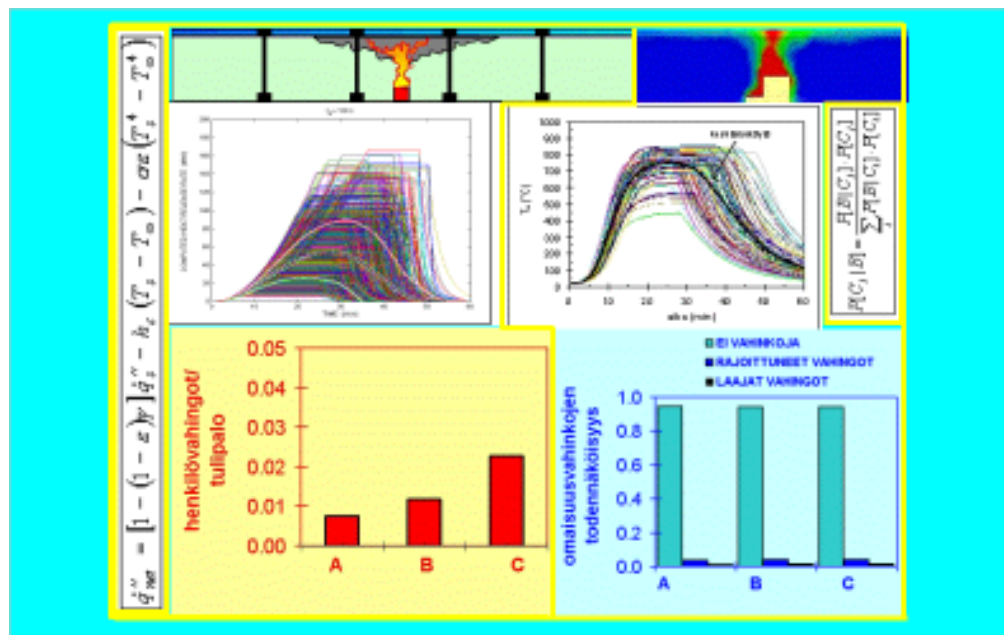


Jukka Hietaniemi, Djebar Baroudi, Timo Korhonen,
Jouni Björkman, Matti Kokkala & Esa Lappi

Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen

Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen



Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen

Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen

Jukka Hietaniemi, Djebbar Baroudi, Timo Korhonen, Jouni Björkman,
Matti Kokkala & Esa Lappi

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5935-5 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5936-3 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

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

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

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

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät,
Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Bygg och transport, Konstruktioner och husteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building and Transport, Structures and Building Services,
Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2002

Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen [Influence of fire resistance of structures on fire safety in a single-storey industrial building. Risk analysis using a time-dependent event-tree model]. Espoo 2002. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Research Notes 2123. 95 s. + liitt. 51 s.

Avainsanat fire safety, fire protection, fire resistance, structures, risk analysis, statistics, Markov, Monte Carlo, industrial buildings, alarm systems, smoke exhaust systems, fault tree analysis

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa kehitettiin malli tulipalojen aiheuttamien vahinkojen riskien suuruuden laskennalliseen arvioimiseen. Mallia on sovellettu sen selvittämiseen, miten yksikerroksisen teollisuushallin henkilö- ja omaisuusvahinkoriskit riippuvat rakenteiden palonkestävyydestä. Eri tekijöiden vertailemiseksi tutkittiin myös sitä, miten kohderakennuksen paloturvallisuusvarusteiden (hälytyksen, käsisammuttimien ja savunpoiston) eri muunnelmat vaikuttavat paloturvallisuuteen.

Kehitetty riskianalyysimenetelmä edustaa uutta paloriskien arvioimisen lähestymistapaa, jossa palon kehittyminen ajan mukana otetaan huomioon kaikissa tarkastellun järjestelmän tapahtumien ja prosessien kuvauksissa. Menetelmä yhdistää palon aikana tapahtuvien eri prosessien kehittymisen mallit kuvaukseksi koko tulipalon kehityksestä. Mallin toiminta perustuu systeemin tapahtumapuu kuvaukseen, jonka perusteella tulipalon aikakehitys saadaan laskettua käsittelemällä järjestelmää Markovin prosessina. Riskien suuruus saadaan määritettyä, kun tulipalon ajallisen kehittymisen kuvaukseen liitetään palon mahdollisten seuraamusten kvantitatiivinen arviointi.

Mallia sovellettiin henkilö- ja omaisuusvahinkojen riskien arviointiin korkeahkossa (sisäkorkeus 8 m) yksikerroksisessa teollisuusrakennuksessa, jossa palon voidaan olettaa pysyvän paikallisena. Tulokset osoittavat, että tämän esimerkkirakennuksen tapauksessa tarkastellut muutokset rakenteiden paloluokissa eivät vaikuttaneet käytännöllisesti katsoen lainkaan omaisuusriskeihin. Myös henkilöille koituvien riskien suhteen havaittiin rakenteiden vaikutuksen olevan merkityksettömän pieni etenkin, kun sitä verrataan muiden paloturvallisuuteen vaikuttavien tekijöiden merkitykseen.

Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen [Influence of fire resistance of structures on fire safety in a single-storey industrial building. Risk analysis using a time-dependent event-tree model]. Espoo 2002. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Research Notes 2123. 95 p. + app. 51 p.

Keywords fire safety, fire protection, fire resistance, structures, risk analysis, statistics, Markov, Monte Carlo, industrial buildings, alarm systems, smoke exhaust systems, fault tree analysis

Abstract

A model for quantitative analysis of fire risks has been developed. The model has been applied to a single-storey industrial building to assess quantitatively the influence of the fire resistance of the structures of the building to the risks associated with casualties and property damage. The influence of other factors affecting the fire safety besides the fire resistance, such as alarm system, manual extinguishers and smoke exhaust system, has also been addressed.

The developed method represents a novel approach to analysis of fire risks in which the temporal evolution of the fire has been taken into account explicitly in the descriptions of the events and processes taking place during the fire incident. The model combines the different unit processes of the fire to an overall description of the evolution of the fire incident. The model is based on an event-tree description of the system, the time evolution of which is calculated by treating the system as a Markovian process. The risks are derived from the time-dependent description of the fire through incorporation of quantitative characterisations of the potential consequences.

The model was applied to fire risk analysis of a single-storey industrial building with 8-m ceiling height, in which the fire can be assumed to remain localised through the whole fire incident. The results in this application example show that the risks associated with damage to property are virtually independent of the changes in the fire resistance of the structures. Also considering the risks to personnel, the influence of the fire resistance of the structures was found out to be negligibly small, especially when compared to influence of other factors affecting the fire safety of the building.

Alkusanat

Työssä kehitettiin malli tulipalojen aiheuttamien vahinkojen riskien laskennalliseen arvioimiseen. Mallia on sovellettu sen selvittämiseen, miten yksikerroksisen teollisuus-hallin henkilö- ja omaisuusvahinkoriskit riippuvat rakenteiden palonkestävyydestä.

Tämä tutkimus on osa STEELTIMBER-hanketta, jonka ovat rahoittaneet Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Wood Focus Ltd ja Teräsrakenneyhdistys. Tekijät kiittävät näitä tahoja työn rahoittamisesta.

Hankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet seuraavat henkilöt: Ismo Heinonen, puheenjohtaja (Vapo Timber Oy), Jouko Kouhi (Teräsrakenneyhdistys), Markku Lehtonen (Wood Focus Oy), Jarmo Leskelä (Metsäteollisuus ry), Pekka Nurro (Wood Focus Oy), Kai Rätty (Teräsrakenneyhdistys), Kristian Witting (Rautaruukki Oy) ja Tom Warras (Tekes). Johtoryhmän jäseniä kiitetään heidän asiantuntevasta ohjauksestaan työn ku- luessa.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	7
2. Tarkastelumenetelmän kuvaus.....	9
2.1 Yleiskuvaus tietyn rakennuksen riskien analysoinnista.....	9
2.2 Tietyn uhkakuvan riskianalyysissä käytetty ajasta riippuva tapahtumapuumalli	11
2.3 Stokastisesti käsitelty mitoituspalo ja sen käyttö.....	13
2.4 Mallissa tarkasteltujen tapahtumien ja prosessien yleiskuvaus.....	13
2.4.1 Palon havaitseminen aistinvaraisesti tai automaattisen paloilmittimen avulla.....	14
2.4.2 Palon sammutus ja itsesammuminen.....	14
2.4.3 Henkilöiden poistuminen palavasta rakennuksesta.....	15
2.4.4 Savun kertyminen rakennukseen.....	15
2.4.5 Rakenteiden lämpeneminen ja vaurioituminen.....	16
2.5 Tulipalon ajallisen kehityksen huomioon ottaminen.....	16
2.5.1 Tulipalon jako aikajaksoihin.....	16
2.5.2 Palon eri vaiheiden tapahtumapuuanalyysi.....	17
2.5.3 Palon aikakehityksen laskeminen käyttämällä eri hetkiä kuvaavien tapahtumapuiden informaatiota.....	19
2.6 Rakennus ja tarkastellut uhkakuvat.....	21
3. Tarkastelun kohderakennus.....	23
3.1 Rakennuksen koko, käyttö ja palontorjunta.....	23
3.2 Tarkasteltavat rakenteet.....	24
4. Tarkastelun perustana oleva tulipalo.....	26
4.1 Kuormalavapinon palamisen deterministinen kuvaus.....	26
4.2 Palon kuvaaminen stokastisena tapahtumana: Monte Carlo -simulointi.....	29
4.2.1 Simuloinnin suoritus.....	30
4.2.2 Simuloituja palotehokäyriä.....	32
5. Palon havaitseminen.....	33
5.1 Havainnointi aistein.....	33
5.2 Automaattinen havainnointi.....	34

6. Palon sammuttaminen tai sammuminen itsestään.....	36
6.1 Palon sammuttaminen	36
6.2 Palon sammuminen	37
7. Poistuminen palavasta rakennuksesta.....	39
8. Rakennuksen täyttyminen savulla.....	42
9. Tulipalon vaikutus rakenteisiin.....	45
9.1 Teräspalkki	46
9.1.1 Lämpörasituksen mallintaminen	46
9.1.2 Teräspalkin vaurioituminen	49
9.1.3 Teräspalkin vaurioitumisaikojen jakaumat	50
9.2 Liimapuupalkki.....	52
9.2.1 Liimapuupalkin kantokyky	52
9.2.2 Liimapuupalkin kuormitus	55
9.2.3 Liimapuupalkin vaurioituminen.....	55
9.2.4 Liimapuupalkin vaurioitumisaikojen jakaumat	55
10. Seuraamukset	57
10.1 Omaisuusvahingot	57
10.2 Henkilövahingot	59
11. Paloriskien arviointi	60
11.1 Syöttötiedot	60
11.1.1 Omaisuusvahinkojen analysoinnin vaatimat tiedot.....	60
11.1.2 Henkilövahinkojen analysoinnin vaatimat tiedot.....	66
11.2 Riskianalyysin tulokset.....	71
11.2.1 Henkilövahinkojen syntyminen	71
11.2.2 Omaisuusvahinkojen syntyminen	75
12. Riskianalyysin tulosten tarkastelu.....	80
12.1 Tietyn palonkestoluokan omaavan rakenteen vaurioitumisriski palonkestoajan puitteissa	80
12.1.1 Teräspalkki.....	80
12.1.2 Liimapuupalkki	81
12.2 Rakenteiden palonkeston vaikutus paloriskeihin	82
12.2.1 Teräspalkit.....	82
12.2.2 Liimapuupalkit	85
12.3 Rakennuksen paloturvallisuusvarusteiden vaikutus paloriskeihin	86

13. Yhteenveto	90
Loppusanat.....	92
Lähdeluettelo	93

LIITTEET

Liite A: Teräspalkin palonkestoluokan ja poikkileikkaustekijän suhde kriittisen lämpötilan vaurioitumistavan puitteissa

Liite B: Monte Carlo -simulointitekniikka

Liite C: Palotehon kasvu- ja hiipumisajan riippuvuussuhteesta

Liite D: Hiiltymismalli

Liite E: Lumikuorman tilastollinen tarkastelu

Liite F: Palotapahtuman aikakehityksen laskeminen

Liite G: Riskianalyysilaskelmien tulokset

Liite H: Erilaisten paloturvallisuusvarustelujen vertailu

1. Johdanto

Paloilmiöitä ja palon vaikutuksia koskeva ymmärtämys ja tiedon määrä ovat kasvaneet voimakkaasti parin viimeisen vuosikymmenen aikana. Samalla myös tietotekniikan tarjoamat mahdollisuudet suunnitella, laskea ja analysoida paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä ovat kehittyneet räjähdysnomaisesti. Nämä kehitystrendit ovat mahdollistaneet palotekniikan kohoamisen insinööritieteeksi ja kulminoituneet mahdollisuudeksi käyttää paloturvallisuuden suunnittelussa ja arvioinnissa toiminnallista lähestymistapaa, jossa tarkastelu lähtee siitä rationaalista ajatuksesta, että systeemejä pitää lähestyä lähtien niiltä edellytettävästä toiminnasta.

Tulipalot ovat ongelmallisia, koska ne uhkaavat yhteiskuntaa monin tavoin. Ne aiheuttavat ihmishenkien ja omaisuuden menetyksiä suorasti ja epäsuorasti. Siksi paloturvallisuuden toiminnalliseen lähestymistapaan liittyy erottamattomana osana tulipalojen aiheuttamien uhkien ja niiden seuraamusten arviointi eli riskien arviointi.

Sen lisäksi, että paloriskien arviointimenetelmiä voidaan soveltaa rakennusten suunnittelussa ja suunnitelmien paloturvallisuusvaikutusten arvioimisessa, niitä voidaan käyttää myös yleisempään arviointitehtävään, nimittäin sen tutkimiseen, miten palosäädösten vaatimukset vaikuttavat paloturvallisuuteen. Koska osa olemassa olevista palosäädöksistä on perustunut perinteeseen ja on voinut muotoutua erilaisten ei-tekniisten vaikutusten alaisena, ei ole lainkaan mahdotonta, että niiden vaikutusten rationaalinen tarkastelu voi paljastaa muutostarpeita.

Suomessakin on noussut esille kysymyksiä siitä, ovatko palosäädökset tasapuolisia eri rakennustuotteiden suhteen. Tällaisten kysymyksien ratkaiseminen vaatii palosäädösten paloturvallisuusvaikutusten analysointia, mikä puolestaan edellyttää tähän tehtävään sopivien menetelmien käyttöä, jotka mahdollistavat kysymysten neutraalin asialähtöisen tarkastelun ja eri tekijöiden kvantifioinnin. Jotta rakenteiden palonkestovaatimusten vaikutus paloriskeihin saataisiin selvitettyä, Suomen teräs- ja puuteollisuus aloittivat hankkeen nimeltä STEELTIMBER, jonka tavoitteena oli tehtävään sopivan menetelmän luominen.

Sopivan menetelmän löytäminen palosäädösten paloturvallisuusmerkityksien selvittämiseksi osoittautui hankalaksi, sillä vaikka paloriskien arviointimenetelmiä onkin saatavilla, osoittautui, että niiden käytettävyys ei välttämättä ole itsestään selvästi taattu.

Paloriskien arviointimenetelmiä on saatavilla joko menetelmäkuvauksina tai tietokoneohjelmina. Niitä ovat mm. FIRE [Fitzgerald 1986], CRISP [Fraser-Mitchell 1994], FIRECAM™ [Yung ym. 1997], CESARE-RISK [Beck 1998], MOCASSIN [Hognon 1991], SIA 81 [SIA 1996] ja FRAME [Hoffman 1995]. Ongelmana näiden mallien käytössä on saada tietää, ovatko ne kelpoisia käytettäväksi myös Suomen palosäädös-

ympäristössä. Vaikka paloturvallisuuden arvioimismenetelmät on pyritty laatimaan mahdollisimman yleispäteviksi ja monet niiden käyttämisestä malleista ovat luonnontieteisiin perustuvina yleiskäyttöisiä, on käytännössä hyvin vaikeaa toteuttaa paloriskien arviointimenetelmää, joka ei joiltain kohdiltaan tukeutuisi oletuksiin, joiden pätevyys voi vaihdella säädösympäristön mukaan. Tällaisia mahdollisia ongelmia on usein vaikea havaita muuta kuin ”yrityksen ja erehdyksen” menetelmää käyttäen. Mahdollisten tarvittavien muutosten tekeminen voi osoittautua hyvin hankalaksi, koska menetelmiä ei monestikaan ole suunniteltu joustaviksi eikä muunneltaviksi, mikä usein onkin suotavaa, jotta voidaan mm. ehkäistä mallin virheellistä käyttöä. Myös se perusvaatimus, joka pätee minkä tahansa paloteknisen menetelmän käytölle, että käyttäjän tulisi tuntea menetelmän toiminnan periaatteet ja tekninen toteutus, on vaikea toteuttaa, koska menetelmien dokumentoinnit eivät lähes koskaan sisällä kaikkia oleellisia tietoja. Jos mallien sisältämiin oletuksiin ja eri prosessien kuvauksiin päästään käsiksi, voidaan havaita niiden olevan monien ongelmien tarkastelun kannalta liian rajoittuneita.

Edellä mainituista syistä STEELTIMBER-hankkeessa päätettiin kehittää menetelmä, jolla palosäädösten vaikutuksia voidaan tutkia eri rakennemateriaalien kannalta. Tämä julkaisu sisältää kehitetyn menetelmän kuvauksen ja sen sovellusesimerkin yksikerroksiseen teollisuushalliin.

Menetelmä on aivan uusi tapa arvioida paloriskejä. Sen erityinen uusi piirre on se, että palon kehittyminen ajan mukana otetaan huomioon kaikissa tarkastellun järjestelmän tapahtumien ja prosessien kuvauksissa. Menetelmä yhdistää palon aikana tapahtuvien eri prosessien kehittymisen mallit kuvaukseksi koko tulipalon kehityksestä. Koska tulipalon mahdollisten tapahtumaketjujen kehittyminen kuvataan käyttäen apuna tapahtumapuita eri ajanhetkinä, voidaan menetelmää luonnehtia nimityksellä ”ajasta riippuva tapahtumapuumalli”. Tapahtumapuu luovat kuitenkin vain staattisen kehyksen palon kehityksen kuvaamiselle. Varsinainen aikakehityksen simulointi suoritetaan käsittelemällä systeemiä ajan suhteen diskreettinä Markovin prosessina.

Riskien suuruus saadaan määritettyä, kun tulipalon ajallisen kehittymisen kuvaukseen liitetään palon mahdollisten seuraamusten kvantitatiivinen arviointi.

Tässä työssä esitetty malli soveltuu sellaisenaan vain esimerkkitapauksena käsitellyn teollisuushallin kaltaisten varsin yksinkertaisten kohteiden paloturvallisuuden tarkasteluun. Mallia kehitetäänkin jatkuvasti, ja se tulee kehitystyön jatkuessa saamaan useita lisäpiirteitä, jotka mahdollistavat sen käytön lukuisissa muissakin sovelluskohteissa.

Tämä julkaisu alkaa menetelmän lyhyellä kuvauksella luvussa 2, jota seuraavat luvut ja liitteet täydentävät. Lopuksi esitetään kohderakennuksen riskianalyysin tulokset ja niiden arviointi.

2. Tarkastelumenetelmän kuvaus

2.1 Yleiskuvaus tietyn rakennuksen riskien analysoinnista

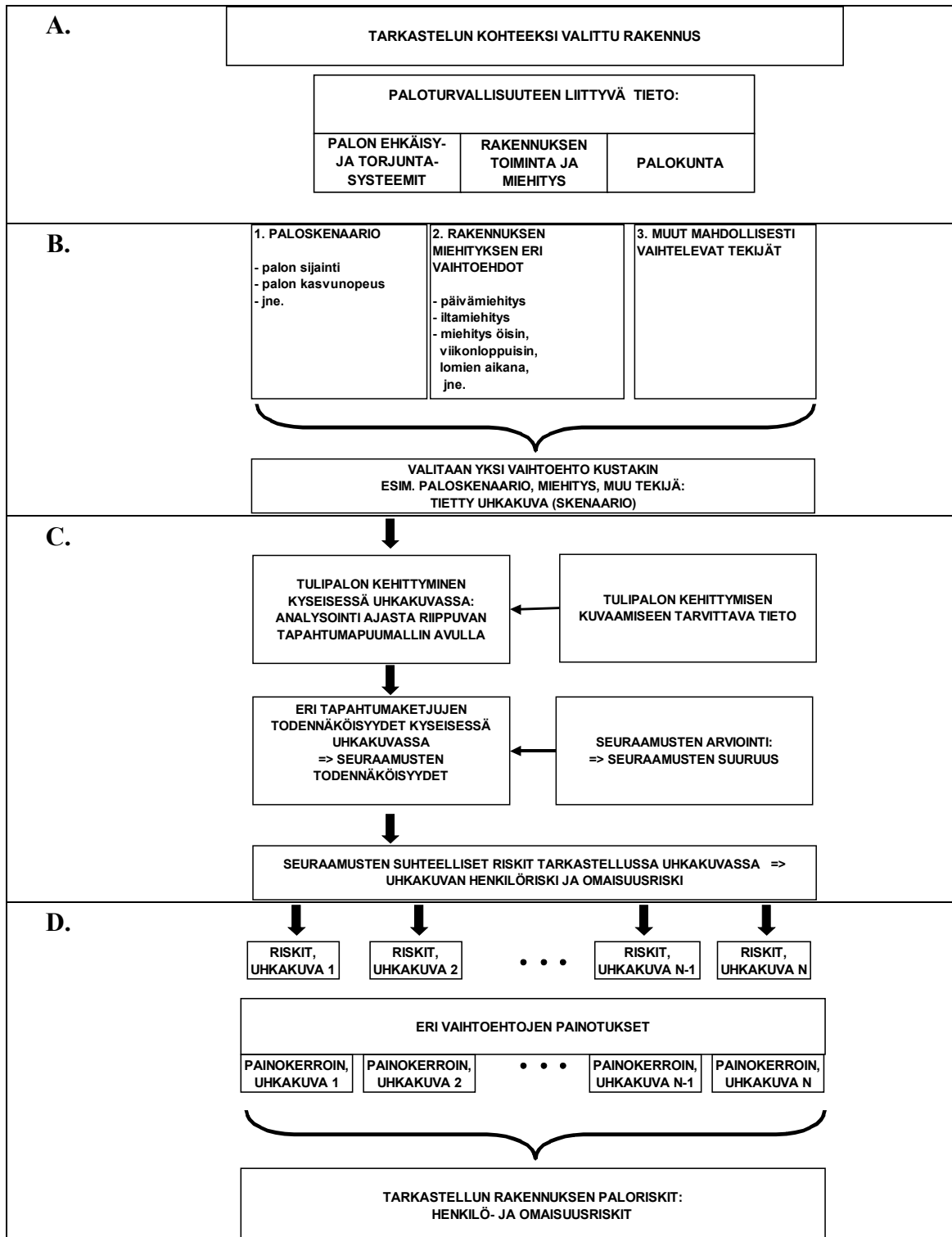
Tässä työssä kehitetty malli tuottaa arvion tarkastelun kohteeksi valitun rakennuksen paloriskeistä. Tässä julkaisussa käsiteltävät riskityypit ovat henkilö- ja omaisuusriskit, jotka ovat paloturvallisuuden kannalta ensiarvoisen tärkeitä. Mallia edelleen kehitettäessä pyritään toteuttamaan myös muiden riskityyppien arviointiin tarvittavia alimalleja.

Rakennuksen paloriskit muodostetaan yhdistämällä tietyille valituille uhkakuville lasketut riskit kuvassa 1 esitetyn systeemin kaaviokuvan mukaisesti. Vaiheessa A valitaan tarkasteltava rakennus ja kerätään kaikki paloriskien arvioinnissa tarvittava tieto. Rakennuksen ominaisuuksista otetaan huomioon sen sijainti, koko, käyttötapa, miehitys ja eri tilojen järjestely ja käyttö. Rakennuksen sijainti otetaan huomioon palokunnan saapumisajan määrittämisessä. Rakennuksen käyttötapa otetaan huomioon sen paloturvallisuusvaikutusten kautta, esim. määräysten edellyttämän paloturvallisuustason vaatimien havainnointi-, hälytys- ja sammutuslaitteiden. Rakennuksen miehitys vaikuttaa paloriskeihin kahdella tavalla. Toisaalta, mitä enemmän rakennuksessa on väkeä, sitä suuremmat ovat palon aikaisen havaitsemisen ja sammuttamisen todennäköisyydet. Toisaalta suuri ihmismäärä kasvattaa mahdollisten uhrien riskiä. Tilojen järjestely ja käyttö otetaan huomioon siinä määrin kuin mahdollisten tulipalojen kuvaaminen riittävän yksityiskohtaisesti edellyttää (palokuorma, mahdolliset sytytyslähteet, jne.).

Vaiheessa B valitaan uhkakuva (skenaario) valitsemalla jokin mahdolliseksi katsotuista paloskenaariosta, jokin rakennuksen miehityksen vaihteluun liittyvistä vaihtoehdoista, jne.

Vaiheessa C toteutetaan valitun uhkakuvan riskianalyysi käyttämällä tässä työssä kehitettyä mallia, jossa tulipalon ajallinen kehitys otetaan huomioon 1) analysoimalla tietyt, mallissa valitut ajanhetket tapahtumapuiden avulla sekä 2) kytkemällä nämä eri hetkien kuvaukset toisiinsa koko palon aikakehityksen kuvaukseksi. Mallia kutsutaan jatkossa nimellä ”ajasta riippuva tapahtumapuumalli”. Tämä julkaisu keskittyy tämän mallin ja muiden vaiheessa C tarvittavien työvaiheiden kuvaamiseen.

Vaiheessa D yhdistetään kaikkien eri uhkakuvien riskianalyysien tuloksena saadut riskiarvot arvioksi rakennusta koskevista tulipaloriskeistä. Yhdistäminen suoritetaan laskeamalla eri uhkakuvia vastaavien riskien painotettu summa, jossa painokertoimet kuvaavat kunkin uhkakuvan todennäköisyyttä.



Kuva 1. Riskianalyysin kulun kaaviokuva.

2.2 Tietyn uhkakuvan riskianalyyssissä käytetty ajasta riippuva tapahtumapuumalli

Tietyn uhkakuvan paloriskien tarkastelussa käytetty systeemi ja tarkastelussa käytetyt menetelmät esitetään kaaviona kuvassa 2.

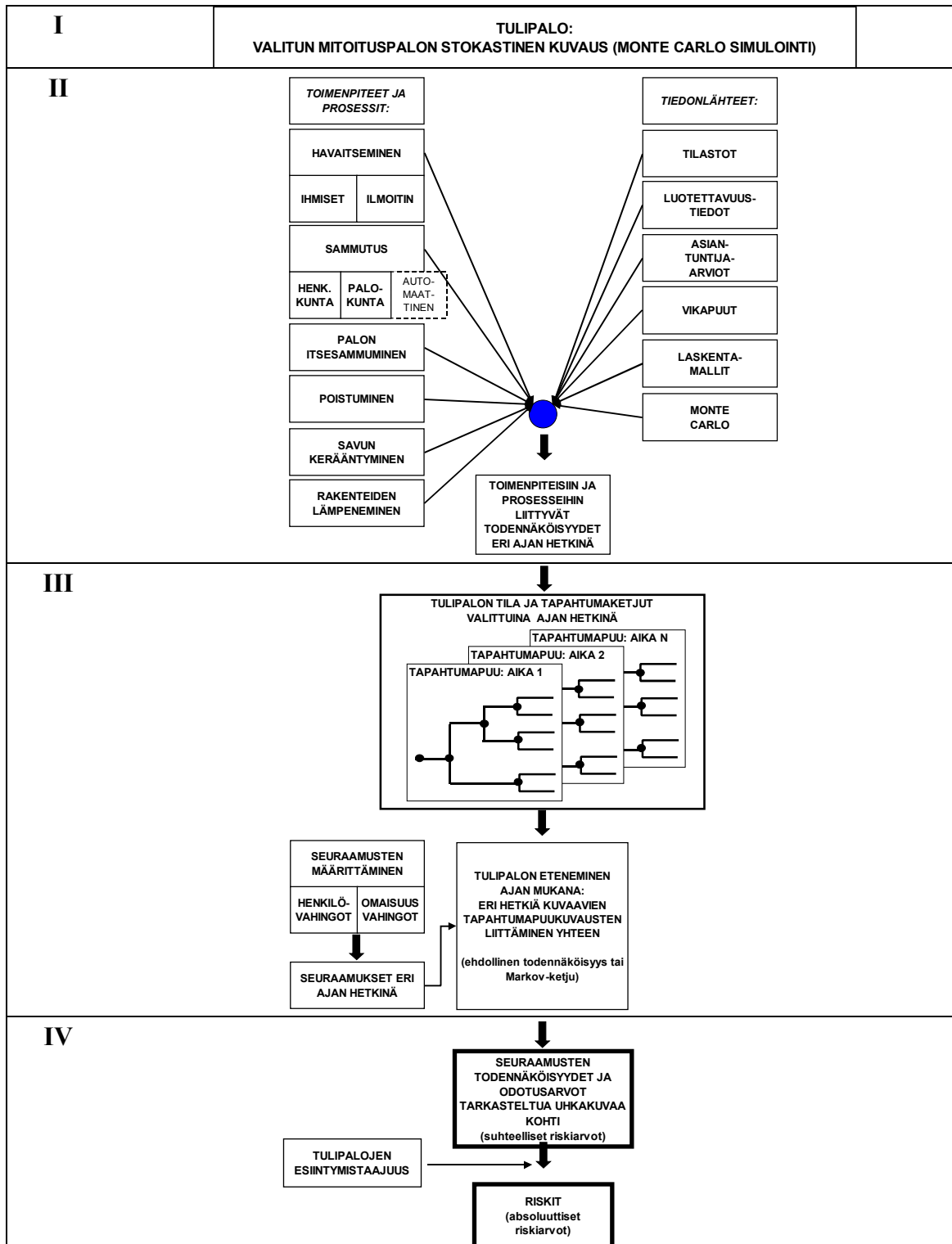
Tarkastelun perustana on valitun paloskenaarion kuvaaminen stokastisesti mallinnettuna mitoituspaloa (vaihe I).

Seuraavassa vaiheessa (vaihe II) käydään läpi tarkastelun piiriin valitut tulipalon aikaiset tapahtumat ja prosessit. Osa näistä tapahtumista ja prosesseista kuvataan laskentamallien avulla. Tietyissä prosesseissa ilmiöiden vaihtelevuus otetaan huomioon suorittamalla laskennat yhdistettynä Monte Carlo -simulointiin, mutta tietyt prosessit tai niiden alisysteemit kuvataan yksinkertaisuuden vuoksi ilman vaihtelevuutta.

Vaiheessa III vaiheesta II saatu tieto eri tapahtumien ja prosessien etenemiseen liittyvistä todennäköisyyksistä kootaan tapahtumapuiden avulla jäsennetyksi kuvaukseksi tulipalon tilasta valittuina ajanhetkinä. Tapahtumapuukuvaus täydennetään erillisellä seuraamusten analysoinnilla. Tämän jälkeen lasketaan systeemin tilan kehittyminen ajan mukana käyttäen joko ehdollisia todennäköisyyksiä tai Markov-prosessin aikakehityksen laskentakaavoja.

Vaiheessa IV kerätään systeemin aikakehityksen laskennan antamat tulokset riskien suuruudesta tarkastelussa uhkakuvassa. Riskeistä saadaan lopullisten arvojen lisäksi selville myös niiden ajallinen kehitys. Riskien lisäksi systeemin aikakehityksen laskennan tuloksista voidaan seurata eri tapahtumien ja prosessien aikakehitystä (esim. palon havaitsemista, palon sammuttamista, uhkaavien olosuhteiden kehittymistä jne.) ja verrata niitä toisiinsa. Jos riskiarvot kerrotaan kyseistä uhkakuvaa vastaavien tulipalojen esiintymistäajuudella, voidaan arvioida tulipalon kokonaisriskiä.

Eri tapahtumia ja prosesseja tarkasteltaessa käytettyjen menetelmien ja mallien yleiskuvauksia esitetään kohdassa 2.3. Niiden soveltaminen käytännössä tuodaan esille esimerkiksi kitapauksen riskien analysoinnissa luvuissa 4–11 ja niihin liittyvissä liitteissä.



Kuva 2. Tarkastelun kohteeksi valitun rakennuksen tietyn uhkakuvan riskien arvioinnissa käytetyn mallin kaavakuva. Automaattinen palon sammutus (sprinklerit) esitetään muista poikkeavalla tavalla sen korostamiseksi, että tässä työssä ei ole tarkasteltu sen vaikutusta.

2.3 Stokastisesti käsitelty mitoituspalo ja sen käyttö

Paloskenaariot kuvataan kvantitatiivisesti käyttäen mitoituspaloa, jonka oletetaan kehittyvän ”vapaasti” eli siten, että siihen ei kohdisteta sammutustoimenpiteitä. Mitoituspalo kuvataan stokastisena prosessina käyttäen apuna Monte Carlo -simulointitekniikkaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yhden mitoituspalon sijasta lähestymistapa kattaa suuren joukon (tuhansia tai kymmeniä tuhansia) mitoituspaloja, joista kukin edustaa jotain rakennuksessa mahdollista tulipaloa: mukana on koko tulipalojen mahdollinen variaatioskaala siten, että ääripäitä edustavien epätodennäköisten palojen lukumäärä on pieni ja tyyppillisten todennäköisten palojen lukumäärä on suuri.

Stokastisesti kuvattua mitoituspaloa käytetään kaikkien tarkasteluun mukaan otettujen tapahtumien ja prosessien kuvaamisen perustietona.

Koska tarkasteltu rakennus on sisämitoiltaan hyvin suuri, on oletettu, että tulipalot pysyvät paikallisina eikä lieskahdusta tapahdu. Paikallisen palon skenaarioina tarkastellaan kahdella eri nopeudella kehittyviä paloja. Toinen palotyyppi on nopeasti kehittyvä palo, jonka kasvuajan oletetaan olevan välillä 120–180 s siten, että kasvuajan keskiarvo on 150 s. Hitaamman palotyypin kasvuajan oletetaan olevan välillä 300–600 s, eli kasvu-aika vastaa normaalilla tai hitaalla nopeudella kasvavaa paloa.

2.4 Mallissa tarkasteltujen tapahtumien ja prosessien yleiskuvaus

Seuraavat palonvahinkojen torjuntalaitteet otetaan huomioon niiden toimintaa koskevien tilasto- ja luotettavuustietojen sekä niiden toimintaa kuvaavien mallien perusteella:

- automaattiset palon havaitsemis- ja hälytyslaitteet
- alkusammutuskalusto
- savunpoistojärjestelmä.

On huomattava, että sprinklereiden vaikutusta ei tässä työssä tarkasteltu, koska tarkastelun kohteena olevassa esimerkkirakennuksessa ei ole automaattista sammutusjärjestelmää. Mitään periaatteellisia tai teknisiä vaikeuksia niiden huomioonottamisessa ei ole.

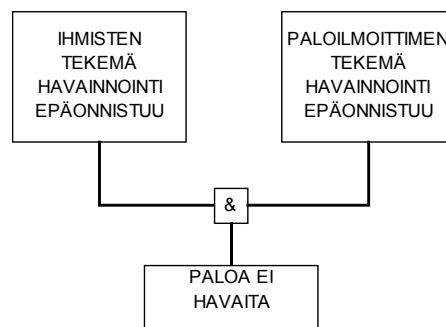
Menetelmässä otetaan huomioon seuraavat tulipaloon liittyvät tapahtumat tai prosessit:

- palon havaitseminen joko aistinvaraisesti tai paloilmoittimen avulla
- palon sammuttaminen käsin, johon on sisällytetty
 - sammutus henkilökunnan toimesta ja

- sammutus palokunnan toimesta,
- palon loppuminen siihen, kun palokuorma palaa loppuun,
- ihmisten poistuminen palavasta rakennuksesta
- savun kertyminen rakennukseen
- rakenteiden lämpeneminen.

2.4.1 Palon havaitseminen aistinvaraisesti tai automaattisen paloilmittimen avulla

Palohavainnon voi tehdä henkilökunta tai automaattinen paloilmittimen avulla. Palon havaitsemisen todennäköisyyttä on helpointa tarkastella sen komplementin, eli tapahtuman ”paloa ei havaita”, avulla. Tapahtuma ”paloa ei havaita” vastaa sitä, että sekä henkilökunnan että paloilmittimen tekemä havainnointi epäonnistuu, joten sen todennäköisyys voidaan määrittää kuvan 3 esittämästä vikapuusta.



Kuva 3. Palon havaitsemisen vikapuutarkastelu.

Henkilökunnan tekemän palon havaitsemisen todennäköisyydet määritettiin asiantuntija-arviona ja paloilmittimen tekemän havaitsemisen todennäköisyydet laskettiin palon aiheuttaman kattosuihkun ilmaisinta lämmittävän vaikutuksen avulla. Palon havaitsemisen yksityiskohtainen käsittely esitetään luvussa 5.

2.4.2 Palon sammutus ja itsesammuminen

Mallissa otetaan huomioon palon sammuttaminen sekä henkilökunnan että palokunnan toimesta. Henkilökunnan oletetaan yrittävän sammutusta vain kerran, samalla hetkellä kuin palo havaitaan. Henkilökunnan oletetaan yrittävän sammuttaa paloa vain ensimmäisen 10 minuutin aikana, jolloin palokunta ei ole vielä paikalla. Palokunnan oletetaan

saapuvan paikalle vasta 10 minuutin jälkeen ja tämän jälkeen sammutusyritykset tapahtuvat palokunnan toimesta.

Tässä työssä palokunnan ja henkilökunnan tekemä sammuttaminen yhdistettiin tapahtumapuissa yhdeksi haaraksi systeemin yksinkertaistamiseksi ja tapahtumapuiden koon pienentämiseksi. Tarkasteltaessa tässä työssä tutkittua teollisuushallia monimutkaisempia systeemejä on käsitteellisesti selkeämpää erottaa nämä kaksi tapahtumaa omiksi tapahtumapuun haaroikseen.

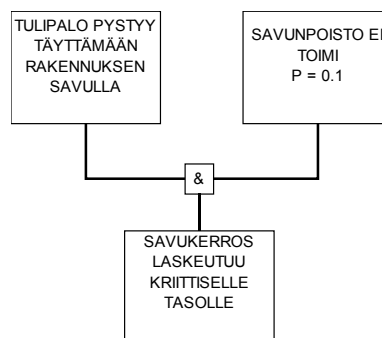
Palon sammutusta ja mahdollisuutta, että se sammuu itseksensä, käsitellään kvantitatiivisesti luvussa 6.

2.4.3 Henkilöiden poistuminen palavasta rakennuksesta

Ihmisten poistumista palavasta rakennuksesta tarkastellaan yksinkertaisen hydraulisen laskentamallin [Nelson ja MacLennan 1995] avulla siten, että poistumiseen liittyvää epävarmuustekijää kuvataan käsittelemällä palon havaitsemisaikaa satunnaisena (stokastisena) suureena.

2.4.4 Savun kertyminen rakennukseen

Savun kertyminen rakennukseen ja sen aiheuttama uhka ihmisille otetaan huomioon palotilaan syntyvän kuumen savukerroksen laskeutumisajan sekä rakennuksen savunpoistojärjestelmän toiminnan perusteella kuvan 4 esittämällä tavalla.



Kuva 4. Vikapuutarkastelu koskien savun kertymistä kriittiselle tasolle.

Kriittisenä, vahingollisiin seurauksiin johtavana tapahtumana pidetään Lundin yliopiston esittämien tarkastelujen [Magnusson ym. 1995] mukaisesti sitä, kun savukerroksen alareuna laskeutuu tasolle 1,6 metriä + 10 % rakennuksen korkeudesta. Tämän ajan las-

keminen esitetään luvussa 8. Savunpoistosysteemin oletetaan toimivan 90 %:n varmuudella.

2.4.5 Rakenteiden lämpeneminen ja vaurioituminen

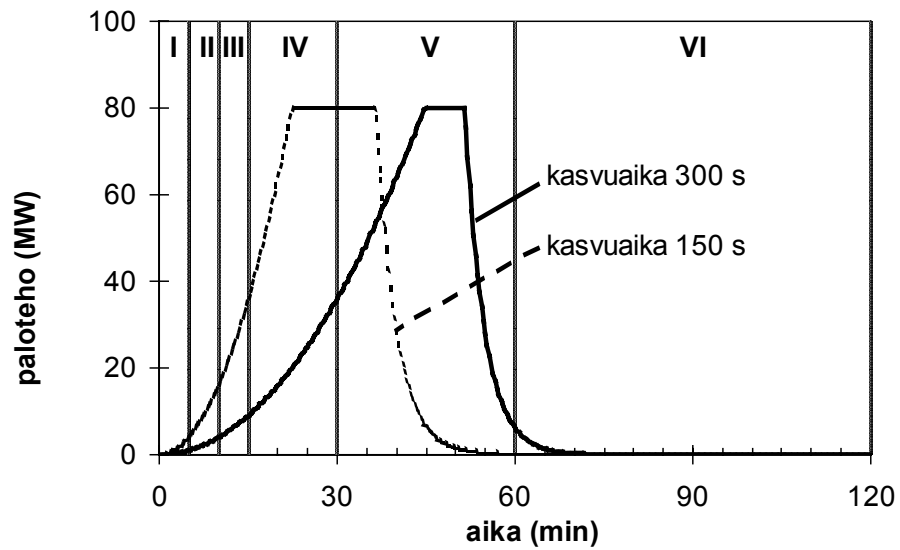
Rakenteiden lämpenemistä kuvataan paikallisen palon aiheuttamaa lämpörasitusta kuvaavien mallien avulla [Hasemi ym. 1995, Myllymäki ja Kokkala 2000]. Riskianalyysi tehdään erikseen kahdelle rakennevaihtoehdolle, teräs- tai liimapuupalkille. Teräsrakenteiden vahingoittumista kuvataan käyttäen kriteerinä teräksen lämpenemistä kriittiseen lämpötilaan, jonka arvoksi on oletettu 600 °C. Puupalkin vaurioituminen lasketaan sen hiiltymisen perusteella. Hiiltymisen laskenta suoritetaan käyttäen VTT Palotekniikassa kehitettyä hiiltymisrajan etenemistä kuvaavaa mallia, joka perustuu Baroudin [1994] esittämään malliin.

Tulipalon rakenteisiin kohdistamaa lämmitystä tarkastellaan stokastisena prosessina eli tapahtumana, jonka lopputulokset eivät samaa tilannetta kuvattaessa ole täsmälleen samoja vaan sisältävät vaihtelevuutta. Näin malliin saadaan mukaan se todellisia tulipaloja jäljittelevä piirre, että kunkin tulipalon kehitys on erilainen, vaikka palojen alkutilanteet olisivatkin yhtenevät. Teknisesti vaihtelevuuden huomioon ottaminen tehdään käyttämällä hyväksi Monte Carlo -simulointitekniikkaa siten, että sekä paikallisen palon aiheuttamaa lämpenemistä että palokuormaa ja palotapahtumaa kuvaavien mallien parametreja käsitellään epävarmuutta sisältävinä stokastisina suureina (parametreille ei anneta tiettyjä tarkkaan määriteltyjä vakioarvoja, vaan niiden arvot valitaan sopivista tilastollisista jakaumista). Monte Carlo -menetelmää kuvataan tarkemmin liitteessä B ja rakenteiden vahingoittumisen laskentatapojen yksityiskohdat esitetään luvussa 9.

2.5 Tulipalon ajallisen kehityksen huomioon ottaminen

2.5.1 Tulipalon jako aikajaksoihin

Riskianalyysimallissa otetaan palon ajallinen kehitys huomioon eksplisiittisesti. Käytännössä tämä tehdään siten, että palo jaetaan aikajaksoihin, joista kutakin tarkastellaan erillisellä tapahtumapuulla siihen liittyvine todennäköisyyksineen, jotka ovat erisuuria palon eri aikoina. Tässä työssä käytetään seuraavaa aikajakoa: 5, 10, 15, 30, 60 ja 120 minuuttia. Palon ajallisen kehityksen käsittelyä on havainnollistettu kuvassa 5.

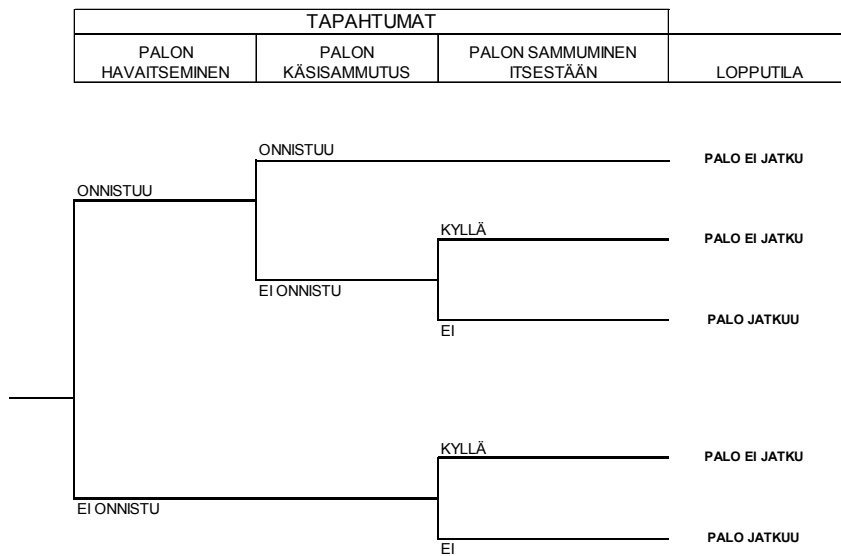


Kuva 5. Tulipalon riskitarkastelussa käytetty aikajako ja kahta analysoitua palotausta edustavat palotehokäyrät. Aikajaksot ovat 0–5 min, 5–10 min, 10–15 min, 15–30 min, 30–60 min ja 60–120 min.

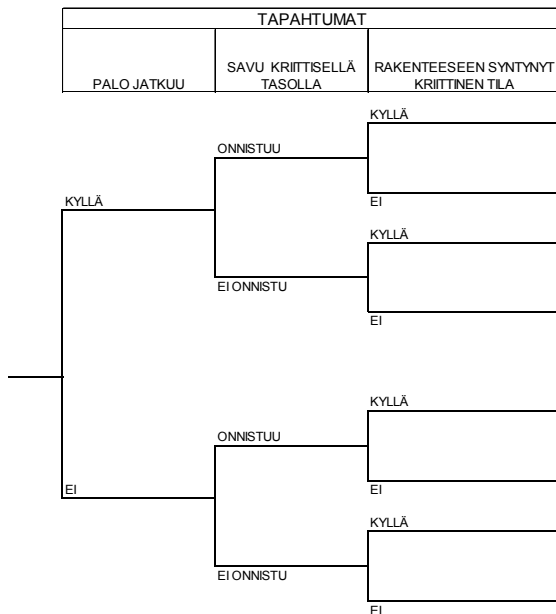
2.5.2 Palon eri vaiheiden tapahtumapuuanalyysi

Tapahtumia palon eri aikoina analysoidaan käyttäen kolmea eri tapahtumapuutyyppiä, jotka on esitetty kuvassa 6. Yhdellä tapahtumapuulla tarkastellaan palon jatkumista ja kahdella muulla analysoidaan vahinkojen syntymisen edellytyksiä.

