

RISKIEN ARVIOINTIIN POHJAUTUVA TOIMINNALLINEN PALOTURVALLISUUSSUUNNITTELU: TOIMISTORAKENNUSESIMERKKI

Jukka Hietaniemi ja Timo Korhonen
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
PL 1803, 02044 VTT

Tiivistelmä

Artikkelissa kuvataan riskien arviointiin pohjautuvaa toiminnallista suunnittelua toimistorakennusta käsittelevän esimerkin avulla. Esimerkissä käydään läpi oleellisia lähtötietoja ja niiden arvojen määrittämistä perustuen todennäköisyypohjaiseen mitoituspalon käsittelyyn, esitetään uhkien ja niiden seuraamusten laskeminen sekä palontorjunnan vaikutusten huomioon ottaminen. Laskennan tulosten tulkitaan henkilöille ja omaisuudelle aiheutuvina riskeinä .

JOHDANTO

Paloteknisen suunnittelun päämäärä on tulipalojen aiheuttamien riskien pienentäminen. Riskeillä on kaksi komponenttia, seuraamusten vakavuus ja niiden todennäköisyys. Paloteknisessä suunnittelussa riskien todennäköisyyskomponentin huomioon ottaminen edellyttää uhkakuvatarkastelun laajentamista todennäköisyyksiin pohjautuvaksi. Eräs tekninen piirre, jonka tämä laajennus tuo mukanaan, on se, että tarkkaan määrättyjen eli determinististen suureiden sijasta toimitaan suureita kuvaavien jakaumien avulla. Tässä esityksessä tuodaan esille toimistorakennusta koskevan esimerkin avulla joitain riskiperustaisen toiminnallisen paloturvallisuustarkastelun pääpiirteitä ja havainnollistetaan käytössä olevia menetelmiä.

Riskiperustainen lähestymistapa on luonteva tapa tarkastella onnettomuuksia, kuten tulipaloja. Siksi riskiperustaiset menetelmät ja niiden käyttö eivät ole suinkaan uusia paloalalla, vaan niitä on kehitetty koko nykyaikaisen palotutkimuksen muutaman kymmenen vuoden mittaisen historian ajan. Esimerkiksi Beck [1] esittää vuodelta 1983 olevassa artikkelissaan laajahkon kirjallisuuskatsauksen 70-luvulla aiheesta tehtyihin töihin. Samana vuonna julkaistu CIB:n kokoama laaja raportti rakenteellisen paloturvallisuuden todennäköisyypohjaisesta tarkastelusta ja sen jatkoraportti [2] pohjautuvat näihin kehitysaskeliin. Riskiperustaisen toiminnallisen suunnittelun perusteet tunnettiin hyvin jo 1980-luvun alussa, mutta niitä ei pystytty soveltamaan kovinkaan tehokkaasti. Tähän oli syynä lähinnä kaksi tekijää: toinen oli puutteet tulipaloilmiön ymmärtämisessä ja sen mallintamisessa ja toinen oli se, että tuolloin saatavilla olleella laskentakapasiteetilla ei ollut mahdollista suorittaa niin laajoja laskentoja kuin olisi ollut tarpeen, jotta tietämys olisi saatu hyödynnettyä. 1990-luvulla tapahtuneen tietotekniikan tarjoamien mahdollisuuksien räjähdysmäisen kasvun ja samalla tapahtuneen palotekniikan ja -tieteiden kehityksen myötä tilanne on tänä päivänä ratkaisevasti erilainen kuin 20 vuotta sitten: nyt olemassa olevat mallit, tiedot ja laskentakapasiteetti mahdollistavat riskiperustaisen palosuunnittelun aivan uudella tavalla. Ulkomailla tähän tarkoitukseen on kehitetty varsin pitkälle vietyjä ohjelmistojakin, mm. FireCAM (Kanada) [3], CESARE-Risk (Uusi-Seelanti) [4], CRISP

(Englanti) [5]. Ruotsissa riskien arviointiin perustuvilla paloturvallisuuden arviointimenetelmillä on pitkä historia [ks. esim. 6, 7] ja tänä päivänä niitä sovelletaan varsin laajalti. Suomessa alan tutkimus ja soveltaminen alkoi 1990-luvulla [esim. 8, 9,10]) ja muutamina viime vuosina VTT on tehnyt merkittäviä kehitysaskelia ja kehittänyt uusia, kansainväliselläkin tasolla edistyksellisiä menetelmiä [11,12,13,14], joita tämä esitys joiltain osin valottaa.

Tässä esityksessä ei sen rajoitetun pituuden vuoksi voida tuoda esille menetelmien yksityiskohtia, vaan ne kuvataan lähinnä sanallisoin luonnehdinnoin. Kuvissa esitetään yksityiskohtaisia tietoja, mutta on muistettava, että nämä tiedot koskevat vain tarkastellun esimerkkirakennuksen tiettyä uhkakuvaa eikä niissä esitettyjä tietoja tule suoraan soveltaa tarkasteltaessa muita kohteita ja uhkakuvia.

TARKASTELTU RAKENNUS

Esimerkkirakennus on 6-kerroksinen toimistorakennus, jonka korkeus on 26 m. Pohjakerroksen korkeus on 4,85 m ja muiden kerrokset ovat 3,80 m korkeita. Rakennuksen 1600 m²:n suuruinen neliön muotoinen pinta-ala muodostuu pääasiassa avokonttoritilasta. Rakennuksen julkisivu on tehty kokonaan lasista (2 lasia, joiden paksuus on 6 mm). Rakennuksen teräs-betoni- komposiittirakenteiden laatat ovat 16 cm paksua luokan C30/37 (B35) betonia ja pohjakerroksessa palkit ovat tyyppiä HE 400B (S460) ja muissa kerroksissa tyyppiä HE 400A (S355). Palkkien väli on 4,2 m. Pohjakerroksessa ja maanpinnan alla olevissa kerroksissa pilarit ovat tyyppiä HD 400×237 (S355) ja ylemmissä kerroksissa tyyppiä HD 400×187 (S355). Väliseinät ovat 8 cm paksua betonia. Työaikana rakennuksessa on keskimäärin 100 henkilöä/kerros (yhteensä 600 henkilöä) ja iltaisin noin 5 henkilöä/kerros. Kussakin kerroksessa on kaksi poistumisreittiä, joiden leveys on 1,1 m. Reitit on osastoitu ja niihin johtavat ovet ovat automaattisesti sulkeutuvia. Ne on paineistettu ja varustettu käsin laukaistavalla savunpoistolla. Rakennus on sprinklattu varavesilähteen ja -pumpun omaavalla järjestelmällä. Lämpöön reagoivat paloilmotimet antavat hälytyksen suoraan palokunnalle, joka sijaitsee noin 5 km päässä kohteesta.

