^2$ $x_{\min} = 1 307 \text{ kW/m}^2$ $p = 0,14$ mediaani: 1 510 kW/m ² 80 %: 1 630 kW/m ² 99 %: 1 750 kW/m ²
palotehon maksimiarvo	Muunneltu Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right] \right\}^p$	$\alpha = 8,3$ $\beta = 4,2 \text{ kW}$ $x_{\min} = 13,6 \text{ kW}$ $p = 0,14$ mediaani: 15,9 kW 80 %: 17,1 kW 99 %: 18,3 kW

FDS4-laskentaohjelmaan perustavassa lähestymistavassa käytetään eri komponenteille FDS4-ohjelman palamismallia Hietaniemen ym. [2004] esittämällä tavalla. Esimerkki FDS4-ohjelmalla lasketusta jätteen palosta esitetään kuvassa 224. FDS4-lasekennan tuloksena saatuja palotehokäyriä esitetään kuvassa 225a (kaksi eri tuuliolosuhdetta, tyyni tilanne ja nopeudella 5 m/s puhaltava tuuli). Edellä esitetyn asiantuntija-arvioon perustuvan palotehon mallintamisen tuloksia ja FDS4-tuloksia verrataan kuvassa 225b. Tulosten nähdään vastaavan toisiaan hyvin siten, että FDS4-tulokset edustavat palotehon voimakkuutta mediaaniin saakka.



Kuva 224. Tyypillinen jäteastiakatoksen palo: a) ei tuulta ja b) tuuli 5 m/s.



Kuva 225. a) FDS4-mallinnuksen antamat palotehokäyrät kahdelle eri tuulen nopeuden arvolle ja b) niiden vertaaminen edellä esitettyä stokastista mallintamista käyttäen saatuihin tuloksiin.

Jätekatoksen ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto: 4 jäteastian katos

Katoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpösäteily määritetään kuvissa 226 ja 227 esitetyillä järjestelyillä. Deterministinen tarkastelu (Kuva 226) käsittää kaksi tuuliolosuhdetta: tyynen tilanteen ja tilanteen, jossa tuulen nopeus maan pinnalla on 5 m/s. Lämpösäteilyn voimakkuus määritetään kuvassa esitetyllä virtuaalisten lämpövuouturien hilalla. Näin saadaan selville tiettyä palotehoa ja palon kestoa vastaavat lämpösäteilyn voimakkuudet eri etäisyyksillä ja korkeuksilla. Yleistetty, stokastinen kuva määrite-

tään käyttäen yksinkertaistettua lämpösäteilyn suuruuden laskentamallia (Kuva 227), jonka tulokset kalibroidaan käyttäen deterministisellä mallilla saatuja tuloksia.

Katoksen ympäristönsä etäisyydellä d olevaan kohteeseen kohdistama lämpövuoto $\dot{q}_{k,t}''$ riippuu katoksen lähettämästä lämpövuosta $\dot{q}_{k,s}''$ seuraavasti

$$\dot{q}_{k,t}'' = \Phi_{k-t} \cdot \dot{q}_{k,s}'', \quad (34)$$

missä katoksen ja kohteen välinen näkyvyystekijä on

$$\Phi_{k-f} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \arctan\left(\frac{b}{\sqrt{1+a^2}}\right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \arctan\left(\frac{a}{\sqrt{1+b^2}}\right) \right] \quad (35)$$

$$a = \frac{L_f}{2d}, b = \frac{D_{eff}}{2d},$$

missä L_f ja D_{eff} ovat kuvan 227 mukaisen katoksen palamisen yksinkertaistetun mallin liekin dimensiot.

Lämpövuon $\dot{q}_{k,s}''$ laskennassa käytetään kahta lähestymistapaa, palotehoon ja liekin lämpötilaan perustuvaa mallia. Palotehoon perustuvassa mallissa

$$\dot{q}_{k,t}'' = \frac{\chi_{r,k} \cdot \dot{Q}_k}{D_{eff} \cdot L}, \quad (36)$$

missä \dot{Q}_k on katoksen paloteho,

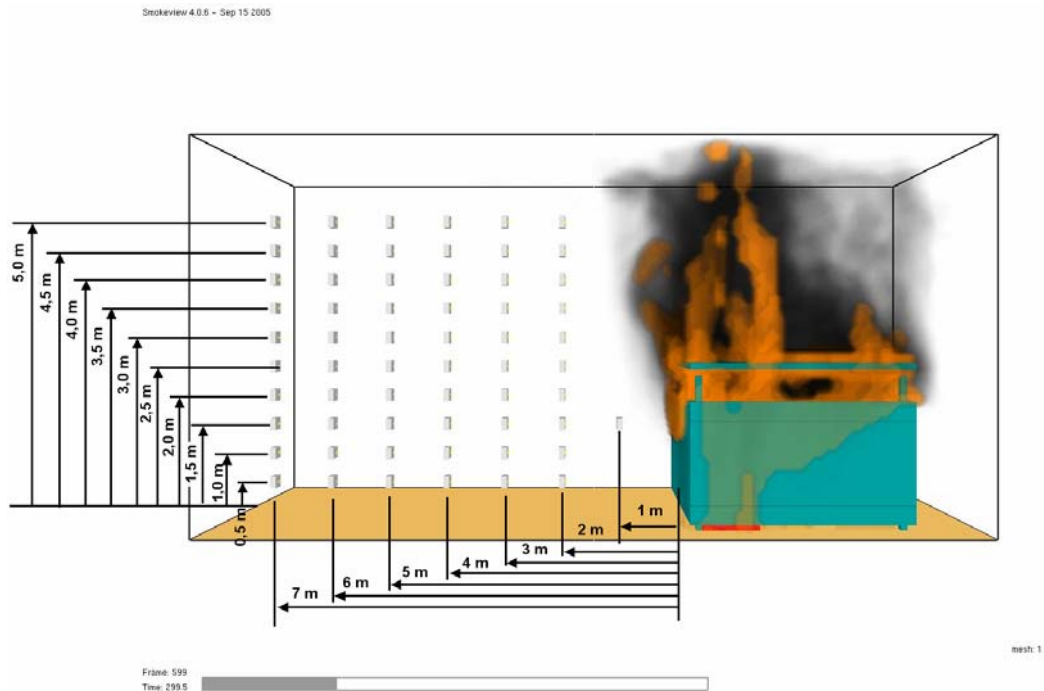
$$\dot{Q}_k = a \cdot b \cdot \dot{Q}_k'', \quad (37)$$

missä a ja b ovat katoksen vaakasuuntaiset mitat (ks. Kuva 227) ja \dot{Q}_k'' on jätekaoksen palotehon maksimi-arvon tiheys (Kuvat 222 ja 223 sekä taulukot 51 ja 52). Säteilyn välityksellä siirtyvän tehon osuus $\chi_{r,k}$ lasketaan perustuen kuvassa 222c esitettyyn $\chi_{r,k}$:n riippuvuuteen palokohteen tehollisesta halkaisijasta D_{eff} [Hietaniemi 2005]. Liekin lämpötilaan T_f perustuvassa mallissa

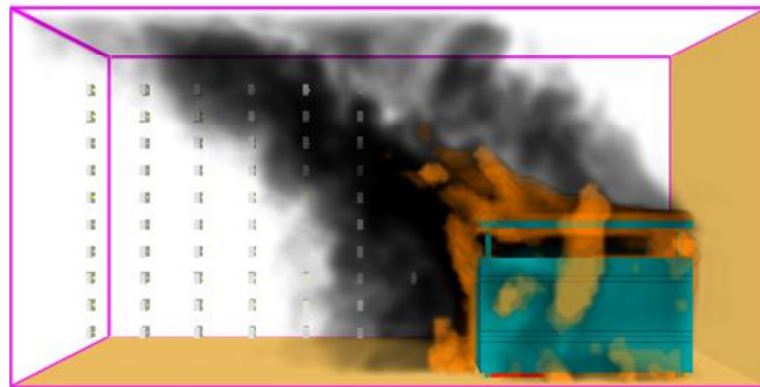
$$\dot{q}_{k,t}'' = \left(1 - e^{-0,3 \cdot D_{eff}/2}\right) \cdot \sigma \cdot T_f^4. \quad (38)$$

Stokastisen mallin tulokset neljän astian jätteiden keräyskatokselle, jonka katto ei osallistu paloon esitetään kuvassa 228 ja katokselle, jonka katto osallistuu paloon kuvassa 229. Kuvassa 229 esitetty stokastisen mallin tuloksien vertaaminen deterministisen mallin tuloksiin osoittaa mallien tulosten olevan hyvässä sopuinnussa keskenään. Tuloksena saatuun jakaumiin parametriarvot ja tunnuslukuja esitetään taulukoissa 53 ja 54.

a)

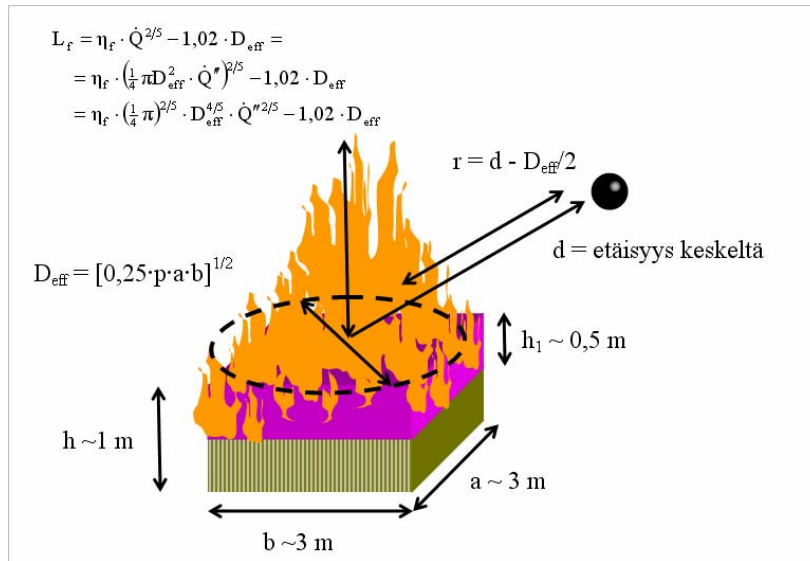


b)

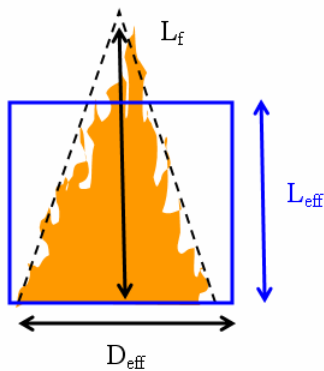


Kuva 226. Jättekatoksen palon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen deterministinen laskenta FDS4-ohjelmalla: a) ei tuulta ja b) tuulen nopeus 5 m/s. Mitat osoittavat virtuaalisten lämpövuointureiden sijainnin.

a)



b)



kolmio: $A_f = D_{eff} \cdot L_f / 2$

neliö: $A_f = D_{eff} \cdot L_{eff}$

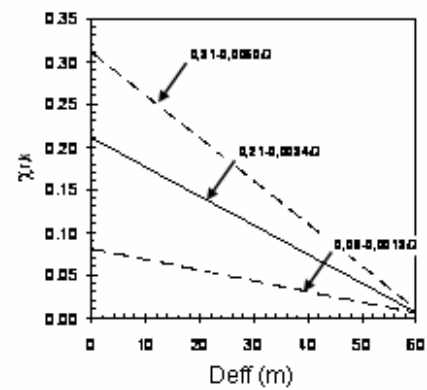
$\Rightarrow L_{eff} = L_f / 2$

$$\Phi = \frac{l}{\pi} \left[\frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \arctan\left(\frac{b}{\sqrt{1+a^2}}\right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \arctan\left(\frac{a}{\sqrt{1+b^2}}\right) \right]$$

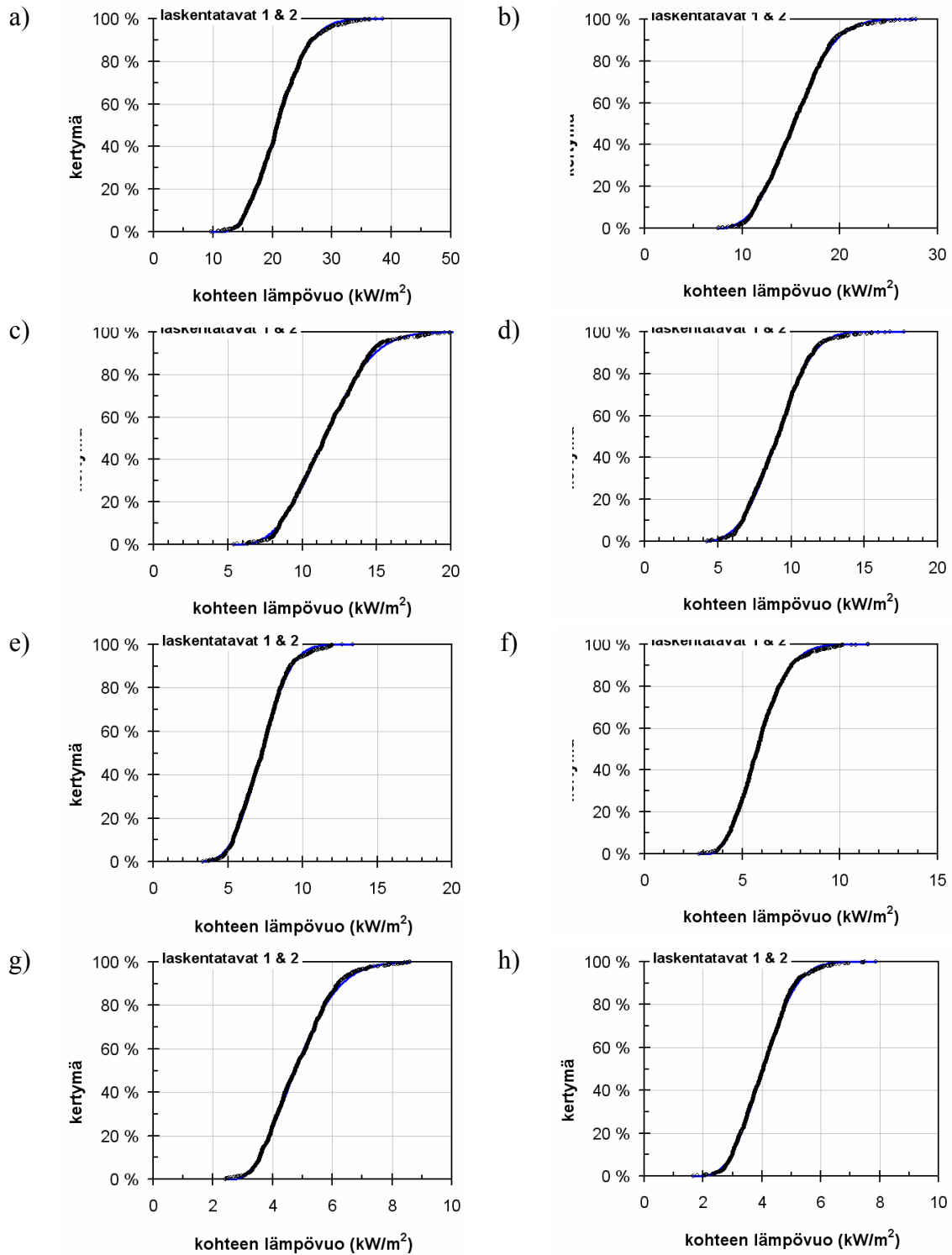
$a = L_{eff} / d = L_f / (2d)$

$b = D_{eff} / (2d)$

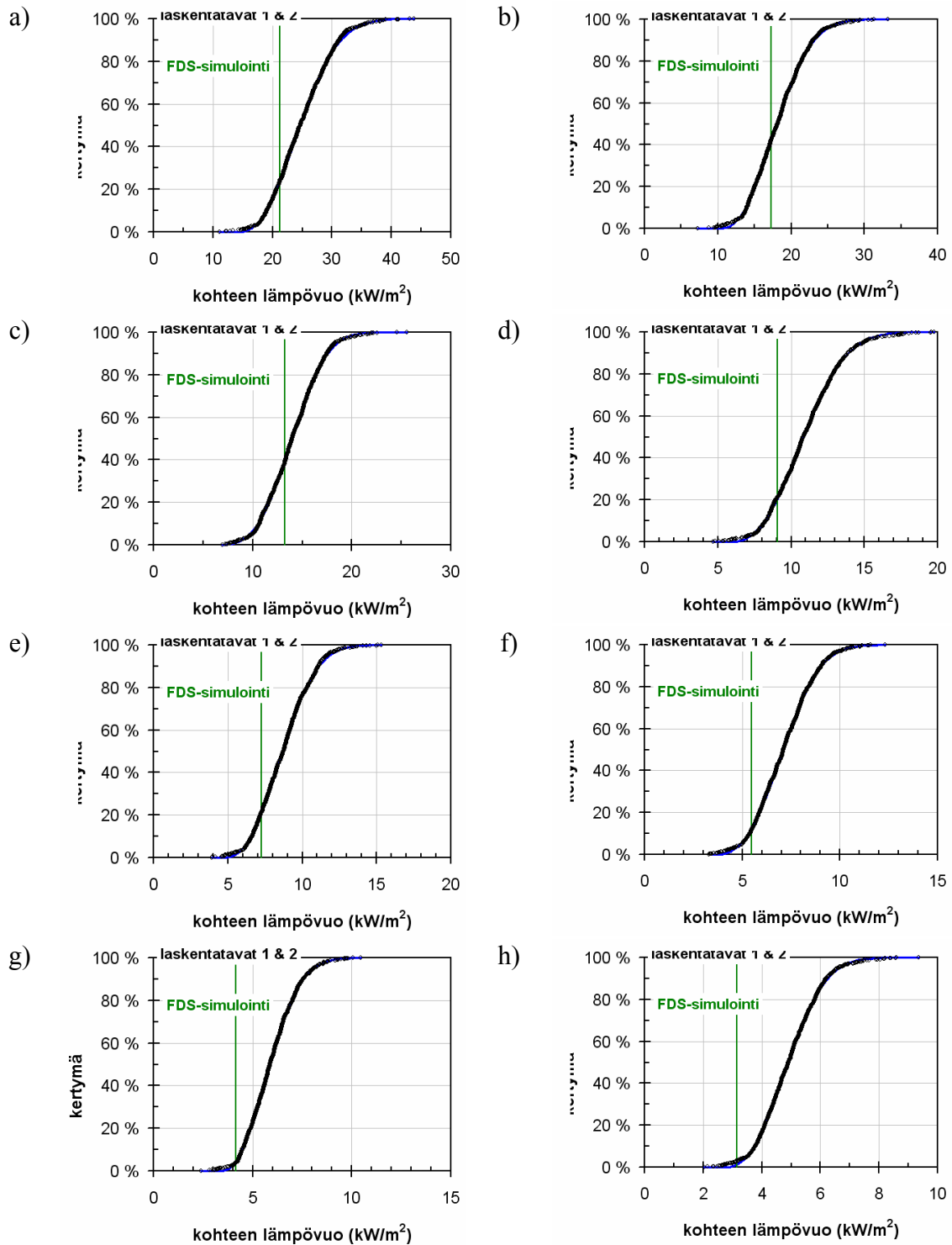
c)



Kuva 227. Jätekatoksen palon ympäristönsä kohdistaman lämpörasituksen stokastisen laskennan malli: a) mallin yleiskuvauks, b) liekin käsittely lämpösäteilyä lähettävänä pintana ja säteilyn välityksellä siirtyvän tehon osuuden riippuvuus palokohteen tehollisesta halkaisijasta D_{eff} [Hietaniemi 2005].



Kuva 228. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä: a) 2 m, b) 3 m, c) 4 m, d) 5 m, e) 6 m, f) 7 m, g) 8 m ja h) 9 m. Katoksen katto ei osallistu paloon.



Kuva 229. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä: a) 2 m, b) 3 m, c) 4 m, d) 5 m, e) 6 m, f) 7 m, g) 8 m ja h) 9 m. Katoksen katto osallistuu paloon palaen puumateriaalin tavoin. Pystyviivat osoittavat vastaavan deterministisen simulointilaskennan tuloksen.

Taulukko 53. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto ei osallistu paloon: lämpövuon jakauman

$$(Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$)$$

parametrit ja tunnuslukuja.

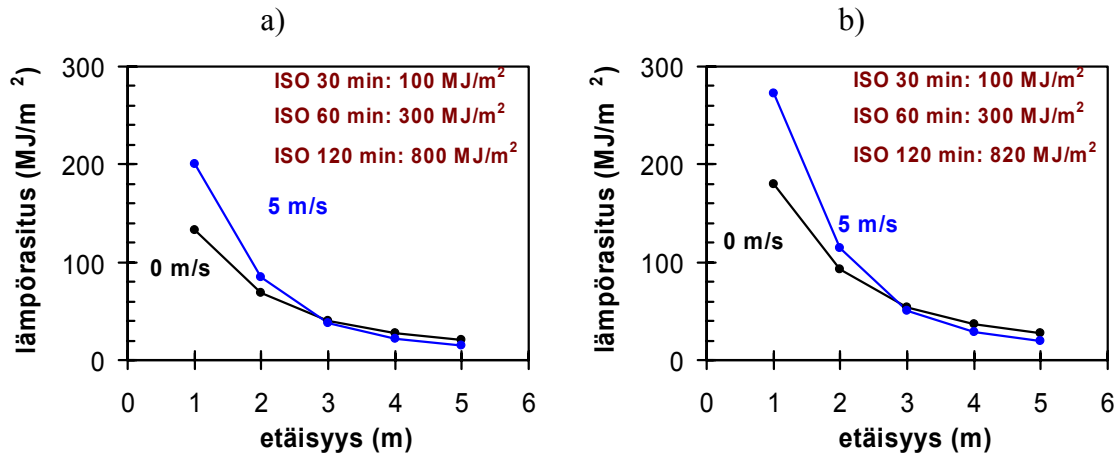
etäisyys	α	β (kW/m ²)	x_{\min} (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	3.4	19.6	11.6	29.2	38.7	42.3
2 m	2.5	11.1	11.2	20.8	28.4	31.7
3 m	2.8	9.4	7.1	15.3	20.8	23.1
4 m	2.6	6.7	5.7	11.5	15.9	17.7
5 m	3.3	6.3	3.4	9.1	12.2	13.5
6 m	3.1	4.8	3.0	7.2	9.8	10.9
7 m	2.3	3.0	3.2	5.8	8.1	9.1
8 m	2.1	2.5	2.7	4.7	6.8	7.7
9 m	2.7	2.5	1.9	4.0	5.6	6.2
10 m	2.8	2.1	1.6	3.4	4.7	5.2

Taulukko 54. Neljän (4) jäteastian jätekatoksen palon ympäristöönsä kohdistama lämpövuoto eri etäisyyksillä, kun katoksen katto osallistuu paloon: lämpövuon jakauman

$$(Weibull-jakauma, kertymäfunktio $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)^\alpha\right]$)$$

parametrit ja tunnuslukuja.

etäisyys	a	b (kW/m ²)	xmin (kW/m ²)	mediaani (kW/m ²)	95 % (kW/m ²)	99 % (kW/m ²)
1 m	2.3	16.1	19.6	33.3	45.6	51.0
2 m	2.4	12.1	14.3	24.7	33.6	37.5
3 m	2.4	9.1	10.3	18.1	24.7	27.6
4 m	3.2	8.7	6.3	14.0	18.6	20.4
5 m	2.5	5.8	5.8	10.9	14.8	16.5
6 m	2.5	4.7	4.7	8.7	11.8	13.2
7 m	2.7	4.0	3.6	7.1	9.7	10.7
8 m	2.3	2.9	3.4	5.9	8.1	9.0
9 m	2.5	2.5	2.7	4.9	6.7	7.4
10 m	2.3	2.0	2.5	4.2	5.7	6.4



- 3 m päässä:
 - 2 h palomuri: tekijän 22 varmuustekijä
 - 1 h palomuri: tekijän 8 varmuustekijä
 - EI30 min: tekijän 2,7 varmuustekijä
- 4 m päässä:
 - 2 h palomuri: tekijän 30 varmuustekijä
 - 1 h palomuri: tekijän 11 varmuustekijä
 - EI30 min: tekijän 3,7 varmuustekijä

- 3 m päässä:
 - 2 h palomuri: tekijän 16 varmuustekijä
 - 1 h palomuri: tekijän 6 varmuustekijä
 - EI30 min: tekijän 2 varmuustekijä
- 4 m päässä:
 - 2 h palomuri: tekijän 23 varmuustekijä
 - 1 h palomuri: tekijän 8 varmuustekijä
 - EI30 min: tekijän 2,7 varmuustekijä

Kuva 230. Jätekatoksen palon aiheuttaman kokonaislämpörasituksen riippuvuus etäisyydestä katoksesta: a) keskimääräinen arvo ja b) 99 % fraktiiliarvo.

Liitteen C lähdeluettelo

Babrauskas, V. & Grayson, S. 1992. Heat Release in Fires.

CEN 2002. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2: General Actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN. 59 s. (EN 1991-1-2:2002 E.)

Hietaniemi, J., Hostikka, S. & Vaari, J. 2004. FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data. Espoo: VTT. 46 s. + liitt.. 6 s. (VTT Working Papers 4) ISBN 951-38-6556-8

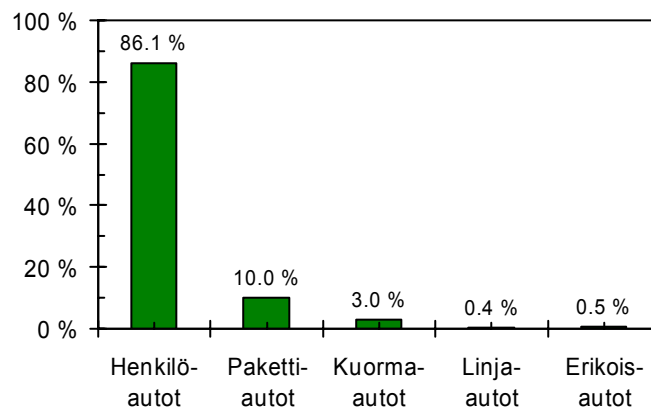
Hietaniemi, J. 2005. Mallintaminen ja sen käyttö palotekniikassa. Palontorjuntatekniikan erikoisnumero, s. 47–51.

Koskelan Saha Oy. 2005. Iso-Antti-jätekatos-esite. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <http://www.wood-group.fi>. (viitattu 28.8.2005)

Melaja. 2005. Plastia-muovituotteiden esite. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <http://melaja.fi/pages.php/Etusivu/Plastia-muovitekniikka/J%E4teastiat/770%20I%20j%E4teastia> (viitattu 28.8.2005)

Liite D: Ajoneuvopalojen voimakkuuden ja niiden aiheuttamien uhkien määrällinen mallintaminen

Autokannasta suurin osa on henkilöautoja (Kuva 231 [AKE 2005]). Asuinalueella henkilöautojen suhteellinen osuus lienee tätäkin seävästi korkeampi. Siksi tässä tarkastelussa päähuomio keskitetään henkilöautojen paloihin. Muiden henkilöajoneuvojen, kuten moottoripyörien, matkailuvaunujen tai -autojen, pikkubussien ja bussien, jne., palojen mallintaminen tehdään niiden palokuorman avulla alla esitetyllä tavalla.

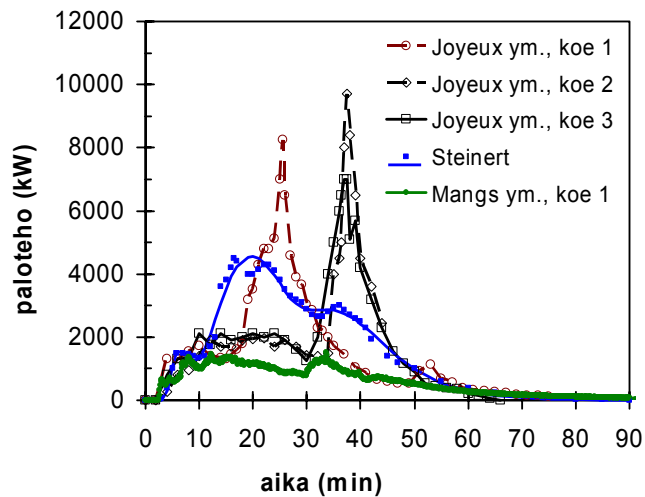


Kuva 231. Suomen autokannan jakautuminen erityyppisiin kulkuneuvoihin vuonna 2004 [AKE 2005].

Henkilöautojen palot

Henkilöautojen polttokokeista saatava tieto

Siihen nähden, että auto on olennainen osa nykyajan elämää, autojen palamista on tutkittu yllättävän vähän. Ensimmäiset kokeet, joissa todella määrällisesti pyrittiin selvittämään autopalon voimakkuutta (eli palotehoa) tehtiin VTT:llä [Mangs & Keski-Rahkonen 1994a, Mangs & Keski-Rahkonen 1994b, Mangs 2004]. Tämän jälkeen autojen palamisen voimakkuutta ovat mitanneet Steinert [2000] ja Joyeux ym. [2001]. Esi-merkkejä näiden tutkijoiden mittaamista palotehokäyristä esitetään kuvassa 232. Näihin tutkimuksiin liittyviä tietoja esitetään taulukossa 55.



Kuva 232. Keskikokoisten henkilöautojen polttokokeissa mitattuja palotehokäyriä [Mangs & Keski-Rahkonen 1994a ja 1994b, Mangs 2004, Steinert 2000, Joyeux ym. 2001].

Taulukko 55. Kuvan 232 autopalokokeisiin liittyviä tietoja.

Lähde	Näyte	Valmistusaika	Alkumassa M_0 ja palaneen massan osuus	Vapautunut kokonaisenergia Q ja tehollinen lämpöarvo EHC	Palotehon huippuarvo ja hetki
Mangs & Keski-Rahkonen 1994a ja 1994b, Mangs 2004	Ford Taunus 1.6 (koe 1)	1970-luvun loppupuoli	$M_0 = 990$ kg, palanut 14 %	$Q = 3\,300$ MJ EHC = 23 MJ/kg	$\dot{Q}_{\max} = 1\,500$ kW @ 34 min
Steinert 2000	Citroën BX 16	1980-luvun jälkipuolisko	-	$Q = 7\,500$ MJ	$\dot{Q}_{\max} = 4\,500$ kW @ 17 min
Joyeux ym. 2001	Laguna	1994–1995	-	$Q = 6\,700$ MJ	$\dot{Q}_{\max} = 8\,300$ kW @ 26 min
	Break	1994–1995	$M_0 = 1\,450$ kg, palanut 18 %	$Q = 8\,600$ MJ EHC = 23 MJ/kg	$\dot{Q}_{\max} = 9\,700$ kW @ 38 min
	Berline	1994–1995	$M_0 = 1\,360$ kg, palanut 19 %	$Q = 7\,000$ MJ EHC = 26,3 MJ/kg	$\dot{Q}_{\max} = 7\,000$ kW @ 38 min

Taulukko 56. Joyeuxin ym. [2001] esittämä taulukko erityyppisissä henkilöautoissa olevan palamiskelpoisen materiaalien sisältämästä energiamäärästä.

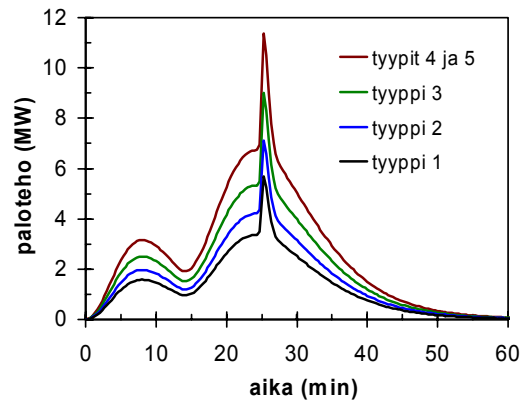
Type	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Peugeot	106	306	406	605	806
Renault	Twingo-Clio	Mégane	Laguna	Safrane	Espace
Citroën	Saxo	ZX	Xantia	XM	Evasion
Ford	Fiesta	Escort	Mondeo	Scorpio	Galaxy
Opel	Corsa	Astra	Vectra	Omega	Frontera
Fiat	Punto	Bravo	Tempra	Croma	Ulysse
Wolkswagen	Polo	Golf	Passat	//	Sharan
Theoretical energy	6000 MJ	7500 MJ	9500 MJ	12000 MJ	

Tuloksista käy esille, että autojen palamisen voimakkuus on kasvanut vuosien mittaan: kun Mangsin ja Keski-Rahkosen tutkimia 1970-luvun lopun auto luovutti suurimmillaan noin 1 500 kW:n palotehon, niin Joyeuxin mittauksissa 1990-luvun puolivälin aikoihin valmistetut autot paloivat lähes 10 000 kW:n teholla. Myös autoissa oleva palokuorman määrä tuntuu kasvaneen: 1970-luvun auto luovutti palaessaan runsaat 3 000 MJ ja 1990-luvun puolenvälin aikoihin valmistetut autot 7 000–8 000 MJ ja ylikin. Tehollisen lämpöarvon perusteella palamisen tehokkuus ei näytä kasvaneen. Yhteenvedon voidaan todeta, että nykyautoissa palavat materiaalit ovat sinänsä samoja kuin vanhemmissa autoissa, mutta nykyään herkästi palavien materiaalien määrä tuntuu olevan selvästi suurempi kuin takavuosina.

Kaikki edellä esitetyt palokoetulokset koskevat keskisuuria autoja (tyypillinen perheauto). On toki selvää, että erikokoisten autojen palaminen poikkeaa toisistaan: todennäköisimpiä palavia autoja asuntoalueella ovat pienet, keskisuuret ja suuret henkilöautot sekä tila-autot/maasturit, mutta myös pakettiauton palo on mahdollinen. Valmiilla alueilla kuorma- tai linja-autojen palon todennäköisyys lienee selvästi em. autotyyppien paloa vähäisempi ja jätetään tässä tarkastelussa ottamatta huomioon.

Erikokoisten henkilöautojen palamisen voimakkuudesta ei ole suoranaista mittaustietoa. Taulukossa 56 esitetään Joyeuxin ym. [2001] käyttämä erikokoisten autojen luokittelu sekä kutakin kokoluokkaa vastaava teoreettinen palamisessa vapautumaan pystyvän energian määrä. Edeltä taulukosta 55 nähdään, että Joyeuxin ym. [2001] tekemissä mittauksissa tyyppiä 3 olevista autoista vapautui keskimäärin 6 700–8 600 MJ eli 70–90 % (keskiarvo 78 %) taulukossa 56 esitetystä teoreettisesta maksimimäärästä. Jos oletetaan, että myös muiden kokoluokkien autojen palamisessa vapautuvan energian määrä teoreettiseen kokonaisenergiamäärään on 78 %, voimme arvioida eri kokoluokissa palamisessa vapautuvan energian määrää seuraavasti: luokka 1, 4 700 MJ; luokka 2, 5 900 MJ; luokka 3, 7 400 MJ ja luokat 4 ja 5, 9 400 MJ. Jos vielä oletamme, että muiden luokkien autoille palotehokäyrän muoto noudattelee luokan 3 auton palotehokäyrää, voimme

konstruoida alla esitetyn kuvan 233 eri kokoluokkien autojen palotehokäyrille. Käyrät on saatu skaalaamalla niitä pystysuunnassa siten, että käyrän ja vaaka-akselin väliin jäävä pinta, joka esittää palamisessa vapautuvaa energiaa, on yhtä suuri kuin edellä esitetty energia-arviot.



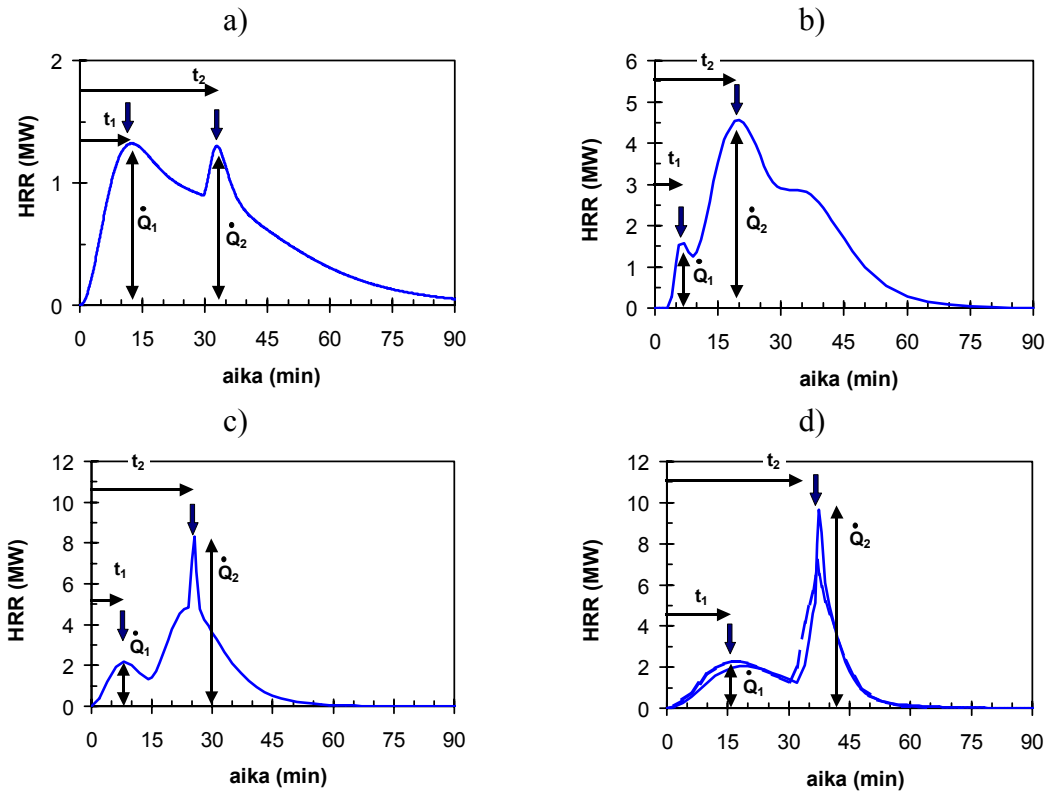
Kuva 233. Arvio erikokoisten henkilöautojen palotehokäyrille.

Autojen polttokokeiden tulosten stokastinen mallintaminen

Kuvassa 233 esitetyllä tavalla autojen polttokokeissa mitattujen palotehokäyrien voidaan katsoa muodostuvan kahdesta suuruudeltaan \dot{Q}_1 ja \dot{Q}_2 olevasta huipusta ajanhetkillä t_1 ja t_2 (Kuva 234). Kuvassa esitettyjen käyrien perusteella näille palotehokäyriä karakterisoiville parametreille saadaan taulukossa 57 esitetyt arvot.

Taulukko 57. Autopalojen palotehon karakterististen suureiden \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 , t_1 ja t_2 arvot.