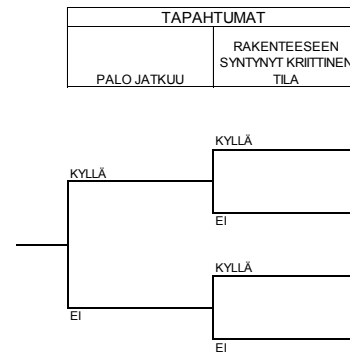
a)



b)



c)



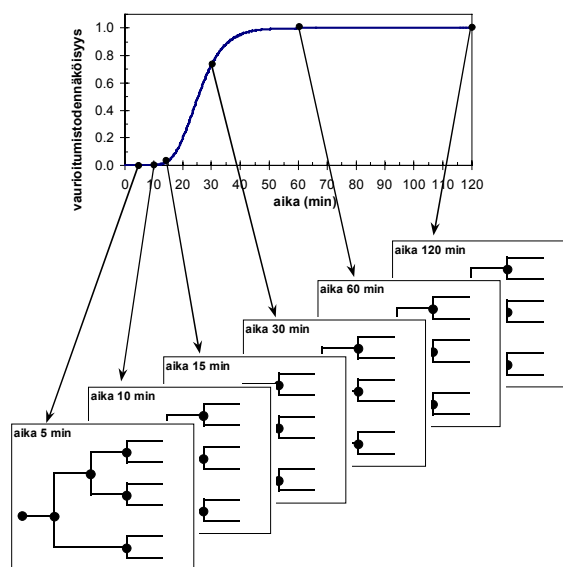
Kuva 6. Työssä käytetyt tapahtumapuut. a) tapahtumapuu, jolla analysoidaan palon jatkumista tiettyinä ajanhetkenä, b) tapahtumapuu henkilövahinkojen syntymisen analysoimiseen ja c) tapahtumapuu omaisuusvahinkojen syntymisen analysoimiseen.

Kuten edellä on esitetty, palon havaitsemiseen liittyvä haarautumistodennäköisyys arvioidaan aistinvaraisen ja automaattisen havainnoinnin todennäköisyyksien perusteella sekä palon sammuttamiseen liittyvä haarautumistodennäköisyys käsin tapahtuvan sammuttamisen onnistumisesta. Se seikka, onko stokastisten mitoituspalojen palokuorma palanut loppuun, otetaan huomioon tätä prosessia kuvaavan todennäköisyysjakauman avulla, eli palon sammuttamisella tarkoitetaan tässä henkilökunnan tai palokunnan (tai

sprinklerien) onnistunutta sammutusyritystä. Näiden todennäköisyyksien arviointi esitetään luvussa 6.

Rakenteiden vaurioitumisen todennäköisyydet saadaan luvussa 9 laskettavista rakenteiden vaurioitumisen todennäköisyyden aikakehitystä esittävistä jakaumista (teräspalkin kuvasta 16 ja liimapuupalkin kuvasta 17).

Kaikki systeemissä tarkasteltavat tapahtumat ja prosessit kuvataan ajasta riippuvina, so. tarkasteluista saadaan tuloksena tietyn tapahtuman tai prosessin todennäköisyys ajan funktiona. Aikariippuvuus voidaan esittää vain muutamissa pisteissä (esim. palon sammuttamisen todennäköisyys) tai jatkuvana käyränä (esim. luvussa 9 esitetyt rakenteen vaurioitumisen kertymäfunktiot). Näistä ajasta riippuvista kuvauksista saatavia todennäköisyyksiä käytetään tapahtumapuiden haarautumispisteissä. Kuva 7 pyrkii havainnollistamaan tapahtumien ja prosessien aikariippuvuuksien tulosten yhteyttä tapahtumapuihin.



Kuva 7. Esimerkki eri tapahtumien ja prosessien kehittymistä koskevien tulosten yhdistämisestä tapahtumapuihin: rakenteiden vaurioitumistodennäköisyyksien aikariippuvuuden syöttäminen henkilö- tai rakennevahinkojen analysointiin käytettyihin tapahtumapuihin.

2.5.3 Palon aikakehityksen laskeminen käyttämällä eri hetkiä kuvaavien tapahtumapuiden informaatiota

Tapahtumapuut kuvaavat palon kehitystä tietyllä ajanhetkellä (aikavälillä) sillä ehdolla, että palo ei ole sammunut kyseessä olevaa hetkeä ennen. Jos palo on jo sammunut ennen tiettyä hetkeä, niin sen aikakehityksen kuvaamiseen ei enää tarvita tapahtumapuuta.

Palon kehittymisen kannalta tärkeät tapahtumat eli tapahtumat, jotka esiintyvät tapahtumapuissa, voivat tapahtua samanaikaisesti (samalla aikavälillä) tai eri ajanjaksoilla. Jälkimmäisessä tapauksessa on itsestään selvää, että tällöin joudutaan yhdistämään eri aikoihin liittyviä tapahtumien todennäköisyyksiä yhteen. Mutta myös vain yhden ajanjakson aikana tapahtuvaan palon sammumiseen johtavan tapahtumaketjun tapauksessa (esim. palo huomataan ja henkilökunta onnistuu sammuttamaan sen samalla ajanjaksolla) pitää tapahtuman todennäköisyyden laskennassa ottaa huomioon myös aikaisempien ajanhetkien tilanne. Esimerkiksi palokunta ei voi onnistua sammuttamaan paloa, ellei paloa ole huomattu.

Tiettyyn ajanjaksoon liittyvä tapahtumapuu kuvaa siis vain siihen hetkeen liittyviä eri prosessien todennäköisyyksiä sillä ehdolla, että kyseinen prosessi on vielä mahdollinen eli esimerkiksi palo ei ole vielä sammunut. Tarkastellaan esimerkkinä henkilökunnan suorittamaa alkusammutusta. Oletetaan tämän alkusammutuksen tapahtuvan samaan aikaan, kun palo havaitaan, eli tarkasteltava tapahtuma olkoon: henkilökunta havaitsee ja sammuttaa palon ajanjaksolla 5–10 minuuttia. Hetkeen 5–10 minuuttia liittyvästä tapahtumapuusta saadaan todennäköisyydet h ja k havaitsemiselle sekä sammuttamisen onnistumiselle. Kertomalla nämä kaksi lukua keskenään saadaan todennäköisyys, että kyseinen tapahtuma tapahtuu, jos palo ei ole sammunut aikaisemmin. Olkoon meillä vaikkapa 100 palotapahtumaa. Huomattakoon niistä 30 kappaletta ensimmäisen 5 minuutin aikana, jolloin hetkellä 5 minuuttia on vain jäljellä 70 paloa, jotka voidaan havaita ja sammuttaa 5–10 minuutissa, eli tapahtumamme todennäköisyydeksi saamme siis $(70/100) \cdot hk = 0.7 \cdot hk$.

Tarkasteltaessa ajasta riippuvia tapahtumapuita pitää muistaa, että puissa esiintyvät haaurautumistodennäköisyydet ovat siis kyseiseen aikaväliin liittyviä ehdollisia todennäköisyyksiä kullekin tapahtumalle. Ne kertovat tapahtumien todennäköisyydet sillä ehdolla, että systeemi on tietyssä tilassa kyseisen aikavälin alkaessa. Jotta näistä ehdollisista todennäköisyyksistä (tapahtuu B, jos A on jo tapahtunut) saataisiin itse tapahtuman todennäköisyyksiä (tapahtuu A ja sen jälkeen B), niin ehdollinen todennäköisyys pitää kertoa tapahtuman A todennäköisyydellä: $P[A \text{ ja } B] = P[B \text{ ehdolla } A] \cdot P[A]$.

Tulipaloa voidaan tarkastella satunnaisprosessina. Määritellään systeemillemme tilat, joissa se voi olla kullakin aikajaksolla. Esimerkkeinä tiloista olkoon vaikkapa tila, jossa palo on huomattu, henkilökunta epäonnistunut alkusammutuksesta mutta palokunta onnistunut, sekä tila, jossa paloa ei ole havaittu ja palokuorma ei ole vielä palanut loppuun (pala). Eli jokaista tapahtumapuun haaraa vastaa yksi tila. Nämä tilat ovat toisensa poissulkevia, eli systeemi voi olla vain yhdessä tilassa kerrallaan, sekä tilat muodostavat täydellisen joukon, eli systeemin on oltava pakostakin jossakin tilassa. Tämän satunnaisprosessin kuvaamiseen tarvitaan tietoa systeemin eri tilojen välisistä siirtymisistä ja niiden todennäköisyyksistä. Esimerkiksi palo, jota ei ole havaittu, voidaan havaita ja

onnistua sammuttamaan henkilökunnan toimesta edellä käytetyillä merkinnöillä todennäköisyydellä hk tietyllä aikavälillä. Mallinnettaessa paloa ajasta riippuvilla tapahtumapuilla havaitaan, että nämä siirtymät eri systeemin tilojen välillä riippuvat vain kulloisestakin ajanhetkestä (eli kyseisen aikavälin tapahtumapuun haarautumistodennäköisyyksistä). Tällaista satunnaisprosessia, jolla ei ole muistia, kutsutaan Markovin prosessiksi. Markovin prosessin tulevien tilojen todennäköisyydet riippuvat vain systeemin tilojen todennäköisyyksistä nykyhetkellä.

Tässä työssä on ajasta riippuvat tapahtumapuut yhdistetty formuloimalla palon kehittyminen Markovin prosessin avulla. Näin systeemin eri tilojen todennäköisyyksien aika-kehityksen kuvaaminen voidaan esittää systeemin eri tilojen välisinä siirtyminä, jotka ovat laskettavissa helposti Markovin prosessin mahdollistamalla matriisiesityksellä. Kutakin aikajaksoa vastaa kyseiseen tapahtumapuuhun liittyvistä haarautumistodennäköisyyksistä muodostettava Markovin siirtomatriisi, ja systeemin tila seuraavalla ajanhetkellä saadaan yksinkertaisesti kertomalla systeemin nykyhetken todennäköisyysvektori tällä matriisilla. Toistettaessa näin alkutilasta (hetkestä, jolloin palo syttyy) aina viimeiseen ajanhetkeen (60–120 minuuttia tässä työssä) saadaan selville systeemin eri tilojen todennäköisyydet joka ajanhetkellä ja siten myös paloon liittyvät riskitkin. Palon aika-kehityksen laskemista käsitellään yksityiskohtaisemmin liitteessä F.

2.6 Rakennus ja tarkastellut uhkakuvat

Tässä työssä tarkasteltiin yksikerroksista teollisuusrakennusta, joka esitellään luvussa 3. Eri uhkakuvat tässä rakennuksessa liittyvät tulipalojen paikan ja kasvunopeuden¹ sekä sen miehityksen eri vaihtoehtoihin. Paloskenaarioissa tarkastellaan tietystä paikassa, rakennuksen keskellä, palavaa tulipaloa, jonka voidaan katsoa edustavan pahinta mahdollista tulipaloa. Palon kasvun nopeutta koskien tarkasteltiin kahta vaihtoehtoa: nopeasti kehittyvää paloa ja normaalilla-hitaalla nopeudella kehittyvää paloa (ks. luku 4). Paloskenaarioita on siis kaksi kappaletta. Miehitykseen liittyviä vaihtoehtoja on kolme. Tarkasteltujen uhkakuvien lukumäärä on siis 6.

Kunkin uhkakuvan puitteissa on tutkittu, miten erilaiset kattorakenteiden ratkaisut vaikuttavat paloriskeihin: on tarkasteltu

¹ On huomattava, että eräs ajasta riippuvan tapahtumamallin ominaispiirteitä on se, että palon voimakkuutta (palotehoa) ei lyödä lukkoon paloskenaariota spesifioitaessa, vaan erisuuruisten palotehojen tarkasteleminen tehdään mallin ”sisällä”, ks. kohta 4.2.

- kolmea erilaista kantokyvyn omaavaa teräspalkkia (muuttuvana tekijänä profiilin poikkileikkaustekijän arvo) ja
- kahta eri kantokyvyn omaavaa liimapuupalkkia (muuttuvana tekijänä palkin pituus).

Kaikkiaan tarkasteltujen eri vaihtoehtojen lukumäärä on uhkakuvien lukumäärä kerrottuna rakenneratkaisujen lukumäärällä, eli $6 \times 6 = 36$.

3. Tarkastelun kohderakennus

3.1 Rakennuksen koko, käyttö ja palontorjunta

Tarkasteltava rakennus on yksikerroksinen teollisuushalli, jonka pituus on 105 m, leveys 48,3 m ja keskimääräinen korkeus 8 m. Kohdetta on käytetty esimerkkikohteena myös muissa tutkimuksissa, esim. Anu Paavilaisen diplomityössä [Paavilainen 1996]. Hallin kantavat rakenteet (palkit ja pilarit) on tehty teräksestä. Ulkoseinät ovat kevyt-betoniharkkoja, ja katto on peltiprofiilia, jonka alapintaan on kiinnitetty akustolevyt.

Hallin pinta-ala, noin 5 070 m², muodostaa käytännöllisesti katsoen yhden avoimen tilan, josta on liikuteltavilla seinämillä erotettu varastointi- ja työtiloja. Tilan keskellä sijaitsee toimistokoppi. Hallin kahdella seinällä on erillisinä tiloinaan puku- ja varastohuoneita. Kahdella muulla seinällä on laboratorio-, ruokailu- ja vapaa-ajantiloja sekä suoja-alue. Halli on yhdistetty käytävällä viereiseen toimistorakennukseen.

Hallissa valmistetaan metallituotteita. Töihin kuuluu tyypillisesti metallin leikkausta, levyjen profilointia, hitsausta ja kokoonpanoa. Hallissa on kuusi sähkökäyttöistä trukkia. Työssä [Paavilainen 1996] hallin palokuorman tiheydeksi arvioitiin 94 MJ/m². Palokuorma koostuu öljyistä, maaleista, pakkausmateriaaleista ja tyhjästä puisista kuormalavoista. Paikallisesti palokuorma on keskittynyt pakkaus- ja varastointitiloihin.

Tässä työssä teollisuushallia tarkastellaan paloluokkaan P2 rakennettuna rakennuksena. Toimintojensa puolesta rakennuksen palovaarallisuusluokka on 1 ja sen paloturvallisuussysteemit vastaavat suojaustasoa 2. Kantavien teräsrakenteiden palonkestoluokaksi riittää tällöin R 15.

Palontorjuntaan hallissa on saatavilla sammutusvettä ja käsिसammuttimia. Palohälytys voidaan antaa käsikäyttöisesti eri puolilla rakennusta sijaitsevien hälytyspainikkeiden avulla. Palohälytys kuuluu hälytysäänenä. Hallissa on automaattinen paloilmaisujärjestelmä, joka perustuu lämpöilmaisimiin. Savu- tai kaasuilmaisimia ei ole käytössä. Hallin savunpoistojärjestelmä aktivoituu lämpöilmaisimien toimesta. Rakennuksessa ei ole sprinklerisysteemiä.

Työskentely hallissa tapahtuu pääsääntöisesti arkipäivisin aamulla ja päiväsaikaan eli maanantaista perjantaihin kello 6 ja 14 välisenä aikana. Tällöin hallissa on noin 60 henkilöä jakautuneena tasaisesti koko hallin alueelle. Arkipäivisin kello 14 ja 22 välillä hallissa voidaan olettaa olevan noin 5 henkilöä työskentelemässä jollain rajatulla alueella. Öisin (kello 22–6) ja viikonloppuisin (perjantai-illasta kello 22:sta maanantai-

aamuun kello 6:een) hallissa ei ole ketään. Hallin toiminta-ajat ja miehitys esitetään tiivistettynä taulukossa 1.

Taulukko 1. Hallin toiminta-ajat ja miehitys.

Aika	Henkilömäärä	Henkilöiden jakautuminen	Painokerroin ¹⁾ $W_{2,k}$	Lyhenne
arkisin 6–14	60	tasaisesti koko halliin	0.238	T1
arkisin 14–22	5	tietyissä työpisteissä	0.238	T2
öisin ja viikonloppuisin	0	–	0.524	T3

1) Painokertoimet ovat kunkin miehitysluokan ajallisia osuuksia, esim. T1-luokan painokerroin 0.238 saadaan jakamalla tätä luokkaa vastaava kokonaisviikkoaika ($5 \cdot 8$ tuntia = 40 tuntia) viikon kokonaistuntimäärällä (168 tuntia).

Riskianalyyssissä tarkastellut uhkakuvat jaotellaan rakennuksen miehityksen ym. suhteen luokkiin T1, T2 ja T3.

3.2 Tarkasteltavat rakenteet

Kohderakennus luo realistisen pohjan rakenteiden kestävyuden tarkastelulle. Tässä työssä ei kuitenkaan tehdä kyseisen kohteen olemassa olevien palonkestävyyden riskianalyysiä, vaan tarkastelussa käytetään niitä yksinkertaisempia kuvitteellisia rakenteita. Tällöin työn ydin eli itse tulipaloon ja sen vaikutuksiin liittyvät mallit ja menetelmät tulevat selvästi esiin hukkumatta monimutkaisten rakenteiden käsittelyn vaatimiin pitkällisiin tarkasteluihin.

Tässä työssä tarkastellaan kahta kantavan rakenteen ratkaisua: teräspalkkia ja liimapuupalkkia. Kummankin rakenteen oletetaan olevan palosuojaamaton. Sen tutkimiseksi, miten erilaiset rakennevaihtoehdot vaikuttavat paloturvallisuuteen, tarkasteltiin työssä teräsrakenteesta kolmea erilaista palkkia, jotka poikkeavat toisistaan poikkileikkaustekijöittensä suhteen, ja puurakenteesta kahta liimapuupalkkia, jotka ovat eripituisia (10 m ja 12 m). Yhteenveto eri rakennevaihtoehtojen oleellisimmista tiedoista esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Tarkastellut rakennevaihtoehdot ja niiden palonkestoajat.

Rakenne	Vaihdeltu ominaisuus	Palonkesto-aika (min)	Palonkestoajan määrittystapa
Teräspalkki	F/V 100 m ⁻¹	19	Normin B7 mukaan, ks. liite A
Teräspalkki	F/V 150 m ⁻¹	15	sama
Teräspalkki	F/V 350 m ⁻¹	10	sama
Liimapuu-palkki	pituus 10 m	55	Normin B10 menetelmien mukaan käyttäen apuna Monte Carlo -simulointia ja liitteessä D esitettyä hiiltymismallia
Liimapuu-palkki	pituus 12 m	40	sama

4. Tarkastelun perustana oleva tulipalo

Tulipaloo kuvataan käyttäen mitoituspaloa [Keski-Rahkonen 1996]. Se on analoginen esimerkiksi kantavien rakenteiden suunnittelussa käytettävän ennalta valitun mitoituskormituksen kanssa. Mitoituspaloa kuvataan sen palotehon aikakehityksellä, jossa otetaan huomioon palon kasvunopeus, täysin kehittyneen palon tuottama paloteho ja palamisen hiipumisvaihe.

Tässä tarkastelussa käytettävä mitoituspalo on valittu lähinnä pitäen silmällä rakenteiden kantavuutta. Niiden kannalta pahin uhkakuva on suuri, voimakkaasti rakenteita lämmittävä tulipalo. Hallissa mahdollisista paloista on aiemmissa tutkimuksissa [Paavilainen 1996] havaittu voimakkaimmaksi kuormalavapinon palo. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan tätä palotilannetta. Mitoituspalon oletetaan olevan paikallinen, sillä hallin lieskahtaminen on epätodennäköistä, koska siihen vaadittaisiin hyvin suuri palo. Palon oletetaan saavan alkunsa siten, että kuormalavapinon lähellä oleva trukki syttyy tuleen.

Mitoituspaloa käsitellään tässä työssä normaalia käytäntöä laajemmalla tavalla. Kun mitoituspaloa sen normaalissa soveltamisessa tarkastellaan deterministisenä tapahtumana eli voimakkuudeltaan ja kestoltaan tietyn suuruisena palona, niin tässä työssä mitoituspaloa tarkastellaan stokastisena tapahtumana, jonka voimakkuus ja kestoaika vaihtelevat tietyissä rajoissa. Mitoituspaloa ja sen vaihtelevuuden kuvaamista tarkastellaan lähemmin kohdissa 4.1 ja 4.2.

4.1 Kuormalavapinon palamisen deterministinen kuvaus

Kuormalavojen palamista on tutkittu varsin paljon [Krasner 1968, Babrauskas 1995] ja se tunnetaan varsin hyvin. Oleelliset tekijät, jotka vaikuttavat palavan kuormalavan luovuttamaan lämpöön, ovat lavapinon korkeus h_p , lattiapinta-ala A_p , puun kosteus M_p ja puun tehollinen lämpöarvo ΔH_c . Näiden vaikutus palavasta pinosta vapautuvaan huippupalotehoon \dot{Q}_{\max} voidaan kiteyttää seuraavasti [Babrauskas 1995]:

$$\frac{\dot{Q}_{\max}}{\text{kW}} = \psi_Q \cdot 65 \cdot \left(\frac{\Delta H_c}{\text{MJ/kg}} \right) \cdot \left(\frac{A_p}{\text{m}^2} \right) \cdot \left[1 + 2,14 \left(\frac{h_p}{\text{m}} \right) \right] \left[1 - 0,027 \left(\frac{M_p}{\%} \right) \right]. \quad (1)$$

Kaavasta (1) voidaan laskea esimerkiksi, että kuormalavapino, jonka korkeus on 2 m, puun kosteus 10 % ja lattiapinta-ala 5 m², voi voimakkaimman palamisen aikana luovuttaa lämpöä noin 18,5 MW:n teholla.

Tekijä ψ_Q kaavassa on tässä työssä käytetyn tilastollisen lähestymistavan vaatima lisäys. Se kuvaa kyseiseen palotehon laskentamalliin liittyvää epävarmuutta. Kyseinen malli on johdettu kokeellisista tuloksista, joissa on poltettu suuri joukko erikokoisia kuormalavoja. Koska koetuloksissa on hajontaa, eivät mallin parametritkaan (luvut 65, 2,14 ja 0,027 kaavassa (1)) ole eksakteja lukuja, vaan koetulosten hajonta kulkeutuu myös niihin. Kyseiset parametrit ovat siis satunnaislukuja, joiden keskiarvon estimaatteja yllä mainitut luvut ovat. Niille voitaisiin koetulosten analysoinnissa johtaa hajonnan estimaatit ja – jos kokeellisen tiedon määrä olisi riittävän suuri – myös jakaumat. Edes hajonta-arvojen suuruutta ei kuitenkaan ole kirjallisuudessa annettu. Siksi kaavaan (1) liittyvää epävarmuutta on – paremman puutteessa – kuvattu yhdellä satunnaismuuttujalla ψ_Q .

Kuormalavapinon palotehon aikariippuvuutta voidaan kuvata yleisesti käytössä olevan mitoituspalojen käsittelytavan mukaan jakamalla palo kolmeen vaiheeseen, kasvuvaiheeseen, täysin kehittyneen palon vaiheeseen ja palon hiipumisvaiheeseen [Keski-Rahkonen 1996] .

Kasvuvaiheessa palon oletetaan kehittyvän neliöllisesti ajan mukana (t^2 -malli):

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^2, \quad \text{kun } t \leq t_1 . \quad (2)$$

Täysin kehittyneen palon aikana palotehon voidaan olettaa olevan likimain vakio (eli huippuarvo)

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max}, \quad \text{kun } t_1 < t < t_2 . \quad (3)$$

Hiipumisvaiheessa paloteho vähenee huippuarvostaan eksponentiaalisesti aikavakiolla τ

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau}\right), \quad \text{kun } t > t_2 . \quad (4)$$

Näissä yhtälöissä \dot{Q}_0 on referenssipaloteho, jonka arvoksi on valittu 1 MW ja t_0 on palon kasvuaika eli aika, jossa paloteho saavuttaa arvon \dot{Q}_0 .

Neliöllisesti ajan funktiona kasvavat palot voidaan jaotella kansainvälisen käytännön mukaan neljään nopeustyyppiin:

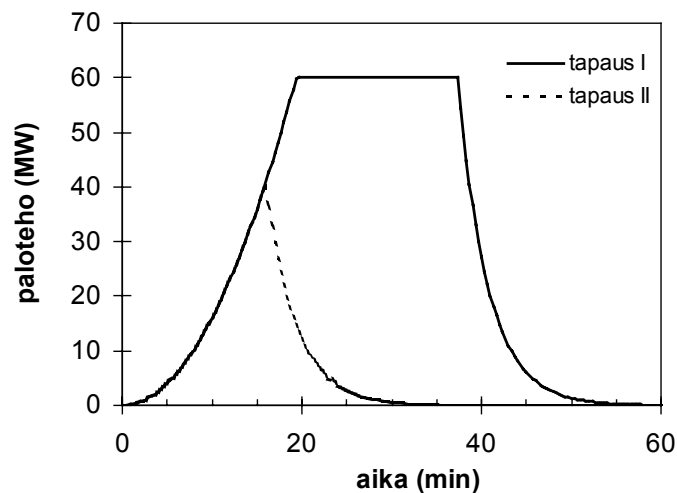
- hitaasti kasvava palo: $t_0 = 600$ s
- normaalisti kasvava palo: $t_0 = 300$ s

- nopeasti kasvava palo: $t_0 = 150$ s
- erittäin nopeasti kasvava palo: $t_0 = 75$ s.

Kun kasvuaika t_0 kiinnitetään johonkin yllä mainituista arvoista, jää edellä kuvattuun malliin kolme määräämätöntä parametria, ajat t_1 ja t_2 sekä hiipumisaika τ . Ajanhetkiä t_1 ja t_2 tarkasteltaessa on huomattava, että on mahdollista myös, että palo saavuttaa hiipumisvaiheen, ennen kuin sen kasvuvaihe on päättynyt. Palo voi siis edetä kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla:

- Tapaus I, jossa $t_1 < t_2$: tällöin paloteho pääsee kasvamaan maksimiarvoonsa asti.
- Tapaus II, jossa $t_1 \geq t_2$: tällöin paloteho ei pääsee kasvamaan maksimiarvoonsa asti.

Näitä eri tapauksia havainnollistetaan kuvassa 8.



Kuva 8. Palokäyrän kaksi eri tapausta: tapauksessa I tulipalo palaa tietyn äärellisen mittaisen ajan huipputehollaan ennen hiipumistaan, ja tapauksessa II palaminen alkaa hiipua heti, kun palo on saavuttanut huipputehonsa. Tapauksen I parametrit ovat $t_0 = 150$ s, $\tau = 200$ s ja $t_1 = 2240$ s. Aika t_1 on määritetty siten, että palamisessa vapautuneeksi kokonaisenergiaksi tulee 100 000 MJ. Tapauksessa II parametri $t_2 = 957$ s on valittu siten, että kokonaisenergia on noin neljännes tapauksen I palotehosta.

Määräämättömien parametrien kiinnittämiseksi voidaan muodostaa kaksi yhtälöä. Ensimmäinen yhtälö saadaan helposti kaavojen (2) ja (3) avulla:

$$\dot{Q}_{\max} = \dot{Q}_0 \left(\frac{t_1}{t_0} \right)^2. \quad (5)$$

Toinen yhtälö saadaan vaatimalla, että palotehokäyrän integraali yli koko palon ajan on sama kuin palaneen massan Δm_{tot} kautta laskettavissa oleva palamisessa vapautunut kokonaisenergia $Q_{tot} = \Delta H_c \Delta m_{tot}$.

$$Q_{tot} = \Delta H_c \cdot \Delta m_{tot} = \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{Q}_0}{t_0^2} \right) t_1^3 + (t_2 - t_1 + \tau) \dot{Q}_{\max}, \text{ tapaus I} \quad (6)$$

$$Q_{tot} = \Delta H_c \cdot \Delta m_{tot} = \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{Q}_0}{t_0^2} \right) t_2^3 + \dot{Q}_{\max} \tau, \text{ tapaus II} \quad (7)$$

4.2 Palon kuvaaminen stokastisena tapahtumana: Monte Carlo -simulointi

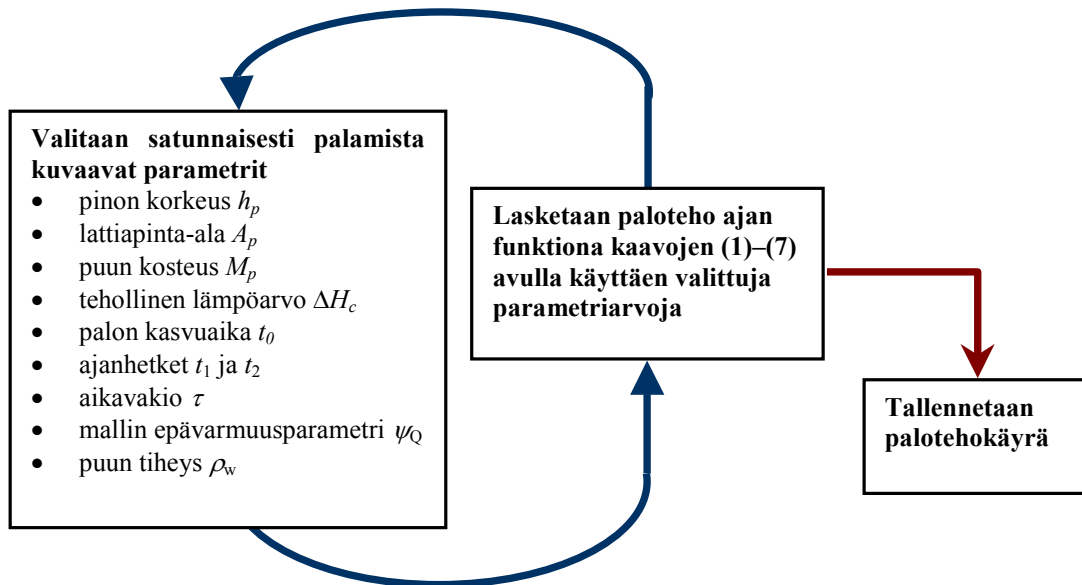
Yllä kuvatuin keinoin voidaan kuvata tietyn kuormalavan palamista: kun valitaan palamiseen vaikuttavat parametrit jonkin kriteerin mukaan, saadaan laskettua koko palon aikakehitys. Käytännössä kuitenkin palamista kuvaavat suureet vaihtelevat: lavapinon suuruus (korkeus ja lattiapinta-ala) vaihtelevat, puun kosteus muuttuu ja mahdollisesti alkaneen palon kasvaminen ei tapahdu samalla nopeudella, vaikka muut tekijät pysyisivätkin samoina. Myös palotehon laskemiseen käytetty malli ei ole tarkka vaan sisältää epävarmuutta (tässä tarkastelussa malliepävarmuus on sisällytettyinä parametriin ψ_Q , kuten edellä selitettiin).

Pyrittäessä arvioimaan paloriskejä juuri niiden tapausten suhteellinen lukumäärä on merkityksellinen, joissa useimmat palamiseen vaikuttavat parametrit saavat epäsuotuisia arvoja – eli, kun palo kasvaa nopeasti suureen palotehoon, joka jatkuu pitkän aikaa. Monte Carlo -simulointi on sopiva työkalu tällaiseen tarkasteluun. Monte Carlo -simulointitekniikka esitetään lyhyesti liitteessä A.

Monte Carlo -simuloinnissa käydään tutkittavasta ilmiöstä laskennallisesti läpi suuri joukko tapauksia, jotka voivat lähtötietojen puitteissa olla mahdollisia. Tämän jälkeen laskentakertojen tulokset analysoidaan tilastollisesti ilmiön todennäköisyyteen ja tapahtumistaajuuteen liittyvien näkökohtien esille saamiseksi. Tiivistetyin tapa esittää saatu informaatio on muodostaa ilmiötä kuvaava todennäköisyysjakauma, yleensä kertymäfunktion muodossa.

4.2.1 Simuloinnin suoritus

Kuvassa 9 on kaaviollinen esitys palotehon Monte Carlo -simuloinnista. Simuloinnissa käytetyt parametrit, niiden luonne (vakiosuure tai satunnaismuuttuja) ja satunnaismuuttujina käsiteltyjen muuttujien jakaumat esitetään taulukossa 3. Kaikkia satunnaismuuttujia on käsitellään tasajakautuneina suureina, koska niiden jakaumista ei tällä hetkellä ole käytettävissä parempaa tietoa.



Kuva 9. Palotehon Monte Carlo -simuloinnin kaaviokuva. Kuvan esittämä sykli toistetaan useita kertoja (tyypillisesti 10 000–100 000 kertaa).

Taulukko 3. Palotehon Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt parametrit.

Parametri	Luonne	Oletettu jakauma tai arvo
lavapinon korkeus h_p	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 1–5 m
lattiapinta-ala A_p	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 2–20 m ²
puun kosteus M_p	vakio	10 %
puun tehollinen lämpöarvo ΔH_c	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 12–18 MJ/kg
palon kasvuaika t_0	riippumaton satunnaismuuttuja	<ul style="list-style-type: none"> nopea palo: tasajakauma, 120–180 s normaali tai hidas palo: tasajakauma, 300–600 s
palon kasvuvaiheen loppumishetki ¹⁾ t_l	laskettu satunnaismuuttuja	parametri t_l määräytyy yhtälön (5) mukaisesti
palon hiipumisvaiheen alkuhetki t_2 (tapaus I) tai kasvuvaiheen loppuhetki (tapaus II)	laskettu satunnaismuuttuja	parametri t_2 määräytyy muista parametreista kaavojen (6) ja (7) esittämällä tavoilla
palon hiipumisaikavakio τ	laskettu satunnaismuuttuja	τ määräytyy t_0 :sta liitteessä B esitetyllä tavalla
mallin epävarmuutta kuvaava parametri ²⁾ ψ_Q	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 0,9–1,1
puun tiheys ρ_p	vakio	500 kg/m ³

1) Vain tapauksen I tyyppiset palot.

2) Perusteena mallin epävarmuudeksi oletettu ± 10 %.

Palossa syntyneen kokonaisenergian Q_{tot} arvioimiseksi kuormalavapinon oletetaan palavan kokonaan, jolloin palossa häviävä massa on sama kuin kuormalavapinon massa m_p . Pinon sisältämien ilmarakojen osuuden eli huokoisuuden η_p , avulla kirjoitettuna palaneen pinon tuottama kokonaisenergia Q_p on

$$Q_p = \eta_p \cdot \rho_p h_p A_p \cdot \Delta H_c, \quad (8)$$

missä ρ_p on puun tiheys, jonka arvoksi on oletettu kiinteä arvo 500 kg/m³. Pinon huokoisuus mitattiin kahden kuormalavapinon avulla: tulos oli $\eta_p = 0,33$. Pinon osuuden

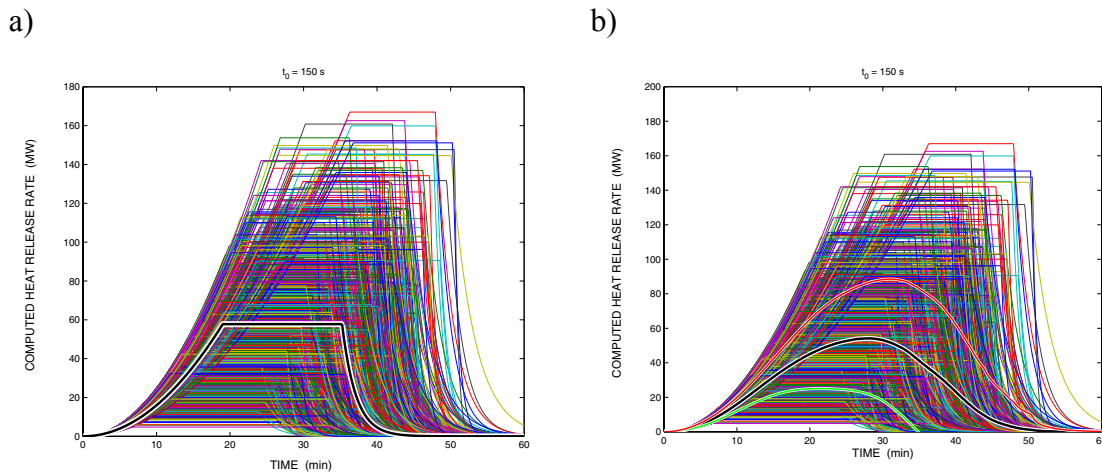
lisäksi otetaan huomioon myös sytytyslähteen, eli trukiin, palamisen tuottama pieni lisä kokonaisenergiaan. Sen oletetaan olevan 4 000 MJ.

Kokonaisenergian avulla saatava rajoitusehto mallin parametreille voidaan siis lausua muodossa

$$Q_{tot} = Q_p + Q_{ign} = 0,33 \cdot \rho_p h_p A_p \cdot \Delta H_c + 4000 \text{ MJ} = \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{Q}_0}{t_0^2} \right) t_1^3 + (t_2 - t_1 + \tau) \dot{Q}_{max}. \quad (9)$$

4.2.2 Simuloituja palotehokäyriä

Kuvassa 10 esitetään joitain esimerkkejä palotehon Monte Carlo -simuloinnista. Vertahtaessa keskiarvoparametreja käyttäen laskettuun palotehokäyriin, kuvan 10a paksuun käyriin, havaitaan, että parametrien vaihtelevuus voi tuottaa selvästi keskiarvotapausta voimakkaampia tai pienempiä palotapauksia.



Kuva 10. Esimerkki palotehon Monte Carlo -simulointien tuloksista: a) Monte Carlo -tulokset ja parametrien keskiarvoja käyttäen laskettu käyrä (paksunnettu) ja b) Monte Carlo -tulokset ja niiden keskiarvona saatava käyrä (keskimmäinen paksunnettu käyrä) sekä yhden keskihajonnan päässä keskiarvosta olevat arvot (ylemmät ja alemmat paksunnetut käyrät). Simuloinnissa tehtiin 1 000 laskentakertaa käyttäen taulukossa 3 esitettyjä parametreja. Tämä tapaus kuvaa nopeaa paloa, eli palotehon kasvunopeus on keskimäärin 150 s. Paksulla käyrällä on esitetty paloteho, joka on laskettu käyttäen parametrien keskimääräisiä arvoja, eli $h_p = 3 \text{ m}$, $A_p = 11 \text{ m}^2$, $\Delta H_c = 15 \text{ MJ/kg}$, $t_0 = 150 \text{ s}$ ja $\psi_Q = 1$.

5. Palon havaitseminen

Tulipalon havaitsemiseen sen syttymisestä kuluva aika, t_h , on ratkaiseva palon kehittymiseen vaikuttava tekijä, kun teollisuushallissa on miehitystä, sillä tämä aika vaikuttaa huomattavasti henkilökunnan alkusammutustoimenpiteiden onnistumiseen. Päivisin, kun hallissa on täysi miehitys, tulipalon alut havaitaan nopeasti aistinvaraisesti ja ne pystytään sammuttamaan heti henkilökunnan toimesta. Iltaisin aistinvaraisen havainnoinnin ohella automaattinen hälytysjärjestelmä on tarpeen. Öisin ja viikonloppuisin havainnointi perustuu automaattisiin hälyttimiin. Tulipalon havaitsemisajalla on myös vaikutusta hallin evakuointiin. Mitä nopeammin palo havaitaan, sitä paremmat mahdollisuudet henkilökunnalla on poistua rakennuksesta turvallisesti. Lisäksi palon pikainen havaitseminen nopeuttaa palokunnan paikalle saapumista, mitä ei tässä työssä ole kuitenkaan huomioitu. Palokunnan oletettiin ehtivän sammutustöihin vasta kymmenen minuuttia palon alkamisesta, joten palon sammutus kahden ensimmäisen aikajaan (0-5 min, 5-10 min) aikana on yksinomaan henkilökunnan toimenpiteiden varassa.

Tarkasteltavassa teollisuusrakennuksessa työskentelee arkipäivisin noin 60 henkilöä ja arki-iltoina (14-20) viisi henkilöä. Öisin rakennus ei ole miehitetty. Rakennuksessa on tulipalon varalta käsikäyttöiset hälytyspainikkeet, ja rakennukseen on asennettu automaattinen hälytysjärjestelmä, jossa on lämpöilmaisimet ($RTI = 100 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{1/2}$, $68 \text{ }^\circ\text{C}$ toimintalämpötila). Savu- tai kaasuilmaisimia ei ole. Ilmaisimet ovat hallin katossa 8 m:n korkeudella lattiasta. Palon havainnointi riippuu oleellisesti palon kasvunopeudesta. Työssä tarkastellaan kahta eri paloskenaariota, joissa toisessa palo kasvaa nopeasti (kasvuaikaparametri 120-180 s) ja toisessa palo kasvaa hitaalla-normaalilla nopeudella (kasvuaikaparametri 300-600 s), joten palon havainnointiakin tarkastellaan erikseen näissä kahdessa tapauksessa.

5.1 Havainnointi aistein

Hitaalla-normaalilla nopeudella kasvavalle palolle on oletettu, että arkipäivisin ihmisten aisteillaan tekemän palon havaitsemisen epäonnistumisen todennäköisyydet ovat 0.01, 0.001 ja 0.0001 ajanjaksoille 5, 10 ja 15 minuuttia. Myöhemmillä ajanjaksoilla, siis 30, 60 ja 120 minuuttia, palo oletetaan havaittavan aistinvaraisesti todennäköisyydellä 1, eli havainnoinnin epäonnistumisen todennäköisyys on 0. Arki-iltaisin vastaavat arvot ovat 1.0, 0.5 ja 0.1 kolmelle ensimmäiselle aikajaksolle.

Nopeasti kasvaville paloille todennäköisyydet ovat 0.001 ja 0.0 päivisin ja 0.5 ja 0.07 iltaisin ajanjaksoille 5 ja 10 minuuttia. Nämä arvot ovat taulukossa 4. Lisäksi taulukoon on merkitty todennäköisyydet myös palotehon funktiona. Näitä todennäköisyyksiä

palotehon funktioina, $P(\dot{Q}(t))$, on käytetty laskettaessa aistinvaraisen havainnoinnin todennäköisyyksiä.

Taulukko 4. Palon aistinvaraisen havainnoinnin epäonnistumisen todennäköisyydet arkipäivisin ja -iltais. Todennäköisyydet on annettu sekä havainnointiajan että havainnointihetken palotehon mukaan.

	Ajan mukaan				Palotehon mukaan		
	Normaali–hidas palonkasvu		Nopea palonkasvu			päivät	illat
	päivät	illat	päivät	illat			
5 min	0.01	1	0.001	0.5	1 MW	0.01	1
10 min	0.001	0.5	0	0.07	4 MW	0.001	0.5
15 min	0.0001	0.1	0	0	9 MW	0.0001	0.1
30 min	0	0	0	0	16 MW	0	0.07
>30 min	0	0	0	0	36 MW	0	0

Aistinvaraisen palon havainnoinnin onnistumisen Monte Carlo -simuloinneissa palotehokäyrien parametreja varioitiin aivan samoin kuin luvussa 4 on esitetty koskien palotehon Monte Carlo -simulointia. Jokaista simuloitua palotehokäyrää kohden saadaan siis palon havaitsemistodennäköisyys ajan funktiona käyttäen taulukosta 4 interpoloimalla saatavia arvoja. Laskemalla kullakin ajanhetkellä näistä todennäköisyyksistä keskiarvo saadaan taulukossa esitetyt todennäköisyydet palon aistinvaraiselle havaitsemiselle. Monte Carlo -simulointien tulosten tarkastelussa oletettiin, että havainnointitodennäköisyyden maksimin saavuttamisen jälkeen todennäköisyys ei lähde pienenemään, vaikka palotehot laskevat palon loppuvaiheessa.

5.2 Automaattinen havainnointi

Teollisuusrakennus on varustettu automaattisilla lämpöön perustuvilla palohälyttimillä. Niiden RTI-arvo on $100 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ ja toimintalämpötila, T_h , on 68 °C . Hallin sisälämpötila, T_0 , on 20 °C . Palovaroitin on pahimmassa tapauksessa 5 m:n päässä tulipesäkkeestä [Hakanen 1999]. Tulipalon synnyttämän kuumen ilmapatjan lämpötilaa katossa mallitetaan tässä käyttämällä Alpertin vuonna 1972 esittämää mallia [Drysdale 1985], jossa kattovirtauksen maksimilämpötila lähellä kattoa tietyllä säteittäisellä etäisyydellä r palopatsaan keskiakselista saadaan yhtälöistä

$$T_{\max} = T_0 + \frac{5.38 \cdot (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H}, \quad r > 0.18 \cdot H \quad (10)$$

ja

$$T_{\max} = T_0 + \frac{169 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad r \leq 0.18 \cdot H. \quad (11)$$

Yhtälöissä paloteho \dot{Q} on yksiköissä kW ja huoneen korkeus H mitattuna palolähteestä metreissä. Palohälyttimen toiminta-ajaksi saadaan olettamalla ”steady state” -tilanne

$$t_h = -\frac{RTI}{\sqrt{u}} \ln \left(1 - \frac{T_h - T_0}{T_{\max} - T_0} \right), \quad (12)$$

missä u on virtauksen nopeus. Käyttämällä tätä kaavaa yhdessä Alpertin kaavojen kanssa voidaan kullekin hetkelliselle paloteholla laskea automaattiseen hälytykseen kuuluva aika. Kutakin simuloitua palotehokäyrää kohden valitaan näistä ajoista se, jolle summa edellä olevasta toiminta-ajasta ja ajasta ko. palotehon saavuttamiseen on pienin. Näin saadut automaattisen hälytyksen todennäköisyydet eri ajanhetkillä ovat esitettyinä taulukossa 5. Huomaa, että automaattisen palohälytinlaitteiston toimintavarmuus 0.9 on otettu huomioon taulukoiduissa arvoissa.

Taulukko 5. Todennäköisyydet, että palo on havaittu tiettyyn ajanhetkeen mennessä. Automaattisen havainnoinnin todennäköisyyksissä on otettu huomioon hälytinsysteemin oletettu toimintavarmuus 0.9.

	Aistit, päivät		Aistit, illat		Automaattinen	
	120–180 s	300–600 s	120–180 s	300–600 s	120–180 s	300–600 s
5 min	0.999	0.979	0.5	0	0.56	0.006
10 min	0.99998	0.995	0.93	0.16	0.9	0.420
15 min	1	0.999	0.98	0.52	0.9	0.850
30 min	1	1	1	0.98	0.9	0.9
60 min	1	1	1	1	0.9	0.9
120 min	1	1	1	1	0.9	0.9

6. Palon sammuttaminen tai sammuminen itsestään

Tässä luvussa esitetään palon sammuttamisen (kohta 6.1) ja itsestään sammumisen arviointiin (kohta 6.2) käytetyt menetelmät. Tarkastelujen tulokset on koottu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Palon sammumiseen liittyvät todennäköisyydet ajasta riippuvissa tapahtumapaissa. Käsिसammutus sisältää sekä henkilökunnan että palokunnan sammutusyritykset.