UHKAKUVA JA MITOITUSPALO

Uhkakuva

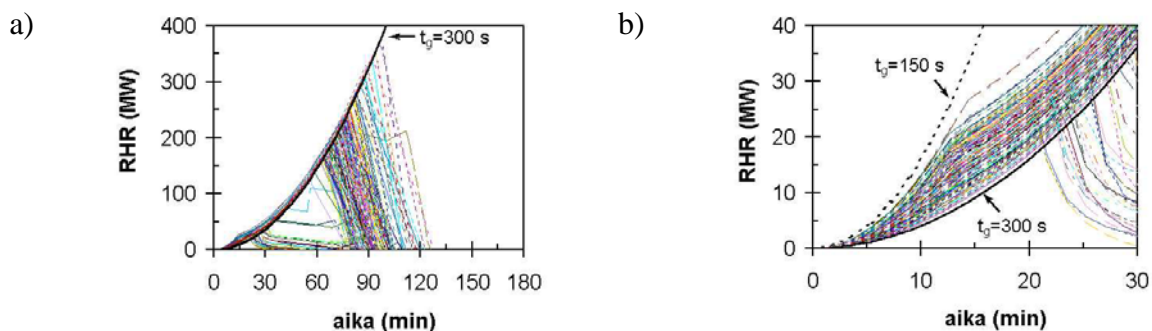
Tilastotietojen valossa [15,16] varsin tyypillinen toimistorakennuksen tulipalon uhkakuva on sähköisestä syystä alkava palo toimistotilassa. Tässä esityksessä tehtävässä tarkastelussa rajoitutaan vain tähän uhkakuvaan: palon oletetaan alkavan avokonttoritilassa työpisteen sähköisen laitteen syttyessä. On huomattava, että täydellisessä toimistorakennuksen paloriskitarkastelussa tulee toki tarkastella myös muita uhkakuvia.

Palo uhkaa aluksi syttymistilassa olevia työntekijöitä. Tämä muodostaa merkittävimmän henkilövahinkovaaran: palokuolemia tai loukkaantumisia voi tapahtua, jos henkilöt eivät ehdi poistua tilasta ennen kuin olosuhteet tulevat kriittisiksi. Kun henkilöt ovat päässeet poistumistielle, vaarat ovat hyvin pienet: poistumistiet on tehty varsin turvallisiksi, eikä henkilöiden altistuminen kuumuuden ja/tai savun synnyttämille kriittisille olosuhteille poistumistiellä ole todennäköistä, ennen kuin niiden rakenteellinen toimintakyky pettää. Tämä voi tarkoittaa osastoinnin pettämistä, jonka oletetaan tapahtuvan, kun osastoinnin eristävyys

menetetään¹, tai kantavien rakenteiden pettämistä. Jälkimmäisen uhan osalta tässä esityksessä tarkastellaan vain teräspalkkien toimintaa, koska niitä ei *a priori* oleteta palosuojatuiksi, kun taas pilarit oletetaan palosuojatuiksi. Komposiittirakenteen laatan tuottamaa palonkestoa parantavaa vaikutusta ei tässä esityksessä tarkastella². On huomattava, että yleensä keskimääräinen poistumisaika tarkasteltavan kaltaisesta 6-kerroksisesta toimistorakennuksesta on niin nopeaa, että rakenteellisen paloturvallisuuden pettäminen ei muodosta merkittävää uhkaa henkilöturvallisuudelle. Tältä osin tarkastelu koskeekin rakenteiden palonkestotarpeen riippuvuutta rakennuksen korkeudesta. Tämä tarkastelu liittyy myös pelastushenkilökunnan turvallisuuteen, koska pelastustoimen toimintaedellytykset on oltava turvattu vähintään niin kauan, kuin rakennuksessa voi mahdollisesti olla pelastettavia henkilöitä.

Mitoituspalo

Mitoituspalona on em. uhkakuvan mukaisesti avokonttorissa syttyvän työpisteen palo, joka voi levitä kattamaan koko avokonttoritilan. Tällaisen palon kehittyminen on monimutkainen prosessi, johon vaikuttaa useita tekijöitä. Siksi palon kehitykseen liittyvä vaihtelevuus on suurta ja riskiperustaisessa käsittelyssä mitoituspaloa on syytä kuvata tietyn tarkkaan määritellyn palotehokäyrän (deterministinen lähestymistapa) sijasta todennäköisyyspohjaisesti stokastisena ilmiönä. Käytännössä tämä voidaan toteuttaa siten, että palotehoo vaikuttavien tärkeimpien suureiden annetaan vaihdella satunnaisesti tiettyjen valittujen jakaumien puitteissa, jolloin yhtä mitoituspaloa tulee kuvaamaan satojen tai tuhansien aikasarjojen muodostama käyräparvi kuvassa 1 havainnollistetulla tavalla³.



Kuva 1. Mitoituspalon stokastinen kuvaus (200 palotehokäyrää laskennassa käytetyistä 5000:sta käyrästä). a) Koko 3 tunnin laskenta-aika ja b) tarkempi esitys mitoituspalon alkukehityksestä ensimmäisen puolen tunnin aikana.

Tärkeimmät stokastisesti käsitellyt suureet mitoituspalon laskennassa ovat seuraavat:

- Palotehon neliöllisen kasvun kasvuaika palon alussa ja hetki, jolloin paloteho alkaa kasvaa 300 s:n kasvuaajalla sekä hiipumisvaiheen pituus.
- Palokuorman määrä, joka on kuvattu Eurocode 1-1-2:n [19] mukaisesti.
- Ikkunoiden särkyminen ja muodostuvien aukkojen koko.
- Polttoaineen lämpöarvo.

