



Tuomas Paloposki, Jukka Myllymäki & Henry Weckman

Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan

Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumis- turvallisuuden laskentaan

Tuomas Paloposki, Jukka Myllymäki ja

Henry Weckman

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-6113-9 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6114-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

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

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

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

Paloposki, Tuomas, Myllymäki, Jukka & Weckman, Henry. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan [Application of reliability techniques for calculation of the evacuation safety of a sports hall]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2181. 53 s. + liitt. 13 s.

Avainsanat sports hall, fire safety, fire protection, reliability, methods, evacuation

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin luotettavuusteknisten menetelmien käyttöä paloturvallisuusanalyysiin. Esimerkkikohteeksi valittiin erään olemassa olevan urheiluhallin poistumisturvallisuus tilanteessa, jossa seiväshyppypatja syttyy palamaan hallissa järjestettävän yleisötilaisuuden aikana.

Tutkittavat menetelmät olivat Cornellin menetelmä, Hasofer-Lindin menetelmä ja Monte Carlo -menetelmä. Kaikki kolme menetelmää soveltuivat valitun kohteen ja poistumistapahtuman tarkasteluun hyvin. Menetelmät antoivat hyvin samankaltaisia tuloksia, kuten oli tässä tapauksessa odotettavissakin näiden menetelmien teorian pohjalta. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että kyseisen urheiluhallin poistumisturvallisuus tarkastellussa palotilanteessa on hyvä.

Menetelmien käytön suurin ongelma on luotettavien lähtötietojen saaminen. Tämä koskee erityisesti poistumista, johon teknisten seikkojen lisäksi vaikuttaa myös kohteessa olevien ihmisten käyttäytyminen, esimerkiksi se, miten he reagoivat havaitessaan tulipalon sekä miten ja mitä kautta he päättävät siirtyä turvaan tulipalon aiheuttamasta uhasta.

Paloposki, Tuomas, Myllymäki, Jukka & Weckman, Henry. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan [Application of reliability techniques for calculation of the evacuation safety of a sports hall]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2181. 53 p. + app. 13 p.

Keywords sports hall, fire safety, fire protection, reliability, methods, evacuation

Abstract

This report describes a study on the use of reliability methods for conducting fire safety analyses. The methods were applied to evaluate the evacuation safety of a sports hall in a situation where a pole jump mattress is ignited during a public event.

The applied reliability methods were the Cornell method, Hasofer-Lind method and Monte Carlo method. All methods proved to be suitable for studying the selected case. In this particular case, the methods also gave very similar results as was expected based on the theory of these methods. The results indicated that the evacuation safety of the sports hall appears to be good in the studied fire scenario.

The biggest problem with the use of these methods is obtaining reliable initial data. This applies particularly to evacuation, which is depending on the behaviour of the occupants; e.g. how they react to the observation of a fire and how and through which routes they will escape to safety from the threat posed by the fire.

Alkusanat

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka käynnisti vuonna 2001 laajan tutkimushankkeen, jonka nimi on "Turvaverkko – turvalliset rakennukset". Hankkeen tavoitteena on mm. kehittää valmiuksia turvallisuuden eri osa-alueiden erityisongelmien ratkaisuun sekä tehostaa turvallisuusnäkökohtien huomioimista suomalaisessa rakentamisessa. Tässä tiedotteessa esitetty työ on osa ko. tutkimushanketta.

Haluamme kiittää Djebbar Baroudia, Jukka Hietaniemeä ja Timo Korhosta hyödyllisistä keskusteluista työn aikana sekä lisäksi erityisesti Djebbar Baroudia luvussa 7.5 esitetyistä Monte Carlo -laskelmista ja Jukka Hietaniemeä luvussa 4 esitetyistä Monte Carlo -laskelmista.

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Tausta.....	9
1.2 Tavoite.....	9
2. Esimerkkirakennus.....	10
2.1 Yleistä.....	10
2.2 Mitat.....	10
2.3 Uloskäytävät.....	10
3. Mitoituspalo.....	13
4. Olosuhteiden muuttuminen poistumisen kannalta kriittiseksi.....	16
5. Kohteessa olevat ihmiset.....	19
5.1 Lukumäärä.....	19
5.2 Sijainti.....	19
5.3 Ominaisuudet poistumisen kannalta.....	19
6. Ihmisten poistuminen tulipalon sattuessa.....	20
6.1 Poistumisen vaiheet.....	20
6.2 Poistumisen onnistuminen.....	21
6.3 Vaihtelu, jakautuma ja hajonta.....	21
6.4 Esivaihe.....	23
6.5 Reagointivaihe.....	25
6.6 Siirtymisvaihe.....	27
7. Laskelmat.....	30
7.1 Lähtötiedot.....	30
7.2 Rajatilafunktio.....	31
7.2.1 Määritelmät.....	31
7.2.2 Rajatilafunktioiden soveltaminen käytäntöön.....	36
7.2.3 Laskennan lähtökohdat nyt tarkasteltavassa tapauksessa.....	37
7.3 Laskenta Cornellin menetelmällä.....	38
7.4 Laskenta Hasofer-Lindin menetelmällä.....	39

7.5	Laskenta Monte Carlo -menetelmällä	42
7.6	Herkkyystarkastelut.....	44
8.	Vertailu yleiseen turvallisuustasoon	47
9.	Yhteenveto	50
	Lähdeluettelo	52
 Liitteet		
	Liite A: Eerikkilän jalkapallohallin pohjapiirros ja uloskäytävät	
	Liite B: <i>Simulex</i> -mallin kuvaus ja laskelmat	
	Liite C: Hasofer-Lindin luotettavuusluku	

1. Johdanto

1.1 Tausta

Tulipalon syttyminen rakennuksessa johtaa usein siihen, että olosuhteet rakennuksen sisällä muuttuvat varsin nopeasti hengenvaarallisiksi. Rakennuksessa oleskelevia ihmisiä uhkaavat sekä palon synnyttämä kuumuus että savun sisältämät myrkylliset yhdisteet. Näiden uhkien torjumiseksi on rakennukset suunniteltava ja rakennettava niin, että niistä voidaan tulipalon sattuessa poistua turvallisesti.

Tässä työssä pyritään arvioimaan todennäköisyyslaskentaan pohjautuvien luotettavuusteknisten menetelmien soveltuvuutta rakennuksen poistumisturvallisuuden arviointiin. Nämä menetelmät ovat olleet jo pitkään käytössä lujuusanalyseissä ja muodostavat teoreettisen taustan mm. kantavien rakenteiden yleiseurooppalaisille suunnitteluohjeille, ns. Eurokoodeille. Luotettavuusteknisten menetelmien käyttöä poistumisturvallisuuden arviointiin on aiemmin tutkittu mm. Lundin yliopistossa [1, 2].

Asetettu tehtävä liittyy toiminnallisen palosuunnittelun menetelmien kehittämiseen ja niiden kelpoisuuden ja soveltuvuuden arviointiin. Tämä työ on ollut jo useiden vuosien ajan käynnissä VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa.

1.2 Tavoite

Tässä käsiteltävän soveltamisesimerkin tavoitteiksi asetettiin seuraavat:

1. Määritellään suhteellisen yksinkertainen, poistumisturvallisuuteen liittyvä esimerkkitehtävä.
2. Valitaan esimerkkitehtävässä esiintyville lähtöarvoille ja niiden todennäköisyysjakautumille mahdollisimman realistiset numeroarvot.
3. Ratkaistaan esimerkkitehtävä luotettavuusteknisiä menetelmiä käyttäen muutamalla erilaisella tavalla.
4. Dokumentoidaan tehty työ kirjallisesti sellaisella tarkkuudella, että syntynyttä aineistoa voidaan käyttää monimutkaisempien ja samalla realistisempien esimerkkitehtävien perustana sekä myös arvioitaessa suunnittelu- ja laskentamenetelmien soveltuvuutta ja kelpoisuutta Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 Rakennusten paloturvallisuus esitetyssä mielessä.

2. Esimerkkirakennus

2.1 Yleistä

Tarkasteltavaksi kohteeksi valittiin Eerikkilän jalkapallohalli Tammelassa. Samaa hallia on käytetty aiemminkin urheiluhallien paloturvallisuustarkasteluihin liittyvissä laskenta-esimerkeissä [3, 4]. Yleiskuva hallista ulkoa on kuvassa 1 ja sisältä kuvassa 2.

Eerikkilän halli on valmistunut vuonna 1998 ja sen pääasiallinen käyttötarkoitus on jalkapallon harjoittelu. Myös yleisurheilulajien harjoittelu on mahdollista. Hallissa ei ole lainkaan katsomoa ja vain vähän oheistiloja. Pääsisäänkäynnin yhteydessä oleva pienehkö siipirakennus sisältää lämpökeskuksen sekä erotuomarin käyttöön tarkoitettun toimistohuoneen. Peseytymis- ja pukuhuoneita ei ole lainkaan.

Hallin kantava teräsrunko koostuu keskenään samanlaisista, kaarevista teräskehistä. Kunkin teräskehän rakenne on seuraava: ulkoseinän kaksi teräspilaria kannattavat kaarevaa putkipalkkiteräsristikkoa. Teräsristikon kannattama hallin kattorakenne muodostuu kaarevista ohutlevyprofiileista, mineraalivillaeristeestä ja kermieristeistä. Pilarien väliset seinäelementit ovat osalla seinää betonirakenteisia sandwich-elementtejä, osin teräsohutlevyistä ja kivivillaeristeestä koostuvia sandwich-elementtejä.

2.2 Mitat

Eerikkilän hallin sisämitat ovat 110 m × 72 m. Katto on kaareva, suurin vapaa korkeus keskellä hallia on 18 m ja korkeus sivuseinien vierellä on 3 m. Hallin tilavuuden ja pohjapinta-alan suhteena laskettu "tehollinen keskikorkeus" on n. 15 m. Hallin pohjapiirros tärkeimpine mittoineen on esitetty liitteessä A.

2.3 Uloskäytävät

Eerikkilän hallissa on viisi ovea, joiden sijainnit ja leveydet on esitetty liitteessä A. Sisääntuloon ja poistumiseen käytetään tavallisesti hallin eteläsivulla pienehkössä siipirakennuksessa sijaitsevaa pääsisäänkäyntiä (kuva 3). Hätäpoistumista varten on lisäksi neljä muuta ovea (kuvat 4 ja 5). Hallin itä- ja länsipäädystä on kummassakin iso pariovi, joita voidaan hätäpoistumisen lisäksi käyttää myös suurten tavaroiden kuljetukseen. Nämä pariovet on varustettu myös pienillä käyntiovilla. Hallin pohjoissivustalla on kaksi tavanomaista yksilehtistä ovea.



Kuva 1. Eerikkilän jalkapallohalli ulkoa. Vasemmalla näkyy pääsisäänkäynti ja sen yhteydessä oleva siipirakennus.



Kuva 2. Eerikkilän jalkapallohalli sisältä.



Kuva 3. Eerikkilän jalkapallohallin pääsisäänkäynti ulkoa ja sisältä.



Kuva 4. Eerikkilän jalkapallohallin itäpäädyn pariovi ulkoa ja sisältä. Tämä ovi on liitteessä A ovi 3. Länsipäädyssä sijaitseva ovi 2 on samanlainen.



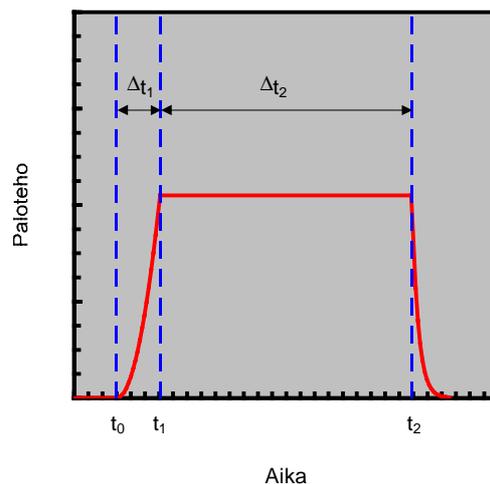
Kuva 5. Toinen Eerikkilän urheiluhallin pohjoissivun ovista ulkoa ja sisältä. Tämä ovi on liitteessä A ovi 4. Pohjoissivun toinen ovi (ovi 5) on samanlainen.

3. Mitoituspalo

Mitoituspalo valitaan aiemmin tehdyn, teräsrakenteisen urheiluhallin kantavien rakenteiden mitoitusta käsittelevän suunnitteluohjeen [3] mukaisesti. Nyt tehtävässä työssä tarkastellaan seiväshyppypatjan paloa, sillä se voidaan nopeasti kehittyvänä ja voimakkaana palona arvioida poistumisen kannalta vaikeimmaksi tapaukseksi. Suunnitteluohjeen [3] mukaisesti oletetaan, että tarkasteltava palo ei hallin suuren koon vuoksi johda hallitilan lieskahdukseen vaan säilyy paikallisena. Mitoituspalon sijaintipaikaksi oletetaan hallin kaakkoisnurkka (ks. liite A). Seiväshyppypatjan normaali säilytyspaikka on tosin hallin luoteisnurkka, missä sijaitsevat myös vauhdinottoradan päätepiste ja seipään alapään tukemiseen tarkoitettu kuoppa. Kaakkoisnurkassa tulipalo on kuitenkin poistumisturvallisuuden kannalta kriittisempi, sillä tällöin ei kaakkoisnurkassa sijaitsevaa ovea 3 voida käyttää poistumiseen.

Mitoituspalon seurauksia arvioitaessa on tärkein tarkasteltava suure paloteho eli palossa vapautuva lämpöenergia aikayksikköä kohden. Paloteho ei ole tulipalon aikana vakio, vaan sen arvo vaihtelee palon kehittymisen mukaan. Jatkossa oletetaan, että mitoituspalon palotehokäyrää (paloteho ajan funktiona) voidaan approksimoida kuvassa 6 esitetyllä yleistetyllä palotehokäyrällä. Käyrä jaetaan kolmeen osaan:

- Vaihe 1 (kasvava vaihe): $t_0 \leq t \leq t_1$
- Vaihe 2 (tasainen vaihe): $t_1 \leq t \leq t_2$
- Vaihe 3 (hiipuva vaihe): $t_2 \leq t < \infty$



Kuva 6. Mitoituspalon palotehokäyrä (paloteho ajan funktiona). Palo syttyy hetkellä t_0 ja kasvaa hetkeen t_1 saakka. Tämän jälkeen alkaa tasainen vaihe, jonka aikana paloteho pysyy vakiona. Tasainen vaihe päättyy hetkellä t_2 , jossa hiipumisvaihe alkaa. Kasvuvaiheen pituus on Δt_1 ja tasaisen vaiheen pituus Δt_2 .

Esitetään seuraavassa palotehokäyrän yhtälö matemaattisesti. Merkitään $t_0 = 0$ (ajanollakohdan valinta ei rajoita esitystavan yleisyyttä).

Kasvavan vaiheen aikana kuvaa palotehoa \dot{Q} yhtälö

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \left(\frac{t}{t_g} \right)^2, \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (1)$$

missä t on aika, \dot{Q}_0 on referenssipaloteho, jonka arvo on 1000 kW, ja t_g on kasvuaikavakio.¹

Kasvavan vaiheen päättyessä alkaa tasainen vaihe, jonka aikana paloteho on vakio:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} = \dot{Q}_0 \left(\frac{t_1}{t_g} \right)^2, \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2)$$

Tasaisen vaiheen päättyessä alkaa hiipuva vaihe, jonka aikana palotehoa kuvataan yhtälöllä

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} e^{-\frac{t-t_2}{\tau}}, \quad t_2 \leq t \leq \infty \quad (3)$$

missä τ on hiipumisaikavakio.

Palokuorma eli tulipalossa vapautunut energiamäärä saadaan integroimalla yhtälöissä (1), (2) ja (3) esitetyt palotehon lausekkeet:

$$Q = \int_0^{\infty} \dot{Q}(t) dt = \dot{Q}_{\max} \left(t_2 - \frac{2}{3} t_1 + \tau \right) \quad (4)$$

Yhtälöissä (1)–(4) kuvattu yleistetty palotehokäyrä on täysin määritelty, kun annetaan numeroarvot parametreille t_g , \dot{Q}_{\max} , τ ja Q . Vapaasti valittavia parametreja on siis yhteensä neljä kappaletta. Tämän jälkeen saadaan t_1 ratkaistuksi yhtälöstä (2) ja t_2 yhtälöstä (4).