Palon kasvu-aika 300–600 s						
	Arkipäivät (06–14)		Arki-illat (14–22)		Yöt ja viikonloput	
aika-jakso (min)	Käsिसammutus ei onnistu	Palokuorma ei ole loppunut	Käsिसammutus ei onnistu	Palokuorma ei ole loppunut	Käsिसammutus ei onnistu	Palokuorma ei ole loppunut
5	0.05	1	0.1	1	1	1
10	0.25	1	0.5	1	1	1
15	0.01	1	0.01	1	0.01	1
30	0.9	1	0.9	1	0.9	1
60	1	0.35	1	0.35	1	0.35
120	1	0	1	0	1	0
Palon kasvu-aika 120–180 s						
	Arkipäivät (06–14)		Arki-illat (14–22)		Yöt ja viikonloput	
aika-jakso (min)	Käsिसammutus ei onnistu	Palokuorma ei ole loppunut	Käsिसammutus ei onnistu	Palokuorma ei ole loppunut	Käsिसammutus ei onnistu	Palokuorma ei ole loppunut
5	0.25	1	0.5	1	1	1
10	0.98	1	0.99	1	1	1
15	0.9	1	0.9	1	0.9	1
30	1	0.89	1	0.89	1	0.89
60	1	0	1	0	1	0
120	1	0	1	0	1	0

6.1 Palon sammuttaminen

Käsintehtävän sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyys riippuu sekä henkilökunnan että palokunnan epäonnistumistodennäköisyyksistä. Mitä isompi palo, sitä todennäköisempää on, että paloa ei onnistuta sammuttamaan. Palokunnan epäonnistumisen todennäköisyys on 1 siihen saakka, kunnes palokunta on ehtinyt paikalle. Tämän jälkeen palokunnan epäonnistumistodennäköisyys kasvaa ajan kuluessa (eli palotehon kasvaessa), kunnes lopulta palon sammuttaminen tulee palokunnalle mahdottomaksi. Tämä raja

on noin 15 MW. Suuremmille paloille palokunnan onnistumistodennäköisyys on asetettu nolllaksi. Palokunnan oletetaan ehtivän paikalle vasta 10 minuuttia palon alusta lukien, joten kahdella ensimmäisellä aikajaksoilla (0–5, 5–10 min) sammuttaminen on henkilökunnan harteilla. Henkilökunta onnistuu sammuttamaan palon todennäköisyyksillä 0.95 ja 0.75 näillä ajanjaksoilla, jos palo kasvaa kasvutekijällä 300 s, eli tällöin paloteho on 1 MW 5 minuutin kohdalla ja 4 MW 10 minuutin kohdalla. Suuremmille paloille henkilökunnan sammutustodennäköisyys on 0. Palokunnan onnistumistodennäköisyydet 300 s palolle eri ajanhetkinä (siis vastaavan kokoisille paloilla) ovat 0.99 ja 0.1 aikaväleillä 10–15 min ja 15–30 min ja muilla aikaväleillä 0. Ilta-aikaan henkilökunnan epäonnistumistodennäköisyyden on oletettu olevan kaksi kertaa suurempi kuin päivisin eli 0.1 ja 0.5 kahdelle ensimmäiselle ajanjaksolle. Palokunnan sammutustehoon ei vuorokaudenajalla oleteta olevan vaikutusta.

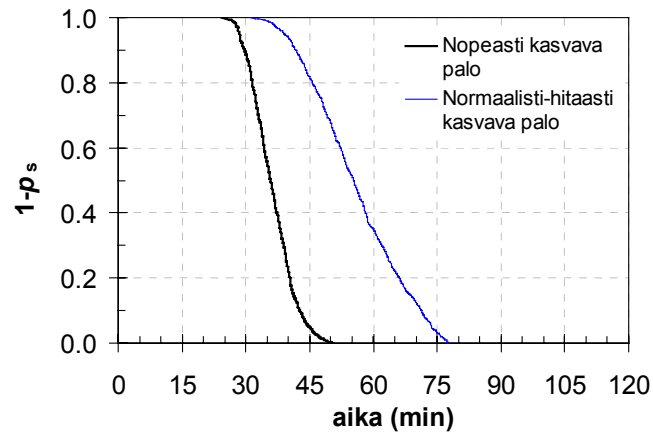
Edellä olevat todennäköisyydet olivat siis 300 s omaaville mitoituspaloille. Nopeasti kehittyvää paloa (aikavakio 150 s) vastaavat todennäköisyysarvot on arvioitu 300 s:n nopeudella kasvavan palon arvoista palotehoo suhteuttamalla. Päivisin sammuttamisen epäonnistumisen todennäköisyyksiksi saadaan näin 0.25, 0.98, 0.90 ajanjaksoille 0–5 min, 5–10 min ja 10–15 min. Hetken 15 min jälkeen palo on kasvanut liian suureksi, jotta se onnistuttaisiin sammuttamaan. Iltaisin vastaavat todennäköisyydet ovat 0.5, 0.99 ja 0.9 kyseisille ajanjaksoille.

Taulukkoon 6 on koottuna palon sammuttamisen todennäköisyydet eri ajanhetkillä. Taulukkoon on merkitty myös todennäköisyydet siihen, että palo sammuu palokuorman loppumiseen. Tällaista tilannetta arvioidaan seuraavassa kohdassa 6.2.. Palo voi siis tietyllä ajanjaksolla sammua joko palon aktiivisten sammuttamistoimien seurauksena tai palokuorman loppumiseen.

6.2 Palon sammuminen

Palo voi sammua itsestään, kun palokuorma loppuu. Luvussa 4 esitetyllä tavalla stokastisesti kuvatulle mitoituspaloille voidaan laskea todennäköisyysjakaumat ajan funktiona sille, että palo päättyy palokuorman loppumiseen. Palokuorman loppumiseksi voidaan tulkita se, kun paloteho alkaa laskea palon loppuvaiheessa. Monte Carlo-simuloinnissa tällaisten tapahtumien todennäköisyys eri ajanhetkinä saadaan määritettyä laskemalla niiden palojen osuus kaikista paloista, joiden paloteho on alkanut pienentyä palotehon huippuarvosta. Kvantitatiivisena kriteerinä sammuvalla palolle käytettiin tässä ehtoa, että paloteho on laskenut alle puoleen huippuarvostaan.

Laskujen tulokset on esitetty kuvassa 11. Todennäköisyydet on esitetty palon jatkumisen todennäköisyytenä, eli todennäköisyyksinä $1-p_s(t)$, missä $p_s(t)$ on todennäköisyys sille, että paloteho on laskenut alle puoleen huippuarvostaan.



Kuva 11. Todennäköisyys, että palo ei ole sammunut palokuorman loppumiseen ajan funktiona kahdelle eri nopeudella kasvavalle palolle. Ohut käyrä vastaa paloa, jonka kasvuaika on 300–600 s ja paksu käyrä vastaa paloa, jonka kasvuaika on 120–180 s.

7. Poistuminen palavasta rakennuksesta

Palotilanteessa rakennuksessa vielä sisällä olevaa henkilömäärää voidaan arvioida monin eri menetelmin; tässä työssä käytetään erästä yksinkertaisimmista malleista, virtausmallia [Nelson ja MacLennan 1995], jossa ihmisten liikkumista kuvataan ihmisvirtauksena. Tässä mallissa henkilömäärä rakennuksessa vähenee lineaarisesti ajan funktiona lähtien siitä hetkestä, jolloin rakennuksen evakuointi aloitetaan. Tämä evakuoinnin aloittamishetki riippuu sekä palon havaitsemisajasta että reagointiajasta, joka on hälytyksestä ihmisten liikkeelle lähtemiseen kuluva aika.

Henkilömäärä rakennuksessa poistumisen aikana, $N_p(t)$, voidaan laskea käyttämällä kaavaa

$$N_p(t) = N_p^0 - F_p(t - t_h - t_r), \quad (13)$$

missä N_p^0 henkilömäärä ennen hälytystä, t_h palon havaitsemiseen kuluva aika ja t_r reaktioaika. Poistumiseen kuluva ajaksi saadaan siis $t_m = N_p^0 / F_p$, eli rakennus on tyhjä ajan $t_h + t_r + t_m$ kuluttua palotapahtuman alusta mitattuna. Yllä olevassa henkilömäärän $N_p(t)$ lausekkeessa aikaa mitataan palon syttymisestä, eli ajalta t vaaditaan, että se on välillä $t_h + t_r < t < t_h + t_r + t_m$. Rakennuksesta poistuvien henkilöiden virtauksen suuruus, F_p , riippuu henkilötiheydestä D (henkilölukumäärä neliometriä kohden) ja poistumisteiden yhteenlasketusta leveydestä W_e (metreissä)

$$F_p = v_0 \cdot (1 - 0.266D) \cdot D \cdot W_e. \quad (14)$$

Laskelmissa käytettiin nopeusparametrille v_0 arvoa 1.4 m/s ja poistumisteiden yhteenlasketulle leveydelle rakennuksen pohjapiirroksesta laskettua arvoa $W_e = 9$ m

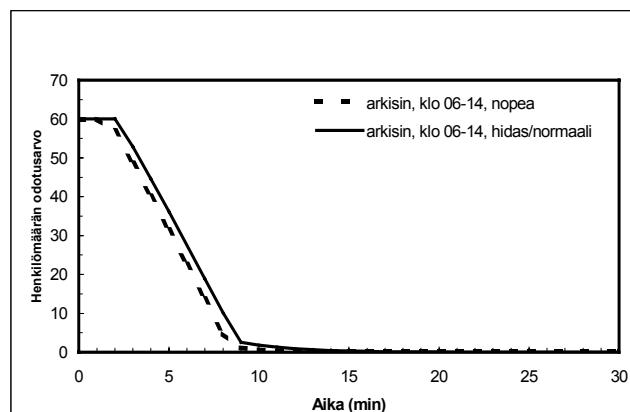
Kuten edellä olevista yhtälöistä nähdään, rakennuksessa olevien henkilöiden lukumäärä riippuu palon havaitsemishetkestä, joka on satunnaismuuttuja. Tämän vuoksi myös henkilömäärästä tulee satunnaismuuttuja. Palon havainnointiajan todennäköisyysjakauma laskettiin käyttämällä Monte Carlo -tekniikkaa ottamalla huomioon sekä aistinvarainen havainnointi että automaattisten hälyttimien toiminta luvussa 5 kuvatulla tavalla.

Myös reaktioaika ja ihmisvirtauksen suuruus ovat todellisuudessa satunnaismuuttujia, mutta niitä on pidetty ennalta annettuina vakioina tässä työssä. Ihmisvirtauksen nopeuden kaavan parametrille v_0 on käytetty siis edellä mainittua vakioarvoa ja reaktioajan pituudelle käytetty kahta eri vakioarvoa palon kasvunopeudesta riippuen, sillä ihmisten reaktioiden on oletettu olevan nopeampia nopeasti kasvavassa palossa kuin hitaammin kasvavassa palossa. Tämä on otettu huomioon poistumislaskelmissa siten, että kasvunopeuden 120–180 s omaaville paloille oletettiin reaktioajan t_r olevan 1½ min ja hitaammin

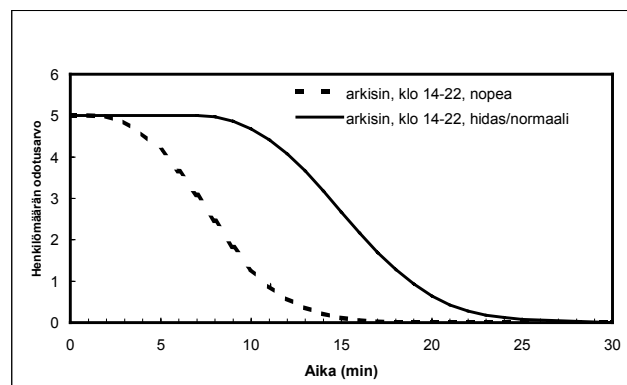
kehittyville, kasvuajan 300–600 s omaaville paloille, ajan t_r oletettiin olevan 2 minuutin pituinen.

Käyttäen yllä annettuja parametriarvoja ja luvussa 5 stokastisesti määritettyjä havainnointiajan arvoja voidaan kaavan (13) avulla laskea kullakin ajan hetkellä hallissa olevien henkilöiden lukumäärän odotusarvo, joka esitetään graafisesti kuvassa 12 ja lukuarvoina taulukossa 7. Nähdään, että arkipäivisin palon kasvunopeudella ei ole juuri mitään vaikutusta henkilöiden poistumiseen, kun taas iltaisin sen vaikutus on huomattava. Tämä selittyy sillä, että päiväsaikaan palo havaitaan aistinvaraisesti hyvin nopeasti palon kasvunopeudesta riippumatta, jolloin automaattisten ilmaisimien toiminta-ajalla ei ole merkitystä. Iltaisin kasvunopeudella on suuri vaikutus palon aistinvaraiseen havainnointiin. Tällöin myöskin paloilmalmaisimien toiminta-aikojen riippuvuudet kasvunopeudesta tulevat näkyviin, sillä iltaisin paloa ei läheskään aina ehditä havaitsemaan aistinvaraisesti ennen automaattista hälytystä.

a)



b)



Kuva 12. Poistumislaskelmien tulokset esitettynä rakennuksessa olevien ihmisten lukumäärän odotusarvona a) arkisin kello 06–14 ja b) arkisin kello 14–22. Miehitystapauksessa T3 (öisin ja viikonloppuisin) rakennuksessa ei ole henkilöitä.

Taulukko 7. Henkilövahinkoseuraamusten kvantifiointi eri riskianalyysin tarkasteluskennarioissa: rakennuksessa sisällä olevien henkilöiden lukumäärän odotusarvot eri ajanhetkillä, jotka tässä työssä käytetyssä lähestymistavassa edustavat henkilövahingon suurinta mahdollista suuruutta.

Rakennuksen miehitys	Palon kehittymisen nopeus, kasvuaika t_0 (s)	Aikajakso ja sitä vastaava seuraamuksen maksimisuuruus	
T1 klo 06–14	120–180	5 min	31.481
		10 min	0.561
		15 min	0.002
		30–120 min	0
T1 klo 06–14	300–600	5 min	36.152
		10 min	1.820
		15 min	0.293
		30 min	0.002
		60–120 min	0
klo T2 14–22	120–180	5 min	4.163
		10 min	1.297
		15 min	0.118
		30 min	0.002
		60–120 min	0
T2 klo 14–22	300–600	5 min	5.000
		10 min	4.678
		15 min	2.655
		30 min	0.001
		60 min	0.001
		120 min	0
T3 yöt + viikonloput	120–180	5–120 min	0
T3 yöt + viikonloput	300–600	5–120 min	0

8. Rakennuksen täyttyminen savulla

Suurin osa tulipalokuolemista johtuu savumyrkytyksestä. Lisäksi palotilan ja siihen liittyvien tilojen täyttyminen savulla haittaa tiloista poistumista: näkyvyys pienenee, savun sisältämien kaasujen hengittäminen voi heikentää henkistä ja fyysistä toimintakykyä. Myös kuuman savukerroksen tuottama lämpö voi haitata poistumista.

Tässä työssä rakennuksessa olevan savun määrää käytetään apuna henkilövahinkojen syntymistä arvioitaessa. Savun merkityksen kvantitatiivinen arviointi perustuu tässä luvussa esitettävän yksinkertaiseen tarkasteluun rakennuksen savuisuuden kehittymisestä.

Rakennuksen savuisuutta kuvataan tulipalon aikana muodostuvan savuisen kerroksen korkeuden avulla. Savukerroksen korkeuden oletetaan tulevan kriittiseksi henkilövahinkojen kannalta, kun tila ”täyttyy” savulla, mikä tarkoittaa tässä työssä käytetyn, Lundin yliopistosta [Magnusson ym. 1995] peräisin olevan lähestymistavan puitteissa sitä, että tilan yläosaan muodostuvan savupatjan alareuna laskeutuu korkeudelle $1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot H_R$. Tämän työn 8 m korkean tilan tapauksessa aika t_{sm} vastaa siis savupatjan laskeutumista korkeudelle 2,4 m.

Magnussonin mukaan savulla täyttymiseen kuluva aika riippuu palon kehityksestä ja tilan koosta seuraavasti:

$$\frac{t_{sm}}{s} = 1,67 \cdot \psi_{SF} \cdot \left(\frac{\dot{Q}_0}{\text{kW}} \right)^{-0,26} \cdot \left(\frac{t_0}{s} \right)^{0,52} \cdot \left(\frac{H_R}{\text{m}} \right)^{0,44} \cdot \left(\frac{A_f}{\text{m}^2} \right)^{0,54}, \quad (15)$$

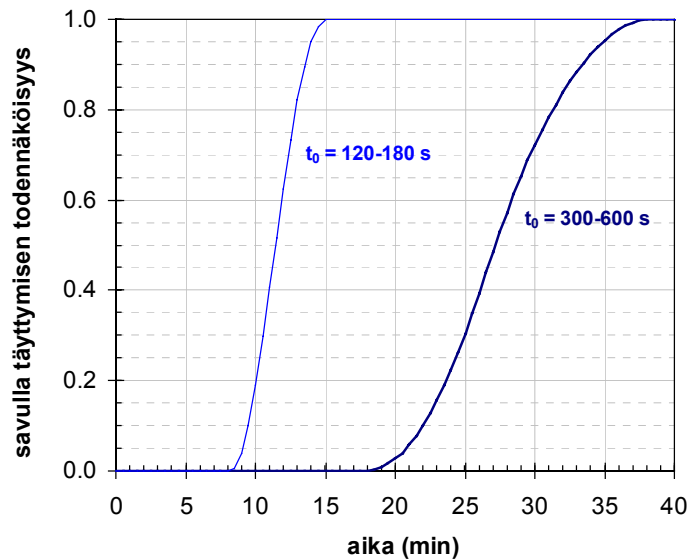
missä $\dot{Q}_0 = 1000 \text{ kW}$ ja t_0 palotehon kasvua kuvaavat suureet (vrt. yhtälö (2)). Tilan korkeus on H_R ja lattiapinta-ala A_f . Parametri ψ_{SF} kuvaa malliin liittyvää epävarmuutta. Yllä esitetty malli on CFAST-vyöhykemalliohjelman laskentatuloksien perusteella luotu korrelaatiomalli. CFAST-ohjelman kelpoisuudesta suurten, korkeiden tilojen palokehittymisen mallintamiseen ei kuitenkaan ole riittävästi tietoa, ja siksi myös sitä käyttäen johdettu malli (10) ei välttämättä sovellu kovin hyvin kohderakennuksen savulla täyttymisen kuvaamiseen. Sitä on käytetty lähinnä siksi, että se antaa arvion t_{SF} :lle yksinkertaisessa analyttisessä muodossa. Lisäksi toisaalta erillisten palokehitystä simuloivien tietokoneohjelmien, kuten CFAST:n ja muiden vyöhykemalliohjelmien, käyttö ei edellä mainitusta syystä välttämättä parantaisi tulosten luotettavuutta.

Tilan savulla täyttymisen Monte Carlo -simuloinneissa käytettiin taulukossa 8 esitettyjä parametriarvoja.

Eri nopeuksilla kehittyviin paloihin, nopeasti sekä normaalin ja hitaan nopeuden välillä kehittyviin paloihin, liittyviä savullatäyttymisaikoja esitetään kuvassa 13. Nähdään, että nopeassa palossa halli täyttyy savulla noin 8–15 minuutin kuluttua siitä, kun paloteho alkaa kasvaa. Savullatäyttymisajan jakaumasta voidaan lukea esimerkiksi, että todennäköisyys sille, että halli olisi täynnä savua alle 10 minuutissa, on noin 20 %. Kun palo kehittyy hitaammin, $t_0 = 300\text{--}600$ s, myös tilan täytyminen savulla on hitaampaa, $t_{sm} \approx 20\text{--}35$ minuuttia; todennäköisyys esimerkiksi sille, että halli olisi täynnä savua alle 30 minuutissa, on noin 70 %.

Taulukko 8. Hallin savulla täyttymisen Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt parametrit.

Parametri	Luonne	Oletettu jakauma tai arvo
palon kasvu-aika t_0	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma palon kasvunopeutta kuvaamaan valituilla väleillä
hallin korkeus H_R	vakio	8 m
hallin lattiapinta-ala A_f	vakio	5 070 m ²
parametri ψ_{SF}	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma välillä 0,9–1,1

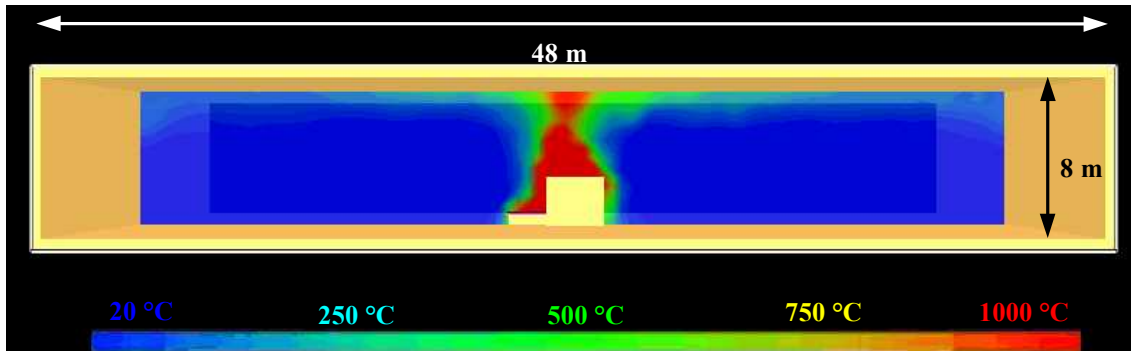


Kuva 13. Tilan savulla täyttymisen todennäköisyys kahdelle eri nopeudelle kehittyvälle palolle: normaali–hidas palokehitys, t_0 on 300–600 s ja nopea palokehitys, t_0 on 120–180 s.

Koska kohderakennuksessa on automaattinen savunpoistosysteemi, saadaan rakennuksen savulla täyttymisen todennäköisyydet yhdistämällä savunpoistolaitteiston toimimisen todennäköisyys kuvasta 13 luettavissa oleviin vapaasti kehittyvään paloon liittyviin savulla täyttymisen todennäköisyyksiin. Jos savunpoistosysteemin toimintavarmuuden oletetaan olevan suuruudeltaan 90 % riippumatta palon kehitysvaiheesta, vastaa savunpoiston vaikutuksen huomioon ottaminen kuvasta 13 luettavissa olevien todennäköisyyksien kertomista tekijällä 0.1.

9. Tulipalon vaikutus rakenteisiin

Tässä työssä tutkitaan katon kantavien rakenteiden lämpenemistä paikallisessa palossa. Ei-paikallista, lieskahtanutta paloa ei tarkastella. Paikallisen palon kattorakenteisiin aiheuttaman lämpörasituksen perusasetelma esitetään kuvassa 14.



Kuva 14. Kattorakenteiden lämpenemisen perusasetelma paikallisessa palossa: palopatsaan kuumat kaasut nuolevat rakenteita ja siirtävät lämpöä niihin konvektiivisen lämmönsiirtomekanismin kautta. Lämpöä siirtyy rakenteeseen myös säteilyn välityksellä kuumista pinnoista ja kuumasta kaasusta. Kuvan esittää FDS-kenttämalliohjelmalla laskettua esimerkkiä tilanteesta, jossa lattiapinta-alaltaan 9 m^2 :n suuruinen, 3 m korkea kuormalavapino (korkeampi laatikko) ja sen sytyttänyt trukki (matalampi laatikko) palavat tasaisella noin 15 MW paloteholla. Eri värit esittävät lämpötiloja tilan kohtisuoraan halkaisevassa leikkaustasossa.

Lämpörasitus muodostuu kahdesta komponentista:

- Konvektiivinen lämmönsiirto palopatsaan kuumista kaasuista rakenteeseen.
- Säteilemällä kuumista pinnoista ja kuumasta kaasusta rakenteeseen siirtyvä lämpö.

Seuraavassa esitetään rakenteiden lämpenemiseen käytetyt mallit ja laskennan tulokset. Päämääränä laskennassa on määrittää rakenteiden pettämisen kannalta kriittisten aikojen todennäköisyysjakaumia erilaisille rakenteille ja paloille (eri nopeudella kasvaville paloille).

9.1 Teräspalkki

9.1.1 Lämpörasituksen mallintaminen

Paikallisesta palosta kohdistuu teräspalkkiin lämpövirrantiheys, joka sisältää sekä konvektiivisen että säteilyn aiheuttaman osuuden. Lämpörasitus ei ole vakio koko palkin matkalla: se saa korkeimman arvonsa palkin keskikohdassa, johon palopatsas osuu ja pienenee, kun etäisyys keskikohdasta kasvaa. Palkin kantokykyä tarkasteltaessa oleellista on palkin lämpeneminen keskikohdassaan.

Valitaan tarkastelun kohteeksi ℓ :n pituinen osa palkin keskikohdasta ja oletetaan sen olevan riittävän lyhyt, jotta siihen kohdistuvaa lämpövirrantiheyttä \dot{q}_{net}'' voidaan pitää vakiona. Tällöin osan lämpötilan T_s aikakehitys määräytyy yhtälöstä

$$\rho_s C_s \frac{dT_s}{dt} = \left(\frac{F}{V} \right) \dot{q}_{net}'' , \quad (16)$$

missä ρ_s ja C_s ovat teräksen tiheys ja ominaislämpö. Termi F/V on palkin ulkopinnan lämmönsiirtoon osallistuvan pinta-alan F suhde palkin ℓ :n pituisen osan tilavuuteen V . Tässä työssä lämmön oletetaan siirtyvän palkkiin joka suunnasta. Tällöin F on profiilin ulkopiiriin s_{profiili} ja pituuden ℓ tulo, $F = s_{\text{profiili}} \cdot \ell$ tulo, ja V on palkin poikkileikkauspinta-alan A_{profiili} ja pituuden ℓ tulo, $V = A_{\text{profiili}} \cdot \ell$. Suhteessa F/V mielivaltaisesti valittu pituus ℓ siis supistuu pois ja jäljelle jää vain palkin profiilia kuvaava suure piiri per poikkipinta-ala.

Teräksen lämpötilan laskemiseksi tarvitaan malli, jolla kuvataan lämpövirrantiheyttä \dot{q}_{net}'' . Tässä työssä siihen käytetään Myllymäen ja Kokkalan [2000] esittämää mallia, joka perustuu Hasemin ym. [1995] tutkimuksiin paikallisen tuottamista lämpörasituksesta. Tämän mallin mukaan lämpövirrantiheyttä \dot{q}_{net}'' voidaan kuvata lausekkeella

$$\dot{q}_{net}'' = [1 - (1 - \varepsilon)\gamma] \dot{q}_s'' - h_c (T_s - T_\infty) - \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4), \quad (17)$$

missä ε on teräksen emissiivisyys ja h_c on lämmönsiirtokerroin palkin pinnalla sekä σ on Stefan–Boltzmanin vakio ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$). Malli on kirjoitettu muotoon, jossa konvektiivista lämmönsiirtoa kuvaavassa termissä esiintyy tunnettu kaukana palkista vallitseva ympäristön lämpötila T_∞ (tyypillisesti esim. $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Kuitenkin todellisuudessa konvektio tapahtuu palkkia välittömästi ympäröivään kaasuun, jonka lämpötila T_g on selvästi lämpötilaa T_∞ korkeampi. Lämpötilaa T_g ei kuitenkaan tunneta, ja siksi sen käyttäminen on kierretty lisäämällä kaavaan vakio γ , joka ottaa huomioon sen pienen eron, joka syntyy, kun konvektion oletetaan tapahtuvan lämpötilaan T_∞ . Vakion γ arvoksi on määritetty kokeiden perusteella noin $0.7\text{--}0.8$ [Myllymäki ja Kokkala 2000]. Malli

on toteutettu siten, että vakiolla γ säädetään paikallisesta palosta teräkseen suuntautuva lämpövuon tiheys \dot{q}_s'' vastaamaan Myllymäen ja Kokkalan koetuloksia.

Lämpövuon tiheys \dot{q}_s'' määräytyy palotehosta ja tilanteen geometriasta Hase-
min ym. [Hasemi ym. 1995] koetulosten perusteella kehitettyjen kaavojen mukaisesti:

$$\dot{q}_s'' = 518.8 \cdot \exp\left[-3.7 \cdot \frac{(r + H_W + z')}{(L_{HW} + H_W + z')}\right], \quad (18)$$

missä r on vaakasuora etäisyys nousevan virtauksen stagnaatiopisteestä, H_W on uuman keskikohdan etäisyys palolähteestä, L_{HW} on liekin vaakasuora ulottuvuus stagnaatiopisteestä ja z' on palolähteen virtuaalisen origon paikka. Suureet z' ja L_{HW} riippuvat palotehosta seuraavien kaavojen mukaisesti:

$$z' = \begin{cases} 2.4D(\dot{Q}^{*2/5} - \dot{Q}^{*2/3}), & \dot{Q}^* < 1 \\ 2.4D(1 - \dot{Q}^{*2/5}), & \dot{Q}^* \geq 1 \end{cases} \quad (19)$$

ja

$$L_{HW} = H_W \cdot (2.9 \dot{Q}_{HW}^{*0.4} - 1), \quad (20)$$

missä paloteho on sisällytetty palavan pinta-alan tehollisen halkaisijan D sekä laipan ja palavan alueen reunan välisen etäisyyden H_W avulla dimensiottomiksi tehtyihin palotehosuureisiin \dot{Q}_D^* ja \dot{Q}_{HW}^* :

$$\dot{Q}_D^* = \frac{\dot{Q}/\text{kW}}{1100 \cdot (D/\text{m})^{5/2}}, \quad (21)$$

ja

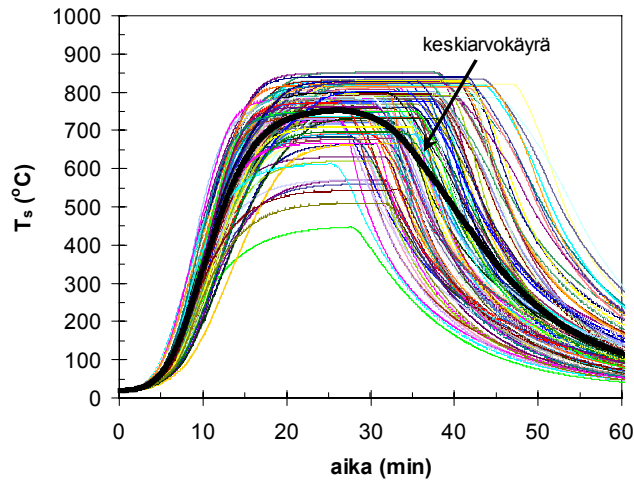
$$\dot{Q}_{HW}^* = \frac{\dot{Q}/\text{kW}}{1100 \cdot (H_W/\text{m})^{5/2}}. \quad (22)$$

Taulukko 9. Teräspalkin lämpörasituksen Monte Carlo -laskuissa käytetyt parametrit.

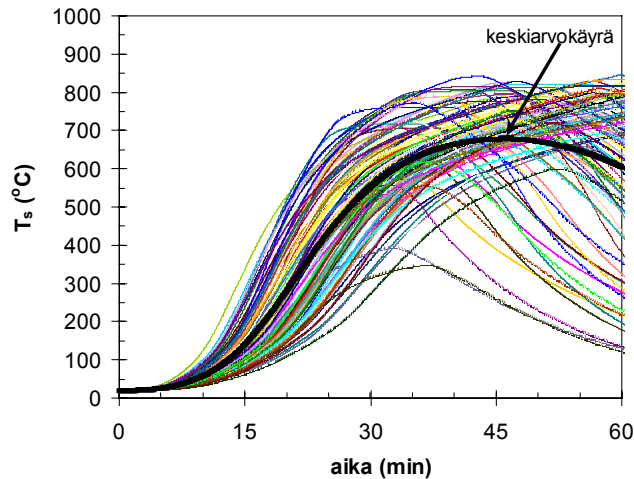
Parametri	Luonne	Oletettu jakauma tai arvo
teräksen tiheys ρ_s	vakio	7 850 kg/m ³
teräksen ominaislämpö C_s	vakio	500 JK ⁻¹ kg ⁻¹
palkin profiilia kuvaava suure F/V	muuttuva vakio parametri	50, 100,... 1/m
teräksen emissiivisyys ε	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 0.79–1.0
mallin parametri γ	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 0.7–0.8
lämmönsiirtokerroin h_c	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 15–40 W/m ²
ympäristön lämpötila T_∞	vakio	20 °C

Kuvassa 15 esitetään laskettuja teräksen lämpötiloja profiilille, jonka F/V -arvo on 150 m⁻¹, joka vastaa noin 15 minuutin palonkestoluokituksen omaavaa tuotetta. Laskennassa on tarkasteltu kahdella eri nopeudella kehittyvää paloa: nopeasti kehittyvä palo, $t_0 = 120\text{--}180$ s, ja hitaammin kasvava palo, jonka kasvuaika on $t_0 = 300\text{--}600$ s.

a)



b)



Kuva 15. Teräspalkin lämpötiloja T_s ajan t funktiona teräspalkille, jonka F/V -arvo on 150 m^{-1} : a) nopea palokehitys, $t_0 = 120\text{--}180 \text{ s}$ ja b) normaali–hidas palokehitys, $t_0 = 300\text{--}600 \text{ s}$.

9.1.2 Teräspalkin vaurioituminen

Teräspalkin vaurioituminen voi tapahtua murtorajatilan, käyttörajatilan tai jatkuvan sortuman rajatilan ylittyessä. Murtorajatilan ylittyminen vastaa tilanteita, joissa 1) rakenne tai sen osa menettää kantokykynsä (materiaali murtuu myötämällä, hauraasti tai väsymällä), 2) rakenne muuttuu mekanismiksi plastisten nivelten syntymisen takia tai 3) rakenteen tai sen osan stabiilisuuden raja ylitetään (rakenne menettää tasapainonsa, esim. sortumisen, kaatumisen tai liukumisen seurauksena). Käyttörajatilan ylitystä kuvaavat liian suuret muodonmuutokset tai siirtymät, halkeamat (tiiviyden tai korroosion aiheuttamat) tai haitalliset värähtelyt. Jatkuvan sortuman rajatilan ylittyessä yksityisen rakenneosan murtuminen aiheuttaa etenevän murtotilan koko rakenteessa.

Rajatiilojen tarkastelu on monitahoinen ongelma, jossa pitää ottaa huomioon sekä rakenteen kantokyky ja siihen vaikuttavat kuormat.

Vaurioitumisongelman tarkastelua voidaan yksinkertaistaa huomattavasti kuvaamalla kuumentuneen teräksen toimintakykyä lämpötilakriteeriä käyttäen. Tällaista lähestymistapaa voidaan soveltaa yksinkertaisten teräsrakenteiden, kuten palkin, tapauksessa, koska tässä tapauksessa sovellettavasta kriittisestä lämpötilasta on olemassa paljon kokemusperäistä ja tutkimustietoa

Tässä työssä teräspalkin vaurioitumista tarkastellaan käyttäen lämpötilakriteeriä. Kriittisenä lämpötilana käytetään arvoa 600 °C.

9.1.3 Teräspalkin vaurioitumisaikojen jakaumat

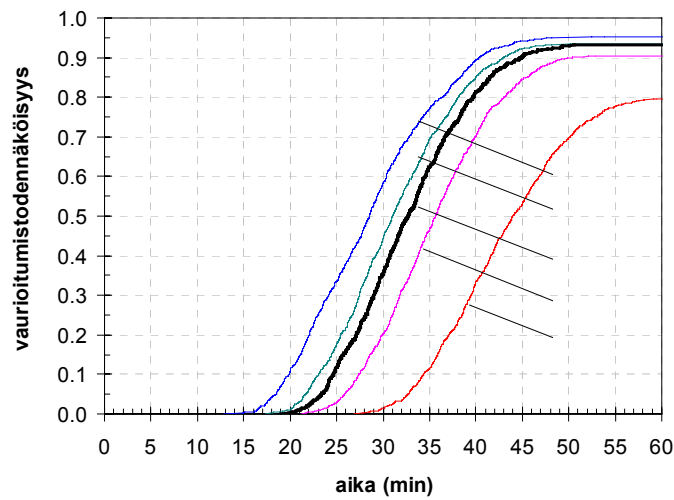
Kun teräspalkin vaurioitumiskriteerinä pidetään tietyn kriittisen lämpötilan saavuttamista, voidaan vaurioitumisaikojen jakaumat määrittää liitteessä A selitetyllä tavalla lasketuista teräksen lämpötilan aikariippuvuutta kuvaavista tuloksista.

Laskennan tulokset esitetään kuvassa 16. Kuvien pysty akselin arvot ovat palkin vaurioitumistodennäköisyydet, ja vaaka-akseli esittää aikaa palon alkamisesta eli hetkestä, jolloin paloteho alkaa kasvaa (ks. luku 4). Kuvaa luetaan seuraavasti:

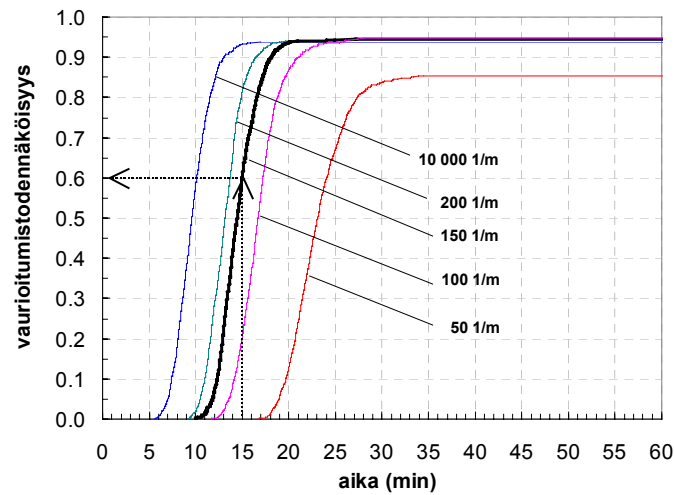
- Valitaan tarkasteltava palkkia kuvaava käyrä eli tietty F/V-arvo.
- Valitaan vaaka-akselilta aika, jona vaurioitumisen todennäköisyyttä halutaan tarkastella.
- Luetaan valittua aikaa vastaava todennäköisyys pysty akselilta.

Kuvaan merkityt nuolet havainnollistavat kuvan lukemista: niistä nähdään esimerkiksi, että todennäköisyys siihen, että teräspalkki, jonka poikkileikkaustekijä on 100 l/m, on vaurioitunut 30 minuutin aikana hitaasti kehittyvässä palossa, on noin 20 %. Nopeasti kehittyvässä palossa vastaavan palkin vaurioitumistodennäköisyys on 30 minuutin palon jälkeen saavuttanut asymptoottisen arvonsa 95 %. Vaurioitumistodennäköisyydet eivät nouse 100 %:iin asti edes hyvin pitkänä aikana, koska osa laskennassa esiin tulevista paloista on niin pieniä, että ne eivät pysty vaurioittamaan palkkeja mallin mukaan edes äärettömän pitkän lämpörasituksen aikana.

a)



b)



Kuva 16. Teräspalkin vaurioitumisaikojen jakaumat eri F/V -arvoille, kun vaurioitumisen kriittinen lämpötila on 600 °C : a) normaali–hidas palokehitys, t_0 on $300\text{--}600\text{ s}$, ja b) nopea palokehitys, t_0 vaihtelee välillä $120\text{--}180\text{ s}$. Nuolet havainnollistavat kuvan lukemistapaa (esim. todennäköisyys siihen, että teräspalkki, jonka poikkileikkaustekijä on 150 l/m , on nopeasti kehittyvässä palossa vaurioitunut 15 minuutin aikana, on noin 60%).

9.2 Liimapuupalkki

Teräspalkin lisäksi toinen rakenne, jota tässä työssä tarkastellaan, on liimapuupalkki. Tässä luvussa esitetään Monte Carlo -analyysi liimapuupalkin palonkestosta luvussa 4 esitetyn tulipalon tapauksessa, jossa rakenne lämpenee paikallisesti.

Tässä tarkastelussa palonkesto merkitsee aikaa, jonka taivutetun korkean suorakaiteen muotoisen poikkileikkauksen omaava puupalkki kestää palorasitusta, ennen kuin tietty rajatila ylittyy. Palon rasitus palkissa näkyy ehjän poikkileikkauksen hiiltymisen seurauksena tapahtuvan mittojen pienenemisen aiheuttamana kestävyuden vähenemisenä: kuormaa kantavan hiiltymättömän puun pinta-alan A pienentyessä poikkileikkauksen taivutusvastus W ja taivutusjäykkyys EI pienenevät ajan funktiona.

Puupalkin vaurioitumisen tarkastelussa ei voida käyttää samanlaista yksinkertaista kriittiseen lämpötilaan perustuvaa lähestymistapaa kuin teräspalkin tapauksessa. Puupalkin tapauksessa vaurioituminen pitää analysoida rajatilojen ylittymisen tarkastelun kautta.

Tarkasteltavat rajatilat ovat

- murtorajatila: taivutus- ja leikkausmurto sekä niiden yhdistelmä
- käyttörajatila: sallitun siirtymän ylitys tai rakenteen stabiliteetin menetys.

Rajatilojen ylittämistä tarkastellaan rakenteiden mekaniikan menetelmin sen jälkeen, kun kinemaattiset (tuenta ja kiinnitykset) ja mekaaniset reunaehdot (kuormitus) on valittu.

9.2.1 Liimapuupalkin kantokyky

Poikkileikkaussuureiden aikariippuvuus lasketaan hiiltymisrintaman etenemisen aika-riippuvuuden perusteella. Hiiltymisen laskenta suoritetaan käyttäen VTT Palotekniikassa kehitettyä hiiltymisrajan etenemistä kuvaavaa mallia [Baroudi 1994]. Palkin pintaan kohdistuva lämpövuon tiheys lasketaan käyttäen Myllymäen ja Kokkalan [2000] muokkaamaa Hasemin ym. [1995] esittämää paikallisen palon mallia (ks. kohta 9.1.1). Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että sama lämpövuon kohdistuu sekä poikkileikkauksen alapintaan että pystypintaan. Poikkileikkaussuureiden laskennan yksityiskohdat esitetään liitteessä D.

Liimapuupalkin oletettiin olevan lujuusluokkaa L30D, kosteusluokkaa KL1 ja aika-luokkaa B. Sen lujuusominaisuuksia on käsitelty satunnaismuuttujina, joiden ominaisuudet esitetään taulukossa 10. Palkin pituudeksi oletettiin 10 m. Palkin pituuden vaikutuksen tutkimiseksi laskenta tehtiin myös 12 m pitkälle palkille. Korkeudeksi H_{GWL} ja

leveydeksi B_{GWL} valittiin kylmä- ja palomitoituksen perusteella seuraavat arvot: $H_{GWL} = 600$ mm ja $B_{GWL} = 200$ mm. Tulipalo-olosuhteissa olevan liimapuupalkin kantokyvyn Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt suureet esitetään taulukossa 11.

Taulukko 10. Liimapuupalkin kantokyvyn Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt parametrit: palkin lujuuden kuvaamisessa tarvittavat suureet.

Parametri	Luonne	Oletettu jakauma tai arvo
pituus	vakio	10 m tai 12 m
paksuus	vakio	600 mm (B10-normin mukaan tehdyn kylmämitoituksen antama arvo)
kosteus ¹⁾ M_{GLW}	riippumaton satunnaismuuttuja	kosteusluokkaa KL1 vastaava kolmiojakauma, jonka kannat ovat pisteissä 6 ja 12 % ja huippu pisteessä 10 %.
kimmomoduuli E_{GLW}	kosteudesta riippuva satunnaismuuttuja ²⁾	kimmomoduuli referenssikosteudessa noudattaa normaalijakaumaa ³⁾ keskiarvona 7 000 MPa ja keskihajontana 910 MPa
liukumoduuli G_{GLW}	kimmomoduulista riippuva satunnaismuuttuja	$G_{GLW} = E_{GLW}/[20 \cdot (1 + \psi_G)]$, missä ψ_G on tasajakautunut satunnaismuuttuja välillä $[-0.05, 0.05]$.
taivutuslujuus σ_{GLW}	kosteudesta riippuva satunnaismuuttuja ⁴⁾	taivutuslujuus referenssikosteudessa noudattaa normaalijakaumaa keskiarvona 31,8 MPa ja keskihajontana 4,1 MPa
leikkauslujuus τ_{GLW}	kosteudesta riippuva satunnaismuuttuja ⁵⁾	leikkauslujuus referenssikosteudessa noudattaa normaalijakaumaa keskiarvona 3,05 MPa ja keskihajontana 0,40 MPa

1) Vastaa kosteusluokkaa 1.

2) Monte Carlo -simuloinnissa kimmomoduulin riippuvuus liimapuun kosteudesta M_{GLW} on otettu huomioon seuraavasti: $E_{GLW}(M_{GLW}) = E(M_{ref}) \cdot [1 - 1,5 \cdot (M_{GLW} - M_{ref})]$, missä $M_{ref} = 10$ %. Kimmomoduulin arvo referenssikosteudessa $E_{GLW}(M_{ref}) \sim N(7\,000 \text{ MPa}, 910 \text{ MPa})$.

3) Lukujen arvonta normaalijakaumasta voi tuottaa epäfysikaalisia negatiivisia arvoja. Monte Carlo -simuloinnissa ne hylätään.

4) Monte Carlo -simuloinnissa taivutuslujuuden riippuvuus liimapuun kosteudesta M_{GLW} on otettu huomioon seuraavasti: $\sigma_{GLW}(M_{GLW}) = \sigma(M_{ref}) \cdot [1 - 4 \cdot (M_{GLW} - M_{ref})]$, missä $M_{ref} = 10$ %. Taivutuslujuuden arvo referenssikosteudessa $\sigma_{GLW}(M_{ref}) \sim N(31,8 \text{ MPa}, 4,1 \text{ MPa})$.

5) Monte Carlo -simuloinnissa leikkauslujuuden riippuvuus liimapuun kosteudesta M_{GLW} on otettu huomioon seuraavasti: $\tau_{GLW}(M_{GLW}) = \tau(M_{ref}) \cdot [1 - 3 \cdot (M_{GLW} - M_{ref})]$, missä $M_{ref} = 10$ %. Leikkauslujuuden arvo referenssikosteudessa $\tau_{GLW}(M_{ref}) \sim N(3,05 \text{ MPa}, 0,04 \text{ MPa})$.

Taulukko 12. Liimapuupalkin kantokyvyn Monte Carlo -simuloinnissa käytetyt parametrit: palkin hiiltymisen laskennassa tarvittavat suureet.

Parametri	Luonne	Oletettu jakauma tai arvo
kosteus ¹⁾ M_{GLW}	riippumaton satunnaismuuttuja	ks.
puun tiheys ρ_{GLW}		tasajakauma, 450–500 kg/m ³
puun lämmönjohtavuus λ_{GLW}	puun tiheydestä ja kosteudesta riippuva suure	$\lambda_{GLW} = 0.1 \times [0,237 + 2 \cdot (\rho_{GLW} / \rho_{water}) \cdot (1 + 2 \cdot M_{GWL})]$ Wm ⁻¹ K ⁻¹
puun ominaislämpö	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 1 200–2 800 JK ⁻¹ kg ⁻¹
hiilen tiheys	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, (120 ± 20 %) kg/m ³
hiilen lämmönjohtavuus λ_c	riippumaton satunnaismuuttuja	$\lambda_c = 0,38$, kun hiilen paksuus > 6 mm $\lambda_c = 0,10$, kun hiilen paksuus ≤ 6 mm
hiilen ominaislämpö	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 700–900 JK ⁻¹ kg ⁻¹
puun tehollinen kaasuuntumislämpö	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 0,3–1,2 MJ/kg
pinnan lämmönsiirtokerroin	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 15–40 Wm ⁻² K ⁻¹
pinnan emissiiviteetti	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 0,8–1,0
kaasuuntumislämpötila	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 300–380 °C
pyrolyysikaasujen palamislämpö	riippumaton satunnaismuuttuja	tasajakauma, 12–18 MJ/kg

9.2.2 Liimapuupalkin kuormitus

Liimapuupalkin vaurioitumisen laskennassa on huomioitu seuraavat kuormat:

- palkin oman painon ja ylärakenteiden aiheuttama kuormitus
- lumikuorma.