¹ Kriteerinä tulen vastaisen puolen lämpötila nouseminen yli 140 °C alkulämpötilasta.

² Tämä vaikutus on todennettu niin todellisissa paloissa kuin palokokeissa (Cardingtonissa tehdyt palokokeet). Laskentatyökalut, joiden avulla betonilaatan kalvovaikutus voidaan ottaa huomioon myös riskiperustaisessa lähestymistavassa, ovat valmiina, mutta sitä ei tätä esitystä kirjoitettaessa ole vielä sovellettu.

³ Kuvan esimerkki koskee pohjakerroksessa, korkeus 4,85 m, tapahtuvaa paloa. Palon kehitys muissa kerroksissa, joiden korkeus on pienempi, 3,8 m, on varsin samankaltaista, mutta ei kuitenkaan identtistä, koska ilmansaanti näissä kahdessa tapauksessa ei ole aivan samanlaista.

Mitoituspalon palotehon suurin mahdollinen arvo on määritetty olettamalla Eurocode 1-1-2:n [19] mukaisella tavalla, että pinta-alaa kohden vapautuva paloteho on $0,25 \text{ MW/m}^2$.

Tässä esityksessä käytetty mitoituspalon kuvaus poikkeaa yksinkertaisesta ajan mukana neliöllisesti kasvavasta mitoituspalon palotehon kuvaustavasta seuraavien seikkojen suhteen:

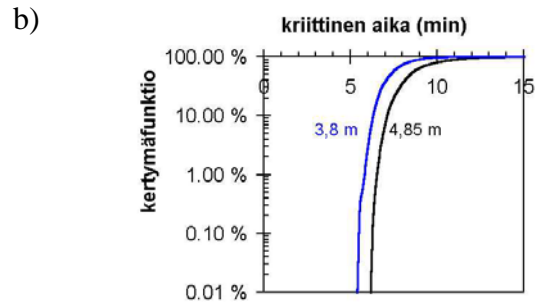
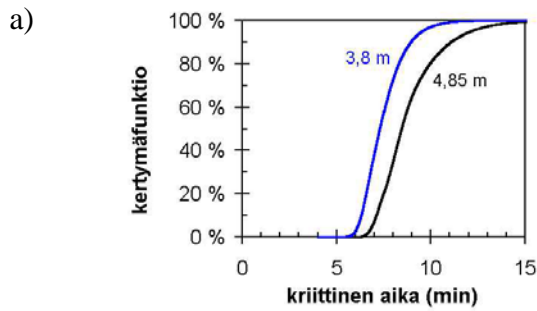
- Mitoituspalokäyrät ovat vyöhykemallilla laskettuja käyriä, eivät vyöhykemallin syöttötietoja. Siksi mitoituspalon kuvaus ottaa huomioon tilan vaikutuksen palon kasvuun: siihen vaikuttaa tilan koko, reunojen lämpötekniset ominaisuudet ja aukot. Erityisesti ilman saannin vaikutus on merkittävä, kuten kuvasta 1 nähdään: osa palotehoista rajoittuu jo varhaisessa vaiheessa varsin pieniin arvoihin hapen määrän rajoituksen takia⁴. Laskentatyökaluna on käytetty VTT:n PFS-ohjelman (Probabilistic Fire Simulator) [11] versiota, jossa vyöhykemalliohjelmana on OZone, jolla avulla voidaan laskea teräsrakenteiden lämpeneminen suoraan ilman apuohjelmia [14, 17, 18].
- Palotehon kasvu ei noudata yhden kasvuaian t_g määräämää ajan suhteen neliöllistä kasvua, vaan aluksi kasvu on voimakkaampaa (kasvunopeus vaihtelee suunnilleen nopean (fast, $t_g = 150 \text{ s}$) ja "normaalin" nopeuden (normal, $t_g = 300 \text{ s}$) välillä). Pitkään jatkuvan palon kasvuaika tasaantuu 300 s:iin, joka on yleisin toimistorakennusten mitoituspalolle käytetty arvo [19]. Tämä malli on kehitetty NISTissä tehtyjen toimiston työpisteiden palokokeiden [20, 21] tuloksien perusteella käyttämällä todennäköisyyspohjaista palonleviämisen mallintamista (yksityiskohtia ei esitystilarajoitusten vuoksi voida käydä läpi tässä yhteydessä).

Esitetty mitoituspalo ei sisällä onnistuneiden sammutusyritysten vaikutusta (henkilökunta, palokunta, sprinklerit). Näiden aktiivisten toimien vaikutus voidaan ottaa huomioon käyttämällä VTT:n kehittämää ajasta riippuvien tapahtumapuiden käyttöön perustuvaa menetelmää [12, 13, 14].

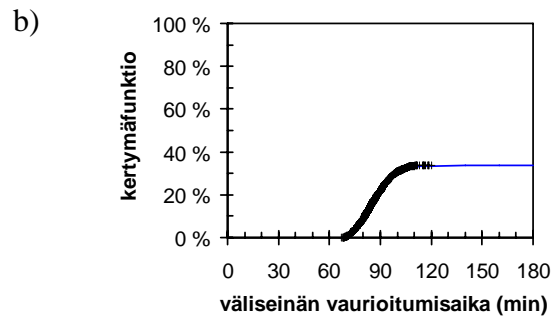
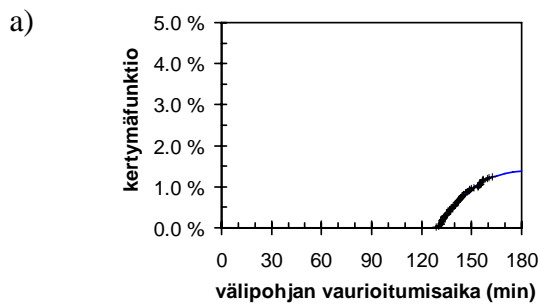
MITOITUSPALON PERUSTEELLA MÄÄRITETYT UHAT