¹ Yhtälö (1) esitettiin varsinkin aikaisemmin usein vaihtoehtoisessa muodossa $\dot{Q} = at^2$, missä kerroin a on palon kasvutekijä. Kasvutekijän a ja kasvuajan t_g välillä on seuraava riippuvuus: $a = \frac{\dot{Q}_0}{t_g^2}$.

Seiväshyppypatjan palolle on suunnitteluohjeessa [3] ehdotettu käytettäväksi seuraavia numeroarvoja:

- Palon kasvuaikavakio $t_g = 150$ s. (Alaviitteessä 1 mainitun kasvutekijän a arvo on tällöin vastaavasti $0,044 \text{ kW/s}^2$).
- Palotehon maksimiarvo $\dot{Q}_{\max} = 4200 \text{ kW}$.
- Hiipumisaikavakio $\tau = 45$ s.
- Palokuorma $Q = 8100 \text{ MJ}$.

Sijoittamalla nämä numeroarvot yhtälöihin (2) ja (4) saadaan $t_1 = 307$ s ja $t_2 = 2\,090$ s.

4. Olosuhteiden muuttuminen poistumisen kannalta kriittiseksi

Palon kehittyminen johtaa usein siihen, että olosuhteet rakennuksen sisällä muuttuvat rakennuksessa oleskelevien ihmisten kannalta sietämättömiksi. Vaaraa aiheuttavat sekä savun sisältämät myrkylliset ja ärsyttävät yhdisteet että palossa syntyvä kuumuus. Vaaran välttämiseksi tulee ihmisten pystyä poistumaan palavasta rakennuksesta riittävän nopeasti.

Jos olosuhteet rakennuksen sisällä heikkenevät liian nopeasti, rakennuksessa oleskelevat ihmiset eivät ehdi ajoissa ulos. Poistumisen keskeytymisen syynä voivat olla savumyrkytys tai palovammat tai myöskin se, että rakennuksen täytyessä savulla ei uloskäytäviä enää pystytä löytämään huonon näkyvyyden vuoksi. Jos tilanteeseen ei tässä vaiheessa puututa nopeasti joko sammutus- tai pelastustoimenpitein, tulevat nämä ihmiset todennäköisesti menehtymään tulipalon uhreina.

Olosuhteiden katsotaan muuttuvan poistumisen kannalta kriittiseksi silloin kun jokin tai jotkin yllämainituista seikoista aiheuttaa poistumisen keskeytymisen. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan tilannetta, jossa olosuhteet muuttuvat poistumisen kannalta kriittiseksi savun aiheuttaman näkyvyyden huonontumisen vuoksi. Muita poistumista vaikeuttavia tekijöitä ei oteta huomioon. Niiden vaikutuksen arviointi joudutaan jättämään jatkotyöksi.

Lundin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa [1] on pyritty selvittämään, kuinka kauan tulipalon syttymisestä kestää siihen, että olosuhteet muodostuvat poistumisen kannalta kriittiseksi. Kriteerinä käytettiin myös tässä tapauksessa huoneen täyttymistä savulla. Tilannetta tarkasteltiin kaksivyöhykemallin avulla. Kaksivyöhykemallissa oletetaan, että tulipalon synnyttämä kuuma savu kohoaa ylöspäin ja muodostaa huoneen yläosaan ns. kuumen vyöhykkeen, jonka paksuus kasvaa ajan funktiona. Tällöin kuumen vyöhykkeen alareuna laskeutuu alaspäin ja lopulta kuuma vyöhyke ulottuu alueelle, jolla ihmiset normaalisti oleskelevat. Tässä vaiheessa olosuhteet muodostuvat poistumisen kannalta kriittiseksi.

Lundin yliopiston tutkimuksessa käytettiin laskelmiin CFAST-vyöhykemalliohjelmaa, jolla tehtyjen laskelmien perusteella on viitteessä [1] johdettu seuraava regressioyhtälö

$$t_{crit} = 1,67a^{-0,26}H^{0,44}A^{0,54} \quad (5)$$

missä t_{crit} [s] on aika, jossa olosuhteet muodostuvat poistumisen kannalta kriittiseksi savulla täyttymisen vuoksi, a [kW/s²] on palon kasvutekijä, H [m] on hallin korkeus ja A [m²] on hallin lattiapinta-ala.

Seiväshyppypatjan palon kasvutekijä $a = 0,044 \text{ kW/s}^2$ (vrt. kohta 3 ja lähdeviite [3]). Eerikkilän hallin mitat ovat $H = 15 \text{ m}$ ja $A = 7\,920 \text{ m}^2$, kuten edellä kohdassa 2.2 on esitetty. Sijoittamalla nämä lukuarvot yhtälöön (5) saadaan $t_{crit} = 1\,580 \text{ s}$ eli n. 26 minuuttia. On tosin huomattava, että laskelmat, joiden perusteella yhtälö (5) on kehitetty, on tehty pienemmille huoneille ja hitaammin kehittyville paloille kuin nyt tarkasteltavana olevassa tapauksessa. Lisäksi on huomattava, että yhtälö (5) on tarkoitettu tilanteeseen, jossa tulipalon paloteho kasvaa jatkuvasti yhtälön (1) kuvaamalla tavalla aina siihen saakka, kunnes olosuhteet muodostuvat kriittisiksi. Eerikkilän hallissa tämä ei pidä paikkaansa hallin ison koon vuoksi (kohdassa 3 esitettyjen laskelmien mukaan saavutetaan palotehon tasainen vaihe jo 307 s jälkeen). Tällä perusteella voitaisiin ehkä olettaa, että todellisuudessa savulla täytyminen kestää pidemmän ajan. Toisaalta savukerros jäähtyy ollessaan kosketuksessa viileän katon kanssa ja saattaa tämän vuoksi ainakin paikoitellen painua alaspäin nopeamminkin kuin mihin yhtälön (5) antamat tulokset viittaavat.

Korpela [4] on arvioinut CFX-kenttämallilla tehtyjen laskelmien perusteella, että seiväshyppypatjan palossa kehittyvä savu heikentää Eerikkilän hallissa näkyvyyden 50 metriin kahdeksan minuutin kuluessa ja 10 metriin 26 minuutin kuluessa. Korpelan arvion mukaan 10 m näkyvyys on poistumisen kannalta kriittinen. Näin isossa hallissa voitaisiin tosin ehkä vaatia parempaa näkyvyyttä, sillä katsomisetaisyydet ovat tässä tapauksessa pitkiä ja ulospääsyn löytäminen saattaa vaarantua, vaikka näkyvyys ylittäisikin 10 m.

Tässä työssä tarkasteltavana olevalle tapaukselle antavat siis sekä Lundin yliopistossa kehitetty regressioyhtälö että CFX-kenttämallilla tehdyt laskelmat kriittisen ajan t_{crit} arvoksi n. 26 minuuttia. Luotettavuusteknisten menetelmien käyttö edellyttää tämän lisäksi sitä, että tunnetaan kriittisen ajan jakautuma. Eräs tapa arvioida jakautumaa on soveltaa lähteessä [5] kehitettyä tekniikkaa. Oletetaan, että yhtälössä (5) esiintyvät suureet a , H ja A sekä vakiokerroin 1,67 eivät ole deterministisiä suureita, joiden arvot tunnetaan tarkalleen, vaan satunnaismuuttujia, joiden arvoja voidaan kuvata todennäköisyysjakautumilla. Edelleen oletetaan, että ko. satunnaismuuttujat ovat tasan jakautuneita keskiarvojensa ympärille. Valitaan keskiarvoiksi yllä olevassa laskelmassa käytetyt numeroarvot ja oletetaan suureiden a , H ja A vaihteluväleiksi $\pm 20\%$ sekä vakiokerroimen 1,67 vaihteluväleiksi $\pm 30\%$. Käyttämällä näitä lähtöarvoja voidaan kriittisen ajan t_{crit} todennäköisyysjakautuma laskea Monte-Carlo-simuloinnilla. Tuloksena saatava jakautuma on hyvin lähellä normaalijakautumaa, jonka keskiarvo on 26 minuuttia ja keskihajonta 6 minuuttia. Valitaan tämän perusteella laskentaa varten kriittisen ajan todennäköisyysjakautumaksi normaalijakautuma, jonka keskiarvo on 26 minuuttia ja keskihajonta 6 minuuttia.

Valitut keskiarvon ja keskihajonnan arvot antavat kriittisen ajan todennäköisyysjakautuman $\pm 3\sigma$ -pisteiksi 8 minuuttia ja 44 minuuttia, ts. todennäköisyys sille, että olosuhteet muuttuvat poistumisen kannalta kriittisiksi viimeistään kahdeksan minuutin kuluttua palon syttymisestä (keskiarvo miinus kolme keskihajontaa) on 0,13 % ja todennäköisyys sille, että olosuhteet muuttuvat poistumisen kannalta kriittisiksi aikaisintaan 44 minuutin kuluttua palon syttymisestä (keskiarvo plus kolme keskihajontaa) on 0,13 %.

5. Kohteessa olevat ihmiset

5.1 Lukumäärä

Hallissa oleskelevien ihmisten lukumääräksi oletetaan 500. Tämä on Eerikkilän hallin rakennusluvan mukaan suurin sallittu henkilömäärä, joka voi oleskella hallissa samanaikaisesti ilman että joudutaan ottamaan käyttöön erityisiä paloturvallisuutta lisääviä toimenpiteitä. Näin suuren henkilömäärän samanaikainen oleskelu hallissa urheiluharjoituksissa ei ole todennäköistä, vaan tällöin on oletettavasti kyseessä kokoontuminen esim. juhlatilaisuuteen.

5.2 Sijainti

Ihmisten oletetaan kokoontuvan 20 m × 25 m suuruisella alueella lähellä hallin itäpäätyä (ks. liite A). Tällainen tilanne saattaa esiintyä, jos hallin päätyyn rakennetaan esim. puhujankoroke tai esiintymislava.

5.3 Ominaisuudet poistumisen kannalta

Poistumiseen vaikuttavat myös rakennuksessa oleskelevien ihmisten henkilökohtaiset ominaisuudet, mm. valppaustila ja liikkumisnopeus. Tässä tutkimuksessa käytettiin poistumisen eräiden vaiheiden kestoajan arviointiin poistumislaskentaohjelmaa *Simulex*, missä yhteydessä määriteltiin myös hallissa oleskelevien ihmisten ominaisuudet siinä laajuudessa kuin ohjelma vaatii. *Simulex*-ohjelma ja sillä tehdyt laskelmat kuvataan tarkemmin liitteessä B.

6. Ihmisten poistuminen tulipalon sattuessa

6.1 Poistumisen vaiheet

Ihmisten poistuminen rakennuksesta tulipalon sattuessa voidaan jakaa kolmeen välittömästi toisiaan seuraavaan vaiheeseen. Nämä vaiheet ovat esivaihe, reagoitinvaihe ja siirtymisvaihe [6].

Esivaihe alkaa tulipalon syttyessä ja päättyy kun ihmiset tulevat tietoisiksi palosta. Reagoitinvaiheen aikana ihmiset pohtivat eri toimintavaihtoehtoja, joita ovat mm. lisätietojen hankkiminen sekä sammutustoimiin ryhtyminen. Reagoitinvaiheen lopuksi ihmiset tekevät päätöksen rakennuksesta poistumisesta. Siirtymisvaiheen aikana ihmiset valitsevat poistumisreitit ja poistuvat rakennuksesta. Siirtymisvaihe päättyy, kun kaikki rakennuksessa oleskelevat ihmiset ovat poistuneet turvallisesti.

Poistumiseen kuluva aika (kokonaispoistumisaika) on tämän perusteella

$$t_p = t_a + t_b + t_m \quad (6)$$

missä t_a on esivaiheen kesto-aika, t_b on reagoitinvaiheen kesto-aika, ja t_m on siirtymisvaiheen kesto-aika.

Yllä olevassa on esivaihe, reagoitinvaihe ja siirtymisvaihe määritelty ihmisjoukon toimintaa kuvaavina käsitteinä. Käytännössä ihmisten havaintokyky, reagoitintavat ja liikkumisnopeudet kuitenkin vaihtelevat, joten myös poistumisen eri vaiheiden kestoajat sekä poistumiseen tarvittava kokonaisaika ovat yksilöllisiä. Ihmisjoukon kannalta tämä tarkoittaa sitä, että poistumisaikalaskelmissa ei kesto-aikoja tulisi käsitellä yksittäisinä numeroarvoina vaan kesto-aikajakautumina. Tähän näkökohtaan palataan kohdassa 6.3.

On huomattava, että rajat eri vaiheiden välillä ovat jossain määrin mielivaltaisia. Niinpä ihmisten varsinainen liikkuminen yhdistetään tavallisesti siirtymisvaiheeseen. Käytännössä ihmiset saattavat liikkua jo esivaiheen ja reagoitinvaiheen aikana esim. sen vuoksi, että he haluavat selvittää tilannetta hankkimalla lisätietoja. Määrätietoinen liikkuminen kohti uloskäyntiä on kuitenkin nimenomaan siirtymisvaiheen tunnus. Voitaisiin myös ajatella poistumisreitit valinnan kuuluvan reagoitinvaiheeseen, sillä reitinvalinta on yhteydessä reagoitinvaiheen aikana mahdollisesti tapahtuvaan lisätietojen hankintaan. Käytännössä poistumisreitit valintaan vaikuttavat kuitenkin myös sellaiset seikat, jotka ilmenevät vasta siirtymisvaiheen aikana, kuten esim. mahdollinen ruuhkautuminen oviaukoissa. Tämän vuoksi reitinvalinta kuuluu luontevammin osaksi siirtymisvaihetta.

6.2 Poistumisen onnistuminen

Poistuminen ei aina onnistu. Joskus vain osa rakennuksessa oleskelevista henkilöistä pääsee turvaan. Ääritapauksessa saattavat jopa kaikki rakennuksessa oleskelevat ihmiset menehtyä tulipalon uhreina jo ennen kuin kukaan heistä on edes ehtinyt tulla tietoiseksi tulipalosta.

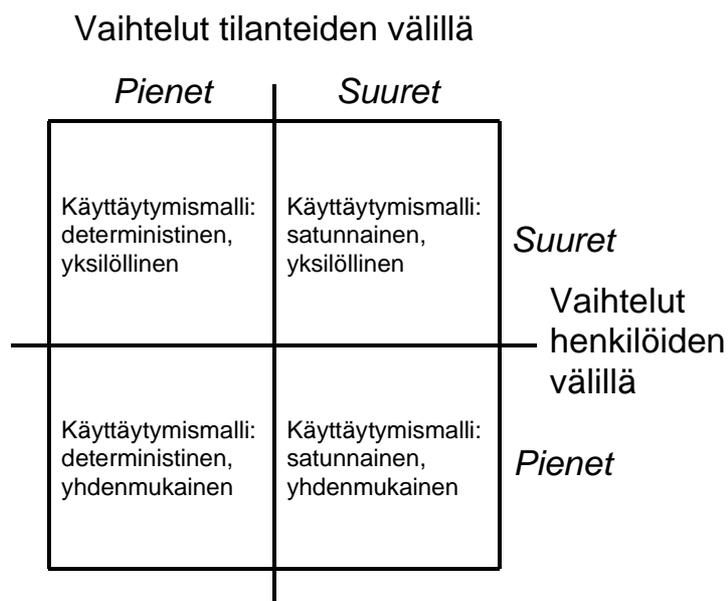
Kun poistumisen onnistumista arvioidaan luotettavuusteknisten menetelmien avulla, on vastaus yksinkertaisimmillaan muotoa "tarkasteltavan tulipalotilanteen sattuessa pääsevät kaikki rakennuksessa oleskelevat ihmiset poistumaan turvallisesti 99,9 prosentin todennäköisyydellä". Tällaiseen kysymyksenasetteluun joudutaan rajoittumaan myös tässä tutkimuksessa. Käytännössä tulisi tilanne kuitenkin eritellä tarkemmin. On suuri ero sillä, tarkoittaako jäljelle jäänyt 0,1 prosentin todennäköisyys mahdollisuutta yhden ihmisen menehtymiseen vai kenties kymmenen tai ehkä jopa sadan ihmisen menehtymiseen. Jatkossa tulisi työtä laajentaa siihen suuntaan, että myös uhrien lukumäärän todennäköisyysjakautuma pystyttäisiin arvioimaan.