Palkin oman painon aiheuttaman kuorman arvona käytetään 174 N/m^2 ja ylärakenteiden aiheuttamalle kuormalle käytetään arvoa 500 N/m^2 . Kuorimien jakautuminen palkin kannettavaksi määräytyy moduulista k , jonka arvo on 1,8 m.

Lumikuormaa käsiteltiin tilastollisena vaihtelevana suureena. Käsittelyn yksityiskohdat esitetään liitteessä D.

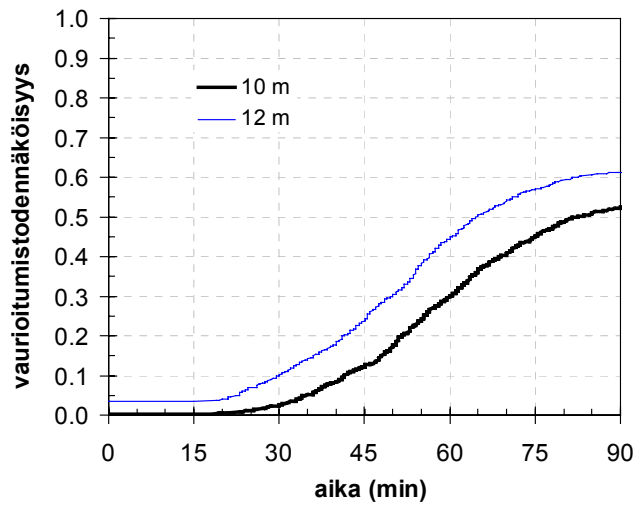
9.2.3 Liimapuupalkin vaurioituminen

Liimapuupalkin vaurioitumistavan selvittämiseksi tarkasteltiin taivutusmurtoa maksimimomentin kohdalla ja leikkausmurtoa maksimileikkausvoiman kohdalla. Yhdistettyä taivutus- ja leikkausmurtoa tarkasteltiin yhdistetyn jännitystilän maksimin kohdalla. Nämä molemmat murtotavat on havaittu VTT Palotekniikassa tehdyissä kuormitettujen puupalkkien kokeissa [Holm ja Kallioniemi 1980]. Taivutusmurto osoittautui tässä tapauksessa määrääväksi vaurioitumistavaksi.

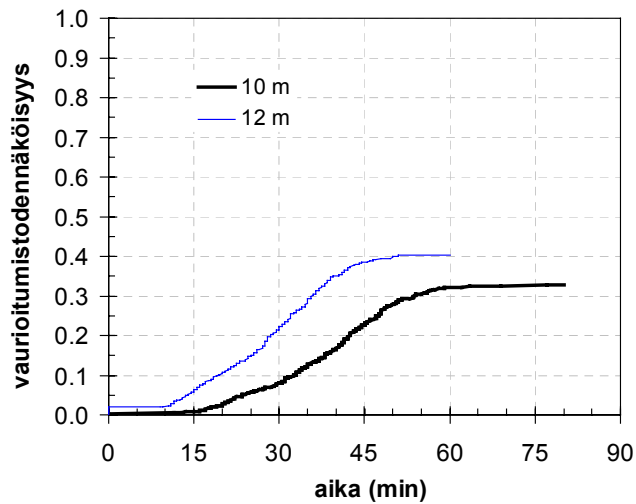
9.2.4 Liimapuupalkin vaurioitumisaikojen jakaumat

Edellä esitettyjen mallien Monte Carlo -simuloinnin tuloksena saadaan arvioitua liimapuupalkkien vaurioitumistodennäköisyydet palon eri aikoina. Laskennan tulokset esitetään kuvassa 17. Kuvaa luetaan samalla tavoin kuin teräksen vaurioitumistodennäköisyydet esittävää kuvaa 16.

a)



b)



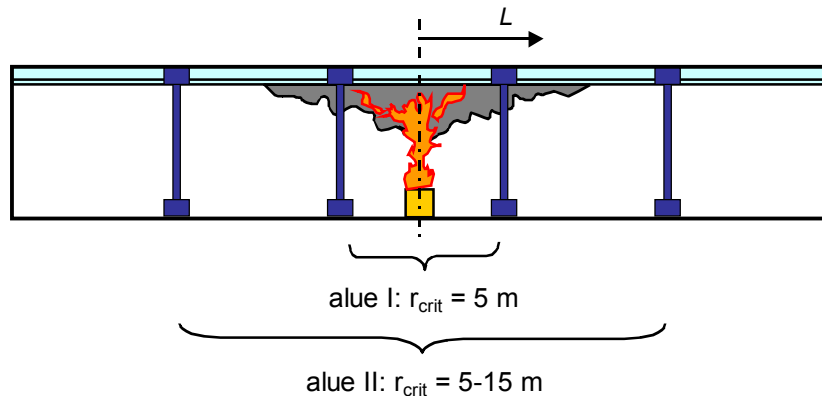
Kuva 17. Kahden eripituisen, 10 m ja 12 m pitkän, liimapuupalkin vaurioitumisaikojen jakaumat vastaten tarkasteltua vaurioitumistapaa: a) normaali-hidas palokehitys, t_0 vaihtelee välillä on 300–600 s ja b) nopea palokehitys, t_0 vaihtelee välillä 120–180 s. Vaurioitumistapana taivutusmurto.

10. Seuraamukset

Riskianalyyseissä vahinkotapauksen seuraamusten määrittäminen on eräs tärkeimpiä vaiheita. Tulipaloissa tärkein seuraamustyyppi ovat henkilövahingot eli kuolemantapaukset, loukkaantumiset ja muut akuutit terveysvaikutukset sekä mahdolliset pitkäaikaiset haitat terveydelle. Näistä tulipalon riskianalyysi pystyy tällä hetkellä parhaiten kuvaamaan akuutteja seuraamuksia. Toisen tärkeän tulipalojen seuraamusluokan muodostavat niiden aiheuttamat omaisuusvahingot, joiden painotus voi sovelluskohteesta riippuen olla hyvinkin suuri. Tässä työssä käsitellään sekä omaisuus- että henkilövahinkoja käyttäen niille seuraavassa esitettyjä yksinkertaistettuja kuvaustapoja.

10.1 Omaisuusvahingot

Omaisuusvahinkoja tarkastellaan vain rakenteiden vaurioitumisen kannalta. Tässä työssä vaurioiden vakavuuden kriteeriona pidetään niiden ulottuvuutta: mitä laajemmalle vaurio ulottuu, sitä vakavampi – eli suuremmat omaisuushäviöt aiheuttava – sen katsotaan olevan. Vaurion ulottuvuutta L arvioidaan liekkien ulottuvuuden perusteella, joka puolestaan voidaan arvioida Hasemin ym. [1995] ja Franssenin [1998] esittämien mallien avulla. Kuva 18 havainnollistaa käytettyä lähestymistapaa.



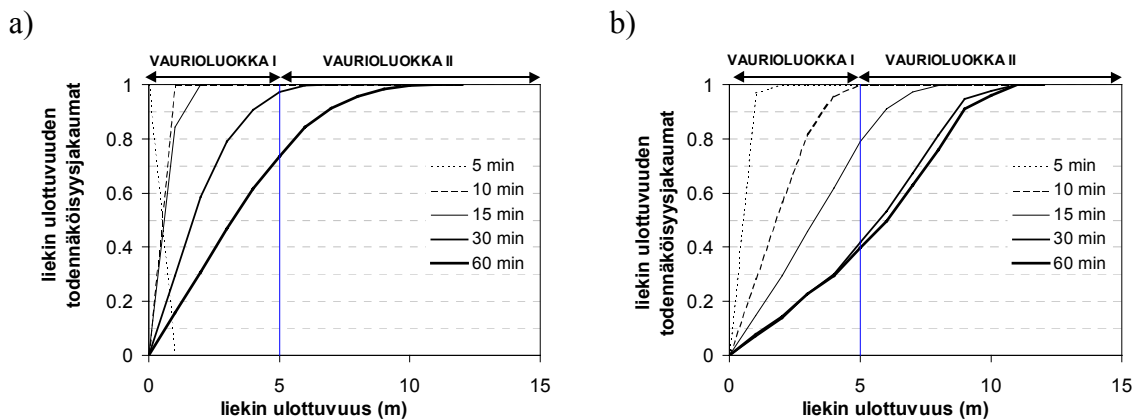
Kuva 18. Rakenteiden vaurioitumiseen liittyvän vahingon vakavuuden kuvaus liekkien ulottuvuuden L avulla. Jos L on pienempi kuin 5 metriä (alue I), vain rakennuksen keskimmäisen palkkijaon alueella olevat rakenteet vaurioituvat. Jos L on suurempi kuin 5 metriä mutta kuitenkin pienempi kuin 15 metriä (alue II), myös seuraavan palkkijaon alueella olevat rakenteet vaurioituvat. Jos L olisi suurempi kuin 15 metriä, rakenteet voisivat vaurioitua koko rakennuksen leveydeltä. Tämä mahdollisuus on kuitenkin suljettu pois sen perusteella, että kohderakennuksen lieskahtaminen on hyvin epätodennäköistä.

Edellä esitetyn mallin mukaisesti rakenteiden vaurioitumiseen liittyvät omaisuusvahingot voidaan jaotella kahteen luokkaan seuraavasti:

- Rajoittunut rakenneaurio syntyy silloin, kun
 - rakenteiden lämpötila ylittää niille määritetyt vaurioitumisrajatilat, eli teräsrakenteiden materiaalin lämpötila nousee yli 600 °C:seen ja puurakenteiden taipusmurtorajatila ylittyy ja
 - liekkien ulottuvuus L on pienempi kuin 5 m.
- Vakava rakenneaurio aiheutuu, kun
 - em. vaurioitumisen rajatilat ylittyvät ja
 - liekkien ulottuvuus L on suurempi kuin 5 m.

Jos rajatilat eivät ylity, rakenneaurioita ei synny.

Rajoittuneen ja vakavan vaurion todennäköisyydet palon eri aikoina määritettiin liekkien ulottuvuuksille Monte Carlo -simuloinnilla laskettujen arvojen avulla. Todennäköisyydet esitetään kuvassa 19. Kuvasta luettavissa olevat todennäköisyysarvot eri aikajaksoille on koottu taulukkoon 12.



Kuva 19. Liekkien ulottuvuuden perusteella arvioidut rajoittuneen ja vakavan rakenneaurion todennäköisyysjakaumat. a) Palon kasvuaika 300–600 s ja b) palon kasvuaika 120–180 s. Kuvan eri käyrät vastaavat tulipalon ajalliseen jakoon käytettyjä aikajaksoja. Vaaka-akseli on kuvaa liekin ulottuvuutta.

Taulukko 13. Liekkien ulottuvuuden perusteella arvioidun rajoittuneen ja vakava rakennevaurion todennäköisyydet tulipalon eri aikoina.

Aikajakso (min)	Nopea palonkasvu, $t_0 = 120\text{--}180\text{ s}$		Normaali–hidas palonkasvu, $t_0 = 300\text{--}600\text{ s}$	
	rajoittunut vaurio	vakava vau- rio	rajoittunut vaurio	vakava vau- rio
5	1	0	1	0
10	1	0	1	0
15	0.79	0.21	1	0
30	0.42	0.58	0.97	0.03
60	0.40	0.6	0.74	0.26
120	0.40	0.6	0.74	0.26

10.2 Henkilövahingot

Henkilövahinkoja tarkastellaan rakennuksen sisällä mahdollisesti olevan henkilömäärän perusteella olettamalla, että rakenteiden pettäessä tai rakennuksen täytyessä savulla kaikki rakennuksen sisällä olevat ihmiset joutuvat henkilövahingon uhriksi. Henkilövahingon laatua ei ole määritetty sen tarkemmin.

Kun kuvassa 12 (tai taulukossa 7) esitetyt rakennuksen sisällä olevien henkilöiden lukumäärän odotusarvot yhdistetään rakenteiden pettämisen (kuvat 16 ja 17) tai tilan savulla täyttymisen todennäköisyyksiin (kuva 13) sekä otetaan huomioon tulipalon sammuttamisen ja sammumisen todennäköisyydet, saadaan tuloksena palossa syntyvien henkilövahinkojen odotusarvo (ks. liite G). Henkilöille vaarallisen rakenteiden pettämisen kriteeriksi on valittu vaurioluokka 'vakavat vahingot'. Paikallisten, rajoittuneiden vaurioiden ei ajatella uhkaavan henkilöturvallisuutta, sillä nämä vauriot ovat palopat-
saan yläpuolella, joten vaurioituneen katon osan alapuolella ei ole ihmisiä.

11. Paloriskien arviointi

Riskianalyyseissä sovelletaan luvun 2 kohdan 2.5.2 kuvassa 6 esitettyjä tapahtumapuita, joiden perusteella lasketaan systeemin aikakehitys kohdassa 2.5 sekä liitteessä F esitettyjen menetelmien mukaisesti.

11.1 Syöttötiedot

Tapahtumapuihin syötettävät haarautumistodennäköisyyksien arvot esitetään taulukoissa 13–20. Taulukoiden sarakkeet vastaavat eri tapahtumia. Lukuarvot näihin sarakkeisiin saadaan edellisissä luvuissa esitettyjen tarkasteluiden tuloksista.

Tapahtuman ”palo havaittu” todennäköisyydet saadaan luvun 5 taulukosta 5.

Tapahtumille ”käsiammutus ei onnistu” todennäköisyydet on esitetty kohdassa 6.1. Jotta taulukoita voidaan käyttää myös tapauksissa, joissa on automaattinen sammutusjärjestelmä, niin niissä on mukana myös tapahtuma ”sprinklerisammutus ei onnistu”. Tässä työssä tarkastellussa kohteessa tämä tapahtuman todennäköisyys on yksi, koska rakennuksessa ei ole sprinklereitä. Tapahtumaan ”palokuorma ei ole loppunut” liittyvät todennäköisyydet on määritetty kohdassa 6.2. Tapahtumaan ”palo on sammunut” on tiivistetty edellä mainittujen tapahtumien lopputulema.

Tapahtuman ”rakenne vaurioituu” todennäköisyydet on laskettu luvussa 9. Tässä luvussa lasketut vaurioitumistodennäköisyydet liittyvät vapaasti kehittyviin mitoituspaloihin eli paloihin, joita ei sammuteta. Kyseiset todennäköisyydet tietyllä ajanhetkellä ovat mahdollisia todennäköisyyksiä kyseisille tapahtumille sillä ehdolla, että paloa ei ole sammutettu tähän ajanhetkeen mennessä. Huomaa, että tapahtuma ”palokuorma on loppunut” sisältyy mitoituspalojen kehitykseen implisiittisesti.

11.1.1 Omaisuusvahinkojen analysoinnin vaatimat tiedot

Omaisuusvahinkojen syntymisen analysoinnissa sovelletaan kuvassa 6c esitettyä tapahtumapuuta. Tapahtumapuissa tarvittavat tiedot eri uhkakuville ja rakennevaihtoehtoille on koottu taulukoihin 13–16 seuraavasti: teräspalkkirakenteen tiedot ovat taulukoissa 13 (normaali–hidas palonkasvu) ja 14 (nopea palonkasvu) sekä puupalkkirakenteen tiedot taulukoissa 15 (normaali–hidas palonkasvu) ja 16 (nopea palonkasvu).

Omaisuusvahinkojen laadun kuvaamiseksi analyysissä otetaan huomioon kohdassa 10.1 esitetyt tiedot syntyvien vahinkojen laajuudesta.

Taulukko 14. Teräspalkki, poikkileikkaustekijän arvot 100, 150 ja 350 m⁻¹. Normaali-hidas palonkasvu, t₀ = 300–600 s: rakenteen vaurioitumisen riskianalyyssissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina. Oikeanpuoleisimmat sarakkeet ovat syöttötiedot kuvassa 6c esitettyyn tapahtumapuuhun.

T1: päivisin kello 6–14								
aika-jakso (min)	Palo havaittu	Käsisammutus ei onnistu	Sprinklersammutus ei onnistu ¹⁾	Palo-kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		
						100 1/m ²⁾	150 1/m ³⁾	350 1/m ⁴⁾
5	0.979126	0.05	1	1	0.930170	0	0	0
10	0.997100	0.25	1	1	0.943650	0	0	0
15	0.999850	0.01	1	1	0.999288	0	0	0
30	1	0.9	1	1	0.999359	0.20	0.35	0.55
60	1	1	1	0.35	0.999776	0.90	0.93	0.93
120	1	1	1	0	1	0.90	0.93	0.93
T2: iltaisin kello 14–22								
aika-jakso (min)	Palo havaittu	Käsisammutus ei onnistu	Sprinklersammutus ei onnistu ¹⁾	Palo-kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		
						100 1/m ²⁾	150 1/m ³⁾	350 1/m ⁴⁾
5	0.006000	0.1	1	1	0.005400	0	0	0
10	0.512800	0.5	1	1	0.258800	0	0	0
15	0.928000	0.01	1	1	0.921308	0	0	0
30	0.998000	0.9	1	1	0.928977	0.20	0.35	0.55
60	1	1	1	0.35	0.975142	0.90	0.93	0.93
120	1	1	1	0	1	0.90	0.93	0.93
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin								
aika-jakso (min)	Palo havaittu	Käsisammutus ei onnistu	Sprinklersammutus ei onnistu ¹⁾	Palo-kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		
						100 1/m ²⁾	150 1/m ³⁾	350 1/m ⁴⁾
5	0.006000	1	1	1	0	0	0	0
10	0.420000	1	1	1	0	0	0	0
15	0.850000	0.01	1	1	0.841500	0	0	0
30	0.900000	0.9	1	1	0.847350	0.20	0.35	0.55
60	0.905000	1	1	0.35	0.946573	0.90	0.93	0.93
120	0.905000	1	1	0	1	0.90	0.93	0.93

1) Ei sprinklereitä.

2) Vastaa noin 19 minuutin palonkestoa.

3) Vastaa noin 15 minuutin palonkestoa.

4) Vastaa noin 10 minuutin palonkestoa.

Taulukko 15. Teräspalkki, poikkileikkaustekijät 100, 150 ja 350 m⁻¹. Nopea palonkasvu, t₀ = 120–180 s: rakenteen vaurioitumisen riskianalyyssissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina. Oikeanpuoleisimmat sarakkeet ovat syöttötiedot kuvassa 6c esitettyyn tapahtumapuuhun.

T1: päivisin kello 6–14								
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammu- nut	Rakenne vaurioituu		
						100 1/m ²⁾	150 1/m ³⁾	350 1/m ⁴⁾
5	0.999560	0.25	1	1	0.749670	0	0	0
10	0.999998	0.98	1	1	0.749679	0	0.002	0.25
15	1	0.9	1	1	0.774711	0.2	0.6	0.89
30	1	1	1	0.89	0.799493	0.95	0.95	0.95
60	1	1	1	0	1	0.95	0.95	0.95
120	1	1	1	0	1	0.95	0.95	0.95
T2: iltaisin kello 14–22								
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammu- nut	Rakenne vaurioituu		
						100 1/m ²⁾	150 1/m ³⁾	350 1/m ⁴⁾
5	0.780000	0.5	1	1	0.390000	0	0	0
10	0.993000	0.99	1	1	0.392130	0	0.002	0.25
15	0.998000	0.9	1	1	0.452717	0.2	0.6	0.89
30	1	1	1	0.89	0.512918	0.95	0.95	0.95
60	1	1	1	0	1	0.95	0.95	0.95
120	1	1	1	0	1	0.95	0.95	0.95
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin								
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammu- nut	Rakenne vaurioituu		
						100 1/m ²⁾	150 1/m ³⁾	350 1/m ⁴⁾
5	0.5600	1	1	1	0	0	0	0
10	0.9000	1	1	1	0	0	0.002	0.25
15	0.9025	0.9	1	1	0.090250	0.2	0.6	0.89
30	0.9250	1	1	0.89	0.190323	0.95	0.95	0.95
60	0.9250	1	1	0	1	0.95	0.95	0.95
120	0.9250	1	1	0	1	0.95	0.95	0.95

1) Ei sprinklereitä.

2) Vastaa noin 19 minuutin palonkestoa.

3) Vastaa noin 15 minuutin palonkestoa.

4) Vastaa noin 10 minuutin palonkestoa.

Taulukko 16. Liimapuupalkki, pituudet 10 m ja 12 m. Normaali-hidas palonkasvu, $t_0 = 300\text{--}600$ s: rakenteen vaurioitumisen riskianalyysissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina. Oikeanpuoleisimmat sarakkeet ovat syöttötiedot kuvassa 6c esitettyyn tapahtumapuuhun.

T1: päivisin kello 6–14							
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu	
						10 m ²⁾	12 m ³⁾
5	0.979126	0.05	1	1	0.930170	0	0
10	0.997100	0.25	1	1	0.943650	0	0
15	0.999850	0.01	1	1	0.999288	0	0.04
30	1	0.9	1	1	0.999359	0.03	0.10
60	1	1	1	0.35	0.999776	0.30	0.45
120	1	1	1	0	1	0.53	0.61
T2: iltaisin kello 14–22							
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu	
						10 m ²⁾	12 m ³⁾
5	0.006000	0.1	1	1	0.005400	0	0
10	0.512800	0.5	1	1	0.258800	0	0
15	0.928000	0.01	1	1	0.921308	0	0.04
30	0.998000	0.9	1	1	0.928977	0.03	0.10
60	1	1	1	0.35	0.975142	0.30	0.45
120	1	1	1	0	1	0.53	0.61
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin							
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu	
						10 m ²⁾	12 m ³⁾
5	0.006000	1	1	1	0	0	0
10	0.420000	1	1	1	0	0	0
15	0.850000	0.01	1	1	0.841500	0	0.04
30	0.900000	0.9	1	1	0.847350	0.03	0.10
60	0.905000	1	1	0.35	0.946573	0.30	0.45
120	0.905000	1	1	0	1	0.53	0.61

1) Ei sprinklereitä.

2) Palokesto 70 min (normin B10 mukaan).

Taulukko 17. Liimapuupalkki, pituudet 10 m ja 12 m. Nopea palonkasvu, $t_0 = 120\text{--}180$ s: rakenteen vaurioitumisen riskianalyyysissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina. Oikeanpuoleisimmat sarakkeet ovat syöttötiedot kuvassa 6c esitettyyn tapahtumapuuhun.

T1: päivisin kello 6–14							
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu	
						10 m ²⁾	12 m ³⁾
5	0.999560	0.25	1	1	0.749670	0	0
10	0.999998	0.98	1	1	0.749679	0	0
15	1	0.9	1	1	0.774711	0.009	0.061
30	1	1	1	0.89	0.799493	0.08	0.22
60	1	1	1	0	1	0.32	0.40
120	1	1	1	0	1	0.33	0.40
T2: iltaisin kello 14–22							
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu	
						10 m ²⁾	12 m ³⁾
5	0.780000	0.5	1	1	0.390000	0	0
10	0.993000	0.99	1	1	0.392130	0	0
15	0.998000	0.9	1	1	0.452717	0.009	0.061
30	1	1	1	0.89	0.512918	0.08	0.22
60	1	1	1	0	1	0.32	0.40
120	1	1	1	0	1	0.33	0.40
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin							
aika- jakso (min)	Palo havaittu	Käsisam- mutus ei onnistu	Sprinkleri- sammutus ei onnistu ¹⁾	Palo- kuorma ei loppunut	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu	
						10 m ²⁾	12 m ³⁾
5	0.5600	1	1	1	0	0	0
10	0.9000	1	1	1	0	0	0
15	0.9025	0.9	1	1	0.090250	0.009	0.061
30	0.9250	1	1	0.89	0.190323	0.08	0.22
60	0.9250	1	1	0	1	0.32	0.40
120	0.9250	1	1	0	1	0.33	0.40

1) Ei sprinklereitä.

2) Palokesto 70 min (normin B10 mukaan).

11.1.2 Henkilövahinkojen analysoinnin vaatimat tiedot

Henkilövahinkojen syntymisen analysointiin käytetään kuvassa 6b esitettyä tapahtumapuumallia. Tapahtumaketjujen todennäköisyyksien laskemisessa käytetyt todennäköisyydet saadaan yhdistämällä taulukoissa 13–16 esitetyt palon jatkumisen ja rakenteiden vaurioitumisen todennäköisyydet tilan savulla täyttymisen todennäköisyyksiin.

Henkilövahinkojen syntymiseen vaikuttavien tekijöiden tarkastelussa käytetyt todennäköisyysarvot esitetään taulukoissa 17 ja 19 (normaali–hidas palonkasvu, $t_0 = 300\text{--}600$ s) sekä 18 ja 20 (nopea palonkasvu, $t_0 = 120\text{--}180$ s). Taulukoissa olevat todennäköisyysarvot vastaavat vapaasti kehittyviä stokastisia mitoituspaloja aivan kuten edellä rakenteiden vaurioiden tarkastelun yhteydessä. Nämä todennäköisyydet saadaan vastaamaan palon todellista kehitystä ottamalla huomioon palon sammuttamisen (henkilökunta, palokunta, sprinklerit) todennäköisyydet, jotka on myöskin lueteltu taulukoissa.

Henkilöriskien arvioinnissa tarvitaan em. taulukoissa esitettyjen todennäköisyysarvojen lisäksi myös taulukossa 7 esitettyjä rakennuksessa olevien henkilöiden määrän odotusarvoja.

Taulukko 18. Teräspalkki, poikkileikkaustekijät 100, 150 ja 350 m⁻¹. Normaali–hidas palonkasvu, t₀ = 300–600 s: henkilövaurioiden syntymisen riskianalyyysissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina.

T1: päivisin kello 6–14						
aika- jakso (min)	Palo on sammutettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu			Rakennus täyt- tynyt savulla
			F/V 100 1 /m	F/V 150 1 /m	F/V 350 1 /m	
5	0.930170	0.930170	0	0	0	0.000
10	0.943650	0.943650	0	0	0	0.000
15	0.999288	0.999288	0	0	0	0.000
30	0.999359	0.999359	0.20	0.35	0.55	0.072
60	0.999359	0.999776	0.90	0.93	0.93	0.100
120	0.999359	1	0.90	0.93	0.93	0.100
T2: iltaisin kello 14–22						
aika- jakso (min)	Palo on sammutettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu			Rakennus täyt- tynyt savulla
			F/V 100 1 /m	F/V 150 1 /m	F/V 350 1 /m	
5	0.005400	0.005400	0	0	0	0.000
10	0.258800	0.258800	0	0	0	0.000
15	0.921308	0.921308	0	0	0	0.000
30	0.928977	0.928977	0.20	0.35	0.55	0.072
60	0.928977	0.975142	0.90	0.93	0.93	0.100
120	0.928977	1	0.90	0.93	0.93	0.100
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin						
aika- jakso (min)	Palo on sammutettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu			Rakennus täyt- tynyt savulla
			F/V 100 1 /m	F/V 150 1 /m	F/V 350 1 /m	
5	0	0	0	0	0	0.000
10	0	0	0	0	0	0.000
15	0.841500	0.841500	0	0	0	0.000
30	0.847350	0.847350	0.20	0.35	0.55	0.072
60	0.847350	0.946573	0.90	0.93	0.93	0.100
120	0.847350	1	0.90	0.93	0.93	0.100

Taulukko 19. Teräspalkki, poikkileikkaustekijät 100, 150 ja 350 m⁻¹. Nopea palonkasvu, t₀ = 120–180 s: henkilövaurioiden syntymisen riskianalyysissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina.

T1: päivisin kello 6–14						
aika- jakso (min)	Palo on sammuettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu			Rakennus täyt- tynyt savulla
			100 1/m	150 1/m	350 1/m	
5	0.749670	0.749670	0	0	0	0.000
10	0.749679	0.749679	0	0.002	0.25	0.019
15	0.774711	0.774711	0.2	0.6	0.89	0.100
30	0.774711	0.799493	0.95	0.95	0.95	0.100
60	0.774711	1	0.95	0.95	0.95	0.100
120	0.774711	1	0.95	0.95	0.95	0.100
T2: iltaisin kello 14–22						
aika- jakso (min)	Palo on sammuettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu			Rakennus täyt- tynyt savulla
			100 1/m	150 1/m	350 1/m	
5	0.390000	0.390000	0	0	0	0.000
10	0.392130	0.392130	0	0.002	0.25	0.019
15	0.452717	0.452717	0.2	0.6	0.89	0.100
30	0.452717	0.512918	0.95	0.95	0.95	0.100
60	0.452717	1	0.95	0.95	0.95	0.100
120	0.452717	1	0.95	0.95	0.95	0.100
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin						
aika- jakso (min)	Palo on sammuettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu			Rakennus täyt- tynyt savulla
			100 1/m	150 1/m	350 1/m	
5	0	0	0	0	0	0.000
10	0	0	0	0.002	0.25	0.019
15	0.090250	0.090250	0.2	0.6	0.89	0.100
30	0.090250	0.190323	0.95	0.95	0.95	0.100
60	0.090250	1	0.95	0.95	0.95	0.100
120	0.090250	1	0.95	0.95	0.95	0.100

Taulukko 20. Liimapuupalkki, pituudet 10 m ja 12 m. Normaali–hidas palonkasvu, $t_0 = 300\text{--}600$ s: henkilövaurioiden syntymisen riskianalyysissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina.

T1: päivisin kello 6–14					
aika- jakso (min)	Palo on sammuettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		Rakennus täyt- tynyt savulla
			10 m	12 m	
5	0.930170	0.930170	0	0	0.000
10	0.943650	0.943650	0	0	0.000
15	0.999288	0.999288	0	0.04	0.000
30	0.999359	0.999359	0.03	0.10	0.072
60	0.999359	0.999776	0.30	0.45	0.100
120	0.999359	1	0.53	0.61	0.100
T2: iltaisin kello 14–22					
aika- jakso (min)	Palo on sammuettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		Rakennus täyt- tynyt savulla
			10 m	12 m	
5	0.005400	0.005400	0	0	0.000
10	0.258800	0.258800	0	0	0.000
15	0.921308	0.921308	0	0.04	0.000
30	0.928977	0.928977	0.03	0.10	0.072
60	0.928977	0.975142	0.30	0.45	0.100
120	0.928977	1	0.53	0.61	0.100
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin					
aika- jakso (min)	Palo on sammuettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		Rakennus täyt- tynyt savulla
			10 m	12 m	
5	0	0	0	0	0.000
10	0	0	0	0	0.000
15	0.841500	0.841500	0	0.04	0.000
30	0.847350	0.847350	0.03	0.10	0.072
60	0.847350	0.946573	0.30	0.45	0.100
120	0.847350	1	0.53	0.61	0.100

Taulukko 21. Liimapuupalkki, pituudet 10 m ja 12 m. Nopea palonkasvu, $t_0 = 120-180$ s: henkilövaurioiden syntymisen riskianalyyssissä käytetyt todennäköisyydet eri aikajaksoina.

T1: päivisin kello 6–14					
aika- jakso (min)	Palo on sammutettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		Rakennus täyt- tynyt savulla
			10 m	12 m	
5	0.749670	0.749670	0	0	0.000
10	0.749679	0.749679	0	0	0.019
15	0.774711	0.774711	0.009	0.061	0.100
30	0.774711	0.799493	0.08	0.22	0.100
60	0.774711	1	0.32	0.40	0.100
120	0.774711	1	0.33	0.40	0.100
T2: iltaisin kello 14–22					
aika- jakso (min)	Palo on sammutettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		Rakennus täyt- tynyt savulla
			10 m	12 m	
5	0.390000	0.390000	0	0	0.000
10	0.392130	0.392130	0	0	0.019
15	0.452717	0.452717	0.009	0.061	0.100
30	0.452717	0.512918	0.08	0.22	0.100
60	0.452717	1	0.32	0.40	0.100
120	0.452717	1	0.33	0.40	0.100
T3: öisin kello 22–6 ja viikonloppuisin					
aika- jakso (min)	Palo on sammutettu	Palo on sammunut	Rakenne vaurioituu		Rakennus täyt- tynyt savulla
			10 m	12 m	
5	0	0	0	0	0.000
10	0	0	0	0	0.019
15	0.090250	0.090250	0.009	0.061	0.100
30	0.090250	0.190323	0.08	0.22	0.100
60	0.090250	1	0.32	0.40	0.100
120	0.090250	1	0.33	0.40	0.100

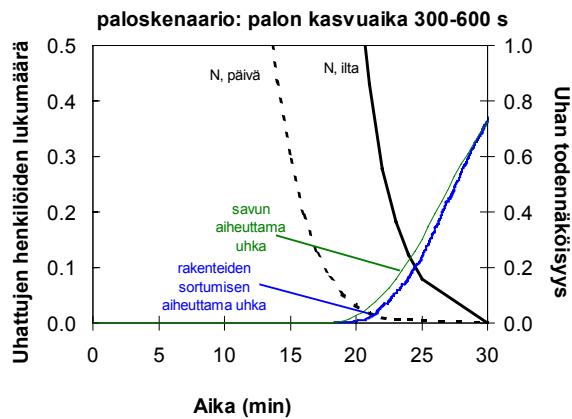
11.2 Riskianalyysin tulokset

Riskianalyysilaskelmien kaikki tulokset esitetään liitteessä G. Tässä kohdassa esitetään yhteenveto oleellisimmista tuloksista.

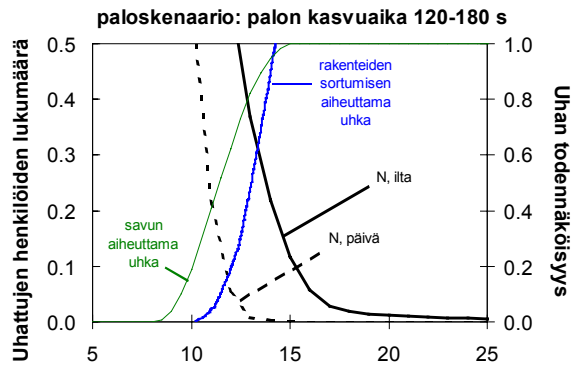
11.2.1 Henkilövahinkojen syntyminen

Henkilövahinkoja syntyy, jos henkilöitä uhkaavat tekijät voivat toteutua sinä aikana, kun rakennuksessa on vielä sisällä ihmisiä. Kuvassa 20 esitetään käyrinä henkilöitä uhkaavat tekijät (savu ja rakenteiden sortuminen) sekä henkilöiden poistuminen. Alueet, jolla käyrät peittävät toisensa, kuvaavat henkilövahinkojen suuruutta. Nähdään, että nopeasti kehittyvässä palossa uhkatekijöiden todennäköisyys on suuri jo selvästi ennen, kuin rakennuksen sisällä olevien henkilöiden määrä laskee nolllaan.

a)



b)



Kuva 20. Henkilövahinkojen syntymisen alkuperä: henkilöitä uhkaavat tekijät voivat toteutua ennen kuin kaikki henkilöt ovat päässeet ulos rakennuksesta. Esimerkki teräspalkista, $F/V = 150 \text{ l/m}$. a) Normaalilla–hitaalla nopeudella kehittyvä palo ja b) nopeasti kehittyvä palo.

Henkilövahinkojen määrän odotusarvot yhtä tulipaloo kohden kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa esitetään taulukossa 21. Taulukossa 22 tarkastellaan eri paloskenaarioiden eroja yhdistämällä eri miehitysvaihtoehdot painotettuna summana, ja taulukossa 23 ovat tarkastelun kohteena eri miehitysvaihtoehtojen erot (eri paloskenaariot on yhdistetty painotettuna summana). Taulukkoon 24 on eri skenaarioiden tulokset yhdistetty arvioksi rakennuksen henkilöriskeistä.

Tuloksista voidaan tehdä seuraavia havaintoja:

- Kuvan 20 avulla voidaan päätellä, että poistumisen tehokkuuden lisääminen on selvästi tehokkaampi tapa vähentää henkilövahinkoja kuin rakennuksen savunpoiston parantaminen. Tämä voidaan päätellä tarkastelemalla henkilövahinkoja edustavaa henkilömäärää ja savullatäyttymiskäyrien rajaamaa pinta-alaa. Savunpoiston parantaminen tekee savulla täyttymistä kuvaavan käyrän nousun loivemmaksi, mutta ei tietyn korkuiselle rakennukselle siirrä käyrää aikasuunnassa. Poistumistehokkuuden lisääminen puolestaan siirtää henkilömääräkäyrää kohti lyhyempiä aikoja. Niinpä tietyllä poistumistehokkuuden arvolla savunpoiston tehokkuuden muutokset muuttavat henkilövahinkoja kuvaavaa pinta-alaa suoraan verrannollisina savunpoiston muutoksiin (pinta-alan korkeus muuttuu), mutta tietyllä savunpoiston tehokkuuden arvolla poistumisen tehokkuuden lisääminen pienentää henkilövahinkoja verrannollisena poistumistehokkuuden muutosten toiseen potenssiin (henkilövahinkoja kuvaavan pinta-alan korkeus ja vaakadimensio pienenevät).
- Kun palo kasvaa normaalilla–hitaalla nopeudella, henkilövahinkojen odotusarvo on ilta-aikaan paljon suurempi kuin päiväsaikaan. Syy tähän on se, että päivällä rakennuksessa on paljon ihmisiä, jotka voivat havaita palon nopeasti, ennen kuin se kasvanut kovinkaan suureksi. Tällöin he saavat palon myös sammumaan varsin suurella todennäköisyydellä eikä palo kasva vaarallisen suureksi kuin hyvin harvoin. Tässä auttaa vielä se, että vaikka sammutus henkilökunnan toimesta epäonnistuisikin, niin palokunnan on varsin helppo sammuttaa hitaasti kasvava palo, koska se on varsin pieni palokunnan saapuessa paikalle.
- Kun palo kasvaa nopeasti, tilanne on aivan toinen: tässä tapauksessa henkilövahinkoja voi syntyä myös päivällä. Nopeasti kehittyvän palon henkilökunta kyllä huomaa hyvin pian, mutta havaittua paloa ei välttämättä pystytä sammuttamaan alkusammutuskalustolla. Sama ongelma koskee palokuntaakin: sen saapuessa paikalle palo voi jo olla kasvanut niin suureksi, ettei sitä saada sammumaan. Illalla rakennuksessa on vähän ihmisiä, ja siksi palon havaitsemisajan odotusarvo on päiväsaikaa pidempi. Koska palo on havaitsemisvaiheessa keskimäärin suurempi kuin päivällä, ovat rakennuksessa olevan muutaman henkilökunnan jäsenen mahdollisuudet sen sammuttamiseen pienet. Aika palon havaitsemisesta siihen, kun palosta on muo-

dostunut vakava uhka hengelle, on illalla lyhyempi kuin päivällä, ja siksi illalla henkilövahingot ovat merkittävän suuret huolimatta varsin pienestä henkilömäärästä.

- Kun halutaan tarkastella rakennuksessa tyypillisesti palavaa paloa, eri paloskenaarioiden riskit pitää yhdistää käyttämällä painokertoimina ko. paloskenaarioiden esiintymistodennäköisyyttä. Tarkastelun kohteeksi valitun palotyypin, eli puisten kuormalavojen tulipalon tapauksessa nopeasti kasvava palo on selvästi epätodennäköisempi palon kehittymistapa kuin normaalilla-hitaalla nopeudella kasvava palo. Taulukoissa 23 ja 24 esitetään, mitkä eri skenaarioiden yhdistämisen tulokset ovat, jos oletetaan, että vain joka sadas palo kehittyy nopeasti. Jos oletettaisiin, että joka kymmenes palo kehittyisi nopeasti, taulukossa 23 annetut arvot kasvaisivat kymmenkertaisiksi ja taulukossa 24 annetut arvot suunnilleen kaksinkertaisiksi.

Taulukko 22. Henkilövahinkojen määrän odotusarvot eri palo- ja miehitysskenaarioissa (vahingoittuneiden henkilöiden lukumäärä yhtä kyseisen palo- ja miehitysskenaarion mukaista tulipaloa kohden).

		Paloskenaariot					
		palon kasvu-aika 300–600 s (painokerroin $W_{P1} = 0.99$)			palon kasvu-aika 120–180 s (painokerroin $W_{P2} = 0.01$)		
Teräspalkki		Miehitysvaihtoehdot			Miehitysvaihtoehdot		
F/V (1/m)	R (min)	T1 ($W_{T1}=0.24$)	T2 ($W_{T2}=0.24$)	T3 ($W_{T3}=0.52$)	T1 ($W_{T1}=0.24$)	T2 ($W_{T2}=0.24$)	T3 ($W_{T3}=0.52$)
100	19	0.000008	0.0074	0	0.084	0.094	0
150	15	0.000008	0.0078	0	0.089	0.122	0
350	10	0.000009	0.0084	0	0.093	0.142	0
Liimapuupalkki		Miehitysvaihtoehdot			Miehitysvaihtoehdot		
pituus (m)	R (min)	T1 ($W_{T1}=0.24$)	T2 ($W_{T2}=0.24$)	T3 ($W_{T3}=0.52$)	T1 ($W_{T1}=0.24$)	T2 ($W_{T2}=0.24$)	T3 ($W_{T3}=0.52$)
10	55	0.000007	0.0070	0	0.081	0.065	0
12	40	0.000008	0.0074	0	0.082	0.071	0

Taulukko 23. Keskimääräiset henkilövahinkojen määrän odotusarvot eri paloskenaarioissa (vahingoittuneiden henkilöiden lukumäärä yhtä nopeasti tai normaalilla-hiitaalla nopeudella kasvavaa tulipaloa kohden).

		Paloskenaariot	
		palon kasvuaika 300–600 s	palon kasvuaika 120–180 s
F/V (1/m)	R (min)	Teräspalkki	
100	19	0.0018	0.043
150	15	0.0019	0.051
350	10	0.0020	0.056
pituus (m)	R (min)	Liimapuupalkki	
10	55	0.0017	0.035
12	40	0.0018	0.037

Taulukko 24. Keskimääräiset henkilövahinkojen määrän odotusarvot eri miehitysskenaarioissa (vahingoittuneiden henkilöiden lukumäärä yhtä päivällä tai illalla tapahtuvaa tulipaloa kohden). Miehitysskenaarioissa T3 rakennuksessa ei ole väkeä eikä henkilövahinkoja siten pysty syntymään.

		Miehitysskenaariot	
		T1	T2
F/V (1/m)	R (min)	Teräspalkki	
100	19	0.00085	0.0083
150	15	0.00090	0.0089
350	10	0.00094	0.0097
pituus (m)	R (min)	Liimapuupalkki	
10	55	0.00082	0.0076
12	40	0.00083	0.0080

Taulukko 25. Keskimääräiset henkilövahinkojen määrän odotusarvot tarkastelussa rakennuksessa, kun siellä palaa puisten kuormalavojen pino (vahingoittuneiden henkilöiden lukumäärä yhtä tulipaloa kohden).

Teräspalkki		
F/V (1/m)	R (min)	
100	19	0.0022
150	15	0.0024
350	10	0.0026
Liimapuupalkki		
pituus (m)	R (min)	
10	55	0.0020
12	40	0.0021

11.2.2 Omaisuusvahinkojen syntyminen

Tässä työssä omaisuusvahinkoja on tarkasteltu vain rakenteiden pettämisestä aiheutuvien vahinkojen kannalta. Tämä lähestymistapa on valittu, koska se on varsin suoraviivainen ja selkeä. Muita omaisuusvahinkojen syntymistapoja, kuten rakennuksen sisällön vahingoittumista, ei tässä työssä ole otettu huomioon. Kun omaisuusvahinkoja tarkastellaan rakenteiden vaurioitumiseen liittyen, niitä syntyy aina, jos palo palaa riittävän pitkän aikaa riittävän voimakkaana, jotta se voi saattaa rakenteet kyvyttömiksi kantamaan kuormaa riittävän hyvin.

Se, onko palo riittävän voimakas tuottamaan rakennevaurioita, otetaan tässä työssä esitetyssä lähestymistavassa huomioon stokastisten mitoituspalojen maksimipalotehojen kautta: koska tarkasteluissa käytetään suurta joukkoa voimakkuudeltaan vaihtelevia paloja, on joukossa sellaisia, jotka eivät tarkastelussa tilassa pysty lämmittämään rakenteita niin paljon, että rakenteet menettäisivät kantokykynsä. Tämä näkyy rakenteiden vaurioitumista kuvaavissa kuvissa 16 ja 17 siten, että vaurioitumistodennäköisyys ei saavuta arvoa 1, vaikka palo saisi palaa vapaasti mielivaltaisen kauan. Se, että jatkuuko tulipalo riittävän kauan, jotta se voisi vaurioittaa rakenteita, määräytyy palon sammutustoimenpiteistä tai mahdollisesta palokuorman palamisesta loppuun (ks. luku 6).

Rakenteen vaurioituminen voi aiheuttaa eriasteisia seuraamuksia. Tässä työssä tätä seikkaa on lähestytty tulipalon laajuuden kautta jakamalla syntyvät vahingot vakaviin ja rajoittuneisiin niiden ulottuvuuden perusteella (ks. luku 10).

Ajasta riippuva tapahtumapuumalli yhdistää edellä mainitut tekijät ja tuottaa arvion rakenteiden vaurioitumiseen perustuville omaisuusvahingoille. Nämä tulokset esitetään taulukoissa 25–29. Taulukossa 25 esitetään kaikkia palo- ja miehitysskenaarioita vastaavat tulokset.

Tuloksista voidaan tehdä seuraavia havaintoja:

- Kun palo kasvaa normaalilla–hitaalla nopeudella, on omaisuusvahinkojen syntymisen todennäköisyys ilta-aikaan sekä öisin ja viikonloppuisin paljon suurempi kuin päiväsaikaan. Syy tähän on se jo edellä mainittu seikka, että päivällä rakennuksessa on paljon ihmisiä, jotka voivat havaita palon nopeasti, ennen kuin se kasvanut kovinkaan suureksi. Omaisuusvahingon todennäköisyys on suurin, kun palo tapahtuu miehittämättöminä aikoina, noin kaksinkertainen ilta-aikoihin verrattuna, jolloin rakennuksessa on muutamia ihmisiä.
- Kun palo kasvaa nopeasti, on vahinkojen syntymisen todennäköisyys merkittävä kaikissa miehitystilanteissa etenkin teräsrakenteilla. Tulokset ennustavat öisin tai viikonloppuisin tapahtuvan palon tuottavan vahinkoja lähes varmasti (todennäköisyys eri teräspalkeille on noin 85–90 %); lähes joka toinen palo tuottaa vakavaksi katsottavia vahinkoja.
- Taulukoissa 28 ja 29 esitetään tarkasteltua tulipaloa vastaavat omaisuusvahinkojen todennäköisyyksien lopputulokset olettaen, että vain joka sadas palo kehittyy nopeasti. Jos oletettaisiin, että joka kymmenes palo kehittyisi nopeasti, taulukossa 29 annetut arvot kasvaisivat suunnilleen kaksinkertaisiksi ja taulukossa 28 annetut arvot kasvaisivat miehitysskenaarion T1 osalta lähes kymmenkertaisiksi, miehitysskenaarion T2 osalta suunnilleen kolminkertaisiksi sekä miehitysskenaarion T3 osalta suunnilleen kaksinkertaisiksi.