Lähde	Näyteauton valmistusaika	\dot{Q}_1	\dot{Q}_2	t_1	t_2
Mangs & Keski-Rahkonen 1994a ja 1994b, Mangs 2004	1970-luvun loppupuoli	1,3 MW	1,3 MW	12,3 min	33,0 min
Steinert 2000	1980-luvun jälkipuolisko	1,6 MW	4,6 MW	7,0 min	20,0 min
Joyeux ym. 2001, tyyppi A	1990-luvun puoliväli	2,2 MW	8,3 MW	8,0 min	25,5 min
Joyeux ym. 2001, tyyppi B	1990-luvun puoliväli	2,3 MW 2,0 MW	9,6 MW 7,2 MW	18,0 min 18,0 min	37,5 min 37,0 min



Kuva 234. Henkilöautojen palotehokäyrien muoto: a) Mangs & Keski-Rahkonen 1994a ja 1994b, Mangs 2004, b) Steinert [2000], c) Joyeux ym. [2001], tyyppi A (toinen huippu n. 25 minuutin kohdalla) ja d) Joyeux ym. [2001], tyyppi B (toinen huippu 35–40 minuutin kohdalla).

Taulukon 57 mukaan palotehon ajallista kehittymistä kuvaavat suureet t_1 ja t_2 eivät riipu auton iästä. Niille käytetään autojen stokastisessa palamismallissa seuraavia jakaumia:

- $t_1 = 5, \dots, 20$ min, tasajakauma,
- $t_2 = 20, \dots, 40$ min, tasajakauma.

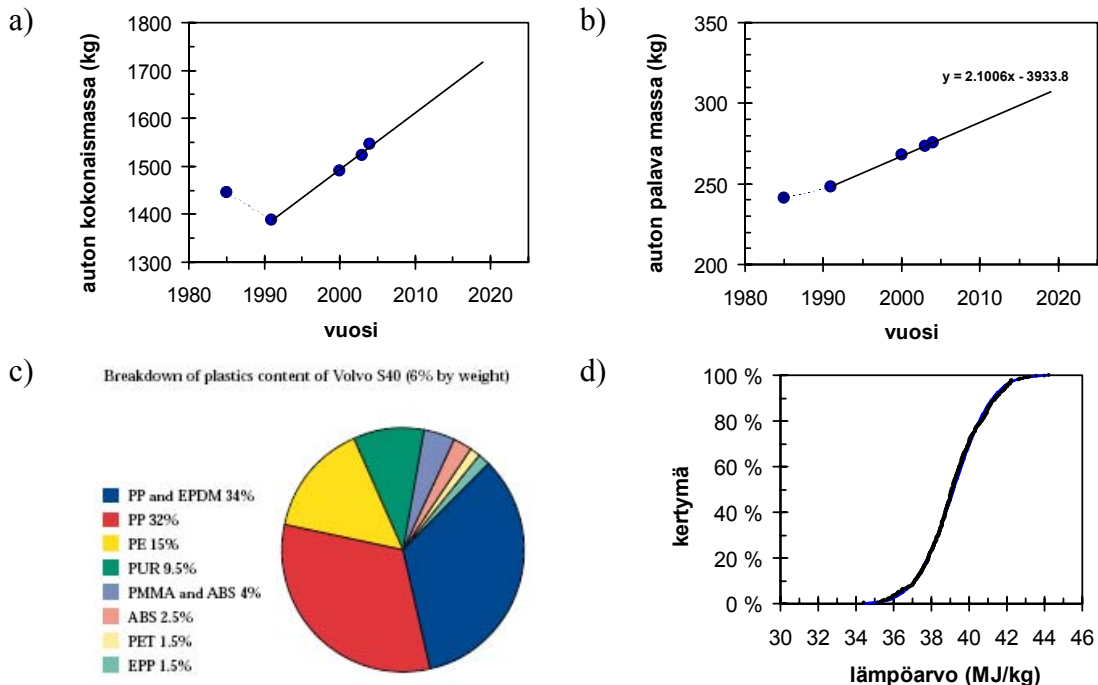
Taulukosta 57 nähdään, että suureet \dot{Q}_1 ja \dot{Q}_2 riippuvat auton iästä. Niiden suhde on pääasiassa välillä $\sim 25\text{--}35\%$. Tämä pätee myös palamisessa vapautuvan energian määrään Q (Taulukko 55). Taulukon 55 tiedot liittyvät jo vähintään 10 vuotta vanhoihin autoihin, minkä vuoksi niitä ei voida sellaisenaan käyttää alue- ja rakennussuunnittelun perustana, joka tähtää tulevaisuuteen aina 50–100 vuoden päähän. Seuraavassa esitetään arvio näiden tekijöiden kehitykselle tulevaisuudessa perustuen tietoihin autoissa olevan palavan materiaalin määrästä ja palavuudesta (lämpöarvo ja palamisen täydellisyys).

Rossin ym. [2005] mukaan autojen kokonaismassa ja niissä olevan palavan aineen massa ovat kehittyneet kuvassa 235 esitetyllä tavalla. Palavan aineen määrä saadaan muun-

nettua palokuormaksi (lämpöenergiämääräksi) käyttämällä tietoja autoissa olevien palavien aineiden jakaantumisesta eri materiaaleihin ja näiden materiaalien lämpöarvoista (kuva 235c ja taulukko 58). Kuvassa 235d esitetään auton palavien materiaalien keskimääräistä koostumusta vastaava lämpöenergian kokonaismäärä (normaalijakauma, jonka keskiarvo on 39 MJ/kg ja keskihajonta 1,6 MJ/kg).

Taulukko 58. Autojen sisältämien muovituotteiden osuudet kuvan Kuva c mukaan ja niiden lämpöarvot [Walters ym. 2000, Tewarson 2002, Tewarson 2005].

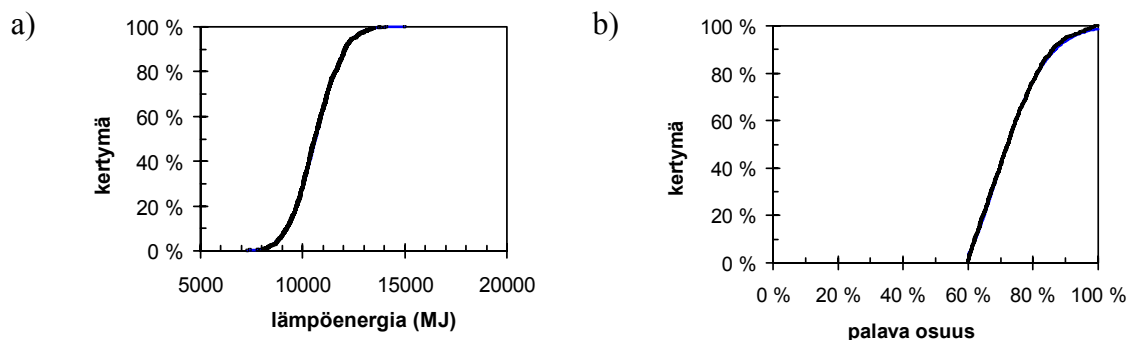
materiaali	osuus (w%)	HC (MJ/kg)
PP & EPDM	34 %	39.5
PP	32 %	42.3
PE	15 %	44.6
PUR	9.50 %	24.5
PMMA & ABS	4 %	31.6
ABS	2.50 %	38.1
PET	1.50 %	23.2
EPP	1.50 %	42.3



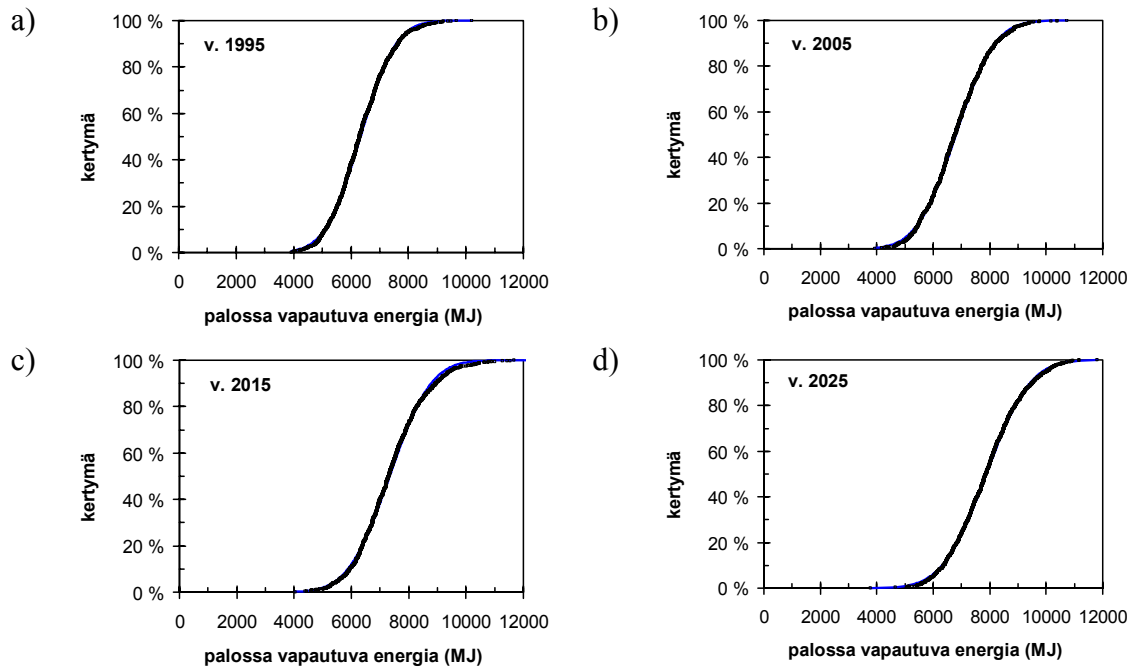
Kuva 235. Autojen a) kokonaismassa ja b) niissä olevan palavan aineen massa [Rossi ym. 2005]. c) Autossa olevan palavan aineen jakautuminen eri materiaalien välillä (esimerkkinä Volvo 40) [Anon 2005] ja d) keskimääräistä materiaalikombinaatiota vastaava lämpöenergian kokonaismäärä.

Koska tulipaloissa palaminen aina enemmän tai vähemmän epätäydellistä, kaikki pala-vaan materiaaliin sitoutunut lämpöenergia ei palossa vapaudu (esim. Eurocode 1991-1-2 esittää palossa vapautuvan lämpöenergian suhteeksi kohteessa olevaan kooknaislämpö-energiaan arvoa 80 %). Nimenomaan autoille soveltuvaa arvoa voidaan arvioida seu-raavasti:

- Kuvan 235b avulla voidaan laskea, että tyypillinen palavan aineen määrä autoissa vuonna 1995 eli vuonna, jona Joyeuxin kokeissaan polttamat autot oli valmistettu, oli noin 260 kg.
- Käyttäen kuvan 235d jakaumaa voidaan tämä massa-arvo muuntaa vuonna 1995 valmistetun auton tyypillisesti sisältämäksi kokonaislämpöenergiamääräksi (Kuva 236a: normaalijakauma, jonka keskiarvo on 10 600 MJ ja keskihajonta 1 100 MJ).
- Joyeuxin kokeissaan polttamien autojen (autotyyppi 3) palamisessa luovuttama läm-pöenergiamäärä oli 6 400–7 000 MJ keskiarvona 6 700 MJ.
- Vertaamalla vuonna 1995 valmistetun auton tyypillisesti sisältämää kokonaislämpö-energiamäärää polttokokeissa vapautuneeseen energiamäärään saadaan tulos, että auto-palossa vapautuu keskimäärin noin 70 % auton kokonaislämpöenergiamäärästä (Kuva-sa 235b esitetty jakauma, jonka keskiarvo on 74 % ja 95 %:n fraktiili 92 %, mikä vastaa varsin edellä Joyeuxin antamien tietojen perusteella esitettyä tulosta 70–90 %).
- Käyttäen em. palossa vapautuvan energian osutta voidaan laatia kuvassa 237 esitetyt arviot eri vuosina valmistettujen autojen palossa vapautuvalle energialle (autotyyppi 3). Jakaumien tunnuslukuja esitetään taulukossa 59.



Kuva 236. a) Vuonna 1995 valmistetun auton sisältämä tyypillinen kokonaislämpö-energiamäärä, b) palamisessa vapautuvan lämpöenergian suhde auton palavien materiaalien sisältämään kokonaislämpöenergiaan.



Kuva 237. a) Vuonna 1995 valmistetun auton (tyypin 3 auto) palossa vapautuvan lämpöenergian jakauma ja tämän suuret arviot koskien vuosia b) 2005, c) 2015 ja 2025.

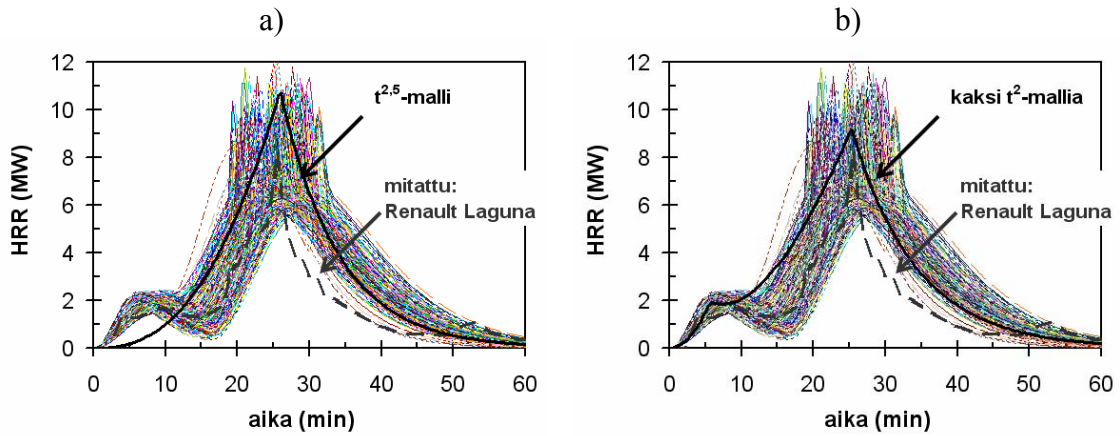
Taulukko 59. Kuvassa 237 esitetyjen jakaumien tunnuslukuja (tyypin 3 auto).

Valmistusvuosi	Keskiarvo (MJ)	Keskihajonta (MJ)	95 %:n fraktiili (MJ)
1995	6 300	1 000	7 900
2005	6 800	1 100	8 600
2015	7 300	1 100	9 200
2025	7 900	1 200	9 900

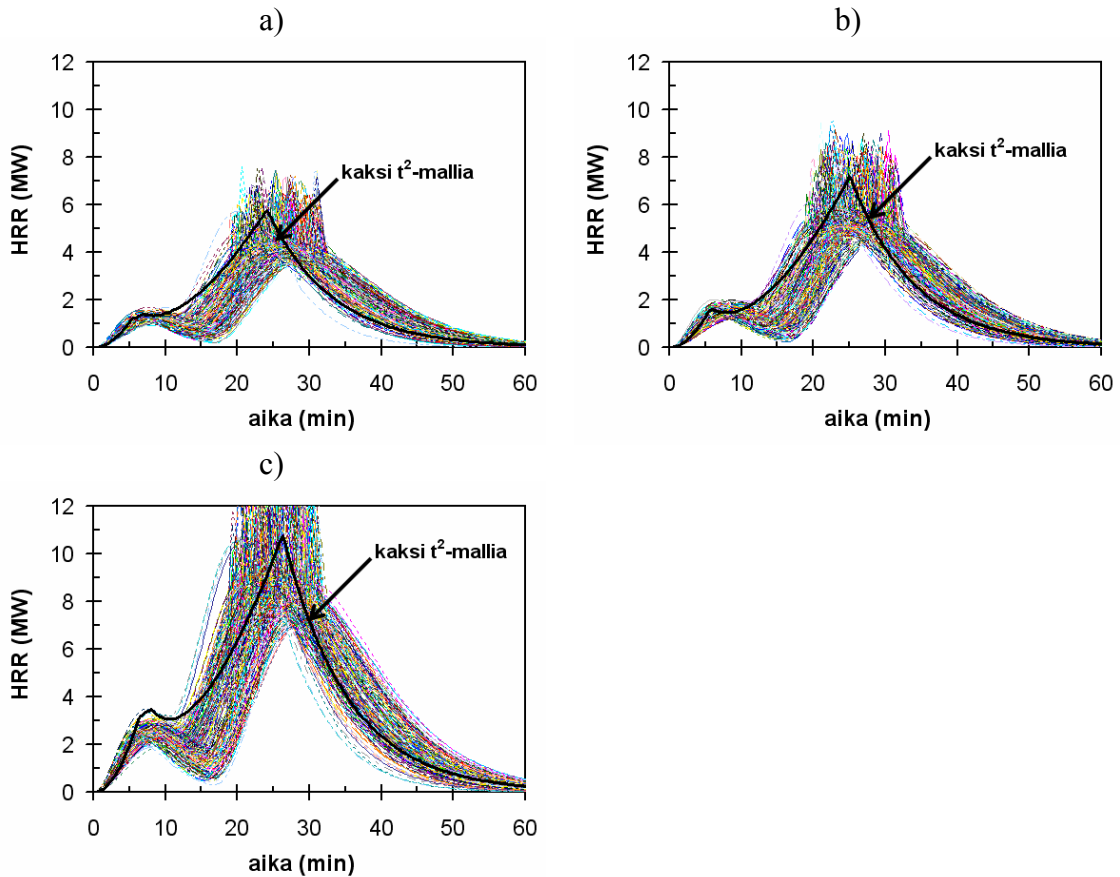
Taulukosta 59 voidaan nähdä, että tyypin 3 autolle turvallisella puolella oleva palotehokäyrä saadaan, kun palossa vapautuvan lämpöenergian määräksi valitaan 10 000 MJ (vaihteluvälinä 80 %:n ja 95 %:n fraktiileja vastaava väli 8 900–10 700 MJ). Muihin luokkiin kuuluvien autojen palamista mallinnetaan niiden energiamäärään perustuen. Taulukosta 56 voimme lukea seuraavat muunnostekijät: suhteessa luokan 3 autoihin luokkaan 1 kuuluvien autojen palon stokastisessa mallissa vapautuvan lämpöenergian määrää skaalataan alaspäin tekijällä 6 000/9 500 arvoon 6 300 MJ, luokkaan 2 kuuluville autoille käytetään skaalaustekijää 7 500/9 500 arvoon 7 900 MJ ja luokkien 4 ja 5 autoille 12 000/9 500 arvoon 12 600 MJ. Monte Carlo -laskentaa soveltaen saadut stokastiset palotehokäyrät erityyppisille henkilöautoille esitetään kuvissa 238 ja 239. Kehitettyä palotehokäyrää käyttäen tehdyn autopalon simuloinnin tulosta havainnollistetaan kuvassa 240.

Kun erityyppisten henkilöautojen mittoina käytetään alla esitettyjä arvoja, niin niiden palokuorman tiheydelle ja yksikköpinta-alaa kohden vapautuvalle paloteholle saadaan kuvissa 241–243 esitetyt jakaumat. Niiden tunnuslukuja ovat:

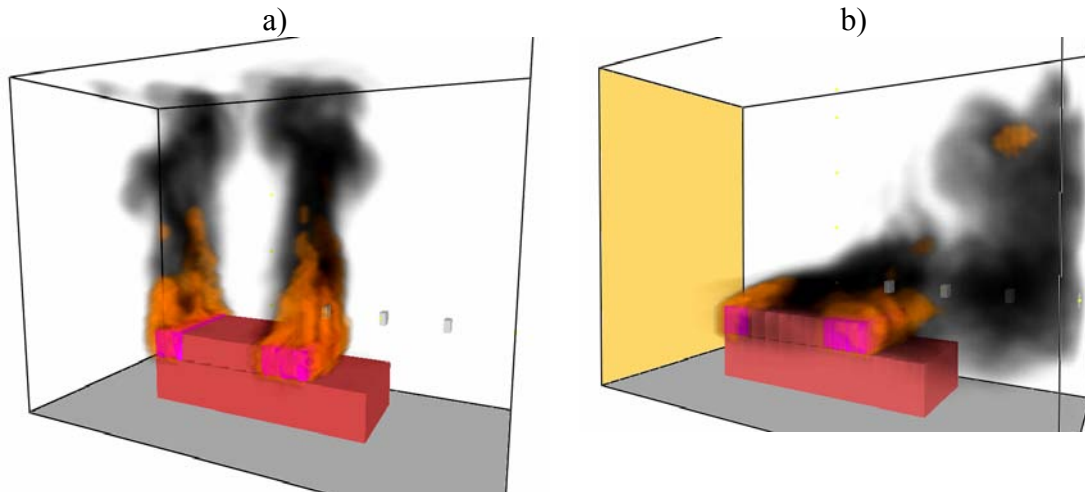
- tyypin 2 auto: leveys 1,65,...,1,75 m ja pituus 3,5,...,4,5 m
 - palokuorma 7 000,..., 8 500 MJ, keskiarvo 7900 MJ (kolmiojakauma),
 - maksimipaloteho 5,8,..., 9,1 MW, keskiarvo 7,4 MW (kolmiojakauma),
 - keskimääräinen palokuorman tiheys = $1\,095\text{ MJ/m}^2$, 95 %:n varmuusväli = 940,..., $1\,330\text{ MJ/m}^2$ (Weibull-jakauma),
 - keskimääräinen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho = 1075 kW/m^2 , 95 %:n varmuusväli = 750,..., $1\,370\text{ kW/m}^2$ (Weibull-jakauma),
- tyypin 3 auto: leveys 1,70,...,1,85 m ja pituus 4,...,5 m
 - palokuorma 8 900,..., 10 700 MJ, keskiarvo 9 800 MJ (kolmiojakauma),
 - maksimipaloteho 7,3,..., 11,8 MW, keskiarvo 9,5 MW (kolmiojakauma),
 - keskimääräinen palokuorman tiheys = $1\,200\text{ MJ/m}^2$, 95 %:n varmuusväli = 1 020,..., $1\,420\text{ MJ/m}^2$ (Weibull-jakauma),
 - keskimääräinen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho = 1200 kW/m^2 , 95 %:n varmuusväli = 800,..., $1\,500\text{ kW/m}^2$ (Weibull-jakauma),
- tyypin 4 tai 5 auto: leveys 1,80,...,2,00 m ja pituus 4,5,...,5,5 m
 - palokuorma 11 200,..., 13 700 MJ, keskiarvo 12 600 MJ (kolmiojakauma),
 - maksimipaloteho 8,1,..., 14,6 MW, keskiarvo 11,4 MW (kolmiojakauma),
 - keskimääräinen palokuorman tiheys = 1760 MJ/m^2 , 95 %:n varmuusväli = 1 455,..., $2\,120\text{ MJ/m}^2$ (Weibull-jakauma),
 - keskimääräinen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho = $1\,700\text{ kW/m}^2$, 95 %:n varmuusväli = 1170,..., $2\,160\text{ kW/m}^2$ (Weibull-jakauma),



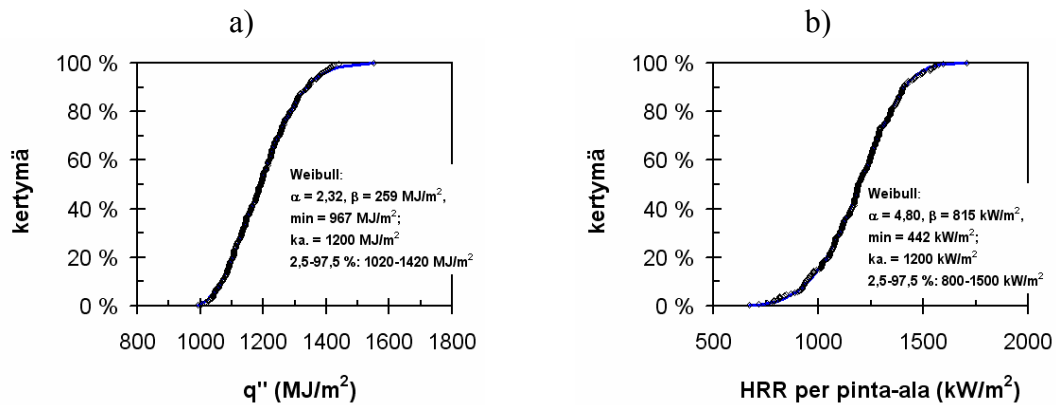
Kuva 238. Erityyppisten henkilöautojen stokastiset palotehokäyrät, tyypin 3 auto:
 a) sovite käyttäen riippuvuuden t^p ($p = 2,5$) mukaisesti kasvavaa funktiomuotoa ja
 b) sovite käyttäen kahden riippuvuuden t^2 mukaisen funktiomuodon summaa.



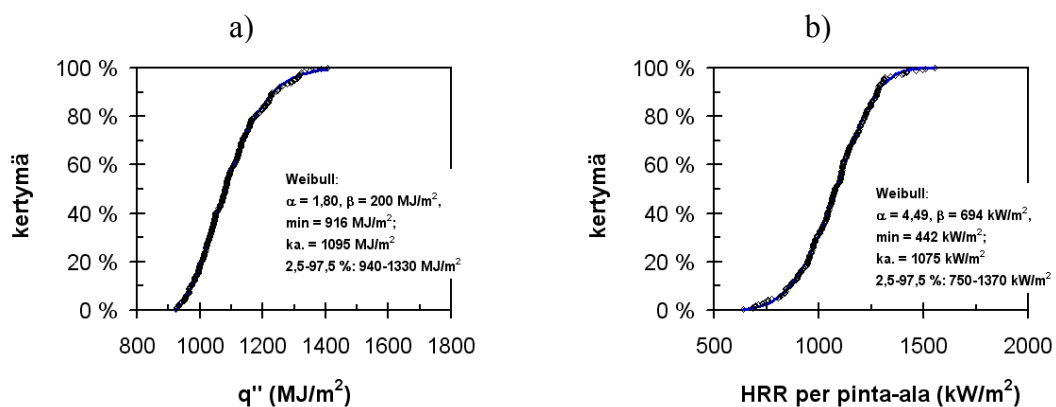
Kuva 239. Erityyppisten henkilöautojen stokastiset palotehokäyrät: a) tyypin 1 auto,
 b) tyypin 2 auto ja c) tyypin 4 ja 5 autot. Sovitteet on laskettu käyttäen kahden
 t^2 -riippuvuuden mukaisen funktiomuodon summaa.



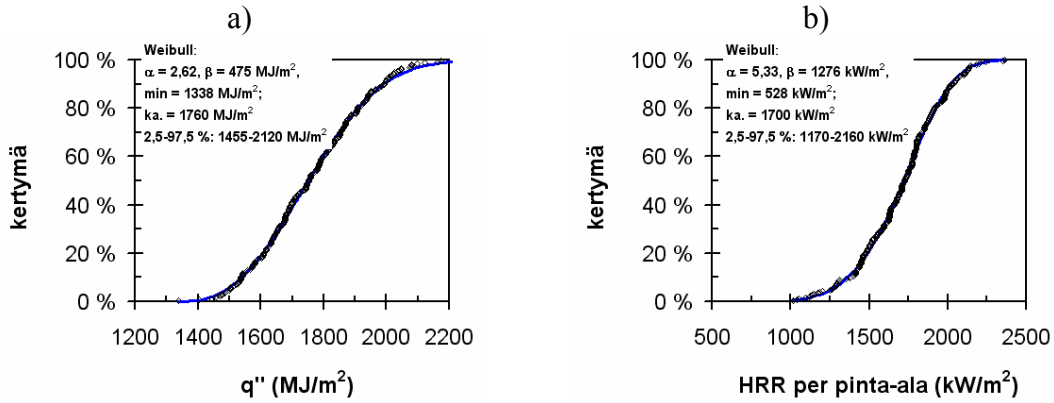
Kuva 240. Tyypillinen henkilöauton palo: a) ei tuulta ja b) tuuli 5 m/s.



Kuva 241. Tyypin 3 henkilöautojen tyypillinen a) palokuorman tiheys ja b) pinta-alayksikköä kohden vapautuva paloteho.



Kuva 242. Tyypin 2 henkilöautojen tyypillinen a) palokuorman tiheys ja b) pinta-alayksikköä kohden vapautuva paloteho.



Kuva 243. Tyyppien 4 ja 5 henkilöautojen tyypillinen a) palokuorman tiheys ja b) pinta-alayksikköä kohden vapautuva paloteho.

Autopalon leviämisestä

Autopalon leviämistä ympäristöönsä voidaan tarkastella ainakin seuraavin tavoin:

- autojen polttokokeista saatujen tulosten perusteella [Joyeux ym. 2001],
- FDS-mallintamisen perusteella,
- käyttämällä tunnettuja analyttisiä malleja tietyn suuruiseen palotehoon liittyvän säteilylle [Beyler 2002, Hietaniemi 2005].

Autojen polttokokeiden tulosten perusteella Joyeux ym. [2001] ovat päätyneet arvioon, että palon leviäminen autosta toiseen kestää 12 minuuttia. Selvää on, että tämä arvo vaihtelee tilanteesta toiseen.

Koska laskennallisista lähestymistavoista FDS-malliin perustuva tulos on selvästi luotettavampi, käytetään tässä työssä vain sitä lähestymistapaa.

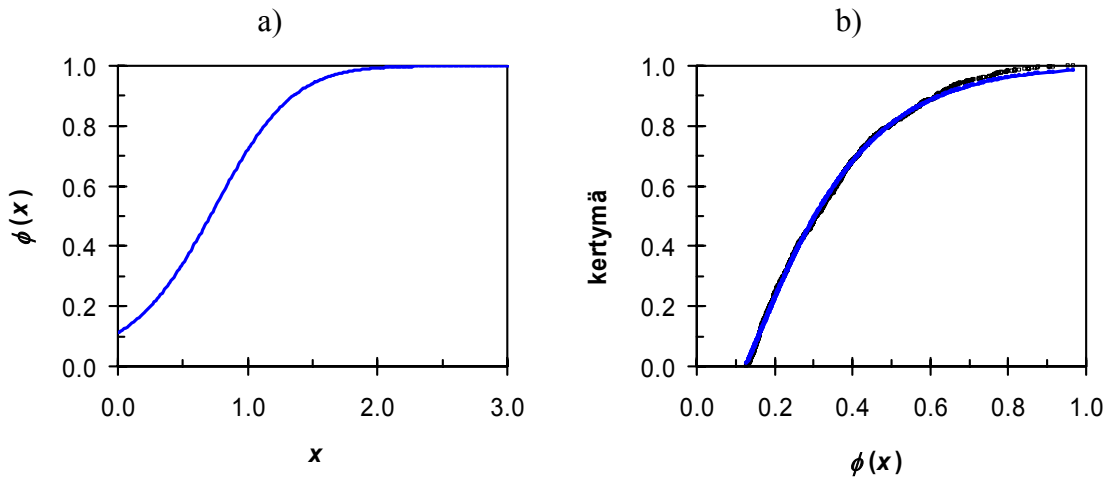
Laskennallisessa lähestymistavassa lasketaan autopalon uhkaamaan kohteeseen kohdistuva lämpövuoto \dot{q}_{car}'' ja arvioidaan sen aiheuttama syttymisvaara. Delichatsios [2005] esittää seuraavan likimääräisen lausekkeen, josta lämpövuonon \dot{q}_{car}'' kuumentaman materiaalin syttymisviive Δt_{ign} voidaan ratkaista

$$\Delta t_{ign} = \left[\frac{\sqrt{\pi} \cdot (T_{ign} - T_0) \sqrt{k \rho C}}{2 \cdot \dot{q}_{car}'' - 0,64 \cdot \dot{q}_{cr}''} \right]^2 \cdot \phi \left(\frac{\delta}{\sqrt{\alpha \cdot \Delta t_{ign}}} \right), \quad (50)$$

missä funktio $\phi(x)$ on määritelty seuraavasti (Kuva 244a)

$$\varphi(x) = \left[\frac{1}{1 + 2\sqrt{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \cdot \operatorname{erfc}(x) \right]} \right]^2. \quad (51)$$

Tässä δ , k , ρ ja C ovat uhatun materiaalin paksuus, lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpö, T_{ign} on lämpötila, jossa materiaali syttyy ja \dot{q}_{cr}'' on syttymiseen vaadittava (kriittinen) lämpövuon arvo. Lämpötila T_0 on materiaalin alkulämpötila, α on lämpötilan johtavuus, $\alpha = k/(\rho C)$, ja $\operatorname{erfc}(x)$ on error-funktion komplementtifunktio.



Kuva 244. a) Funktio $\phi(x)$ ja b) sen vaihtelevuus kertymäfunktiona esitettynä tyypillisillä parametrialvoilla.

Ympäristössämme olevien syttyvien aineiden lämmöntilan johtavuus α on tyypillisesti suuruusluokkaa $1\text{--}3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, ainekerroksien paksuus δ on tyypillisesti suuruusluokkaa $10^{-3}\text{--}10^{-2} \text{ m}$. Joyeuxin ym. [2001] havaitseman noin 12 minuutin pituista syttymisaian perusteella voimme arvioida *a priori* että syttymisaika t_{ign} on suuruusluokkaa 5–20 minuuttia. Kun annamme funktion $\phi(\delta/\sqrt{\alpha t_{\text{ign}}})$ argumenttien vaihdella satunnaisesti em. rajoissa, havaitsemme, että funktio vaihtelee välillä $\sim 0,1\text{--}1,0$ (Kuva). jatkossa korvaammekin funktion $\phi(\delta/\sqrt{\alpha t_{\text{ign}}})$ satunnaismuuttujalla $\hat{\phi}$, jonka arvo vaihtelee kuvassa Kuva b esitetyllä tavalla:

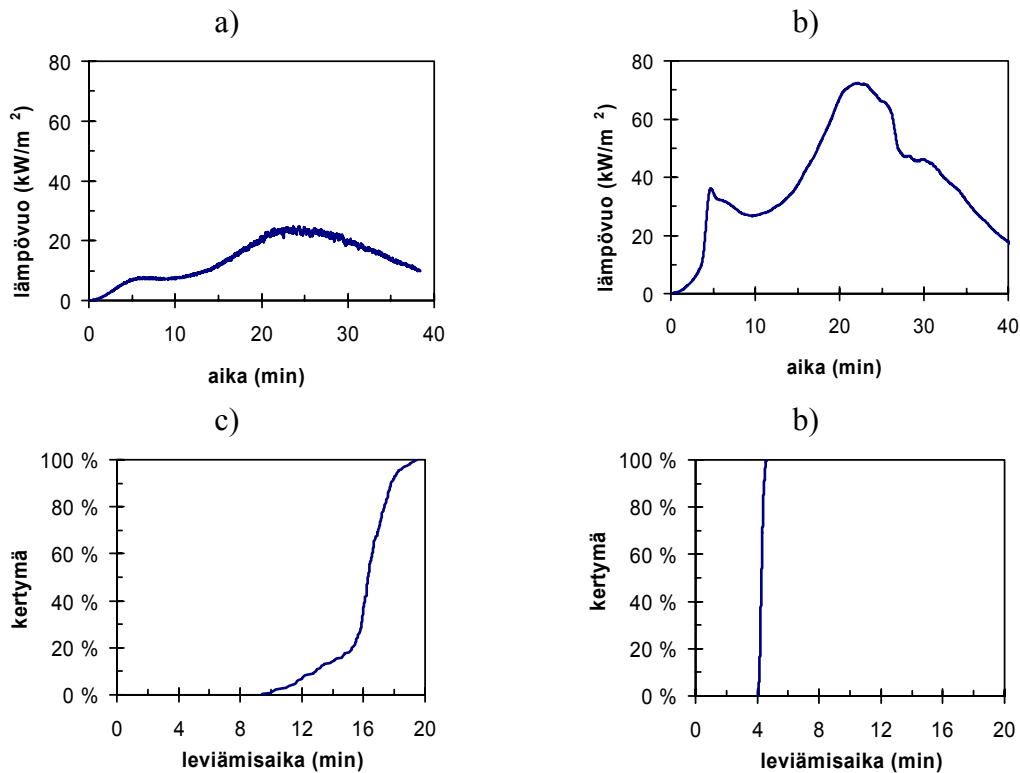
$$\Delta t_{\text{ign}} = \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{(T_{\text{ign}} - T_0) \sqrt{k \rho C}}{\dot{q}_{car}'' - 0,64 \cdot \dot{q}_{cr}''} \right]^2 \cdot \hat{\phi} = \frac{TRP^2}{(\dot{q}_{car}'' - 0,64 \cdot \dot{q}_{cr}'')^2} \cdot \hat{\phi}, \quad (52)$$

missä tavalliseen tapaan [Tewarson 2002] on määritelty materiaalin lämpövasteparametri TRP (Thermal Response Parameter) syttymislämpötilan ja materiaalin lämpötunkeutumiskertoimen $\sqrt{k\rho C}$ avulla

$$TRP = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (T_{ign} - T_0) \sqrt{k\rho C}. \quad (53)$$

Ismat ym. [1998] ovat määrittäneet lämpövasteparametrin arvon $TRP = 93 \text{ kW s}^{1/2} \text{ m}^{-2}$ henkilöautoissa varsin tavalliselle polypropeenimuoville. Heidän tuloksistaan voidaan arvioida ko. suureen hajonnan olevan noin 7 %, joten vaihtelun sisältävä arvio TRP -parametrille on $TRP = (93 \pm 6) \text{ kW s}^{1/2} \text{ m}^{-2}$. Samassa tutkimuksessa on määritetty myös syttymiseen vaadittavan lämpövuon arvo $\dot{q}_{cr}'' = (10 \pm 2) \text{ kW m}^{-2}$, missä vaihteluväli on jälleen tässä työssä Ismatin ym. [1998] tuloksien perusteella määritetty hajonta-arvio.

Arviot autopalon leviämisajalle vieressä olevaan autoon esitetään kuvissa 245c ja 245d. laskennan perustana olevat lämpövuokäyrät esitetään kuvissa 245a ja 245b. Nähdään, että katos kiihdyttää palon leviämistä merkittävästi: katoksessa oleville autoille leviämisaika on vain noin 4–5 minuuttia, mutta katoksen ulkopuolella oleville autoille noin 10–20 minuuttia (odotusarvo noin 16 minuuttia).



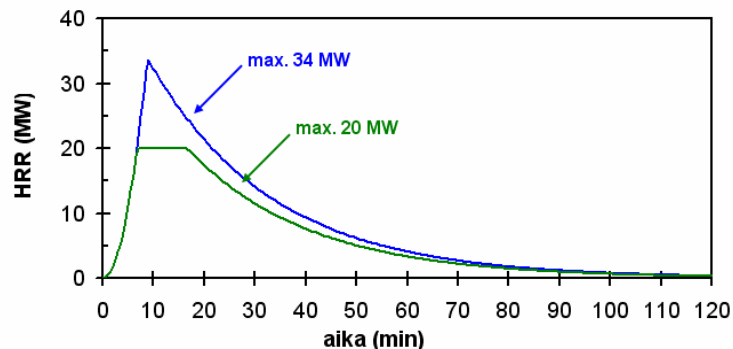
Kuva 245. Autopalon ympäristöönsä kohdistama lämpösäteily, kun a) auto palaa vapaasti ja b) kun auto palaa katoksessa sekä vastaavat autopalon leviämisaajat vieressä olevaan autoon: c) autot ovat ilman katosta ja d) autot ovat katoksessa.