6.3 Vaihtelu, jakautuma ja hajonta

Poistumiseen tarvittava aika vaihtelee useista eri syistä. Poistumisaikaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. rakennuksessa oleskelevien henkilöiden lukumäärä, henkilökohtaiset ominaisuudet ja sijoittuminen rakennuksen sisällä, tulipalon kehittyminen ja sen vaikutus ihmisten päätöksenteko- ja liikkumiskykyyn, käytettävissä olevat poistumistiet jne.

Yllä mainittuihin tekijöihin sisältyy runsaasti vaihtelua ja satunnaisuutta. Tämän vuoksi poistumisaikaa ei voi kunnollisesti esittää yksittäisenä lukuna vaan se tulisi esittää jakautumana. Käytännössä saattaa poistumisajan jakautuman määrittäminen olla mahdotonta, sillä vaihtelua aiheuttaviin tekijöihin sisältyy paljon epävarmuutta ja jakautuman määrittämiseen tarvittava työmäärä muodostuu joka tapauksessa hyvin suureksi. Tällöin voidaan pyrkiä arvioimaan esim. keskimääräinen poistumisaika, poistumisajoissa esiintyvä hajonta ja/tai poistumisajan ylä- ja alaraja.

Poistumiseen tarvittavan ajan vaihtelut voidaan luokitella monella eri tavalla. Tarkastellaan kuvassa 7 esitettyä jaottelua.



Kuva 7. Yksittäisten ihmisten poistumisaikojen vaihteluiden selittäminen käyttäytymismallien avulla.

Kuvan 7 vaaka-akselilla kuvataan niitä eroja, joita havaitaan yksittäisen ihmisen käytöksessä samanlaisen tilanteen toistuessa. Näiden erojen ollessa pieniä on kyseisen ihmisen käyttäytyminen determinististä ja ainakin periaatteessa ennalta arvattavissa. Erojen ollessa suuria on kyseisen ihmisen käyttäytyminen satunnaista ja vaikeasti ennustettavaa. Jälkimmäinen tilanne on luonnollisesti paljon vaikeampi paloturvallisuusanalyysien kannalta.

Kuvan 7 pystyakselilla kuvataan niitä eroja, joita havaitaan eri ihmisten käyttäytymisessä jossain tietyissä tilanteissa. Näiden erojen ollessa pieniä on ihmisten käyttäytyminen yhdenmukaista, ihmiset pyrkivät ensisijaisesti toimimaan ryhmänä. Parhaimmillaan tämä saattaa johtaa ripeään ja kurinalaiseen poistumiseen eli poistumisen onnistumistodennäköisyys nousee korkeaksi. Kääntöpuolena on se, että koko ryhmän viivytely saattaa johtaa suureen katastrofiin. Pystyakselilla kuvattujen erojen ollessa suuria on ihmisten käyttäytyminen yksilöllistä. Tähän saattaa liittyä korkeampi todennäköisyys sille, että ainakin joku menehtyy, mutta alhaisempi todennäköisyys sille, että kaikki menehtyvät. Palataan siis jo kohdassa 6.2 esitettyyn seikkaan: tilanteen kuvaamiseen ei riitä tieto epäonnistumisen todennäköisyydestä vaan tarvitaan myös tieto epäonnistumisen seurausten vakavuudesta.

Poistumisajoissa esiintyvä hajonta muodostuu siis kuvassa 7 esitetyllä tavalla kahdesta eri komponentista. Kutsutaan jatkossa näitä komponentteja nimillä "tilanteiden väliset vaihtelut" ja "henkilöiden väliset vaihtelut".

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 8 pyritään havainnollistamaan niitä vaikutusmekanismeja, jotka aiheuttavat vaihtelua ja hajontaa eri vaiheiden kestoajoihin. Tarkasteltavana ovat seuraavat kysymykset:

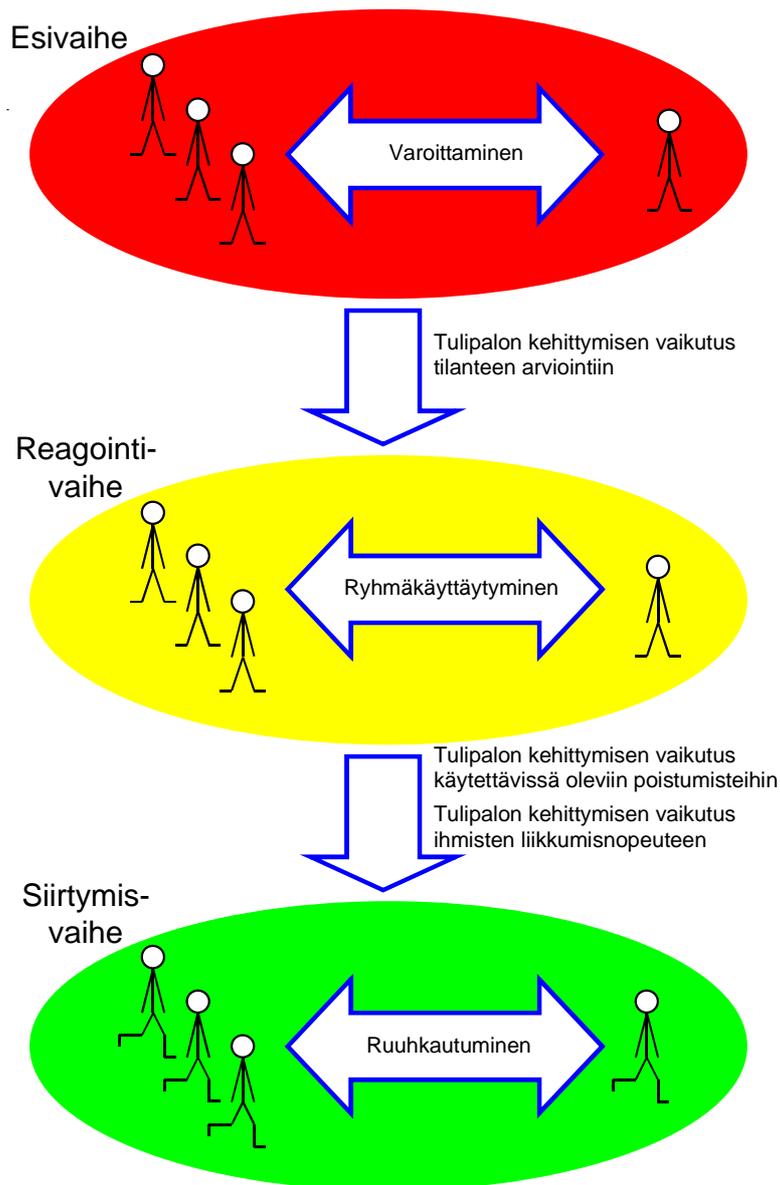
- Millä tavoin yksittäisen ihmisen toiminta ja päätökset vaikuttavat muiden rakennuksessa oleskelevien ihmisten poistumiseen? Entä kääntäen?
- Millä tavoin poistumisen eri vaiheiden kestoajat vaikuttavat toisiinsa?

Kuvassa 8 esitetyt tekijät ovat jossain määrin itsestäänselvyyksiä, mutta reagointivaiheeseen liitettyä ryhmäkäyttäytymistä kannattaa tarkastella hieman lähemmin. Sinänsä reagointivaiheen ja ryhmäkäyttäytymisen yhteenkuuluvuus on kokemuksen valossa perusteltua [7]. Aiemmin mainitun mukaisesti ryhmäkäyttäytyminen pienentää henkilöiden välisiä eroja, mutta lisää tilanteiden välisiä eroja. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltamisen kannalta on merkittävää kuitenkin erityisesti se, että reagointivaiheeseen liittyvällä ryhmäkäyttäytymisellä on vaikutusta siirtymisvaiheen kestoajaan ja sen hajontaan: ihmisten yhtäaikainen liikkeellelähtö johtaa helposti ruuhkaantumiseen, jolla taas on taipumus pidentää siirtymisvaiheen kestoajaa ja suurentaa siirtymisvaiheen kestoajan hajontaa ihmisten välillä.

Johtopäätös kuvassa 8 esitetyistä tekijöistä on se, että poistumisen eri vaiheiden kestoajoina ei voi tarkastella itsenäisinä ja toisistaan riippumattomina. Käytännössä esivaiheen aikana tapahtuvat asiat vaikuttavat reagointivaiheen tapahtumiin ja nämä taas vuorostaan siirtymisvaiheen tapahtumiin. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltamisen kannalta on merkittävää se, että laskenta ei voi yksinomaan perustua riippumattomien satunnaismuuttujien ja niiden jakautumien käyttämiseen.

6.4 Esivaihe

Esivaiheen pituus voidaan urheiluhalleja tarkasteltaessa arvioida lyhyeksi. Tähän on kaksi perustetta. Ensinnäkin itse halli muodostaa laajan, avoimen, yhtenäisen tilan, mikä antaa hyvät edellytykset liekkien ja savun varhaiselle havaitsemiselle. Toiseksi, hallissa oleskelevat ihmiset ovat valveilla ja heidän voidaan olettaa pystyvän käyttämään aistiaan normaalisti. Tämä antaa havaintojen tekemisen lisäksi myös hyvät mahdollisuudet toisten hallissa oleskelevien ihmisten varoittamiseen.



Kuva 8. Rakennuksesta poistumisen vaiheet. Kuvassa on hahmoteltu vaikutusmekanismeja, joiden kautta edeltävän vaiheen kesto aika vaikuttaa seuraavan vaiheen kesto aikaan sekä joiden kautta ihmiset vaikuttavat toisiinsa.

Magnusson *et al.* [1] ovat arvioineet esivaiheen pituuden noudattavan tällaisessa tapauksessa logaritminormaalijakautumaa, jonka keskiarvo on 10 sekuntia ja keskihajonta 5 sekuntia. Esivaiheen pituus on siis arvioitu erittäin lyhyeksi. Tässä tutkimuksessa arvioidaan esivaiheen pituudeksi yksi minuutti. Hajonta oletetaan merkityksettömäksi.

Tehtyä valintaa voidaan havainnollistaa laskemalla, kuinka suureksi paloteho kasvaa minuutin aikana palon kasvutekijän saadessa joitakin tyypillisiä arvoja. Tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Palon kasvunopeuden ja palotehon välinen riippuvuus yhden minuutin kuluttua tulipalon syttymisestä.

Palon kehittyminen	Kasvutekijä [kW/s ²]	Kasvuaika- vakio [s]	Paloteho yhden minuutin kuluttua syttymisestä [kW]
Hidas	0,0028	600	10
Keskinopea	0,011	300	40
Nopea	0,044	150	160

Nyt käsiteltävänä oleva mitoituspalo kuuluu luokkaan "nopea". Valittaessa esivaiheen pituudeksi yksi minuutti on siis käytännössä oletettu, että tulipalo havaitaan palotehon saavutettua arvon 160 kW. Tässä vaiheessa voidaan palotekniikan nyrkkisääntöjä käyttämällä arvioida liekin korkeuden olevan jo yli yhden metrin [8]. Minuutin pituinen havaitsemisaika vaikuttaa varmalla puolella olevalta arviolta ajatellen kyseessä olevaan tilanteeseen liittyviä, tulipalon nopeaa havaitsemista edesauttavia seikkoja.

Tulipalon kehittymisen ollessa hidasta voi esivaiheen ajatella muodostuvan pidemmäksi, sillä 10 kW paloteho ei ole vielä kovin suuri. Toisaalta on tällöin myös kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika todennäköisesti pidempi kuin nopeasti kehittyvän palon tapauksessa.

6.5 Reagointivaihe

Reagointivaiheen pituuden arvioiminen on vaikeaa, ja asia on parhaillaan aktiivisen tutkimuksen kohteena [2].

Urheiluhallien tapauksessa voidaan arvioida useiden seikkojen lyhentävän reagointivaiheen pituutta. Koska tila on yhtenäinen ja selkeä, ei uloskäytävien löytämiseen ja poistumisreitien valintaan liity samanlaisia ongelmia kuin monikerroksisissa ja sokkeloisissa rakennuksissa. Samasta syystä eivät ihmiset myöskään todennäköisesti joudu käyttämään paljoakaan aikaa samassa hallissa mahdollisesti oleskelevien perheen-

jäsentensä etsimiseen. Lopuksi voidaan arvioida, että kyseeseen tulevissa tilaisuuksissa on paikalla sekä hallin henkilökuntaa että muulla tavoin auktoriteettiasemassa olevia ihmisiä, joiden toimenpiteillä on reagointiaikaa lyhentävä vaikutus.

Viitteessä [2] arvioidaan reagointivaiheen pituuden olevan noin 1 minuutti silloin kun rakennuksessa oleskelevat ihmiset pystyvät näkemään tulipaloon liittyvät liekit ja savun. Samassa lähteessä esitetään myös yksityiskohtaisempia tuloksia kyselystä, jossa ruotsalaisia asiantuntijoita pyydettiin arvioimaan reagointivaiheen pituutta eri tilanteissa. Kyselyssä ei tosin käsitelty urheiluhalleja, mutta vastaavana tilanteena voidaan pitää tavaratalopaloa, jossa ihmiset pystyvät näkemään savun ja liekit. Tällaisessa tapauksessa oli reagointivaiheen pituudelle esitettyjen arvioiden keskiarvo 1 minuutti 30 sekuntia, pienin esitetty arvio 45 sekuntia ja korkein esitetty arvio 3 minuuttia 30 sekuntia.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan reagointivaiheen pituuden vaikutusta kolmen eri vaihtoehdon avulla:

- (a) Nopea reagointi: reagointivaiheen pituus on normaalijakautunut siten, että keskiarvo on 1 minuutti ja keskihajonta on 15 sekuntia.
- (b) Hidas reagointi: reagointivaiheen pituus on normaalijakautunut siten, että keskiarvo on 3 minuuttia ja keskihajonta on 15 sekuntia.
- (c) Vaihteleva reagointi: reagointivaiheen pituus on logaritminormaalijakautunut siten, että jakautuman mediaani on 1 minuutti 15 sekuntia ja logaritminen keskihajonta on 0,70 (tällöin reagointivaiheen pituuden aritmeettinen keskiarvo on n. 96 sekuntia ja keskihajonta n. 74 sekuntia).

Vaihtoehdot (a) ja (b) edustavat kohdassa 6.3 annetun määritelmän mukaisesti yhdenmukaista käyttäytymismallia: henkilöiden välisiä eroja kuvaava 15 s keskihajonta on alhainen. Vaihtoehto (c) edustaa huomattavasti yksilöllisempää käyttäytymismallia.

Esitetyistä kolmesta vaihtoehdosta on vaihtoehto (a) lähinnä viitteessä [2] esitettyjä arvoja. Tätä voidaan pitää normaalivaihtoehtona. Vaihtoehdon (a) todennäköisyydeksi arvioidaan 60 %.

Vaihtoehto (b) kuvaa tilannetta, jossa siirtymisvaihe viivästyy esim. sen vuoksi, että hallissa oleskelevat ihmiset jäävät odottamaan poistumiskehotusta tai joitakin muita henkilökunnan toimenpiteitä eivätkä sen vuoksi tee päätöstä liikkeellelähdestä. Vaihtoehdon (b) todennäköisyydeksi arvioidaan 10 %.

Vaihtoehto (c) kuvaa tilannetta, jossa ihmisten reagointitavat jostain syystä vaihtelevat voimakkaasti. Ihmiset saattavat esim. kuulua useaan erilliseen ryhmään, jotka tekevät

päätöksensä muista ryhmistä riippumatta. Vaihtoehdon (c) todennäköisyydeksi arvioidaan 30 %.