Kuumuuden ja savun palotilassa oleville henkilöille aiheuttamaa uhka arvioitiin savupatjan alareunan korkeuden perusteella käyttäen kriteerinä arvoa $1,6 \text{ m} + 0,1 \times \text{huoneen korkeus}$ [22, kohta 5:361], joka näkyvyyteen liittyvänä kriteerinä tarjoaa konservatiivisen arvion. Kuvassa 2 esitetään todennäköisyysjakaumat henkilöitä uhkaavan savunkerroksen korkeuden kehittymiselle pohjakerroksessa (korkeus 4,85 m) ja muissa kerroksissa (korkeus 3,8 m). Tämä karkea kuvaustapa ei kerro määrällisesti altistuksen seuraamuksien laatua; tulokset ilmaisevat vain, että henkilöitä on joutunut alttiiksi kriittisille olosuhteille, josta voi olla seuraamuksena minkäläinen vaurio tahansa lievistä loukkaantumisesta kuolemaan. Lisävalaistusta seuraamuksen laadulle on saatavissa kuitenkin rakennustyyppikohtaisista tilastoista loukkaantuneiden ja kuolleiden lukumäärästä [13] (tällaista tietoa on saatavilla ainakin ulkomaisista lähteistä). Tarkempia arvioita henkilövahinkojen laadusta voidaan saada käyttämällä myös tämän aiheen arviointiin erikoisesti kehitettyjä laskentamenetelmiä, esim. CRISP-ohjelma [5].

⁴ Tämä vastaa hyvin sitä todellisista tulipaloista tunnettua tilannetta, että useat palot jäävät pieniksi jopa sammuen itsestään hapen loppuessa.

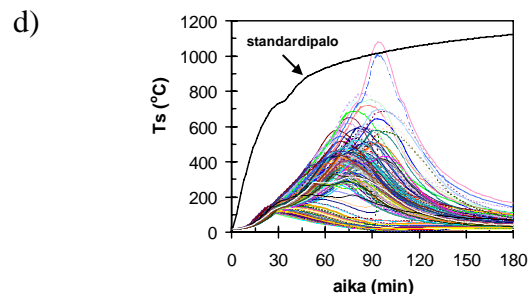
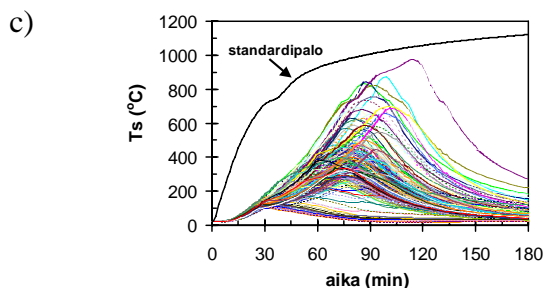
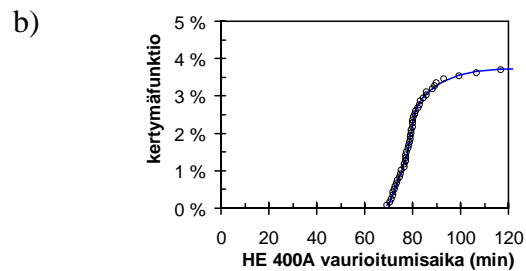
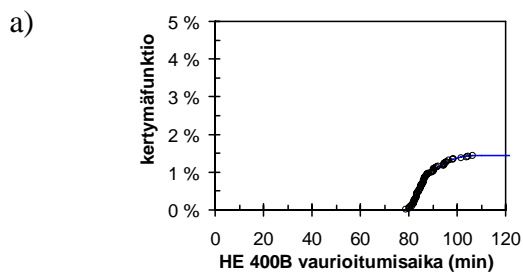


Kuva 2. Palotilassa henkilöitä uhkaavan tekijän aikajakauma pohjakerroksessa (huonekorkeus 4,85 m) ja muissa kerroksissa (huonekorkeus 3,8 m): a) normaali pystyasteikko ja b) logaritminen pystyasteikko.



Kuva 3. a) Välipohjan ja b) väliseinien vaurioitumisaajan (eristävyyden menettäminen) jakauma pohjakerroksessa. Jakaumat ovat oleelliset samat myös muissa kerroksissa.

Tarkastellun toimistorakennuksen tapauksessa osastoinnin pettäminen (kuva 3) aiheuttaa lähinnä uhan poistumisreitillä oleville henkilöille. Lisäksi se lisää omaisuusvahinkoja, mutta ei esimerkkirakennuksen tapauksessa niin suuressa määrin kuin monessa muussa kohteessa, jossa palon uhkaama pinta-ala voi kasvaa merkittävästi, jos osastointi pettää.

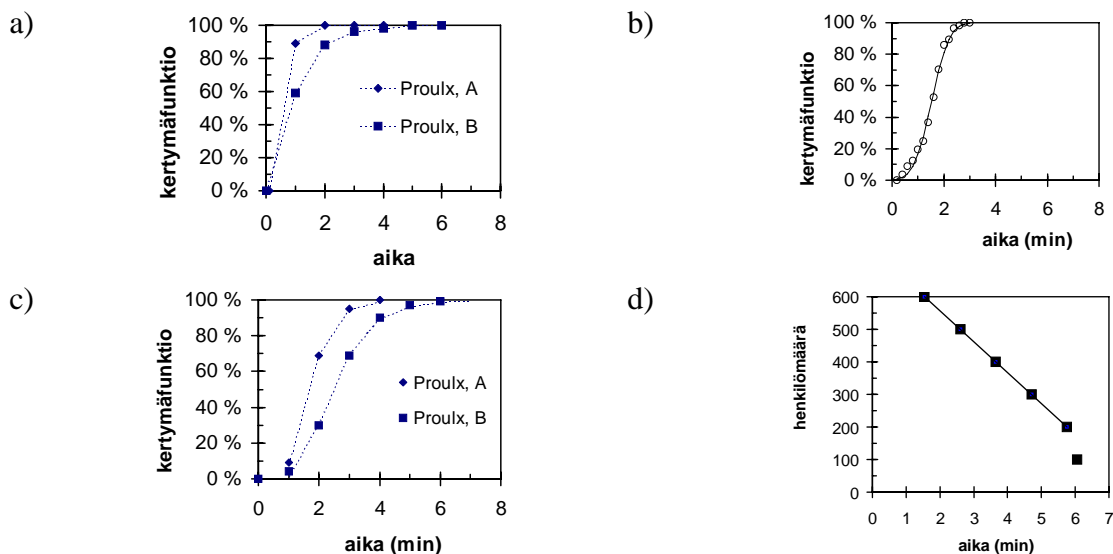


Kuva 4. Suojaamattomien teräspalkkien vaurioitumisaajan jakaumat: a) HE 400B (S460) ja b) HE 400A (S355) sekä laskennassa käytettyjä teräksen lämpötilakäyriä: c) HE 400B ja d) HE 400 A -palkit.