Ajoneuvopalojen yleistetty laskentamalli

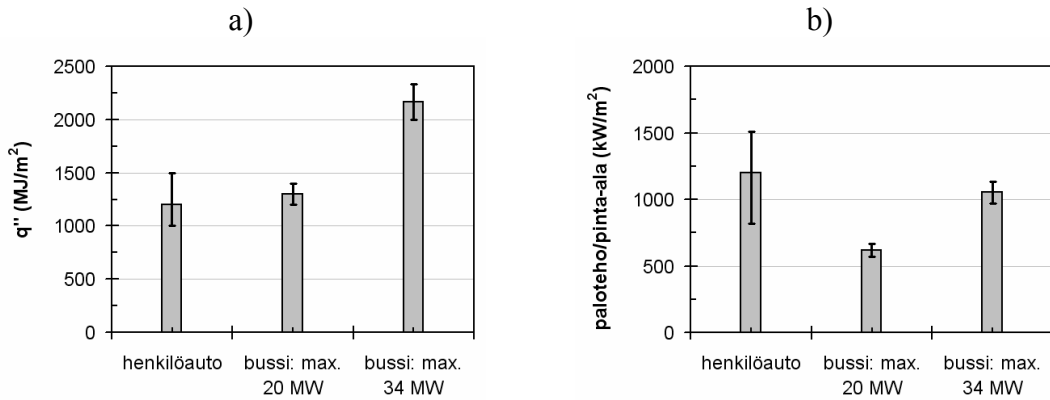
Bussien paloissa maksimipaloteho vaihtelee noin 20 MW:sta 34 MW:iin (Kuva) [Ingason 2001, Ingason 2004, Pålsson 2004]. Vastaavat palossa vapautuvat lämpöenergiämäärät ovat 40 000 MJ ja 70 000 MJ. Jos bussin mitoituksi oletetaan leveys 2,5 m ja pituus 14 m, niin edellä esitettyjä arvoja vastaavat seuraavat suureet:

- palokuorman tiheys 1 200,...,1 400 MJ/m² ja yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho 570,..., 670 kW/m² (bussi, jonka max. paloteho on 20 MW);
- palokuorman tiheys 2 000,...,2 300 MJ/m² ja yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho 970,..., 1 130 kW/m² (bussi, jonka max. paloteho on 34 MW).

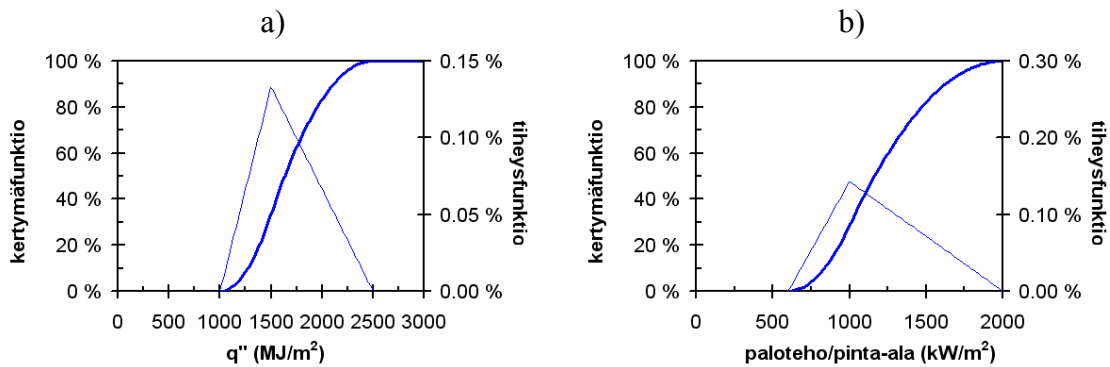
Kun näiden tietojen lisäksi otetaan huomioon edellä esitetyt henkilöautoja koskevat tiedot, saadaan ajoneuvojen palamista kuvaaville suureille kuvassa 247 esitetyt tulokset. Nämä tiedot muodostavat perustan asiantuntija-arviolle ja siksi niiden tilastollista luonnetta voidaan luonnehtia kolmiojakaumalla. Kolmiojakaumien parametrit esitetään taulukossa 60.



Kuva 246. Bussien palotehon kuvaajia lähteiden [Ingason 2001, Ingason 2004, Pålsson 2004] mukaan.



Kuva 247. Ajoneuvojen palamista kuvaavia suureita: a) palokuorman tiheys ajoneuvon vaakasuuntaisen leikkauksen pinta-alaa kohden ja b) vaakasuuntaisen leikkauksen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho.



Kuva 248. Ajoneuvojen palamista kuvaavien suureiden jakaumat: a) palokuorman tiheys ajoneuvon vaakasuuntaisen leikkauksen pinta-alaa kohden ja b) vaakasuuntaisen leikkauksen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho.

Taulukko 60. Ajoneuvojen palamista kuvaavien suureiden kolmiojakaumien parametrit.

Palokuorman tiheys ajoneuvon vaakasuuntaisen leikkauksen pinta-alaa kohden		Vaakasuuntaisen leikkauksen yksikköpinta-alaa kohden vapautuva paloteho	
a	1 000 MJ/m ²	a	600 kW/m ²
b	1 500 MJ/m ²	b	1 000 kW/m ²
c	2 500 MJ/m ²	c	2 000 kW/m ²

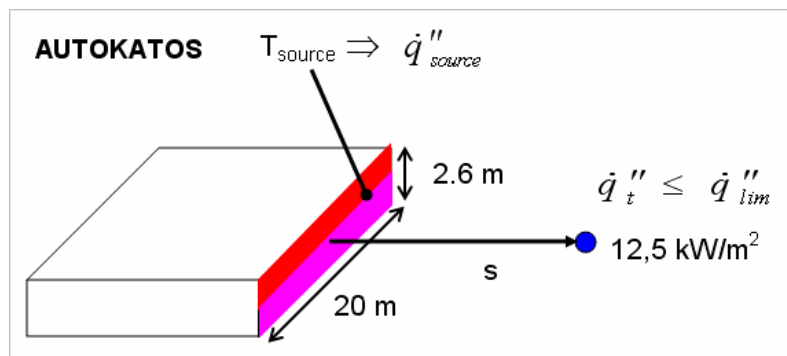
Autokatoksen palon synnyttämä lämpösäteilyn laskennasta

Autokatoksen palossa palon puolelle katoksen pinnan normaaliin suuntaan kohdistuvan lämpösäteilyn $\dot{q}''_{t\text{arg et}}$ kaskenta on periaatteessa eräs yksikertaisimpia paloteknisiä arvi-

ointitapauksia. Kun tunnetaan ”palon lämpötila” T_{source} , on säteilyn lähde-termi $\dot{q}_s'' = \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot T_{source}^4 \approx \sigma \cdot T_{source}^4$, koska liekki-emissiviteeteille voidaan yläraja-arvioina käyttää arvoa 1. Suure \dot{q}_{target}'' riippuu säteilijän ja säteilyä asvtaanottavan pinnan keskinäisestä asemasta, joka voidaan laskea käyttäen näkyvyystekijää Φ , joka tässä tapauksessa riippuu vain säteilevän pinnan koosta (korkeus H ja leveys W) ja sen etäisyydestä tarkastelupisteestä (s):

$$\dot{q}_{target}'' = \varepsilon_{target} \cdot \Phi(H, W, s) \cdot \dot{q}_s'' \approx \Phi(H, W, s) \cdot \sigma \cdot T_{source}^4, \quad (54)$$

kun jälleen asetetaan sekä kohteen että säteilijän emissiviteetit ykkösiksi. Turvallinen eäisyys määritetään säätämällä etäisyys s site, että laskettu \dot{q}_{target}'' alittaa asetetun kriteerion, esim. $12,5 \text{ kW/m}^2$. Tilannetta havainnollistetaan kuvassa 249.



Kuva 249. Autokatoksen palon synnyttämän lämpösäteilyn ja tähän uhkaan liittyvän turvallisen etäisyyden laskennan asetelma.

Vaikka tilanne on periaatteessa suoraviivainen ja yksikertainen, menettelyn soveltaminen käytännön laskuissa ei sitä ole, koska saatava tulos määräytyy ”palon lämpötilasta” tehtävien oletusten perusteella. Oikeasti palon lämpötila on ajasta ja paikasta riippuva lämpökenttä, jonka suuruus vaihtelee etenkin pystysuunnassa palon ”alaosan” suhteellisen alhaisista lämpötiloista palon ”yläosan” korkeisiin lämpötiloihin.

Yksinkertaisissa, palotieteiden ja -tekniikan alkuhistoriaan liittyvissä lähestymistavoissa on erinteisesti on tehty seuraavat oletukset:

- koko seinä on samassa lämpötilassa (mikä tekee edustvan lämpötila-arvon valinnan erityisen haastavaksi tehtäväksi)
- seinän lämpötila valitaan joko jonkin standardin ISO 843 mukaisen lämpötilakehityksen arvon mukaisesti, esim. 60 minuutin ISO 843 -arvo, joka on 945 °C tai 120 minuutin arvo, on 1050 °C tai antamalla sille asiantuntija-arvioon perustuva arvo, esim. 1200 °C .

Tällä tavalla määritettävät turvalliset etäisyydet kuvassa 249 esitettävässä tapauksessa ovat

- 10,4 m, jos käytetään 60 minuutin ISO 843 -arvoa,
- 13,0 m, jos käytetään 120 minuutin ISO 843 -arvoa,
- 17,0 m, jos käytetään lämpötila-arvoa 1 200 °C.

Jos halpaa tonttimaata olisi käytettävissä yllin kyllin, tämä laskennan epämääräisyys ei aiheuttaisi ongelmia: valitaan turvalliselle etäisyydelle suurin laskettu arvo 17 m. Tiiviissä ja matalassa rakentamisessa tonttimaata on kallista ja ylikonservatiiviset turvallisuusetäisyyden arviot maksavat selvää rahaa. Jos valitaan turvaeäisyydeksi 17 m joka suuntaan, autokatos suoja-alueineen vie noin 2 100 m² ja jos turvaeäisyys otetaan vain eteen ja sivulle, autokatos suoja-alueineen vie noin 1 200 m². Jos valitaan turvaeäisyydeksi 10 m, nämä pinta-alat puolittuvat, eli jos turvaeäisyys otetaan kaikkiin suuntiin, autokatos suoja-alueineen vie noin 1 000 m² jos turvaeäisyys otetaan vain eteen ja sivulle, autokatos suoja-alueineen vie noin 600 m². Jos maan hinta arvioidaan vain tonttimaana (esim. Espoossa noin 200 euroa per neliometri) ottamatta huomioon tälle maalle mahdollisesti rakennettavien talojen hintaa Laskennan epätarkkuuden hinta on siis suuruusluokkaa (600, ..., 1 100) m² × 200 €/m² ~ 100 000, ..., 200 000 €¹¹. Tarkempi laskenta siis kannattaa.

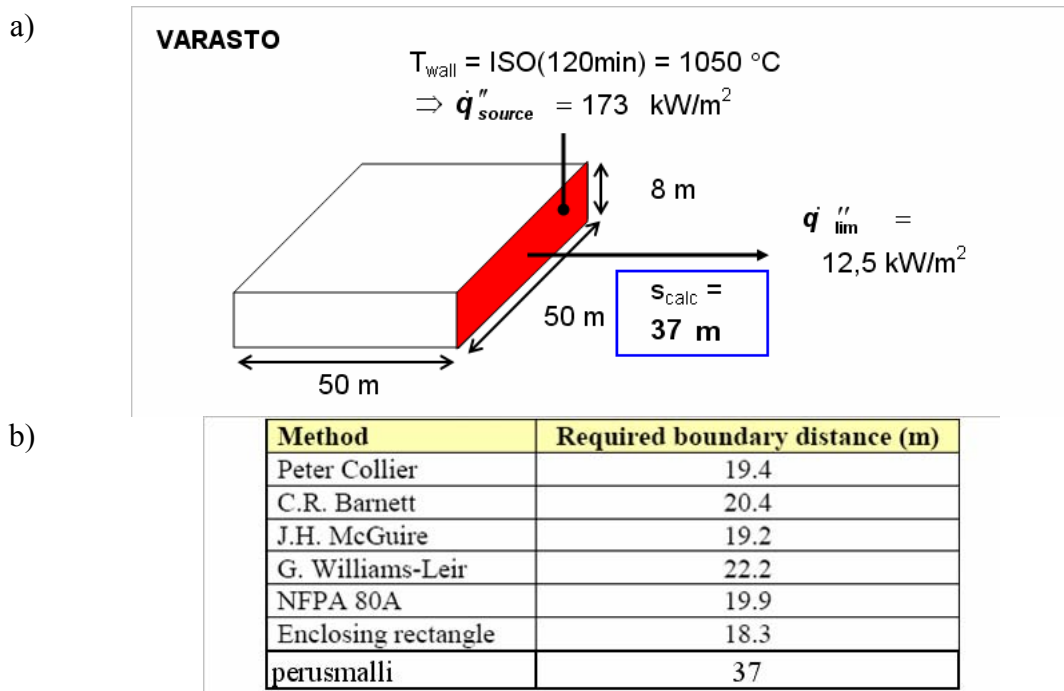
Toinen seikka, joka voimakkaasti tarkemman laskennan etujen puolesta on se, että eri maissa on olemassa erilaisia turvallisen etäisyyden laskentamenetelmiä, joissa laskennan fysiikka on täsmälleen edellä kuvatun kaltainen, mutta **laskentaan on sisällytetty erilaisia laskettua arvoa pienentäviä tekijöitä yksinkertaisesti sen takia, että edellä esitetyillä oletuksilla saatavat turvaeäisyydet ovat niin pitkiä, että niiden toteuttaminen on käytännössä hyvin vaikeaa**. Tällaisia menetelmiä ovat mm.

- “Enclosing rectangle method” [Fire Research Station 1991], joka perustuu Margater Law’n vuonna 1963 esittämään malliin [Law 1963].
- Collierin menetelmä [ks. esim. Clarke 1998],
- Barnett’n menetelmä [Barnett 1988],
- Williams-Leir’n menetelmä [Williams-Leir 1970],
- McGuiren menetelmä [McGuire 1965],
- NFPA 80A -menetelmä [NFPA 1996].

¹¹ Enemmän kuin koko tämän hankkeen hinta!

Carlsson [1999] vertailee näiden eri menetelmien antamia tuloksia varastorakenukselle, joka korkeus on 8 m ja pohjan pinta-ala $50 \times 50 \text{ m}^2$ (Kuva 250a). Kun yllä kuvattu laskentatapa, jossa koko seinän oletetaan tuottavan lämpöä tasaisesti seinälämpötilan ollessa 1050 °C (kaksi tuntia ISO 834 -paloa), antaa laskenta turvaetäisyydelle vaatimuksen 37 m. Yllä esitettyjä menettelytapoja käyttäen tämä vaatimus putoaa noin puoleen (välillä 18–22 m, kuva 250b).

Tässä työssä ei käytetä mitään edellä esitetystä lähestymistavoista, vaan niiden sijasta käytetään tarkempaa palonsimuloinnilla määritettyyn lämpötilakenttään perustuvaa fyysikaalista laskentaa.



Kuva 250. Carlssonin [1999] esittämä eri turvaetäisyyden laskentamenetelmien vertailutapa.

Liitteen D lähdeluettelo

AKE. 2005. AKE Tietopalvelu. Tilastot – Ajoneuvotilastot. Helsinki: Ajoneuvohallintokeskus. [viitattu 23.8.2005]. Saatavissa: <http://tietopalvelu.ake.fi>.

Anon. 2005. ECRIS – a research project in environmental car recycling 1994–1998. REPORT NO. 98:17.

Barnett, C. R. 1988. Fire Separation between External Walls of Buildings, Fire Safety Science, Proceedings of the 2nd International Symposium. S. 841–850.

Beyler, C. L. 2002. Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires. In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-268–3-314. ISBN 087765-451-4.

Carlsson, E. 1999. External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research. Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University. Report 5051. ISSN: 1402-3504 ISRN: LUTVDG/TVBB—5051--SE

CEN 2002. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1–2: General Actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN. 59 s. (EN 1991-1-2:2002 E.)

Clarke, J. M. W. 1998. A review of the building separation requirements of the New Zealand Building Code Acceptable Solutions. University of Canterbury, Christchurch.

Delichatsios, M. A. 2005. Piloted ignition times, critical heat fluxes and mass loss rates at reduced oxygen atmospheres. Fire Safety Journal, Vol. 40, s. 197–212.

Fire Research Station. 1991. External Fire Spread: Building separation and boundary distances. Ed. by Read R.E.H., Building Research Establishment Report BR 187, Borehamwood.

Hietaniemi, J. 2005. Mallintaminen ja sen käyttö palotekniikassa. Palontorjuntatekniikan erikoisnumero, s. 47–51.

Ingason, H. 2001. Tunnelkonferensen 2001 – Nordisk sikkerhetskonferanse for underjordiske anlegg. Varfor får ulykkene så katastrofale følger? [Online]. Available: <http://www.sp.se/fire/Nyheter/PPresentation-TunnelkOsloAug2001-filer/frame.htm>. [2003, July 25]

Ingason, H. 2004. Fire Dynamics in Tunnels. Chapter 13. Fire Safety Handbook, Heriot-Watt University.

Ismat, A.-I. A., Cummings, D. R., LaDue, D. E. & Tewarson, A. 1998. Thermal properties and flammability behavior of automotive polymers. West Gloucester, R.I., USA: Factory Mutual Research. Paper Number 98-S4-P-17. 9 s.

Joyeux, D., Kruppa, J., Cajot, L.-G., Schleich, J.-B., van de Leur, P. & Twilt, L. 2001. Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings. Saint-Remy-Les-Chevreuse Cedex, France: CTICM. Final Report. ECSC Contract nro. 7215 PP 025. 156 s. + liitt. 11 s.

Law, M. 1963. Heat radiation from fires and building separation, Fire Research Technical Paper No. 5, Joint Fire Research Organization.

Lyon, R. E., Speitel, L., Walters, R. N. & Crowley, S. 2003. Fire-resistant elastomers. *Fire and Materials*, Vol. 27, s. 195–208.

Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1994a. Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part 1. Car fire experiments. *Fire Safety Journal*, Vol. 23, s.17–35.

Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1994b. Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part 2. Parametrization of measured rate of heat release curves. *Fire Safety Journal*, Vol. 23, s. 37–49. ISBN 951-38-6273-9; 951-38-6274-7.

Mangs, J. 2004. On the fire dynamics of vehicles and electrical equipment. Espoo: VTT. 62 s. + liitt. 99 s. (VTT Publications 521.)

McGuire, J H. 1965 Fire and the Spatial Separation of Buildings, *Fire Technology*, Vol. 1, No. 4.

NFPA 1996. NFPA 80A Recommended Practice for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures. Quincy, MA: National Fire Protection Association.

Pálsson, G. I. 2004. Risk Management in Hvalfjörður Tunnel. Lund: Lund University. Report 5136. 134 s. ISSN: 1402-3504, ISRN: LUTVDG/TVBB--5136-SE

Rossi, M., Griffith, C., Gearhart, J. & Juska, C. 2005. Moving Towards Sustainable Plastic: A Report Card on the Six Leading Automakers. USA, MI: Ecology Center. 56 s.

Steinert, C. 2000. Experimentelle Untersuchungen zum Abbrand- und Feuerübersprungsverhalten von Personenkraftwagen. [Experimental Investigation of Burning and Fire Jumping Behavior of Automobiles.] *VFDB*, Vol. 49, No. 4, s. 163–172.

Tewarson, A. 2002. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. In: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-82–3-161. ISBN 087765-451-4.

Tewarson, A. 2005. Thermophysical and Fire Properties of Automobile Plastic Parts and Engine Compartment Fluids. TECHNICAL REPORT #0003018009, VOLUME III. FM Global. (Project ID 0003018009-3)

Walters R. N., Hackett, S. M. & Lyon, R. E. 2000. Heats of Combustion of High Temperature Polymers. *Fire and Materials*, Vol. 24, s. 245–252.

Williams-Leir, G. 1970. Another Approximation for Spatial Separation, *Fire Technology*, Vol. 6, No. 3.

Liite E: Palon lieskahtamismahdollisuudesta

Suljetussa tilassa palo voi kehittyä lieskahtamisen kautta täyden palon vaiheeseen, jossa oleellisesti kaikki tilan palokurma osallistuu paloon. Lieskahtamiseen kehittyvässä palossa tilan yläosaan muodostuu yleensä kuuma savuinen kerros, jonka synnyttämä lämpösäteily on merkittävä tekijä lieskahduksen tapahtumisessa (Kuva). Mitä kuumempi ja paksumpi tämä kerros on, sitä todennäköisempää lieskahtaminen on.

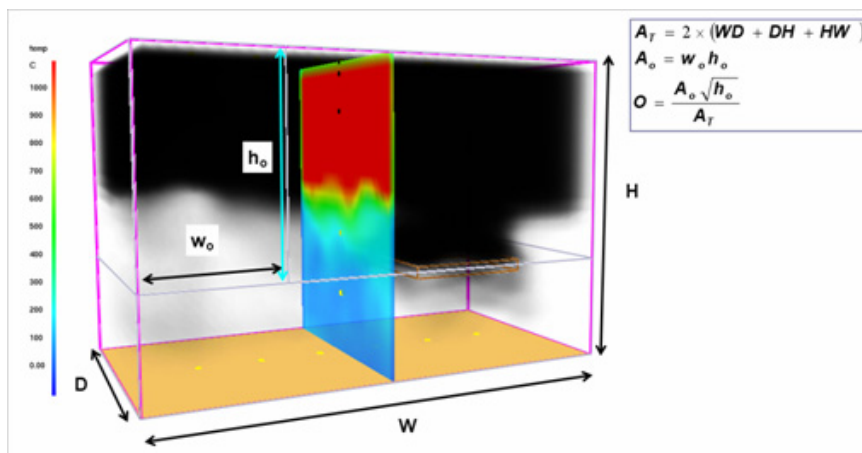
Paksun kuuman kerroksen muodostuminen on sitä tehokkaampaa, mitä suljetumpi tila on. Tilan umpinaisuutta voidaan kuvata sen aukkotekijällä

$$O = \frac{A_T}{A_o \sqrt{h_o}}, \quad (55)$$

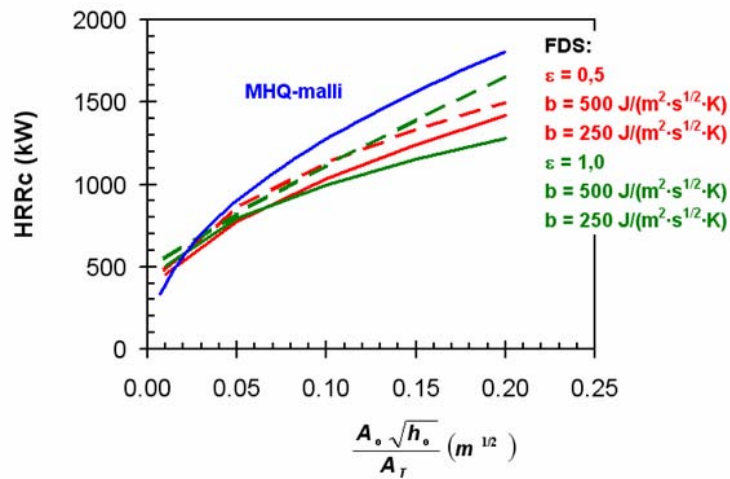
missä A_T on tilan reunojen kokonaispinta-ala [m^2], A_o on aukkojen pinta-ala [m^2] ja h_o niiden korkeus [m]. Tilan kuumentamiseen vaikuttavat myös sen reunojen lämpötekniset ominaisuudet eli emissiviteetti ja lämpöhitaus

$$b = \sqrt{\rho k c}, \quad (56)$$

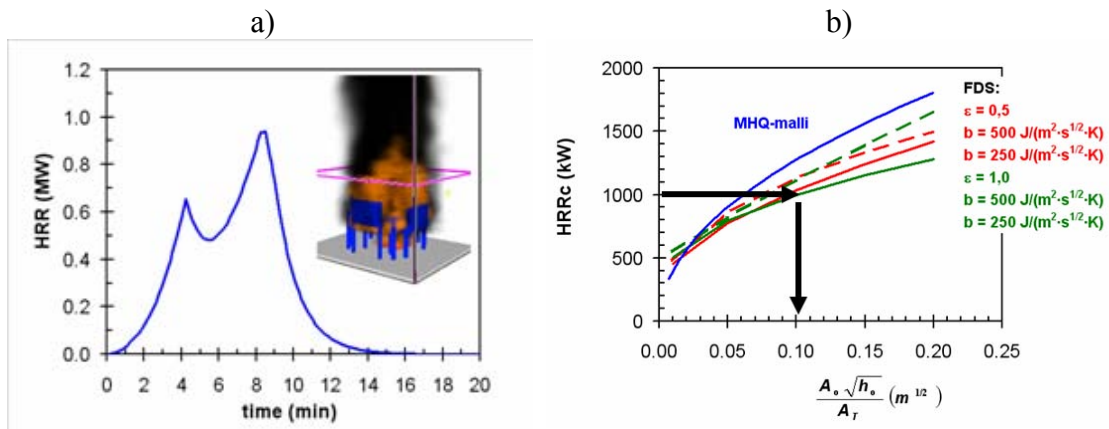
missä ρ on reunamateriaalien tiheys [kg/m^3], k lämmönjohtavuus [$\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$] ja c ominaislämpö [$\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$]. Luonnollisesti alkupalon paloteho lopulta määrää, lieskahtaako tila vai ei. Näiden eri tekijöiden riippuvuutta tarkastellaan kuvassa 252. Esimerkki lieskahduksen mahdollisuuden arvioinnista esitetään kuvassa 252.



Kuva 251. Suljetun tilan palon havainnollistus.



Kuva 252. Lieskahdukseen vaadittavan palotehon (HRR_c) riippuvuus aukkotekijästä vastaten eri reunamateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia.



Kuva 253. Esimerkki lieskahduksen mahdollisuuden arvioinnista:
a) puutarhakalusteryhmä, joka synnyttää suurimmillaan noin 1 megawatin palotehon ja b) lieskahduksen mahdollistavan aukkotekijän määrittäminen; tässä tila ei lieskahda, jos aukkotekijä on suurempi kuin $0,1 \text{ m}^{1/2}$.

Liite F: Uhkakuvien esiintymis- todennäköisyyksien arviointi

Käytetty tilastoaineisto

Uhkakuvien esiintymistodennäköisyydet arvioitiin onnettomuustietokanta Prontoon kirjautuneiden asuinrakennuspaloaaineistoon pohjautuen. Asuinrakennuspalohavainnot vuosilta 1996–2004 sisältänyt aineisto poimittiin Prontosta 9.1.2006.

Tulipalot rivi- ja ketjutaloissa

Käytetty tilastoaineisto kattoi tulipalot erillisissä pientaloissa, rivi- ja ketjutaloissa sekä asuinkerrostaloissa. Näistä rivi- ja ketjutalojen katsottiin edustavan parhaiten tässä raportissa tarkasteltavaa rakennustyyppiä.

Rivi- ja ketjutaloissa syttyi yhteensä 1 240 tulipaloa vuosina 1996–2004 eli keskimäärin 138 tulipaloa vuosittain. Näistä noin 10% syttyi rakennuksen ulkopuolelta.

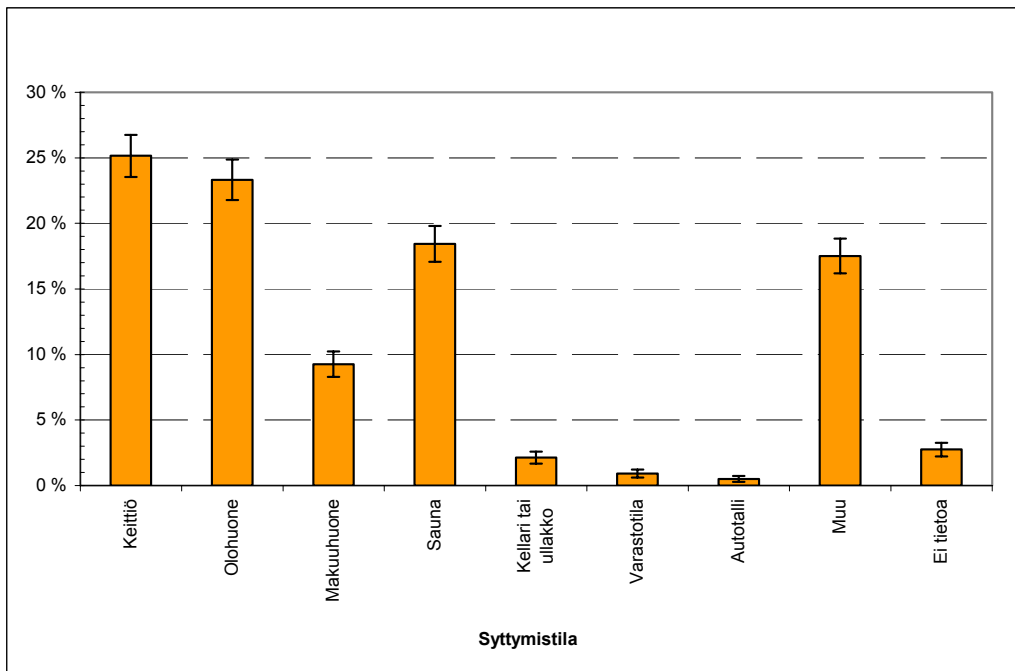
Syttymistäajuustiheys, joka kuvaa syttymien lukumäärää vuodessa kerrosneliometriä kohden oli rivi- ja ketjutaloissa vuosina 1996–2001 $f^n = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (Tillander 2004)[†]. Taulukossa 61 on esitetty päivitetty syttymistäajuuden arvo kerrosneliometriä, rakennusta sekä asuntoa kohden, kun mukana ovat rivi- ja ketjutalopalot vuosilta 1996–2004 sekä rakennus- ja asuntokantatiedot vuodelta 2004 (Tilastokeskus 2004a, 2004b). Kuten taulukosta 61 nähdään, päivitetyllä aineistolla määritetty syttymistäajuustiheyden arvo on samalla tasolla kuin aiemmin.

Taulukko 61. Syttymistäajuudet rivi- ja ketjutaloissa perustuen Pronto-aineistoon vuosilta 1996–2004.

Syttymistäajuus	
kerrosneliometriä kohden	$5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$
rakennusta kohden	0.002 per rakennus ja vuosi
asuntoa kohden	$4 \cdot 10^{-4}$ per asunto ja vuosi

[†] Syttymistäajuustiheyden yksikkö $\text{m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ tarkoittaa "neliometriä ja vuotta kohden". Pieni *a* on latinan sanasta "annus" johdettu vuoden SI-yksikköjärjestelmän mukainen lyhenne.

Onnettomustietokanta Prontossa esitetty arvio rivi- ja ketjupalopalojen syttymistilasta on esitetty kuvassa 254. Syttymistilatietoa ei ollut merkitty vuoden 2004 tietoihin lainkaan, jonka vuoksi havaintojoukossa olivat mukana rakennuksen sisäpuoliset syttymät (N=982) vuosilta 1996–2003. Kuten kuva 254 osoittaa, 25 % sisäpuolisista syttymistä sai alkunsa keittiöstä, 23 % olohuoneesta ja 9 % makuuhuoneesta.



Kuva 254. Syttymistila rakennuksen sisältä syttyneissä rivi- ja ketjupalaloissa vuosina 1996–2003 (N = 982) perustuen onnettomuustietokanta Pronton tietoihin. Vuoden 2004 tietoihin syttymistilaa ei ollut merkitty, jonka vuoksi vuoden 2004 havainnot jätettiin tässä tarkastelun ulkopuolelle.

Taulukossa 62 on esitetty Pronto-aineiston (1996–2004) perusteella määritetyt syttymien keskimääräiset lukumäärät vuosittain. Kaikkien syttymien lukumäärä rivi- ja ketjupalloissa oli tarkasteluajanjaksolla keskimäärin 138 kpl vuodessa. Näistä syttymistä 10 % (N=14 kpl/a) oli ulkoisia ja 90 % (N=124 kpl/a) sisäpuolisia syttymiä. Sisäpuolisista syttymistä 25 % (N=31 kpl/a) oli arvioitu alkaneen keittiöstä 23 % (N=29 kpl/a) olohuoneesta ja 9 % (N=11 kpl/a) makuuhuoneesta.

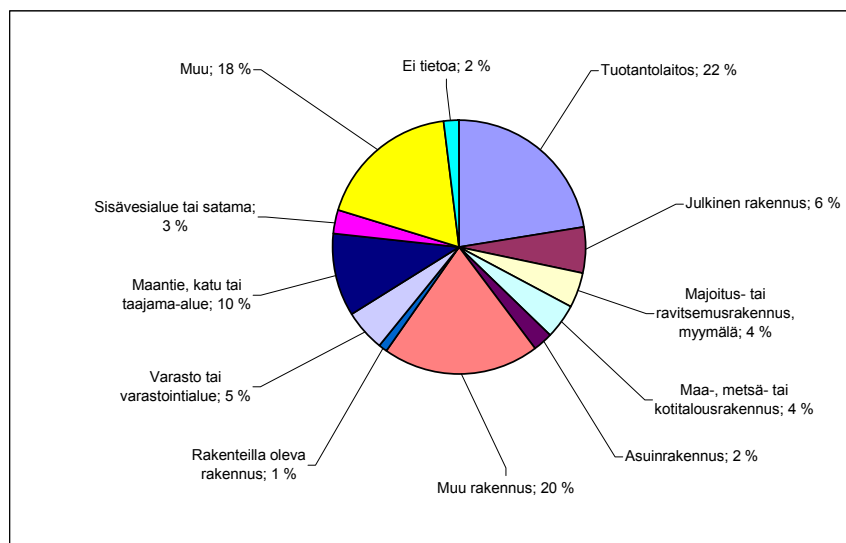
Taulukko 62. Syttymien keskimääräinen esiintyminen vuosittain perustuen Pronto-aineistoon vuosilta 1996–2004.

Keskimääräinen vuosittainen syttymistiheys	
Kaikki syttymät	0.0020 per rakennus ja vuosi
- Ulkoiset syttymät	0.0002 per rakennus ja vuosi
- Sisäpuoliset syttymät	0.0018 per rakennus ja vuosi 3 · 10 ⁻⁴ per asunto ja vuosi
keittiö	9 · 10 ⁻⁵ per asunto ja vuosi
olohuone	8 · 10 ⁻⁵ per asunto ja vuosi
makuuhuone	3 · 10 ⁻⁵ per asunto ja vuosi

Räjähdykset

Vuosilta 1996–2004 Prontoon oli kirjautunut yhteensä 201 räjähdystä eli keskimäärin 22 räjähdystä vuosittain. Räjähdyksen aiheuttaja oli jätetty merkkäämatta tai arvioitu tuntemattomaksi 84 % tapauksista. Syynä 5 %:ssa (N=10) räjähdyksistä arvioitiin olevan ihmisen toiminta, 4 %:ssa koneen tai laitteen vika (N=9) tai palovaarallinen aine (N=8).

Kuvassa 255 on esitetty Protossa esitetty arvio vuosina 1996–2004 tapahtuneiden räjähdysvahinkojen tapahtumapaikasta. Tämän tarkastelun kannalta olennaisiksi oletettiin asuinrakennuksissa, rakenteilla olevissa rakennuksissa sekä maanteilla, kaduilla sekä taajama-alueilla sattuneet räjähdykset, joiden yhteenlaskettu osuus oli tarkasteluajanjaksoilla 14 %, joka on keskimäärin 3 räjähdystä vuosittain.



Kuva 255. Räjähdyshäädyn arvioitu tapahtumapaikka (Pronto, 1996–2004 (N=201)).

Jätekatosten syttymät

Rakennusten ulkopuolisten jätekatosten syttymien lukumäärää arvioitiin Pronton 'muut tulipalot' sekä 'rakennuspalot-muut rakennukset' -kategorioihin kirjattujen tapausten perusteella. Tapaukset poimittiin tekstikenttien perusteella, hakusanoilla jätekato*, roskakato* sekä roskiskato*. Hakuehdoilla löytyi vuosina 1996–2004 kategoriasta 'muut tulipalot' yhteensä 511 syttymää ja kategoriasta 'rakennuspalot-muut rakennukset' yhteensä 53 syttymää. Tämän perusteella arvioitiin jätekatoksia syttyvän keskimäärin noin 60 kpl vuosittain. Mikäli tehdään erittäin yksinkertaistettu oletus, että jätekatoksia on yhtä paljon kuin rivi- ja ketjutaloja Suomessa, saadaan jätekatosten syttymistiheydeksi $5 \cdot 10^{-4}$ vuotta ja jätekatosta kohden.

Liikennevälinepalot

Prontossa liikennevälinepaloiksi merkittyjä syttymiä oli tarkasteluajanjaksolla 1996–2004 keskimäärin 2 340 kpl vuodessa, joista tieliikenteen ajoneuvoja oli noin 2 270 kpl. Tieliikenteen ajoneuvoiksi määriteltiin tässä Pronton luokituksesta seuraavat ajoneuvot (myöh. tieliikenteen ajoneuvot): henkilöauto, pakettiauto, kuorma-auto, säiliöauto, linja-auto, ajoneuvoyhdistelmä, traktori, moottoripyörä, kevyt moottoripyörä, mopedi, moottorikäyttöinen työkone, telamaasturi, moottorikelkka tms. maastoajoneuvo, perävaunu, asuntoauto- tai vaunu, sekä muu tieliikenteen ajoneuvo. Tilastokeskuksen tietojen (Tilastokeskus 2004c) mukaisesti Suomessa oli vuonna 2004 2 727 160 rekisteröityä moottoriajoneuvoa (mukana henkilöautot, pakettiautot, kuorma-autot, linja-autot, erikoisautot, moottoripyörät, mopot, moottorikelkat, traktorit, moottorityökoneet, perävaunut).

Näiden tietojen perusteella määritettiin vuosittainen keskimääräinen syttymistiheys tieliikenteen ajoneuvoissa, jonka arvoksi saatiin $8 \cdot 10^{-4}$ vuotta ja ajoneuvoa kohden. Näistä kuitenkin vain osa syttyy rakennusten läheisyydessä. Tämän osuuden suuruusluokkaa pyrittiin selvittämään Prontoon kirjattujen liikennevälinepalo-, rakennuspalo- ja muu tulipalotietojen perusteella.