Vaihtoehtojen (a), (b) ja (c) väliset erot kuvaavat tilanteiden välistä hajontaa. Periaatteessa voisi myös tilanteiden väliselle hajonnalle esittää jakautuman, mutta tässä esityksessä rajoitutaan tarkastelemaan kolmea yksittäistä vaihtoehtoa, joiden todennäköisyydet annetaan diskreetteinä numeroarvoina.

6.6 Siirtymisvaihe

Siirtymisvaiheeseen kuuluvat poistumisreitien valinta sekä varsinainen siirtyminen. Poistumisen onnistumisen kannalta kriittisimpiä tapauksia ovat sellaiset, joissa osa uloskäytävistä ei ole käytössä. Syynä saattaa olla esim.:

- Ihmiset eivät tunne uloskäytävien sijaintia. Tämä vaihtoehto ei vaikuta merkittävältä urheiluhalleissa, sillä yhtenäinen hallitila on selkeä ja poistumistiet ovat periaatteessa nähtävissä kaikkialta hallista.
- Uloskäytävien eteen on varastoitu tavaraa, joka estää liikkumisen tai hidastaa sitä. Uloskäytävien ovet on myös saatettu lukita esim. murtoturvallisuuden vuoksi. Kolmantena vaihtoehtona voidaan mainita mm. palloiluhalleissa käytettävät verkot ja verhot, joiden tehtävänä on pysäyttää kentältä pois lentävät pallot. Nämä verkot ja verhot muodostuvat normaalisti suikaleista, jotka sallivat läpikulun, sillä se on tärkeää myös hallien normaalikäytön kannalta. Asiaan kannattanee silti kiinnittää huomiota.
- Tulipalo itsessään estää uloskäytävän käytön. Jos esim. tulipalon sijaintipaikka on ihmisjoukon ja uloskäytävän välissä, eivät ihmiset todennäköisesti voi tai ainakaan halua käyttää ko. ovea. Tämä vaihtoehto on erittäin todennäköinen, sillä hallissa syttyvä tulipalo estää todennäköisesti kaikissa tapauksissa ainakin jonkin uloskäytävän käytön.

Tässä tehtävässä tarkastellaan seuraavia kahta tapausta:

- (d) Hallin ovet 1, 2, 4 ja 5 ovat käytössä ja avautuvat koko leveydeltään. Tulipalo syttyy hallin kaakkoiskulmassa, joten ovea 3 ei voida käyttää poistumiseen. Tämän tapauksen todennäköisyydeksi arvioidaan 80 %.

- (e) Hallin ovet 1, 2, 4 ja 5 ovat käytössä, mutta ovella 2 ei poistumiseen voida käyttää pariovien koko leveyttä vaan ainoastaan kapeampaa käyntiovea. Tämän tapauksen todennäköisyydeksi arvioidaan 20 %.

Siirtymiseen tarvittava aika arvioitiin *Simulex*-poistumislaskentaohjelmalla käyttäen tässä tutkimuksessa valittuja lähtöarvoja (ks. liite B). Käytännössä *Simulex*-ohjelmalla laskettiin sekä reagoitivaihe että siirtymisvaihe, ja reagoitivaiheen pituuden annettiin vaihdella kohdassa 6.5 esitettyjen tapausten mukaisesti. *Simulex* ei tunne logaritminormaalijakautumaa, joten tapauksen (c) logaritminormaalijakautuma korvattiin kahdella tasan jakautuneella jakaumalla (400 henkilöä, joiden reagoitajat olivat tasaisesti jakautuneet aikavälille 20...130 s ja 100 henkilöä, joiden reagoitajat olivat tasaisesti jakautuneet aikavälille 130...300 s).

Simulex-laskentaohjelmalle joudutaan antamaan lähtötietona ihmisten jakautuminen eri poistumisteiden välille. Tarkasteltavana olevassa urheiluhallissa vallitsee esteetön näkyvyys kaikille käytössä oleville oville, joten oletettiin, että ihmisten käyttäytymistä hätäpoistumisen aikana hallitsee "kassajonoperiaate", eli ruuhkautuneelle ovella ei jäädä odottamaan, jos jokin toinen reitti näyttää tarjoavan mahdollisuuden nopeampaan ulospääsyyn. Näin saatiin muutaman koelaskennan perusteella valituksi seuraava jakautuminen:

Ovi 1	130 henkilöä
Ovi 2	60 henkilöä
Ovi 4	75 henkilöä
Ovi 5	235 henkilöä

Suurin osa ihmisistä poistuu siis lähimpänä olevien ovien 1 ja 5 kautta. Ovi 2 on kauimpana ihmisjoukosta ja sitä käyttää vain 60 henkilöä. Tulokset osoittivat myös, että on merkityksetöntä, onko ovella 2 käytössä koko parioven leveys vai vain kapeampi käyntiovi. Tämän vuoksi sulautettiin ylempänä valitut tapaukset (d) ja (e) yhdeksi tapaukseksi.

Simulex-ohjelmalla tehtäviin laskelmiin sisältyy aina tietty määrä satunnaisuutta mm. ihmisten siirtymisnopeuden valinnassa, joten laskelmissa toistettiin kukin tapaus viisi kertaa. Näin saatiin arvioiduksi myös tuloksissa syntyvää hajontaa. Näin syntyvä hajonta on siis tilanteiden välistä hajontaa.

Reagointi- ja siirtymävaiheen yhteispituudeksi saatiin *Simulex*-laskelmilla taulukossa 2 esitetyt tulokset. Tässä taulukossa hajonta on siis tilanteiden välistä hajontaa, ei henkilöiden välistä.

Taulukko 2. Simulex-poistumislaskentaohjelmalla saadut reagointi- ja siirtymisaikojen yhteenlasketut arvot kohdassa 6.5 määritellyissä tapauksissa (a), (b) ja (c).

Kohdan 6.5 mukainen laskentata- paus	Reagointi- ja siirtymävaiheen yhteispituus			
	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Hajonta
	[s]	[s]	[s]	[s]
Tapaus (a)	202	209	206	2,5
Tapaus (b)	323	339	331	6,9
Tapaus (c)	361	427	393	24,3

Taulukossa on annettu se aika, joka kuluu reagoitivaiheen alusta siihen, kun viimeisenkin henkilö on poistunut hallista. Niinpä tapauksessa (c) on kokonaisaika suurempi kuin tapauksessa (b), vaikka tapauksessa (c) noin puolet henkilöistä ehtii jo ulos hallista ennen kuin tapauksessa (b) kukaan on vielä poistunut. Jatkon kannalta olisi tärkeää tarkastella kohdassa 6.2 esitettyjen näkökohtien valossa todennäköisyyksiä ja riskitasoja moniuhrisille tulipaloille (nyt toteutettavissa laskelmissa on tarkasteltavana se, kuinka todennäköistä on, että ylipäänsä joku ei ehdi ajoissa ulos hallista vaan menehtyy tulipalossa).

7. Laskelmat

Tässä luvussa lasketaan luotettavuusteknisten menetelmien avulla todennäköisyys sille, että kaikki urheiluhallissa oleskelevat henkilöt eivät ehdi turvallisesti poistua hallista tässä raportissa tarkasteltua mitoituspaloa vastaavan tulipalon sattuessa.

7.1 Lähtötiedot

Taulukko 3 sisältää yhteenvedon laskelmia varten tarvittavien lähtötietojen numeroarvoista, jotka on valittu edellisissä luvuissa esitetyin perustein.

Taulukko 3. Laskelmia varten valitut lähtötiedot. Sulkeissa on mainittu tämän julkaisun kohta, jossa on esitetty perusteet tehdyille valinnoille.

Aika t_{crit} , jonka jälkeen olosuhteet hallissa muuttuvat poistumisen kannalta kriittisiksi (kohta 4):

Keskiarvo \bar{t}_{crit}	1 560 s
Keskihajonta $\sigma_{t_{crit}}$	360 s

Kokonaispoistumisaika $t_p = t_a + t_b + t_m$, joka on saatu laskemalla yhteen poistumisen esivaiheen pituus t_a (kohta 6.4) ja poistumisen yhteenlaskettu reagointi- ja siirtymisaika, $t_b + t_m$ (kohdat 6.5 ja 6.6):

	Tapaus		
	(a)	(b)	(c)
Keskiarvo \bar{t}_p	266 s	391 s	453 s
Keskihajonta σ_{t_p}	2,5 s	6,9 s	24,3 s
Esiintymistodennäköisyys, P_f	0,60	0,30	0,10

7.2 Rajatilafunktio

7.2.1 Määritelmät

Turvallisuutta voidaan analysoida matemaattisesti rajatilafunktion käsitteen avulla. Rajatilafunktiot ovat eräs luotettavuusteknisten menetelmien perustyökaluista [9].

Oletetaan, että tarkasteltavana olevan systeemin tilaa kuvaa joukko muuttujia r, s, \dots . Osa muuttujista kuvaa jossain mielessä systeemiin kohdistuvaa kuormitusta, osa taas systeemin kestävyyskykyä. Systeemi on turvallinen niin kauan kuin kuormitukset eivät ylitä kestävyyskykyä. Turvallisen ja turvattoman alueen välistä rajaa kutsutaan rajatilaksi.

Matemaattisesti rajatilafunktio $g(r, s, \dots)$ muotoillaan tavallisesti siten, että sen avulla ilmaistuna

$$g(r, s, \dots) > 0 \Rightarrow \text{systeemi on turvallinen}$$

$$g(r, s, \dots) < 0 \Rightarrow \text{systeemi on turvaton}$$

Turvallisen ja turvattoman alueen välisen rajan eli rajatilan määrää siis yhtälö $g(r, s, \dots) = 0$.

Rajatilafunktion käsitettä havainnollistetaan kuvassa 9, johon on valittu yksinkertainen mahdollinen tilanne. Systeemin kestävyyskykyä kuvaa yksi muuttuja r ja kuormitusta yksi muuttuja s . Kuvassa esitetty rajatilafunktio on

$$g(r, s) = r - s \tag{7}$$

jonka saadessa positiivisia arvoja systeemi on turvallinen (harmaa alue) ja jonka saadessa negatiivisia arvoja systeemi on turvaton. Rajatila $g(r, s) = r - s = 0$ on merkitty kuvaan 9 katkoviivalla.

Jos muuttujilla r, s, \dots on jotkut tietyt numeroarvot, kutsutaan systeemiä deterministiseksi. Tällöin myös rajatilafunktion arvo on jokin tietty numeroarvo, eli systeemi on aina joko täysin turvallinen tai täysin turvaton. Tilannetta voidaan kuvan 9 koordinaatistossa kuvata yksittäisellä pisteellä. Todellisuus on kuitenkin yleensä monimutkaisempi. Sekä systeemiin kohdistuviin kuormituksiin että systeemin kestävyyskykyyn liittyy käytännössä runsaasti satunnaisvaihteluita, joita pyritään kuvaamaan todennäköisyysjakautumilla. Tällöin myös rajatilafunktion arvo on satunnaismuuttuja, johon liittyy jokin to-

dennäköisyysjakautuma. Systeemin turvallisuuden arviointiin ei siis tässä tapauksessa voi enää käyttää kyllä/ei-asteikkoa, vaan turvallisuus joudutaan esittämään todennäköisyyksinä.

Jatkossa esitettäviä asioita voidaan havainnollistaa kuvassa 10 esitettyjen geometrinen konstruktioiden avulla. Oletetaan, että muuttujat r ja s ovat toisistaan riippumattomia, normaalijakautuneita satunnaismuuttujia, joiden keskiarvot ovat \bar{r} ja \bar{s} ja keskihajonnat σ_r ja σ_s . Muuttujien r ja s yhteisjakautuman tasa-arvokäyrät ovat tällöin ellipsejä, joiden pääakselit ovat yhdensuuntaisia koordinaattiakselien kanssa (ks. kuvan 10 vasen puoli). Intuitiivisesti vaikuttaa selvältä, että tilanne on sitä turvallisempi mitä kauempana ellipsien keskipiste on rajatilafunktion määrittelemästä turvattomasta alueesta. Kvantitatiivinen mitta turvallisuudelle saadaan seuraavasti. Määritellään ensin uudet muuttujat

$$r' = \frac{r - \bar{r}}{\sigma_r} \quad (8)$$

ja

$$s' = \frac{s - \bar{s}}{\sigma_s} \quad (9)$$

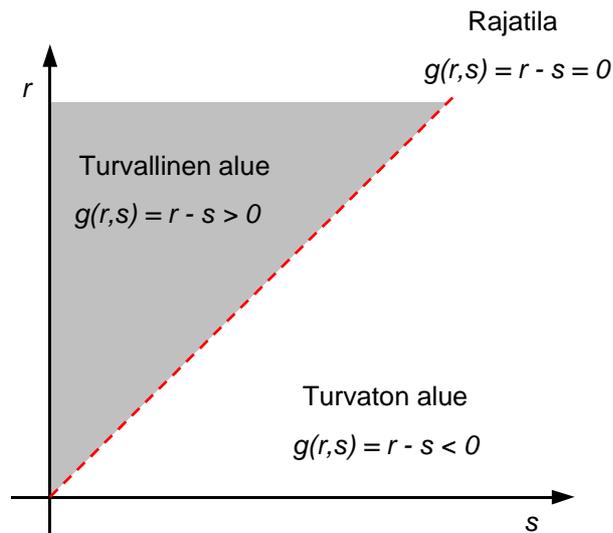
jotka ovat (0,1)-normaalijakautuneita satunnaismuuttujia. Muuttujien r' ja s' yhteisjakautuman tasa-arvokäyrät ovat siis origokeskisiä ympyröitä (kuvan 10 oikea puoli). Rajatilaa $g(r, s) = r - s = 0$ vastaa (s', r') -koordinaatistossa yhtälö

$$r' = \frac{\sigma_s}{\sigma_r} s' - \frac{\bar{r} - \bar{s}}{\sigma_r} \quad (10)$$

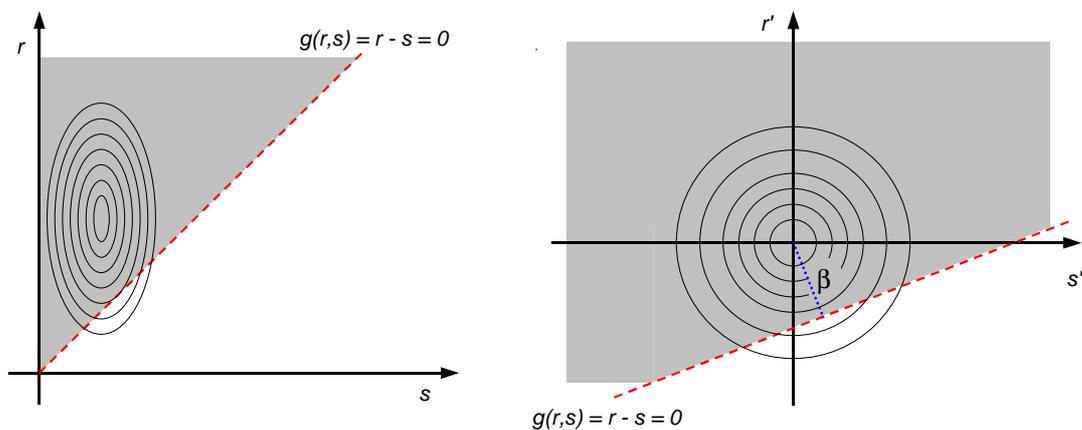
joka kuvaa nousevaa suoraa ja on myös piirretty näkyviin kuvan 10 oikeaan puoleen. Suoran lyhin etäisyys origosta on

$$\beta = \frac{\bar{r} - \bar{s}}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \quad (11)$$

ja tilanne on siis sitä turvallisempi mitä korkeampi on β :n arvo.