Taulukko 26. Omaisuusvahinkojen syntyminen eri miehitysskenaarioissa, kun paloskenaariona on normaalilla–hitaalla nopeudella kehittynvä palo ($t_0 = 300\text{--}600\text{ s}$): vahinkojen todennäköisyydet (kaikki vahingot ja vakavat vahingot) yhtä kyseisen palo- ja miehitysskenaarion mukaista tulipaloa kohden.

Teräspalkki										
F/V (1/m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.0006	0.0002	0.0004	0.0639	0.0166	0.0473	0.1374	0.0357	0.1017
150	15	0.0006	0.0002	0.0004	0.0661	0.0172	0.0489	0.1420	0.0369	0.1051
350	10	0.0006	0.0002	0.0004	0.0661	0.0172	0.0489	0.1420	0.0369	0.1051
Liimapuupalkki										
pituus (m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.0002	0.0001	0.0001	0.0235	0.0061	0.0174	0.0504	0.0131	0.0373
12	40	0.0003	0.0001	0.0002	0.0289	0.0074	0.0215	0.0614	0.0159	0.0455

Taulukko 27. Omaisuusvahinkojen syntyminen eri miehitysskenaarioissa, kun paloskenaariona on nopeasti kehittynvä palo ($t_0 = 120\text{--}180\text{ s}$): vahinkojen todennäköisyydet yhtä kyseisen palo- ja miehitysskenaarion mukaista tulipaloa kohden.

Teräspalkki										
F/V (1/m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.2140	0.1284	0.0856	0.5199	0.3120	0.2079	0.8643	0.5186	0.3457
150	15	0.2141	0.1284	0.0857	0.5200	0.3120	0.2081	0.8644	0.5186	0.3459
350	10	0.2203	0.1284	0.0919	0.5351	0.3120	0.2231	0.8868	0.5186	0.3683
Liimapuupalkki										
pituus (m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.0743	0.0446	0.0297	0.1806	0.1084	0.0722	0.3002	0.1801	0.1201
12	40	0.0901	0.0541	0.0360	0.2189	0.1313	0.0876	0.3639	0.2183	0.1456

Taulukko 28. Omaisuusvahinkojen syntyminen eri paloskenaarioissa (eri miehitysskenaariot yhdistetty): keskimääräiset vahinkojen todennäköisyydet) yhtä kyseisestä paloskenaariota vastaavaa tulipaloa kohden.

		Paloskenaariot					
		palon kasvuaika 300–600 s			palon kasvuaika 120–180 s		
Teräspalkki							
F/V (1/m)	R (min)	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.0869	0.0226	0.0643	0.6256	0.3754	0.2502
150	15	0.0898	0.0234	0.0665	0.6257	0.3754	0.2504
350	10	0.0898	0.0234	0.0665	0.6424	0.3754	0.2671
Liimapuupalkki							
pituus (m)	R (min)	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.0319	0.0083	0.0236	0.2173	0.1304	0.0869
12	40	0.0389	0.0101	0.0289	0.2634	0.1580	0.1054

Taulukko 29. Omaisuusvahinkojen syntyminen eri miehitysskenaarioissa (eri paloskenaariot yhdistetty): keskimääräiset vahinkojen todennäköisyydet) yhtä kyseisestä miehitysskenaariota vastaavana aikana (päivällä, illalla tai yöllä ja viikonloppuisin) tapahtuvaa tulipaloa kohden.

		Miehitysskenaariot								
		T1			T2			T3		
Teräspalkki										
F/V (1/m)	R (min)	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.0027	0.0015	0.0013	0.0685	0.0196	0.0489	0.1447	0.0405	0.1041
150	15	0.0027	0.0015	0.0013	0.0706	0.0201	0.0505	0.1492	0.0417	0.1075
350	10	0.0028	0.0015	0.0013	0.0708	0.0201	0.0506	0.1494	0.0417	0.1077
Liimapuupalkki										
pituus (m)	R (min)	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.0009	0.0005	0.0004	0.0251	0.0071	0.0179	0.0529	0.0148	0.0381
12	40	0.0012	0.0006	0.0006	0.0308	0.0086	0.0222	0.0644	0.0179	0.0465

Taulukko 30. Keskimääräiset omaisuusvahinkojen todennäköisyydet tarkastelussa rakennuksessa, kun siellä palaa puisten kuormalavojen tulipalo.

Teräspalkki				
F/V (1/m)	R (min)	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.092	0.026	0.066
150	15	0.095	0.027	0.068
350	10	0.095	0.027	0.068
Liimapuupalkki				
pituus (m)	R (min)	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.034	0.010	0.024
12	40	0.041	0.012	0.030

12. Riskianalyysin tulosten tarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan lähemmin riskien arvioinnissa saatuja tuloksia joidenkin käytännössä esille tulevien kysymysten kannalta.

12.1 Tietyn palonkestoluokan omaavan rakenteen vaurioitumisriski palonkestoajan puitteissa

Normien mukainen palonkestoaja liittyy standardipalon mukaiseen lämpörasitukseen. Tässä työssä käytetty lämpörasitusmalli pyrkii kuvaamaan tulipalossa tapahtuvaa lämpörasitusta standardipalokäyrää realistisemmin. Huomionarvoinen seikka tässä työssä esitetyssä palonkuvauksessa on se, että palon oletetaan pysyvän paikallisena, mikä suuressa teollisuushallissa on varsin hyvä oletus: hallin lieskahtamisen edellyttämä paloteho on niin suuri, että sen esiintymisen todennäköisyys on häviävän pieni.

12.1.1 Teräspalkki

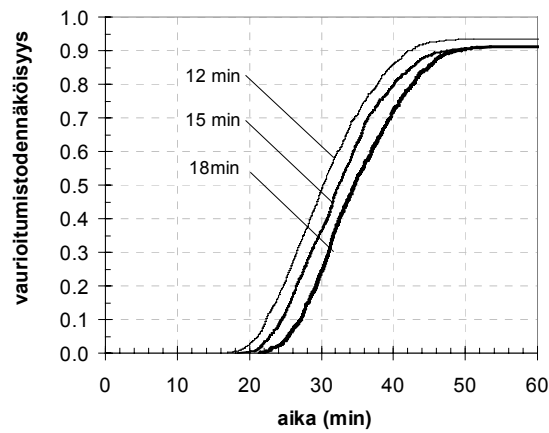
Kuvassa 21 esitetään kolmen eri palonkestoajan omaavan teräspalkin vaurioitumistodennäköisyydet sekä hitaahkosti kasvavassa palossa, kasvuaika 5–10 minuuttia, että nopeasti kasvavassa palossa, kasvuaika 2–3 minuuttia. Tässä työssä tarkastellun palokuorman, tyhjien puisten kuormalavojen, tapauksessa hitaammin kasvava palo on näistä kahdesta selvästi todennäköisempi [Linkova 1999].

Nähdään, että hitaahkosti kasvavassa palossa palkin vaurioitumistodennäköisyys alkaa kasvaa selvästi palkin palonkeston ilmaiseman ajankohdan jälkeen. Esimerkiksi 15 minuutin palonkeston omaavan palkin vaurioitumistodennäköisyys on häviävän pieni aina noin 20 minuuttiin asti, minkä jälkeen se kasvaa siten, että 50 % vaurioitumistodennäköisyys saavutetaan noin 35 minuutin kohdalla.

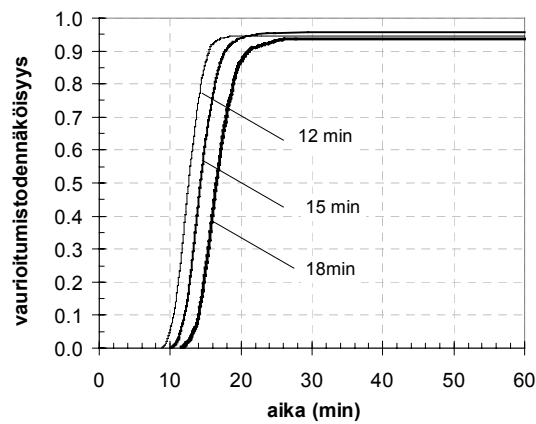
Nopean palonkasvun tapauksessa vaurioitumistodennäköisyydet alkavat kasvaa 0:aa suuremmiksi hieman ennen palkkien palonkeston ilmaisemaa aikaa. Vaurioitumistodennäköisyyden arvo 50 % saavutetaan suunnilleen palkin palonkeston ilmaisemassa ajassa.

Koska hitaahkosti kehittyvä palo on tässä nimenomaisessa tapauksessa todennäköisempi, palkkien voidaan katsoa kestävän palorasitusta pidempään kuin standardin mukainen palonkestoaja ilmaisee.

a)



b)



Kuva 21. Kolmen eri palonkestoluokituksen omaavan teräspalkin vaurioitumisen todennäköisyysjakaumat: a) palon kasvuaika 300–600 s ja b) palon kasvuaika 120–180 s.

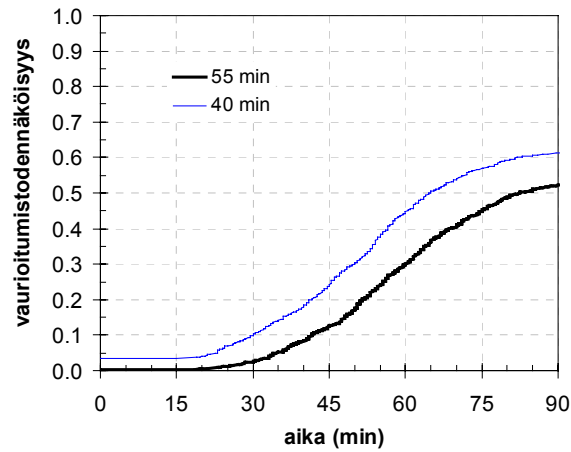
12.1.2 Liimapuupalkki

Kahden eri palonkeston omaavan liimapuupalkin vertailu esitetään kuvassa 22.

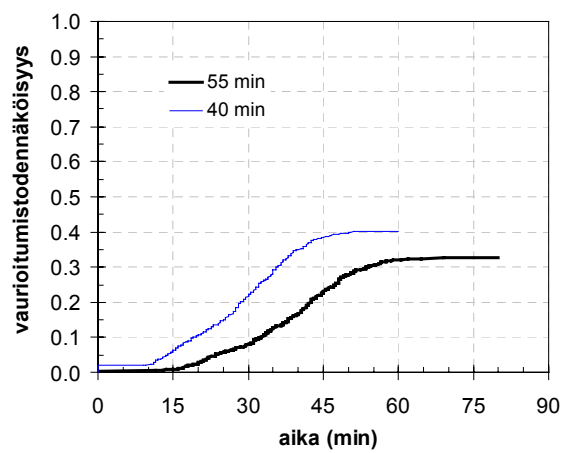
Nähdään, että hitaahkosti kasvavassa palossa liimapuupalkkien palonkeston ilmaisemaa aikaa vastaavalla hetkellä palkkien vaurioitumistodennäköisyydet ovat noin 20–30 %.

Nopean palonkasvun tapauksessa vaurioitumistodennäköisyydet ovat saavuttaneet lähes maksimiarvonsa hetkillä, jotka vastaavat palkkien palonkeston ilmaisemaa aikaa. Tämä maksimiarvo on noin 30–40 %.

a)



b)



Kuva 22. Kahden eri palonkestoluokituksen omaavan puupalkin vaurioitumisen todennäköisyysjakaumat: a) palon kasvuaika 300–600 s ja b) palon kasvuaika 120–180 s.

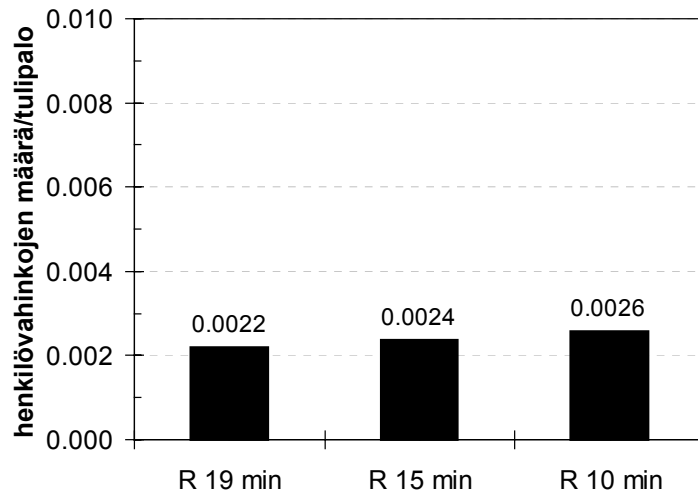
12.2 Rakenteiden palonkeston vaikutus paloriskeihin

Tässä kohdassa tarkastellaan lähemmin eri rakennevaihtoehtojen merkitystä palorisken kannalta.

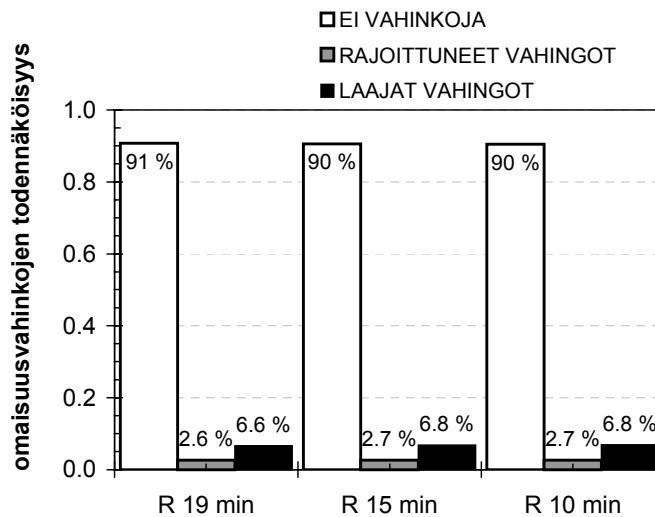
12.2.1 Teräspalkit

Eri teräspalkeille saadut tulokset henkilö- ja omaisuusvahingoille esitetään kuvassa 23.

a)



b)



Kuva 23. Tulipalon seuraamukset kolmelle eri palonkestoluokituksen omaavalle teräspalkille: a) henkilövahinkojen odotusarvo yhtä tulipaloa kohden ja b) omaisuusvahinkojen syntymisen todennäköisyys.

Havaitaan, että kyseisessä teollisuusrakennuksessa teräspalkin palonluokituksen parantaminen vähentää henkilövahinkojen määrää vain vähän. Palkin paloluokituksen pieni vaikutus henkilöriskeihin selittyy sillä, että rakenteisiin syntyy vakavia vaurioita vasta 30 minuutin jälkeen palon alusta (ks. liite G), jos palon kasvunopeus on normaali-hidas. Tässä vaiheessa rakennus on jo täytynyt savulla (jos savunpoistoluukut eivät toimi) ja suurin osa henkilöistä on poistunut rakennuksesta.

Myöskään omaisuusvahinkojen syntymisen todennäköisyyteen teräspalkin paloluokitus ei vaikuta oleellisesti.

Sitä, onko rakenteen paloluokituksen vaikutus henkilöturvallisuuteen merkittävä, voidaan arvioida tuloksia vastaavien absoluuttisen henkilövahinkomäärien perusteella seuraavasti. Suomessa teollisuusrakennuksien tulipalojen syttymistäajuus on noin $1.4 \cdot 10^{-2}$ tulipaloo/vuosi/rakennus [Rahikainen 1998, s. 42]. Teräspalkille R15 saatu henkilövahinkojen odotusarvo 0.0024 henkilövahinkoa/tulipalo vastaa siten $3.4 \cdot 10^{-5}$ henkilövahinkoa/vuosi/rakennus. Jos oletetaan tarkastellun rakennuksen edustavan keskimääräisesti ottaen Suomen n. 30 000 teollisuusrakennusta, niin saadaan arvio, että vuodessa teollisuusrakennusten tulipaloissa syntyisi noin yksi henkilövahinko. Rakenteen vaikutuksen suuruutta henkilövahinkojen määrään voidaan arvioida vastaavasti. Kuvasta 23 nähdään, että paloluokkien R19 ja R10 erotus, 0,0004 vahinkoa/tulipalo, vastaa vain noin 0,17 henkilövahinkoa/vuosi, eli ko. palonkestomuutos vastaa siis yhtä lisähenkilövahinkoa noin kuudessa vuodessa.

Näiden henkilövahinkoriskien merkittävyys riippuu siitä, mikä osuus henkilövahingoista vastaa palokuolemia. Palokuolemien osuutta kaikista henkilövahingoista voidaan arvioida kvantitatiivisesti Yhdysvalloissa kerättyjen tilastotietojen perusteella (Karter 2000). Näiden tietojen mukaan asuinrakennuksissa 15 % kaikista henkilövahingoista on palokuolemia, ja muissa kuin asuinrakennuksissa palokuolemien osuus henkilövahingoista on n. 4 %. Näistä luvuista huomautetaan niiden edustavan palokuolemien osuuden yläarvioita, koska loukkaantumisten osuus on ilmeisesti liian pieni, sillä artikkelin mukaan suurin osa loukkaantuneista jää kirjaamatta (tilastoihin kirjattu luku vastaa sairaalaan vietyjä uhreja, jolloin luvusta puuttuu esim. loukkaantuneiden lukumäärä pienissä paloissa, joista ei tule ilmoitusta palokunnalle, ja ne loukkaantuneet, joita palomiehet eivät ole huomanneet).

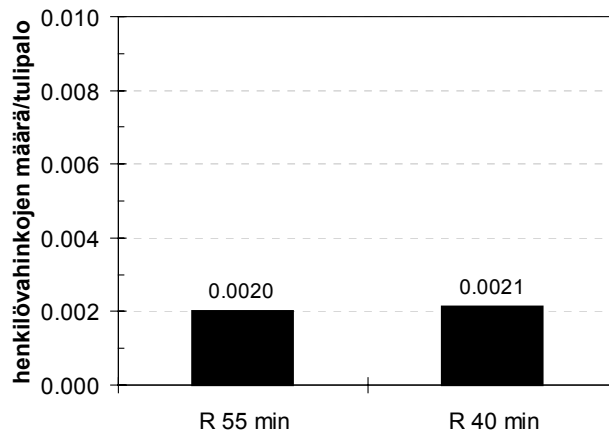
Edellä esitettyjen tietojen mukaan teollisuusrakennuksessa voidaan palokuolemien osuuden olevan siis enintään noin 4 % henkilövahingoista. Täten palonkeston 10 minuuttia omaavalle teräsrakenteelle lasketun henkilöriskiarvion, 1 henkilövahinko/vuosi, voidaan arvioida vastaavan 0,04 palokuolemaa/vuosi eli 1 palokuolema 25 vuodessa. Erotukseksi palonkeston 15 tai 20 minuuttia omaaville rakenteille ja 10 minuutin palonkeston omaavalle rakenteelle saatiin arvo 0.17 henkilövahinkoa/vuosi, joka palokuolemina vastaa siis noin 0.0068 palokuolemaa/vuosi tai yhtä palokuolemaa 150 vuotta kohden. Tämä on hyvin pieni ero verrattuna monen muun paloturvallisuuden vaikuttavan tekijän vaikutukseen (ks. kohta 12.3). Tulosten valossa teräsrakenteiden palonkeston parantaminen esim. tekijällä 2 ei välttämättä tuota vastaavaa vähennystä paloriskeihin, vaan paloturvallisuuden taso voi pysyä oleellisesti muuttumattomana.

12.2.2 Liimapuupalkit

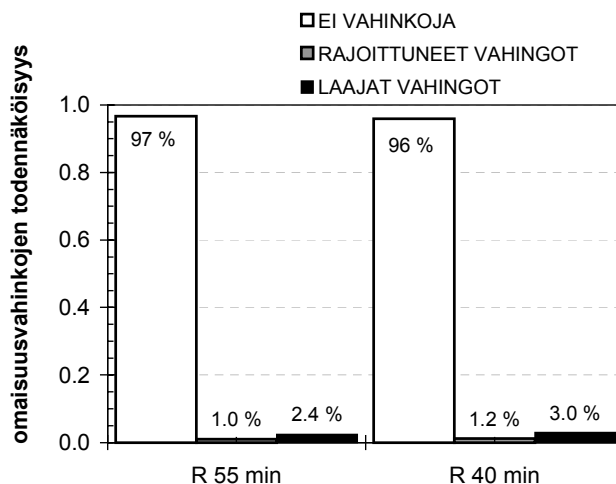
Liimapuupalkille saadut tulokset henkilö- ja omaisuusvahingoille (kuva 24) ovat samanlaiset kuin teräspalkille saadut tulokset: kummankaan vahinkotyyppin, henkilö- tai omaisuusvahinkojen riskit eivät muutu, jos rakenteiden palonkestoa parannetaan 40 minuutista 50 minuuttiin.

Absoluuttisiksi arvoiksi muunnettuna tarkasteltuihin liimapuupalkkeihin liittyvät henkilövahinkoriskit ovat samat kuin teräsrakenteille. Koska näiden rakenteiden palonkestojat ovat kuitenkin hyvin erilaiset, teräsrakenteiden 10–20 minuuttia ja puurakenteen 40–55 min, tämän tuloksen voidaan katsoa heijastelevan sitä, että tarkastellun teollisuusrakennuksen paloriskien pääasialliset syyt eivät liity rakenteiden palonkestoon.

a)



b)



Kuva 24. Tulipalon seuraamukset kahdelle eri palonkestoluokituksen omaavalle liimapuupalkille: a) henkilövahinkojen odotusarvo yhtä tulipaloa kohden ja b) omaisuusvahinkojen syntymisen todennäköisyys.

12.3 Rakennuksen paloturvallisuusvarusteiden vaikutus paloriskeihin

Jotta voitaisiin verrata rakenteiden vaikutusta rakennuksen paloriskeihin muiden paloturvallisuuteen vaikutuksiin, tutkittiin myös erilaisten paloturvallisuusvarusteiden vaikutusta tarkasteltavan teollisuusrakennuksen tulipaloriskeihin. Tarkasteltavaksi otettiin neljä eri vaihtoehtoa, jotka poikkeavat toisistaan automaattisen hälytyksen, alkusammutuskaluston ja savunpoistoluukkujen osalta. Sprinklereiden vaikutusta ei tarkasteltu. Kutakin neljää paloturvallisuusvarusteiden vaihtoehtoa (D1, D2, D3, D5) tarkastellaan eri vuorokauden aikoina (T1, T2, T3) ja eri rakennevaihtoehdoille (teräspalkit F/V 100, 150, 350 1/m ja liimapuupalkit 10 m, 12 m).

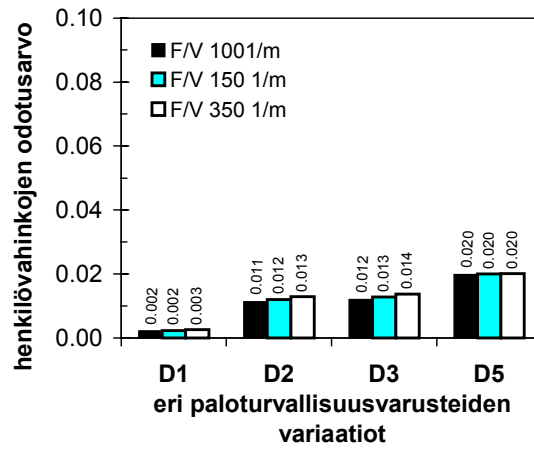
Tarkastellut paloturvallisuusvarusteiden vaihtoehdot ovat (ks. myös vaihtoehtoja havainnollistava taulukko 30):

- D1: Tässä työssä käsitelty esimerkkitapaus: Rakennukseen on asennettu automaattinen palohälytin-järjestelmä, käsisammuttimet ja savunpoistoluukut, E2:n paloturvallisuustaso 2.
- D2: Kuten yllä oleva esimerkkitapaus, mutta automaattista hälytysjärjestelmää ei ole asennettu, E2:n paloturvallisuustaso 1.
- D3: Kuten D1, mutta ei automaattista hälytysjärjestelmää eikä käsisammuttimia. Tämä vaihtoehto ei ole sallittu E2:n mukaan.
- D5: Kuten D1, mutta ei savunpoistosysteemiä, E2:n paloturvallisuustaso 2.

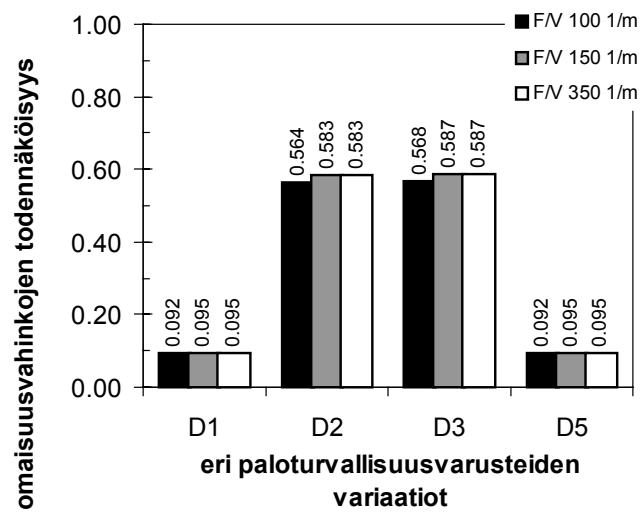
Taulukko 31. Tarkastellut paloturvallisuusvarusteiden vaihtoehdot.

	Automaattinen hälytys	Käsisammutuslaitteet	Savunpoisto	E2-paloturvallisuustaso
D1	ON	ON	ON	2
D2	–	ON	ON	1
D3	–	–	ON	ei sallittu
D5	ON	ON	–	2

a)

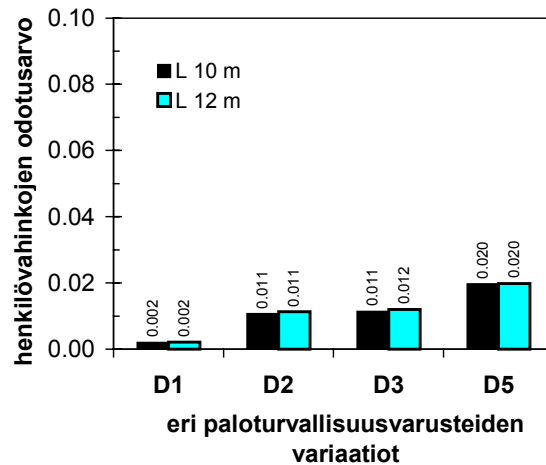


b)

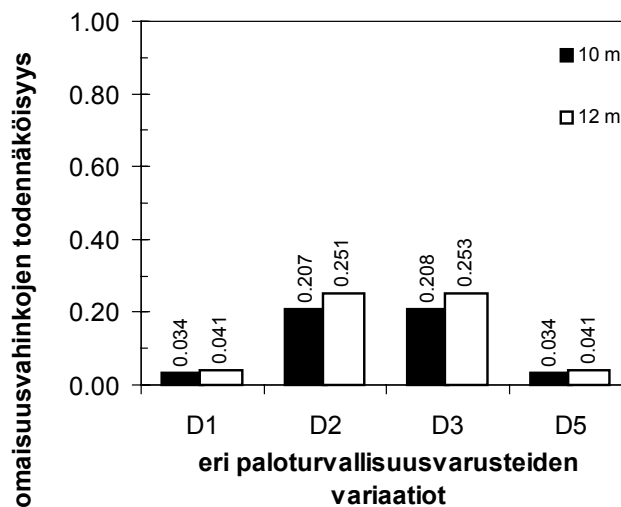


Kuva 25. Teräsrakenteet: a) henkilövahinkojen odotusarvot ja b) omaisuusvahinkojen todennäköisyydet eri rakenne- ja paloturvallisuusvaihtoehdoille.

a)



b)



Kuva 26. Puurakenteet: a) henkilövahinkojen odotusarvot ja b) omaisuusvahinkojen todennäköisyydet eri rakenne- ja paloturvallisuusvaihtoehdoille.

Teollisuusrakennuksen eri paloturvallisuusvarusteluja vastaavat henkilö- ja omaisuusvahinkoriskit teräsrakenteiselle ratkaisulle esitetään kuvassa 25 ja puurakennerratkaisulle kuvassa 26.²

Nähdään, että omaisuusvahinkojen vähentämisen suhteen automaattinen hälytyslaitteisto on oleellisin tekijä: jos se puuttuu (vaihtoehdot D2 ja D3), niin omaisuusvahinkojen todennäköisyys miltei kuusinkertaistuu verrattuna vaihtoehtoihin, joissa on automaattinen hälytys (D1 ja D5).

² Yksityiskohtaiset tulokset esitetään liitteessä H.

Henkilövahinkojen syntymisen suhteen savunpoistolla on suuri merkitys: vaihtoehdossa D5, jossa savunpoistojärjestelmä puuttuu, henkilövahinkojen odotusarvot ovat noin kymmenkertaiset verrattuna vaihtoehtoon D1 ja noin kaksinkertaiset vaihtoehtoihin D2 ja D3 verrattuina.

Vaihtoehtojen D1 ja D5 tulosten perusteella voidaan arvioida, miten pieni muutos savunpoiston luotettavuudessa muuttaa rakennuksen paloturvallisuutta. Vaihtoehdossa D1 savunpoistolle oletettiin 90 %:n luotettavuus. Jos tämä luotettavuus putoaa jostain syystä 10 % verran (esim. sen takia, että savunpoistoluukut jumittuvat katolta huolimattomasti luodun lumen takia), niin tällöin vaihtoehdon D1 henkilöriskit kasvavat arvoon $90 \% \times 0.0022 + 10 \% \times 0.02 = 0.004$, eli kaksinkertaistuvat. Tämän muutoksen aiheuttama riskien kasvu ($0.002 \rightarrow 0.004$) on selvästi suurempi kuin vaikutus ($0.0022 \rightarrow 0.0026$), joka seuraa teräsrakenteen palonkeston puolittamisesta (muutos 19 minuutista 10 minuuttiin).

Kuten edellä kohdassa 11.2.1 on esitetty, henkilöiden poistumisnopeuden muuttuminen vaikuttaa henkilövahinkojen syntymiseen enemmän kuin savunpoiston muutokset.

13. Yhteenveto

Tässä työssä on kehitetty aivan uusi paloriskien arvioimismenetelmä, joka ottaa huomioon tulipalon kehittymisen eri vaiheet. Menetelmää on sovellettu paloriskien arvioimiseen yksikerroksisessa teollisuushallissa, jossa tilan suuren koon vuoksi voidaan olettaa palon pysyvän paikallisena. Tarkastelussa on otettu huomioon sekä henkilö- että omaisuusriskit. Tarkastelun kohteena on se, miten rakenteiden paloluokka vaikuttaa näihin riskeihin.

Menetelmä edustaa aivan uutta tapaa arvioida paloriskejä. Sen erityinen uusi piirre on se, että palon kehittyminen ajan mukana otetaan huomioon kaikissa tarkastelusysteemin tapahtumien ja prosessien kuvaamisessa. Koska tulipalon kehittyminen kuvataan käyttäen apuna tapahtumapuuta eri ajanhetkinä mahdollisten tapahtumakulkujen kuvaamiseen, voidaan menetelmää luonnehtia nimityksellä ”ajasta riippuva tapahtumapuumalli”. Tapahtumapuut luovat kuitenkin vain staattisen kehyksen palon kehityksen kuvaamiselle. Varsinainen aikakehityksen simulointi suoritetaan käsittelemällä systeemiä Markovin prosessina. Myös Monte Carlo -simulointitekniikan laaja käyttö eri prosessien vaihtelevuuden kuvaamisessa edustaa uutta lähestymistapaa paloteknisessä laskennassa. Tämän on mahdollistanut aivan viime vuosina tapahtunut mikrotietokoneiden laskentakapasiteetin ja -nopeuden huima kasvu. Koko systeemin kuvauksen perustan onkin Monte Carlo -menetelmää apuna käyttäen luotu stokastinen mitoituspalo.

Tässä työssä menetelmää on käytetty olemassa olevan rakennuksen paloturvallisuuden analysoinnissa. Menetelmä käyttäen voidaan kuvata, miten rakennus ja paloturvallisuussysteemit toimivat palon aikana; sen luonnollinen viitekehys onkin toiminnallinen paloturvallisuuden lähestymistapa.

Tutkimus osoitti, että tarkastellut muutokset rakenteiden paloluokissa eivät vaikuttaneet käytännöllisesti katsoen lainkaan omaisuusriskeihin. Liimapuurakenteiden tapauksessa palonkeston kasvattaminen 40 minuutista 55 minuuttiin ei vaikuttanut lainkaan henkilövahinkoriskeihin. Teräsrakenteiden tapauksessa havaittiin henkilövahinkojen riskeissä vähäinen nousu, kun rakenteen palonkesto väheni 15 minuutista 10 minuuttiin. Rakenteille, joiden palonkesto oli 20 minuuttia, henkilövahinkojen riski oli samansuuruinen kuin 15 minuutin rakenteille. Kun 15 minuutin ja 10 minuutin rakenteiden välinen henkilöriskien kasvu tulkitaan vuotuisina palokuolemien määränä, nähdään, että nousu on merkityksettömän pieni etenkin, kun sitä verrataan muiden paloturvallisuuteen vaikuttavien tekijöiden merkitykseen.

Menetelmä on kehitetty erityisesti rakenteita koskevien palosäädösten vaikutusten arviointiin ja mahdollisten muutostarpeiden esilletuomiseen. Tähän tarkoitukseen sitä tullaan käyttämään laajasti ECSC:n rahoittamassa hankkeessa ”Risk-Based Fire Resistance Requirements” (RISK REI). Tähän työhön liittyen mallia tullaan kehittämään tässä raportissa esitettyä versiota monipuolisemmaksi.

Loppusanat

Tässä työssä kehitetty riskien arvioimismalli tarjoaa menetelmän tulipalon aiheuttamien riskien arvioimiseen rakennuksen paloteknisen toiminnan perusteella. Mallissa tiedot rakennuksen paloturvallisuusratkaisuksista ja sen muusta toiminnasta sekä palokunnan sammutustoimien onnistumismahdollisuuksista yhdistetään palotekniikan, tilastotieteen ja systeemianalyysin tarjoamien keinojen avulla kuvaukseksi tapahtumien ja prosessien kehittämisestä palon aikana. Mallin tuottamat tulokset käsittävät riskiarvioiden lisäksi kuvauksen koko systeemin toiminnasta palossa (milloin ja miten palo havaitaan, miten sammuttaminen alkaa ja milloin se tulee vaikeaksi tai mahdottomaksi palon koon vuoksi, jne.).

Mallia voidaankin pitää tulipalon etenemistä kuvaavana mallina, joka tuottaa lopputuloksenaan tiedon paloriskeistä. Verrattuna yksittäisiä palon aikaisia tapahtumia (paloilmoittimien toiminta, tilan täyttyminen savulla, jne.) kuvaaviin malleihin tässä työssä kehitetty malli on metamalli, joka yksittäisten tapahtumien ja prosessien sijasta kuvaa koko tulipaloa. On selvää, että toiminnallisen lähestymistavan käytössä paloturvallisuuden arvioinnissa ja toteuttamisessa tarvitaan juuri tällaisia metamalleja. Tätä taustaa vasten katsottuna mallin voidaankin katsoa edustavan merkittävää edistysaskelta toiminnallisen paloajattelun ja yleensä palotekniikan alalla.

Mallia käyttäen saadut tulokset osoittavat, että ainakin esimerkkitapauksena tarkastellun teollisuushallin paloriskit eivät oleellisesti muutu rakenteiden palonkeston muuttuessa. Tämän tuloksen valossa näyttää selvästi, että epäilyt siitä, ovatko palonkestovaatimukset kohdallaan kaikkien rakennusten ja rakenteiden kannalta, ovat perusteltuja.

Lähdeluettelo

Babrauskas, V. 1995. Burning Rates. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Dinunno, P. J. (toim). 2. p. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3–1. ISBN 0-87765-354-2

Baroudi, D. 1994. Application of the finite element method to the Stefan problem in 1-D. Proceedings of the 5th Finnish Mechanics Days. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, matematiikan osasto. S. 159–166. (Report 3/1994.) ISBN 951-34-0284-3

Beck, V. 1998. CESARE-RISK: A tool for performance-based fire engineering design, In: Proc. 1998 Pacific Rim Conference and Second International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods. May 3–9, 1998, Maui, Hawaii. International Code Council & Society of Fire Protection Engineers. S. 441–452.

Drysdale, D. 1985. An Introduction to Fire Dynamics. Chichester: John Wiley & Sons. 424 s.

Fitzgerald, R. 1986. Risk analysis using the engineering method for building fire safety. In: Grant, C. E. and Pagni, P. J. (ed). Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Gaithersburg, MD, USA, 7–11 October 1985, Hemisphere, Washington DC, USA. S. 993–1002.

Franssen, J.-M. 1998. Contributions a la modelisation des incendies dans les batiments et de leurs effets sur les structures. Universite de Liege, Faculte des Sciences Appliquees. 1997–1998.(in French).

Fraser-Mitchell, J. N. 1994. An object-oriented simulation (CRISP II) for fire risk assessment. In: IAFFS Proceeding of 4th International conference on fire safety science, 1994. S. 793–804.

Hakanen, V. 1999. Poistumisturvallisuus teräsrakenteisessa teollisuushallissa. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 74 s. + liitt. 71 s.

Hasemi Y, Yokobayashi S., Wakamatsu, T. & Ptchelintsev, A.V. 1995. Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire. ASIAFLAM 95. Hong Kong 1995.

Hoffman, R. 1995. RISK – Program Version 2.0. Institute of Safety & Security, Switzerland.

Hognon, B. & Zini, M. 1991. A probabilistic approach to the analysis of fire safety of hotels: MOCASSIN. In: Cox, G. & Langford, B. (eds.). *Fire Safety Science – Proceedings of the Third International Symposium*, 8–12 July 1991, Edinburgh, Scotland, United Kingdom. S. 505–513.

Holm, C. & Kallioniemi, P. 1980. *Kantavien puurakenteiden palonkestävyys*. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Palotekniikan laboratorio, Tiedonanto 21. 116 s. + liitt. 16 s. ISBN 951-38-0984-6

Karter, M. J. 2000 United States Fire Loss Report. *NFPA Journal*, Sep/Oct 2000, s. 81–87.

Keski-Rahkonen, O. 1996. Design fire construction for individual assessment. In: Twilt, L. (ed.). *Proc. of 3rd CIB/W14 Workshop "Modelling"*. Rijswijk, The Netherlands, 25–26 January 1993. Rijswijk, NL: TNO Building and Construction. S. 43–48. (96–CVB–R0365)

Krasner, L. M. 1968. *Burning Characteristics of Wooden Pallets as a Test Fuel*. Norwood, MA: Factory Mutual Engineering Assn. (Serial 16437.)

Linkova, P. 1999. *Palotehokäyrien aikavakioiden määrittäminen*. Diplomityö, TKK Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto.

Magnusson, S. E, Frantzich, H. & Harada, K. 1995. *Fire Safety Design Based on Calculations. Uncertainty Analysis and Safety Verification*. Lund: Lund University. 128 s. (Report 3078) ISSN 1102-8246

Myllymäki, J. & Kokkala, M. 2000. Thermal Exposure to a High Welded I-Beam above a Pool Fire. Toim. Franssen, J.-M. *Structures in fire: proceedings of the first international workshop*. Copenhagen, Denmark, 19–20 June 2000. Liege, Belgium: University of Liege. S. 211–224.

Nelson, H. E. & MacLennan, H. A. 1995. *Emergency Movement*. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. S. 3–286. ISBN 0-87765-354-2

Paavilainen, A. 1996. *Teollisuusrakennuksen palonkestoajatähtäytymisen täytyminen käytettäessä kantavana rakenteen palosuojaamatonta terästä*. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 110 s. + liitt. 23 s.

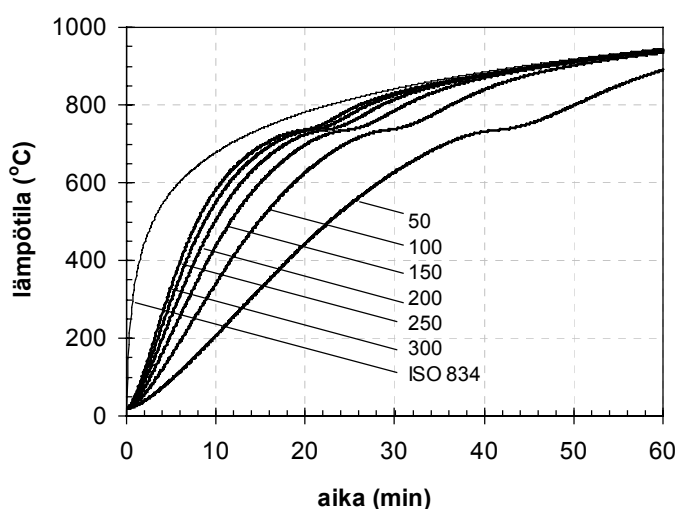
Rahikainen, J. 1998. *Palotilastojen analysointi toiminnallisten palosäädösten pohjaksi*. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 111 s. + liitt. 79 s. (VTT Tiedotteita 1892).

SIA Documentation 81. 1996. Fire Hazard Rating Method of Calculation. Zürich, Switzerland, SIA Swiss Federation of Engineers and Architects, 1996. 33 s. + liitt.

Yung, D., Hadjisophocleous, G. V. & Proulx, G. 1997. Case study: The use of FiRE-CAM™ to identify cost-effective fire safety design options for a large 4-storey office building. In: Lund, P. E. (ed.). 1996 Intl. Conf. on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods – Proceedings, Ottawa 24–26 September 1996. Society of Fire Protection Engineers, 1997. S. 269–280.

Liite A: Teräspalkin palonkestoluokan ja poikkileikkaustekijän suhde kriittisen lämpötilan vaurioitumistavan puitteissa

Eri poikkileikkaustekijöitä F/V vastaaville teräspalkeille voidaan laskea laskennalliset palonkestoluokitukset käyttäen hyväksi Eurokoodin tai normin B7 laskentakaavoja teräksen lämpenemiselle. Kuvassa A1 esitetään normien mukaan laskettuja lämpötilojen kehittymiskäyriä eri poikkileikkaustekijän arvoille.

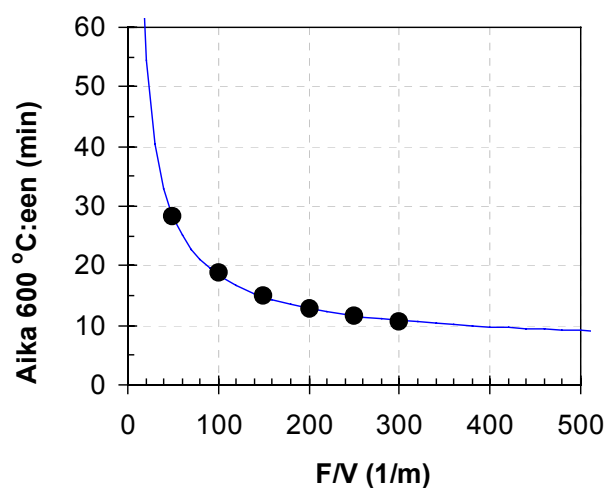


Kuva A1. Normien mukaan lasketut teräksen lämpötilat eri poikkileikkaustekijän arvoille.

Tässä työssä käytettyä vaurioitumiskriteeriä eli teräksen lämpötilan nousua 600 °C:seen vastaavat ajat ovat tulkittavissa kyseisten palkkien laskennallisiksi palonkestoajoiksi. Ne saadaan kuvasta A1 lukemalla eri poikkileikkaustekijöitä vastaavilta käyryltä 600 °C:n lämpötila-arvoa vastaava aika. Poikkileikkaustekijöitä $F/V = 50 \text{ m}^{-1}$, 100 m^{-1} , 150 m^{-1} , 200 m^{-1} , 250 m^{-1} ja 300 m^{-1} vastaavat palonkestoajat esitetään taulukossa A1. Taulukossa annettujen poikkileikkaustekijöiden välillä olevia palonkestoarvoja voidaan määrittää interpoloimalla kuvan A2 graafisen esityksen avulla. Nähdään, että esim. 10 minuutin aikaa vastaa palkki, jonka F/V-arvo on noin 350 m^{-1} .

Taulukko A1. Poikkileikkaustekijöitä $F/V = 50 \text{ m}^{-1}$, 100 m^{-1} , 150 m^{-1} , 200 m^{-1} , 250 m^{-1} ja 300 m^{-1} vastaavat palonkestoajat (pyöristettyinä lähimpään tasaminuuttiin) tässä työssä käytetyn vaurioitumistavan puitteissa.

Poikkileikkaustekijä F/V (m ⁻¹)	50	100	150	200	250	300
Palonkesto aika (min)	28	18	15	13	12	11



Kuva A2. Ajat, jotka kuluvat teräksen lämpötilan nousemiseen vaurioitumiskriteerilämpötilaan 600 °C eri poikkileikkaustekijän arvoille. Yhtenäinen käyrä kuvaa pisteiden kehitystrendiä. Sen tarkoitus on auttaa pisteiden välisten aika-arvojen määrittämistä interpoloimalla.

Liite B: Monte Carlo -simulointitekniikka

Monte Carlo -simulointi³ on suoraviivainen tekniikka laskea tarkastelun kohteena olevien suureiden epävarmuuksia. Sitä käyttäen saadaan laskettua myös approksimaatio tarkastelusuureen arvojen todennäköisyyden kertymäfunktiolle.

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

$$p_A^{\text{true}} = \frac{N_A}{N}, \text{ kun } N \rightarrow \infty \quad (\text{klassinen todennäköisyys}). \quad (\text{B1})$$

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

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

$$p_A^{\text{MC}} \approx \frac{N_A}{N} \quad (\text{Monte - Carlo - likiarvo}). \quad (\text{B2})$$

³ Nimityksellä Monte Carlo ei sinänsä ole mitään erityistarkoitusta. Se on saanut alkunsa ydinaseiden kehitystyön koodinimityksestä Los Alamosin laboratoriosta toisen maailmansodan aikana ja viittaa toisaalta myös tunnettuun pelikasinoon, jossa käsitellään riskejä [Haldar ja Mahakevan 2000, s. 251]. Sana simulointi tarkoittaa menetelmää, jolla tutkimustarkoituksessa jäljitellään jotakin tapahtumaa. Tässä on kyse nimenomaan laskennallisesta menetelmästä.

Monte Carlo -laskennan antama likiarvo paranee laskentatulosten (eli numeeristen koe- tulosten) lukumäärän N kasvaessa. Todennäköisysestimaatin p_A^{MC} suhteellinen epä- varmuus riippuu lukumäärästä N ja tarkasteltavan tapahtuman todellisesta todennäköi- syydestä p_A^{true} (joka eksakti arvo yleensä on tuntematon) seuraavasti [Haldar ja Maha- kevan 2000, s. 259]

$$\varepsilon(N, p_A^{\text{true}}) = \frac{p_A - p_A^{\text{true}}}{p_A^{\text{true}}} = 200\% \times \sqrt{\frac{(1 - p_A^{\text{true}})}{N \cdot p_A^{\text{true}}}}. \quad (\text{B3})$$

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

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

Tietyn satunnaismuuttujan Monte Carlo -käsittely tehdään teknisesti kyseisen muuttujan jakauman käänteisfunktioita käyttäen. Satunnaismuuttujan X kertymäfunktio $F_X(x)$ kuva- vaa satunnaismuuttujan arvot x niitä vastaaviksi todennäköisyydeksi; se saa arvoja vä- liltä 0–1. Myös tietokoneilla muodostettavat satunnaisluvut u_i saavat arvoja välillä 0–1. Ne ovat tasajakautuneita. Jos nämä satunnaisluvut kuvataan kertymäfunktion käänteis- funktiolla F_X^{-1} , saadaan kutakin arvottua satunnaislukua vastaamaan tietty satunnaismuuttujan X arvo $x_i = F_X^{-1}(u_i)$. Satunnaismuuttujan ominaisuudet saadaan siis liitettyä tietokoneen tuottamiin satunnaisesti valittuihin lukuihin kuvauksella F_X^{-1} . Kuva A1 ha- vainnollistaa tätä Monte Carlo -simuloinnin peruskonseptia.