Kantavien rakenteiden vaurioitumisen kriteerinä käytetään teräspalkkien lämpötilan nousua yli kriittisen lämpötilan, joka HE 400B (S460) -palkeille on 780 °C ja HE 400A (S355) -palkeille 710 °C. Vaurioitumisaikojen jakaumat esitetään kuvissa 4a ja b. Nähdään, että palkkien palonkesto suojaamattomanakin on yli tunnin, kun se standardipalorasituksessa on HE 400B (S460) -palkeille noin 40 minuuttia ja HE 400A (S355) -palkeille noin 25 minuuttia. Ero johtuu siitä, että laajan toimistotilan palossa teräksen lämpötila nousee selvästi hitaammin kuin standardipalokäyrän lämpötilasituksessa, ks. kuvat 4c ja d. On huomattava, että tässä tapauksessa palon alussa palopatsaan paikallinen lämmitys kohdistuu niin pienelle osalle, että sen vaikutus palonkestoon ei ole merkittävä.

POISTUMINEN TOIMISTORAKENNUKSESTA

Tulipalon aikainen poistuminen toimistorakennuksista sujuu yleensä varsin joutuisasti ja se on luotettavammin mallinnettavissa kuin monissa muissa kohteissa [23, 24]: Kuva 5 esittää esimerkkejä kokeellisesti ja laskennallisesti määritetyistä toimistorakennuksista poistumiseen liittyvistä ajoista⁵. Suhteellisen nopeasti tapahtuva poistuminen johtuu useasta eri tekijästä: henkilöt tuntevat ympäristön, ovat hyvässä vireystilassa ja pystyvät toimimaan nopeasti ja rationaalisesti; poistumista on saatettu harjoitella ja sen hallintaan saattaa olla nimettyä vastuuhenkilöitä. Lisäksi poistumisreitit ovat yleensä selkeitä ja uloskäytävän sijainti on usein nähtävissä laajalle alueelle.



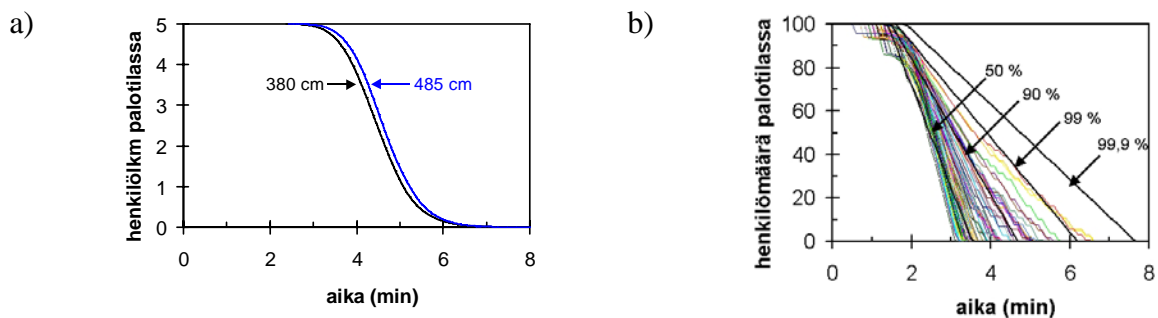
Kuva 5. Esimerkkejä toimistorakennuksen poistumisajoista: a) ennen liikkeelle lähtemistä kuluvan ajan jakauma [23], b) palotilasta poistumisreitille siirtymiseen kuluvan ajan jakauma [24], c) ulos rakennuksesta siirtymiseen kuluvan ajan jakauma ((A): 180 hengen poistuminen 7-kerroksisesta ja (B): 550 hengen poistuminen 8-kerroksisesta rakennuksesta [23]). d) Virtauslaskentamallilla [25] laskettu 600 hengen poistuminen 6-kerroksisesta toimistorakennuksesta.

Tässä esityksessä poistumiseen kuluvaa aikaa arvioidaan yksinkertaisella virtausmallilla, jonka perustietona on liikkumisnopeuden S (m/s) riippuvuus henkilötiheydestä D (henk/m²) [25, 26]: $S = k - kaD$, missä k ja a ovat mallin parametrit. Tässä työssä lasketut poistumisajan

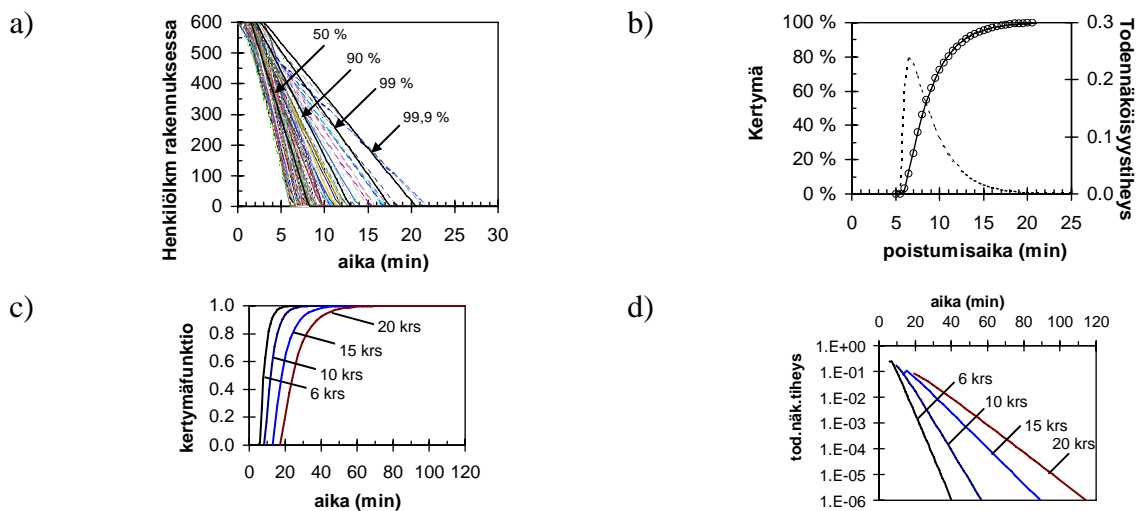
⁵ On huomattava, että kuvat a ja c koskevat eri rakennuksia kuin kuvat d ja b eikä näitä kuvia voi suoraan verrata keskenään. Kuvat tuovat kuitenkin esille toimistorakennuksen poistumisen pääpiirteitä määrällisellä tasolla.

jakaumat perustuvat parametrien k ja a vaihtelevuuteen, joka arvioitiin analysoimalla kirjallisuudessa esitettyjä tietoja [26,27].