Kuva 9. Turvallinen ja turvaton alue sekä niiden välisen rajan määrittelevä rajatila, kun systeemiä kuvataan kahdella muuttujalla (r ja s) ja rajatilafunktio on $g(r,s) = r - s$. Tässä kuvassa on oletettu, että r ja s ovat aina positiivisia, mutta tämä oletamus ei ole kaikissa tapauksissa tarpeellinen.



Kuva 10. Vasen puoli: rajatilafunktio $g(r,s)$ sekä muuttujien r ja s yhteisjakautuman tasa-arvokäyrät. Oikea puoli: sama asia esitettynä muuttujien r' ja s' avulla. Oikean puolen kuvassa näkyy myös β eli rajatilafunktion lyhin etäisyys (s',r') -koordinaatiston origosta.

Suurelle β voidaan yllä olevan geometrisen tulkinnan lisäksi esittää myös todennäköisyysmatematiikkaan pohjautuva tulkinta. Koska muuttujat r ja s ovat toisistaan riippumattomia, normaalijakautuneita satunnaismuuttujia, on myös niiden erotus $z = r - s$ normaalijakautunut satunnaismuuttuja, jonka keskiarvo on $\bar{z} = \bar{r} - \bar{s}$ ja keskihajonta $\sigma_z = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}$. Todennäköisyys turvattoman tilanteen syntymiselle on tällöin

$$P_F = P(r < s) = P(z < 0) = P\left(\frac{z - \bar{z}}{\sigma_z} < -\frac{\bar{z}}{\sigma_z}\right) = P\left(\frac{z - \bar{z}}{\sigma_z} < -\beta\right) \quad (12)$$

missä alaindeksi F tulee englannin kielen sanasta ”Failure”. Ottamalla huomioon, että $(z - \bar{z})/\sigma_z$ on (0,1)-normaalijakautunut satunnaismuuttuja, voidaan yhtälö (12) esittää muodossa

$$P_F = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (13)$$

missä $\Phi(x)$ on (0,1)-normaalijakautuneen satunnaismuuttujan kertymäfunktion arvo muuttujan arvolla x .

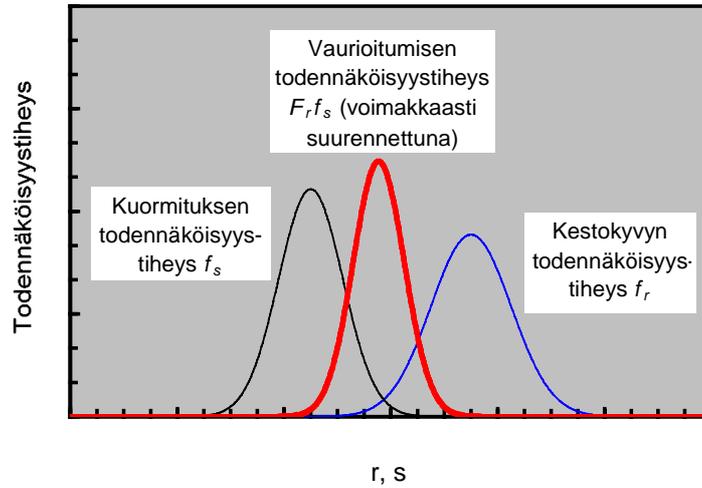
Yleisemmässä tapauksessa ei muuttujien r ja s tarvitse olla normaalijakautuneita. Oletetaan ne kuitenkin edelleen toisistaan riippumattomiksi ja tarkastellaan yhtälön (7) kuvaamaa rajatilafunktiota. Olkoon systeemin kestävyys r todennäköisyystiheys $f_r(r)$ ja kertymäfunktio $F_r(r)$ sekä systeemin kuormituksen s todennäköisyystiheys $f_s(s)$ ja kertymäfunktio $F_s(s)$. Tällöin on todennäköisyys sille, että kuormituksen s arvo on välillä $(x, x + dx)$ ja samaan aikaan kestävyys r arvo on pienempi kuin x on

$$dP_F = P(r \leq x) \cdot P(x \leq s \leq x + dx) = F_r(x) \cdot f_s(x) dx \quad (14)$$

Todennäköisyys turvattoman tilanteen syntymiselle saadaan integroimalla yhtälö (14). Integrointi tulee ulottaa kuormitusta kuvaavan muuttujan s kaikkien sallittujen arvojen ylitse. Olettamalla, että kuormituksen vaihteluväli on $(-\infty, \infty)$ saadaan

$$P_F = P(r < s) = \int dP_F = \int_{-\infty}^{\infty} F_r(x) f_s(x) dx \quad (15)$$

Kuvassa 11 on havainnollistettu tilannetta esittämällä samassa kuvassa kestävyys r kuvaavan muuttujan todennäköisyystiheys $f_r(r)$ ja kuormitusta kuvaavan muuttujan todennäköisyystiheys $f_s(s)$ sekä lisäksi turvattoman tilanteen syntymistä kuvaava todennäköisyystiheys $F_r(x) f_s(x)$. Turvattoman tilanteen syntymistä kuvaava todennäköisyystiheys on esitetty voimakkaasti suurennettuna, sillä yleensä tämän funktion arvot ovat hyvin paljon pienempiä kuin todennäköisyystiheyksien $f_r(r)$ ja $f_s(s)$ arvot.



Kuva 11. Esimerkki kestokyvyn r ja kuormituksen s todennäköisyysjakautumista sekä turvattoman tilanteen todennäköisyysjakautumasta. Turvaton tilanne on mahdollinen alueelle, jossa kestokyvyn ja kuormituksen jakautumat ovat päällekkäisiä. Turvattoman tilanteen todennäköisyysjakautuma on esitetty voimakkaasti suurennettuna, jotta se erottuisi kuvan alareunasta.

7.2.2 Rajatilafunktioiden soveltaminen käytäntöön

Rajatilafunktioiden käyttöön perustuvissa luotettavuusteknisissä tarkasteluissa joudutaan vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- (a) Mitkä ovat ne tarkasteltavana olevan systeemin kuormitusta ja kestokykyä kuvaavat muuttujat, jotka tulisi ottaa mukaan analyysiin?
- (b) Mikä olisi systeemin turvallisuutta parhaiten kuvaava rajatilafunktion lauseke?
- (c) Minkälaiset todennäköisyysjakautumat liittyvät kohdan (a) muuttujiin (keskiarvot, hajonnat, maksimi- ja minimiarvot, jakautuman muotoa kuvaavat matemaattiset funktiot ja niissä esiintyvien parametrien numeroarvot)?
- (d) Minkälainen todennäköisyysjakautuma saadaan rajatilafunktion arvolle kohdassa (c) valittujen jakautumien perusteella?

On selvää, että kohdat (c) ja (d) ovat usein erittäin työläitä ja vaikeita. Tunnetta vain harvoja asioita niin hyvin, että niille voidaan esittää uskottavat todennäköisyysjakautumat. Poistumisturvallisuuden kannalta tällainen asia saattaisi olla esim. ihmisten keskimääräinen liikkumisnopeus. Useimmille asioille todennäköisyysjakautumat joudutaan arvioimaan puutteellisten tietojen perusteella, ja jakautumien luotettava selvittäminen onkin eräs jatkotutkimusta vaativista asioista.

Helppoin tapa edetä on olettaa tarkasteltavat muuttujat toisistaan riippumattomiksi normaalijakautuneiksi satunnaismuuttujiksi. Oletus normaalijakautuneisuudesta johtaa siihen, että kunkin muuttujan todennäköisyysjakautuman kuvaamiseen tarvitaan vain kahden parametrin numeroarvot (keskiarvo ja keskihajonta). Oletus riippumattomuudesta johtaa siihen, että rajatilafunktion arvon todennäköisyysjakautuman muodostamiseen tarvittava matematiikka pysyy suhteellisen yksinkertaisena.

Luotettavuusteknisiä menetelmiä sovellettaessa tulisi kuitenkin myös muuttujien väliset korrelaatiot ottaa huomioon. Erityisen tärkeää tämä on poistumisturvallisuutta tarkasteltaessa, sillä voidaan arvioida, että poistumisturvallisuuteen liittyy poikkeuksellisen paljon eri muuttujien välisiä riippuvuuksia. Esimerkkinä voidaan mainita, että palon kehittymisen ollessa keskimääräistä nopeampaa on siirtymisvaiheen kesto aika todennäköisesti keskimääräistä pitempi. Syynä tähän on se, että palossa syntyvä savu vaikeuttaa ihmisten liikkumista huonon näkyvyyden ja hengitysvaikeuksien vuoksi. Tämän tyyppisten negatiivisten korrelaatioiden jättäminen huomiotta saattaa johtaa yli-

optimistiseen arvioon poistumisen onnistumistodennäköisyydestä. Aiheeseen palataan tämän raportin kohdassa 7.6.

Luvuissa 7.3, 7.4 ja 7.5 esitetään kolme erilaista tapaa soveltaa rajatilafunktioita käytäntöön. Nämä ovat Cornellin menetelmä, Hasofer-Lindin menetelmä ja Monte Carlo -menetelmä.

7.2.3 Laskennan lähtökohdat nyt tarkasteltavassa tapauksessa

Valitaan

- kestokykyä kuvaavaksi muuttujaksi r aika t_{crit} , jonka jälkeen olosuhteet ovat poistumisen kannalta kriittisiä,
- kuormitusta kuvaavaksi muuttujaksi s aika t_p , joka kuluu tulipalon havaitsemiseen, päätöksentekoon ja turvaan siirtymiseen (kokonaispoistumisaika).

Tällöin rajatilafunktio on

$$g(r, s) = r - s = t_{crit} - t_p \quad (16)$$

jolle on voimassa

$$\begin{cases} g(r, s) = r - s > 0 \Rightarrow (r, s) \in S & \text{(turvallinen)} \\ g(r, s) = r - s = 0 \Rightarrow (r, s) \in L & \text{(rajatila)} \\ g(r, s) = r - s < 0 \Rightarrow (r, s) \in F & \text{(turvaton)} \end{cases} \quad (17)$$

ja muuttujien r ja s jakautumat saadaan luvussa 7.1 annetussa taulukossa 3.

7.3 Laskenta Cornellin menetelmällä

Cornellin menetelmää käytettäessä oletetaan, että rajatilafunktio on lineaarinen ja että systeemin kuormituksia ja kestäkykyä kuvaavat muuttujat ovat normaalijakautuneita ja toisistaan riippumattomia [9]. Yksinkertaisimmillaan lineaarinen rajatilafunktio on yhtälössä (16) esitettyä muotoa. Tällöin määritellään Cornellin luotettavuusluku β_C yhtälöllä [9]

$$\beta_C = \frac{\bar{r} - \bar{s}}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \quad (18)$$

missä \bar{r} , \bar{s} , σ_r ja σ_s ovat muuttujien r ja s keskiarvot ja keskihajonnat.

Cornellin luotettavuusluku on siis täysin identtinen tämän raportin kohdassa 7.2.1 määritellyn suureen β kanssa, ja myös sen todennäköisyysmatemaattinen tulkinta on sama.

Yhteenveto nyt käsitellyn esimerkkitehtävän tuloksista Cornellin luotettavuuslukua sovellettaessa on taulukossa 4. Kaikki tutkitut tapaukset havaittiin varsin turvallisiksi. Vähiten turvallinen oli tapaus (c), jossa ihmisten väliset suuret erot reagointivaiheen pituudessa johtavat pitkiin kokonaispoistumisaikoihin.

Taulukko 4. Laskennan lähtöarvot sekä Cornellin menetelmällä lasketut luotettavuusluvut ja todennäköisyydet turvattoman tilanteen syntymiselle tarkastelun kohteina olleissa kolmessa tapauksessa.

Tapaus	\bar{r} [s]	σ_r [s]	\bar{s} [s]	σ_s [s]	β_C []	P_F []
(a)	1 560	360	266	2,5	3,594	0,00016
(b)	1 560	360	391	6,9	3,247	0,00058
(c)	1 560	360	453	24,3	3,068	0,00108

Tarkastellaan taulukon 4 oikeanpuoleisimmassa sarakkeessa annettuja todennäköisyyden P_F arvoja. Kyseessä ovat ehdolliset todennäköisyydet, eli esim. tapaukselle (a) annettu todennäköisyyden arvo 0,00016 on todennäköisyys sille, että kaikki hallissa oleskelevat ihmiset eivät ehdi poistua turvallisesti, jos hallissa syttyy nyt tarkasteltavaa mitoituspaloa vastaava tulipalo ja jos ihmiset palon syttyttyä käyttäytyvät vaihtoehdossa (a) kuvatulla tavalla.

Taulukossa 5 on yhdistetty kaikki kolme tapausta käyttämällä hyväksi taulukossa 3 annettuja esiintymistodennäköisyyksiä P_I tapauksille (a), (b) ja (c). Tuloksena saatava todennäköisyys 0,000378 on todennäköisyys sille, että kaikki hallissa oleskelevat ihmiset eivät ehdi poistua turvallisesti, jos hallissa syttyy nyt tarkasteltavaa mitoituspaloa vastaava tulipalo.

Taulukko 5. Todennäköisyys sille, että kaikki urheiluhallissa olevat henkilöt eivät ehdi poistua turvallisesti, kun otetaan huomioon tarkasteltujen tapausten esiintymistodennäköisyydet P_I taulukosta 3.

Tapaus	P_F []	P_I []	$P_F \cdot P_I$ []
(a)	0,00016	0,60	0,000096
(b)	0,00058	0,30	0,000174
(c)	0,00108	0,10	0,000108
Yhteensä:			0,000378

7.4 Laskenta Hasofer-Lindin menetelmällä

Hasofer-Lindin menetelmää voidaan pitää Cornellin menetelmän yleistyksenä tilanteeseen, jossa rajatilafunktio ei ole lineaarinen ja jossa systeemiä kuvaavien satunnaisuuttujen ei tarvitse olla toisistaan riippumattomia [9, 10]. Olkoon seuraavassa esityksessä systeemin tilaa kuvaavien muuttujien lukumäärä n ja niiden symbolit z_1, z_2, \dots, z_n .

Hasofer-Lindin luotettavuusluku määritellään yhtälöllä

$$\beta_{HL} = \sqrt{\min(\beta^2)} \quad (19)$$

kun minimoinnissa käytetään rajoite-ehtoa

$$g(z_i) = g(z_1, z_2, \dots) = 0 \quad (20)$$

ja

$$\beta^2 = B^T \cdot C^{-1} \cdot B \quad (21)$$

missä pystymatriisi B on

$$B = Z - E(Z) = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \bar{z}_1 \\ \bar{z}_2 \\ \vdots \\ \bar{z}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 - \bar{z}_1 \\ z_2 - \bar{z}_2 \\ \vdots \\ z_n - \bar{z}_n \end{pmatrix} \quad (22)$$

ja kovarianssimatriisi C on

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_{z_1}^2 & \sigma_{z_1 z_2} & \cdots & \sigma_{z_1 z_n} \\ \sigma_{z_2 z_1} & \sigma_{z_2}^2 & \cdots & \sigma_{z_2 z_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{z_n z_1} & \sigma_{z_n z_2} & \cdots & \sigma_{z_n}^2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Kovarianssimatriisin C päälavistäjän alkiot $\sigma_{z_i}^2$ ovat muuttujien z_i variansseja (keskihajonnan neliötä) ja päälavistäjän ulkopuolella sijaitsevat alkiot $\sigma_{z_i z_j}$ ovat muuttujien z_i ja z_j keskinäistä riippuvuutta kuvaavia kovariansseja. Muuttujien ollessa toisistaan riippumattomia ovat niiden kovarianssit $= 0$, jolloin matriisi C on päälavistäjämatriisi.