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

$$F_X(x) = P(X \leq x). \quad (\text{B4})$$

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

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \varphi(s) ds = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}s^2\right) ds \equiv \Phi(x). \quad (\text{B5})$$

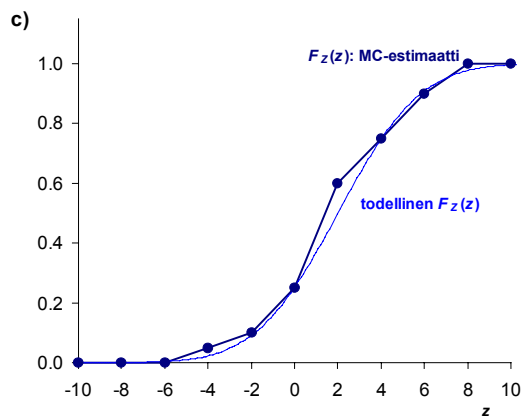
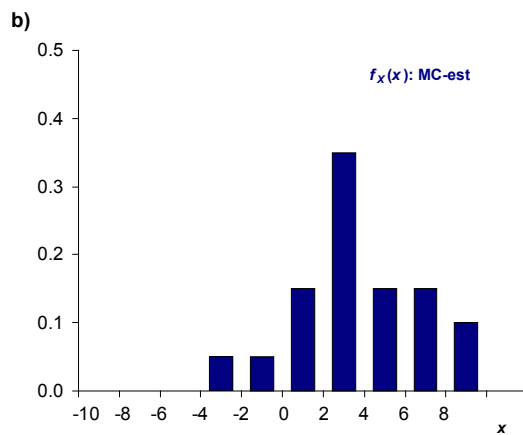
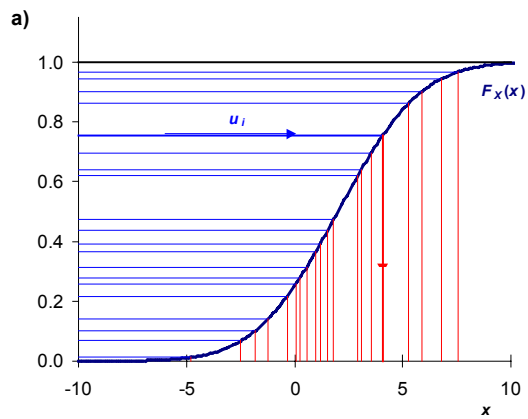
Monte Carlo -simuloinnissa kertymäfunktion estimaatti $F_X^{\text{MC}}(x)$ muodostetaan laskennan antamista tuloksista, lukuarvot x_i ($i = 1, \dots, N$), määritelmän (B4) ja käytännön laskutapaa esittävän esimerkin (B5) mukaisesti seuraavasti:

$$F_X^{\text{MC}}(x_i) = P(X \leq x_i) \approx \frac{\sum_{y \leq x_i} N_y}{N}, \quad (\text{B6})$$

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

Jos käytettävissä on automaattinen työkalu histogrammien tekemiseen, kertymäfunktion muodostaminen käy helposti myös laskemalla kumuloitu summa todennäköisyystiheysfunktioista. Monte Carlo -estimaatti tiheysfunktiolle, $f_X^{\text{MC}}(x)$, saadaan muodostamalla suhteellisia osuuksia esittävä histogrammi laskentakertojen tuloksista. Tätä menettelyä havainnollistaa kuva B1. Kuvaa laskettaessa on käytetty 20 laskentakertaa, ja siksi kertymäfunktion Monte Carlo -estimaatti paikoin poikkeaa todellisesta (alkuperäisestä) todennäköisyysjakaumasta.

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



Kuva B1. a) Satunnaismuuttujan arvojen x_i tuottaminen tasajakautuneista satunnaisluvuista u_i käyttäen satunnaismuuttujan X kertymäfunktion $F_X(x)$ käänteiskuvausta F_X^{-1} . b) Todennäköisyystiheysfunktion estimaatin $f_X^{\text{MC}}(x)$ muodostaminen histogrammina laskentakertojen tuloksista. c) Kertymäfunktion Monte Carlo -estimaatti $F_X^{\text{MC}}(x)$ muodostettuna tiheysfunktion $f_X^{\text{MC}}(x)$ kumuloituna summana.

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

$$y_i = G(x_1, x_2, \dots, x_p). \text{ (indeksi } i \text{ kuvaa laskentakertaa, } i = 1, \dots, N) \quad (\text{B7})$$

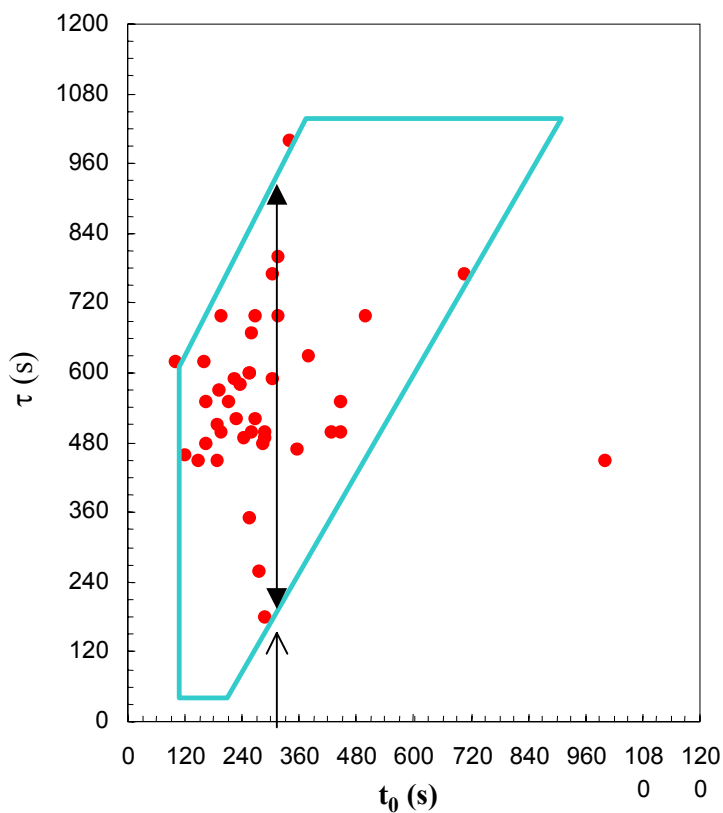
Puisten kuormalavojen palamisen tapauksessa satunnaismuuttujia X_j ovat seuraavat suu-reet: lavapinon korkeus h_p , lattiapinta-ala A_p , tehollinen lämpöarvo ΔH_c ja tekijä Ψ_Q ($P = 4$). Funktio G on yhtälön (1) esittämä yhteys näiden parametrien ja palotehon maksimiarvon \dot{Q}_{\max} välillä. Luvut y_i ovat palotehon maksimiarvoja, \dot{Q}_{\max} , jotka on saatu tulokseksi laskentakerralla i käyttämällä kyseisellä laskentakerralla arvottuja h_p , A_p ja Ψ_Q arvoja.

Viite liitteeseen B

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

Liite C: Palotehon kasvu- ja hiipumisajan riippuvuussuhteesta

Linkova on tutkinut diplomityössään palotehokäyrien hiipumisen aikavakioita τ [Linkova 1999]. Työssä havaittiin, että τ korreloi jossain määrin palon kasvuajan t_0 kanssa. Tässä raportissa tehdyissä palotehon Monte Carlo -simuloinneissa on käytetty hyväksi tätä vastaavuutta kuvassa C1 esitetyllä tavalla: kun simuloinnissa ensin on valittu arvo parametrille t_0 , niin sen jälkeen aikavakio τ valitaan satunnaisesti t_0 -arvon määräämältä alueelta.



Kuva C1. Suureiden τ ja t_0 vastaavuus ja sen käyttö palotehon Monte Carlo -simuloinneissa. Pisteet ovat Linkovan diplomityössä esitettyjä (t_0, τ) -lukupareja puutuotteille. Paksunnetulla viivalla merkitty kuvio rajaa kyseisten parametrin vastaavuusalueen. Jos kasvu-aika on esimerkiksi $t_0 = 300$ s, niin aikavakio τ valitaan satunnaisesti tasajakaumasta välillä n. 200–930 s.

Viite liitteeseen C

Linkova, P. 1999. Palotehokäyrien aikavakioiden määrittäminen. Diplomityö, TKK Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto.

Liite D: Hiiltymismalli

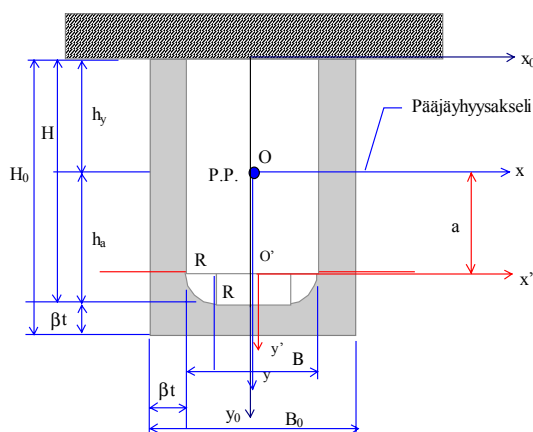
Palon vaikutusta puupalkkiin kuvataan sen poikkileikkauksen pienenemisenä. Poikkileikkauksen hiiltymistä kuvataan 1-dimensioisena Stefanin ongelmana, jossa lämmönsiirtomalliin on kytketty hiiltymisrajan evoluutioyhtälö [Baroudi 1994]. Sovellettaessa mallia paikalliseen paloon pitää huomioida erityisesti pintaan kohdistuvan lämpövuon tiheyden ajallinen kehitys, joka ei välttämättä ole ajan suhteen monotoninen, vaan aika-kehitys voi olla esimerkiksi ensin nouseva ja sitten laskeva. Tällöin hiiltymisrajan eteneminen joko etenee tai on pysähtynyt, mutta ei koskaan palaudu.

Laskennan vaiheet

Laskenta etenee siten, että tarkasteltavan suorakaidepoikkileikkauksen leveyttä ja korkeutta päivitetään ajan funktiona hiiltymismallin määräämällä tavalla.

Tarkastelun keskeinen suure on hiiltymänopeus β . Se lasketaan hiiltymismallia käyttäen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös esim. eurokoodissa annettuja hiiltymisnopeuden arvoja. Alla esitetyt poikkileikkauksuureiden kaavat pätevät, kun hiiltymisnopeus riippuu ajasta, $\beta = \beta(t)$, ja paikasta (esim. $\beta = \beta_1(t)$ 'uudessa' ja $\beta = \beta_2(t)$ 'alalaipassa'). Tässä tarkastelussa käytetään kuitenkin vakioarvoista hiiltymisnopeutta.

Kun hiiltymisnopeus on selvitetty, poikkileikkauksuureiden määrittäminen on geometri- nen tehtävä. Laskennassa käytettävä geometria esitetään kuvassa D1.



Kuva D1. Liimapuupalkin hiiltymisen laskennassa käytetty geometria.

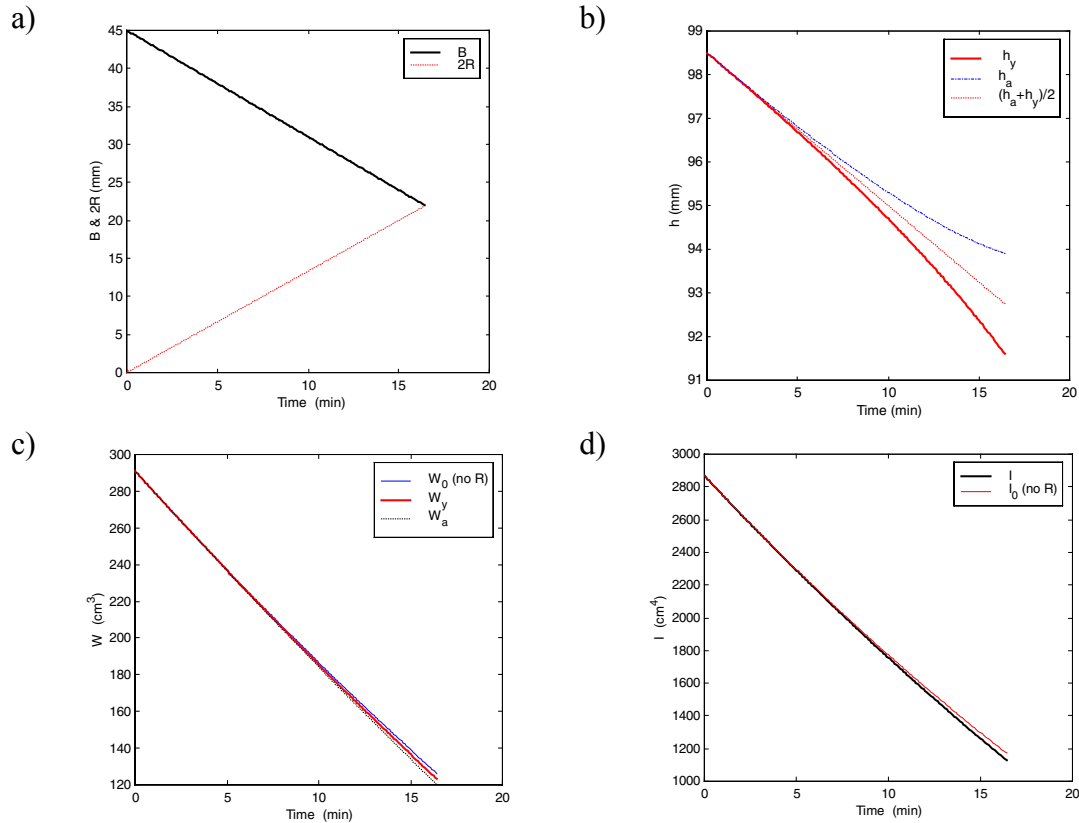
Lähtötietoina geometrinen suureiden laskennassa ovat palkin leveyden ja korkeuden arvot hetkellä $t = 0$ s, $B(0)=B_0$ ja $H(0)=H_0$. Palkin leveys $B(t)$ ja korkeus $H(t)$ myöhemmin ajanhetkinä t sekä näistä suureista laskettavissa olevat palkin lujuutta kuvaavat suureet lasketaan taulukossa D1 esitetyillä tavoilla.

Taulukko D1. Liimapuupalkin hiiltymistä kuvaavien geometrinen suureiden laskenta.

Suure	Laskentatapa
palkin leveys	$B(t) = B_0 - 2 \cdot \int_0^t \beta(t') dt' = B_0 - 2\beta t$
palkin korkeus	$H(t) = H_0 - \int_0^t \beta(t') dt' = H_0 - \beta t$
'kulmapyöristykset' $R(t)$	ENV 1995-1-2:1994 (sivu 27) mukaisesti
pääjäyhyyskoordinaatisto	x, y -koordinaatisto kuvassa C1
painopiste $h_y(t)$	$h_y(t) = S_x(t) / A(t)$, missä $A(t)$ on pinta-ala, $S_x(t) = \sum_{k=1}^3 y_k A_k$, $y_1 = \frac{1}{2}(H(t) - R(t))$, $y_2 = H(t) - \frac{1}{2}R(t)$ ja $y_3 = \frac{4\pi}{3}R(t) + H(t) - R(t)$ (arvot A_k on annettu alla)
pinta-ala $A(t)$	$A(t) = A_1 + A_2 + A_3$, missä $A_1 = B(t) \cdot (H(t) - R(t))$, $A_2 = (B(t) - 2R(t)) \cdot R(t)$ ja $A_3 = \frac{1}{2}\pi R(t)^2$
pääjäyhyysmomentti x -akselin suhteen I_x	$I_x(t) = \int_{A(t)} y^2 dA = I_{x'}(t) - a(t)^2 A(t)$, missä $a(t) = H(t) - (h_y(t) + R(t))$ ja $I_{x'}(t) = \frac{1}{3}B(t) \cdot (H(t) - R(t))^3$ $+ \frac{1}{3}R(t)^3(B(t) - 2R(t)) + \frac{\pi}{8}R(t)^4$
taivutusvastukset:	
yläpinnan suhteen $W_x^{(y)}(t)$	$W_x^{(y)}(t) = I_x(t) / h_y(t)$
alapinnan $W_x^{(a)}(t)$ suhteen	$W_x^{(a)}(t) = I_x(t) / (H(t) - h_y(t))$

Laskentaesimerkki

Esimerkkinä hiiltymislaskennasta tarkastellaan liimapalkin, jonka leveys on 45 mm ja korkeus 197 mm, hiiltymistä. Hiiltymänopeudelle laskenta on antanut arvon 0.7 mm/min. Tulokset esitetään kuvassa D2.



Kuva D2. Laskentaesimerkin tulokset esitettynä poikkileikkaussuureiden aika-muutoksina. a) Hiiltymisnopeus ja säde R , b) hiiltymättömän osan korkeutta kuvaavat suureet, c) taivutusvastus ja d) pääjäyhyismomentti.

Viite liitteeseen D

Baroudi, D. 1994. Application of the finite element method to the Stefan problem in 1-D. Proceedings of the 5th Finnish Mechanics Days. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, matematiikan osasto. S. 159–166. (Report 3/1994.) ISBN 951-34-0284-333119-8

Liite E: Lumikuorman tilastollinen tarkastelu

Lumikuorman kuukausittaisen vaihtelun jakaumat

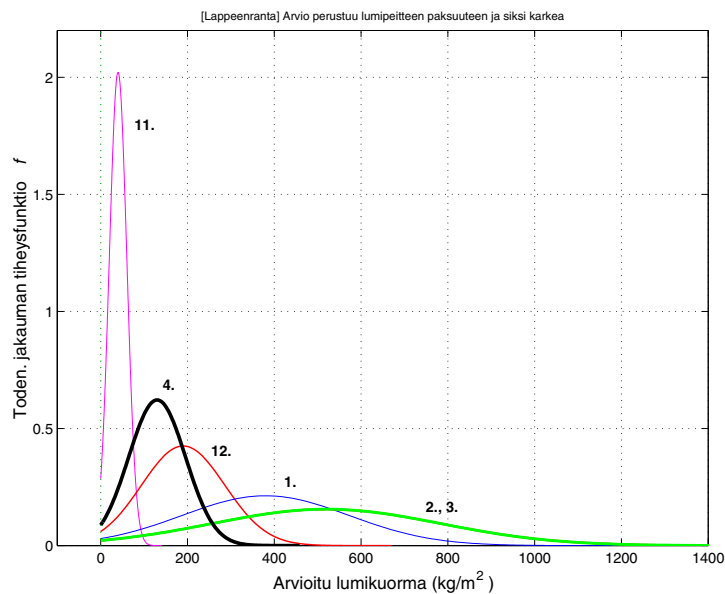
Suomen olosuhteissa on lumikuorman vaihtelevuus on voimakasta. Jotta lumikuormien vaikutusta tulipalojen riskitarkastelussa ei yliarvioitaisi, lumikuorman huomioonottamisessa tulisi käyttää mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavaa kuormitusta mieluummin kuin rakennusten mitoituksen perusteena käytettyjä lumikuorman suurimpia kuukausittaisia arvoja. Pätevän lumikuorman riskianalyttisen tarkastelun pohjaksi tarvitaan tietoa lumikuorman kuukausittaisesta vaihtelusta.

Ongelmana tällaisen tiedon käytössä on tällä hetkellä kuitenkin se, ettei lumikuormista ole saatavilla riittävän yksityiskohtaisesta tilastotietoa, jotta niistä voitaisiin johtaa kuukausikohtaisia jakaumia. Tässä työssä on luotu tällaisia tietoja perustamalla ne almanakassa esitettyihin tietoihin keskimääräisistä lumensyvyyksistä kuukausittain vuosien 1961–1990 aikana paikkakunnittain (Almanakka 2000, sivu 52) sekä rakennusten mitoituksen tarpeisiin määritettyihin tietoihin lumikuorman maksimiarvoista (Mononen 1983). Tulokset muokattiin Monte Carlo -simulointia hyväksi käyttäen todennäköisyysjakaumiksi, jotka esitetään kuvassa E1.

Lumikuorman kuukausivaihteluiden todennäköisyysjakaumien johtamisessa käytetyt yksityiskohdat ovat:

- Jakaumien perustana olevat lumenpaksuustiedot vastaavat Lappeenrannan seudun lumenpaksuuksia.
- Lumikuorman jakaumien oletettiin olevan katkaistu normaalijakauma, jossa todennäköisyydet nolaa pienemmille lumikuorman arvoille on asetettu nolliksi. Kullekin kuukaudelle (indeksi i) käytettiin omaa jakaumaa, jonka normaalijakauman muotoisen jakaumafunktion keskiarvo on μ_i ja hajonta σ_i . Monte Carlo -laskujen nopeuttamiseksi myös lukemat, jotka ylittivät arvon $5 \times \sigma_i$ katkaistiin pois jakaumasta. Katkaisujen vaikutus otettiin huomioon normituksessa.
- Kunkin kuukauden lumikuorman jakauman keskiarvoparametrille μ_i käytettiin almanakasta lumenpaksuustiedoista johdettua estimaattia lumikuorman suuruudelle. Lumikerroksen paksuus muunnettiin lumikuormaksi Monte Carlo -simuloinnin keinoin käyttäen lumen tiheydelle tasajakaumasta väliltä 250–500 kg/m³ valittuja arvoja.

- Tuntematon jakauman hajonnan arvo σ_i määritettiin välillisesti käyttäen apuna lumikuorman maksimiarvojen tilastollisen tarkastelun (Mononen 1983) tuloksia. Monosen (1983) tutkimuksen aluetta 7 koskevien tulosten perusteella lumikuormien jakaumien variaatiokertoimen $V_i = \mu_i / \sigma_i$ arvon voidaan arvioida olevan vakio, suurltaan noin 0.5. Kiinnittämällä V :n arvoksi 0.5 jakaumien hajonnat voidaan laskea niiden keskiarvoista seuraavasti: $\sigma_i = \mu_i / 0.5 = 2\mu_i$.



Kuva E1. Monte Carlo -simuloinnin tuloksena saadut arviot lumikuorman kuukausittaisille jakaumille talvikuukausina (kuukausien järjestysluvut 1, 2, 3, 4, 11 ja 12 vastaten tammi-, helmi-, maaliskuu-, huhti-, marras- ja joulukuuta) todennäköisyystiheytenä esitettyinä. Kesäkuukausina lumikuorma on nolla.

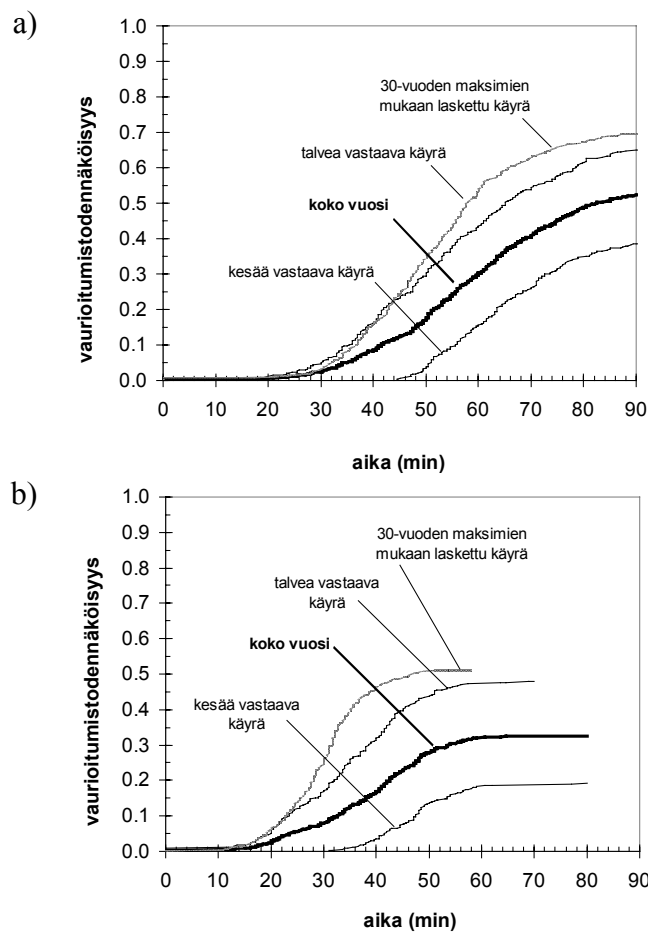
Lumikuorman vaihtelevuuden vaikutus palkin vaurioitumistodennäköisyyteen

Lumikuorman kuukausittaisille vaihteluille johdettuja todennäköisyysjakaumia käytettiin lumen aiheuttaman kuormituksen ja siitä aiheutuvan palkin vaurioitumistodennäköisyyden kuvaamisessa yhdistämällä lumikuorman stokastinen kuvaus palotilanteen Monte Carlo -laskentaan seuraavasti:

- Kussakin Monte Carlo -laskentakierroksessa valittiin satunnaisesti tarkastelu-kuukausi.

- Lumikuormalle valittiin arvo tarkastelukuukauden mukaan:
 - Jos valitun kuukauden järjestysluku on 5, 6, 7, 8, 9 tai 10 (kesäkuukaudet), lumikuormalle annetaan arvo 0.
 - Jos valitun kuukauden järjestysluku on 1, 2, 3, 4, 11 tai 12, lumikuormalle annetaan arvo valitsemalla se kyseisen kuukauden todennäköisyysjakaumasta.

Toistamalla suuri määrä koko tilanteen simulointilaskentoja saadaan tulokseksi kuvasa E2 esitetyt todennäköisyysjakauma palkin vaurioitumiselle palon alkamisesta kuluneen ajan funktiona.



Kuva E2. Liimapuupalkin (pituus 10 m) vaurioitumisen todennäköisyys palon alusta kuluneen ajan funktiona, kun a) palon kasvuaika vaihtelee välillä 300–600 s ja b) palon kasvuaika vaihtelee välillä 120–180 s. Riskitarkasteluissa käytettävät käyrät ovat koko vuotta vastaavat käyrät. Vertailun vuoksi kesä- ja talviaikojen tulokset on esitetty erikseen samoin kuin Monosen tutkimuksessa esitetyt lumikuorman 30-vuoden maksimi-arvojen jakaumia käyttäen laskettu vaurioitumisen todennäköisyysjakauma.

Viitteet liitteeseen E

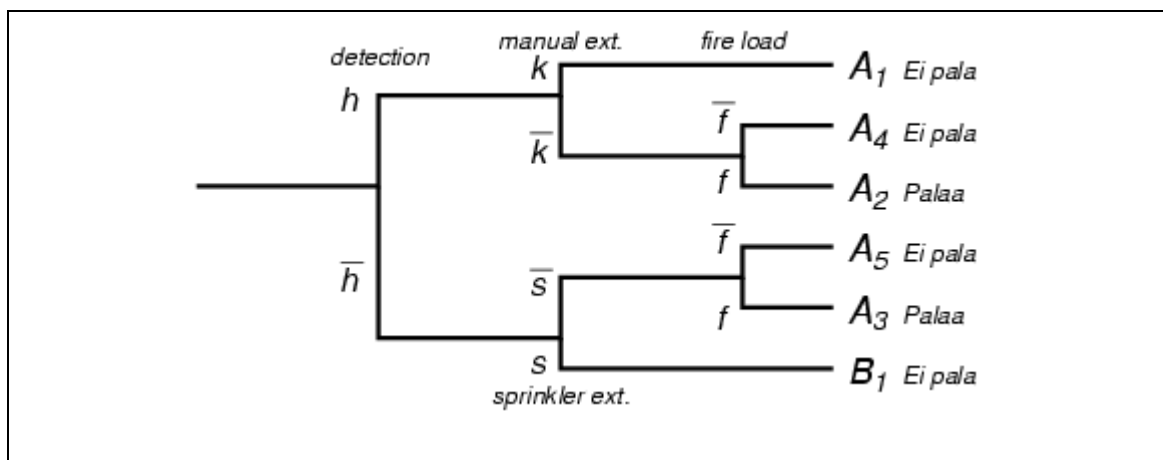
Almanakka. 2000. Yliopiston Almanakka vuodeksi 2000. Helsinki: Helsingin Yliopisto.

Mononen, T. 1983. Lumi- ja tuulikuormien tilastollinen tarkastelu. Rakenteiden mekaniikka, vol. 16, nro 2, s. 1–18.

Liite F: Palotapahtuman aikakehityksen laskeminen

Tapahtumaketjujen lopputapahtumien tulkinta systeemin tiloina

Tässä työssä esitetyssä riskianalyysissä tarkastellaan teollisuusrakennuksen palon 120 ensimmäistä minuuttia. Tämä aikajakso on jaettu kuuteen eri osaan, joiden loppuajankohdat ovat $t_1 = 5$, $t_2 = 10$, $t_3 = 15$, $t_4 = 30$, $t_5 = 60$ ja $t_6 = 120$ minuuttia. Kullakin ajanjaksolla systeemiä kuvataan kuvassa F1 olevalla tapahtumapuulla. Eri ajanjaksojen tapahtumapuut ovat muodoltaan samanlaisia, vain tapahtumapuun haarautumistodennäköisyydet ovat ajasta riippuvia. Tapahtumapuiden haarat kuvaavat seuraavia tapahtumia: ”palon havaitseminen”, ”käsिसammutus”, ”sprinklerisammutus” ja ”palokuorman loppuminen”. Tapahtumapuita on yksinkertaistettu siten, että palokuorman loppuminen samaan aikaan kuin sammuttaminen käsin tai sprinklerein onnistuu, on liitetty sammuttamisen onnistumiseen. Lisäksi käsिसammutuksen ajatellaan sisältävän sekä henkilökunnan että palokunnan sammutusyritykset. Henkilökunnan oletetaan yrittävän sammutusta vain kahden ensimmäisen ajanjakson aikana, ja palokunnan oletetaan saapuvan paikalle vasta tämän jälkeen eli yli kymmenen minuutin kuluttua palon alusta.



Kuva F1. Tapahtumapuu, jota käytetään kuvaamaan tulipaloa kohderakennuksessa eri ajanhetkinä.

Systeemi voi olla vain yhdessä kuudesta toisensa poissulkevasta tilasta kullakin ajanhetkellä. Nämä tilat ovat:

- A_1^t : Palo on havaittu ja käsिसammutus on onnistunut hetkeen t mennessä. Palo on sammunut.

- A_2' : Palo on havaittu mutta käsisammutus on epäonnistunut. Palo ei ole sammunut, sillä palokuormaa riittää vielä hetkellä t .
- A_3' : Paloa ei ole havaittu ja palokuorma ei ole loppunut hetkeen t mennessä. Systemi on tässä tilassa, kun palo syttyy hetkellä $t = 0$.
- A_4' : Palo on havaittu ja käsisammutus on epäonnistunut hetkeen t mennessä, mutta palokuorma on loppunut. Palo on sammunut.
- A_5' : Paloa ei ole havaittu hetkeen t mennessä, mutta palokuorma on loppunut, joten palo on sammunut.
- B_1' : Sprinklerisysteemi on sammuttanut palon hetkeen t mennessä, joten palo on sammunut. (Tarkasteltavaa rakennusta ei ollut varustettu sprinklerein, joten tämän haaran todennäköisyys on nolla eikä sitä siten oteta huomioon alla olevassa systeemin aikakehityksen kuvauksessa.)

Tapahtumapuun haarautumistodennäköisyyksiä merkitään seuraavasti:

- h_t on ehdollinen todennäköisyys, että palo havaitaan joko aistinvaraisesti tai automaattisesti ajanjaksolla t , jos sitä ei ole havaittu aikaisemmin.
- k_t on todennäköisyys, että palon sammuttaminen onnistuu joko henkilökunnalta tai palokunnalta ajanjaksolla t .
- f_t on ehdollinen todennäköisyys, että palokuorma ei lopu ajanjaksolla t , jos se ei ole loppunut aikaisemmin.
- s_t on todennäköisyys, että sprinklerisysteemi onnistuu sammuttamaan palon ajanjakson t aikana. Tämä todennäköisyys on nolla, sillä sprinklereitä ei ole tarkasteltavassa teollisuusrakennuksessa.

Näiden todennäköisyyksien arvot kullakin aikajaksolla saadaan luvun 7 taulukoista. Sammuttamisen onnistumisen todennäköisyydet k_t saadaan ottamalla taulukkojen sarakkeen 'käsisammutus ei onnistu' todennäköisyyksien komplementit (eli yksi miinus ko. todennäköisyys). Todennäköisyydet h_t ja f_t saadaan taulukkojen todennäköisyyksien 'palo havaittu' ja 'palokuorma on loppunut' (taulukossa jälkimmäisen komplementit eli 'palokuorma ei ole loppunut') arvoista. Nämä taulukoidut arvot ovat kertymäfunktioita, kuten luvuissa 5 ja 6 on kerrottu, ja tämän vuoksi niiden käytössä on syytä olla varovainen. Esimerkiksi nopeasti ajateltuna palon havaitsemisen todennäköisyys aikavälillä 5–10 min olisi kertymäfunktion arvo 10 min kohdalla vähennettynä sen arvolla kohdassa

5 min. Mutta näin ei ole, sillä tapahtumapuun haarautumistodennäköisyydet ovat ehdollisia todennäköisyyksiä. Jotta palo voitaisiin havaita aikavälillä 5–10 min, sitä ei ole voitu havaita aikavälillä 0–5 min, joten meillä on aikavälillä 5–10 min käytössä tämä tieto, joka muuttaa todennäköisyyksiä.

Yllä olevan kaltaisten ehdollisten todennäköisyyksien laskentaan voidaan käyttää ns Bayesin teoremaa:

$$P[C_j | B] = \frac{P[B | C_j] \cdot P[C_j]}{\sum_i P[B | C_i] \cdot P[C_i]} \quad (\text{F1})$$

Oletuksena on tietenkin, että todennäköisyys $P[B] \neq 0$ ja että tapahtumat C_j ovat toisensa poissulkevia ja muodostavat täydellisen joukon. Lasketaan yllä ollut esimerkki palon havaitsemisesta välillä 5–10 min. Merkitään luvun 7 taulukoissa olevia havainnoinnin kertymäfunktiota $H(t)$:lla ja tapahtumapuissa tarvittavia todennäköisyyksiä vastaavasti pienellä kirjaimella, eli $h(5-10)$ tarkoittaa haarautumistodennäköisyyttä kyseisellä aikavälillä. Nyt siis pätee Bayesin teoreeman perusteella, että

$$h(5-10) = P[5-10 | \text{ei } 0-5] = P[\text{ei } 0-5 | 5-10]P[5-10] / \{P[\text{ei } 0-5 | 0-5]P[0-5] + P[\text{ei } 0-5 | 5-10]P[5-10] + P[\text{ei } 0-5 | 10-\infty]P[10-\infty]\} \quad (\text{F2})$$

Nyt pätee, että tapahtumat (havaitaan välillä 0–5, 5–10, 10– ∞ min) ovat selvästi toisensa poissulkevia ja muodostavat täydellisen joukon, sillä palo (tai sen tuhot) havaitaan ennemmin tai myöhemmin. Myöskin $P[\text{ei } 0-5] \neq 0$, joten oletukset ovat kunnossa. (Tapaus, jossa palo havaitaan todennäköisyydellä yksi tiettyyn hetkeen mennessä, on triviaali, sillä ko. hetken jälkeen palo on havaittu eli tiedetään varmasti se, että missä tapahtumapuun haarassa ollaan.) Edellä kaavassa (F2) todennäköisyydet $P[\text{ei } 0-5 | 5-10]$ ja $P[\text{ei } 0-5 | 10-\infty]$ ovat triviaalisti ykkösiä. Vastaavasti $P[\text{ei } 0-5 | 0-5]$ on nolla. Lisäksi todennäköisyydet $P[5-10] = H(10) - H(5)$ ja $P[10-\infty] = H(\infty) - H(10) = 1 - H(10)$. Eli haarautumistodennäköisyydeksi saadaan lopulta

$$h(5-10) = \frac{H(10) - H(5)}{(H(10) - H(5)) + (H(\infty) - H(10))} = \frac{H(10) - H(5)}{1 - H(5)}. \quad (\text{F3})$$

Aivan vastaavasti saadaan laskettua todennäköisyydet palokuorman loppumiselle, eli todennäköisyyksien f_i komplementeille.

Henkilökunnan oletetaan yrittävän sammutusta vain kerran ja tämän oletetaan tapahtuvan samalla hetkellä kuin palo havaitaan. Kuten edellä jo mainittiin, niin henkilökunta yrittää sammuttaa paloa vain ensimmäisen 10 minuutin aikana (kaksi ajanjaksoa 0–5 ja 5–10 min), jonka aikana palokunta ei ole vielä paikalla. Palokunnan oletetaan yrittävän

sammuttaa paloa vasta ajanjaksosta 3 (10–15 min) alkaen joka jaksolla erikseen. Koska palokunnan ja henkilökunnan sammuttaminen on tapahtumapuissa yhdistetty yhdeksi haaraksi, niin joudutaan hieman muuntamaan henkilökunnan sammuttamisen todennäköisyyksiä, jotta nämä kaksi sammutusvaihtoehtoa pystytään pitämään saman formalismin puitteissa. Tämä pieni hankaluus olisi ollut helposti vältettävissä laittamalla tapahtumapuihin sekä palokunnalle että henkilökunnalle molemmille omat haaransa, mutta tämä olisi kasvattanut puiden haarojen lukumäärää.

Systemin tilojen aikakehityksen laskeminen ehdollisten todennäköisyyksien avulla

Systemin tilojen A_j todennäköisyydet tulipalon syttymisen jälkeen voidaan laskea käyttämällä ajasta riippuvien tapahtumapuiden haarautumistodennäköisyyksiä. Käytetään seuraavaa notaatiota: $P[A_j^t]$ on todennäköisyys sille, että systemi on tilassa A_j aikajakson t_i lopussa. Tulipalon syttyessä systemi on tilassa A_3 , joten $P[A_3^{t_0}] = 1$ ja muiden tilojen todennäköisyydet ovat nollia. Tarkastellaan seuraavassa esimerkissä hitaasti-normaalisti kehittyvää paloa arki-iltaisain (T2). Hetkellä $t_1 = 5$ min systemin eri tilojen todennäköisyydet ovat

$$P[A_1^{t_1}] = P[A_1^{t_0}] + h_1 \cdot k_1 \cdot P[A_3^{t_0}] = 0 + 0.006 \cdot 0.9 = 0.0054 \quad (\text{F4a})$$

$$P[A_2^{t_1}] = P[A_2^{t_0}] + h_1 \cdot \bar{k}_1 \cdot P[A_3^{t_0}] = 0 + 0.006 \cdot 0.1 = 0.0006 \quad (\text{F4b})$$

$$P[A_3^{t_1}] = \bar{h}_1 \cdot P[A_3^{t_0}] = 0.994 \cdot 1 = 0.9940 \quad (\text{F4c})$$

ja tilojen A_4 tilassa A_5 todennäköisyydet ovat edelleen nollia, sillä palokuorma ei lopu neljän ensimmäisen ajanjakson aikana (0–30 min). Edellä viivat haarautumistodennäköisyyksien päällä tarkoittavat kyseisen todennäköisyyden komplementtia eli esimerkiksi $\bar{h} = 1 - h$. Huomaa, että kullakin ajanhetkellä on pädeävä, että $\sum_{j=1}^5 P[A_j^t]$ on yksi, sillä systemin voi olla vain yhdessä tilassa kerrallaan (tilat ovat toisensa poissulkevia).

Systemin tilojen todennäköisyydet seuraavalla hetkellä $t_2 = 10$ min saadaan vastaavasti

$$P[A_1^{t_2}] = P[A_1^{t_1}] + h_2 \cdot k_2 \cdot P[A_3^{t_1}] \quad (\text{F5a})$$

$$P[A_2^{t_2}] = P[A_2^{t_1}] + h_2 \cdot \bar{k}_2 \cdot P[A_3^{t_1}] \quad (\text{F5b})$$

$$P[A_3^{t2}] = \bar{h}_2 \cdot P[A_3^{t1}] \quad (\text{F5c})$$

Näiden todennäköisyyksien lukuarvot ovat taulukossa F1, kuten arvot muina ajanhetkinäkin.

Aikajaksolla 10–15 minuuttia ($t_3 = 15$ min) palokunta voi onnistua sammuttamaan palon, joten tilassa A_2 oleva palo (henkilökunta ei onnistunut sammuttamaan) voi sammua palokunnan toimesta. Edellä ajanjaksolla t_2 paloa ei voitu enää yrittää sammuttaa, sillä henkilökunta sai yrittää sammuttamista vain kerran. Tämän johdosta todennäköisyyksien lausekkeet muuttuvat hieman ja ovat

$$P[A_1^{t3}] = P[A_1^{t2}] + h_3 \cdot k_3 \cdot P[A_3^{t2}] + k_3 \cdot P[A_2^{t2}] \quad (\text{F6a})$$

$$P[A_2^{t3}] = P[A_2^{t2}] + h_3 \cdot \bar{k}_3 \cdot P[A_3^{t2}] - k_3 \cdot P[A_2^{t2}] \quad (\text{F6b})$$

$$P[A_3^{t3}] = \bar{h}_3 \cdot P[A_3^{t2}] \quad (\text{F6c})$$

Ajanhetkellä $t_4 = 30$ min todennäköisyyksien lausekkeet ovat aivan samat, ainoastaan aikaindeksit kasvavat yhden yksikön suuremmiksi.

Kahdella viimeisellä ajanjaksolla palokuorma voi palaa loppuun, joten tilojen A_4 ja A_5 todennäköisyydet eivät ole enää välttämättä nollija. Tällöin pitää ottaa huomioon myös tapahtumapuiden haarat, joissa palokuorma voi loppua. Ajanhetkellä $t_5 = 60$ min systeemin tilojen todennäköisyyksien lausekkeet ovat

$$P[A_1^{t5}] = P[A_1^{t4}] + h_5 \cdot k_5 \cdot P[A_3^{t4}] + k_5 \cdot P[A_2^{t4}] \quad (\text{F7a})$$

$$P[A_2^{t5}] = \bar{k}_5 \cdot f_5 \cdot P[A_2^{t4}] + h_5 \cdot \bar{k}_5 \cdot f_5 \cdot P[A_3^{t4}] \quad (\text{F7b})$$

$$P[A_3^{t5}] = \bar{h}_5 \cdot f_5 \cdot P[A_3^{t4}] \quad (\text{F7c})$$

$$P[A_4^{t5}] = P[A_4^{t4}] + h_5 \cdot \bar{k}_5 \cdot \bar{f}_5 \cdot P[A_3^{t4}] + \bar{k}_5 \cdot \bar{f}_5 \cdot P[A_2^{t4}] \quad (\text{F7d})$$

$$P[A_5^{t5}] = P[A_5^{t4}] + \bar{h}_5 \cdot \bar{f}_5 \cdot P[A_3^{t4}] \quad (\text{F7e})$$

Viimeisellä ajanhetkellä $t_6 = 120$ min todennäköisyydet saadaan aivan vastaavasti.

Todennäköisyys, että palo on sammunut tietyllä ajanhetkellä, on summa tilojen A_1 , A_4 ja A_5 todennäköisyyksistä. Todennäköisyys, että palo on sammutettu joko henkilökun-

nan tai palokunnan toimesta, on tilan A_1 todennäköisyys. Todennäköisyys, että tulipalo sammutetaan tietyllä ajanjaksolla, on tilan A_1 ajanjakson loppuhetken ja alkuhetken todennäköisyyksien erotus. Näidenkin todennäköisyyksien arvot löytyvät taulukosta F1.

Taulukko F1. Systemin tilojen todennäköisyydet eri ajanhetkillä.

	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
$P[A_1]$	0.0054	0.258800	0.921308	0.928977	0.928977	0.928977
$P[A_2]$	0.0006	0.254000	0.006692	0.069023	0.024858	0
$P[A_3]$	0.9940	0.487200	0.072000	0.002000	0	0
$P[A_4]$	0	0	0	0	0.046165	0.071023
$P[A_5]$	0	0	0	0	0	0
Palaa	0.9946	0.741200	0.078692	0.071023	0.024858	0
Sammunut	0.0054	0.253400	0.662508	0.007669	0.046165	0.024858
Sammutettu	0.0054	0.253400	0.662508	0.007669	0	0

Tulipalon seuraamusten todennäköisyydet

Taulukkoon F1 laskettujen todennäköisyyksien avulla on mahdollista laskea rakennuksen vaurioitumisen ja sen savulla täyttymisen todennäköisyydet sekä näistä myös henkilöriskien todennäköisyydet. Tarkastellaan edelleen arki-iltoina tapahtuvia tulipaloja, jolloin rakennuksessa työskentelee viisi henkilöä. Valitaan tarkasteltavaksi rakennevaihtoehtoksi $F/V=150$ l/m teräspalkki ja palon kasvunopeudeksi luokka 300–600 s kuten edelläkin. Rakenteen vaurioitumis- ja savullatäyttymistodennäköisyyksistä nähdään (luvusta 11 ja 12 taulukoista 12, 13 ja 17), että kolmen ensimmäisen aikajakson aikana rakennus ei vaurioitu eikä se myöskään täyty savulla. Eli aikavälillä 0–15 min ei tulipalosta ole seuraamuksia (ihmishenkien menetyksiä tai rakennevaurioita). Tämän jälkeen on mahdollisuus vaurioille, jos paloa ei ole sammutettu. Jos paloa ei ole sammutettu 30 minuutin kuluessa palon syttymisestä, rakenne on vaurioitunut tällöin todennäköisyydellä 0,35. Vahinko on 97 %:ssa tapauksista rajoittunut ja 3 %:ssa tapauksista laaja, kuten luvun 11 taulukosta nähdään. Huomaa, että rakenteen vaurioitumis- ja savullatäyttymistodennäköisyydet ovat vapaasti kehittyville suunnittelupaloille eli ne ovat ehdollisia todennäköisyyksiä.

Rakennevaurion todennäköisyys v_i on siis ehdollinen todennäköisyys sille, että rakenne on vaurioitunut ja paloa ei ole sammutettu (henkilökunta, palokunta, sprinklerit) hetkeen t_i mennessä. Itse palo on voinut kyllä sammua palokuorman loppumiseen, eli v_i on

$$v_i = P[\text{vaurio } t_i \mid \text{ei sammutettu } t \leq t_i] = \frac{P[\text{vaurio } t_i \text{ JA ei sammutettu } t \leq t_i]}{P[\text{ei sammutettu } t \leq t_i]} \quad (\text{F8})$$

Tästä saadaan siis rakennevaurion todennäköisyydeksi tietyllä ajanhetkellä

$$\begin{aligned} P[\text{vaurio } t_i \text{ JA ei sammutettu } t \leq t_i] &= \\ &= P[\text{vaurio } t_i \mid \text{ei sammutettu } t \leq t_i] \cdot P[\text{ei sammutettu } t \leq t_i] = \\ &= v_i \cdot P[\text{ei sammutettu } t \leq t_i] \end{aligned} \quad (\text{F9})$$

Aivan vastaavasti voidaan laskea todennäköisyydet savulla täyttymiselle.