Palon havaitseminen ja poistuminen on erilaista työaikana ja iltaisin. Työaikaan avokonttoritilassa on paljon ihmisiä ja palo havaitaan varsin nopeasti, tyypillisesti jo ennen kuin lämpöilmamaiset reagoivat paloon, kun taas ilta-aikaan palo havaitaan hitaammin, todennäköisimmin vasta hälytyksen perusteella. Työaikaan poistuminen palotilasta on kuitenkin hitaampaa ovien ja kulkureittien kapasiteetin rajoitusten takia, mutta ilta-aikana ruuhkia ei synny ja poistuminen voi sujua henkilöiden optiminopeudella. Alla esitetään todennäköisyysperustainen kuvaus poistumisesta palotilasta sekä työ- että ilta-aikaan (kuva 6). Koko rakennuksen tyhjenemistä tarkastellaan vain työaikana tapahtuvan poistumisen osalta: kuvat 7a ja b esittävät 6-kerroksisen esimerkkirakennuksen tyhjenemistä ja kuvissa 7c ja d esitetään, miten tyhjenemisajan jakaumat siirtyvät kohti pidempiä aikoja, kun rakennuksen korkeus kasvaa.



Kuva 6. Poistuminen palotilasta: a) iltaisin (jakauma) ja b) työaikana (henkilömäärä; suorat kuvaavat fraktiileja, esim. 90 %-fraktiili tarkoittaa sitä, että 90 %:ssa tulipaloista poistuminen tapahtuu ko. suoran mukaisesti tai joutuisammin).

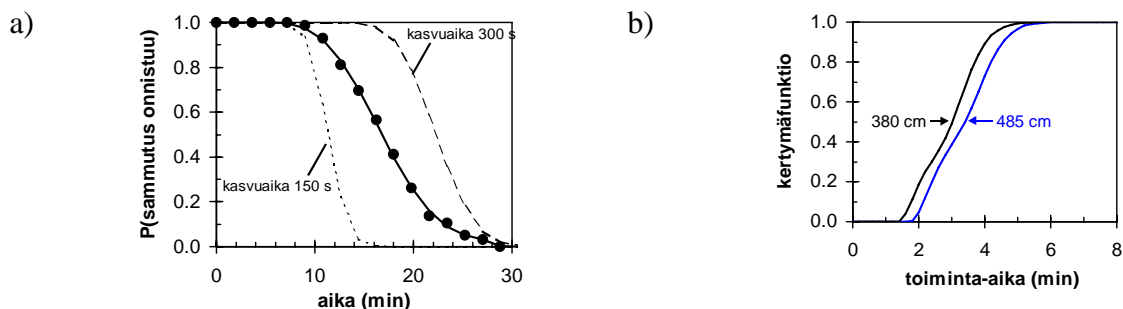


Kuva 7. Poistuminen rakennuksesta työaikaan: a) henkilömäärän väheneminen ja b) rakennuksen tyhjenemisajan jakauma. Rakennuksen korkeuden vaikutus tyhjenemisaikaan: c) kertymäfunktio ja d) vastaava todennäköisyystiheys.

RISKIT

Henkilöturvallisuusriskien suuruus voidaan arvioida yhdistämällä kuvissa 2, 3 ja 4 esitetyt uhkatekijät kuvissa 6 ja 7 esitettyihin tietoihin siitä, miten ihmiset pyrkivät välttämään uhat. Omaisuusvahinkojen syntymistä voidaan arvioida mm. palon leviämistien kautta. Realististen tulosten saamiseksi näissä tarkasteluissa on syytä ottaa huomioon sammutustoimien vaikutus: vain harvoin tulipalo päättyy vasta sitten, kun kaikki palokuorma on palanut loppuun, joskin tämäkin mahdollisuus toki on olemassa.

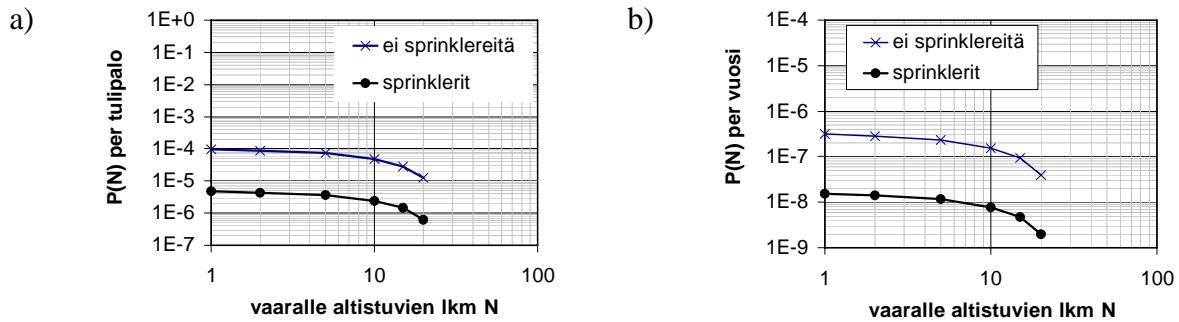
Palokunnan mahdollisuudet sammuttaa palo riippuu siitä, miten suureksi palo on palokunnan sammutusyritysten alkaessa ehtinyt kasvaa suhteessa palokunnan kykyyn sammuttaa palo. Näistä tekijöistä on olemassa määrällistä tietoa (ks. tarkemmin Korhosen artikkeli [14]), jonka perusteella laskettu palokunnan onnistumisen todennäköisyyden ajallinen jakauma esitetään kuvassa 8a. Sprinklerin toimintaa kuvataan sen RTI-arvon ($100 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$) ja laukeamislämpötilan (68 °C) avulla (8b). Todennäköisyydeksi, että sprinklerit toimivat asianmukaisesti (sammuttavat palon tai hillitsevät sitä riittävän tehokkaasti) oletetaan 95 %.