Rakennusten läheisyydessä syttyneet liikennevälinepalot pyrittiin erottamaan muusta joukosta tekstikenttien perusteella. Poiminta tehtiin käyttämällä hakusanoja 'raken*' ja 'rakenn*'. Hakusanalla 'raken*' löytyneet tapaukset käytiin läpi ja poimittiin soveltuvat tapaukset. Hakusanalla 'rakenn*' poimitut tapaukset oletettiin pienen otoksen perusteella olevan kaikki tarkasteluryhmään soveltuvia tapauksia. Yhteensä tapauksia näillä poimintaehdoilla löytyi 812 kpl (1996–2004). Rakennustyyppiä ei tästä joukosta voitu erottaa, joten havaintojoukko ei ole rajoitettu vain rivi- ja ketjutaloihin. Jos oletetaan, että syttymät ovat jakautuneet samoin kuin rakennuspalot, joista tilastojen perusteella 45 % syttyy asuinrakennuksissa ja asuinrakennusten syttymistä 10 % rivi- ja ketjutaloissa

(Tillander 2004), voidaan ajatella että näistä liikennevälinepaloista noin 4 kpl vuosittain liittyy rivi- ja ketjutaloihin.

Autojen ja autokatosten osuutta rivi- ja ketjutalopaloissa selvitettiin myös Pronton tekstikenttien perusteella käyttäen hakusanoja 'auto' + 'kat*'. Tekstikenttien perusteella voitiin päätellä, että rivi- ja ketjutaloissa syttyneistä paloista 10 kpl (1996–2004) oli syttyviä, joissa oli palanut auto tai autokatos. Kategoriasta 'muut tulipalot' poimittiin tekstikenttien perusteella (hakusanalla 'kato*') 37 syttymää (1996–2004), joissa palo oli joko syttynyt autokatoksessa tai muualla syttynyt palo oli levinnyt sinne.

Edellä kuvatuilla poimintaehdoilla onnettomuustietokannasta löytyi siten vuosina 1996–2004 yhteensä 859 syttymää eli noin 95 syttymää vuosittain, joiden oletettiin olevan rakennuksen tai vastaavan rakennelman läheisyydessä syttyneitä liikennevälinepaloja. Jos oletetaan kategorioista 'liikennevälinepalot' sekä 'muut tulipalot' poimittujen syttymien jakaantuvan eri rakennustyyppien välillä samoin kuin rakennuspalojen, saadaan syttymien keskimääräiseksi lukumääräksi rivi- ja ketjutaloissa vuosittain 5 kpl. Tällöin syttymistäajuus rakennusta kohden on $n. 1.4 \cdot 10^{-5}$ rakennusta ja vuotta kohden. On kuitenkin huomattava, ettei tässä Pronton tekstikenttien perusteella määritetyssä luvussa ole mukana kaikki rakennusten läheisyydessä tai autokatoksissa syttyneet ajoneuvot, jolloin todellinen luku on tätä suurempi.

Kartoitus palon leviämistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa

Taulukko 63. Kartoitus palon leviämistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa, vuosi 2000.

Kaikki palot	3134		
P3-luokan rakennukset:	2014 (64 %)		
Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa	lukumäärä	osuus ei-tyhjästä	osuus kaikista
01 = "Osa syttymishuonetta"	615	33.1 %	30.5 %
02 = "Koko syttymishuone"	388	20.9 %	19.3 %
03 = "Koko palo-osasto"	538	29.0 %	26.7 %
04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin"	80	4.3 %	4.0 %
05 = "Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)"	19	1.0 %	0.9 %
06 = "Palo/savu ei levinnyt rakennuksen sisälle"	74	4.0 %	3.7 %
07 = "Palo/savu levisi rakennuksen sisälle yhteen osastoon"	82	4.4 %	4.1 %
08 = "Palo sammunut tai sammutettu/ei savukausuja"	61	3.3 %	3.0 %
Tyhjiä	157		7.8 %
	2 014	100 %	100 %

Taulukko 64. Kartoitus palon leviämistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa, vuosi 2001.

Kaikki palot		3468		
P3-luokan rakennukset:		2388 (69 %)		
Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa	lukumäärä	osuus ei-tyhjiä	osuus kaikista	
01 = "Osa syttymishuonetta"	647	31.3 %	27.1 %	
02 = "Koko syttymishuone"	420	20.3 %	17.6 %	
03 = "Koko palo-osasto"	516	25.0 %	21.6 %	
04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin"	108	5.2 %	4.5 %	
05 = "Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)"	31	1.5 %	1.3 %	
06 = "Palo/savu ei levinnyt rakennuksen sisälle"	110	5.3 %	4.6 %	
07 = "Palo/savu levisi rakennuksen sisälle yhteen osastoon"	88	4.3 %	3.7 %	
08 = "Palo sammunut tai sammutettu/ei savukaasuja"	145	7.0 %	6.1 %	
Tyhjiä	323		13.5 %	
	2 388	100 %	100 %	

Taulukko 65. Kartoitus palon leviämistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa, vuosi 2002.

Kaikki palot		3441		
P3-luokan rakennukset:		2032 (59 %)		
Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa	lukumäärä	osuus ei-tyhjiä	osuus kaikista	
01 = "Osa syttymishuonetta"	576	29.5 %	28.3 %	
02 = "Koko syttymishuone"	366	18.7 %	18.0 %	
03 = "Koko palo-osasto"	576	29.5 %	28.3 %	
04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin"	96	4.9 %	4.7 %	
05 = "Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)"	36	1.8 %	1.8 %	
06 = "Palo/savu ei levinnyt rakennuksen sisälle"	81	4.1 %	4.0 %	
07 = "Palo/savu levisi rakennuksen sisälle yhteen osastoon"	78	4.0 %	3.8 %	
08 = "Palo sammunut tai sammutettu/ei savukaasuja"	144	7.4 %	7.1 %	
Tyhjiä	79		3.9 %	
	2 032	100 %	100 %	

Taulukko 66. Kartoitus palon leviämistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa, vuosi 2003.

Kaikki palot	3506		
P3-luokan rakennukset:	2242 (64 %)		
Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa	lukumäärä	osuus ei-tyhjiä	osuus kaikista
01 = "Osa syttymishuonetta"	617	29.2 %	27.5 %
02 = "Koko syttymishuone"	430	20.3 %	19.2 %
03 = "Koko palo-osasto"	641	30.3 %	28.6 %
04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin"	111	5.2 %	5.0 %
05 = "Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)"	29	1.4 %	1.3 %
06 = "Palo/savu ei levinnyt rakennuksen sisälle"	88	4.2 %	3.9 %
07 = "Palo/savu levisi rakennuksen sisälle yhteen osastoon"	83	3.9 %	3.7 %
08 = "Palo sammunut tai sammutettu/ei savukaasuja"	116	5.5 %	5.2 %
Tyhjiä	127		5.7 %
	2 242	100 %	100 %

Taulukko 67. Kartoitus palon leviämistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa, vuosi 2004.

Kaikki palot	3149		
P3-luokan rakennukset:	2044 (65 %)		
Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa	lukumäärä	osuus ei-tyhjiä	osuus kaikista
01 = "Osa syttymishuonetta"	571	27.9 %	27.9 %
02 = "Koko syttymishuone"	353	17.3 %	17.3 %
03 = "Koko palo-osasto"	540	26.4 %	26.4 %
04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin"	109	5.3 %	5.3 %
05 = "Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)"	27	1.3 %	1.3 %
06 = "Palo/savu ei levinnyt rakennuksen sisälle"	124	6.1 %	6.1 %
07 = "Palo/savu levisi rakennuksen sisälle yhteen osastoon"	96	4.7 %	4.7 %
08 = "Palo sammunut tai sammutettu/ei savukaasuja"	202	9.9 %	9.9 %
09 = "Koko rakennus"	22	1.1 %	1.1 %
Tyhjiä	0		0.0 %
	2 044	100 %	100 %

Taulukko 68. Kartoitus palon leviämisistä toiseen rakennukseen P3-luokan rakennuksissa, vuosi 2005.

Kaikki palot	3670		
P3-luokan rakennukset:	2372 (65 %)		
Vahinkojen laajuus tilanteen lopussa	lukumäärä	osuus ei-tyhjiä	osuus kaikista
01 = "Osa syttymishuonetta"	710	35.2 %	29.9 %
02 = "Koko syttymishuone"	284	14.1 %	12.0 %
03 = "Koko palo-osasto"	304	15.1 %	12.8 %
04 = "Levinnyt useisiin palo-osastoihin"	48	2.4 %	2.0 %
05 = "Levinnyt toiseen rakenn. (koskee vain palon leviämistä)"	17	0.84 %	0.72 %
06 = "Palo/savu ei levinnyt rakennuksen sisälle"	174	8.6 %	7.3 %
07 = "Palo/savu levisi rakennuksen sisälle yhteen osastoon"	94	4.7 %	4.0 %
08 = "Palo sammunut tai sammutettu/ei savukaasuja"	194	9.6 %	8.2 %
09 = "Koko rakennus"	547	23.1 %	23.1 %
Tyhjiä	0		0.0 %
	2 372	100 %	100 %

Liitteen F lähdeluettelo

Tillander, K. 2004. Utilisation of statistics to assess fire risks in buildings. Espoo: VTT. 224 s. + liitt. 37 s. (VTT Publications; 537.) ISBN 951-38-6392-1; 951-38-6393-X. <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>.

Tilastokeskus 2004a. StatFin tilastopalvelu. Asuntokanta alueittain 2004. Tilastokeskuksen verkkosivut. <http://statfin.stat.fi/StatWeb/start.asp?LA=fi&lp=home>. Viitattu 20.12.2005.

Tilastokeskus 2004b. StatFin tilastopalvelu. Rakennuskanta alueittain 2004. Tilastokeskuksen verkkosivut. <http://statfin.stat.fi/StatWeb/start.asp?LA=fi&lp=home>. Viitattu 20.12.2005.

Tilastokeskus 2004b. StatFin tilastopalvelu. Moottoriajoneuvot 1922–. Tilastokeskuksen verkkosivut. <http://statfin.stat.fi/StatWeb/start.asp?LA=fi&lp=home>. Viitattu 30.1.2006.

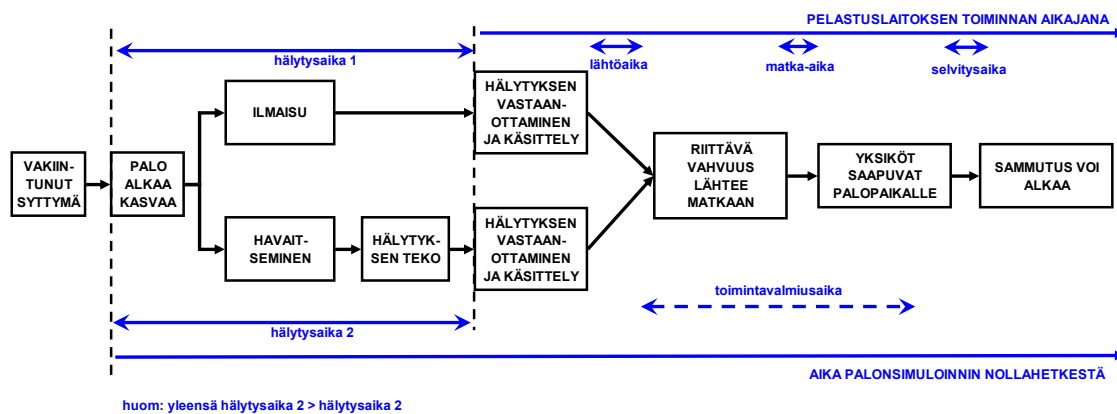
Liite G: Palokunnan toimien mallintaminen

Se, miten tehokkaasti palokunta pystyy vaikuttamaan palon leviämismahdollisuuteen riippuu pääasiassa kahdesta tekijästä:

- ajanhetki, jolloin palokunta aloittaa palon sammuttamisen,
- palon suuruus kyseisellä hetkellä.

Palokunnan toimien ajoitukseen vaikuttavat seuraavat tekijät (ks. Kuva 256):

- aika, jolloin palokunta saa hälytyksen,
- aikaviive hälytyksestä yksiköitten lähtöön (lähtöaika),
- matkaaika,
- sammutuksen valmistelu sekä tilanteen kartoitukseen ja etsintään kuuluva aika (selvitysaika).



Kuva 256. Sammutustoiminnan aloittamisen ajoitus.

Tässä työssä on kyse joko huoneistopalon tai paikallisten palojen (katos, auto/autoja, alkupalon sytyttämä kohde, jne.) samuttamisesta ja niiden suhteen palokunnan normaalilähdöllä ei yleensä ole ongelmia sammuttamisen onnistumisen suhteen ainakaan siinä mielessä, että palon voimakkuus ylittäisi palokunnan sammutusvoiman¹².

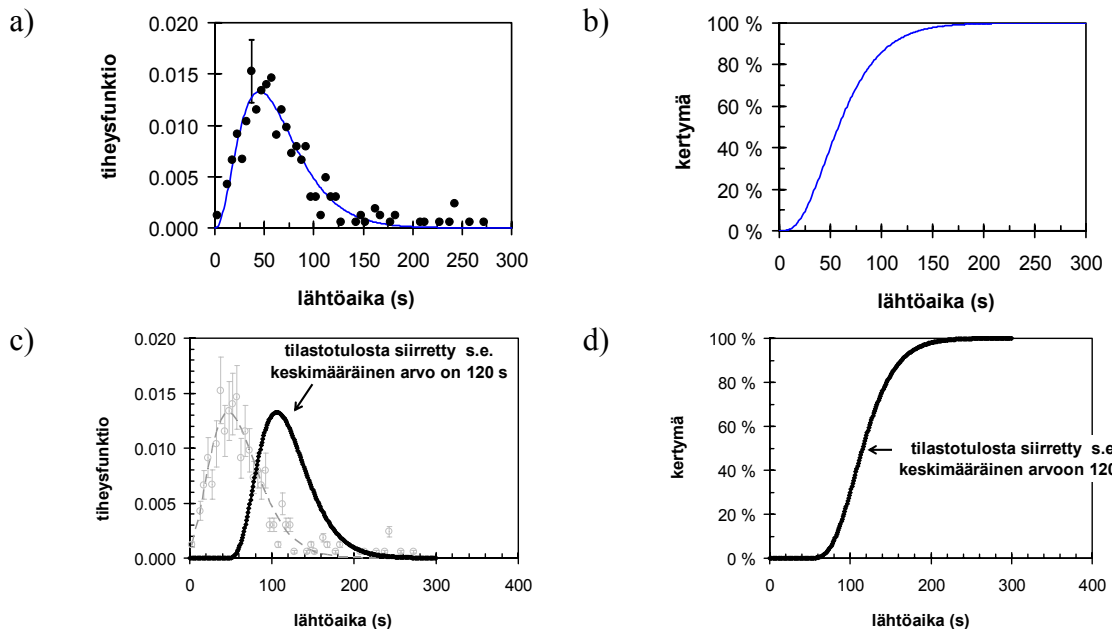
Seuraavassa esitetään jakaumat ja niiden perustelut edellä aikatekijöille.

¹² Muunlaisia ongelmia voi toki olla, esim. liittyen kovaan pakkaseen tai muihin poikkeuksellisiin tilanteisiin.

Lähtöaika

Tillanderin ja Keski-Rahkosen urauurtavan palotilastojen analysoinnin ansiosta Suomessa on käytävissä eras mailman lparhaista palotilastoaineistoista. Kuvissa 257a ja 257b esitetään Tillander and Keski-Rahkosen [2000, kuva 40] vuoden 1996 palotilastotuloksista analysoima palokuntien lähtöajan jakauma. Tilastolliseksi malliksi soveltuu 2-parametrinen gammajakauma, jonka parametrit ovat $\alpha = 3,43$ and $\beta = 18,6$ s. Jakauman keskimääräinen arvo on noin 60 s.

Jakauman arvojen keskittyminen noin yhden minuutin paikkeille voi heijastella tuona aikana vakiintunutta tapaa kirjata lähtöaika ja siksi tässä työssä ei käytetä kyseistä jakaumaa suoraan, vaan siirrettynä siten¹³, että jakauman keskimääräinen arvo on 120 s [Anon. 2006]. Tämä jakauma esitetään kuvissa 257c ja 257d. Tämä viive muodostuu hälytyksen käsittelyyn sekä yksiköiden lähtemistoimiin kuluva ajasta.



Kuva 257. Palokunnan lähtöajan jakauma: a) ja b) Tillanderin ja Keski-Rahkosen [2000] tulos sovitettuna käyttäen 2-parametrista gammajakaumaa sekä c) ja d) tässä työssä käytetty siirretty jakauma.

¹³ Siirtäminen on tehty muuttamalla jakauma 3-parametriseksi gammajakaumaksi, jolla on samat parametrien α ja β arvot kuin Tillanderin ja Keski-Rahkosen määrittämässä jakaumassa ja kolmas parametri siirtää jakaumaa aika-akselilla. Kolmeparametrinen gammajakauman tiheysfunktio on

$$f_{\text{gamma}}(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} (x - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)$$

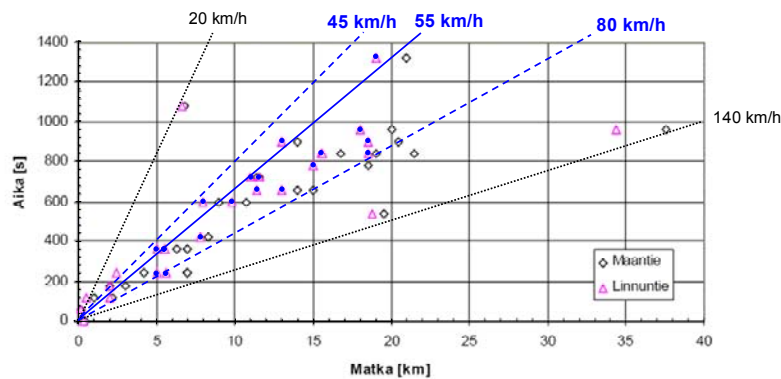
ja kaksiparametrisen gammajakauma saadaan tästä funktiosta asettamalla $x_{\min} = 0$.

Matka-aika

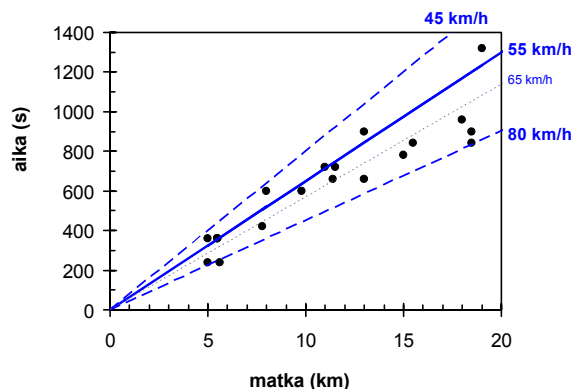
Tillander and Keski-Rahkonen [2000] esittävät myös palokuntien matka-aikoja koskevia tietoja (Kuva 258a). Kirjaamis- ym. syistä tarkasteluajana kerättyjen tietojen hajonta on varsin suuri, mutta tässä työssä tarkasteltavalla matka-alueella eli noin 5 ja 15 km:n välillä suurin osa arvoista on keskittynyt alueelle, jota rajaavat nopeuksia 45 km/h ja 80 km/h vastaavat suorat. Nämä arvot esitetään korostettuna kuvassa 258a. Pienimmän neliösumman mielessä paras sovite lineaarinen sovite näihin pisteisiin vastaa nopeutta 65 km/h. Hankkeen johtoryhmässä käydyn keskustelun [Anon. 2006] perusteella tässä työssä käytetään kuitenkin alemmaa arvoa, 55 km/h (Kuva 258b). Matka-ajan laskemiseen käytettäväksi tilastolliseksi jakaumaksi valitaan asiantuntija-arviointiin perustuvan tiedon kuvaamiseen soveltuva kolmiojakauma. Edellä esitetyn nojalla kolmiojakauman parametrit ovat:

- minimiarvo 45 s/km (vastaten nopeutta 80 km/h),
- maksimiarvo 80 s/km (vastaten nopeutta 45 km/h),
- todennäköisin arvo 65 s/km (vastaten nopeutta 55 km/h).

a)



b)

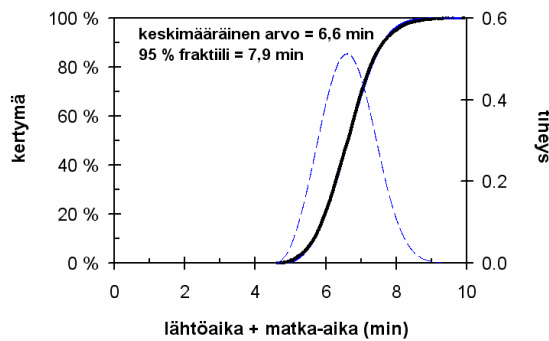


Kuva 258. Matka-ajan tilastollisen jakauman arviointi: a) Tillanderin ja Keski-Rahkonen [2000] maaseutukuntien palokuntien matka-aikatilastoista analysoimia tietoja ja b) väliltä 5–15 km valittuja arvoja sekä niiden ja asiantuntija-arvion [Anon. 2006] perusteella arvioitu matkan ja ajan tyypillinen vastaavuus ja hajonta.

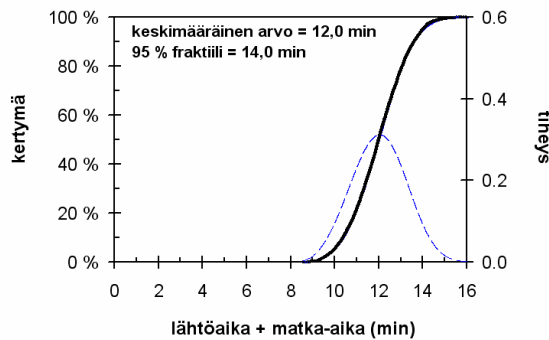
Toimintavalmiusaika

Kuvassa 256 esitetyn mallin puiitteissa toimintavalmiusaikaa vastaa lähtöajan ja matka-ajan summa. Vaikka tämän työn laskuissa ei suoraan käytetä toimintavalmiusaikaa, tarjoaa se erään vertailukohdan tämän työn tilastolliseen malliin, joka pääasiassa pohjautuu Tillanderin and Keski-Rahkosen [2000] analyysiin, jonka perustana käytettiin 1990-luvun puolivälin palotilastoja. Kuvassa 259 esitetään lasketut toimintavalmiusajan arviot kolmelle eri palokunnan matkaetäisyydelle. Kun näitä tuloksia verrataan Sisäasianministeriön pelastustoimen tilastoihin [SM 2006], joiden mukaan mukaan valtakunnallinen keskimääräinen kokonaistoimintavalmius vuonna 2005 oli 11,32 min ja esim. Länsi-Uudellamaalla 11,52 min, havaitaan, että lasketut arvot vastaavat suunnilleen 10 km:n etäisyyttä palokunnan ja palopaikan välillä. Tätä etäisyysarvoa voidaan siis pitää perusarvona palokunnan toimia arvioitaessa, johon 5 km:n ja 15 km:n etäisyydelle tehdyt tarkastelut tarjoavat herkkyystarkastelun.

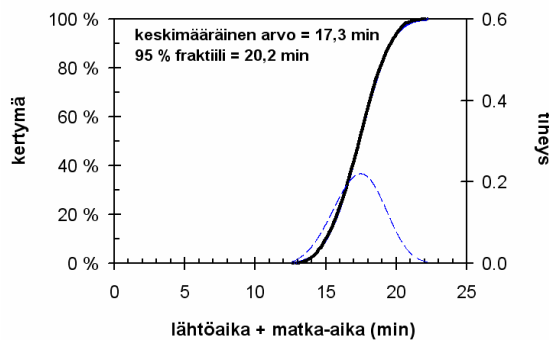
a)



b)



c)



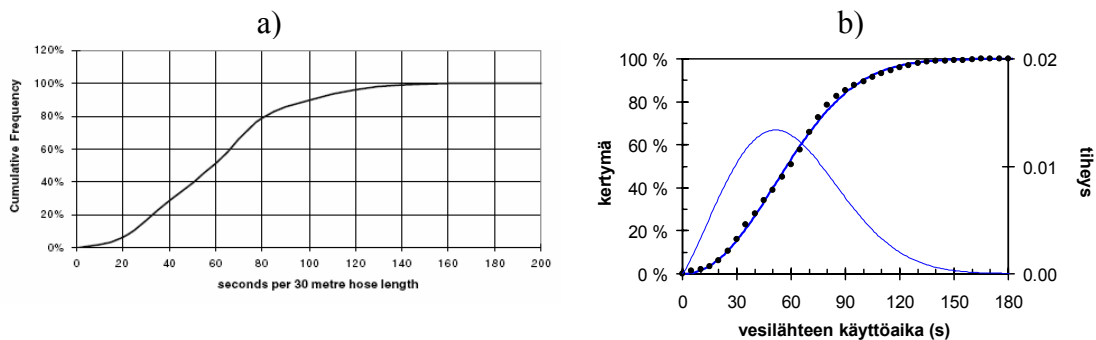
Kuva 259. Toimintavalmiusajan estimaatti laskettuna lähtö- ja matka-ajan summana:
a) matka 5 km, b) matka 10 km ja c) matka 15 km.

Operatiiviset toimet palopaikalla

Suomessa ei ole vielä käytettävissä kotimaista tilastoaineistoa koskien palokunnan palopaikalla tekemien operatiivisten toimien vaatimaa aikaa. Siksi tässä työssä käytetään muista maista saatavilla oleviin tietoihin perustuvaa *arviota* näille ajoille (lähteenä käytetään australialaista mallia ”Fire Brigade Intervention Model (FBIM)” [Marchant *et al.* 2001] ja Särdaqvistin [1998] esittämiä tuloksia). Tarkasteltavat tehtävät ovat vesilähteen käyttöönotto sekä etsintään ja pelastamiseen kuluva aika.

Vesilähteen käyttöönottoaika

Marchantin ym. [2001] määrittämä jakauma koskien vesilähteen valmisteluihin kuluva aikaa (65 mm:n letkun aukivetäminen, kytkeminen ja vesisuihkutuksen aloittaminen) esitetään kuvassa 260. Jakauma voidaan kuvata Weibullin jakaumalla¹⁴, jonka parametrit ovat $\alpha = 2,18$, $\beta = 68,0$ min. Tämän jakauman keskiarvo on 60 s ja variaatiokerroin (keskihajonnan ja keskiarvon suhde) 48 %.



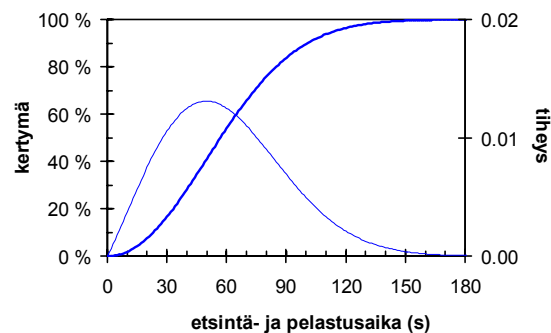
Kuva 260. a) Marchantin ym. [2001] määrittämä jakauma koskien vesilähteen valmisteluihin kuluva aikaa (65 mm:n letkun aukivetäminen, kytkeminen ja vesisuihkutuksen aloittaminen) ja b) tämän jakauman mallintaminen käyttäen Weibullin jakaumaa (pisteet esittävät Marchant ym. [2001] jakaumasta luettuja arvoja).

Etsintään ja pelastamiseen kuluva aika

Särdaqvist [1998] analysoi 307 Lontoossa vuosina 1994–1997 muissa kuin asuinrakennuksissa sattunutta paloa. Hän esittää useita tietoja koskien operatiivisten toimien vaa-

¹⁴ Tiheysfunktio $f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$.

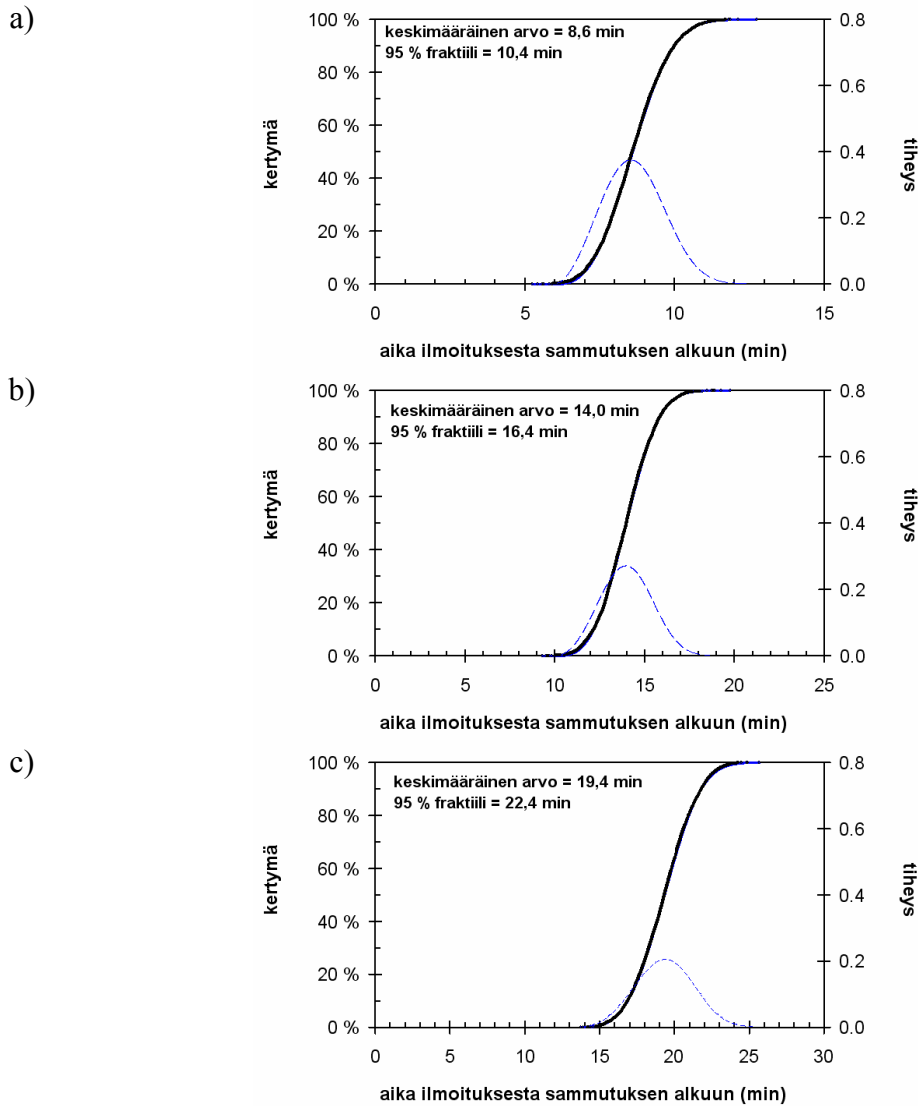
timaa aikaa, joista tässä työssä käytetään aikaa, jonka on kulunut hetkestä, jolloin palokunnan on raportoitu saapuneen paikalle siihen, kun se on aloittanut palon ”puuttumisen” (intervention). Särdaqvistin [1998] yleinen havainto on, että tämä aika on suhteellisen lyhyt: pisimmät ajat, joita hän raportoi, ovat 5–10 minuuttia, ja ne liittynevät pieniin paloihin suhteellisen monimutkaisissa rakennuksissa (joita Lontoon varsin iäkkäitäkin kohteita sisältävässä rakennuskannassa varmaankin riittää). Pääosa ajoista vaihtelee välillä 1–2 minuuttia. Koska nyky suunnittelun mukainen tiivis ja matala rakentaminen on suhteellisen selkeää, voidaan näiden lyhyempien aikojen arvioida vastaavan sitä. Paremman tiedon puuttuessa tehdään lisäarvio, että noin puolet tästä ajanjaksosta kuluu etsintään ja pelastamiseen eli keskimääräinen arvo on siis noin 1 minuutti. Hajonnan arvioidaan olevan suhteellisen suuri, noin 50 % keskiarvosta. Näitä tietoja vastaava jakauma (muotona Weibull-jakauma) esitetään kuvassa 261.



Kuva 261. Arvio etsintään ja pelastamiseen kuluvalle ajalle.

Aika hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen

Arvio hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen kuluvalle ajalle saadaan laskemalla yhteen lähtö- ja matka-aika sekä operatiivisiin toimiin kuluva aika. Näin saatavat tulokset esitetään kuvassa 262.



Kuva 262. Arvio hälytyksestä sammuttamisen aloittamiseen kuluvalle ajalle, kun palokunnan etäisyys palopaikalta on: a) 5 km, b) 10 km ja c) 15 km.
Huom: eri kuvien aika-akselit ovat erilaiset.

Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle

Kun palokunnan toiminta-aikaa koskevat tulokset yhdistetään hälytysajan mallin antamiin tuloksiin (luku 9 ja liite I) saadaan arvio sille ajalle, joka kuluu palon kasvamisen alkamisesta sammuttamisen aloittamiseen. Tämänkin malli kehitetään vaiheittain yhdistämällä eri tilanteita, jotka koskevat vuoden- ja päivänajoja sekä mahdollisuutta, että palohuoneessa on henkilöitä. Eri vaiheiden välituloksia esitetään taulukoissa 69–74. Lopputulos esitetään kuvassa 263.

Taulukko 69. Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle, kun palokunnan ajomatka on 5 km. Jaottelu vuorokaudenajan ja sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö.

A. palohuoneistossa on paloon reagoimaan pystyvä henkilö	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 93 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 78 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 25 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 20 %
<p style="text-align: center;">aika (min)</p>	<p style="text-align: center;">aika (min)</p>
B. palohuoneistossa ei ole paloon reagoimaan pystyvää henkilöä	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 7 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 22 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 75 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 80 %
<p style="text-align: center;">aika (min)</p>	<p style="text-align: center;">aika (min)</p>

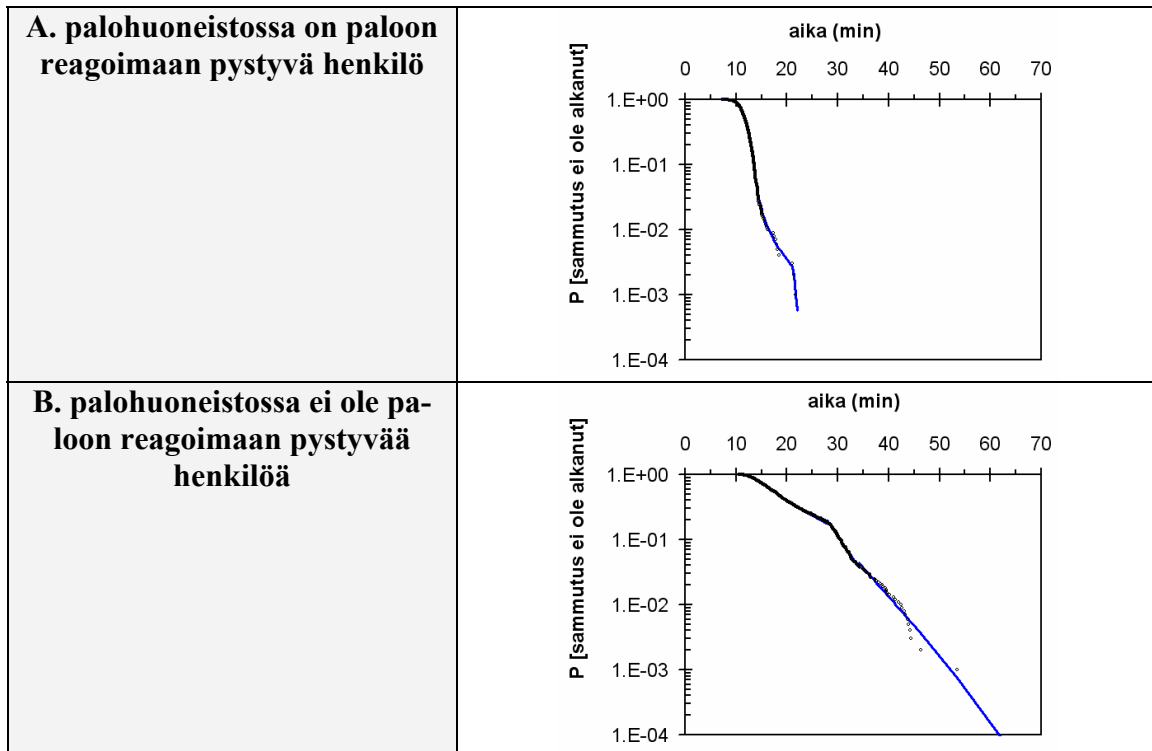
Taulukko 70. Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle, kun palokunnan ajomatka on 10 km. Jaottelu vuorokaudenajan ja sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö.

A. palohuoneistossa on paloon reagoimaan pystyvä henkilö	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 93 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 78 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 25 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 20 %
<p style="text-align: center;">aika (min)</p>	<p style="text-align: center;">aika (min)</p>
B. palohuoneistossa ei ole paloon reagoimaan pystyvää henkilöä	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 7 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 22 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 75 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 80 %
<p style="text-align: center;">aika (min)</p>	<p style="text-align: center;">aika (min)</p>

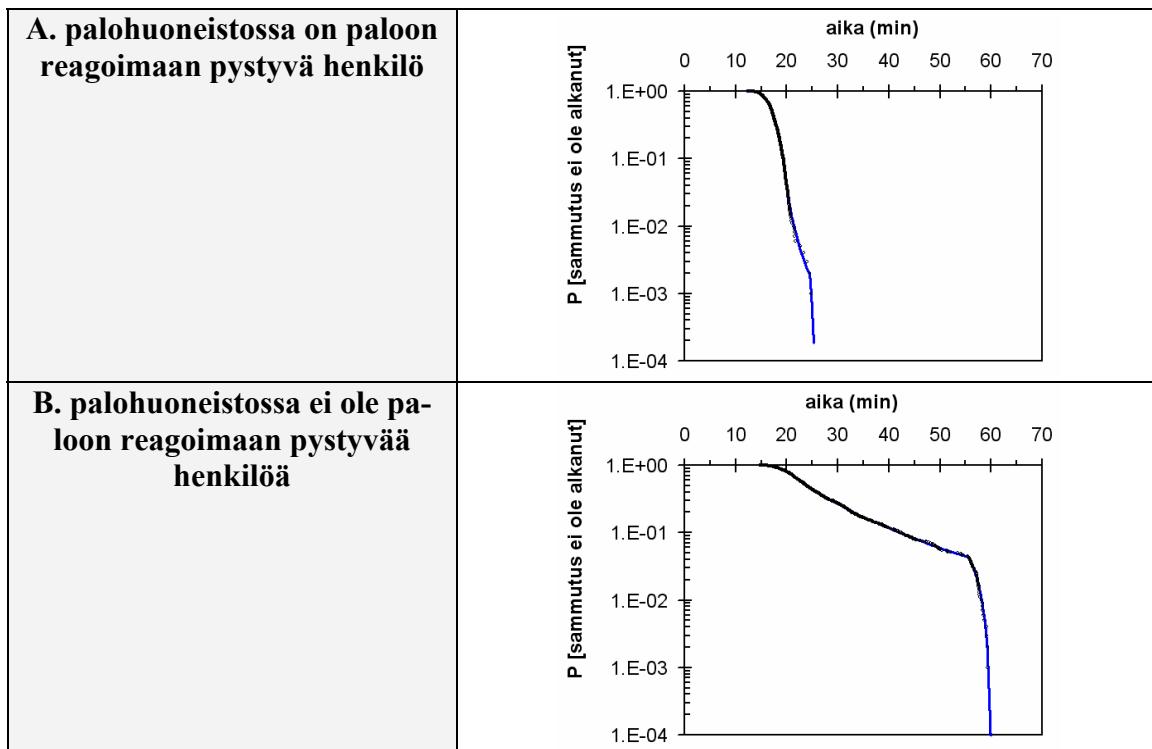
Taulukko 71. Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle, kun palokunnan ajomatka on 15 km. Jaottelu vuorokaudenajan ja sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö.