Nyt tarkasteltavassa tapauksessa muuttujia on kaksi (r ja s) ja rajatilafunktio $g(z_i)$ on lineaarinen. Voidaan siis merkitä

$$z_1 = r \quad (24a)$$

$$z_2 = s \quad (24b)$$

$$g(z_1, z_2) = r - s = z_1 - z_2 = 0 \quad (24c)$$

Lisäksi muuttujat r ja s ovat toisistaan riippumattomia. Liitteessä C esitetyllä tavalla voidaan tälle tapaukselle johtaa lauseke

$$\beta^2 = \frac{(z_1 - \bar{r})^2}{\sigma_r^2} + \frac{(z_2 - \bar{s})^2}{\sigma_s^2} \quad (25)$$

ja ottamalla huomioon rajoite-ehto (24c) voidaan yhtälö (25) edelleen yksinkertaistaa muotoon

$$\beta^2 = \left(\frac{1}{\sigma_r^2} + \frac{1}{\sigma_s^2} \right) z^2 - 2 \cdot \left(\frac{\bar{r}}{\sigma_r^2} + \frac{\bar{s}}{\sigma_s^2} \right) z + \left(\frac{\bar{r}^2}{\sigma_r^2} + \frac{\bar{s}^2}{\sigma_s^2} \right) \quad (26)$$

missä siis $z_1 = z_2 = z$.

Lausekkeen (26) minimi voidaan etsiä asettamalla

$$\frac{d(\beta^2)}{dz} = 0 \quad (27)$$

Liitteessä C esitettyjen välimuotojen kautta saadaan yhtälöstä (27) ratkaistuksi

$$z = \frac{\sigma_s^2 \bar{r} + \sigma_r^2 \bar{s}}{\sigma_r^2 + \sigma_s^2} \quad (28)$$

ja sijoitus yhtälöön (26) antaa tulokseksi

$$\beta^2 = \frac{(\bar{r} - \bar{s})^2}{\sigma_r^2 + \sigma_s^2} \quad (29)$$

josta saadaan

$$\beta_{HL} = \sqrt{\beta^2} = \frac{\bar{r} - \bar{s}}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \quad (30)$$

Tässä tapauksessa siis $\beta_{HL} = \beta_C$. Tämä ei ole yllätys, sillä kuten jo edellä todettiin, Hasofer-Lindin menetelmä palautuu Cornellin menetelmään, jos rajatilafunktio on lineaarinen ja muuttujat r ja s ovat riippumattomia.

Todennäköisyys, että urheiluhallissa syntyy poistumisen kannalta turvaton tilanne, lasketaan vastaavalla kaavalla kuin edellä Cornellin menetelmällä

$$P_F = 1 - \Phi(\beta_{HL}) \quad (31)$$

missä $\Phi(x)$ on (0,1)-normaalijakautuneen satunnaismuuttujan kertymäfunktion arvo muuttujan arvolla x .

Taulukkoon 6 on koottu yhteenveto nyt käsitellyn esimerkkitehtävän laskentatuloksista käyttäen yhtälöitä (30) ja (31). Taulukon numeroarvot ovat siis samat kuin taulukossa 4, koska tässä tapauksessa Hasofer-Lindin menetelmä palautuu Cornellin menetelmään.

Samoin saadaan tapaukset (a), (b) ja (c) yhdistämällä täsmälleen sama tulos kuin Cornellin menetelmää käytettäessä (taulukko 5).

Taulukko 6. Laskennan lähtöarvot sekä Hasofer-Lindin menetelmällä lasketut luotettavuusluvut ja todennäköisyydet turvattoman tilanteen syntymiselle tarkastelun kohteina olleissa kolmessa tapauksessa.

Tapaus	\bar{r} [s]	σ_r [s]	\bar{s} [s]	σ_s [s]	β_{HL} []	P_F []
(a)	1 560	360	266	2,5	3,594	0,00016
(b)	1 560	360	391	6,9	3,247	0,00058
(c)	1 560	360	453	24,3	3,068	0,00108

7.5 Laskenta Monte Carlo -menetelmällä

Monte Carlo -simulointi on suoraviivainen tekniikka laskea tarkastelun kohteena olevien suureiden epävarmuuksia. Sitä käyttäen saadaan lasketuksi myös approksimaatio tarkastelusuureen arvojen todennäköisyyden kertymäfunktioille [5].

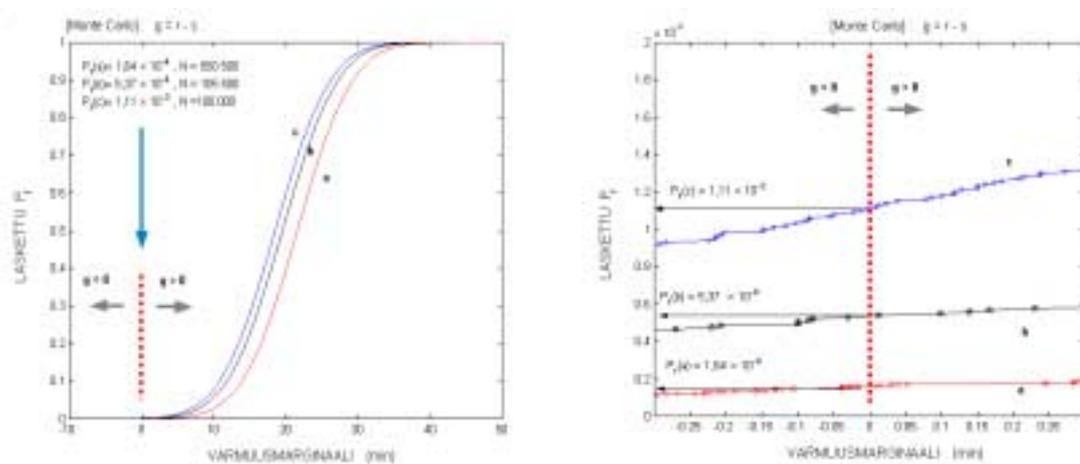
Käytettäessä Monte Carlo -menetelmää todennäköisyyden arviointiin tehdään suuri määrä kuviteltuja kokeita laskennallisesti, ja tietyn tapahtuman todennäköisyys saadaan niiden laskentatulosten osuutena, jossa laskettu arvo vastaa kyseistä tapahtumaa [5].

Tässä tapauksessa Monte Carlo -laskelmat perustuvat luvussa 3 määriteltyyn palotilanteeseen, kuten edellä esitetyt Cornellin ja Hasofer-Lindin menetelmillä tehdyt vastaavat laskelmat. Laskennassa käytetyt lähtötiedot ovat vastaavasti peräisin taulukosta 3, josta myös ilmenee niiden valintaperusteet.

Arvioitaessa todennäköisyyksiä P_F Monte Carlo -menetelmällä tulee laskentakierrosten lukumäärän N olla vähintään luokkaa $10/P_F$ riittävän laskentatarkkuuden saavuttamiseksi. Taulukkoon 7 on koottu yhteenveto tarkasteltavan esimerkkitapauksen laskentatuloksista käyttäen Monte Carlo -menetelmää. Kuvassa 12 esitetään onnistuneen poistumisen kumulatiivinen jakautuma kolmessa tarkasteltavassa tapauksessa.

Taulukko 7. Monte Carlo -menetelmällä laskettu todennäköisyys P_F turvattoman tilanteen syntymiselle ja laskennassa käytetyt lähtöarvot kolmessa tarkastelun kohteena olevassa tapauksessa. Viimeisessä sarakkeessa on havaintojen eli laskentakierrosten lukumäärä.

Tapaus	\bar{r} [s]	σ_r [s]	\bar{s} [s]	σ_s [s]	P_F []	N []
(a)	1 560	360	266	2,5	0,000163	550 000
(b)	1 560	360	391	6,9	0,000537	105 500
(c)	1 560	360	453	24,3	0,00111	100 000



Kuva 12. Monte Carlo -menetelmällä laskettu rajatilafunktion $g(r,s)$ kumulatiivinen jakauma (suhteelliset frekvenssit). Todennäköisyys, että oletetussa palotilanteessa kaikki hallissa olevat henkilöt eivät ehdi poistua turvallisesti määräytyy kohdasta $g(r,s)=0$. Oikeanpuoleinen kuva on suurennus alueesta, josta kyseinen todennäköisyys näkyy tarkemmin.

Vertaamalla taulukossa 7 esitettyjä todennäköisyyksiä P_F turvattoman tilanteen syntyemiselle vastaaviin todennäköisyyksiin taulukoissa 4 ja 6 voidaan todeta niiden olevan käytännössä samat.

7.6 Herkkyystarkastelut

Koska laskennan lähtötietoihin liittyy epävarmuutta, on tärkeää arvioida tulosten luotettavuutta herkkyysanalyysin avulla. Herkkyysanalyysi on eräs oletettuun palonkehitykseen perustuvan paloturvallisuussuunnittelun keskeisistä osista [11, 12].

Tässä työssä haluttiin tutkia seuraavien lähtötietoihin liittyvien epävarmuustekijöiden vaikutusta laskennan lopputulokseen:

1. Palonkehitystä kuvaavan kriittisen ajan t_{crit} keskiarvoon ja keskihajontaan liittyvä epävarmuus.
2. Kokonaispoistumisajan t_p keskiarvoon ja hajontaan liittyvä epävarmuus.
3. Palonkehitystä kuvaavan kriittisen ajan t_{crit} ja kokonaispoistumisajan t_p keskinäiseen korrelaatioon liittyvä epävarmuus.

Laskelmat tehtiin Hasofer-Lindin menetelmällä, sillä se tarjoaa mahdollisuuden ottaa huomioon myös muuttujien välisiä korrelaatioita, jotka siis vaikuttavat matriisissa C esiintyvien kovarianssien $\sigma_{z_1 z_2}$ välityksellä. Koska sekä t_{crit} että t_p ovat normaalijakautuneita, voidaan kovarianssit laskea yhtälöstä [13]

$$\sigma_{z_1 z_2} = \rho \sigma_{z_1} \sigma_{z_2} \quad (32)$$

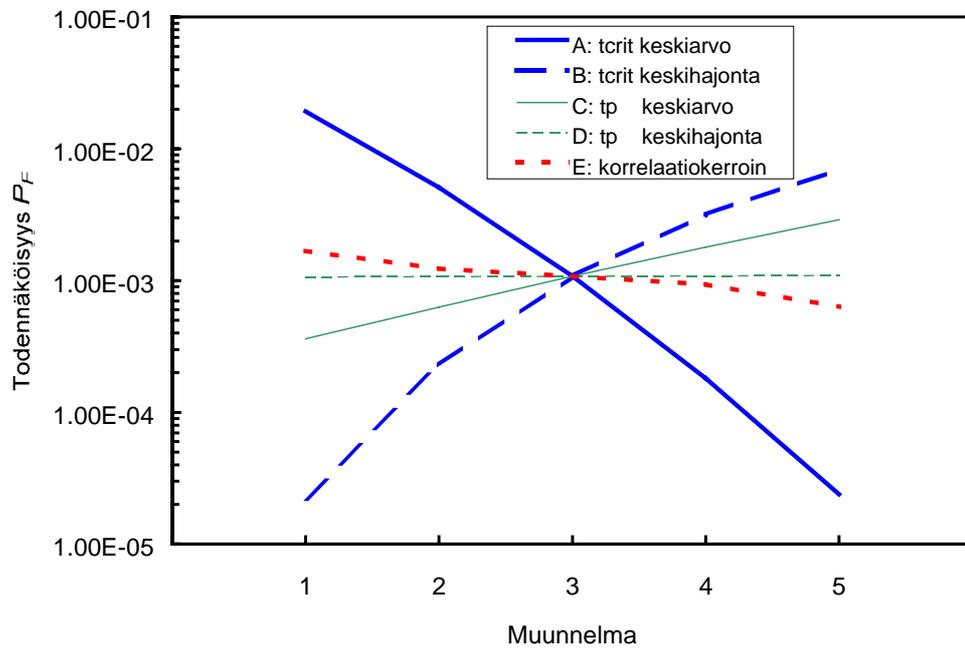
missä ρ on muuttujien z_1 ja z_2 välinen korrelaatiokerroin. Jotta korrelaatio voitaisiin ottaa huomioon, tehtiin laskelmat suoraan yhtälöiden (21)–(23) avulla käyttäen rajoiteehtoa (24c).

Tarkasteltavaksi tapaukseksi valittiin (c), sillä se oli laskentatulosten mukaan vähiten turvallinen. Lähtötietojen vaihteluvälit valittiin taulukon 8 mukaisesti. Keskiarvojen ja keskihajontojen vaihteluväleiksi valittiin n. $\pm 25\%$ taulukossa 3 annettujen arvojen ympärillä. Korrelaatiokertoimen arvo on perustapauksessa = 0, ja sille valittiin vaihteluväliksi arvosta -0,7 (voimakas negatiivinen korrelaatio) arvoon 0,7 (voimakas positiivinen korrelaatio).

Herkkyystarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 8 ja kuvassa 13. Havaitaan, että tässä tulokset olivat erittäin herkkiä palonkehitystä kuvaavaan kriittiseen aikaan liittyvälle epävarmuudelle (sekä keskiarvon että keskihajonnan epävarmuudelle). Palonkehityksen ja poistumisajan välisellä korrelaatiolla oli jonkin verran merkitystä, ja pienin vaikutus oli poistumisaikaan liittyvällä epävarmuudella.

Taulukko 8. Herkkyysanalyysin tulokset tapaukselle (c). Laskenta suoritettu Hasofer-Lindin menetelmällä.

Muunnelma	\bar{t}_{crit} [s]	$\sigma_{t_{crit}}$ [s]	\bar{t}_p [s]	σ_{t_p} [s]	ρ []	β_{HL} []	P_F []
A1	1 200	360	453	24,3	0	2,070	$1,92 \cdot 10^{-2}$
A2	1 380	-"	-"	-"	-"	2,569	$5,10 \cdot 10^{-3}$
A3	1 560	-"	-"	-"	-"	3,068	$1,08 \cdot 10^{-3}$
A4	1 740	-"	-"	-"	-"	3,567	$1,81 \cdot 10^{-4}$
A5	1 920	-"	-"	-"	-"	4,066	$2,40 \cdot 10^{-5}$
B1	1 560	270	453	24,3	0	4,084	$2,22 \cdot 10^{-5}$
B2	-"	315	-"	-"	-"	3,504	$2,29 \cdot 10^{-4}$
B3	-"	360	-"	-"	-"	3,068	$1,08 \cdot 10^{-3}$
B4	-"	405	-"	-"	-"	2,728	$3,18 \cdot 10^{-3}$
B5	-"	450	-"	-"	-"	2,456	$7,02 \cdot 10^{-3}$
C1	1 560	270	340	24,3	0	3,381	$3,61 \cdot 10^{-4}$
C2	-"	-"	396	-"	-"	3,226	$6,28 \cdot 10^{-4}$
C3	-"	-"	453	-"	-"	3,068	$1,08 \cdot 10^{-3}$
C4	-"	-"	509	-"	-"	2,913	$1,79 \cdot 10^{-3}$
C5	-"	-"	565	-"	-"	2,758	$2,91 \cdot 10^{-3}$
D1	1 560	270	453	18,2	0	3,071	$1,07 \cdot 10^{-3}$
D2	-"	-"	-"	21,2	-"	3,070	$1,07 \cdot 10^{-3}$
D3	-"	-"	-"	24,3	-"	3,068	$1,08 \cdot 10^{-3}$
D4	-"	-"	-"	27,4	-"	3,066	$1,08 \cdot 10^{-3}$
D5	-"	-"	-"	30,4	-"	3,064	$1,09 \cdot 10^{-3}$
E1	1 560	270	453	24,3	-0,7	2,933	$1,68 \cdot 10^{-3}$
E2	-"	-"	-"	-"	-0,2	3,028	$1,23 \cdot 10^{-3}$
E3	-"	-"	-"	-"	0,0	3,068	$1,08 \cdot 10^{-3}$
E4	-"	-"	-"	-"	0,2	3,110	$9,35 \cdot 10^{-4}$
E5	-"	-"	-"	-"	0,7	3,223	$6,34 \cdot 10^{-4}$



Kuva 13. Herkkyysanalyysin tulokset tapaukselle (c). Laskenta suoritettu Hasofer-Lindin menetelmällä. Lähtöarvot on esitetty taulukossa 8.