Kuva 8. a) Palokunnan ensimmäisen sammutusyrityksen onnistumistodennäköisyys. b) Sprinklerin toiminta-ajan jakauma.

Savun ja kuumuuden palon alussa aiheuttamat henkilöriskit

Ajasta riippuvaa tapahtumapuutekniikkaa soveltamalla saadaan savun ja kuumuuden aiheuttamille henkilöriskeille kuvassa 9 esitetty tulos. Tässä ns. FN-kaaviossa vaaka-akselina on vaaralle altistuvien henkilöiden lukumäärä ja pysty-akselina altistumisen todennäköisyys yhtä työaikana tapahtuvaa tulipaloa (a) tai vuotta (b) kohden (vuotuinen riski saadaan syttymistäajuustiheyden $2 \cdot 10^{-6} / \text{m}^2 / \text{vuosi}$ [28] avulla.). Kokonaisriski saadaan summaamalla näiden tulot: ilman sprinklereitä se on noin yksi altistuminen per 500 tulipaloa ja sprinklatussa tapauksessa noin yksi altistuminen per 10 000 tulipaloa, eli tekijällä 20 pienempi. Ilta-aikoja koskevat riskit laskettiin samalla tavalla: tässä tapauksessa kokonaisriski on noin kaksinkertainen (1/250 ilman sprinklereitä ja 1/5000 sprinklereiden kanssa). Vaikka iltaisin on uhattuna paljon vähemmän ihmisiä kuin työaikana, voi poistuminen iltaisin olla niin paljon hitaampaa, että riskit muodostuvat suuremmiksi. Kun otetaan huomioon, että savulle altistuminen ei vastaa palokuolemaa, vaan palokuolemien osuus on selvästi pienempi, niin kokonaisriski ei ole kovin korkea edes sprinklaamattomassa tapauksessa. Etenkin ilman sprinklereitä saatua tulosta ei kuitenkaan välttämättä voida pitää tyydyttävänä, koska usean henkilön yhtäaikaisen altistumisen todennäköisyys on suhteellisen korkea verrattuna yhden henkilön altistumisen todennäköisyyteen. Syynä tähän on luonnollisestikin se, että suuressa yhtenäisessä avokonttoritilassa palon aiheuttamalle uhalle voi altistua samaan aikaan suuri joukko ihmisiä.



Kuva 9. a) Savun ja kuumuuden palon alussa aiheuttama henkilöriski FN-kaaviona esitettyinä yhtä työaikana tapahtuvaa tulipaloa kohden (pohjakerros) ja b) vastaava henkilöriski vuotta kohden laskettuna.

Rakenteellisiin paloturvallisuustekijöihin liittyviä riskejä

Kuvista 4 ja 7 nähdään suoraan, että 6- tai 10-kerroksisessa rakennuksessa todennäköisyys sille, että ihmiset eivät ehdi poistua ennen kuin rakenteet menettävät kantokykynsä, on merkityksettömän pieni. Laskenta osoittaa, että tämä pätee myös korkeammissa rakennuksissa (15- tai 20-kerrosta): jälkimmäisessäkin tapauksessa yhdelle henkilölle koitua vuotuinen riski jää alle 10^{-10} ja moniuhristen palojen riski on tätä pienempi, mikä on selvästi pienempi (useita dekadeja) kuin kirjallisuudessa esitetyt arviot [7,29] siedettävissä olevan riskin suuruudesta.

Vaikka henkilövahinkojen riski olisikin pieni, kantavien rakenteiden pettäminen on sinänsä niin vakava tapahtuma, että sen todennäköisyyden tulee olla riittävän pieni: toimistorakennuksen sortumaan liittyvät omaisuusvahingot ovat yleensä melkoiset ja lisäksi talon sortuessa palo voi levitä ympäröiviin rakennuksiin. Esimerkiksi Eurocodeissa [30] mitoituksen perusteena on, että yksittäisen kantavan rakenteen sortuminen saa aiheuttaa rakennuksen elinaikana vakavan onnettomuuden korkeintaan todennäköisyydellä $7,3 \cdot 10^{-5}$. Esimerkkirakennuksen HE 400 A -palkeille tätä arvoa vastaavaksi todennäköisyydeksi saadaan sprinklaamattomalle rakennukselle arvo $1 \cdot 10^{-3}$ ja sprinklatulle rakennukselle arvo $1 \cdot 10^{-5}$: sprinklerit siis parantavat rakenteellisen turvallisuuden hyväksyttävälle tasolle.

Osastoivien rakenteiden toimintaan liittyviä riskejä voidaan tarkastella samalla tavalla kuin edellä esitetyissä esimerkeissä. Tärkein tähän liittyvä uhka on palon leviäminen ja siitä aiheutuvat vaarat henkilöille ja omaisuudelle. Lisäksi voidaan tarkastella esim. tärkeiden erityistilojen suojauksen toiminnan varmuutta. Ikkunoiden särkymiseen liittyy palon leviämisen vaara ylempiin kerroksiin sekä naapurirakennuksiin; myös näihin uhkiin liittyvät riskit voidaan arvioida laskennallisesti edellä kuvatun kaltaisien menetelmien avulla.

LOPPUSANAT

Tämä artikkeli tuo esille joitain niistä monista mahdollisuuksista, joita palotekniikassa on tarjolla riskien arviointiin ja sen käyttöön suunnitteluratkaisujen turvallisuuden arvioinnissa. Menetelmillä voidaan arvioida kaikkiin paloturvallisuuden olennaisiin vaatimuksiin liittyviä kysymyksiä. Pisimmälle kehittyneimpiä ovat siviilihenkilöiden turvallisuuteen liittyvät menetelmät ja myös rakenteellisen paloturvallisuuden alueella on viime aikoina saavutettu merkittävää edistymistä. Aihepiiri, jossa tällä hetkellä on selvä lisäkehitystyön tarve, on

pelastushenkilöstön turvallisuuden määrällinen arviointi: eräs tärkeä aihe on palokunnan toimien ajoitus palopaikalle saapumisen jälkeen.