A. palohuoneistossa on paloon reagoimaan pystyvä henkilö	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 93 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 78 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 25 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 20 %
B. palohuoneistossa ei ole paloon reagoimaan pystyvää henkilöä	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 7 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 22 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 75 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 80 %

Taulukko 72. Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle, kun palokunnan ajomatka on 5 km. Jaottelu sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö.

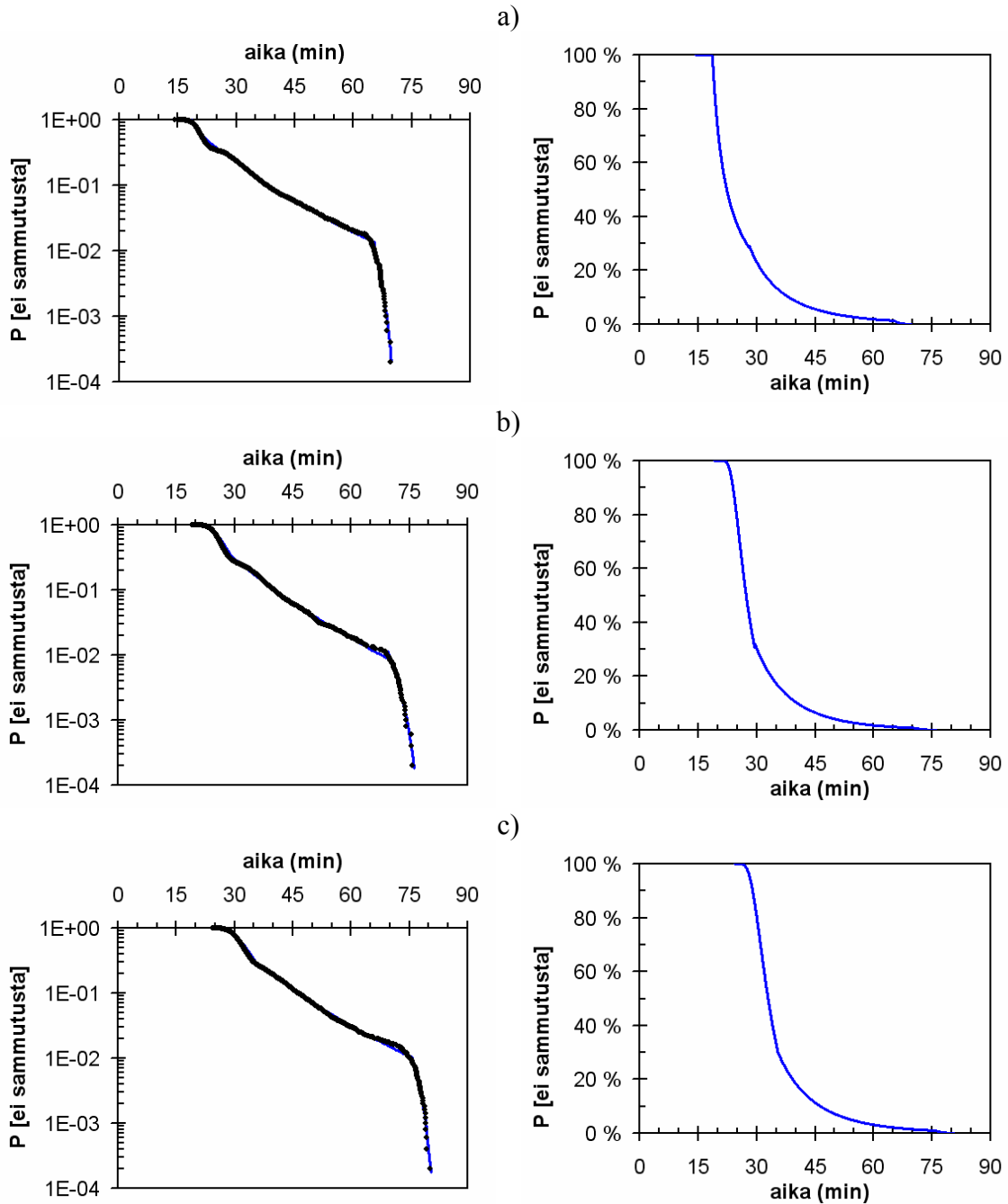


Taulukko 73. Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle, kun palokunnan ajomatka on 10 km. Jaottelu sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö.



Taulukko 74. Arvio palon kasvamisen alkamisen ja sammuttamisen aloittamisen väliselle viiveelle, kun palokunnan ajomatka on 15 km. Jaottelu sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö.

<p>A. palohuoneistossa on paloon reagoimaan pystyvä henkilö</p>	<p>Graph A shows the probability of fire starting (P) over time (min) for a scenario where a person is available to react. The y-axis is logarithmic, ranging from 1.E-04 to 1.E+00. The x-axis is linear, ranging from 0 to 70 minutes. The curve starts at 1.0 (100% probability) and remains constant until approximately 18 minutes. After 18 minutes, the probability drops sharply, reaching approximately 1.E-03 (0.1% probability) at 30 minutes.</p>
<p>B. palohuoneistossa ei ole paloon reagoimaan pystyvää henkilöä</p>	<p>Graph B shows the probability of fire starting (P) over time (min) for a scenario where no person is available to react. The y-axis is logarithmic, ranging from 1.E-04 to 1.E+00. The x-axis is linear, ranging from 0 to 70 minutes. The curve starts at 1.0 (100% probability) and remains constant until approximately 18 minutes. After 18 minutes, the probability decreases more gradually than in Graph A, reaching approximately 1.E-02 (1% probability) at 65 minutes, and then dropping to approximately 1.E-03 (0.1% probability) at 70 minutes.</p>



Kuva 263. Arvio palon kasvamisen alkamisesta sammuttamisen aloittamiseen kuluvalle ajalle, kun palokunnan etäisyys palopaikalta on: a) 5 km, b) 10 km ja c) 15 km. Käyrät esittävät todennäköisyyttä sille, että palon sammuttaminen ei ole vielä alkanut. Vasemman puoleisissa kuvissa käytetään logaritmista todennäköisyysasteikkoa ja oikeanpuoleisissa lineaarista todennäköisyysasteikkoa.

Liitteen G lähdeluettelo

Anon. 2006. Keskustelu hankkeen johtoryhmän kokouksessa 2.10.2006.

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

SM 2006. <http://www.pelastustoimi.fi/tilastot/>

Särdqvist, S. 1998. Real Fire Data: Fires in non-residential premises in London 1994–1997. Lund: Lund University. 62 s. (Report 7003) ISRN LUTVDG/TVBB--7003--SE

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

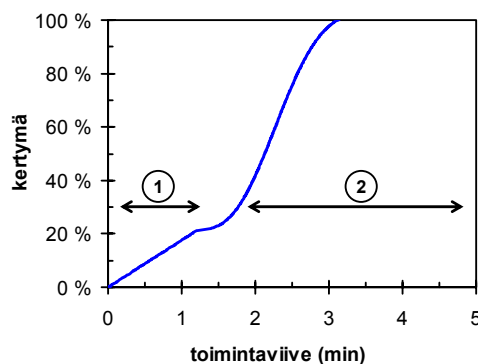
Liite H: Palovaroittimen tai -ilmaisimen toimintaviive huoneistopalossa

Tässä liitteessä esitetään malli palovaroittimen tai -ilmaisimen toimintaviiveen laskemiseksi huoneistopalossa (Kuva). Mallin lähtötiedot ja siinä tehdyt oletukset ovat:

- Palovaroitin tai -ilmaisimien on savuun reagoiva laite.
- Malli kattaa vain liekehtivän palon vaiheen, mikä on turvallisella puolella oleva oletus, koska se jättää huomiotta mahdollisen kytevän palon vaiheen, jonka aikana savuilmaisin voi jo reagoida paloon.
- Erityyppisten (ionisaatioon perustuva/optinen) savuilmaisimien toimintaa koskevan tutkimuksen [Geiman & Gottuk 2003, Hietaniemi & Rinne 2007] mukaan toimintahetkellä vallitseva savuntiheyttä kuvaava vaimennusvakio k on suuruusluokkaa $0,1 \text{ m}^{-1}$; määrällisesti koetulokset voidaan esittää kuvassa 265a esitetyllä tavalla ja ne voidaan mallintaa käyttäen kahdesta 3-parametrisestä gammajakaumasta muodostuvaa jakaumaa käyttäen, jonka keskimääräinen (mediaani) arvo on $0,09 \text{ m}^{-1}$ ja 95 %:n fraktiili $0,4 \text{ m}^{-1}$.
- Koska palon alussa palotilan lämpötilan nousun ΔT_g ja tilan savuisuuden välillä on suoraviivainen (lineaarinen) yhteys [Heskestad & Delichatsios 1977, Schifiliti & Pucci 1996, Björkman ym. 2002, Hietaniemi & Rinne 2007], ks. kuva 265c, savuilmaisimen toimintaa voidaan arvioida palotilan lämpötilan nousun perusteella. Tässä työssä käytettävä korrelaatio on $\Delta T_g = a_s \cdot k$, missä a_s on välillä $110, \dots, 200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}^{-1}$ vaihteleva tasajakaunut tilastollinen suure; tällöin savuilmaisimen toimintalämpötilaa kuvaavaksi tilastolliseksi malliksi saadaan kuvassa 265d esitetty jakauma, jonka keskimääräinen arvo on $18,5 \text{ }^\circ\text{C}^{15}$.
- Asuinhuoneiston palo on nopeasti kehittyvä (mikä t^2 -palonkasvumallin puitteissa vastaa sitä, että paloteho saavuttaa 1 MW :n 150 s :ssa) ja siksi savuilmaisimen toimintaan vaadittava kuuman kerroksen lämpötilan nousu kehittyy hyvin nopeasti. Tässä työssä käsitellyn huonepalomallin puitteissa kuvassa 265d esitettyä lämpötilan nousukriteeriä vastaavat ajat ovat pienempiä kuin $0,7 \text{ min}$ (noin 40 s): tätä suuretta käsitellään välillä $0, \dots, 40 \text{ s}$ vaihtelevana tasajakautuneena tilastollisena suureena. Tämä aika on siis mallin mukainen savuilmaisimen toiminta-aika siinä tapauksessa, että *ilmaisimien on samassa huoneessa, jossa palo alkaa*.

¹⁵ Paloteknisessä kirjallisuudessa viitataan usein $13 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilan nousuun arvoon savuilmaisimen toimintaa vastaavana lämpötilan nousuna. Tässä työssä johdettu malli antaa korkeamman tyyppillisen arvon eli on siis turvallisella puolella (ennustaen hitaamman ilmaisun).

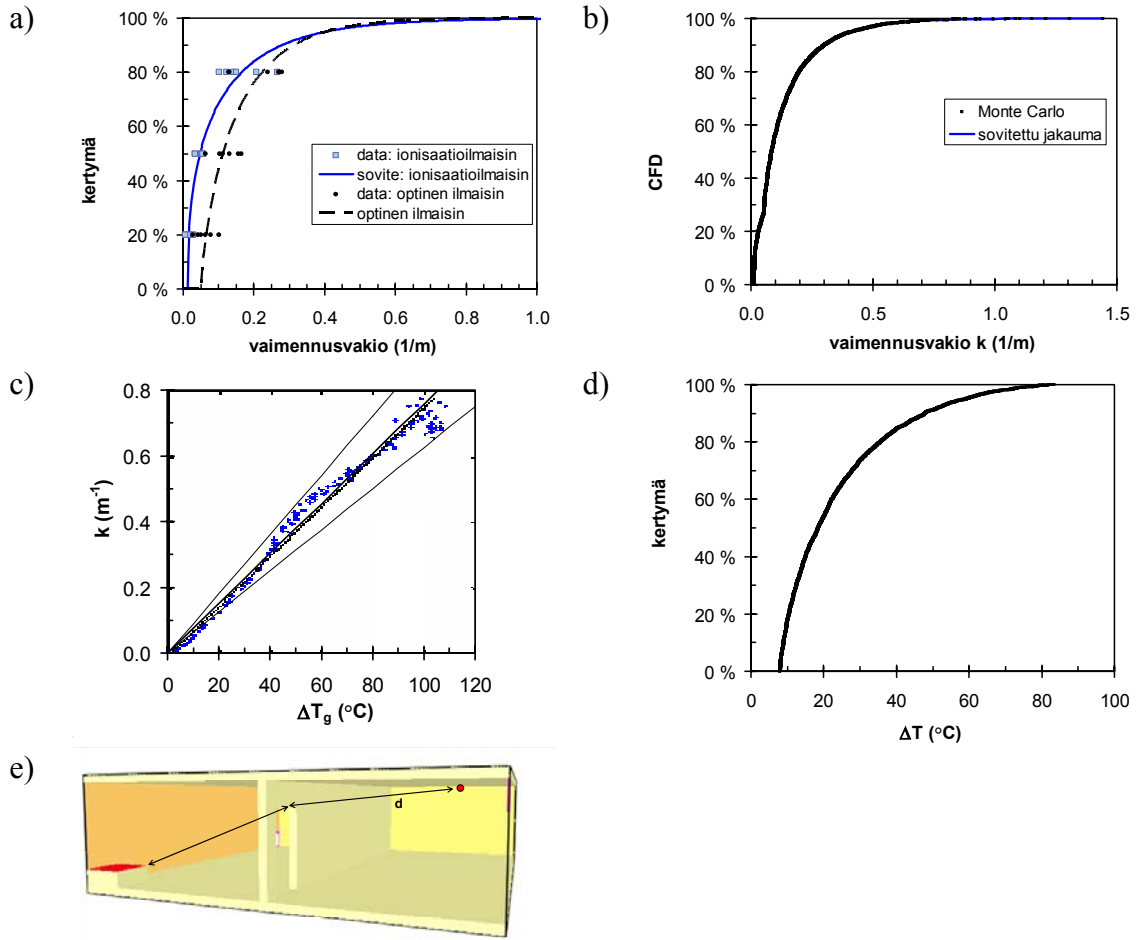
- Kun *ilmais*in on eri huoneessa kuin jossa palo alkaa, savuilmaisimen toimintaa viivästyttää lisäksi aika, joka kuluu savun kulkeutumiseen palosta ilmaisimelle. Tätä aikaa arvioitiin käyttäen kuvassa 265e esitettyä laskentamallia, jossa savu kulkeutuu palosta viereisen huoneen katossa olevaan ilmaisiin. Tehtyjen parametrusten tarkastelujen (eri tekijöitä vaihdeltiin niille tyypillisellä vaihteluvälillä) mukaan savun kulkeutumista voidaan kuvata seuraavasti:
 - Savu saavuttaa ilmaisimen tyypillisesti noin 60–80 s:n kuluttua palon alkamisesta. Tämä tulos voidaan yleistää siten, että aika, jossa savu saavuttaa ilmaisimen tyypillisesti noin 1–2 minuuttia¹⁶ (tasajakautunut suure).
 - Kun savu on saavuttanut ilmaisimen, alkaa lämpötila ilmaisimen luona nousta nopeudella n. 0,7 °C/s. Mallissa valitaan 0,6–0,7 °C/s (tasajakauma).
 - Ilmaisuhetkellä virtausnopeus u_g ilmaisimen luona on noin 0,5 m/s. Mallissa käytetään arvoa 0,4–0,6 °C/s (tasajakautunut suure).
- Kun savu on saavuttanut ilmaisimen, sen lämpötila T_D alkaa nousta verrannollisena kaasun ja ilmaisen lämpötilan eroon. Verrannollisuustekijänä on ilmaisimen kuumentamisen aikavakio $\tau = RTI/u_g^{1/2}$, missä RTI on ilmaisimen vasteaikaindeksi, jolle savuilmaisimen tapauksessa voidaan käyttää pientä arvoa¹⁷. Mallissa valitaan $RTI = 5\text{--}15 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$.



Kuva 264. Palovaroittimen tai -ilmaisimen toimintaviiveen laskentamalli ilmaisimen viiveen tilastollisella jakaumalla ilmaistuna: aikaväli (1) vastaa sitä, että palo alkaa samassa huoneessa, jossa ilmaisim on ja (2) vastaa sitä, että palo alkaa eri huoneessa, kuin missä ilmaisim on.

¹⁶ Tätä arviota on venytetty hitaaseen suuntaan turvalliselle puolella olevan arvion muodostamiseksi.

¹⁷ Brittiläisessä paloturvallisuussuunnitteluoppaassa [FSE 1997] annetaan yksinkertainen malli savuilmaisimen mallintamiselle käyttämällä RTI-arvoa $0,5 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ ja lämpötilan nousulle arvoa 13 °C. Myös Bukowskin ja Averillin [1998] havainnon mukaan, että savuilmaisin reagoi jo n. 4 °C:n lämpötilan nousuun, vasteaikaindeksin voidaan olettaa olevan varsin pieni.



Kuva 265. Palovaroittimen tai -ilmaisimen toimintaviiveen laskentamallin lähtötiedot: a) Geimanin ja Gottukin savuilmaisimien toimintaa koskevan tutkimuksen koetuloksia [2003] ja b) niiden tilastollinen mallintaminen. c) Esimerkki palotilan lämpötilan nousun ja savutiheyden välillä palon alussa vallitsevasta lineaarisesta riippuvuudesta [Hietaniemi & Rinne 2006] ja d) sen avulla määritetty savuilmaisimen toimintaa vastaavan lämpötilan nousun jakauma. e) Savun kulkeutumisaajan määrittämisen virtuaalinen.

Liitteen H lähdeluettelo

Björkman, J., Baroudi, D., Latva, R., Tuomisaari M. & Kokkala, M. 2002. Determination of dynamic model parameters of smoke detectors. *Fire Safety Journal*, Vol. 37, 4, s. 395–407.

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

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

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

Heskestad, G. & Delichatsios, M. A. 1977. *Environments of Fire Detectors – Phase I: Effect of Fire Size, Ceiling Height, and Material. Volume I: “Measurements” (NBSGCR-77-86); Volume II: “Analysis” (NBS-GCR-77-95)*, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.

Hietaniemi, J., & Rinne, T. 2007. *Historiallisesti arvokkaan kohteen paloturvallisuussuunnittelu – esimerkkitapauksena Porvoon museo*. Espoo: VTT: VTT Working Papers 71. 136 s. + liitt. 44 s. ISBN 978-951-38-6623-5

Schifiliti, R. P. & Pucci, W. E. 1996. *Fire Detection Modeling: State of the Art*. Bloomfield, CT: Fire Detection Institute.

Liite I: Palon havaitsemisen ja siitä tehtävän hälytyksen mallintamisen tulokset

Huoneistopalo

Huoneistopalon havaitsemisen ja siitä tehtävän hälytyksen mallintamisen tulokset esitetään alla olevissa taulukoissa (esityksessä käytetään sekä lineaarista että logaritmistä pystyasteikkoa).

Yksinkertaisemman mallin aikaansaamiseksi edellä esitetyjä tuloksia pitää vielä yhdistää. Tämän synteesi voidaan tehdä vaiheittain seuraavasti: ’

- 1. vaiheessa yhdistetään¹⁸ eri vuodenaikoja koskevat tulokset,
- 2. vaiheessa yhdistetään eri päivänajoja koskevat tulokset päivää (klo 08–17) ja iltaa/yötä (klo 17–02).
- 3. vaiheessa yhdistetään eri päivää jaa iltaa ja yötä koskevat tuloksetm jolloin saadaan vain siitä riippuvat mallit, että on palohuoneistossa palon reagoimaan pystyvää henkilöä vai ei.
- 4. vaiheessa lasketaan lopullinen tulos yhdistämällä jakaumat, jotka koskevat tilannetta, jossa palohuoneistossa on palon reagoimaan pystyvää henkilöä tai ei ole.

Vaiheen 1, 2 ja 3 tulokset esitetään taulukoissa 75–80. Jakaumia luonnehtivat seuraavat keskimääräiset (mediaani) arvot ja 5 %:n fraktiiliarvot:

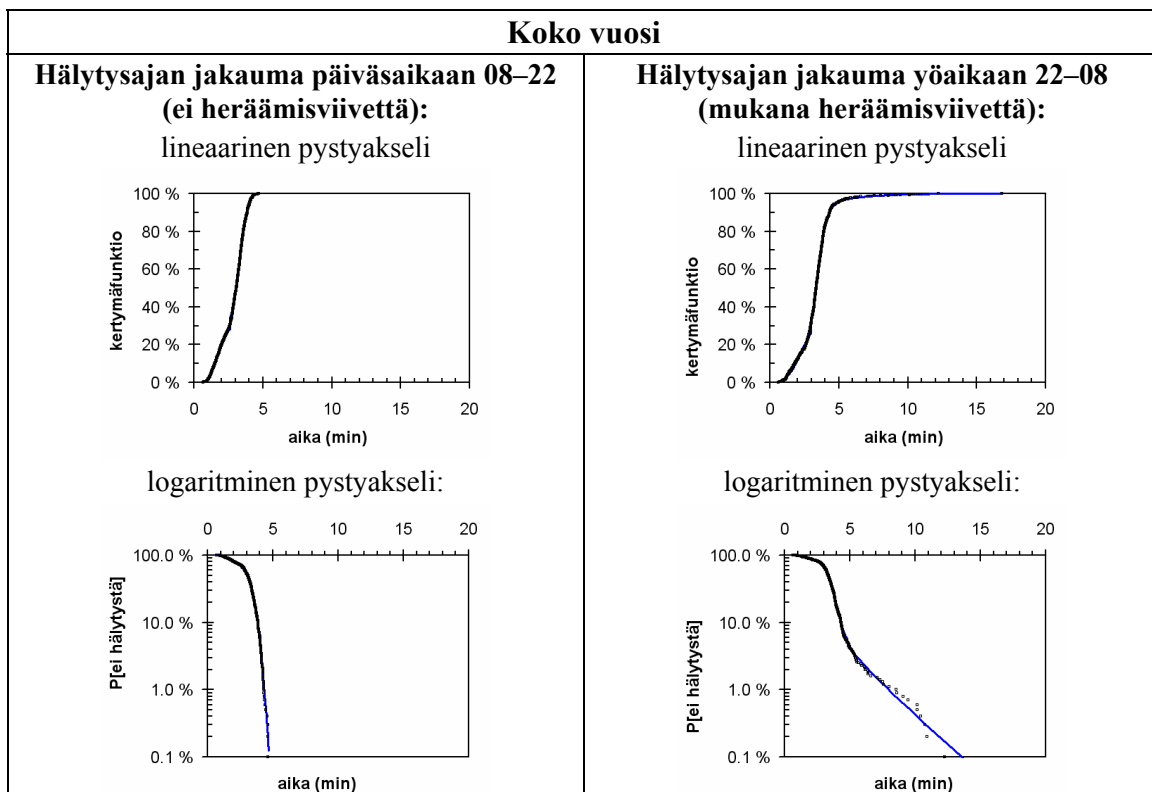
- kun palohuoneistossa on joku, joka voi reagoida palovaroittimeen tai -ilmaisimeen:
 - mediaani: 3,2 min
 - 5 %:n fraktiiliarvo: 4,3 min
- kun palohuoneistossa ei ole ketään, joka voisi reagoida palovaroittimeen tai -ilmaisimeen:
 - mediaani: 9,5 min
 - 5 %:n fraktiiliarvo: 24 min

Vaiheen 4 tulos eli mallin lopputulos esitetään kuvassa 266. Havaitsemisen jakaumaa luonnehtivat seuraava keskimääräinen (mediaani) arvo ja fraktiiliarvot:

¹⁸ Jakaumien yhdistäminen lasketaan käyttäen Monte Carlo -tekniikkaa.

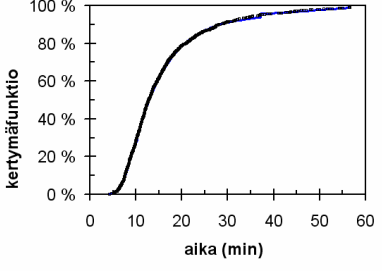
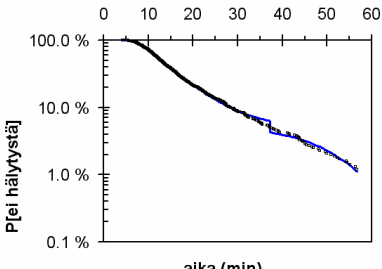
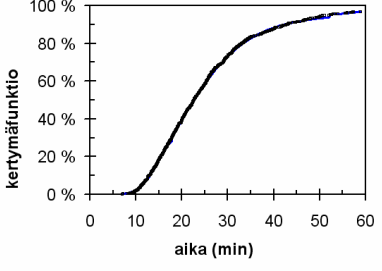
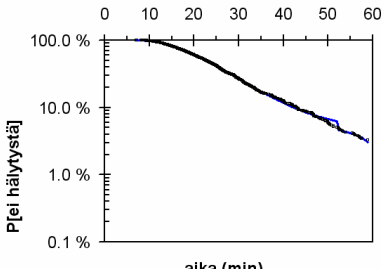
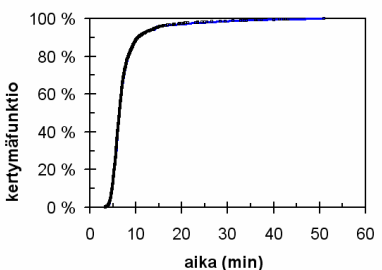
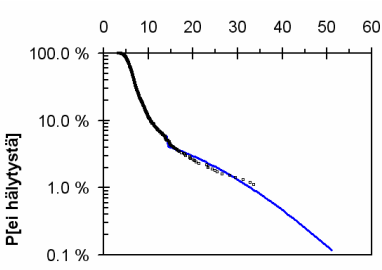
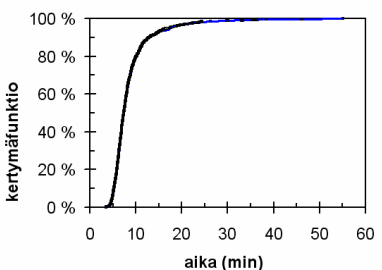
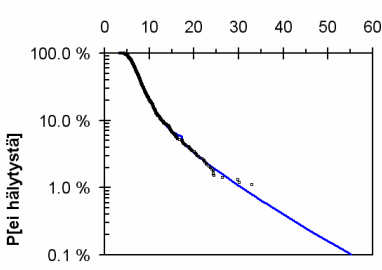
- mediaani: 3,8 min
- 5 %:n fraktiiliarvo: 21 min
- 1 %:n fraktiiliarvo: 28 min
- 0,1 %:n fraktiiliarvo: 43 min.

Taulukko 75. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulokset: tilanne, kun palohuoneistossa on joku, joka voi reagoida paloon^{a)}. Merkit esittävät Monte Carlo -otosta ja yhtenäiset käyrät siihen sovitettua jakaumaa (paloittain jatkuva kolmesta 3-parametrisesta Weibull-jakaumasta muodostuva funktio).

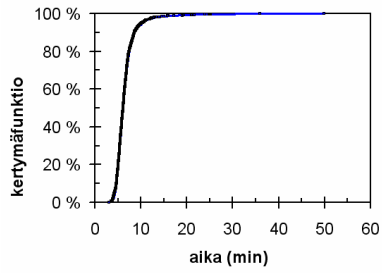


a) Tässä tapauksessa olohuoneen ja muiden huoneiden palot eivät poikkea toisistaan, koska palon ilmaisen oletetaan tapahtuvan kaikissa paloissa samalla tavalla.

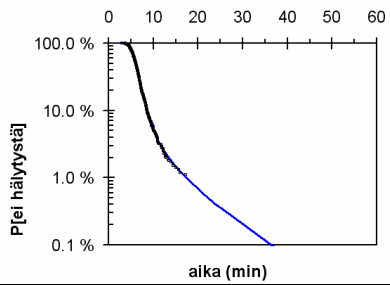
Taulukko 76. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulokset: olohuoneen tulipalo, tilanne, jossa palohuoneistossa ei ole ketään, joka voisi reagoida palovaroittimen tai -ilmaisimen hälytykseen. Merkit esittävät Monte Carlo -otosta ja yhtenäiset käyrät siihen sovitettua jakaumaa (paloittain jatkuva kolmesta 3-parametrisesta Weibull-jakaumasta muodostuva funktio).

elo–toukokuu	kesä- ja heinäkuu
<p>Hälytysajan jakauma klo 02–08: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 	<p>Hälytysajan jakauma klo 02–08: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 
<p>Hälytysajan jakauma klo 08–17: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 	<p>Hälytysajan jakauma klo 08–17: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 

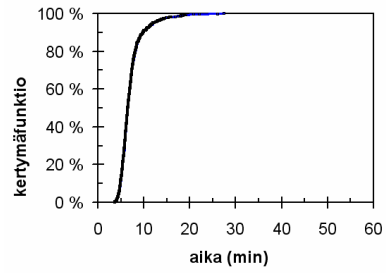
Hälytysajan jakauma klo 17–22:
lineaarinen pystyakseli



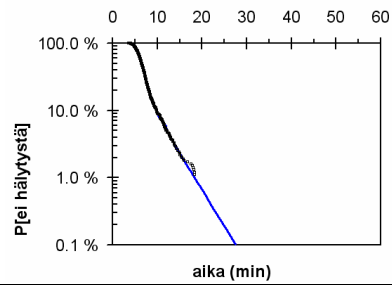
logaritminen pystyakseli:



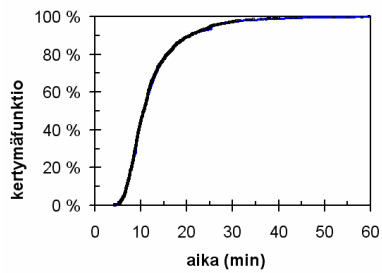
Hälytysajan jakauma klo 17–22:
lineaarinen pystyakseli



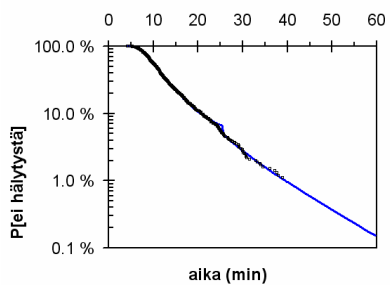
logaritminen pystyakseli:



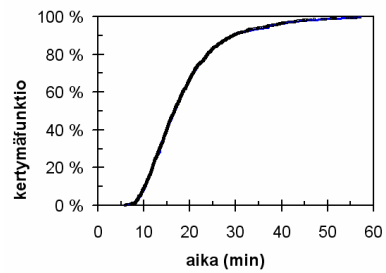
Hälytysajan jakauma klo 22–02:
lineaarinen pystyakseli



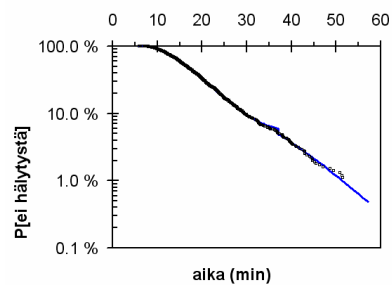
logaritminen pystyakseli:



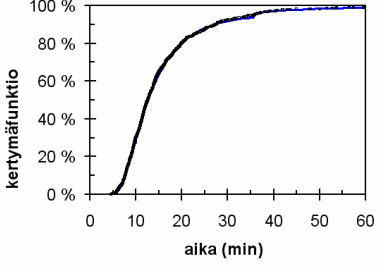
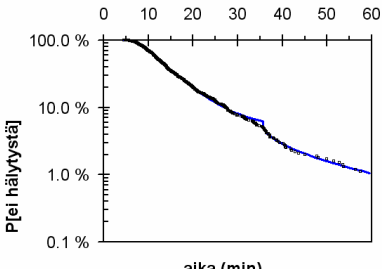
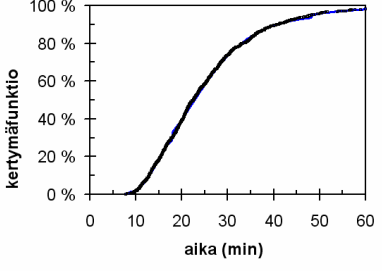
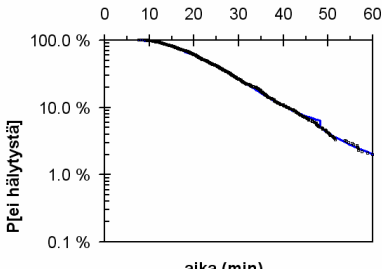
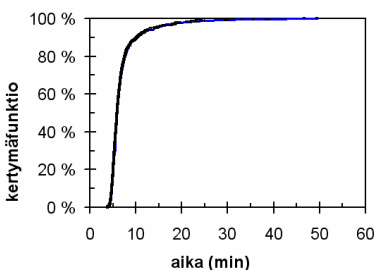
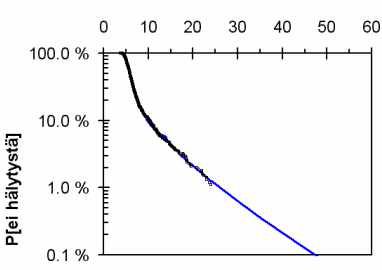
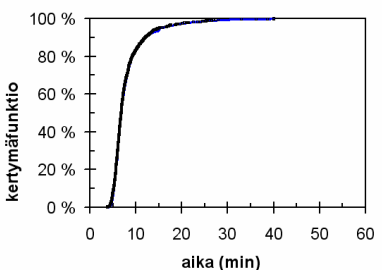
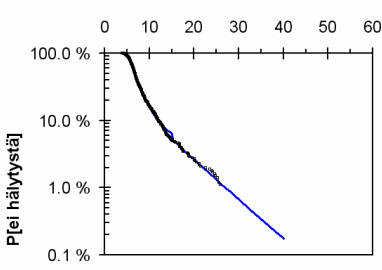
Hälytysajan jakauma klo 22–02:
lineaarinen pystyakseli



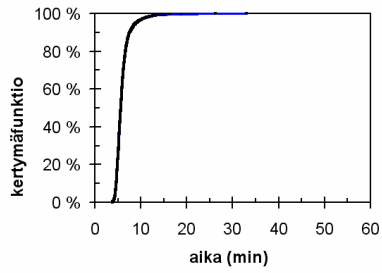
logaritminen pystyakseli:



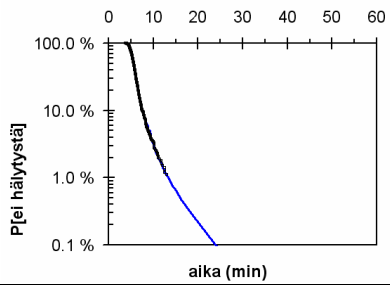
Taulukko 77. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulokset: makuuhuoneen tai keittiön tulipalo, tilanne, jossa palohuoneistossa ei ole ketään, joka voisi reagoida palovaroittimen tai -ilmaisimen hälytykseen. Merkit esittävät Monte Carlo -otosta ja yhtenäiset käyrät siihen sovitettua jakaumaa (paloittain jatkuva kolmesta 3-parametrisesta Weibull-jakaumasta muodostuva funktio).

elo–toukokuu	kesä- ja heinäkuu
<p>Hälytysajan jakauma klo 02–08: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 	<p>Hälytysajan jakauma klo 02–08: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 
<p>Hälytysajan jakauma klo 08–17: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 	<p>Hälytysajan jakauma klo 08–17: lineaarinen pystyakseli</p>  <p>logaritminen pystyakseli:</p> 

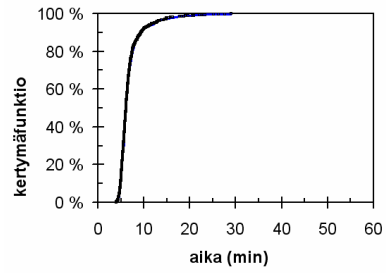
Hälytysajan jakauma klo 17–22:
lineaarinen pysty akseli



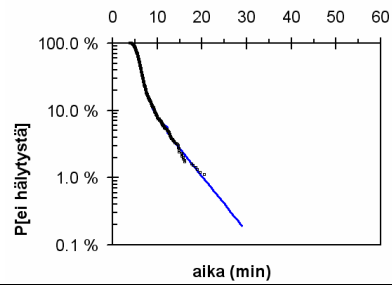
logaritminen pysty akseli:



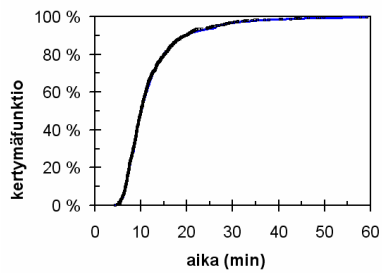
Hälytysajan jakauma klo 17–22:
lineaarinen pysty akseli



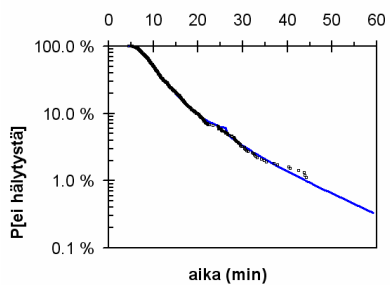
logaritminen pysty akseli:



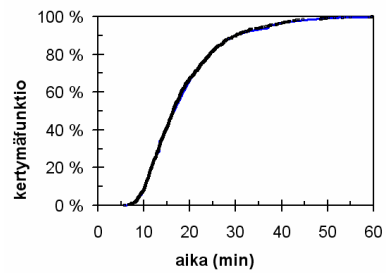
Hälytysajan jakauma klo 22–02:
lineaarinen pysty akseli



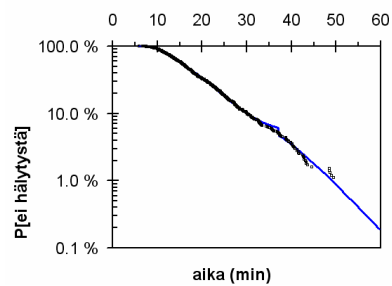
logaritminen pysty akseli:



Hälytysajan jakauma klo 22–02:
lineaarinen pysty akseli



logaritminen pysty akseli:



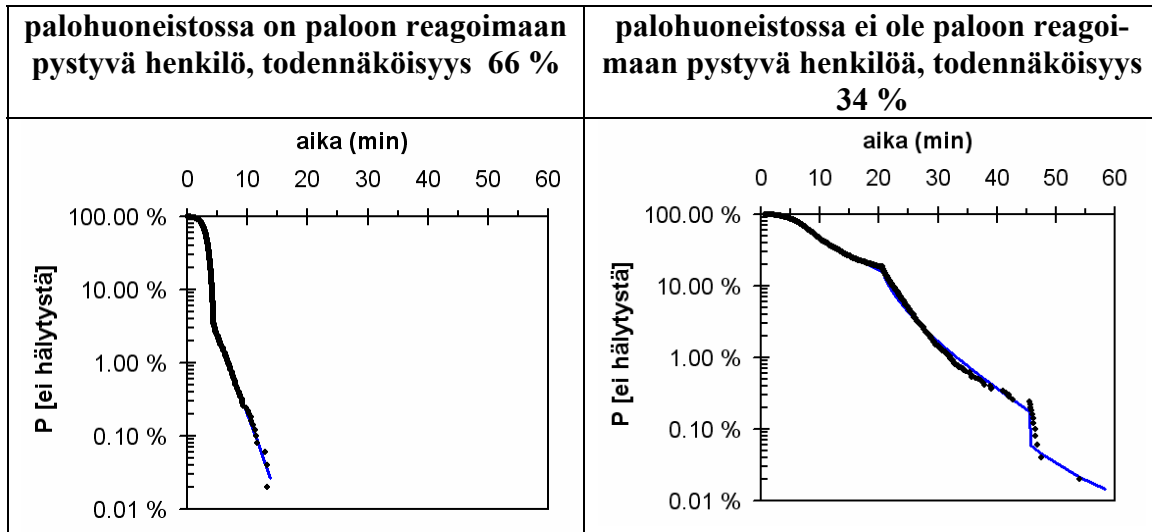
Taulukko 78. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin yhdistetyt tulokset koskien tilannetta, jossa palohuoneistossa on paloon reagoimaan pystyvä henkilö. Merkit esittävät Monte Carlo -otosta ja yhtenäiset käyrät siihen sovitettua jakaumaa (paloittain jatkuva neljästä 3-parametrisesta Weibull-jakaumasta muodostuva funktio).

palohuoneistossa on paloon reagoimaan pystyvä henkilö	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 93 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 78 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 25 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 20 %
<p>Hälytysajan jakauma:</p> <p>aika (min)</p>	<p>Hälytysajan jakauma:</p> <p>aika (min)</p>

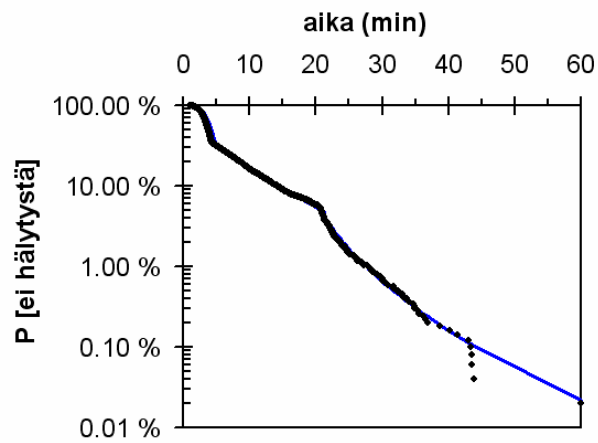
Taulukko 79. Hälytysajan yksinkertaistetun mallin yhdistetyt tulokset koskien tilannetta, jossa palohuoneistossa ei ole paloon reagoimaan pystyvää henkilöä.

palohuoneistossa ei ole paloon reagoimaan pystyvää henkilöä	
klo 17–08 (ilta ja yö)	klo 08–17 (päivä)
<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 7 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 22 % 	<ul style="list-style-type: none"> • elo–toukokuu: tilanteen todennäköisyys = 75 % • kesä- ja heinäkuu: tilanteen todennäköisyys = 80 %
<p>Hälytysajan jakauma:</p> <p>aika (min)</p>	<p>Hälytysajan jakauma:</p> <p>aika (min)</p>

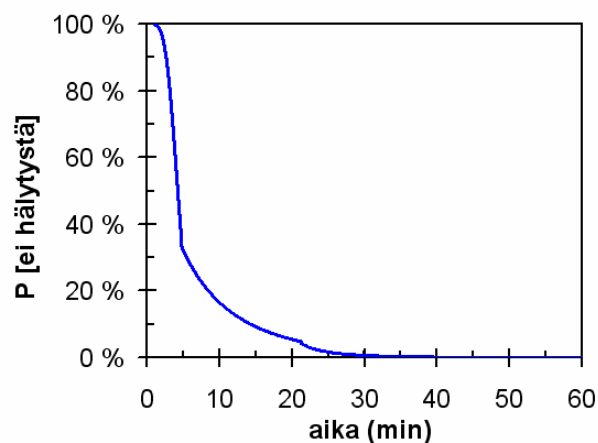
Taulukko 80. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulokset jaoteltuna sen mukaan, onko palohuoneistossa paloon reagoimaan pystyvä henkilö vai ei.



a)



b)



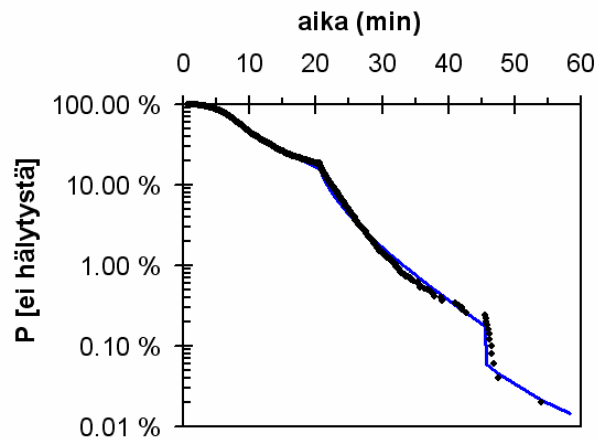
Kuva 266. Huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulos:
a) logaritminen ja b) lineaarinen todennäköisyysasteikko.