8. Vertailu yleiseen turvallisuustasoon

Edellisessä luvussa esitettyjen laskelmien tulokset voidaan kiteyttää numeroarvoon 0,000378. Tämä numeroarvo on tässä työssä tehtyjen laskelmien antama todennäköisyys sille, että kaikki tarkasteltavana olevassa urheiluhallissa oleskelevat ihmiset eivät ehdi poistua hallista ajoissa, jos hallissa syttyy nyt tarkasteltua mitoituspaloa vastaava tulipalo ja jos ihmisten lukumäärä, sijainti, ominaisuudet ja käyttäytyminen vastaavat tässä työssä tarkasteltuja. Ajoissa tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että ihmiset ehtivät poistua ulos ennen kuin tulipalon seurauksena hallin yläosaan muodostuva kuuma savu-kerros laskeutuu niin alas, että se haittaa näkyvyyttä niin paljon, että ihmiset eivät pysty enää löytämään ulospääsyä.

Onko saatu todennäköisyyden arvo korkea vai alhainen? Eli onko halli tässä suhteessa turvallinen vai turvaton? Tällä kysymyksellä on keskeinen merkitys nyt käytettyjen laskentamenetelmien ja niillä saatujen tulosten käyttökelpoisuuden arvioinnissa.

Tilanteen tekee ongelmalliseksi se, että saatua tulosta on vaikea verrata mihinkään. Rakentamismääräyksissä ei perinteisesti ole asetettu hyväksymiskriteereitä turvallisuuteen liittyville todennäköisyyksille. Sopiva vertailukohta saadaan kuitenkin palo-tilastoista. Oletuksena on tällöin se, että nykytilanne määrittelee hyväksyttävänä pidettävän turvallisuustason.

Rahikainen ja Keski-Rahkonen ovat esittäneet tilastotiedot palokuolemista Suomessa vuosina 1988–97 rakennustyyppin mukaan jaoteltuna. Luokassa kokoontumisrakennukset (joihin myös urheiluhallit luetaan) sattui tuona ajanjaksona yksi palokuolema. Samassa lähteessä on esitetty tilastotieto, jonka mukaan kokoontumisrakennuksissa sattui Suomessa vuosina 1994–95 yhteensä 74 tulipaloa. Jos siis kokoontumisrakennuksissa sattui kahden vuoden aikana 74 tulipaloa ja jos oletetaan kokoontumisrakennuksissa tapahtuvien tulipalojen esiintymistiheys vakioksi, voidaan arvioida, että kokoontumisrakennusten tulipalojen kokonaismäärä kymmenen vuoden ajanjaksolla 1988–97 oli yhteensä suunnilleen $5 \cdot 74 = 370$. Tällöin todennäköisyys sille, että kokoontumisrakennuksessa tapahtuva tulipalo johtaa ihmishengen menetykseen on tuona ajanjaksona ollut

$$P_F = \frac{1}{370} = 0,0027 \quad (33)$$

eli n. 7 kertaa korkeampi kuin nyt arvioitu todennäköisyys.

Tehtyyn vertailuun tulee suhtautua hyvin varovaisesti. Palokuolemien lukumäärä kokoontumisrakennuksissa on niin pieni, että tilastollinen hajonta muodostuu todennäköisyyksien arvioinnissa hyvin suureksi. Ei ole myöskään selvää, onko urheiluhallien turvallisuustaso samanlainen kuin kokoontumisrakennusten keskimäärin. Lopuksi on

todettava, että tässä työssä tulokseksi saatu todennäköisyys kattaa myös ne tapaukset, joissa tulipalon uhreja on enemmän kuin yksi.

Vertailu palotilastojen kanssa voidaan tehdä toisellakin tavalla. Suomen väestö on n. 5 miljoonaa ja näistä viidestä miljoonasta ihmisestä menettää vuosittain henkensä tulipalon uhrina n. 100. Kaikista palokuolemista n. 90 % tapahtuu asuinrakennuksissa. Muiden kuin asuinrakennusten osuus palokuolemista on siis n. 10 kuolemantapausta vuodessa. Vuotuinen todennäköisyys sille, että suomalainen kuolee muun kuin asuntopalon uhrina, on siis

$$P_F' = \frac{10 \text{ 1/a}}{5\,000\,000} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/a} \quad (34)$$

Nyt tarkasteltu esimerkkitapaus voidaan suhteuttaa tähän numeroarvoon seuraavalla tavalla. Arvioidaan aluksi tulipalon todennäköisyys. Käytetään syttymistaajuustiheydelle yleistettyä Barrois'n mallia

$$f'' = c_1 A^m + c_2 A^n \quad (35)$$

missä A on rakennuksen pinta-ala ja c_1 , c_2 , m ja n ovat parametreja, joiden arvot määritetään tilastoaineistosta. Tillander ja Keski-Rahkonen ovat määrittäneet uusimman tilastoaineiston perusteella seuraavat arvot [14]:

- $c_1 = 1,24 \text{ m}^{3,5}/\text{a}$
- $c_2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1,9}/\text{a}$
- $m = -2,75$
- $n = -0,05$

Nämä arvot ovat voimassa kaikille rakennuksille.

Eerikkilän hallin kerrosala on $8\,291 \text{ m}^2$. Sijoittamalla tämä arvo yhtälöön (35) saadaan syttymistaajuustiheydeksi

$$\begin{aligned} f'' &= 1,24 \text{ m}^{3,5} / \text{a} \cdot (8291 \text{ m}^2)^{-2,75} + 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1,9} / \text{a} \cdot (8291 \text{ m}^2)^{-0,05} \\ &= 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/m}^2\text{a} \end{aligned} \quad (36)$$

ja syttymistiheydeksi

$$f = f'' \cdot A = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/m}^2\text{a} \cdot 8291 \text{ m}^2 = 0,032 \text{ 1/a} \quad (37)$$

Todennäköisyys sille, että hallissa sattuu tulipalo, jossa kaikki ihmiset eivät ehdi poistua turvallisesti, on siten

$$P_F' = 0,032 \text{ 1/a} \cdot 0,000378 = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/a} \quad (38)$$

ja koska riski jakaantuu 500 ihmisen osalle, on todennäköisyys yksittäisen ihmisen kohdalla

$$P_F' = \frac{1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/a}}{500} = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/a} \quad (39)$$

eli siis paljon alhaisempi kuin keskimääräinen vuotuinen todennäköisyys sille, että suomalainen ihminen kuolee muun kuin asuntopalon uhrina.

Esitetty laskelma perustuu siihen olettamukseen, että hallia käytetään koko ajan laskelmissa kuvattua kokoontumistilaisuutta vastaaviin tilaisuuksiin. Käytännössä halli on suurimman osan aikaa joko kokonaan tyhjänä tai ainakin siellä oleskelee huomattavasti vähemmän ihmisiä. Laskelman tuloksena saatu arvo antaa siis tässä mielessä ylärajan todennäköisyydelle.

Jälkimmäisen laskelman etuna on se, että sekä tulipalojen että palokuolemien esiintymistäajuudet on voitu arvioida paljon isomman tilastoaineiston perusteella. Tälläkin tavalla laskettaessa jää ongelmaksi se, että tässä työssä tulokseksi saatu todennäköisyys kattaa myös ne tapaukset, joissa tulipalon uhreja on enemmän kuin yksi.

Kummallakin tavalla tehty vertailu antaa saman tuloksen. Kyseisen urheiluhallin poistumisturvallisuus nyt tarkastellussa palotilanteessa vaikuttaa tehtyjen laskelmien perusteella ainakin yhtä hyvältä kuin mitä viime vuosien tulipaloista kootut palotilastot keskimäärin antavat odottaa.

9. Yhteenveto

Tutkimuksessa tarkasteltiin kolmen luotettavuusteknisen menetelmän – Cornell-, Hasofer-Lind- ja Monte Carlo -menetelmän – käyttöä paloturvallisuusanalyysiin. Menetelmiä sovellettiin Eerikkilän jalkapallohalliin, jota on myös aikaisemmin käytetty erilaisten paloturvallisuustarkastelujen kohteena. Valittujen luotettavuusteknisten menetelmien avulla arvioitiin urheiluhallin poistumisturvallisuutta tilanteessa, jossa seiväshyppypatja syttyy palamaan yleisötilaisuuden aikana.

Kaikki kolme menetelmää soveltuivat valittuun tehtävään varsin hyvin. Tehdyt oletukset johtivat siihen, että Cornellin menetelmä ja Hasofer-Lindin menetelmä olivat käytännössä identtiset. Myös MonteCarlo -menetelmä antoi lähes täysin samoja tuloksia, mikä olikin odotettavissa, sillä laskentakierrosten lukumäärä oli valittu hyvin suureksi. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että kyseisen urheiluhallin poistumisturvallisuus tarkastellussa palotilanteessa on hyvä.

Menetelmien käytön suurimmaksi ongelmaksi osoittautui luotettavien lähtötietojen hankkiminen. Ongelma korostuu erityisesti poistumistarkasteluissa, joissa ihmisten käyttäytyminen palotilanteissa on usein vaikeasti ennakoitavissa. Tällaisessa tilanteessa tulisi esimerkiksi arvioida, miten ja milloin henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta ja kuinka he reagoivat siihen sekä miten ja mitä kautta he siirtyvät turvaan tulipalon aiheuttamasta uhkatilanteesta.

Poistumisen laskentaan käytettiin VTT:lle hankittua *Simulex*-ohjelmaa. Käytetty ohjelma käsittelee ainoastaan poistumisen siirtymisvaiheeseen liittyviä fyysisiä tekijöitä normaaliolosuhteissa, kuten esimerkiksi portaiden, esteiden, kapeikkojen ja tungoksen vaikutusta liikkumiseen. Liikkumiseen vaikuttaa useita muitakin tekijöitä, joita mallissa ei oteta huomioon. Tällaisia merkittäviä tekijöitä, joita ei ole tässä otettu huomioon, ovat tulipalon vaikutukset ihmisten liikkumiseen ja psykologisiin reaktioihin.

Tässä tutkimuksessa oletettiin tilanteen urheiluhallissa muuttuvan kriittiseksi käyttäen Lundin yliopistossa kehitettyä, huonetilan savulla täyttymistä kuvaavaa regressiomallia. Mallin soveltuvuudesta tarkasteltuun tilanteeseen ei ole varmuutta, sillä malli on alkujaan kehitetty pienempiä tiloja ja hitaammin kasvavia paloja varten kuin nyt tarkastellussa tilanteessa.

Jatkotyönä tulisi pyrkiä selvittämään laskennan lähtöarvojen todennäköisyysjakautumat nykyistä paremmin ja ne tulisi mahdollisuuksien mukaan myös todentaa kokeellisesti. Erityisesti tulisi kiinnittää huomiota muuttujien välisiin riippuvuuksiin. Luotettavuustekniset menetelmät sinänsä ovat hyvin pitkälle kehitettyjä ja pystyvät ottamaan huomioon monimutkaisiakin riippuvuuksia, jos vain lähtötiedot ovat kunnossa.

Eräs osa tätä työtä olisi sellaisten poistumislaskentaohjelmistojen kehittäminen ja käyttö, joiden avulla voitaisiin kuvata tulipalon kehittymisen vaikutus ihmisten havainnointiin, päätöksentekoon ja liikkumisnopeuteen. Nyt käytetty *Simulex*-ohjelman versio ei pysty tähän.

Luotettavuusteknisiä menetelmiä tulisi kehittää myös siihen suuntaan, että saataisiin lasketuksi palokuolemien odotusarvo tulipaloa kohti. Nyt tehdyissä laskelmissa saadut tulokset olivat tyyppiä ”todennäköisyydellä X kaikki rakennuksessa oleskelevat henkilöt eivät ehdi poistua turvallisesti”, mutta tuloksissa ei otettu kantaa siihen, oliko odotettavissa oleva uhrien lukumäärä yksi vai useampia.

Lopuksi on muistettava, että luotettavuusteknisten menetelmien antamat tulokset eivät edusta absoluuttista totuutta samoin kuin eivät tietysti minkään muidenkaan matemaattisten menetelmien antamat tulokset. Tulosten käyttöarvon ratkaisee kolme kriteeriä:

1. Onko kaikki todellisen tilanteen kannalta tärkeät muuttujat otettu mukaan malliin?
2. Onko laskennan lähtötietojen numeroarvot valittu todenmukaisesti?
3. Ovatko tehtävän ratkaisuun käytetyt matemaattiset menetelmät kelvollisia?

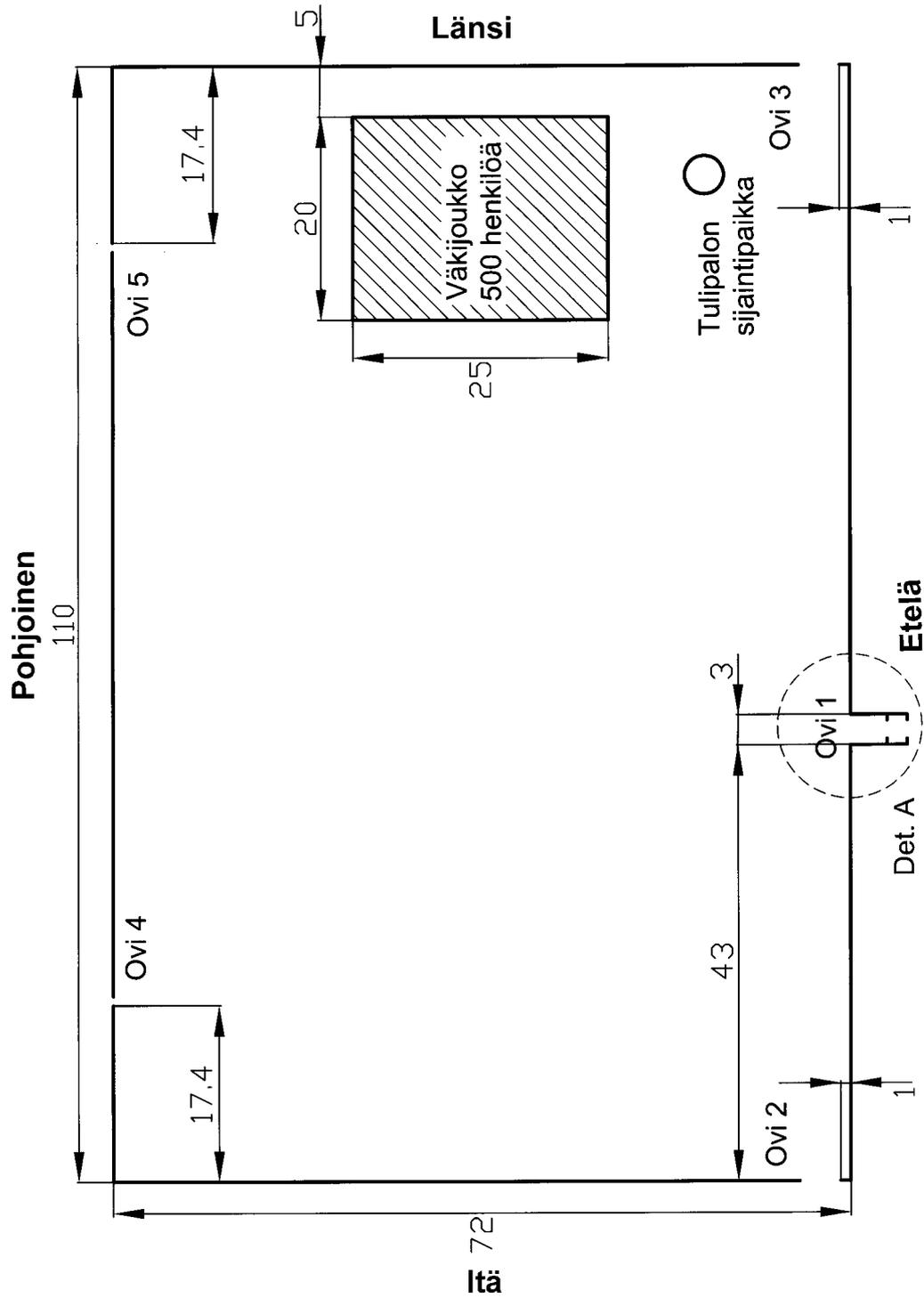
Käytännössä joudutaan kaikkien kolmen kriteerin suhteen tyytymään kompromisseihin, kuten tämänkin raportin tekstistä käy eri kohdissa ilmi. Tästä syystä ovat luotettavuusteknisten menetelmien antamat tulokset sopivia tutkimuksiin, joissa vertaillaan erilaisen palotilanteiden tai paloteknisten ratkaisujen keskinäistä turvallisuutta tai joissa pyritään tunnistamaan turvallisuuden kannalta kriittisimmät kohdat.