KIITOKSET

Tässä artikkelissa esitettyä työtä ovat rahoittaneet European Coal and Steel Community (ECSC Steel RTD Programme, Contract No.: 7210-PR-251), Rautaruukki Group ja Wood Focus Finland sekä VTT.

LÄHDELUETTELO

1. Beck, V. R. Outline of Stochastic Decision-making Model for Building safety and Protection, Fire Safety Journal, vol. 6, 1983, s. 105-120
2. Kersken-Bradley, M (toim.). A Conceptual Approach Towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire safety. Fire Safety Journal, vol. 6, 1983, s. 1-79 ja Kersken-Bradley, M (toim.). Design Guide: Structural Fire safety. Fire Safety Journal, vol. 10, 1986, s. 77-154
3. Yung, D, Hadjisophocleous, GV, and Proulx, G, Modelling Concepts for the Risk-cost Assessment Model FIRECAMTM and its Application to a Canadian Government Office Building, IAFSS Proc. 5th Int. Symp. On Fire Safety Science, p.631-642, 1997
4. Beck, VR, Performance-based Fire Engineering Design and its Application in Australia, IAFSS Proc. 5th Int. Symp. On Fire Safety Science, p.23-40, 1997
5. Fraser-Mitchell, J. N. An Object-Oriented Simulation (CRISP II) for Fire Risk Assessment. Teoksessa: Proceedings of 4th International Symposium of Fire Safety Science, Ottawa, 13-17 June 1994, s. 793-804.
6. Magnusson, S. E. & Petterson, O. Rational Design Methodology for Fire Exposed Load Bearing Structures. Fire Safety Journal, vol. 3, 1980/1981, s.227-241
7. Magnusson, S. E. Risk Analysis. Teoksessa: Proceedings of 5th International Symposium of Fire Safety Science, Melbourne, 3-7 March 1997, s. 41-58.
8. Keski-Rahkonen, O., Heikkilä, L., Pulkkinen, U., Mälkki, H. & Fieandt, J. Selection of reliability engineering methods for fire risk assessment applications in Finland. Teoksessa: Reliability and safety processes and manufacturing systems. London: Elsevier Applied Science, 1991, 200-211
9. Björkman, J. & Keski-Rahkonen, O. Fire safety risk analysis of a community centre. Journal of fire sciences, Vol. 14, 1996, No: Sept.-Oct., s. 346 - 352
10. Keski-Rahkonen, O. Performance-based fire safety design of an office complex with large atria. Proceedings of EUROFIRE '98 : fire safety by design, engineering & management, Brussels, 11th-13th March 1998. IFE. Asse, 1998.
11. Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. Fire safety research (FISRE): Probabilistic fire simulator - Monte Carlo simulation tool for fire scenarios. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2002, s. 205 - 210 (VTT Research Notes 2164)
12. Korhonen, T., Hietaniemi, J., Baroudi, D. & Kokkala, M., Time-Dependent Event-Tree Method for Fire Risk Analysis: Tentative Results, Teoksessa: Proceedings of 7th International Symposium of Fire Safety Science, Boston, 16-21 June 2002, painossa.
13. Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M. & Lappi, E: Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2002. 95 s + liitt. 51 s. VTT Tiedotteita 2123.

-
14. Korhonen, T. & Hietaniemi, J. Riskianalyysiin perustuva paloturvallisuussuunnittelu: Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. Espoo: Palotutkimuspäivät 2003.
 15. Hietaniemi, J. Toimistorakennusten paloriskianalyysi. 7. Turvallisuusjohdon koulutusohjelma. Espoo 10.2.2003 . Koulutuskeskus Dipoli (2003), 46 s.
 16. Holborn, P., Nolan, P., Golt, J. & Townsend. N. Fire Safety Journal, vol. 37, 2002. s. 303-327
 17. Cadorin, J.-F. and Franssen, J.-M. A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2. Part 1: Pre-and post-flashover compartment fire model. Fire Safety Journal, 38, 2003, s. 395 –427.
 18. Cadorin, J.-F., Pintea, D., Dotreppe, J.-C. and Franssen, J.-M. A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2. Part 2: Methodology and application. Fire Safety Journal, 38, 2003, s. 429 –451.
 19. Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2 : General Actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002. (EN 1991-1-2:2002 E)
 20. Madrzykowski, D. Office work station heat release rate study: full scale vs. bench scale. Teoksessa: Proceedings Interflam 1996 Conference, Cambridge, England, 1996, s. 47-55.
 21. Babrauskas, V. Heat Release Rates. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3. painos). Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2002. s. 3–1-37.
 22. Boverket. Boverkets byggregler, BFS 1993:57 med ändringar till och med 2002:19, 2002.
 23. Proulx, G., Kaufman, A. & Pineau, J. Evacuation Time and Movement in Office Buildings, NRCC, Ottawa, 1996, Internal Report no. 711.
 24. Purser, D. A. & Bensilum, M. Quantification of Behaviour for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations, Safety Science, Vol. 38, 2001, s. 157-182.
 25. Nelson, E. B. & Mowrer, F. W. Emergency Movement. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3. painos). Quincy: National Fire Protection Association, 2002, s. 3–367-380.
 26. Proulx, G. Movement of People: The Evacuation Timing. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3. painos). Quincy: National Fire Protection Association, 2002. s. 3–342-366.
 27. Pauls, J. Calculating Evacuation Times for Tall Buildings. Fire Safety Journal, Vol. 12, 1987, No. 3, s. 213-236.
 28. Tillander, K. & Keski-Rahkonen, O. Rakennusten syttymistäajuudet PRONTO-tietokannasta 1996-1999. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2001. 66 s + liitt. 16 s. VTT Tiedotteita 2119
 29. Rasbash, D. J. Criteria for Acceptability for Use with Quantitative Approaches in Fire Safety. Fire Safety Journal, vol. 8, 1984/1985, s.151-157
 30. Eurocode 0: Basis of Design. Brussels: CEN, 2001.