Muiden kohteiden kuin asuinhuoneistojen palot

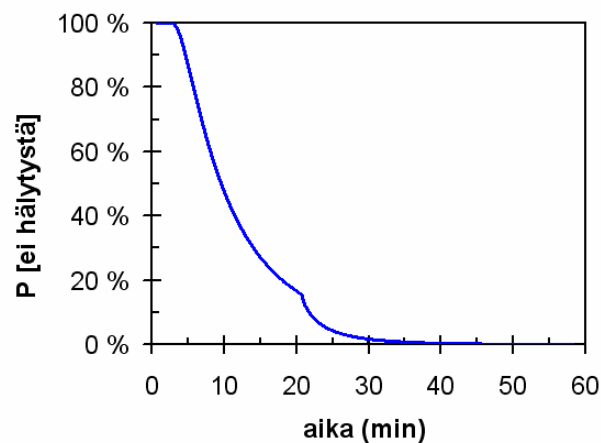
Muiden kohteiden kuin asuinhuoneistojen palojen havaitseminen perustuu liekkien tai syntyvän savun tai muun ilmiön kuten äänen havaitsemiseen. Se voidaan mallintaa käyttäen samaa mallia kuin huoneistopalon havaitsemisessa tilanteessa, jossa siellä ei ole paloon reagoimaan kykynevää henkilöä. Jakauma esitetään kuvassa 267.

- mediaani: 9,5 min
- 5 %:n fraktiiliarvo: 24 min
- 1 %:n fraktiiliarvo: 32 min
- 0,1 %:n fraktiiliarvo: 47 min.

a)



b)



Kuva 267. Muun kohteen palon kuin huoneistopalon hälytysajan yksinkertaistetun mallin tulos: a) logaritminen ja b) lineaarinen todennäköisyysasteikko.

Liite J: Kipinöiden aiheuttaman palovaaran mallintaminen

Tulipalossa syntyy voimakkaita virtauksia, jotka voivat kuljettaa mukanaan palavista kohteista irtoavia aineosasia. Jos nämä kipinöintinä ilmenevät kuumat hiukkaset laskeutuvat herkästi syttyvälle alustalle, ne voivat aiheuttaa alustan syttymisen ja siten levittää paloa edelleen. Tämä palon leviämistapa lienee ollut historiasta tuntemiemme kaupunkipalojen eräs tärkeimpiä palon leviämisen mekanismeja; tähän viittaa se, että katteiden paloturvallisuuden parantaminen oli eräs niistä keinoista, joilla nämä aluepalot saatiin kuriin.

Tässä liitteessä esitetään malli kipinöiden aiheuttamalle palovaaralle. Se käsittää seuraavat osat:

- kipinöiden syntyminen,
- kipinöiden kulkeutuminen virtausten mukana,
- kipinöiden mahdollisesti aiheuttama syttyminen.

Kipinöiden syntyminen ja ominaisuuksia

Palon leviämisen kannalta kipinöiden syntymisessä olennaisimpia tekijöitä ovat

- syntyvien kipinöiden määrä,
- kipinöiden koko, muoto ja ominaispaino (tiheys).

Syntyvien kipinöiden määrä vaikuttaa palon leviämisen todennäköisyyteen: palon leviäminen tällä mekanismilla on sitä todennäköisempää, mitä enemmän kipinöitä syntyy. Kipinöiden koko ja muoto puolestaan vaikuttaa toisaalta siihen, miten pitkälle kipinät lentävät ja toisaalta siihen, miten todennäköistä yhden kipinän aiheuttama syttyminen on: suuremmat kipinät aiheuttavat suuremman lämpörasituksen kohteeseensa ja siten niihin liittyy pieniä kipinöitä suurempi syttymistodennäköisyys. Kipinöiden tiheys vaikuttaa suoraan niiden liikkeen pystysuuntaiseen voimataseeseen: mitä pienempi tiheys kipinöillä on, sitä paremmin ne "kelluvat" ilmassa ja lentävät siten pitemmälle.

Kipinöiden syntyminen on tyypillinen palotekninen ongelma, jolle fysikaalinen mallintaminen eli kokeiden tekeminen on tällä hetkellä ainoa käytettävissä oleva mallinnustapa. Tämän tutkimuksen kannalta relevantein työ on Yoshiokan ym. [2004] tekemä kipinöiden syntymiseen liittyvä kokeellinen tutkimus, jossa aiheena on kaupunkipalon le-

viäminen. Tässä tutkimuksessa selvitettiin sekä palossa syntyvien kipinöiden kokonaisu-määrää että yksittäisten kipinöiden kokoa.

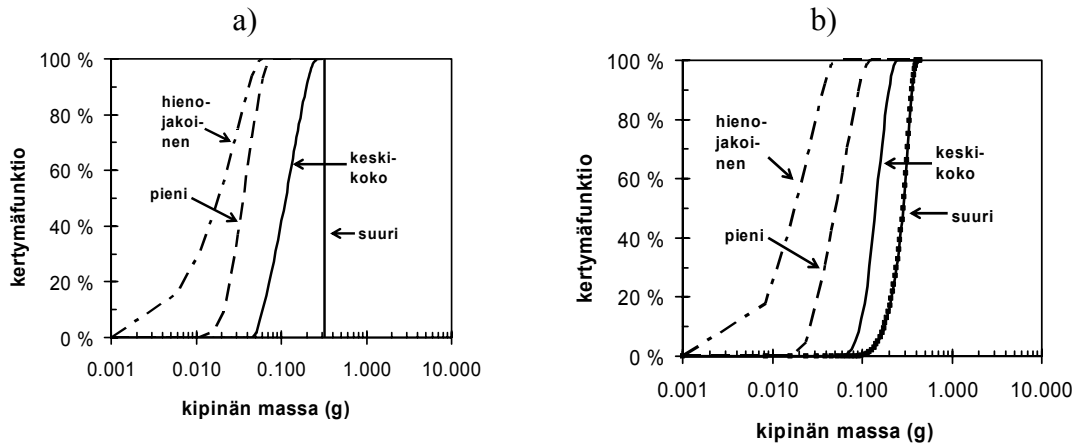
Muita tämän työn kannalta hyödyllisiä tutkimuksia liittyen kipinöiden välityksellä ta-pahtuvaan palon leviämiseen ovat Manzellonin ym. [2006], Ellisin [2000] ja Waterma-nin & Takatan [1969] tekemät kokeelliset tutkimukset sekä Woycheesen & Pagnin [1997] ja Anthenienin ym. [2005] tekemät laskennalliset tutkimukset.

Yoshioka ym. [2004] tutkivat tuulitunnelissa olevasta palavasta pienehköstä (lattia-ala n. 7 m^2) puurakenteisesta talosta lentäviä kipinöitä analysoimalla tuulen alapuolelle lä-helle palavaa taloa asetettuihin laakeisiin astioihin kertyneiden kipinöiden kokoa ja massaa. He käyttivät se kuivaa että kostutettua keräysastiaa. Seuraavassa tarkastellaan molemmilla keräystavoilla saatuja tuloksia. Kipinöiden analysoinnin tulokset esitetään taulukossa 81 [Yoshioka ym. 2004]. Nämä tulokset esitetään niitä parhaiten kuvaavien kolmiojakaumien avulla kuvassa 268. Kuvassa 269 esitetään näitä kolmiojakaumia ja eri luokkien esiintymistäajuuden avulla laskettu arvio palossa syntyvienkipinöiden massajakaumalle. Tätä jakaumaa on mallinnettu logaritmisesti normaalilla jakaumalla (yhtenäiset käyrät kuvassa 270). Tämän tilastollisen mallin mukaan kuivalla keräilyasti-alla kerättyjen hiukkasten keskimääräinen massa on hieman alle 0,1 g, keskihajonnan suhde keskimääräiseen arvoon on noin 2 ja jakauma on hyvin vino, vinousparametrin arvo on 16. Tämän perusteella tässä työssä käytetään kipinöiden massan jakaumana lo-garitmisesti normaalia jakaumaa, jonka keskimääräinen arvo 0,1 g, keskihajonnan suhde keskimääräiseen arvoon on noin 2 ja jakauman vinous on 16, ks. kuva 270.

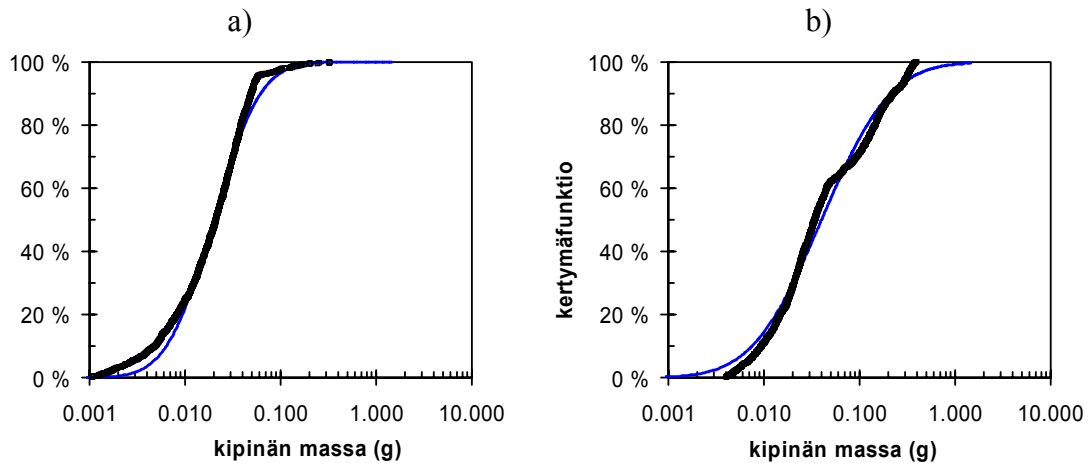
Taulukko 81. Yoshiokan ym. [2004] tulokset palossa syntyvien kipinöiden koosta.

KOSTEA NÄYTTEENKERÄYSASTIA				
luokka	suuri	keskikokoinen	pieni	hienojakoinen
S (cm ²)	≥ 4	2–4	1–2	0,25–1
V (cm ³) ^{†)}	≥ 9	1–9	0,14–1,0	0,002–0,14
määrä	1	15	44	308
osuus	0,3 %	4,1 %	12,0 %	83,7 %
massa/kipinä (g)				
keskiarvo	0,325	0,108	0,038	0,0090
minimi	0,325	0,049	0,012	0,0010
maksimi	0,325	0,266	0,076	0,0610
keskihajonta	0,325	0,053	0,016	0,0075
massa/kipinä (g): kolmiojakauman parametrit				
a (g)	-	0,049	0,012	0,001
b (g)	-	0,266	0,076	0,061
c (g)	-	0,049	0,026	0,001
KUIVA NÄYTTEENKERÄYSASTIA				
luokka	suuri	keskikokoinen	pieni	hienojakoinen
S (cm ²)	≥ 4	2–4	1–2	0,25–1
V (cm ³)	≥ 9	1–9	0,14–1,0	0,002–0,14
määrä	1	15	44	308
osuus	6,5 %	16,1 %	24,2 %	53,2 %
massa/kipinä (g)				
keskiarvo	0,273	0,144	0,050	0,0170
minimi	0,087	0,058	0,021	0,0040
maksimi	0,412	0,245	0,125	0,0520
keskihajonta	0,138	0,060	0,025	0,0104
massa/kipinä (g): kolmiojakauman parametrit				
a (g)	0,087	0,058	0,021	0,004
b (g)	0,412	0,245	0,125	0,052
c (g)	0,331	0,128	0,021	0,004

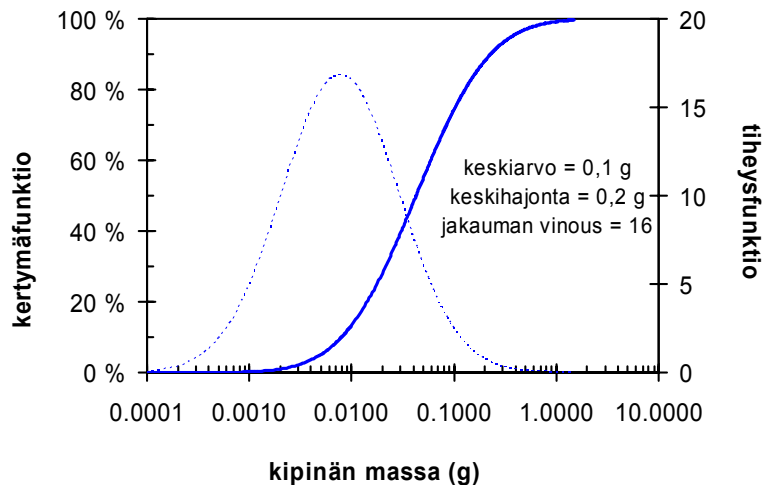
^{†)} Tilavuus, jos kipinä oletetaan pallomaiseksi.



Kuva 268. Yoshiokan ym. [2004] mittaamien eri luokkiin kuuluvien kipinöiden massan jakautumien kuvaaminen kolmiojakaumalla: a) kostea näytteenkeräysastia ja b) kuiva näytteenkeräysastia.



Kuva 269. Yoshiokan ym. [2004] tuloksista johdettu kipinöiden massajakauma: a) kostea näytteenkeräysastia ja b) kuiva näytteenkeräysastia. Yhtenäiset käyrät kuvaavat massajakaumiin pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettuja logaritmisesti normaaleja jakaumia.



Kuva 270. Yoshiokan ym. [2004] tuloksien perustella saatu kipinöiden massan logaritmisesti normaali tilastollinen jakauma.

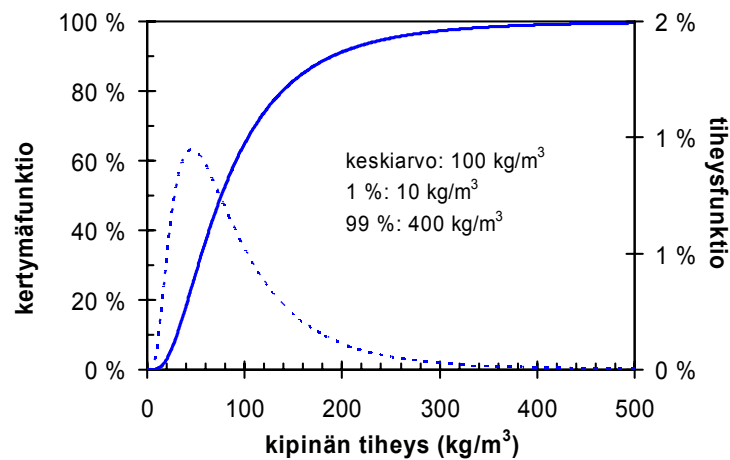
Kipinöiden tiheyden yläraja-arviona voidaan käyttää sen materiaalin tiheyttä, joka kipinöitä synnyttää. Tämän työn puitteissa kipinöitä tuottavaksi palavaksi aineeksi voidaan olettaa kuusi- tai mäntypuu, joiden tiheys on noin $400\text{--}500\text{ kg/m}^3$. Toisaalta palon muodostamien virtausten mukana lentävien objektien tiheyden alaraja on periaatteessa hyvin pieni (ajatellana vaikka paperin palamisessa jäljelle jäävää hyvin kevyttä ainetta), mutta tässä työssä voidaan keskittyä puuhiiltä muistuttavien objektien tiheyteen. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 82) esitetään muutamissa tutkimuksissa esilletulevia puuhiilen tiheysarvoja. Kun kipinöiden tiheyttä arvioidaan näiden lukuarvojen mukaan, havaitaan, että se vaihtelee noin arvosta 10 kg/m^3 arvoon $400\text{--}500\text{ kg/m}^3$ keskimääräisen arvon ollessa suuruusluokkaa 10 kg/m^3 . Tämän perusteella tässä työssä kuvataan kipinöiden tiheyttä kuvassa 271 esitettyä jakaumaa käyttäen (keskiarvo 100 kg/m^3 , 1 %:n fraktiili 10 kg/m^3 ja 99 %:n fraktiili 400 kg/m^3).

Taulukko 82. Puuhiilen tiheystietoja.

Puumateriaali	Puun tiheys ρ_w (kg/m ³)	Hiilen tiheys ρ_c (kg/m ³)	Viite
		suuri ^{a,b} : 40 & 30 keskikokoinen: 10–110 & 20–140 pieni: 40–270 & 50–360	Yoshioka ym. [2004]
Redwood	312	176	Tran & White [1992]
Southern Pine	508	302	
Red Oak	660	322	
Basswood	420	255	
spruce	400	120	Fredlund, B. 1988
		190–480	Ellis [2000]
		100	Waterman & Takata [1969]
		190	Jiang ym. [2005]
kuusi		110–120	Alakangas [2000]
mänty		130–140	

a) Pätee, jos hiukkaset oletetaan pallomaisiksi.

b) Eri arvot vastaavat kostealla ja kuivalla näytteenkeräysastialla kerättyjä näytteitä.



Kuva 271. Kipinöiden tiheyden logaritmisesti normaali tilastollinen jakauma.

Kipinöiden kulkeutuminen virtausten mukana

Kipinöiden massan väheneminen niiden palamisen vuoksi

Kipinöiden koko pienenee sitä mukaa, kun ne palavat. Tse ja Fernandez-Pello [1998] mallintavat kipinähiukkasten palamista Tarifan ym. [1967] tekemissä kokeissa saatujen tulosten perusteella. Heidän mukaansa hyvä yhteenspiivuus Tarifan ym. [1967] tulosten kanssa saadaan, kun hiukkasen todellisen halkaisijan D pienenemiselle käytetään mallia

$$D(0)^4 - D(t)^4 = \sqrt{3} \beta^2 t^2 \quad (57a)$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} (D(t)^4) = -2\sqrt{3} \beta^2 t, \quad (57b)$$

missä β on virtauksista Reynoldsin luvun Re ja Prandtin luvun Pr kautta riippuva suure:

$$\beta = \beta_0 \left(1 + 0,276 \cdot Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \right), \quad (58)$$

missä β_0 on vakio ja

$$Re_D = \frac{u_w D}{\nu}, \quad (59a)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \approx 0,7, \quad (59b)$$

missä u_w on virtausnopeus, D on hiukkasen todellinen halkaisija ja ν on ilman kineemaattinen viskositeetti ja α on ilman lämpötilan johtavuus. Vakion β_0 arvo riippuu mm. hiukkasten muodosta.

Pyöreät kipinät

Pyöreille hiukkasille vakion β_0 arvo on $1,8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Yhtälön D1a mukaan siis

$$D(t) = D(0) \left[1 - \sqrt{3} \frac{\beta^2 t^2}{D(0)^4} \right]^{1/4}. \quad (60)$$

On mielenkiintoista verrata tätä tulosta Woycheesen ja Pagnin [1997] käyttämään malliin

$$\frac{d}{dt}D(t) = -4\alpha\left(\frac{\rho_a}{\rho_s}\right)\ln(1+B)\cdot D(t)^{-1} \quad (61a)$$

$$\Rightarrow D(t) = D(0)\sqrt[4]{1 - 8\frac{\alpha}{D(0)}\left(\frac{\rho_a}{\rho_s}\right)\ln(1+B)t} \quad (61b)$$

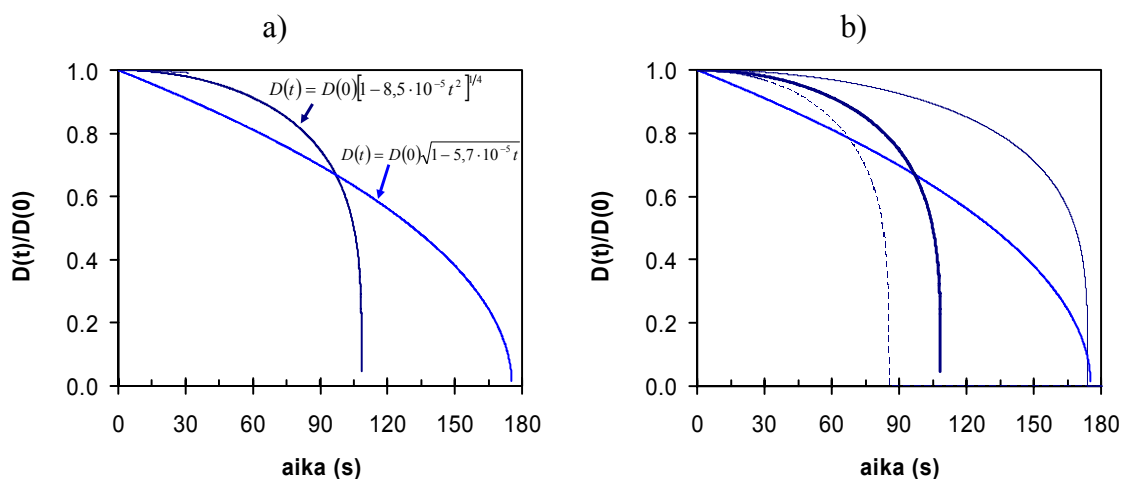
missä $B \approx 1,2$ on aineensiirtoluku ja ρ_s on hiukkasen tiheys. Tarkastellaan 1 g:n painoista hiukkasta, jonka tiheys on $\rho_s = 100 \text{ kg/m}^3$. Tällöin hiukkasen tilavuus V on $10^{-3} \text{ kg}/100 \text{ kgm}^{-3} = 10^{-5} \text{ m}^3$ ja sen alkuhalkaisija on $D(t) = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} = 2,7 \text{ cm}$.

Virtausten nopeus on suuruusluokkaa 10 m/s ja ilman ominaisuudet ovat $\nu \approx 2 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ ja $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ja siten $\beta \approx 50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Eri lausekkeet säteen muutokselle ajan mukana ovat siten

$$\text{malli 1: } D(t) = D(0)\left[1 - 8,5 \cdot 10^{-5} t^2\right]^{1/4} \Rightarrow t_{\text{burnout}} = 108 \text{ s}$$

$$\text{malli 2: } D(t) = D(0)\sqrt[4]{1 - 5,7 \cdot 10^{-5} t} \Rightarrow t_{\text{burnout}} = 175 \text{ s}$$

missä t_{burnout} ovat kipinöiden elinajat. Näillä lausekkeilla lasketut kipinöiden suhteelliset koot ($D(t)/D(0)$) esitetään kuvassa 272a. Kuvassa 272b tarkastellaan, miten mallin $D(t) = D(0)\left[1 - 8,5 \cdot 10^{-5} t^2\right]^{1/4}$ parametria $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ tulisi muuttaa, jotta kipinän elin-aika kasvaisi samaksi kuin mallin 2 antama tulos: tarvittava muutos on $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \rightarrow 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ eli $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ tai n. 60 %. Jatkossa käytetään tähän perustuvaa arvioita parametrin β_0 vaihtelevuudelle: $\beta_0 = 1,8 \times 10^{-7} (\pm 60 \%) \text{ m}^2/\text{s}$.



Kuva 272. a) Kahden pyöreiden kipinöiden palamismallin vertaaminen ja b) mallin parametrien vaikutuksen tutkiminen.

Sylinterinmuotoiset kipinät

Kaavaa

$$\frac{d}{dt}(D(t)^4) = -2\sqrt{3}\beta^2 t \quad (62)$$

voidaan soveltaa sylinterinmuotoisille hiukkasille seuraavalla tavalla [Tse ja Fernandez-Pello 1998]: Koska pallon pinta-ala on $S_{sph} = \pi D_{sph}(t)^2$, voidaan em. yhtälö kirjoittaa

$$\frac{d}{dt} S_{sph} = -\frac{\pi^2 \sqrt{3} \beta^2 t}{S_{sph}} \quad (63)$$

Sylinterinmuotoisen hiukkasen (pituus L , halkaisija D_{cyl}) pinta-ala on $S_{cyl} = \pi D_{cyl}(t)L = \pi E D_{cyl}(t)^2$, missä on otettu käyttöön sylinterin muotosuhde $E = L/D_{cyl}$. Sijoittamalla tämä lauseke saadaan

$$\frac{d}{dt}(D_{cyl}(t)^2) = -\frac{\pi \sqrt{3} \beta^2 t}{S_{cyl}} \quad (64)$$

josta saadaan sylinterimäisen hiukkasen halkaisijan pienenemiselle yhtälö

$$\frac{d}{dt}(D_{cyl}(t)^4) = -\frac{2\sqrt{3}\beta^2 t}{E} \quad (65)$$

Tämä voidaan ratkaista muotoon

$$D_{cyl}(t) = D_{cyl}(0) \left[1 - \frac{\sqrt{3}\beta^2 t^2}{E D_{cyl}(0)^4} \right]^{1/4} \quad (66)$$

Yhteenveto

Kipinän halkaisija pienenee sen palamisen vuoksi ao. kaavan mukaisesti

$$D(t) = D(0) \left[1 - A \frac{\beta^2 t^2}{D(0)^4} \right]^{1/4} \quad (67)$$

missä

- pallonmuotoisille kipinöille $A = \sqrt{3}$,
- sylinterinmuotoisille $A = \sqrt{3}/E$,

missä E on sylinterin muotosuhde (pituuden suhde halkaisijaan). Sijoittamalla $m = \rho\pi D^3/6$ saadaan kipinän massan vähenemiselle lauseke

$$m(t) = m(0) \cdot \left[1 - A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)} \right)^{4/3} \cdot \beta^2 t^2 \right]^{3/4}, \quad (68a)$$

missä

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_0 \left(1 + 0,276 \cdot \text{Re}_D^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} \right) \\ \beta_0 &= 1,8 \times 10^{-7} (\pm 60\%) \text{ m}^2/\text{s}. \end{aligned} \quad (68b)$$

ja

- pallonmuotoisille kipinöille $A_m = \sqrt{3}(\pi/6)^{4/3}$,
- sylinterinmuotoisille $A_m = (\sqrt{3}/E)(\pi/6)^{4/3}$.

Lasketaan tulevaa tarvetta varten vielä kipinän massan aikaderivaatta

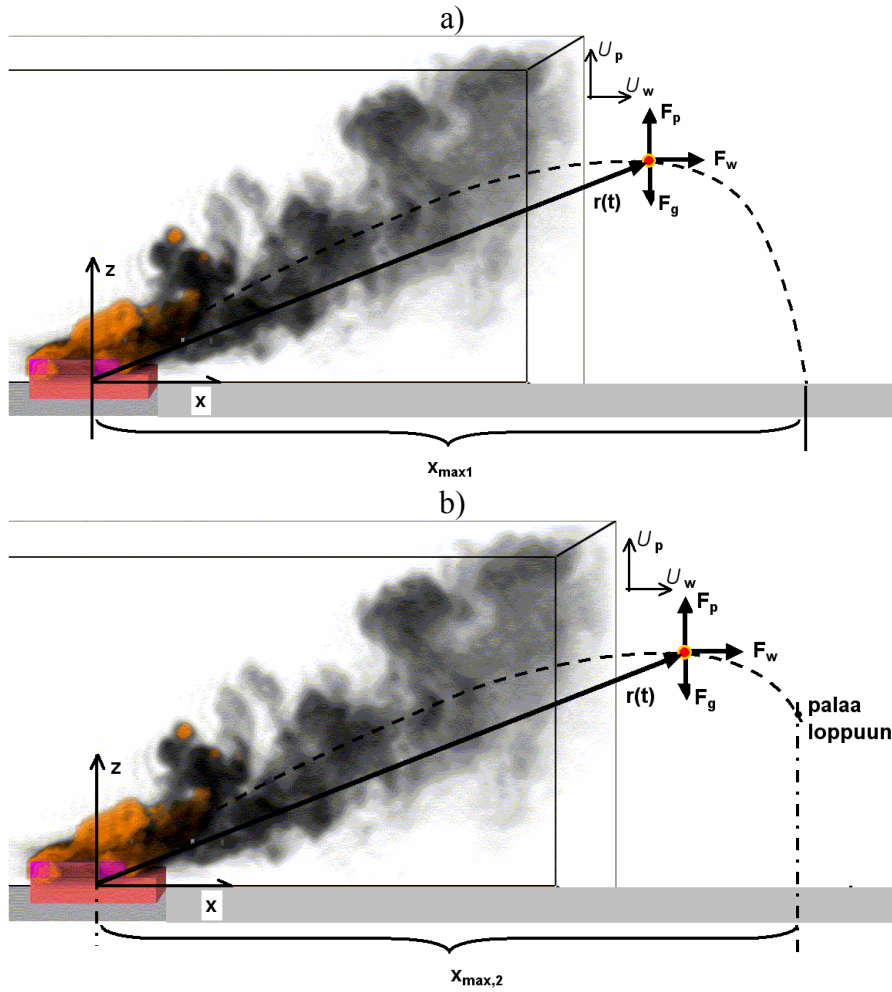
$$\frac{dm(t)}{dt} = -\frac{3}{2} A_m \cdot m(0) \cdot \frac{\left(\frac{\rho(0)}{m(0)} \right)^{4/3} \cdot \beta^2 t}{\left[1 - A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)} \right)^{4/3} \cdot \beta^2 t^2 \right]^{1/4}}. \quad (69)$$

Kipinöiden lentorata

Kipinään vaikuttavat voimat

Tulipalosta aiheutuvassa virtauksessa olevaan kipinään vaikuttavat seuraavat voimat (ks. Kuva):

- palon synnyttämän nostepatsaan virtauksen ja tuulen synnyttämä voima F_D ;
- painovoima F_g .



Kuva 273. Kipinän kulkeutuminen virtausten mukana: a) kun kipinä ei pala loppuun ilmassa ja b) kun kipinä palaa loppuun ilmassa.

Kun hiukkanen, jonka massa on $m(t)$ on paikassa $\mathbf{r}(t)$ hetkellä t , sen nopeus on

$$\mathbf{v}(t) = \frac{d\mathbf{r}(t)}{dt}. \quad (70)$$

Kun nostepatsaan virtausnopeus on \mathbf{U}_p ja tuulen nopeus on \mathbf{U}_w , niiden aiheuttama virtausnopeus on $\mathbf{W} = \mathbf{U}_p + \mathbf{U}_w$ ja syntyvä voima \mathbf{F}_D on

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_D &= \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot A_{proj} \cdot |\mathbf{W}(t) - \mathbf{v}(t)| (\mathbf{W}(t) - \mathbf{v}(t)) = \\ &= \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot A_{proj} \cdot \\ &\quad \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_z - V_z)^2} \cdot (W_x(t)\mathbf{u}_x + W_z(t)\mathbf{u}_z - V_x(t)\mathbf{u}_x - V_z(t)\mathbf{u}_z) \end{aligned} \quad (71)$$

missä C_D on hiukkasen muodosta ja virtauksen voimakkuudesta riippuva kerroin, ρ_a on ilman tiheys normaalipaineessa ja lämpötilassa T_f , A_{proj} on hiukkasen projisoitu ala ja \mathbf{u}_x ja \mathbf{u}_z ovat x - ja z -suuntaiset yksikkövektorit.

Lämpötila T_f , jossa kaasun ominaisuudet lasketaan, on keskiarvo hiukkasen pinnan lämpötilasta T_s ja kaukana vallitsevasta lämpötilasta, jonka oletetaan olevan $T_\infty = 20 \text{ °C}$. Lämpötilalle T_s käytetään arvoa 700 °C [Tse & Fernandez-Pello 1998], joten $T_f = 360 \text{ °C} \approx 630 \text{ K}$.

Palon nostepatsaan virtausnopeus

Palon yläpuolella olevan nostevirtauksen (palopatsas) ominaisuuksien kuvaamiseksi on kehitetty useita eri malleja, joista kaksi varsin yleisesti käytettyä mallia ovat ns. Heskestadin palopatsasmalli [Karlsson & Quintiere 2000, s. 63–65] ja McCaffreyn palopatsasmalli [Karlsson & Quintiere 2000, s. 67]. Näillä molemmilla malleilla voidaan laskea palopatsaan lämpötilan ja virtausnopeuden pystysuuntainen jakauma, kun tunnetaan tulipalon voimakkuus eli sen paloteho \dot{Q} . Heskestadin mallilla voidaan lisäksi laskea palopatsaan horisontaalinen ulottuvuus [Heskestad 1995].

Palopatsasmallia ei ole syytä valita umpimähkään, vaan perustellusti. Tässä työssä valintakriteerinä käytetään sitä, että kumpi palopatsasmalli tuottaa paremmin FDS-ohjelmalla laskettuja tuloksia vastaavia arvoja. Kuvassa 274 esitetään palopatsas- ja FDS-mallin tuottamien tulosten vertaaminen. Voidaan havaita, että McCaffreyn palopatsasmallilla saavutetaan jonkin verran parempi yhteensopivuus kuin Heskestadin palopatsasmallilla. Siksi jatkossa käytetään McCaffreyn palopatsasmallia, jonka mukaan pystysuuntainen virtausnopeus palopatsaassa U_p (yksikkönä m/s) voidaan laskea seuraavasti:

$$U_p = \kappa \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^\eta \cdot \dot{Q}_c \quad (72)$$

missä paloteho \dot{Q} ilmaistaan kilowateissa ja suure $\dot{Q}_c \approx 0,7\dot{Q}$ on palopatsaan virtausten aikana kuljettumalla siirtyvä osuus palotehosta. Tekijöiden κ ja η arvot riippuvat tekijästä $z/\dot{Q}^{2/5}$ seuraavasti:

- $z/\dot{Q}^{2/5} < 0,08$: $\kappa = 6,8 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$, $\eta = 1/2$;
- $0,08 < z/\dot{Q}^{2/5} \leq 0,2$: $\kappa = 1,9 \text{ m}\cdot\text{kW}^{-1/5}\text{s}^{-1}$, $\eta = 0$;
- $z/\dot{Q}^{2/5} > 0,2$: $\kappa = 1,1 \text{ m}\cdot\text{kW}^{-1/3}\text{s}^{-1}$, $\eta = -1/3$.