Menetelmän yleistys käsittämään mielivaltaisen monta tilaa

Edellä tarkastelujakso oli jaettu kuuteen osaan. Tämä voidaan yleistää suoraviivaisesti mille tahansa aikajalolle. Olkoon tarkastelujakso jaettu n aikajaksoon t_1, t_2, \dots, t_n . Merkinällä t_i tarkoitetaan joko aikajaksoa tai sen päätepistettä tapauksesta riippuen. Merkitään ajasta riippuvia tapahtumapuiden haarautumistodennäköisyyksiä ja systeemin tiloja ja todennäköisyyksiä samoin kuin edelläkin. Systeemi on tulipalon syttyessä tilassa A_3 , joten $P[A_3^0] = 1$ ja muiden tilojen todennäköisyydet ovat nolliä. Tarkastelemalla yhtälöitä F7 nähdään, että systeemin tilojen todennäköisyyksien aikakehitys voidaan kirjoittaa muodossa

$$P[A_1^i] = P[A_1^{i-1}] + h_i \cdot k_i \cdot P[A_3^{i-1}] + k_i \cdot P[A_2^{i-1}] \quad (\text{F10a})$$

$$P[A_2^i] = h_i \cdot \bar{k}_i \cdot f_i \cdot P[A_3^{i-1}] + \bar{k}_i \cdot f_i \cdot P[A_2^{i-1}] \quad (\text{F10b})$$

$$P[A_3^i] = \bar{h}_i \cdot f_i \cdot P[A_3^{i-1}] \quad (\text{F10c})$$

$$P[A_4^i] = P[A_4^{i-1}] + h_i \cdot \bar{k}_i \cdot \bar{f}_i \cdot P[A_3^{i-1}] + \bar{k}_i \cdot \bar{f}_i \cdot P[A_2^{i-1}] \quad (\text{F10d})$$

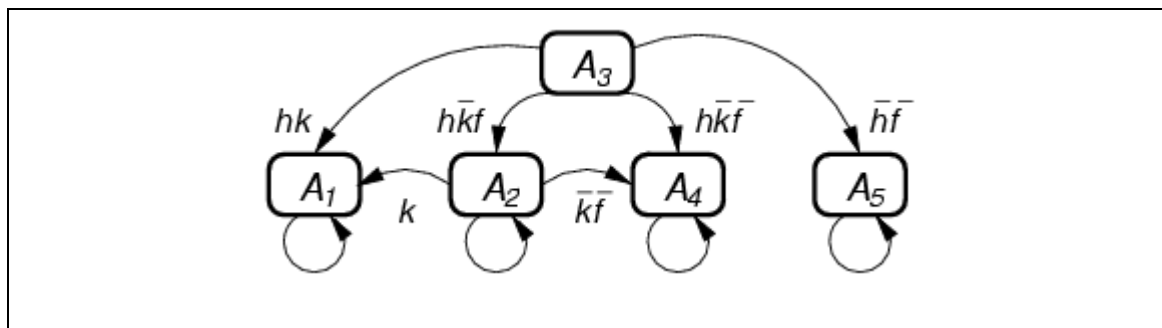
$$P[A_5^i] = P[A_5^{i-1}] + \bar{h}_i \cdot \bar{f}_i \cdot P[A_3^{i-1}] \quad (\text{F10e})$$

Summaamalla yhtälöt F10 puolittain yhteen päädytään identiteettiin $\sum_{j=1}^5 P[A_j^i] = \sum_{j=1}^5 P[A_j^{i-1}] = 1$ kuten pitääkin. Edellä olevissa yhtälöissä F10 sammutusta

yritetään joka aikajaksolla. Jos henkilökunta yrittää sammuttaa paloa vain kerran (kuten esimerkkitapauksessamme) pitää yllä olevia yhtälöitä hieman modifioida henkilökunnan sammutuksen osalta. Tällöin yhtälöstä (F10a) pitää jättää pois viimeinen termi ja yhtälöön (F10b) lisätä termi $k_i \cdot P[A_2^{i-1}]$.[†]

Menetelmän kuvaus Markov-prosessina

Tarkastelemalla yllä olevia yhtälöitä huomataan, että systeemin kunkin tilan todennäköisyys tietyllä ajan hetkellä t_i riippuu vain systeemin tilojen todennäköisyyksistä edellisellä ajanhetkellä t_{i-1} sekä tapahtumapuiden haarautumistodennäköisyyksistä. Jos tilojen todennäköisyydet mielletään satunnaismuuttujiksi, niin käsiteltävä systeemi on Markovin prosessi. Markovin prosessilla ei ole muistia, eli sen tulevat tilat määräytyvät yksikäsitteisesti sen satunnaismuuttujien nykyhetken arvoista. Tarkasteltavan systeemi voidaan esittää kuvassa F2 olevalla prosessilla. Kuvaan on myös merkattu eri tilojen väliset siirtokertoimet. Esimerkiksi tilaan A_4 (palo on havaittu, sammutus epäonnistunut, palokuorma loppunut) voidaan päätyä kahdella eri tavalla: 1) tilasta A_3 huomaamalla palo, epäonnistumalla sammutuksessa ja palokuorman loppuessa, jolloin siirtokertoimen arvo on siis $h \cdot \bar{k} \cdot \bar{f}$, 2) tilasta A_2 sammuttamisen epäonnistuessa, jos palokuorma loppuu. Tällöin siirtokertoimen arvo on $\bar{k} \cdot \bar{f}$. Aivan vastaavalla päättelyllä voidaan ratkaista kuvaan merkityt muutkin siirtokertoimet.



Kuva F2. Ajasta riippuvien tapahtumapuiden kuvaama prosessi. Prosessi on tilassa A_3 , kun palo syttyy hetkellä nolla. Kuvaan on myös merkitty tilojen väliset siirtokertoimet siirryttäessä ajanhetkestä t_i ajanhetkeen t_{i+1} .

[†] Esimerkissämme, jossa henkilökunta voi sammuttaa paloa vain kahden ensimmäisen ajanjakson aikana, voidaan yhtälöiden muoto säilyttää yhtälöiden F10 muodossa, jos kahden ensimmäisen ajanhetken käsisammutuksen onnistumisen kertoimia k_1 ja k_2 muutetaan seuraavasti: $k_1 = 0$ ja $k_2 = (h_1 k_1 + \bar{h}_1 h_2 k_2) / (1 - \bar{h}_1 \bar{h}_2)$.

Määritellään tilavektori $\mathbf{A}^i = (A_1^i, A_2^i, \dots, A_p^i)^T$ ja siihen liittyvä todennäköisyysvektori $\mathbf{P}[\mathbf{A}^i] = (P[A_1^i], P[A_2^i], \dots, P[A_p^i])^T$, missä yläindeksit viittaavat ajanhetkeen ja alaindeksit systeemin tiloihin $1, 2, \dots, p$ (olkoon systeemissä nyt siis p tilaa). Käyttäen näitä merkintöjä voidaan prosessi kirjoittaa Markovin ketjuna

$$\mathbf{P}[\mathbf{A}^i] = \mathbf{M}_i \mathbf{P}[\mathbf{A}^{i-1}], \quad i = 1, \dots, n, \quad (\text{F11})$$

missä \mathbf{M}_i on siirtomatriisi, joka siirtää systeemin ajanhetkestä t_{i-1} ajanhetkeen t_i . Systeemi on ajanhetkellä nolla tilassa \mathbf{A}^0 . Esimerkkitapauksessamme systeemi on siis palon alkaessa tilassa A_3 , eli $\mathbf{P}[\mathbf{A}^0] = (0, 0, 1, 0, 0)^T$.

Esimerkkitapauksessamme matriisiyhtälö (F11) on auki kirjoitettuna

$$\begin{pmatrix} P[A_1^i] \\ P[A_2^i] \\ P[A_3^i] \\ P[A_4^i] \\ P[A_5^i] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}^i & m_{12}^i & m_{13}^i & m_{14}^i & m_{15}^i \\ m_{21}^i & m_{22}^i & m_{23}^i & m_{24}^i & m_{25}^i \\ m_{31}^i & m_{32}^i & m_{33}^i & m_{34}^i & m_{35}^i \\ m_{41}^i & m_{42}^i & m_{43}^i & m_{44}^i & m_{45}^i \\ m_{51}^i & m_{52}^i & m_{53}^i & m_{54}^i & m_{55}^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P[A_1^{i-1}] \\ P[A_2^{i-1}] \\ P[A_3^{i-1}] \\ P[A_4^{i-1}] \\ P[A_5^{i-1}] \end{pmatrix}. \quad (\text{F12})$$

Koska Markov-prosessi käsittelee todennäköisyyksiä ja systeemimme viisi tilaa muodostavat täydellisen tilajoukon, niin Markovin siirtomatriisin \mathbf{M} kunkin sarakkeen alkioiden summan on oltava 1.

Vertaamalla matriisimuotoista yhtälöä (F12) yhtälöihin (F10) saadaan esimerkkisysteemimme Markovin siirtomatriisiksi

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} 1 & k_i & h_i k_i & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_i f_i & h_i \bar{k}_i f_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{h}_i f_i & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_i \bar{f}_i & h_i \bar{k}_i \bar{f}_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{h}_i \bar{f}_i & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{F13})$$

Tämä siirtomatriisin elementit voidaan myös nähdä suoraan tutkimalla kuvassa F2 esitettyä dynaamista prosessia. Kuvasta nähdään esimerkiksi se, että tilan A_3 todennäköisyys pienenee joka aika-askeleella määrällä $(hk + h\bar{k}f + h\bar{k}\bar{f} + \bar{h}\bar{f})P[A_3]$. Muistamalla komplementin määritelmä tästä saadaan pienen algebran jälkeen $(hf)P[A_3]$ eli yhtälön (F10c) oikea puoli.

Liite G: Riskianalyysilaskelmien tulokset

Tässä liitteessä esitetään riskianalyysin tulokset eri rakenteille (teräspalkit, $F/V = 100$, 150 ja 350 l/m sekä liimapuupalkit, pituus 10 m ja 12 m) ja eri rakennuksen miehitystapauksille (T1, T2 ja T3) palon kehittymisen eri aikoina.

Henkilövahinkoja kuvaavat luvut ovat palossa syntyvien henkilövahinkojen odotusarvoja kyseisen paloskenaarion tapauksessa. Tässä työssä henkilövahinkojen laatua ei ole eritelty kuolemantapauksiin ja eriasteisiin loukkaantumisiin. Jos halutaan, että vahingot eivät tule aliarvioiduksi, voidaan henkilövahinkojen odotusarvon tulkita vastaavan kuolemaan johtaneiden vahinkojen määrää.

Omaisuusvahinkoja kuvaavat luvut ovat eri vahinkoluokkien (ei vahinkoa, rajoitettu vahinko ja laaja vahinko) todennäköisyydet kyseisen paloskenaarion tapauksessa.

Laskenta antaa myös mielenkiintoista tietoa palon havaitsemisesta ja kehittymisestä, kun se ei etene vapaasti, vaan siihen kohdistetaan sammutusyrityksiä. Myös sammutusyritysten onnistumisen todennäköisyyden aikariippuvuus saadaan selville. Koska nämä seikat muodostavat perustan sille, millaisia vahinkoja palossa voi syntyä, ne on esitetty ennen vahinkoja koskevia tuloksia.

Tulosten esittämisessä käytettyjen termien merkitykset ovat seuraavat:

$P(A)$	Tapahtuman A todennäköisyys.
$E(X)$	Suureen X odotusarvo.
”Palo havaittu”	Tuli havaitaan joko henkilökunnan toimesta tai paloilmittimella.
”Käsिसammutus”	Joko henkilökunta tai palokunta onnistuu sammuttamaan tulipalon. [†]
”Rakennuksessa palaa”	Tulipalo ei ole sammunut itsestään eikä myöskään sen sammutus ole onnistunut.
”Savu kriittisellä tasolla”	Savukerros on laskeutunut korkeudelle $1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot H_R$, missä H_R on palotilan korkeus.
”Henkilövahinko tietyllä hetkellä”	Tilanne, jossa rakennuksessa on henkilöitä samalla, kun sinne ovat kehittyneet henkeä uhkaavat olosuhteet savulla täyttymisen tai rakenteiden pettämissen takia.
”Rakenteet vaurioituvat”	Rakenteiden vaurioitumista kuvaava kriteeri toteutuu.
”Vakava vaurioituminen”	Lasketun liekkien ulottuvuuden perusteella vaurion voidaan katsoa ulottuvan aina 15 m:n etäisyydelle (vaurioala n. 700 m^2 eli 14 % rakennuksen pinta-alasta)
”Rajoittunut vaurioituminen”	Lasketun liekkien ulottuvuuden perusteella vaurion voidaan katsoa ulottuvan vain 5 m:n etäisyydelle (vaurioala n. 80 m^2 eli 1,5 % rakennuksen pinta-alasta)

[†] Termi käsिसammutus viittaa kaikkeen sammuttamiseen, joka ei tapahdu automaattisten järjestelmien (lähinnä sprinklerien) avulla.

Palon havaitsemisen, sammuttamisen ja sammumisen todennäköisyydet

Tässä työssä esitettyssä mallissa palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet riippuvat palon kehittymisnopeudesta ja vuorokaudenajasta (rakennuksen miehityksen kautta). Tulokset näiden tekijöiden eri kombinaatioille esitetään taulukoissa G1–G6 sekä kuvissa G1 ja G2.

Päiväsaika: maanantai–perjantai, kello 6–14

Taulukko G1. Normaali–hidas palonkehitys ($t_0 = 300\text{--}600\text{ s}$), aikakategoria T1. Mallia käyttäen lasketut palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet.

Aika (min)	P(palo havaittu)	P(käsisammutus)	P(rakennuksessa palaa)
5	0.979	0.930	0.0698
10	0.997	0.013	0.0564
15	1.000	0.056	0.0007
30	1	0	0.0006
60	1	0	0.0002
120	1	0	0

Taulukko G2. Nopea palonkehitys ($t_0 = 120\text{--}180\text{ s}$), aikakategoria T1. Mallia käyttäen lasketut palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet.

Aika (min)	P(palo havaittu)	P(käsisammutus)	P(rakennuksessa palaa)
5	1	0.75	0.25
10	1	0	0.25
15	1	0.03	0.23
30	1	0	0.20
60	1	0	0
120	1	0	0

Ilta: maanantai–perjantai, kello 14–22

Taulukko G3. Normaali–hidas palonkehitys ($t_0 = 300\text{--}600\text{ s}$), aikakategoria T2. Mallia käyttäen lasketut palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet.

Aika (min)	P(palo havaittu)	P(käsisammutus)	P(rakennuksessa palaa)
5	0.006	0.005	0.9946
10	0.513	0.253	0.7412
15	0.928	0.663	0.0787
30	0.998	0.008	0.0710
60	1	0	0.0249
120	1	0	0

Taulukko G4. Nopea palonkehitys ($t_0 = 120\text{--}180\text{ s}$), aikakategoria T2. Mallia käyttäen lasketut palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet.

Aika (min)	P(palo havaittu)	P(käsisammutus)	P(rakennuksessa palaa)
5	0.780	0.390	0.6100
10	0.993	0.002	0.6078
15	0.998	0.061	0.5470
30	1	0	0.4869
60	1	0	0
120	1	0	0

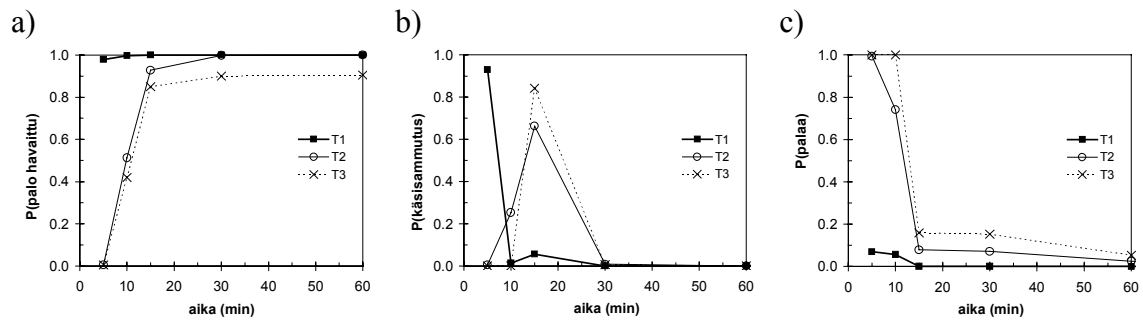
Yöt ja viikonloput: maanantai–perjantai, kello 22–6 ja perjantai kello 22 – maanantai kello 6

Taulukko G5. Normaali–hidas palonkehitys ($t_0 = 300\text{--}600\text{ s}$), aikakategoria T3. Mallia käyttäen lasketut palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet.

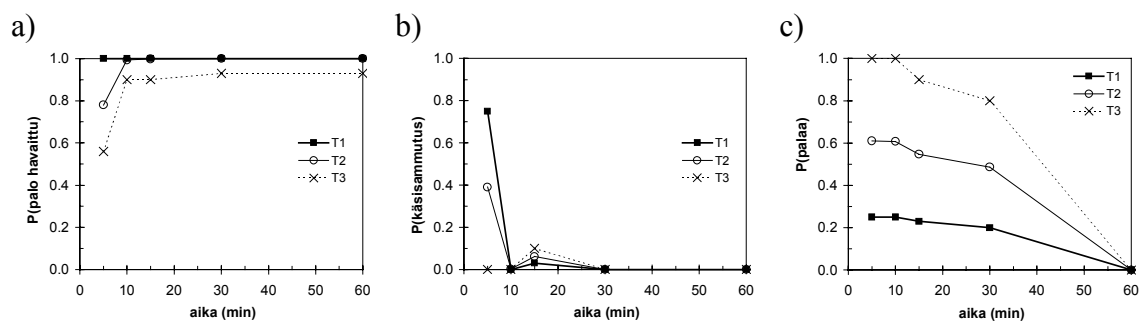
Aika (min)	P(palo havaittu)	P(käsisammutus)	P(rakennuksessa palaa)
5	0.006	0	1
10	0.420	0	1
15	0.9850	0.842	0.1585
30	0.900	0.006	0.1527
60	0.905	0	0.0534
120	0.905	0	0

Taulukko G6. Nopea palonkehitys ($t_0 = 120\text{--}180\text{ s}$), aikakategoria T3. Mallia käyttäen lasketut palon havaitsemisen, sammutusyritysten ja palon sammumisen todennäköisyydet.

Aika (min)	P(palo havaittu)	P(käsisammutus)	P(rakennuksessa palaa)
5	0.56	0	1
10	0.90	0	1
15	0.90	0.10	0.90
30	0.93	0	0.80
60	0.93	0	0
120	0.93	0	0



Kuva G1. Normaali-hidas palonkehitys: a) palon havaitsemisen b) käsisammutuksen ja c) palon sammumisen todennäköisyydet eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3.



Kuva G2. Nopea palonkehitys: a) palon havaitsemisen b) käsisammutuksen ja c) palon sammumisen todennäköisyydet eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3.

Henkilövahingot

Henkilövahinkojen syntymisessä on otettu huomioon sekä savun että rakenteiden pettämisen muodostama uhka rakennuksen sisällä oleville henkilöille. Henkilöille vaarallisen rakenteiden pettämisen kriteeriksi on valittu vaurioluokka 'vakavat vahingot'. Paikallisten, rajoittuneiden vaurioiden ei ajatella uhkaavan henkilöturvallisuutta, sillä nämä vauriot ovat palopatsaan yläpuolella, joten vaurioituneen katon osan alapuolella ei ole ihmisiä.

Henkilövahinkojen lukumäärän odotusarvot eri nopeuksilla kehittyville paloille eri aikakategorioissa teräs- ja liimapuurakenteille on koottu taulukkoihin G7 (teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys), G8 (teräsrakenne, nopea palonkehitys), G9 (liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys) ja G10 (liimapuurakenne, nopea palonkehitys). Tulokset esitetään graafisesti kuvissa G3 (teräsrakenne) ja G4 (liimapuurakenne).

Henkilövahinkojen kehittyminen ajan funktiona esitetään kuvissa G5 (teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys), G6 (teräsrakenne, nopea palonkehitys), G7 (liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys) ja G8 (liimapuurakenne, nopea palonkehitys).

Taulukko G7. Teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys ($t_0 = 300-600$ s): henkilövahinkojen odotusarvot.

F/V (1/m)	R (min) ¹⁾	T1	T2	T3
100	19	0.000008	0.0074	0
150	15	0.000008	0.0078	0
350	10	0.000009	0.0084	0

1) Arvot saatu liitteessä A esitetyllä tavalla.

Taulukko G8. Teräsrakenne, nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s): henkilövahinkojen odotusarvot.

F/V (1/m)	R (min) ¹⁾	T1	T2	T3
100	19	0.084	0.094	0
150	15	0.089	0.122	0
350	10	0.093	0.142	0

1) Arvot saatu liitteessä A esitetyllä tavalla.

Taulukko G9. Liimapuorakenne, normaali-hidas palonkehitys ($t_0 = 300-600$ s): henkilövahinkojen odotusarvot.

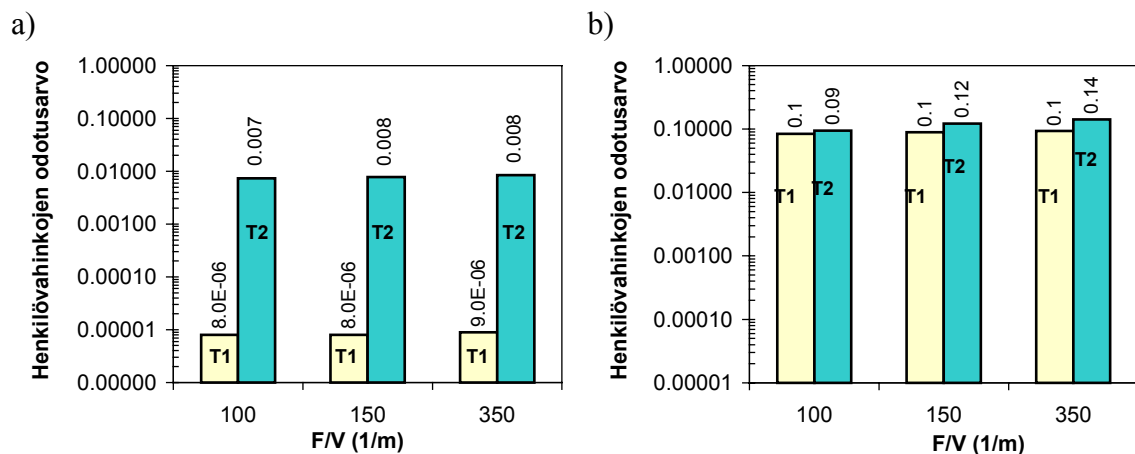
pituus (m)	R (min) ¹⁾	T1	T2	T3
10	55	0.000007	0.0070	0
12	40	0.000008	0.0074	0

1) Arvot saatu liitteessä A esitetyllä tavalla.

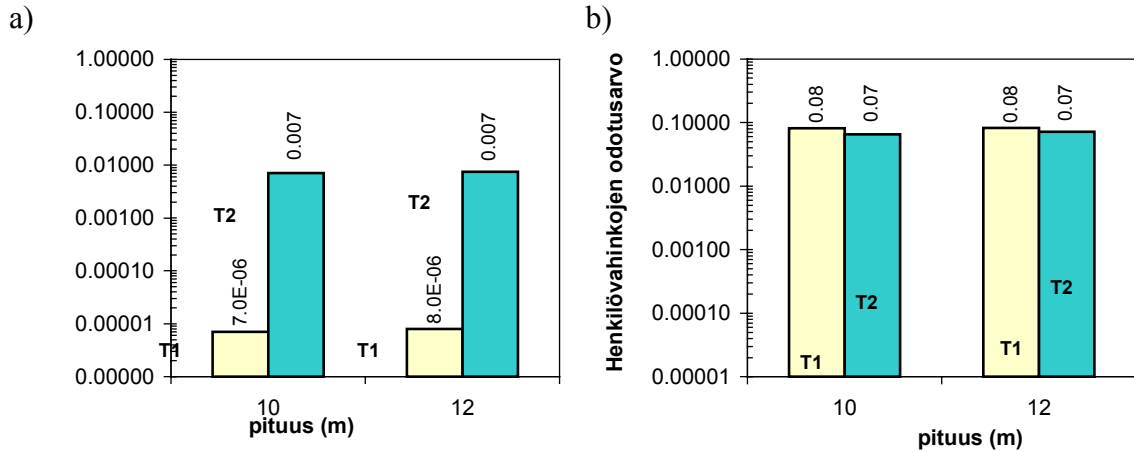
Taulukko G10. Liimapuorakenne, nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s): henkilövahinkojen odotusarvot.

pituus (m)	R (min) ¹⁾	T1	T2	T3
10	55	0.081	0.065	0
12	40	0.082	0.071	0

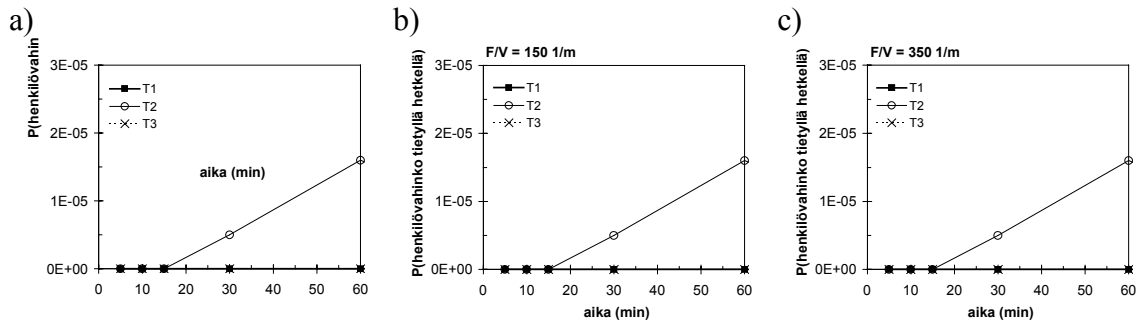
1) Arvot saatu liitteessä A esitetyllä tavalla.



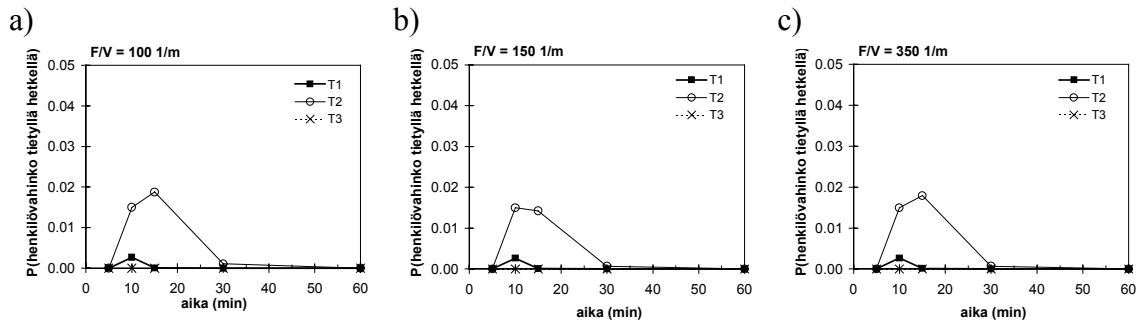
Kuva G3. Teräsrakenne, henkilövahinkojen odotusarvot, eri rakenteet ($F/V = 100, 150$ ja 350 1/m) ja aikakategoriat (T1, T2 ja T3): a) normaali-hidas palonkehitys ($t_0 = 300-600$ s) ja b) nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s). Aikakategoria T3 vastaa aikoja, jolloin rakennus ei ole miehitetty eikä siinä siten voi syntyä henkilövahinkoja.



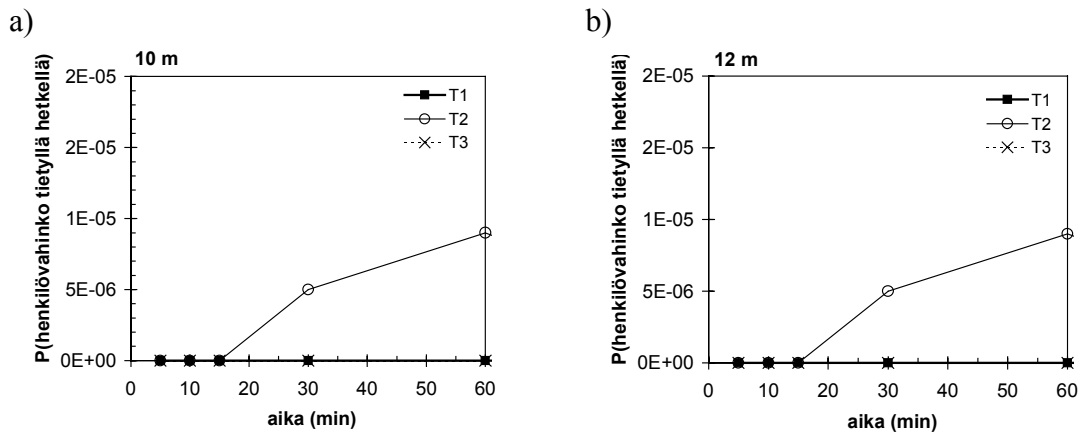
Kuva G4. Liimapuurakenne, henkilövahinkojen odotusarvot, eri rakenteet (pituus = 10 m ja 12 m) ja aikakategoriat (T1, T2 ja T3): a) normaali-hidas palonkehitys ($t_0 = 300-600$ s) ja b) nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s). Aikakategoria T3 vastaa aikoja, jolloin rakennus ei ole miehitetty eikä siinä siten voi syntyä henkilövahinkoja.



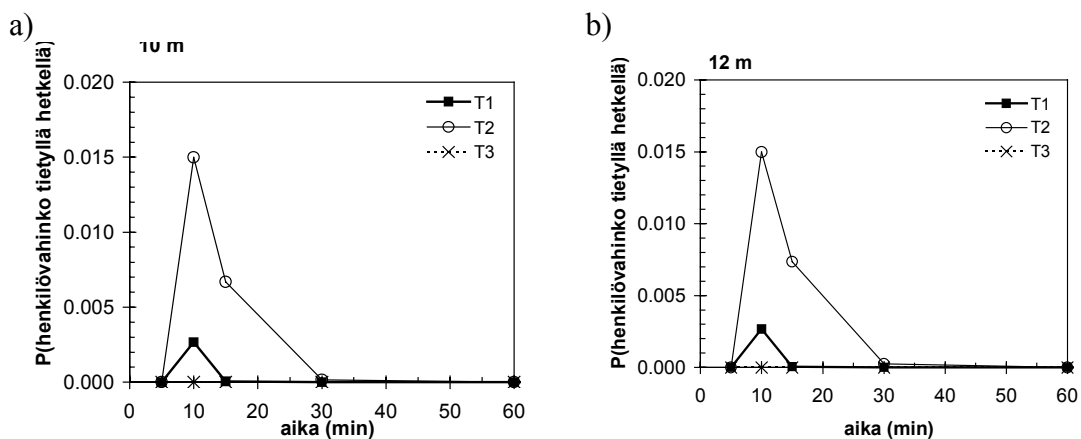
Kuva G5. Teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys, todennäköisyys sille, että tietyllä hetkellä syntyy henkilövahinko eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) $F/V = 100$ 1/m, b) $F/V = 150$ 1/m ja c) $F/V = 350$ 1/m.



Kuva G6. Teräsrakenne, nopea palonkehitys, todennäköisyys sille, että tietyllä hetkellä syntyy henkilövahinko eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) $F/V = 100 \text{ 1/m}$, b) $F/V = 150 \text{ 1/m}$ ja c) $F/V = 350 \text{ 1/m}$.



Kuva G7. Liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys, todennäköisyys sille, että tietyllä hetkellä syntyy henkilövahinko eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) pituus 10 m ja b) pituus 12 m.



Kuva G8. Liimapuurakenne, nopea palonkehitys, todennäköisyys sille, että tietyllä hetkellä syntyy henkilövahinko eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) pituus 10 m ja b) pituus 12 m.

Omaisuuksvahingot

Teräsrakenteille omaisuusvahingon on arvioitu syntyvän aina kun rakenteen lämpötila nousee yli 600 °C:n ja liimapuukurakenteille, kun palorasitus on jatkunut riittävän voimakkaana riittävän pitkän aikaa, jotta palkki on hiiltynyt niin paljon, että se ei enää kannu. Vaurioiden todennäköisyys on laskettu Monte Carlo -simulointia käyttäen useista tuhansista erilaisista mitoituspaloista. Riippuen siitä, onko vaurion aiheuttaneen palon laajuus pieni (liekit eivät ulotu yli 5 m:n päähän palosta) vai suuri (liekkien ulottuvuus yli 5 m), katsotaan syntyneen vaurion olevan joko rajoitettu (pieni vaurion laajuus) tai vakava (suuri vaurion laajuus).

Taulukoissa G11–G14 esitetään omaisuusvahingot tässä työssä tarkasteltua paloskenaariota (ks. luku 4) vastaavina todennäköisyyksinä (omaisuusvahinkojen syntymisen todennäköisyys siinä tapauksessa, että rakennuksessa on syttynyt esitettyä paloskenaariota vastaava tulipalo). Taulukoidut tiedot vastaavat eri nopeuksilla kehittyviä paloja eri aikakategorioissa teräs- ja liimapuukurakenteille seuraavasti: G11 (teräsrakenne, normaali–hidas palonkehitys), G12 (teräsrakenne, nopea palonkehitys), G13 (liimapuukurakenne, normaali–hidas palonkehitys) ja G14 (liimapuukurakenne, nopea palonkehitys). Tulokset on esitetään graafisesti kuvissa G9 (teräsrakenne, normaali–hidas palonkehitys), G10 (teräsrakenne, nopea palonkehitys), G11 (liimapuukurakenne, normaali–hidas palonkehitys) ja G12 (liimapuukurakenne, nopea palonkehitys).

Omaisuuksvahinkojen kehittyminen ajan funktiona esitetään kuvissa G13 (teräsrakenne, normaali–hidas palonkehitys), G14 (teräsrakenne, nopea palonkehitys), G15 (liimapuukurakenne, normaali–hidas palonkehitys) ja G16 (liimapuukurakenne, nopea palonkehitys).

Taulukko G11. Teräsrakenne, normaali–hidas palonkehitys ($t_0 = 300–600$ s): omaisuusvahinkojen todennäköisyydet tässä työssä tarkastellussa paloskenaariossa.

F/V (1/m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	Vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.0006	0.0002	0.0004	0.0639	0.0116	0.0473	0.1374	0.0357	0.1017
150	15	0.0006	0.0002	0.0004	0.0661	0.0172	0.0489	0.1420	0.0369	0.1051
350	10	0.0006	0.0002	0.0004	0.0661	0.0172	0.0489	0.1420	0.0369	0.1051

Taulukko G12. Teräsrakenne, nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s): omaisuusvahinkojen todennäköisyydet tässä työssä tarkastellussa paloskenaariossa.

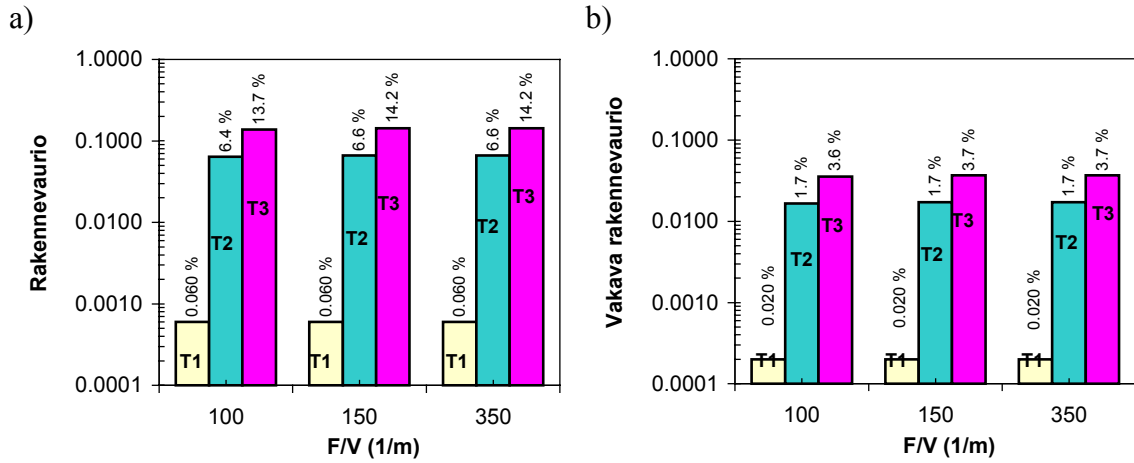
F/V (1/m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
100	19	0.2140	0.1284	0.0856	0.5199	0.3120	0.2079	0.8643	0.5186	0.3457
150	15	0.2141	0.1284	0.0857	0.5200	0.3120	0.2081	0.8644	0.5186	0.3459
350	10	0.2203	0.1284	0.0919	0.5351	0.3120	0.2231	0.8868	0.5186	0.3683

Taulukko G13. Liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys ($t_0 = 300-600$ s): omaisuusvahinkojen todennäköisyydet tässä työssä tarkastellussa paloskenaariossa.

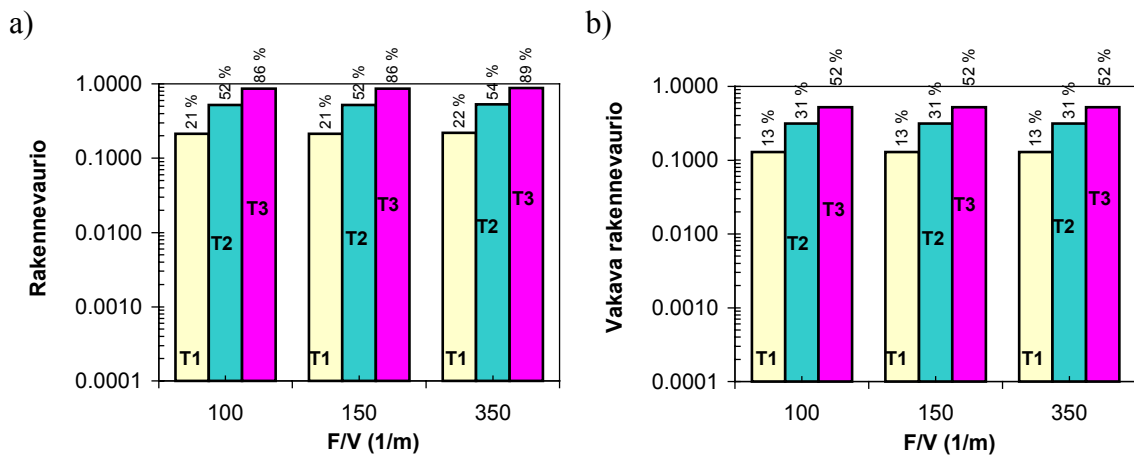
pituus (m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.0002	0.0001	0.0001	0.0235	0.0061	0.0174	0.0504	0.0131	0.0373
12	40	0.0003	0.0001	0.0002	0.0289	0.0074	0.0215	0.0614	0.0159	0.0455

Taulukko G14. Liimapuurakenne, nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s): omaisuusvahinkojen todennäköisyydet tässä työssä tarkastellussa paloskenaariossa.

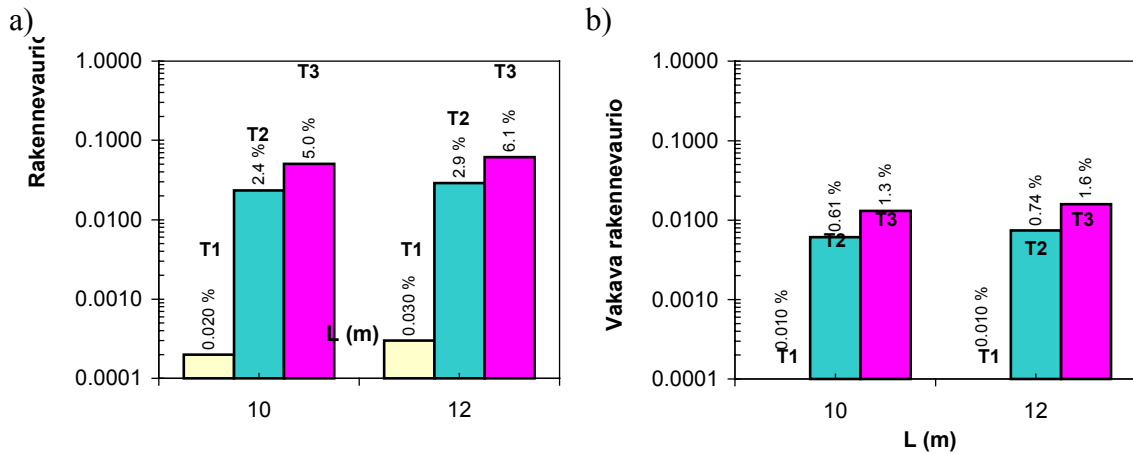
pituus (m)	R (min)	T1			T2			T3		
		vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.	vaurio	vakava	rajoit.
10	55	0.0743	0.0446	0.0297	0.1806	0.1084	0.0722	0.3002	0.1801	0.1201
12	40	0.0901	0.0541	0.0360	0.2189	0.1313	0.0876	0.3639	0.2183	0.1456



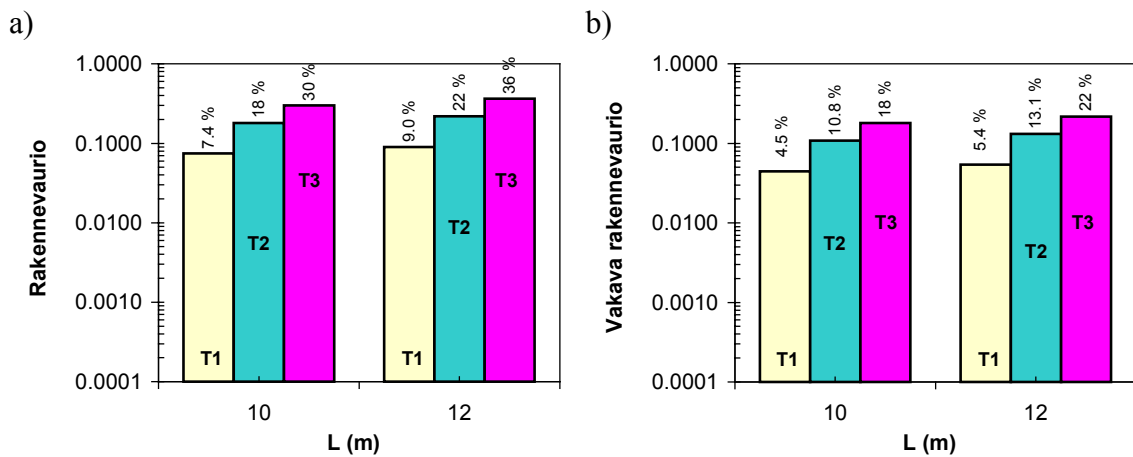
Kuva G9. Teräsrakenne, normaali–hidas palonkehitys ($t_0 = 300\text{--}600$ s): todennäköisyydet sille, että palossa syntyy omaisuusvahinko, eri rakenteet ($F/V = 100, 150$ ja 350 l/m) ja aikakategoriat (T1, T2 ja T3). a) Vaurio (vakava ja rajoitettu) ja b) vakava vaurio.



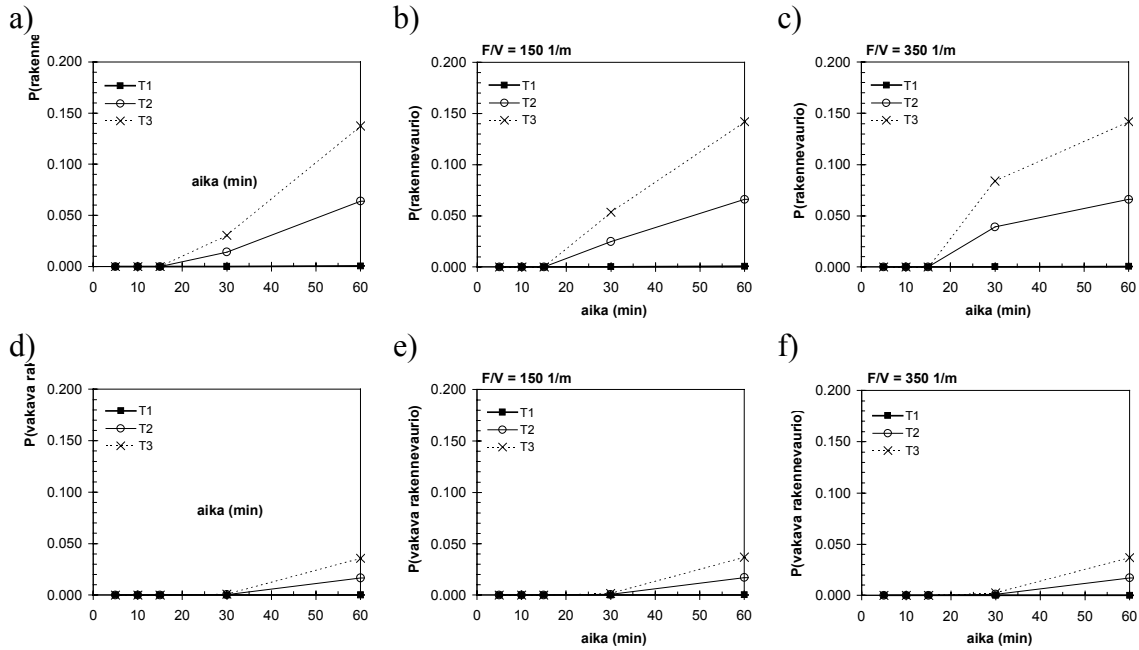
Kuva G10. Teräsrakenne, nopea palonkehitys ($t_0 = 120\text{--}180$ s): todennäköisyydet sille, että palossa syntyy omaisuusvahinko, eri rakenteet ($F/V = 100, 150$ ja 350 l/m) ja aikakategoriat (T1, T2 ja T3). a) Vaurio (vakava ja rajoitettu) ja b) vakava vaurio.