Palopatsaan horisontaaliselle ulottuvuudelle¹⁹ σ_U (yksikkönä m) käytetään Heskestadin malliin perustuvaa arvoa

$$\sigma_U = 0,14 \cdot \mathcal{G} \cdot \sqrt{\frac{T_c}{T_\infty}} \cdot z \quad (73)$$

missä T_c on lämpötila palopatsaan keskiviivalla (Kelvin-yksiköissä lausuttuna),

$$T_c = T_\infty + \left(\frac{\kappa}{4,0} \right) \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} \cdot T_\infty \quad (74)$$

ja T_∞ on ympäristön lämpötila (Kelvin-asteissa). Parametrille \mathcal{G} on mitattu arvoja 0,85:stä 1,5:een luotettavimman arvon ollessa [Heskestad 1995, s. 2–12]. Tämän perusteella parametria \mathcal{G} mallinnetaan kolmiojakaumalla, jonka minimiarvo on 0,84, maksimiarvo on 1,5 ja tyyppiarvo 1,1. Palopatsaan nopeuden riipuvuus horisontaalisesta (x -suuntaisesta) etäisyydestä palopatsaan akselilta oletetaan Gaussiseksi [Heskestad 1995] eli

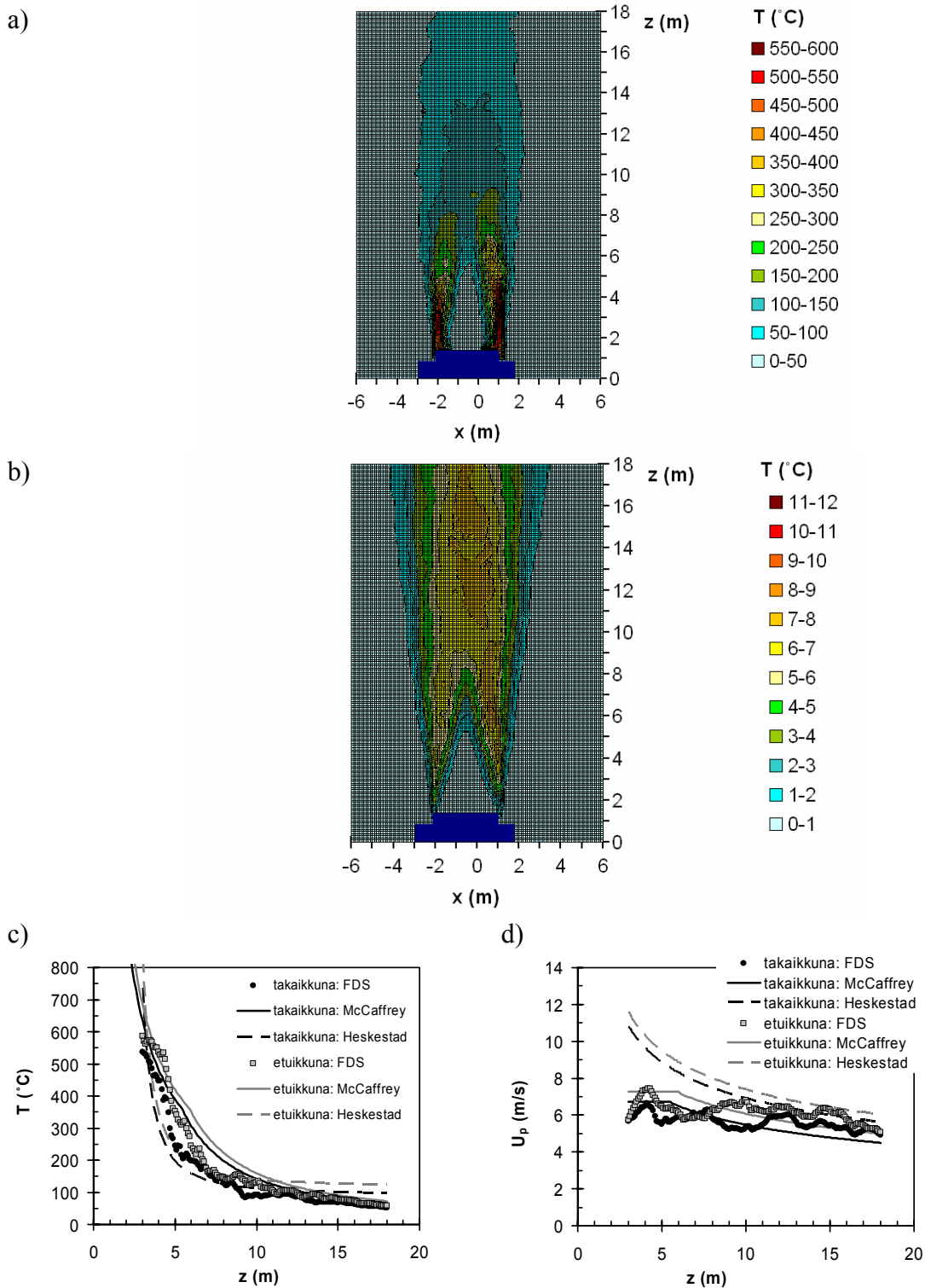
$$U(x) = U_p \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{\sigma_U} \right)^2 \right]. \quad (75)$$

Kun tuulee, palopatsas kallistuu tuulen suuntaan määrällä, joka riippuu palopatsaan tyypillisen virtausnopeuden u^* ja tuulen nopeuden u_w aiheuttamien voimien suhteesta (Kuva). Kokeellisesti määritetty määrällinen lauseke palopatsaan kallistuskulmalla ϕ on

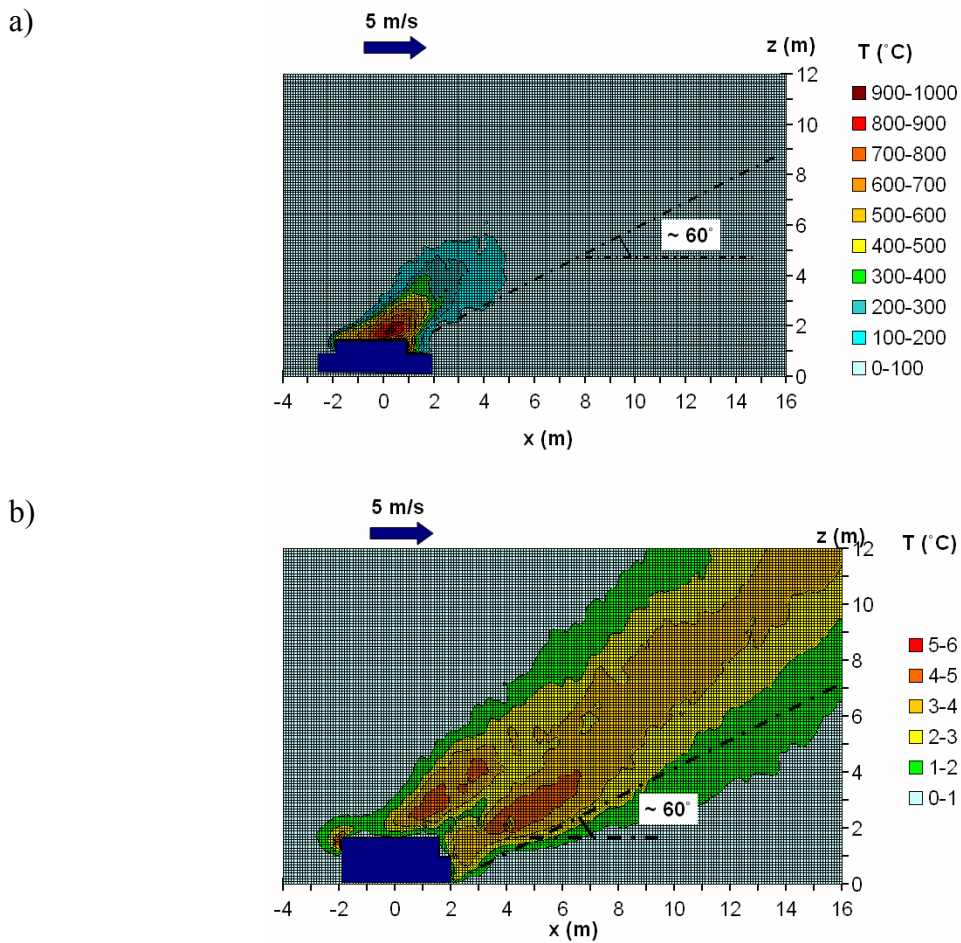
$$\phi = \begin{cases} 0, & U_w < u^* \\ \arccos \left(\sqrt{\frac{u^*}{U_w}} \right) \approx \arccos \left(\sqrt{\frac{1}{U_w}} \right), & U_w > u^* \end{cases} \quad (76)$$

missä $u^* \approx 2(\dot{Q}H_c^{-1}D^{-1}\rho_v^{-1})^{1/3}$ (H_c on lämpöarvo (kJ/kg), D tulipalon tehollinen halkaisija (m) ja ρ_v polttoainehöyryjen tiheys (kg/m³)). Kun sijoitetaan tyypilliset arvot, $\dot{Q} \sim 10$ 000 kW, $H_c \sim 20$ 000 kJ/kg, $D \sim 5$ m ja $\rho_v \sim 0,5$ kg/m³, saadaan $u^* \approx 1$ m/s, mikä perustelee yo. lausekkeen alemman likiarvoistuksen. Kun esim. $U_w = 5$ m/s, on kallistuskulma noin 60°. Kallistuskulmaa laskettaessa käytetään tuulen nopeutta referenssikorkeudella (ks. alla), joka yleensä on 10 m.

¹⁹ Tämä on horisontaalinen matka, jolla palopatsaan virtausnopeus putoaa 37 %:iin huippuarvostaan.



Kuva 274. Palopatsasmallin valinta: a ja b) FDS-ohjelmalla lasketut lämpötilat ja pystysuuntaiset nopeudet, c) palopatsasmalleja käyttäen laskettujen lämpötila-arvojen vertaaminen FDS-tulokseen ja d) palopatsasmalleja käyttäen laskettujen nopeusarvojen vertaaminen FDS-tulokseen.



Kuva 275. Esimerkki palopatsaan kallistumisesta tuulen vaikutuksesta (tuulen nopeus 5 m/s).

Tuulen nopeus

Tuulen nopeus U_w kasvaa maanpinnan tasolta ylöspäin. Davenportin mallin [Dyrbye & Hansen 1997] mukaan

$$U_w(z) = U_{bas} \left(\frac{z}{z_{bas}} \right)^{\alpha_T}, \quad (77)$$

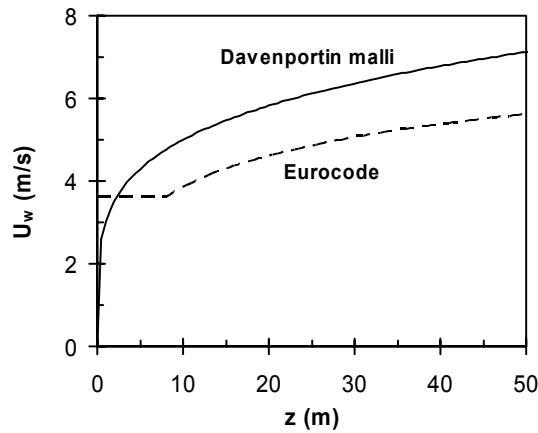
ja Eurocoden [EC 1] mukaan

$$U_w(z) = \begin{cases} U_{bas} k_{WT} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), & z > z_{\min} \\ U(z_{\min}) & \end{cases}, \quad (78)$$

missä tekijät U_{bas} riippuu paikan tuulisuudesta ja se voidaan määrittää tuulitilastojen perusteella alla esitetyllä tavalla. Näitä eri malleja verrtaan kuvassa Kuva . Tekijän z_{bas} arvo on 10 m ja tekijät a_T , k_{WT} , z_0 ja z_{min} riippuvat maastosta alla olevassa taulukossa esitetyllä tavalla (Taulukko 83). Eri maastotyyppien määritelmien perusteella tiivistä ja matalaa rakennustapaa käyttäen toteutettu pientaloalue vastaa parhaiten luokkaa II, jolle $a_T = 0,22$, $k_{WT} = 0,22$, $z_0 = 0,3$ m ja $z_{min} = 8$ m.

Taulukko 83. Tekijät z_{bas} , a_T , k_{WT} , z_0 ja z_{min} eri maastotyypeille.

Maastotyyppi	a_T	k_{WT}	z_0 (m)	z_{min} (m)
I: tasainen (esim. avomeri, pelto)	0.12	0.17	0.01	2
II: avoin maaseutumainen maasto (paikka paikoin taloja ja puita)	0.16	0.19	0.05	4
III: esikaupunkialue, teollisuusalue, metsä	0.22	0.22	0.3	8
IV: kaupunkimainen alue, jossa ainakin 15 % taloista yli 15 m korkeita	0.3	0.24	1	16

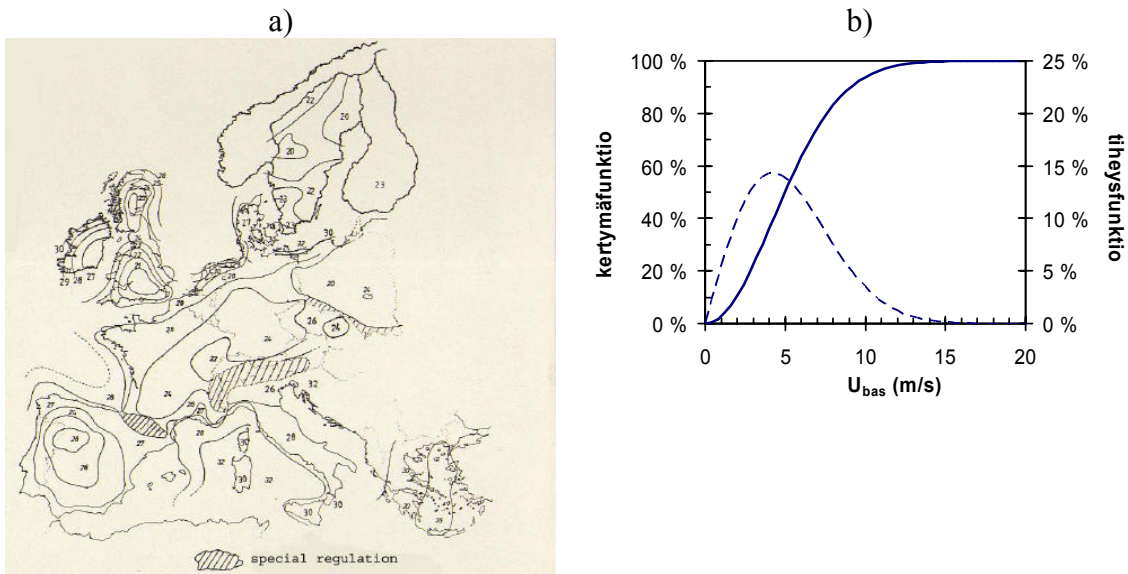


Kuva 276. Keskimääräistä referenssituulennopeutta, $U_{bas} \approx 5$ m/s, vastaavat tuulennopeuden riippuvuudet korkeudesta z .

Referenssituulennopeus U_{bas} on tilastollinen suure, joka noudattaa Weibull-jakaumaa [Tammelin1991]. Sen tiheysfunktio on siis

$$F(U_{bas}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U_{bas}}{U_c}\right)^k\right], \quad (79)$$

missä muotoparametrille käytetään yleisesti arvoa $k = 2$. Paikkaparametrin U_c arvo voidaan määrittää tuulitilastojen perusteella. Eräs tuulen voimakkuuden tilastoinnin käyttökohteita on äärimmäisen kovien tuulien esiintymistäajuuden selvittäminen. Kuva 277a esittää tuulen nopeuden arvoja, joiden esiintymistodennäköisyys on 10 min per 50 vuotta $= 3,8 \cdot 10^{-7}$. Jotta Suomea vastaava tuuli, 23 m/s, vastaisi em. Weibull-jakauman kyseistä fraktiiliarvoa, on suurelle U_c käytettävä arvoa 5,982 m/s. Arvoilla $U_c = 5,982$ m/s ja $k = 2$ laskettu Weibull-jakauma esitetään kuvassa 277b; sen keskiarvo on 5,3 m/s, mediaani 5,0 m/s ja keskihajonta 2,8 m/s.



Kuva 277. Euroopan maksimituulia esittävä kartta [EC 1] ja Suomen keskimääräisiä tuuliolosuhteita kuvaava referenssituulennopeuden jakauma.

Virtauskerroin C_D ja projisoitu pinta-ala A_{proj}

Virtauskerroin C_D riippuu hiukkasen ja sitä ympäröivän kaasun nopeuserosta $\mathbf{V}_R = \mathbf{W}(t) - \mathbf{V}(t)$ Reynoldsin luvun

$$\text{Re}(V_R) = \frac{|\mathbf{V}_R|D}{\nu} = \frac{V_R D}{\nu} \quad (80)$$

kautta, missä D on hiukkasen tyypillinen dimensio ja ν on kaasun kinemaattinen viskositeetti, $\nu \approx 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, ilmalle lämpötilassa $360 \text{ }^\circ\text{C}$ [Kundu 1990, Tse ja Fernandez-Pello 1998]. Kertoimen C_D riippuvuus Reynoldsin luvusta tunnetaan kuitenkin empiiristen kaavojen kautta. Pyöreille hiukkasille voidaan valita käytettäväksi esim. seuraava lauseke [Frössling 1938, Clift & Gauvin 1970, Haider & Levenspiel 1989]

$$C_{D,sph}(V_R) = \frac{24}{\text{Re}(V_R)} \left[1 + 0,15 \text{Re}(V_R)^{0,687} \right] + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 \cdot \text{Re}(V_R)^{-1,16}} . \quad (81)$$

Sylinterimäisille hiukkasille voidaan käyttää seuraavaa lauseketta [White 1991]

$$C_{D,cyl}(V_R) = 1,18 + \frac{6,8}{\text{Re}(V_R)^{0,89}} + \frac{1,96}{\text{Re}(V_R)^{0,5}} - \frac{0,0004 \text{Re}(V_R)}{1 + 3,64 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Re}(V_R)^2} . \quad (82)$$

Virtaussuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa projisoitu pinta-ala A_{proj} on pallolle

$$A_{proj,sph} = \frac{\pi}{4} D_{sph}^2 . \quad (83)$$

Sylinterille se riippuu hiukkasen asennosta: kun akseli on virtaussuuntaan, on

$$A_{proj,cyl} = \frac{\pi}{4} D_{cyl}^2 , \quad (84)$$

ja kun akseli on kohtisuorassa virtaussuuntaa vastaan, on

$$A_{proj,cyl} = D_{cyl} L = E D_{cyl}^2 , \quad (85)$$

missä L on sylinterin pituus ja $E = L/D$ on sen muotosuhde. Hiukkasen dimension $D(t)$ ja massan $m(t)$ on pallomaiselle hiukkaselle

$$m_{sph}(t) = \frac{\pi \rho_s D_{sph}(t)^3}{6} \Rightarrow D_{sph}(t) = \left[\frac{6m_{sph}(t)}{\pi \rho_s} \right]^{1/3} , \quad (86)$$

missä ρ_s on hiukkasen (keskimääräinen) tiheys ja sylinterimäiselle hiukkaselle

$$m_{cyl}(t) = \frac{\pi}{4} \rho_s D_{cyl}(t)^2 L = \frac{\pi}{4} E \rho_s D_{cyl}(t) \Rightarrow D_{cyl}(t) = \left[\frac{4m_{cyl}(t)}{\pi E \rho_s} \right]^{1/3} . \quad (87)$$

Näin suure A_{proj} voidaan lausua hiukkasen massan avulla: pallomaisille hiukkasille

$$A_{proj,sph} = \pi^{1/3} \left(\frac{3}{4} \right)^{2/3} \left[\frac{m_{sph}(t)}{\rho_s} \right]^{2/3} . \quad (88)$$

ja sylinterimäisille hiukkasille, joiden akseli on virtaussuuntaan,

$$A_{proj,cyl} = \pi^{1/3} \left(\frac{1}{2E} \right)^{2/3} \left[\frac{m_{cyl}(t)}{\rho_s} \right]^{2/3} \quad (89)$$

sekä sylinterimäisille hiukkasille, joiden akseli on kohtisuorassa virtausuuntaa vastaan,

$$A_{proj,cyl} = \pi^{1/3} \left(\frac{E}{\pi} \right)^{1/3} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2/3} \left[\frac{m_{cyl}(t)}{\rho_s} \right]^{2/3} . \quad (90)$$

Yhteenvetokaavana voidaan kirjoittaa

$$A_{proj} = A_c \left[\frac{m(t)}{\rho_s} \right]^{2/3} , \quad (91)$$

missä

$$A_c = \begin{cases} \pi^{1/3} \left(\frac{3}{4} \right)^{2/3} , & \text{pallomainen} \\ \pi^{1/3} \left(\frac{1}{2E} \right)^{2/3} , & \text{sylinterimäinen //} \\ \pi^{1/3} \left(\frac{E}{\pi} \right)^{1/3} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2/3} , & \text{sylinterimäinen } \perp \end{cases} \quad (92)$$

ja tiheys ρ_s on sama kuin edellä määritelty hiukkasen tiheys alussa $\rho(0)$:

$$\rho_s \equiv \rho(0) . \quad (93)$$

Painovoima

Painovoima on

$$\mathbf{F}_g = m(t) \mathbf{g} , \quad (94)$$

missä vektori $\mathbf{g} = -g \mathbf{u}_z$ on putoamiskiihtyvyys, missä $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Liikkeyhtälö

Newtonin 2. lain mukaan hiukkaseen vaikuttavat voimat aiheuttavat sen liikemäärän $m(t)\mathbf{V}(t)$ muutoksen

$$\frac{d}{dt}[m(t)\mathbf{V}(t)] = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g . \quad (95)$$

Oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että nostepatsaan aiheuttama voima sekä painovoima vaikuttavat pystysuunnassa (z -suunta kuvassa 273) ja että tuulen aiheuttama voima vaikuttaa vaakasuunnassa (x -suunta kuvassa 273). Tällöin voimavektorien x - ja z -komponentit ovat:

$$F_{g,x} = 0 \quad (96a)$$

$$F_{g,z} = -m(t)g$$

$$\mathbf{F}_{D,x} = \frac{1}{2}C_D \cdot \rho_a \cdot A_{proj} \cdot \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_z - V_z)^2} \cdot (W_x(t) - V_x(t)) \quad (96b)$$

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2}C_D \cdot \rho_a \cdot A_{proj} \cdot \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_z - V_z)^2} \cdot (W_z(t) - V_z(t)) .$$

Liikkeyhtälön komponentit x - ja z -suunnassa ovat

$$\frac{d}{dt}[m(t)V_x(t)] = F_{D,x} = \frac{1}{2}C_D \cdot \rho_a \cdot A_{proj} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_w(t) - V_x(t)) \quad (97a)$$

$$\frac{d}{dt}[m(t)V_z(t)] = F_{D,z} - mg = \quad (97b)$$

$$= \frac{1}{2}C_D \cdot \rho_a \cdot A_{proj} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_p(t) - V_z(t)) - m(t)g$$

ja

$$V_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (98)$$

$$V_z(t) = \frac{dz(t)}{dt} . \quad (99)$$

Nämä yhtälöt voidaan ratkaista numeerisesti, kun tunnetaan kipinän paikka (x_0, z_0) ja nopeus $(v_{x,0}, v_{z,0})$ hetkellä $t = 0$. Numeerista ratkaisemista käsitellään enemmän tämän liitteen kirjallisuusviitteiden jälkeen olevassa lisäyksessä.

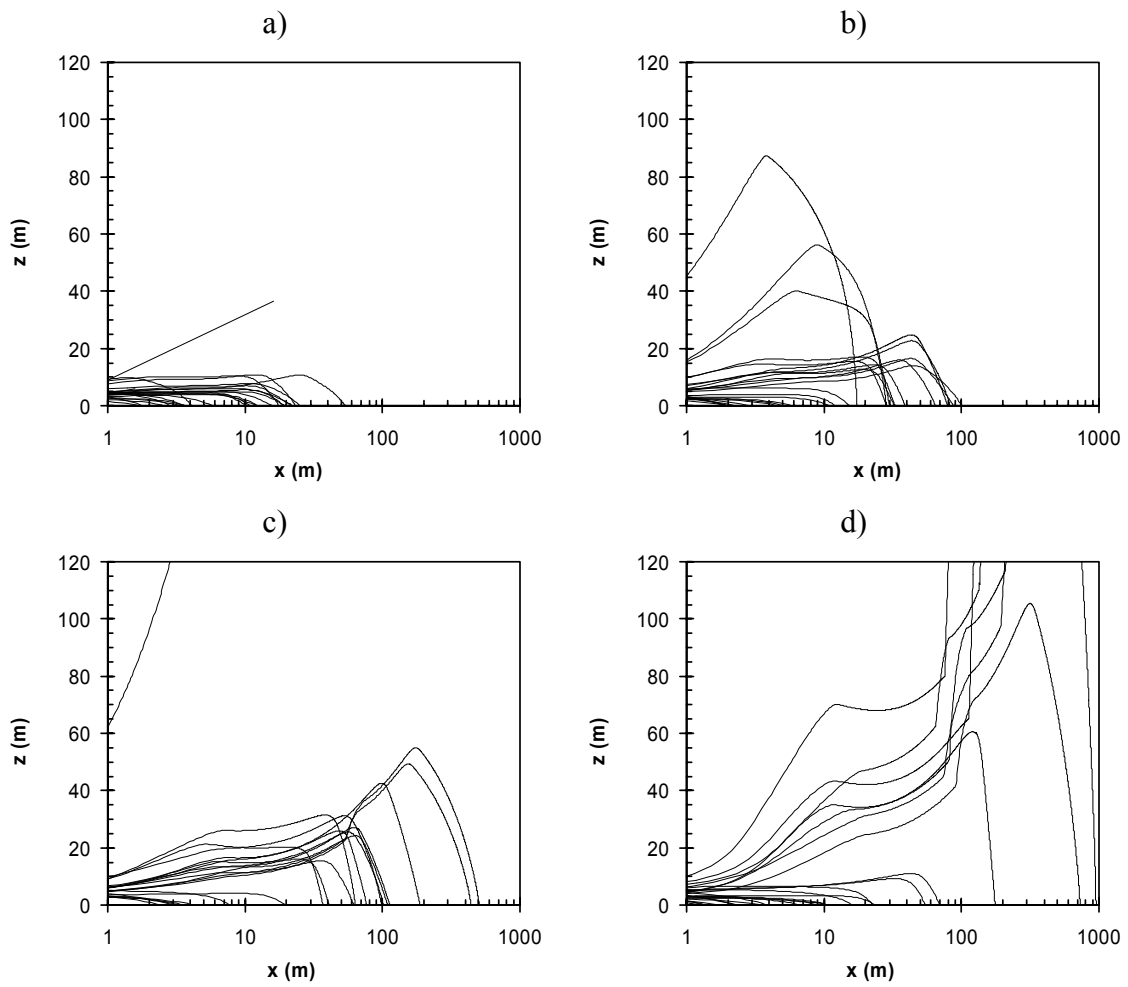
Kipinöiden lentoratoja koskevia tuloksia

Edellä kehitetyssä mallissa kipinän lentorata riippuu vain tulipalon koosta eli sen palotehosta \dot{Q} ja pinta-alasta A_f . Näistä paloteho määrää oleellisesti ylöspäin nousevien virtausten voimakkuuden ja palon pinta-ala näiden virtausten ulottuvuuden. Kun otetaan käyttöön vielä suure \dot{Q}_f'' , joka ilmaisee palavaa pinta-alaa kohden keskimäärin vapautuvan palotehon, niin pinta-ala voidaan laskea palotehosta seuraavasti

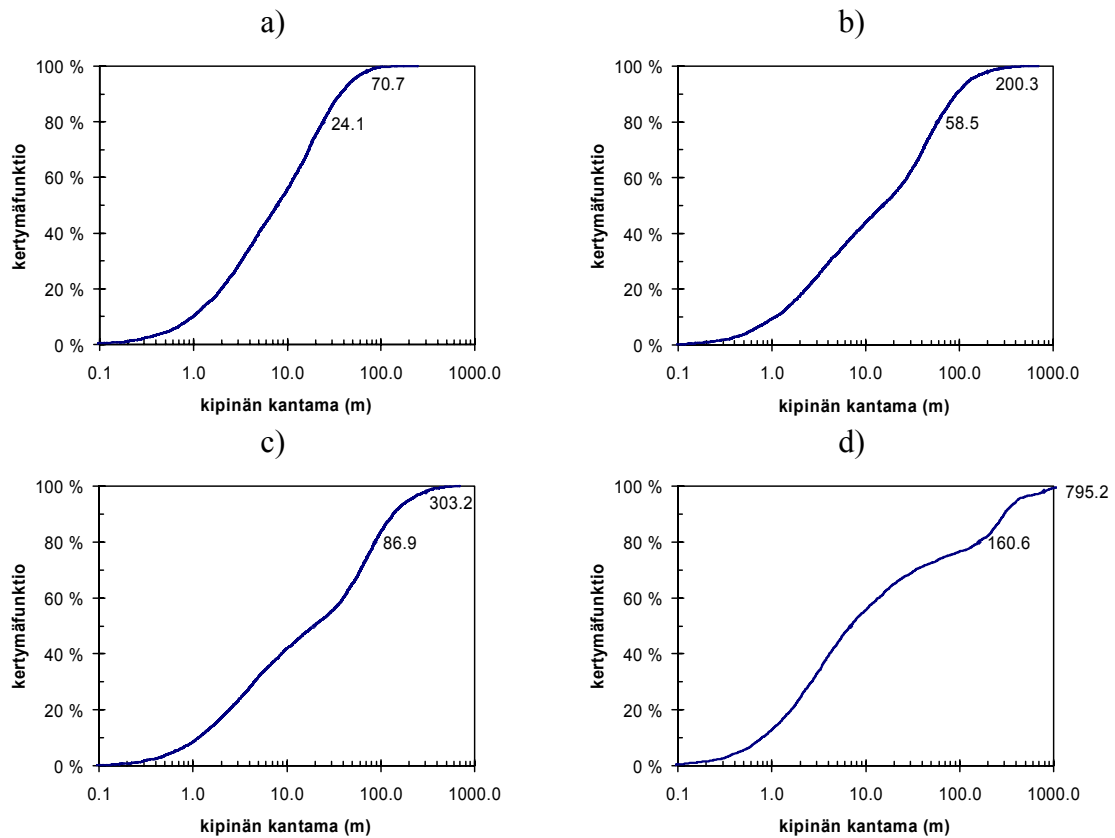
$$A_f = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_f''} . \quad (100)$$

Suureen \dot{Q}_f'' voidaan olettaa vaihtelevan muutamasta sadasta kilowatista neliometriä kohti lähelle tuhatta kilowattia neliometriä kohti; alla esitettävät tulokset on laskettu siten, että \dot{Q}_f'' :n on annettu vaihdella satunnaisesti (tasajakauma) arvosta 250 kW/m² arvoon 750 kW/m².

Kuvassa 278 esitetään esimerkkejä kipinöiden lentoradoista, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on 10–1000 MW. Monte Carlo -laskentaotoksen perusteella määritetyt kipinöiden kantaman jakaumat esitetään kuvassa 279 ja jakaumien tunnuslukuja esitetään taulukossa 84.



Kuva 278. Esimerkkejä kipinöiden lentoradoista, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on a) 10 MW, b) 50 MW, c) 100 MW ja d) 1000 MW. Kustakin tapauksesta esitetään 25 laskennan tulosten muodostama otos.



Kuva 279. Kipinöiden kantaman jakaumia, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on a) 10 MW, b) 50 MW, c) 100 MW ja d) 1000 MW. Kustakin tapauksesta laskettiin 5000 tapauksen Monte Carlo -otos.

Taulukko 84. Kipinöiden kantaman jakaumien tunnuslukuja, kun hiukkasen lähtökorkeus on 2–5 m ja paloteho on a) 10 MW, b) 20 MW, c) 50 MW ja d) 100 MW.

Paloteho	Esimerkkitapaus	Odotus-arvo	80 %:n fraktiili	98 %:n fraktiili
10 MW	yksittäisen auton, katoksen tai huoneiston palo	16 m	24 m	71 m
20 MW	kaksi autoa, huoneiston katon osittain puhkaissut palo	23 m	36 m	100 m
50 MW	palo, jossa asuinrakennus on kauttaaltaan liekeissä	39 m	59 m	200 m
100 MW	useita suuria palavia kohteita käsittävä tulipalo	53 m	87 m	303 m
1000 MW	aluepalo (ks. esim. Pagni [1993])	93 m	161 m	795 m

Kipinöiden aiheuttama syttyminen

Manzellan ym. [2006] ovat tutkineet kipinöiden aiheuttamaa syttymistä. heidän tuloksensa esitetään taulukossa 85.

Tulosten mukaan yksittäinen liekehtivä kipinä aiheuttaa kuivan huokoisen polttoaineen (männyn neulaset tai revitty paperi) syttymisen liekahtivään paloon. Kuivan kiinteän aineen syttyminen (puun rako) liekahtivään paloon seuraa, kun yksittäisen liekehtivän kipinän koko on riittävän suuri (kokoluokka 50 mm). Syttymisen todennäköisyys kasvaa kipinöiden määrän kasvaessa. Näissä kokeissa hehkuva kipinä ei saanut aikaan liekehtivää paloa. Paperisilppu syttyi kytöpaloon jo yhdestä hehkuvasta kipinästä ja männyn neulaset, kun hehkuvia kipinöitä oli useampia. Kiinteä aine ei syttynyt liekehtivään eikä kytöpaloon uesillakaan kipinöillä.

Taulukko 85. Manzellan ym. [2006] tuloksia kipinöiden aiheuttamista syttymistä. (Sytyvät kohteet: pine needles = männyn neulaset, shredded paper = suikaleiksi revitty paperi, cedar crevice = setripuinen halkeama/rako; lyhennysmerkinnät: NI - no ignition = ei syttymistä, SI - smoldering ignition = syttyminen kytöpaloon, FI - flaming ignition = syttyminen liekehtivään paloon; NT - not tested = ei mitattu).

Number of firebrands deposited	State of firebrand at impact	Air flow (m/s)	Firebrand size (mm)	Pine needles		Shredded paper		Cedar crevice	
				Dry	11%	Dry	11%	Dry	11%
1	Glowing	0.5	25	NI	NI	SI	NI	NI	NI
1	Glowing	0.5	50	NI	NI	SI	SI	NI	NI
1	Glowing	1	25	NI	NI	SI	SI	NI	NI
1	Glowing	1	50	NI	NI	SI	SI	NI	NI
1	Flaming	0.5	25	FI	FI	FI	FI	NI	NI
1	Flaming	0.5	50	FI	FI	FI	FI	FI	NI
1	Flaming	1	25	FI	FI	FI	FI	NI	NI
1	Flaming	1	50	FI	FI	FI	FI	FI	NI
4	Glowing	0.5	25	NI	NI	NT	NT	NI	NI
4	Glowing	0.5	50	NI	NI	NT	NT	NI	NI
4	Glowing	1	25	NI	NI	NT	NT	NI	NI
4	Glowing	1	50	SI to FI	SI to FI	NT	NT	NI	NI
3	Flaming	0.5	25	NT	NT	NT	NT	FI	FI
3	Flaming	0.5	50	NT	NT	NT	NT	FI	FI
3	Flaming	1	25	NT	NT	NT	NT	FI	FI
3	Flaming	1	50	NT	NT	NT	NT	FI	FI

Liitteen J lähdeluettelo

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: VTT. 172 s. + liitt. 17 s. (VTT Tiedotteita 2045.) ISBN 951-38-5699-2: 951-38-5740-9

Anthenien, R. A., Tse, S. D. & Fernandez-Pello, A. C. 2005. On the trajectories of embers initially elevated or lofted by ground fire plumes in high winds. Submitted to Fire Safety Journal.

Clift, R. & Gauvin, W. H. 1970. Proc. Chemeca, Vol. 1, s. 14–28.

Dyrbye, C. & Hansen, S. O. 1997. Wind Loads on Structures. John Wiley & Sons.

Ellis, P. F. 2000. The aerodynamic and combustion characteristics of eucalypt bark – a firebrand study. Ph.D. Dissertation. Canberra: Australian National University.

EC 1. ENV 1991-2-4. 1995. Base of Design and Actions on Structures. Part 2.4, Wind Actions.

Fredlund, B. 1988. A Model for Heat and Mass Transfer in Timber Structures During Fire, A theoretical, numerical and experimental study. Lund: Report LUTVDG(TVBB-1003), Department of Fire Safety Engineering.

Frössling, N. 1938. Über die verdunstung fallender tropfen. Gerlands Beitr. Geophys., 52, s. 170–216.

Haider, A. & Levenspiel, O. 1989. Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical particles. Powder Technology, Vol. 58, s. 63–70.

Heskestad, G. 1995. Fire plumes. In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association.

Jiang, T., Huang, H. & Ooka, R. 2005. Study into Predictions of Fire Spread in Urban Areas. Part 1. Combination of wood pyrolysis models with CFD. IAFSS 8th Symposium.

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

Kundu, P. K. 1990. Fluid Mechanics. San Diego, USA: Academic Press.

Manzella, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R. & Yang, J. C. 2006. On the ignition of fuel beds by firebrands. *Fire and Materials*, Vol. 30, s. 77–87.

Pagni, P. J. 1993. Causes of the 20 October 1991 Oakland Hills Conflagration. *Fire Safety Journal*, Vol. 21, s. 331–339.

Tammelin, B. Suomen Tuuliatlas. Helsinki: Ilmatieteen laitos. 1991. 355 s.

Tarifa, C. S., Del Notario, P. P., Moreno, F. G. & Villa, A. R. 1967. Transport and combustion of firebrands. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Final Report of Grants FGSP-114 and FG-SP-146. Madrid, May 1967.

Tran, H. C. & White, R. H. 1992. Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter. *Fire and Materials*, Vol. 16, s. 197–206.

Tse, S. D. & Fernandez-Pello, A. C. 1998. On the Flight Paths of Metal Particles and Embers Generated by Power Lines in High Winds – a Potential Source of Wildland Fires. *Fire Safety Journal*, Vol. 30, s. 333–356.

Waterman, T. E. & Takata, A. N. 1969. Laboratory study of ignition of host materials by firebrands. Project J6142}OCD Work Unit 2539A, IIT Research Institute, Chicago.

White, F. M. 1991. *Viscous Fluid Flow*. 2. painos. Boston, MA, USA: McGraw Hill.

Woycheese, J. P. & Pagni, P. J. 1997. Brand Lofting Above LargeScale Fires. In: *Proceedings of the Second International Conference on Fire Research and Engineering*, Gaithersburg, MD, 10–15 August, 1997. National Institute of Standards and Technology & Society of Fire Protection Engineers.

Yoshioka, H., Hayashi, Y., Masuda, H. & Noguchi, T. 2004. Real-scale fire wind tunnel experiment on generation of firebrands from house on fire. *Fire Science and technology*, Vol. 23, No. 2, s. 142–150.

Lisäys: Liiketyhtälöiden numeerinen ratkaiseminen

Sijoitetaan edeltä massan ja sen aikamuutoksen sekä suureen A_{proj} lausekkeet nopeuskomponenttien V_x ja V_z differentiaaliyhtälöihin

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3}{2} A_m \cdot m(0) \cdot \frac{\left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2 t}{\left[1 - A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2 t^2\right]^{1/4}} V_x(t) + \\
 & + m(0) \cdot \left[1 - A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2 t^2\right]^{3/4} \frac{dV_x(t)}{dt} = \\
 & = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot A_c \left[\frac{m(t)}{\rho_s}\right]^{2/3} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_w(t) - V_x(t)) \\
 & -\frac{3}{2} A_m \cdot m(0) \cdot \frac{\left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2 t}{\left[1 - A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2 t^2\right]^{1/4}} V_z(t) + \\
 & + m(0) \cdot \left[1 - A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2 t^2\right]^{3/4} \frac{dV_z(t)}{dt} = \\
 & = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot A_c \left[\frac{m(t)}{\rho_s}\right]^{2/3} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_p(t) - V_z(t)) - m(t)g
 \end{aligned}$$

Määritellään aikavakio

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2}}$$

ja dimensioton aika

$$t^* = t/\tau .$$

Tällöin

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3}{2} \frac{m(0)}{\tau} \cdot \frac{t^*}{\left[1 - t^{*2}\right]^{1/4}} V_x + \frac{m(0)}{\tau} \cdot \left[1 - t^{*2}\right]^{3/4} \frac{dV_x}{dt^*} = \\
 & = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot A_c \cdot \left[\frac{m(0)}{\rho_s}\right]^{2/3} \cdot \left[1 - t^{*2}\right]^{1/2} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_w - V_x)
 \end{aligned}$$

ja

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3}{2} \frac{m(0)}{\tau} \cdot \frac{t^*}{\left[1 - t^{*2}\right]^{1/4}} V_z + \frac{m(0)}{\tau} \cdot \left[1 - t^{*2}\right]^{3/4} \frac{dV_z}{dt^*} = \\
 & = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot A_c \cdot \left[\frac{m(0)}{\rho_s}\right]^{2/3} \cdot \left[1 - t^{*2}\right]^{1/2} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_p - V_z) \\
 & - m(0)g \cdot \left[1 - t^{*2}\right]^{3/4}
 \end{aligned}$$

josta edelleen saadaan

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3}{2} \frac{t^*}{\left[1 - t^{*2}\right]^{1/4}} V_x + \left[1 - t^{*2}\right]^{3/4} \frac{dV_x}{dt^*} = \\
 & = \frac{1}{2} \frac{C_D A_c \rho_a \tau}{\rho_s^{2/3} m(0)^{1/3}} \cdot \left[1 - t^{*2}\right]^{1/2} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_w - V_x)
 \end{aligned}$$

ja

$$-\frac{3}{2} \frac{t^*}{[1-t^{*2}]^{3/4}} V_z + [1-t^{*2}]^{3/4} \frac{dV_z}{dt^*} =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{C_D A_c \rho_a \tau}{\rho_s^{2/3} m(0)^{1/3}} \cdot [1-t^{*2}]^{3/2} \cdot \sqrt{(U_w - V_x)^2 + (U_p - V_z)^2} \cdot (U_p - V_z)$$

$$- g \tau \cdot [1-t^{*2}]^{3/4}$$

Määritellään nopeusvakiot

$$U_g = g \tau$$

ja

$$U_c = \sqrt{\frac{g \rho_s^{2/3} m(0)^{1/3}}{C_D A_c \rho_a}}$$

jolloin yhtälöt saadaan seuraavaan muotoon

$$-\frac{3}{2} \frac{t^*}{[1-t^{*2}]^{3/4}} \frac{V_x}{U_g} + [1-t^{*2}]^{3/4} \frac{d[V_x/U_g]}{dt^*} =$$

$$= \frac{1}{2} [1-t^{*2}]^{3/2} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_w}{U_c} - \frac{U_g}{U_c} \frac{V_x}{U_g}\right)^2 + \left(\frac{U_p}{U_c} - \frac{U_g}{U_c} \frac{V_x}{U_g}\right)^2} \cdot \left(\frac{U_w}{U_c} - \frac{U_g}{U_c} \frac{V_x}{U_g}\right)$$

ja

$$-\frac{3}{2} \frac{t^*}{[1-t^{*2}]^{3/4}} \frac{V_z}{U_g} + [1-t^{*2}]^{3/4} \frac{d[V_z/U_g]}{dt^*} =$$

$$= \frac{1}{2} [1-t^{*2}]^{3/2} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_w}{U_c} - \frac{U_g}{U_c} \frac{V_x}{U_g}\right)^2 + \left(\frac{U_p}{U_c} - \frac{U_g}{U_c} \frac{V_z}{U_g}\right)^2} \cdot \left(\frac{U_p}{U_c} - \frac{U_g}{U_c} \frac{V_z}{U_g}\right)$$

$$- [1-t^{*2}]^{3/4}$$

Määritellään dimensiottomat nopeusmuuttujat

$$U_w^* = \frac{U_w}{U_c}$$

$$U_p^* = \frac{U_p}{U_c}$$

ja funktiot F ja G

$$F(t^*) = \frac{V_x}{U_g}$$

$$G(t^*) = \frac{V_z}{U_g}$$

jolloin

$$V_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} \Rightarrow F(t^*) = \frac{d(x/(\tau U_g))}{dt^*} = \frac{dX^*}{dt^*}$$

$$V_z(t) = \frac{dz(t)}{dt} \Rightarrow G(t^*) = \frac{d(z/(\tau U_g))}{dt^*} = \frac{dZ^*}{dt^*}$$

missä on määritetty dimensiottomat paikkamuuttujat

$$X^* = \frac{x}{\tau U_g}$$

$$Z^* = \frac{z}{\tau U_g}$$

Hiukkasen liikettä kuvaavat yhtälöt voidaan siis esittää dimensiottomassa muodossa seuraavasti:

$$\frac{dX^*}{dt^*} = F(t^*)$$

$$\frac{dZ^*}{dt^*} = G(t^*).$$

missä

$$\frac{dF}{dt^*} = \frac{3}{2} \frac{t^*}{1-t^{*2}} F + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{\left(U_w^* - \frac{U_g}{U_c} F\right)^2 + \left(U_p^* - \frac{U_g}{U_c} G\right)^2} \cdot \left(U_w^* - \frac{U_g}{U_c} F\right)}{\left[1-t^{*2}\right]^{1/4}}$$

ja

$$\frac{dG}{dt^*} =$$

$$= \frac{3}{2} \frac{t^*}{1-t^{*2}} G + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{\left(U_w^* - \frac{U_g}{U_c} F\right)^2 + \left(U_p^* - \frac{U_g}{U_c} G\right)^2} \cdot \left(U_p^* - \frac{U_g}{U_c} G\right)}{\left[1-t^{*2}\right]^{1/4}} - 1$$

sekä

$$F(t^*) = \frac{V_x}{U_g}$$

$$G(t^*) = \frac{V_z}{U_g}$$

$$X^* = \frac{x}{\tau U_g}$$

$$Z^* = \frac{z}{\tau U_g}$$

$$U_w^* = \frac{U_w}{U_c}$$

$$U_p^* = \frac{U_p}{U_c}$$

$$U_g = g\tau$$

$$U_c = \sqrt{\frac{g\rho_s^{2/3} m(0)^{1/3}}{C_D A_c \rho_a}}$$

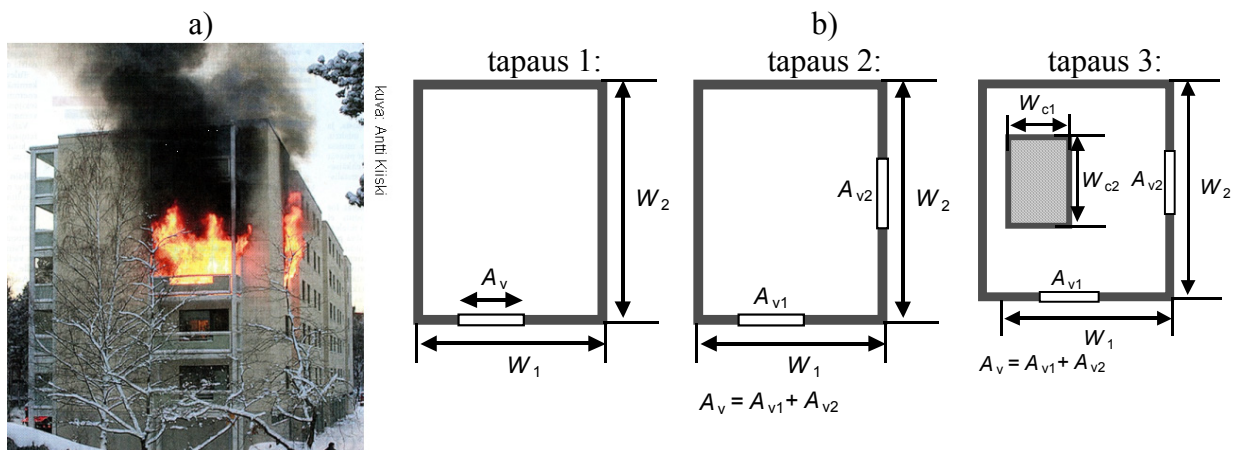
$$\tau = \sqrt{\frac{1}{A_m \cdot \left(\frac{\rho(0)}{m(0)}\right)^{4/3} \cdot \beta^2}}$$

$$t^* = t/\tau.$$

Käyttäen tässä liitteessä esitettyjä tietoja, nämä differentiaaliyhtälöt voidaan ratkaista numeerisesti esim. käyttäen Runge-Kutta-menetelmää.

Liite K: Ulkopuolisen liekehdinnän yksinkertaistettu laskentamenetelmä eli ns. Law'n malli (SFS-EN 1991, osa 1–2, opastava liite B)

Ulkopuolisen liekehdinnän yksinkertaistettu laskentamenetelmä eli ns. Law'n malli on kehitetty 1970- ja 1980-lukujen taitteessa Englannissa tehdyn laajan polttokoesarjan perusteella [Law & O'Brien 1981]. Menetelmä esitetään myös Eurocoden SFS-EN 1991 osan 1–2 opastavassa liitteessä B. Menetelmässä on kyse ulkoisesta liekehdinnän synnyttämän lämpörasituksen laskennassa (kuvassa 280a esitetään esimerkki ulkoisesta liekehdinnästä). Tässä liitteessä esitetään *korjattu*²⁰⁾ yhteenveto tästä menetelmästä ja sen soveltamisesta.



Kuva 280. a) Esimerkki ulkoisesta liekehdinnästä²¹⁾ ja b) laskennassa tarkasteltavat erilaiset palohuoneen asetelmat.

Laskennan lähtötietojen määrittäminen

Palotila

Palotila määritellään tilan korkeuden H , leveyden W_1 ja syvyyden W_2 avulla, ks. kuva 280b. Mittojen yksikkönä on metri [m] ja pinta-alojen neliometri [m²]. Menetelmää voidaan käyttää vain, kun $W_2 \leq 70$ m, $W_1 \leq 18$ m ja $H \leq 5$ m.

²⁰⁾ Standardin SFS-EN 1991 osan 1-2 opastavan liitteen B (ja saman standardin englanninkielisen alkuperäisdokumentin vastaavassa liitteessä) kaava (B.1) on virheellinen: oikea muoto on $D/W = W_2/W_1$.

²¹⁾ Helsingin Sanomat, 23.1.2006.

Laskennassa käytettävät suureet ovat

huoneen muotoparametri $\eta =$ suhteen leveys/syvyys tehollinen arvo =

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{W_1}{W_2}, \text{ tapaus 1} \\ \eta = \frac{W_1}{W_2} \cdot \frac{A_v}{A_{v1}}, \text{ tapaus 2} \\ \eta = \frac{(W_1 - W_{c1})}{(W_2 - W_{c2})} \cdot \frac{A_v}{A_{v1}}, \text{ tapaus 3} \end{array} \right. \quad [-]$$

lattian pinta-ala $A_f = W_1 W_2$

vaipan kokonaispinta-ala $A_t = 2 \cdot (HW_1 + W_1 W_2 + W_2 H)$ $[m^2]$.

Vaipan kokonaispinta-alaan A_t lasketaan mukaan myös aukkojen pinta-ala.

Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon vaikutus määritetään aukkotekijän O (yksikkönä $m^{1/2}$) avulla, joka lasketaan seuraavasti:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad [m^{1/2}],$$

missä

- A_v on kaikissa seinissä olevien pystyaukkojen kokonaisala $[m^2]$
- h_{eq} on ikkunoiden korkeuksien pinta-aloilla painotettu keskiarvo $[m]$

Jos seinissä olevien ikkunoiden määrä on N ja niiden korkeudet ja leveydet ovat h_i (korkeudet, $i = 1, 2, 3, \dots, N$) ja w_i (leveydet, $i = 1, 2, 3, \dots, N$), niin

$$A_v = \sum_{i=1}^N w_i \cdot h_i \quad [m^2]$$

$$h_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \cdot h_i}{A_v} \quad [m].$$

Ikkunoiden leveyttä käsitellään käyttäen niiden yhteenlaskettua leveyttä

$$w_t = \sum_{i=1}^N w_i \quad [m].$$

Palokuorma

Palokuorman määrä otetaan huomioon käyttäen suuretta $q_{f,d}$, joka on lattian pinta-alaa A_f kohti lasketun palokuorman tiheyden mitoitusarvo (yksikkönä on MJ/m²).

Suurelle $q_{f,d}$ annetaan arvoja standardin SFS-EN 1991 osan 1–2 opastavassa liitteessä E.

Palokuormatieto syötetään laskentaan käyttäen parametria Ω :

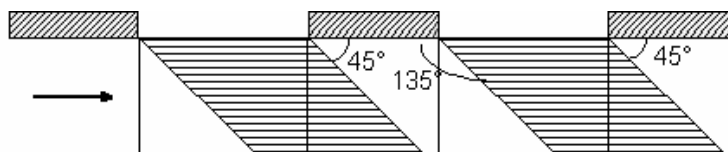
$$\Omega = \frac{A_f}{\sqrt{A_v \cdot A_t}} \cdot q_{f,d} \quad [\text{MJ/m}^2].$$

Liekin perusmuotoon vaikuttavat tekijät

Huonetilan aukosta ulostulevien liekkien muodon kannalta erikseen tarkasteltavia tapauksia ovat

- tilanne, jossa tuulettuu palotila ikkunoiden välityksellä luonnollisen ilmanvaihdon mukaisesti
- tilanne, jossa palotilan tuulettumista tehostetaan ulkoisilla keinoilla tai jos palotilan vastakkaisilla puolilla on ikkunoita tai jos paloon tulee lisäilmaa muualta kuin ikkunoista.

Mahdollinen sivuttaistuuli liekkien muuttaa liekkien suuntaa 45° kuvassa 281 esitetyllä tavalla.



Kuva 281. Sivuttaistuulen aiheuttama liekkien suunnan muuttuminen 45°:lla.

Myös parvekkeet, katokset ja muut ulokkeet vaikuttavat liekin kokoon ja muotoon.

Menetelmä

Luonnollinen ilmanvaihto

Kun palotilan ilmanvaihto tapahtuu luonnollisesti eli painovoiman ja tiheyserojen ajamana sen ikkunan kautta, josta liekit lyövät tulos, liekkien muoto on erilainen seuraavissa tapauksissa:

- seinä jatkuu palotilan yläpuolelle
- seinä ei jatku palotilan yläpuolelle

sekä silloin, kun

- ikkuna-aukot ovat muodoltaan leveitä: $h_{eq} > 1,25 w_t$, jolloin pitää vielä tarkastella erikseen tilanteet, joissa
 - etäisyys jokaiseen muuhun ikkunaan $> 4 w_t$
 - etäisyys jokaiseen muuhun ikkunaan $\leq 4 w_t$
- ikkuna-aukot ovat muodoltaan kapeita: $h_{eq} \leq 1,25 w_t$.

Liekkien koosta ja muodosta riippumattomat suureet ovat

$$\text{lämmönvapautumisnopeus}^{22)} \dot{Q} = \min[\dot{Q}_{FCF}; 3,15 \cdot A_v \sqrt{h_{eq}} \cdot \eta \cdot (1 - e^{-0,036/O})] \text{ [MW]}$$

$$\text{palotilan lämpötila } T_f = T_0 + 6000 \cdot \sqrt{O} \cdot (1 - e^{-0,00286\Omega}) \cdot (1 - e^{-0,1/O}) \text{ [}^\circ\text{C]},$$

missä T_0 on alkulämpötila ja tekijä \dot{Q}_{FCF} on paloteho silloin, kun palon voimakkuus on polttoaineen määrän rajoittama. Standardin SFS-EN 1991 osan 1-2 opastavassa liitteessä B tälle suurelle käytetään arviota

$$\dot{Q}_{FCF} = (q_{f,d} \cdot A_f) / \tau_F$$

missä $\tau_F = 1\,200$ s on vapaasti kehittyvän palon kesto. Käyttäen standardin SFS-EN 1991 osan 1-2 opastavassa liitteessä E esitettyä suuretta RHR_f (lämmönvapautumisnopeuden suurin arvo neliometriä kohti, yksikkönä kW/m^2) sille voidaan esittää myös arvio

²²⁾ Standardissa SFS-EN 1991 osassa 1-2 esitetään virheellisesti, että palamisnopeus on sama kuin lämmönluovutusnopeus. Tämä ei pidä lainkaan paikkaansa, vaan lämmönluovutusnopeus on palamisnopeus kerrottuna tehollisella lämpöarvolla (sama virhe esiintyy myös alkuperäistekstissä, jossa rinnastetaan ”rate of burning” ja ”rate of heat release”). Lisäksi vakiintunut käänös termille ”rate of heat release” on lämmönvapautumisnopeus, ei lämmönluovutusnopeus (samaa merkitsevä yleisesti käytetty termi on myös paloteho).

$$\dot{Q}_{FCF} = RHR_f \cdot A_f / 1000.$$

Liekin lämpötilan jakauma sen akselia $T(z)$ pitkin paikassa $L(z)$ vastaten korkeutta z (ks. kuva 282b) voidaan ilmaista liekin koosta ja muodosta riippumattomassa muodossa

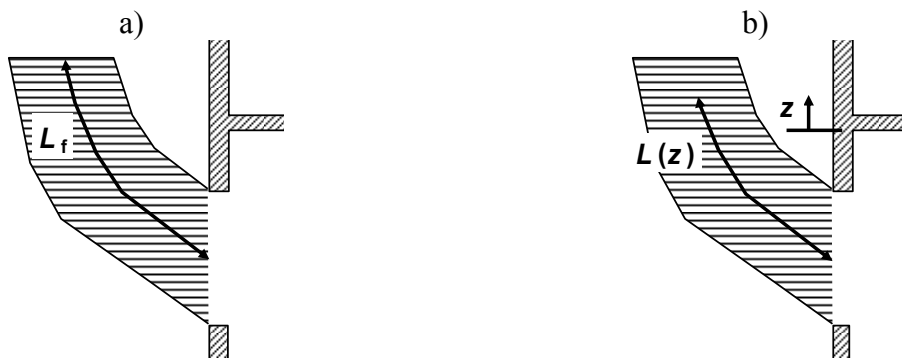
$$T(z) = T_0 + 520 \cdot \left(\frac{1 - 0,4725 \cdot \frac{L(z)w_t}{\dot{Q}}}{1 - 0,4725 \cdot \frac{L_f w_t}{\dot{Q}}} \right) \quad [^{\circ}\text{C}],$$

missä L_f on liekin pituus sen akselia pitkin mitattuna (kuva 282a). Tästä lausekkeesta nähdään, että

- liekki on määritelty siten, että sen huipun lämpötila on $520 \text{ }^{\circ}\text{C}$ alkulämpötilan yläpuolella
- liekin lämpötila ikkunalla ($Lz = 0$) on

$$T_w = T_0 + 520 \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,4725 \cdot \frac{L_f w_t}{\dot{Q}}} \right) \quad [^{\circ}\text{C}].$$

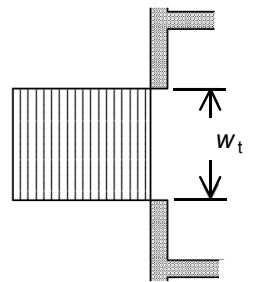
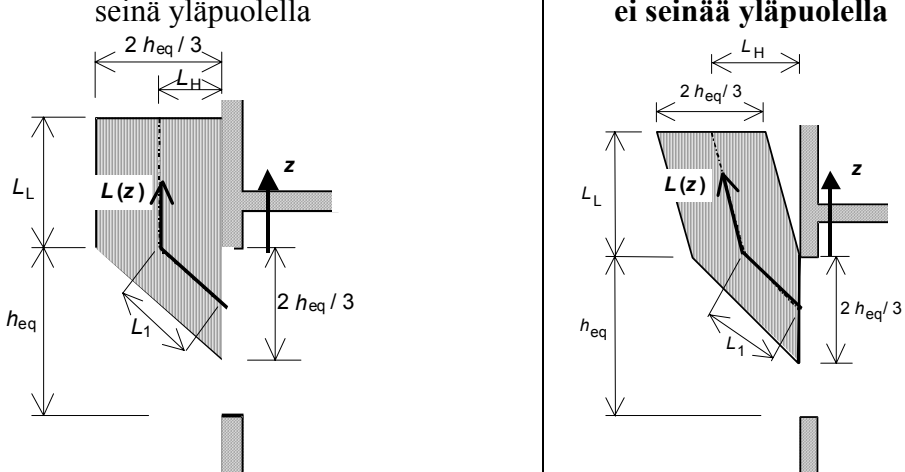
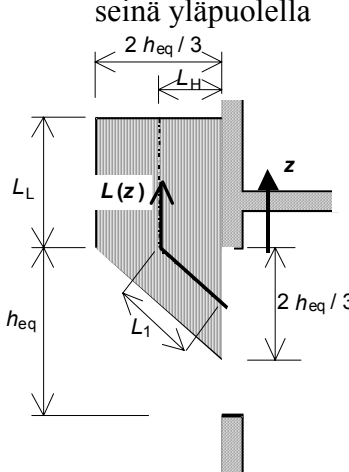
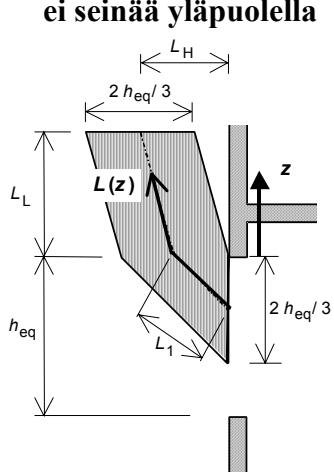
Lämpötila T_w voi olla palotilan lämpötilaa T_f korkeampi, mikä johtuu siitä, että palaminen on voimakkainta juuri ikkunalla, missä polttoainekaasut ja happi yhtyvät tehokkaasti.



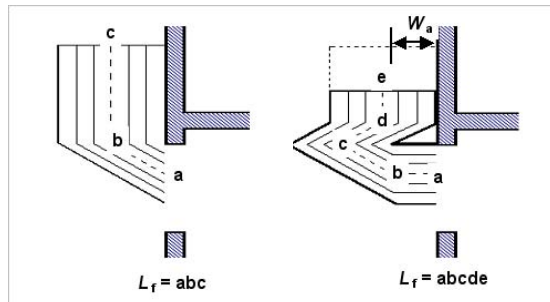
Kuva 282. a) Liekin pituus sen akselia pitkin, L_f , ja b) liekin pituus korkeudelle z , $L(z)$.

Liekkien eri muodot ja tekijöiden L_f ja $L(z)$ lausekkeet esitetään taulukossa 86.

Taulukko 86. Liekin muoto ja sen ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät eri tapauksissa, joissa palotilan ilmanvaihto on luonnollinen.

liekin leveys = w_t ja paksuus = $2 \cdot h_{eq}/3$		
liekin vaakaleikkaus 	$L_L = \max \left(0; h_{eq} \left(2,37 \left(\frac{\dot{Q}}{A_v \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right) \right)$ tai $L_L \approx 1,9 \left(\frac{\dot{Q}}{w_t} \right)^{2/3} - h_{eq}$, kun kaasun tiheys $\rho_g = 0,45 \text{ kg/m}^3$ (lämpötila $500 \text{ }^\circ\text{C}$)	
liekin pystyleikkaus 	seinä yläpuolella 	ei seinää yläpuolella 
L_H	kun $h_{eq} \leq 1,25 \cdot w_t$: $L_H = h_{eq}/3$ kun $h_{eq} > 1,25 \cdot w_t$: $L_H = 0,3 \cdot h_{eq} \cdot (h_{eq}/w_t)^{0,54}$, kun $h_{eq} > 1,25 \cdot w_t$ ja etäisyys jokaiseen muuhun ikkunaan $> 4 w_t$, $L_H = 0,454 \cdot h_{eq} \cdot [h_{eq}/(2w_t)]^{0,54}$, muulloin	$L_H = 0,6 h_{eq} (L_L/h_{eq})^{1/3}$
L_f	$L_f = L_L + h_{eq}/2$, kun $h_{eq} \leq 1,25 \cdot w_t$ $L_f = [L_L^2 + (L_H - h_{eq}/3)^2]^{1/2} + h_{eq}/2$, kun $h_{eq} > 1,25 \cdot w_t$	$L_f = [L_L^2 + (L_H - h_{eq}/3)^2]^{1/2} + h_{eq}/2$
$L(z)$	$L(z) = z + [L_H^2 + (h_{eq}/3)^2]^{1/2}$	$L(z) = [L_H^2 + (h_{eq}/3)^2]^{1/2} + [z^2 + (L_H - h_{eq}/3)^2]^{1/2}$
<ul style="list-style-type: none"> liekin emissiviteetti on $\epsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f}$, missä d_f on liekin paksuus [m] konvektion lämmönsiirtymiskerroin on $\alpha_c = 4,67 \left(\frac{1}{\ell_{eff}} \right)^{0,4} \left(\frac{\dot{Q}}{A_v} \right)^{0,6}$ missä ℓ_{eff} on ulkopuoliselle rakenneosalle ominainen mitta (läpimitta tai sivumitta) [W/m²] 		

Parvekkeiden, katosten ja muiden seinän ulokkeiden vaikutus liekin kokoon ja muotoon esitetään kuvassa 283.



seinä yläpuolella ja $h_{eq} \leq 1,25 w_f$:

$$L_L \rightarrow L_L - W_a (1 + \sqrt{2})$$

$$L_H \rightarrow L_H + W_a$$

ei seinää yläpuolella tai $h_{eq} > 1,25 w_f$:

$$L_L \rightarrow L_L - W_a$$

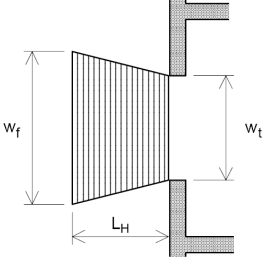
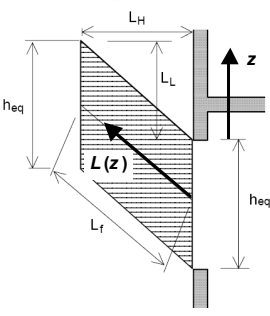
$L_H \rightarrow L_H + W_a$ (lasketaan ensin L_H käyttäen muunnettua L_L arvoa ja sitten tähän lisätään W_a)

Kuva 283. a) Ulokkeiden vaikutus liekin pituuteen L_f ja b) suureisiin L_L ja L_H .

Tehostettu ilmanvaihto

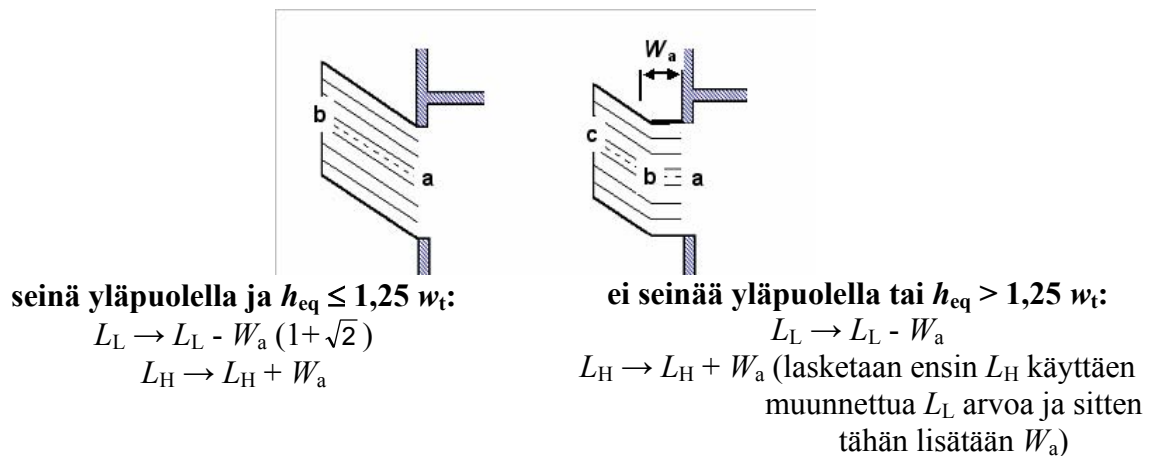
Taulukossa 87 esitetään liekin koko ja ominaisuudet siinä tapauksessa, kun palotilan ilmanvaihto on tehostettua tai ikkunoita palotilan vastakkaisilla puolilla tai paloon tulee lisäilmaa muualta kuin ikkunoista siten, että tilan läpi kulkee ilmavirtaus, jonka nopeus on u (yksikkönä m/s).

Taulukko 87. Liekin muoto ja sen ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät eri tapauksissa, kun palotilan ilmanvaihto on tehostettu¹⁾.

<p>liekin vaakaleikkaus: $w_f = w_t + 0,4 L_H$</p> 	<p>lämmönvapautumisnopeus: $\dot{Q} = \dot{Q}_{FCF} = (q_{f,d} \cdot A_f) / \tau_F$ palotilan lämpötila: $T_f = T_0 + 1200 \cdot (1 - e^{-0,00228 \Omega})$ $T(z) = T_0 + 520 \cdot \left(\frac{1 - 0,3325 \cdot \frac{L(z) \cdot A_v^{1/2}}{\dot{Q}}}{1 - 0,3325 \cdot \frac{L_f \cdot A_v^{1/2}}{\dot{Q}}} \right)$</p>
<p>liekin pystyleikkaus</p> 	<p>$T_w = T_0 + 520 \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,3325 \cdot \frac{L_f \cdot A_v^{1/2}}{\dot{Q}}} \right) \quad (L_f (A_v)^{1/2} / \dot{Q} < 1)$ $L_L = \left(1,366 \left(\frac{1}{u} \right)^{0,43} \frac{\dot{Q}}{A_v^{1/2}} \right) - h_{eq}$ $L_H = 0,605 \left(u^2 / h_{eq} \right)^{0,22} (L_L + h_{eq})$ $L_f = (L_L^2 + L_H^2)^{1/2}$ $L(z) = z \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{L_H}{L_L} \right)^2}$</p>
<ul style="list-style-type: none"> • liekin emissiviteetti on $\epsilon_f = 1 - e^{-0,3df}$, missä df on liekin paksuus [m], paitsi ikkunalla, jossa $\epsilon_f = 1$ • lämmönsiirtymiskerroin on • $\alpha_c = 9,8 \cdot \left(\frac{1}{l_{eff}} \right)^{0,4} \left(\frac{\dot{Q}}{17,5 \cdot A_v} + \frac{u}{1,6} \right)^{0,6} \quad [W/m^2]$ 	

1) Suureiden yksiköt ovat samat kuin luonnollisen ilmanvaihdon tapauksessa.

Parvekkeiden, katosten ja muiden seinän ulokkeiden vaikutus liekin kokoon ja muotoon esitetään kuvassa 284.



Kuva 31. a) Ulokkeiden vaikutus liekin pituuteen L_f ja b) suureisiin L_L ja L_H .

Liitteen K viite

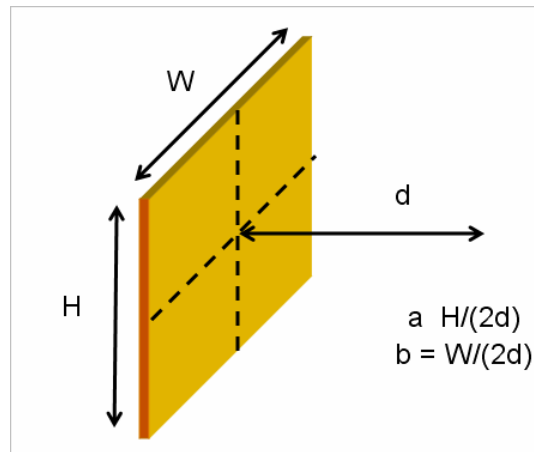
Law, M. & O'Brien, T. 1981. Fire Safety of Bare External Structural Steel. Croydon: Constrado. ISBN 0862000262

Liite L: Näkyvyystekijän arvoja

Tässä työssä käytetään säteilyn aiheuttaman uhan arviointiin näkyvyystekijää

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \left[\frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \arctan \left(\frac{b}{\sqrt{1+a^2}} \right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \arctan \left(\frac{a}{\sqrt{1+b^2}} \right) \right]$$

missä a ja b määritellään kuvassa 285. Näkyvyystekijän arvoja eri a :n ja b :n arvoilla esitetään kuvassa 286.



Kuva 285. Näkyvyystekijän laskennan geometria.

Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka		
Nimeke Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus		
Tiivistelmä Julkaisussa tarkastellaan viime aikoina yleistyneen, entistä tehokkaampaan maankäyttöön (tehokkuus jopa 0,5 tai vieläkin korkeampi) perustuvan ns. tiiviin ja matalan pientalorakentamisen paloturvallisuutta. Työssä määritettiin tiiviin ja matalan rakentamisen henkilöturvallisuuden ja omaisuudensuojan kannalta hyväksyttävä paloturvallisuustaso ja siihen vaikuttavat keskeiset tekijät sekä laadittiin vaatimustason täyttäviä periaatteellisia kaavoitukseen ja rakentamistapaan liittyviä ratkaisuja. Tutkimus toteutettiin käyttäen palosimuloinnin ja paloriskien arvioinnin uudenaikaisimpia menetelmiä. Työssä lähdettiin paloturvallisuuteen vaikuttavien osatekijöiden tutkimisesta, jolta pohjalta edettiin tuloksia yleistäen siten, että saatiin muodostettua kattava kuva tiiviiden ja matalien pientaloalueiden paloturvallisuudesta. Näiden tulosten perustella kehitettiin kaavoituksen ja rakentamistavan ratkaisuja, joita paloturvallisuus näillä alueilla saadaan toteutumaan. Hankkeen toteutti VTT:n paloturvallisuuden tutkimusryhmä yhteistyössä keskeisten viranomais- ja teollisuustahojen kanssa.		
ISBN 978-951-38-6971-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 6439
Julkaisuaika Joulukuu 2007	Kieli Suomi	Sivuja 227 s. + liitt. 144 s.
Projektin nimi Tiiv ja matala – toiminnallisen paloturvallisuussuunnitelun perusteet	Toimeksiantaja(t) Wood Focus Oy, ympäristöministeriö, Rakennuspolyuretaaniteollisuus, Pientaloteollisuus ry, Espoon kaupunki, VTT	
Avainsanat fire safety, fire safety engineering, fire risk assessment, fire simulation, probabilistic fire simulation, dense residential building, performance based fire design	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2406 Häkkinen, Kai, Hemilä, Jukka, Uoti, Mikko, Salmela, Erno, Happonen, Ari, Hämäläinen, Harri, Siniluhta, Eero, Nousiainen, Jukka & Kärkkäinen, Mikko. VMI teollisuudessa. Teoriaa, teknologiaa ja sovelluksia. 2007. 142 s.
- 2407 Koskela, Mika & Haajanen, Jyrki. Business Process Modeling and Execution. Tools and technologies report for SOAMeS project. 2007. 63 p. + app. 2 p.
- 2408 Kemppe, Paul. Next generation satellite navigation systems. 2007. 61 p. + app. 2 p.
- 2409 Pulakka, Sakari, Heimonen, Ismo, Junnonen, Juha-Matti & Vuolle, Mika. Talotekniikan elinkaarikustannukset. 2007. 58 s. + liitt. 3 s.
- 2410 Mikkola, Markku & Rynnänen, Tapani. Liiketoimintamallit talotekniikan elinkaari palveluissa. 2007. 40 s.
- 2411 Kaartinen, Tommi, Laine-Ylijoki, Jutta & Wahlström, Margareta. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. 2007. 44 s. + liitt. 20 s.
- 2412 Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista. von Weymarn, Niklas (toim.). 2007. 44 s.
- 2413 Pietiläinen, Jorma, Kauppinen, Timo, Kovanen, Keijo, Nykänen, Veijo, Nyman, Mikko, Paiho, Satu, Peltonen, Janne, Pihala, Hannu, Kalema, Timo & Keränen, Hannu. ToVa-käsikirja. Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta. 2007. 173 s. + liitt. 56 s.
- 2415 Hietaniemi, Jukka. Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus. 2007. 227 s. + liitt. 144 s.
- 2416 Vesanto, Petri, Hiltunen, Matti, Moilanen, Antero, Kaartinen, Tommi, Laine-Ylijoki, Jutta, Sipilä, Kai & Wilén, Carl. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon. 2007. 55 s. + liitt. 4 s.
- 2417 Leinonen, Arvo. Wood chip production technology and costs for fuel in Namibia. 2007. 66 p. + app. 21 p.
- 2418 Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset. 2007. 45 s.
- 2419 Martikainen, Antti, Pykälä, Marja-Leena & Farin, Juho. Recognizing climate change in electricity network design and construction. 2007. 106 p. + app. 29 p.
- 2420 Leviäkangas, Pekka, Hautala, Raine, Räsänen, Jukka, Öörni, Risto, Sonninen, Sanna, Hekkanen, Martti, Ohlström, Mikael, Venäläinen, Ari & Saku, Seppo. Benefits of meteorological services in Croatia. 2007. 71 p. + app. 2 p.
- 2421 Hostikka, Simo, Korhonen, Timo, Paloposki, Tuomas, Rinne, Tuomo, Matikainen, Katri & Heliövaara, Simo. Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations. Project summary report. 2007. 64 p.
- 2422 Vestola, Elina & Mroueh, Ulla-Maija. Sulfaatinpelkistyksen hyödyntäminen happamien kaivosvesien käsittelyssä. Opas louhoskäsittelyn hallintaan. 2008. 58 s. + liitt. 13 s.

Julkaisu on saatavana

VTT
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

Publikationen distribueras av

VTT
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

This publication is available from

VTT
P.O. Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4520
<http://www.vtt.fi>