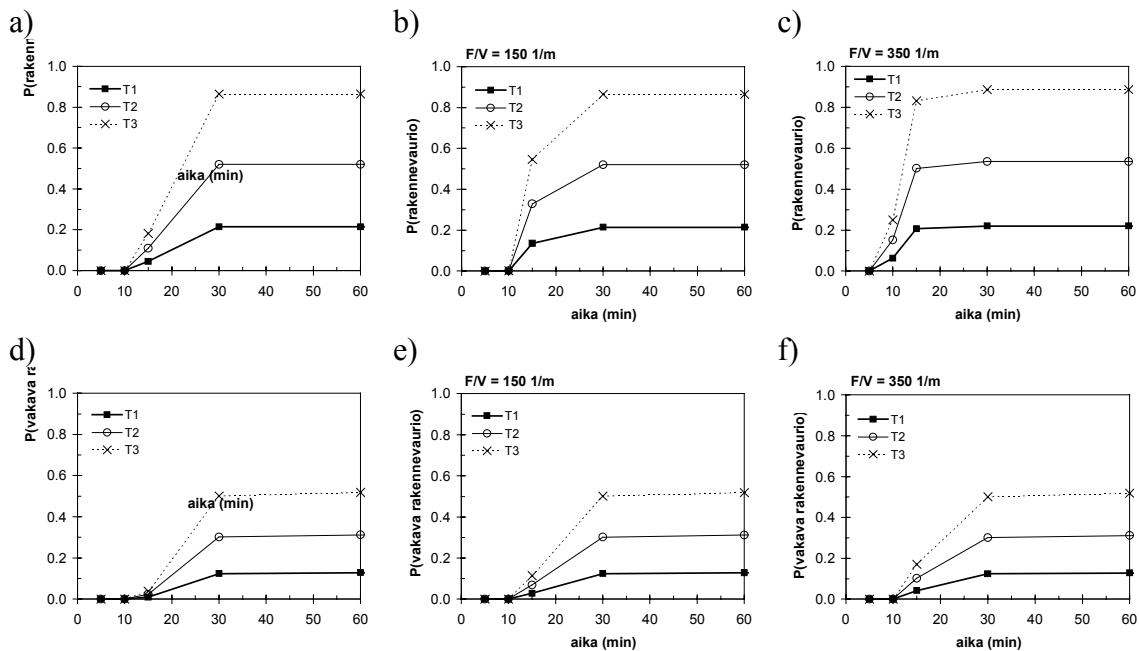
Kuva G11. Liimapuukurakenne, normaali-hidas palonkehitys ($t_0 = 300-600$ s): todennäköisyydet sille, että palossa syntyy omaisuusvahinko, eri rakenteet (10 m, 12 m) ja aikakategoriat (T1, T2 ja T3). a) Vaurio (vakava ja rajoitettu) ja b) vakava vaurio.



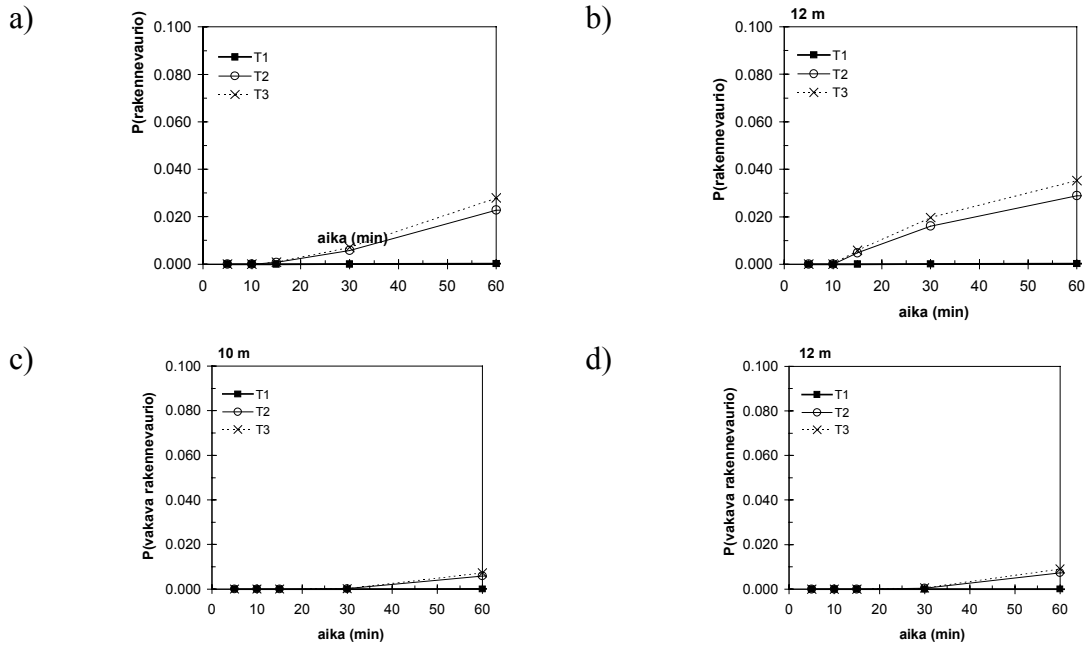
Kuva G12. Liimapuukurakenne, nopea palonkehitys ($t_0 = 120-180$ s): todennäköisyydet sille, että palossa syntyy omaisuusvahinko, eri rakenteet (10 m, 12 m) ja aikakategoriat (T1, T2 ja T3). a) Vaurio (vakava ja rajoitettu) ja b) vakava vaurio.



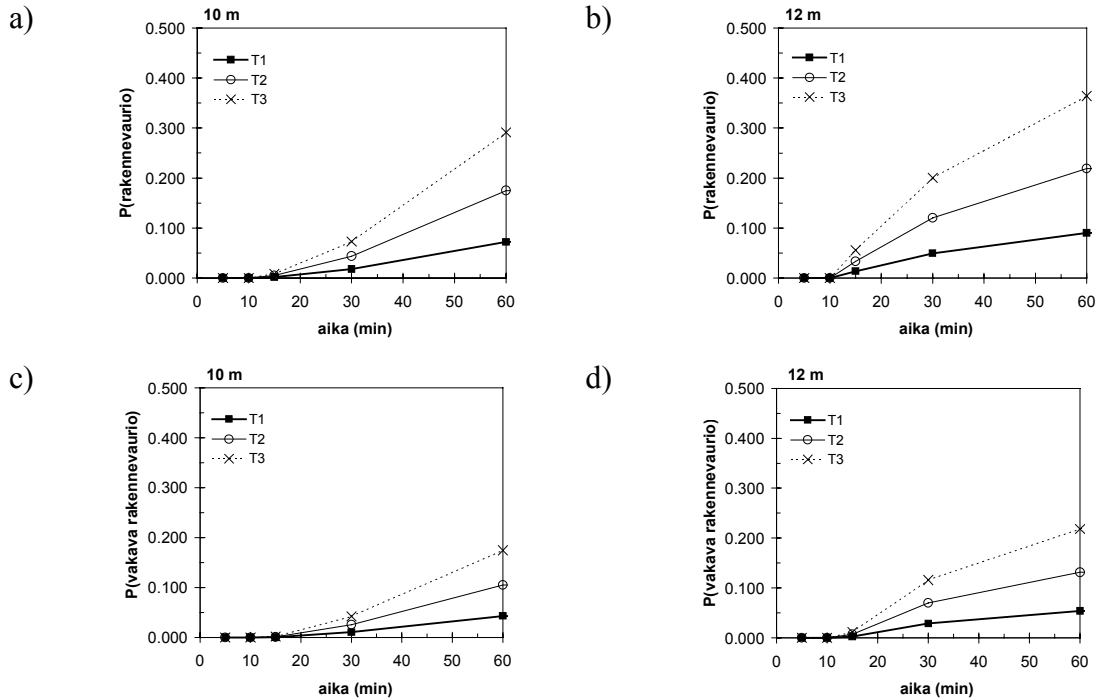
Kuva G13. Teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys, omaisuusvahingon syntymisen todennäköisyydet eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) $F/V = 100$ 1/m, vaurio (vakava ja rajoittunut); b) $F/V = 150$ 1/m, vaurio (vakava ja rajoittunut) ja c) $F/V = 350$ 1/m, vaurio (vakava ja rajoittunut) sekä d) $F/V = 100$ 1/m, vakava vaurio; e) $F/V = 150$ 1/m, vakava vaurio ja f) $F/V = 350$ 1/m, vakava vaurio.



Kuva G14. Teräsrakenne, nopea palonkehitys, omaisuusvahingon syntymisen todennäköisyydet eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) $F/V = 100$ 1/m, vaurio (vakava ja rajoittunut); b) $F/V = 150$ 1/m, vaurio (vakava ja rajoittunut) ja c) $F/V = 350$ 1/m, vaurio (vakava ja rajoittunut) sekä d) $F/V = 100$ 1/m, vakava vaurio; e) $F/V = 150$ 1/m, vakava vaurio ja f) $F/V = 350$ 1/m, vakava vaurio.



Kuva G15. Liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys, omaisuusvahingon syntymisen todennäköisyydet eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) pituus 10 m, vaurio (vakava ja rajoittunut); b) pituus 12 m, vaurio (vakava ja rajoittunut) sekä c) pituus 10 m, vakava vaurio ja d) pituus 12 m, vakava vaurio.



Kuva G16. Liimapuurakenne, nopea palonkehitys, omaisuusvahingon syntymisen todennäköisyydet eri aikakategorioissa T1, T2 ja T3: a) pituus 10 m, vaurio (vakava ja rajoittunut); b) pituus 12 m, vaurio (vakava ja rajoittunut) sekä c) pituus 10 m, vakava vaurio ja d) pituus 12 m, vakava vaurio.

Liite H: Erilaisten paloturvallisuusvarustelujen vertailu

Työssä tutkittiin rakennuksen paloturvallisuusvarustelun vaikutusta esimerkkinä olevan teollisuusrakennuksen tulipaloriskeihin tarkastelemalla neljää erilaista toteutusvaihtoehtoa, jotka poikkeavat toisistaan automaattisen hälytyksen, alkusammutuskaluston ja savunpoistoluukkujen osalta. Sprinklereitä ei ollut asennettu mihinkään näistä neljästä vaihtoehdosta. Kutakin vaihtoehtoa (D1, D2, D3, D5) tarkastellaan eri vuorokaudenaikoina (T1, T2, T3) ja eri rakennevaihtoehdolle (teräspalkit F/V 100, 150, 350 1/m ja liimapuupalkit 10 m, 12 m).

Suunnitteluvaihtoehdot

Tässä liitteessä tutkittavat vaihtoehdot ovat:

- D1: Työn esimerkkitapaus: Rakennukseen on asennettu automaattinen palohälytinsjärjestelmä, käsisammuttimet ja savunpoistoluukut, E2:n paloturvallisuustaso 2.
- D2: Kuten yllä oleva esimerkkitapaus, mutta automaattista hälytysjärjestelmää ei ole asennettu, E2:n paloturvallisuustaso 1.
- D3: Kuten D1, mutta ei automaattista hälytysjärjestelmää eikä käsisammuttimia. Tämä vaihtoehto ei ole sallittu E2:n mukaan.
- D5: Kuten D1, mutta ei savunpoistosysteemiä, E2:n paloturvallisuustaso 2.

Palon kehittyminen eri suunnitteluvaihtoehdoissa

Taulukoihin H1–H6 on koottuna palon kehitys eri tarkasteluaikoina (T1, T2, T3) molemmille paloluokille (normaali–hidas palonkehitys, nopea palonkehitys). Kullekin suunnitteluvaihtoehdolle on annettu todennäköisyydet sille, että palo on havaittu ko. hetkeen mennessä, palo on sammutettu (käsisammutus) ko. hetkeen mennessä ja että rakennuksessa palaa vielä ko. hetkenä.

Taulukko H1. Normaali–hidas palonkehitys, arkipäivät (T1).

P(palo havaittu)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.979126	0.997100	0.999850	1	1	1
D2	0.979000	0.995000	0.999000	1	1	1
D3	0.979000	0.995000	0.999000	1	1	1
D5	0.979126	0.997100	0.999850	1	1	1
P(käsisammutus)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.930170	0.013481	0.055638	0.000071	0	0
D2	0.930050	0.012000	0.056381	0.000157	0	0
D3	0	0	0.989010	0.001099	0	0
D5	0.930170	0.013481	0.055638	0.000071	0	0
P(rakennuksessa palaa)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.069830	0.056350	0.000712	0.000641	0.000224	0
D2	0.069950	0.057950	0.001570	0.001413	0.000494	0
D3	1	1	0.010990	0.009891	0.003462	0
D5	0.069830	0.056350	0.000712	0.000641	0.000224	0

Taulukko H2. Normaali–hidas palonkehitys, arki-illat (T2).

P(palo havaittu)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.006000	0.512800	0.928000	0.998000	0	0
D2	0	0.160000	0.520000	0.980000	0	0
D3	0	0.160000	0.520000	0.980000	0	0
D5	0.006000	0.512800	0.928000	0.998000	0	0
P(käsisammutus)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.005400	0.253400	0.662508	0.007669	0	0
D2	0	0.080000	0.435600	0.046440	0	0
D3	0	0	0.514800	0.046520	0	0
D5	0.005400	0.253400	0.662508	0.007669	0	0
P(rakennuksessa palaa)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.994600	0.741200	0.078692	0.071023	0.024858	0
D2	1	0.920000	0.484400	0.437960	0.153286	0
D3	1	1	0.485200	0.438680	0.153538	0
D5	0.994600	0.741200	0.078692	0.071023	0.024858	0

Taulukko H3. Normaali–hidas palonkehitys, yöt ja viikonloput (T3).

P(palo havaittu)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.006000	0.420000	0.850000	0.900000	0.905000	0.905000
D2	0	0	0	0	0.050000	0.050000
D3	0	0	0	0	0.050000	0.050000
D5	0.006000	0.420000	0.850000	0.900000	0.905000	0.905000
P(käsisammutus)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0	0	0.841500	0.005850	0	0
D2	0	0	0	0	0	0
D3	0	0	0	0	0	0
D5	0	0	0.841500	0.005850	0	0
P(rakennuksessa palaa)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	1	1	0.158500	0.152650	0.053428	0
D2	1	1	1	1	0.350000	0
D3	1	1	1	1	0.350000	0
D5	1	1	0.158500	0.152650	0.053428	0

Taulukko H4. Nopea palonkehitys, arkipäivät (T1).

P(palo havaittu)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.999560	0.999998	1	1	1	1
D2	0.999000	0.999980	1	1	1	1
D3	0.999000	0.999980	1	1	1	1
D5	0.999560	0.999998	1	1	1	1
P(käsisammutus)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.749670	0.000009	0.025032	0	0	0
D2	0.749250	0.000020	0.025073	0	0	0
D3	0	0	0	0	0	0
D5	0.749670	0.000009	0.025032	0	0	0
P(rakennuksessa palaa)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.250330	0.250321	0.225289	0.200507	0	0
D2	0.250750	0.250730	0.225657	0.200835	0	0
D3	1	1	0.900000	0.801000	0	0
D5	0.250330	0.250321	0.225289	0.200507	0	0

Taulukko H5. Nopea palonkehitys, arki-illat (T2).

P(palo havaittu)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.780000	0.993000	0.998000	0	0	0
D2	0.500000	0.930000	0.980000	0	0	0
D3	0.500000	0.930000	0.980000	0	0	0
D5	0.780000	0.993000	0.998000	0	0	0
P(käsisammutus)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.390000	0.002130	0.060587	0	0	0
D2	0.250000	0.004300	0.072570	0	0	0
D3	0	0	0.098000	0	0	0
D5	0.390000	0.002130	0.060587	0	0	0
P(rakennuksessa palaa)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.610000	0.607870	0.547283	0.487082	0	0
D2	0.750000	0.745700	0.673130	0.599086	0	0
D3	1	1	0.902000	0.802780	0	0
D5	0.610000	0.607870	0.547283	0.487082	0	0

Taulukko H6. Nopea palonkehitys, yöt ja viikonloput (T3).

P(palo havaittu)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0.560000	0.900000	0.902500	0.925000	0.925000	0.925000
D2	0	0	0.025000	0.250000	0.250000	0.250000
D3	0	0	0.025000	0.250000	0.250000	0.250000
D5	0.560000	0.900000	0.902500	0.925000	0.925000	0.925000
P(käsisammutus)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	0	0	0.090250	0	0	0
D2	0	0	0.002500	0	0	0
D3	0	0	0.002500	0	0	0
D5	0	0	0.090250	0	0	0
P(rakennuksessa palaa)						
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min
D1	1	1	0.909750	0.809678	0	0
D2	1	1	0.997500	0.887775	0	0
D3	1	1	0.997500	0.887775	0	0
D5	1	1	0.909750	0.809678	0	0

Taulukoista H1–H6 havaitaan, että hitaalla–normaalilla nopeudella ($t_0 = 300\text{--}600$ s) kasvavissa paloissa iltaisin ja öisin automaattinen hälytyslaitteisto mahdollistaa palon sammuttamisen, ennen kuin se ehtii kasvaa liian suureksi. Päiväsaikaan automaattisella palohälyttimillä ei ole suurta merkitystä, sillä runsaslukuinen henkilökunta huomaa palon aistinvaraisesti varsin nopeasti. Päivisin palon onnistuu sammuttamaan henkilökunta varsin tehokkaasti (jos on sammuttimet) ja palokuntakin onnistuu hyvin, koska palo ei ehdi kasvaa liian suureksi.

Nopeasti kasvavissa paloissa ($t_0 = 120\text{--}180$ s) ei automaattiselle hälytyslaitteistolla ole palon sammuttamisen kannalta yhtä suurta merkitystä kuin hitaammin kasvavissa paloissa. Tämä johtuu siitä, että palo kasvaa nopeasti niin suureksi, että henkilökunta ei sitä onnistu hallitsemaan. Lisäksi palokunnan tullessa paikalle palo on jo kasvanut niin suureksi, että sen sammuttaminen on jo epätodennäköistä. Käsiammuttimista on selvästi hyötyä päivisin, jolloin rakennuksen miehitys on suuri. Iltaisin palo pääsee kasvamaan huomaamatta turhan suureksi, jotta sitä ehdittäisiin tehokkaasti sammuttamaan. Nopeasti kasvavissa paloissa henkilökunnan sammutustoimenpiteiden onnistumisella on suurin vaikutus palonkehitykseen. Hitaammin kasvavissa paloissa palokuntakin ehtii omilla toimillaan rajoittamaan tulipalon kasvua.

Paloriskit eri suunnitteluvaihtoehdoissa

Taulukossa H7 ovat tulokset henkilöriskeille päiväsaikaan (T1) syttyville paloille ja taulukossa H8 iltaisin (T2) syttyville paloille. Öisin ja viikonloppuisin (T3) ei synny henkilövahinkoja, koska rakennus on silloin miehittämätön. Vastaavasti taulukoissa H9–H11 ovat omaisuusvahingot kullekin kolmelle aikakategorialle (T1, T2, T3). Nämä tulokset ovat myös esitettyinä graafisesti kuvissa H1–H5. Eri miehitys- ja paloskenaariorien tulokset yhdistämällä saadut riskiarviot esitetään taulukoissa H12 ja kuvassa H6.

Taulukoista ja kuvista voidaan havaita seuraavat asiat:

- Nopea palonkehitys
 - Savunpoisto vaadittava, muuten henkilöriskit ovat liian suuret.
 - Alkusammutusvälineet pienentävät henkilöriskejä.

- Normaali–hidas palonkehitys:
 - Savunpoisto vaadittava, muuten henkilöriskit ovat liian suuret.
 - Tapauksissa D2 ja D3 tulee liikaa henkilövahinkoja iltaisin, eli automaattinen hälytys pelastaa iltaisin. (Ilman automaattista hälytystä ei käsiammuttimilla ole merkitystä, sillä paloa ei huomata, joten sitä ei myöskään sammuteta.)

Taulukko H7. Aikakategoria T1: Henkilövahinkojen odotusarvojen vertailu eri rakennevaihtoehtojen ja paloturvallisuusvaihtoehtojen välillä. Kaikkialla muualla kuin tässä liitteessä on tarkasteltavana paloturvallisuusvaihtoehtona ollut tapaus D1.

Arkipäivät, nopea palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.084042	0.089224	0.092982	0.081456	0.082148
D2	0.084179	0.089370	0.093133	0.081589	0.082282
D3	0.334972	0.354216	0.368167	0.325370	0.327938
D5	0.815430	0.819515	0.822476	0.813392	0.813938
Arkipäivät, normaali–hidas palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.000008	0.000008	0.000009	0.000007	0.000008
D2	0.000017	0.000018	0.000019	0.000016	0.000017
D3	0.000116	0.000123	0.000132	0.000110	0.000116
D5	0.000069	0.000069	0.000070	0.000069	0.000069

Taulukko H8. Aikakategoria T2: Henkilövahinkojen odotusarvojen vertailu eri rakennevaihtoehtojen ja paloturvallisuusvaihtoehtojen välillä. Kaikkialla muualla kuin tässä liitteessä on tarkasteltavana paloturvallisuusvaihtoehtona ollut tapaus D1.

Arki-illat, nopea palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.093977	0.122092	0.142475	0.065035	0.071181
D2	0.114967	0.149077	0.173807	0.079853	0.087309
D3	0.152828	0.197389	0.229696	0.106956	0.116696
D5	0.643485	0.656624	0.666149	0.629960	0.632832
Arki-illat normaali–hidas palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.007395	0.007819	0.008384	0.007048	0.007445
D2	0.045508	0.048053	0.051443	0.043426	0.045805
D3	0.045582	0.048132	0.051527	0.043497	0.045880
D5	0.068730	0.069134	0.069673	0.068399	0.068777

Taulukko H9. Aikakategoria T1: Omaisuusvahinkojen todennäköisyyksien vertailu eri rakennevaihto-ehtojen ja paloturvallisuusvaihtoehtojen välillä. Kaikkialla muualla kuin tässä liitteessä on tarkasteltavana paloturvallisuusvaihtoehtona ollut tapaus D1.

Arkipäivät, nopea palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.214025	0.214075	0.220283	0.074345	0.090116
D2	0.214374	0.214425	0.220643	0.074467	0.090263
D3	0.855000	0.855200	0.880000	0.297000	0.360000
D5	0.214025	0.214075	0.220283	0.074345	0.090116
Arkipäivät normaali–hidas palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.000577	0.000596	0.000596	0.000212	0.000261
D2	0.001271	0.001314	0.001314	0.000468	0.000575
D3	0.008902	0.009199	0.009199	0.003274	0.004023
D5	0.000577	0.000596	0.000596	0.000212	0.000261

Taulukko H10. Aikakategoria T2: Omaisuusvahinkojen todennäköisyyksien vertailu eri rakennevaihto-ehtojen ja paloturvallisuusvaihtoehtojen välillä. Kaikkialla muualla kuin tässä liitteessä on tarkasteltavana paloturvallisuusvaihtoehtona ollut tapaus D1.

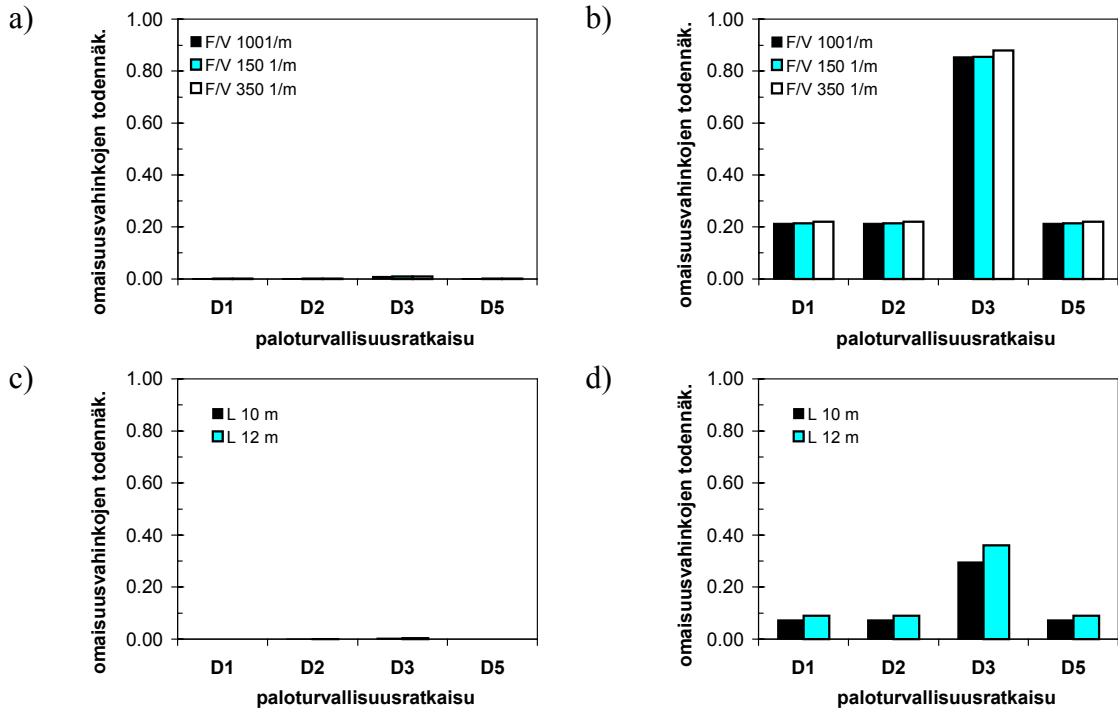
Arki-illat, nopea palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.519919	0.520040	0.535066	0.180603	0.218913
D2	0.639473	0.639619	0.657616	0.222133	0.269252
D3	0.856900	0.857096	0.881400	0.297660	0.360800
D5	0.519919	0.520040	0.535066	0.180603	0.218913
Arki-illat normaali–hidas palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.063921	0.066051	0.066051	0.023507	0.028877
D2	0.394164	0.407303	0.407303	0.144945	0.178017
D3	0.394812	0.407972	0.407972	0.145183	0.178310
D5	0.063921	0.066051	0.066051	0.023507	0.028877

Taulukko H11. Aikakategoria T3: Omaisuusvahinkojen todennäköisyyksien vertailu eri rakennevaihto-ehtojen ja paloturvallisuusvaihtoehtojen välillä. Kaikkialla muualla kuin tässä liitteessä on tarkasteltavana paloturvallisuusvaihtoehtona ollut tapaus D1.

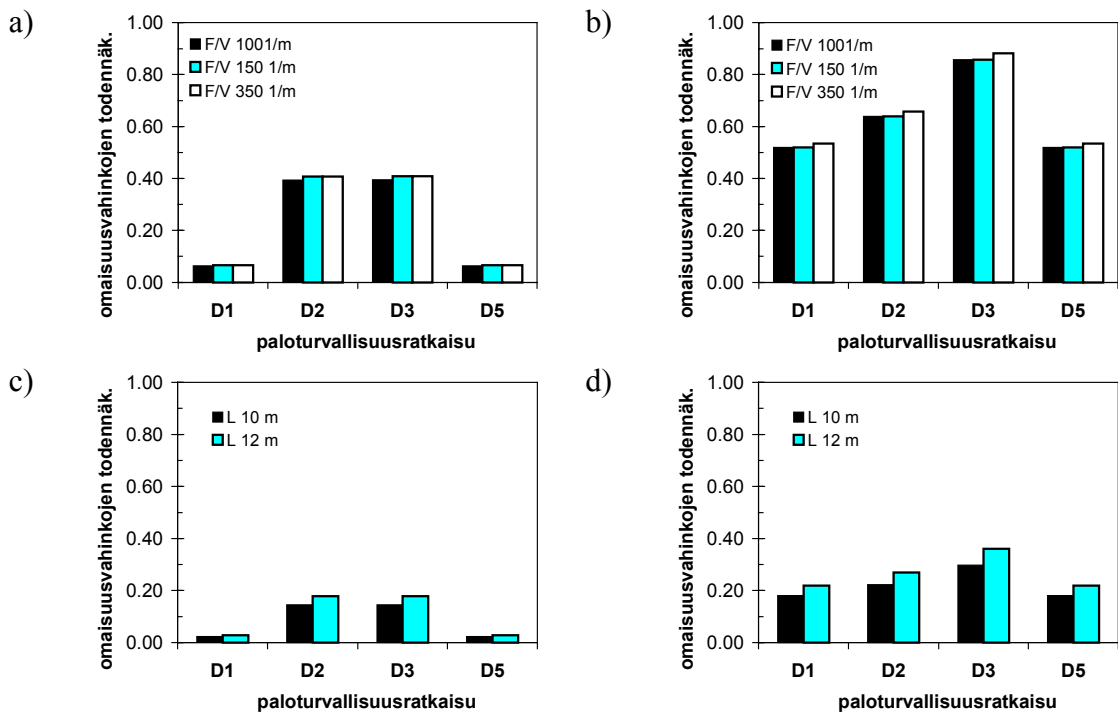
Yöt ja viikonloput, nopea palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.864263	0.864443	0.886825	0.300218	0.363900
D2	0.947625	0.947630	0.948250	0.329175	0.399000
D3	0.947625	0.947630	0.948250	0.329175	0.399000
D5	0.864263	0.864443	0.886825	0.300218	0.363900
Yöt ja viikonloput, normaali-hidas palonkehitys					
	F/V 100	F/V 150	F/V 350	10 m	12 m
D1	0.137385	0.141965	0.141965	0.050427	0.061417
D2	0.900000	0.930000	0.930000	0.330000	0.400000
D3	0.900000	0.930000	0.930000	0.330000	0.400000
D5	0.137385	0.141965	0.141965	0.050427	0.061417

Taulukko H12. Henkilövahinkojen odotusarvot ja omaisuusvahinkojen todennäköisyydet eri teräs- ja puurakenteille sekä paloturvallisuusvaihtoehtoille.

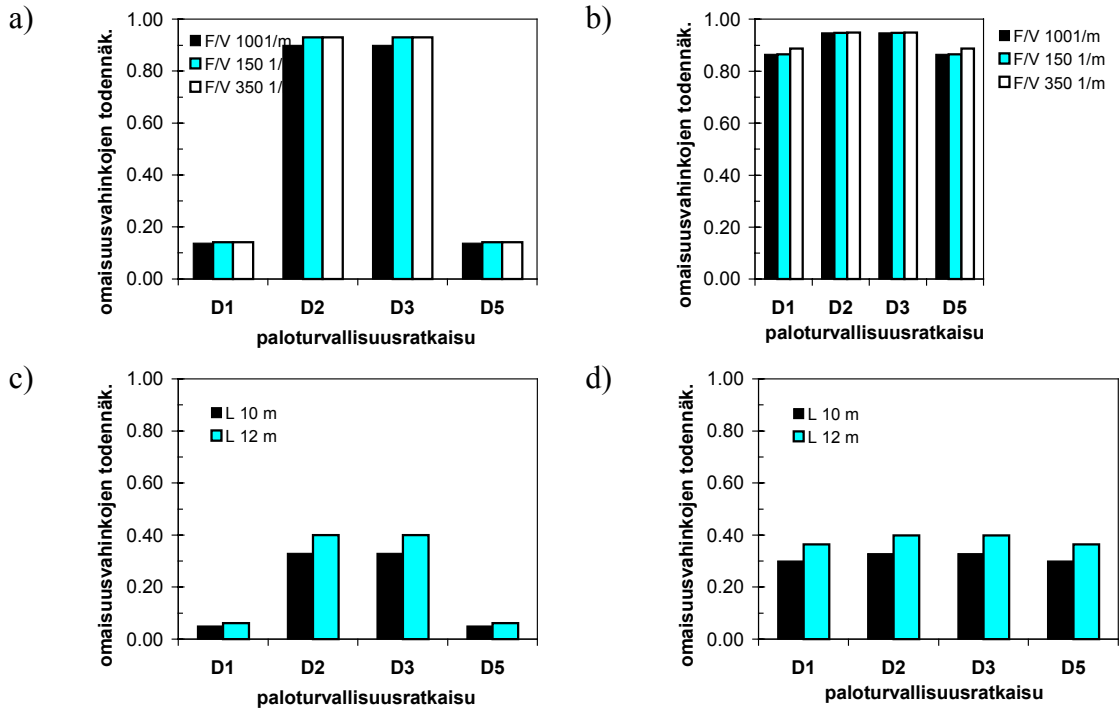
Henkilövahinkojen odotusarvot tulipaloa kohden (henkilövahinkojen määrä/tulipalo)					
	F/V 100 m ⁻¹	F/V 150 m ⁻¹	F/V 350 m ⁻¹	L 10 m	L 12 m
D1	0.0022	0.0024	0.0026	0.0020	0.0021
D2	0.0113	0.0120	0.0129	0.0107	0.0113
D3	0.0120	0.0128	0.0137	0.0114	0.0120
D5	0.0198	0.0200	0.0201	0.0197	0.0198
Omaisuusvahinkojen todennäköisyydet tulipaloa kohden (vakavien ja rajoitettujen vahinkojen yhteismäärä)					
	F/V 100 m ⁻¹	F/V 150 m ⁻¹	F/V 350 m ⁻¹	L 10 m	L 12 m
D1	0.092	0.095	0.095	0.034	0.041
D2	0.564	0.583	0.583	0.207	0.251
D3	0.568	0.587	0.587	0.208	0.253
D5	0.092	0.095	0.095	0.034	0.041



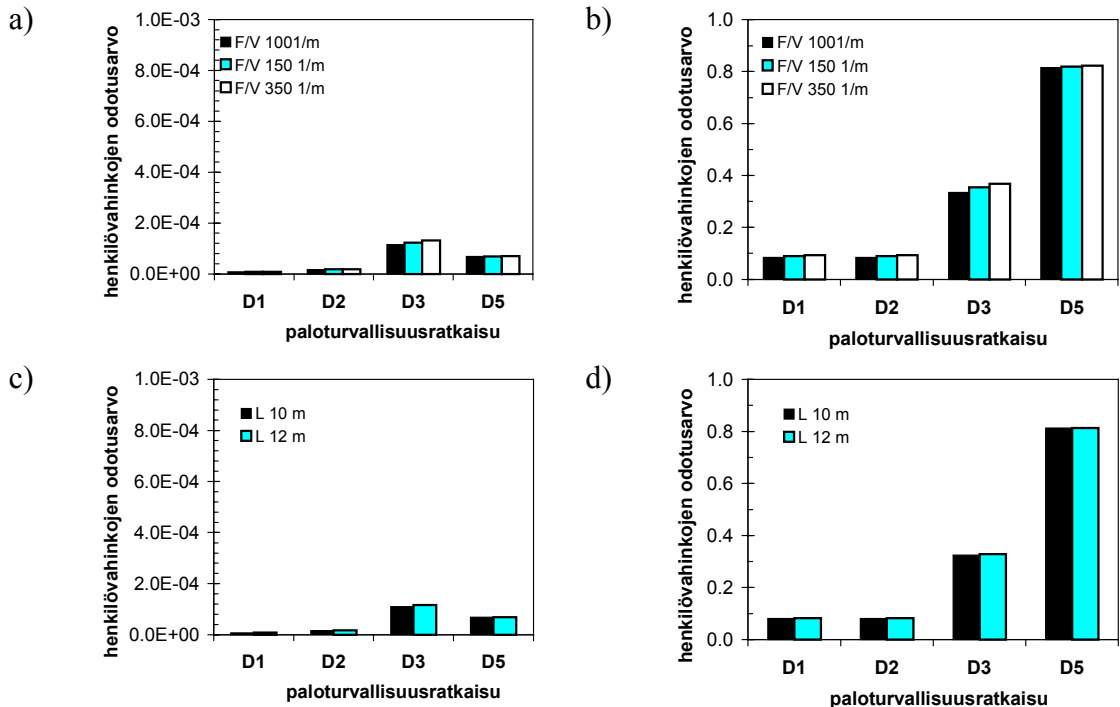
Kuva H1. Omaisuusvahinkojen todennäköisyydet aikakategoriassa T1. a) teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys; b) teräsrakenne, nopea palonkehitys; c) liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys ja d) liimapuurakenne, nopea palonkehitys



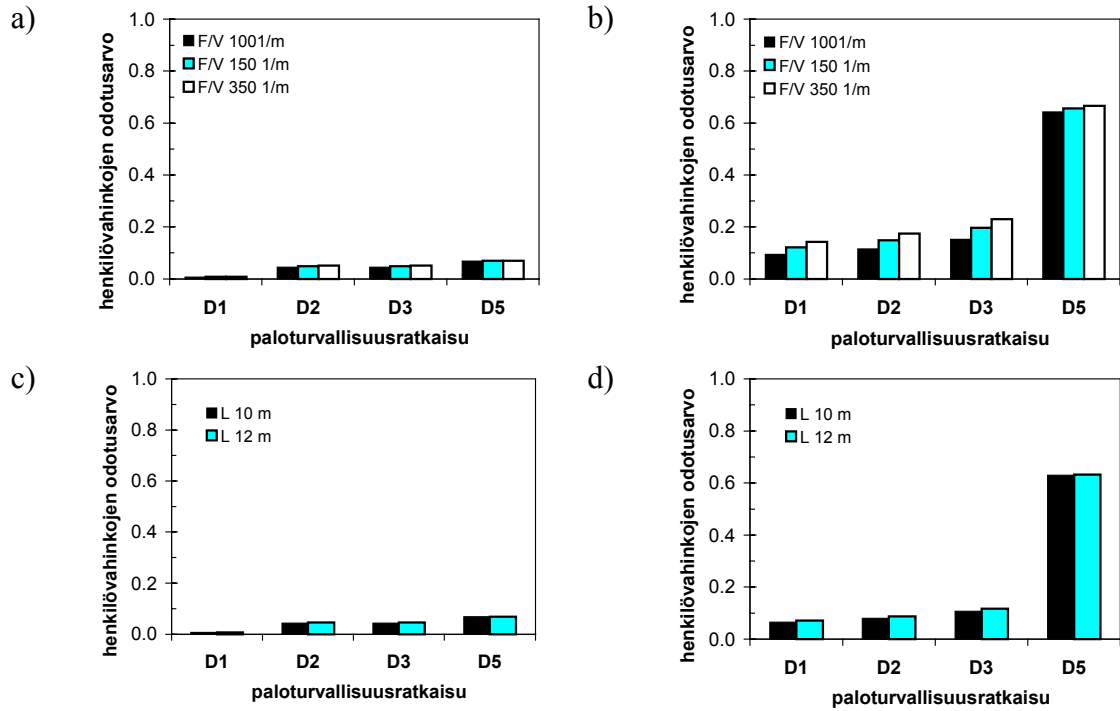
Kuva H2. Omaisuusvahinkojen todennäköisyydet aikakategoriassa T2. a) teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys; b) teräsrakenne, nopea palonkehitys; c) liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys ja d) liimapuurakenne, nopea palonkehitys



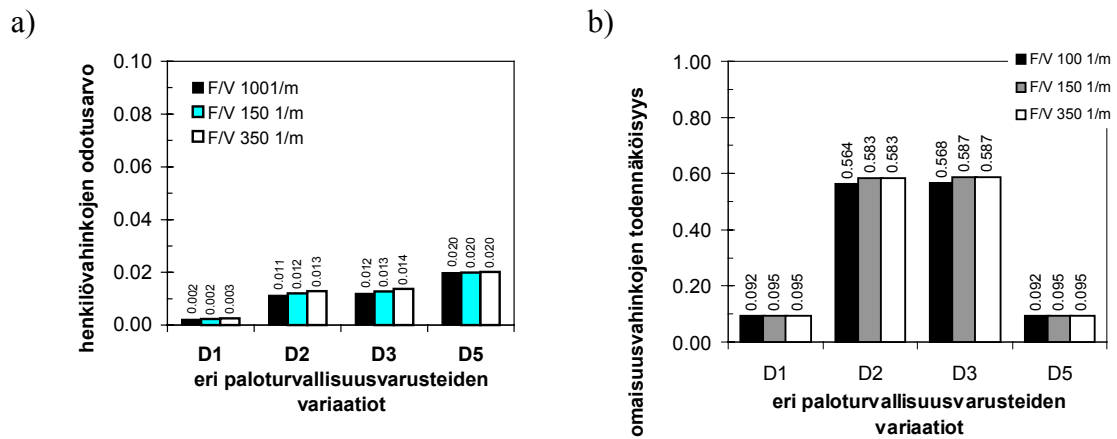
Kuva H3. Omaisuusvahinkojen todennäköisyydet aikakategoriassa T3. a) teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys; b) teräsrakenne, nopea palonkehitys; c) liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys ja d) liimapuurakenne, nopea palonkehitys



Kuva H4. Henkilövahinkojen odotusarvot aikakategoriassa T1. a) teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys; b) teräsrakenne, nopea palonkehitys; c) liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys ja d) liimapuurakenne, nopea palonkehitys

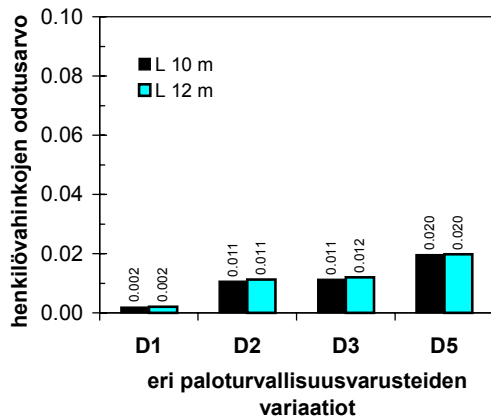


Kuva H5. Henkilövahinkojen odotusarvot aikakategoriassa T2. a) teräsrakenne, normaali-hidas palonkehitys; b) teräsrakenne, nopea palonkehitys; c) liimapuurakenne, normaali-hidas palonkehitys ja d) liimapuurakenne, nopea palonkehitys

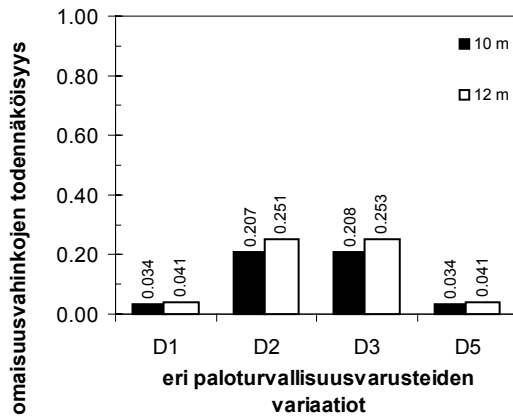


Kuva H6. Teräsrakenteet: a) henkilövahinkojen odotusarvot ja b) omaisuusvahinkojen todennäköisyydet eri rakenne- ja paloturvallisuusvaihtoehdoille.

a)



b)



Kuva H7. Puurakenteet: a) henkilövahinkojen odotusarvot ja b) omaisuusvahinkojen todennäköisyydet eri rakenne- ja paloturvallisuusvaihtoehdoille.

Johtopäätöksenä eri paloturvallisuusratkaisuista voidaan sanoa, että rakennukseen on vaadittava automaattinen savunpoisto sekä alkusammutusvälineet henkilöturvallisuuden parantamiseksi. Aineellisten vahinkojen pienentämiseksi automaattinen hälytysjärjestelmä on myöskin vaadittava (auttaa etenkin iltaisin ja öisin). Lisäksi käsisammuttimet vähentävät vahinkojen todennäköisyyttä nopeissa paloissa. Hitaissa paloissa palokunta ehtii torjumaan varsin hyvin aineellisia vahinkoja. Edellä olevat johtopäätökset sopivat yhtä hyvin kullekin tutkituista viidestä eri rakennevaihtoehdoista (3 palosuojaamatonta teräspalkkia, 2 liimapuupalkkia).



Tekijä(t) Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa			
Nimeke Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen			
Tiivistelmä Tässä tutkimuksessa kehitettiin malli tulipalojen aiheuttamien vahinkojen riskien suuruuden laskennalliseen arvioimiseen. Mallia on sovellettu sen selvittämiseen, miten yksikerroksisen teollisuushallin henkilö- ja omaisuusvahinkoriskit riippuvat rakenteiden palonkestävyydestä. Eri tekijöiden vertailemiseksi tutkittiin myös sitä, miten kohderakennuksen paloturvallisuusvarusteiden (hälytyksen, käsisammuttimien ja savunpoiston) eri muunnelmat vaikuttavat paloturvallisuuteen. Kehitetty riskianalyysimenetelmä edustaa uutta paloriskien arvioimisen lähestymistapaa, jossa palon kehittyminen ajan mukana otetaan huomioon kaikissa tarkastellun järjestelmän tapahtumien ja prosessien kuvauksissa. Menetelmä yhdistää palon aikana tapahtuvien eri prosessien kehittymisen mallit kuvaukseksi koko tulipalon kehityksestä. Mallin toiminta perustuu systeemin tapahtumapuumallin kuvaukseen, jonka perusteella tulipalon aikakehitys saadaan laskettua käsittelemällä järjestelmää Markovin prosessina. Riskien suuruus saadaan määritettyä, kun tulipalon ajallisen kehittymisen kuvaukseen liitetään palon mahdollisten seuraamusten kvantitatiivinen arviointi. Mallia sovellettiin henkilö- ja omaisuusvahinkojen riskien arviointiin korkeahkossa (sisäkorkeus 8 m) yksikerroksisessa teollisuusrakennuksessa, jossa palon voidaan olettaa pysyvän paikallisena. Tulokset osoittavat, että tämän esimerkkirakennuksen tapauksessa tarkastellut muutokset rakenteiden paloluokissa eivät vaikuttaneet käytännöllisesti katsoen lainkaan omaisuusriskeihin. Myös henkilöille koituvien riskien suhteen havaittiin rakenteiden vaikutuksen olevan merkityksättömän pieni etenkin, kun sitä verrataan muiden paloturvallisuuteen vaikuttavien tekijöiden merkitykseen.			
Avainsanat fire safety, fire protection, fire resistance, structures, risk analysis, statistics, Markov, Monte Carlo, industrial buildings, alarm systems, smoke exhaust systems, fault tree analysis			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Materiaalit ja tuotteet, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5935-5 (nid.) 951-38-5936-3 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero R9SU00767	
Julkaisu-aika Tammikuu 2002	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 95 s. + liitt. 51 s.	Hinta C
Projektin nimi STEELTIMBER2		Toimeksiantaja(t) Tekes, Rautaruukki Oyj, Teräsrakenneyhdistys ry, Wood Focus Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2123
VTT-TIED-2123

Author(s) Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebbar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa			
Title Influence of fire resistance of structures on fire safety in a single-storey industrial building Risk analysis using a time-dependent event-tree model			
Abstract <p>A model for quantitative analysis of fire risks has been developed. The model has been applied to a single-storey industrial building to assess quantitatively the influence of the fire resistance of the structures of the building to the risks associated with casualties and property damage. The influence of other factors affecting the fire safety besides the fire resistance, such as alarm system, manual extinguishers and smoke exhaust system, has also been addressed.</p> <p>The developed method represents a novel approach to analysis of fire risks in which the temporal evolution of the fire has been taken into account explicitly in the descriptions of the events and processes taking place during the fire incident. The model combines the different unit processes of the fire to an overall description of the evolution of the fire incident. The model is based on an event-tree description of the system, the time evolution of which is calculated by treating the system as a Markovian process. The risks are derived from the time-dependent description of the fire through incorporation of quantitative characterisations of the potential consequences.</p> <p>The model was applied to fire risk analysis of a single-storey industrial building with 8-m ceiling height, in which the fire can be assumed to remain localised through the whole fire incident. The results in this application example show that the risks associated with damage to property are virtually independent of the changes in the fire resistance of the structures. Also considering the risks to personnel, the influence of the fire resistance of the structures was found out to be negligibly small, especially when compared to influence of other factors affecting the fire safety of the building.</p>			
Keywords fire safety, fire protection, fire resistance, structures, risk analysis, statistics, Markov, Monte Carlo, industrial buildings, alarm systems, smoke exhaust systems, fault tree analysis			
Activity unit VTT Building and Transport, Building Materials and Products, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5935-5 (soft back ed.) 951-38-5936-3 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R9SU00767	
Date January 2002	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 95 p. + app. 51 p.	Price C
Name of project STEELTIMBER2		Commissioned by Tekes, Rautaruukki Oyj, Teräsrakenneyhdistys ry, Wood Focus Oy	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	