Lähdeluettelo

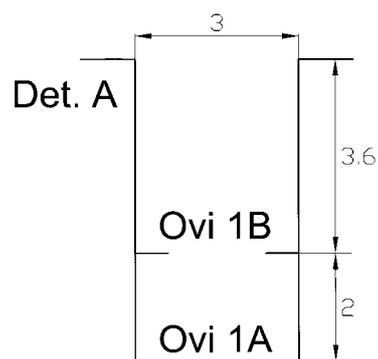
1. Magnusson, S.-E., Frantzich, H. & Harada, K. Fire safety design based on calculations – Uncertainty analysis and safety verification. Lund, SE: Lund University, 1995. 120 s. (Report 3078.) ISSN 1102–8246
2. Frantzich, H. Tid för utrymning vid brand. Karlstad, SE: Räddningsverket, 2001. 122 s. ((FoU Rapport P21-365/01.) ISBN 91–7253–092–8
3. Paloposki, T. Urheiluhallin teräsrakenteiden lämpeneminen tulipalossa. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, 2001. (Tutkimusselostus nro RTE3425/00.) [Saatavissa: <http://www.rautaruukki.com/ten> (Valitse: 1. Tuotteet ja palvelut 2. Palotekniikka, Urheiluhallien teräsrakenteet)]
4. Korpela, K. Urheiluhallien palosimuloinnit. Vantaa: Palotekninen insinööritoimisto Markku Kauriala Oy, 2002. (Palotekninen selvitys 22.5.2002.)
5. 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 – Research Notes 2123.) ISBN 951–38–5935–5 ISSN 1235–0605
6. Weckman, H. Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997. 50 s. + liitt. 11 s. (VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1846.) ISBN 951–38–5133–8 ISSN 1235–0605
7. Pauls, J. Movement of people. Teoksessa: DiNunno, P. E. et al. (toim.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2. p. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1995. S. 1-246–1-268. ISBN 0–87765–354–2
8. Drysdale, D. An introduction to fire dynamics. 2nd Ed. Chichester, GB: John Wiley & Sons, 1999. 451 s. ISBN 0–471–97290–8
9. Haldar, A. & Mahadevan, S. Probability, reliability, and statistical methods in engineering design. New York, NY: John Wiley & Sons, 2000. 304 s. ISBN 0–471–33119–8
10. Madsen, H. O., Krenk, S. & Lind, N.C. Methods of structural safety. Eaglewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986. 403 s. ISBN 0–13–579475–7

11. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. Helsinki: Ympäristöministeriö, 2002. 40 s. (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 12.3.2002, Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E1) ISBN 951-37-3762-4
12. Lehtimäki, S. (toim.). Palotekninen erityissuunnittelu vyöhykemalleja käyttäen. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö, 1997. 81 s. (Tekniikka opastaa 12) ISBN 951-797-043-9
13. Hald, A. Statistical theory with engineering applications. New York, NY: John Wiley & Sons, 1952. 783 s. ISBN 0-471-34056-1
14. Tillander, K. & Keski-Rahkonen, O. Palojen syttymistäajuus Suomessa 1996-99. Palontorjuntatekniikka, 31(2001) 3-4, s. 8-12.

Liite A: Eerikkilän jalkapallohallin pohjapiirros ja uloskäytävät



(Mitat metrejä)



Eerikkilän urheiluhallin ovet

Ovi n:o	Oven tyyppi	Oven leveys	
		kokonaan auki [mm]	osittain auki [mm]
1A	Pariovi	1 800	900
1B	- " -	1 800	900
2	- " -	4 000	900
3	- " -	4 000	900
4	Yksilehtinen	900	–
5	- " -	900	–

Liite B: *Simulex*-mallin kuvaus ja laskelmat

Simulex [1] on 1990-luvun puolivälissä kehitetty tietokonemalli, jolla simuloidaan ihmisten poistumista rakennuksista. Malli sopii myös suurten ihmismäärien poistumisen laskemista varten ja sitä on esimerkiksi sovellettu tiloihin, joiden koko on yli 50 000 m² ja joissa on noin 15 000 henkilöä. Malli on alun perin kehitetty Edinburghin yliopistossa, mutta sen kehitystyöstä vastaa nykyään skotlantilainen yhtiö *Integrated Environmental Solutions Ltd.*

Simulex-malli on nykyaikainen, täysin graafisella käyttöliittymällä varustettu helppokäyttöinen tietokoneohjelma. Moniin muihin vastaavilla ominaisuuksilla varustettuihin ohjelmiin verrattuna *Simulex*-ohjelmassa on tarkasteltavien poistumistilanteiden mallintaminen varsin nopeaa ja yksinkertaista. *Simulex* on myös hankintahinnaltaan useimpia muita ohjelmia edullisempi, minkä vuoksi se on kohtalaisen yleisessä käytössä mm. suunnittelutoimistoissa. Mallin antamia laskentatuloksia on verrattu poistumisharjoituksissa saatuihin kokeellisiin tuloksiin, jolloin niiden on todettu olevan hyvässä sopusoinnussa keskenään [2].

Simulex on poistumismalli, joka simuloi yksittäisten henkilöiden poistumista rakennuksesta. Malli seuraa kunkin yksilön kulkemaa reittiä poistumisen aikana, kunnes henkilö poistuu rakennuksesta. Kullekin poistuvalla henkilölle voidaan antaa yksilöllinen liikkumisnopeus, tai tarkasteltaessa ihmisryhmiä ohjelma valitsee kullekin poistuvalla henkilölle tietyn tilastollisen jakauman mukaisen liikkumisnopeuden. Mallissa otetaan huomioon hitaammin liikkuvien henkilöiden hidastava vaikutus toisten henkilöiden liikkumisnopeuteen. Lisäksi henkilöt voivat tarvittaessa ohittaa toisensa. Mallilla pyritään siten simuloimaan ryhmän liikkeitä sallimalla kuitenkin kunkin yksilön liikkuminen omalla vauhdillaan haluamaansa suuntaan riippuen henkilöiden välisistä etäisyyksistä ja ympäröivän rakennuksen muodosta.

Tilojen geometria laaditaan erillisillä CAD-ohjelmilla, joilla tuotetut DXF-muotoiset piirustustiedostot luetaan *Simulex*-ohjelmaan. Simulointiohjelma luo tiheän 0,25 m × 0,25 m solmuverkon pohjapiirustuksen päälle sekä laskee lyhimmän poistumistien kustakin verkkoalkiosta lähimpään uloskäytävään.

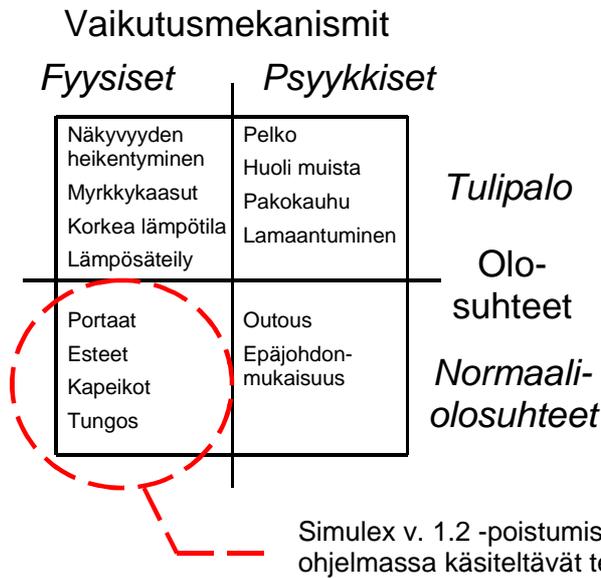
Simulointilaskelmia varten on määriteltävä henkilöiden lukumäärä rakennuksen kussakin tilassa tai vastaava henkilötiheys, jonka perusteella ohjelma sijoittaa kyseiseen tilaan tasan jakaantuneesti tiheyttä vastaavan määrän henkilöitä. Henkilöiden esteetön liikkumisnopeus voi vaihdella satunnaisesti välillä 0,8–1,7 m/s, ja kunkin henkilön liikkeellelähtösuunnalla on myös satunnainen alkuarvo. Henkilön liikkumisnopeus portaisa alaspäin on 0,5 kertaa esteetön liikkumisnopeus ja ylöspäin vastaavasti 0,35 kertaa. Ohjelma on täysin graafinen, ja kuvaruudulta voidaan havainnollisesti seurata evakuoinnin edistymistä.

Simuloinnin aika-askeleen pituus on 0,1 s, jossa ajassa nopeinkin kävelijä siirtyy vain 0,17 m. Jokaisen aika-askeleen kohdalla määritetään kunkin henkilön sijainti ja etäisyydet toisiin henkilöihin tai esteisiin, millä perusteella lasketaan seuraavaa liikettä varten tarvittavat parametrit. Uudessa pisteessä määritetään liikesuunta sekä etäisyys lähimpään uloskäytävään. Simulointia jatketaan, kunnes kaikki henkilöt ovat poistuneet rakennuksesta.

Mallissa otetaan huomioon henkilöiden välisen etäisyyden vaikutus liikkumisvauhtiin. Jos henkilöiden liikesuunnat ja -vauhdit ovat sopivat, toinen henkilö voi ohittaa toisen, jonka jälkeen ohittavan henkilön vauhti taas kasvaa. Ohitusalgoritmia ei käytetä, jos henkilötiheys on yli 2 hlö/m². Mikäli henkilö törmää kiinteään esteeseen, hänen suuntansa muutetaan siten, että hänen olkapäänsä etäisyys seinästä on vähintään 50 mm.

Tässä tutkimuksessa käytetyn *Simulex*-ohjelman versio (1.2) käsittelee ainoastaan liikkumiseen vaikuttavia fyysisiä tekijöitä normaaliolosuhteissa, kuten esimerkiksi portaiden, esteiden, kapeikkojen ja tungoksen vaikutusta liikkumiseen. Liikkumiseen vaikuttaa useita muitakin tekijöitä, joita mallissa ei oteta huomioon, kuten kuvan B.1 esittämistä poistumisen vaikutusmekanismeista voidaan nähdä. Ohjelman uudempiin versioihin ja eräisiin toisiin poistumisen laskentaohjelmiin sisältyy mahdollisuus ottaa huomioon myös joitakin nyt puuttuvia tekijöitä.

Tutkimusten tässä vaiheessa ei sen tekijöillä ollut selvää kuvaa, miten kvantitatiivisesti kuvattaisiin tulipalon vaikutuksia ihmisten etenemisnopeuteen ja päätöksentekoon sekä ihmisten psykologisia reaktioita. Tämän vuoksi näitä tekijöitä ei ole otettu huomioon tässä tutkimuksessa, ja *Simulex*-ohjelman käyttö on sen vuoksi katsottu tarkoituksenmukaiseksi.



Kuva B.1. Poistumiseen vaikuttavia mekanismeja. Tässä tutkimuksessa käytetyssä Simulex-ohjelman versiossa 1.2 otetaan huomioon näistä mekanismeista vain fyysiset tekijät normaaleissa ympäristöolosuhteissa. Huomioon ottamatta jäävät esimerkiksi tulipalo-olosuhteiden tai psykologisten tekijöiden vaikutukset poistumiseen.

Mallissa on muitakin rajoituksia kuin mitä edellä on esitetty. Siinä mm. oletetaan, että henkilö poistuu aina lähimmän uloskäytävän kautta riippumatta olemassa olevista opasteista ja siitä, kuinka hyvin hän tuntee rakennuksen. Tämä rajoitus on osittain kiertävissä siten, että ohjelmalla voidaan määrittellä minkä uloskäytävän kautta yksittäinen henkilö tai tietty henkilöryhmä poistuu.

Poistuminen Eerikkilän urheiluhallista

Simulointilaskelmia varten laadittiin liitteessä A olevien piirrosten perusteella *AutoCAD LT 2000i* -ohjelmalla pohjapiirros Eerikkilän urheiluhallista. Laadittu pohjapiirros näkyy kuvassa B.3.

Seuraavassa vaiheessa sijoitettiin 500 satunnaisesti valittua henkilöä liitteessä A esitetyille 25 m × 20 m kokoiselle alueelle. *Simulex*-ohjelmassa on mahdollisuus jossain määrin varioida poistuvien henkilöiden ominaisuuksia. Näissä laskelmissa käytettiin henkilöinä ohjelmassa määriteltyä henkilöryhmää "päivittäismatkustaja" (engl. *commuters*), johon kuuluvien henkilöiden ominaisuuksia on tarkemmin selvitetty taulukossa B.1.

Taulukko B.1. Simulointilaskelmissa käytettyjen henkilöiden fyysisiä ominaisuuksia.

Ominaisuus	Arvo (vaihteluväli)
Henkilöryhmä, jonka kokoonpano on:	Päivittäismatkustajia (<i>commuters</i>):
– Keskimääräisiä	– 30 %
– Miehiä	– 30 %
– Naisia	– 30 %
– Lapsia	– 10 %
Esteetön kävelyvauhti	0,8 – 1,7 m/s
Reagointiaika:	Jakauman tyyppi, parametrit
– Tapaus (a)	– Normaalijakauma, $m = 60$ s, $s = 15$ s
– Tapaus (b)	– Normaalijakauma, $m = 180$ s, $s = 15$ s
– Tapaus (c)	– Logaritminen normaalijakauma: mediaani = 75 s logaritminen keskihajonta = 0.7

Kuten taulukossa B.1 on esitetty, on kaikkien henkilöiden esteetön kävelyvauhti 0,8–1,7 m/s henkilötyypistä riippumatta. Henkilöiden todellinen kävelyvauhti on tätä pienempi ja se riippuu etäisyydestä edellä kävelevään henkilöön. Henkilötyypit keskimääräiset, miehet, naiset ja lapset poikkeavat toisistaan ainoastaan fyysisen kokonsa suhteen, jolla siten on tietty vaikutus yksilöiden vauhtiin henkilöryhmässä. Henkilötyyppien koot on esitetty kuvassa B.2.

Henkilö- tyyppi	Mitta	Mitta	Mitta
	R(t) [m]	R(s) [m]	S [m]
Keskimää- räiset	0,25	0,15	0,10
Miehet	0,27	0,17	0,11
Naiset	0,24	0,14	0,09
Lapset	0,21	0,12	0,07

Kuva B.2. Simulex-ohjelmassa käytettyjen henkilötyyppien kokoa kuvaavat mitat [3].

Toinen *Simulex*-ohjelmaan sisältyvä henkilöiden ominaisuuksiin liittyvä tekijä, joka vaikuttaa poistumisaikaan, on henkilöiden reagointiaika. Reagointiajalla tarkoitetaan tässä aikaa, joka kuluu siitä, kun henkilö tulee tietoiseksi rakennuksessa olevasta palosta siihen, että hän alkaa siirtyä turvaan. Kuten kohdassa 5.3 on esitetty, tehtiin laskelmat käyttäen kolmea eri reagointiaikaa:

Tapaus (a): Normaalijakautunut, keskiarvo 1 min, keskihajonta 15 s.

Tapaus (b): Normaalijakautunut, keskiarvo 3 min, keskihajonta 15 s.

Tapaus (c): Logaritmisesti normaalijakautunut, mediaani 1 min 15 s, logaritminen keskihajonta 0,7.

Näistä kolmesta tapauksesta kaksi ensimmäistä (a ja b) voitiin laskea suoraan, koska *Simulex*-ohjelmassa voidaan reagointiaika määrittellä normaalijakautuman parametrien, keskiarvon ja keskihajonnan avulla. Ohjelmassa ei kuitenkaan anneta keskihajonnan arvoa sellaisenaan, vaan se esitetään vaihteluvälinä, joka on yhtä kuin kolme kertaa keskihajonta, eli tässä tapauksessa käytetään vaihteluväliä ± 45 s.

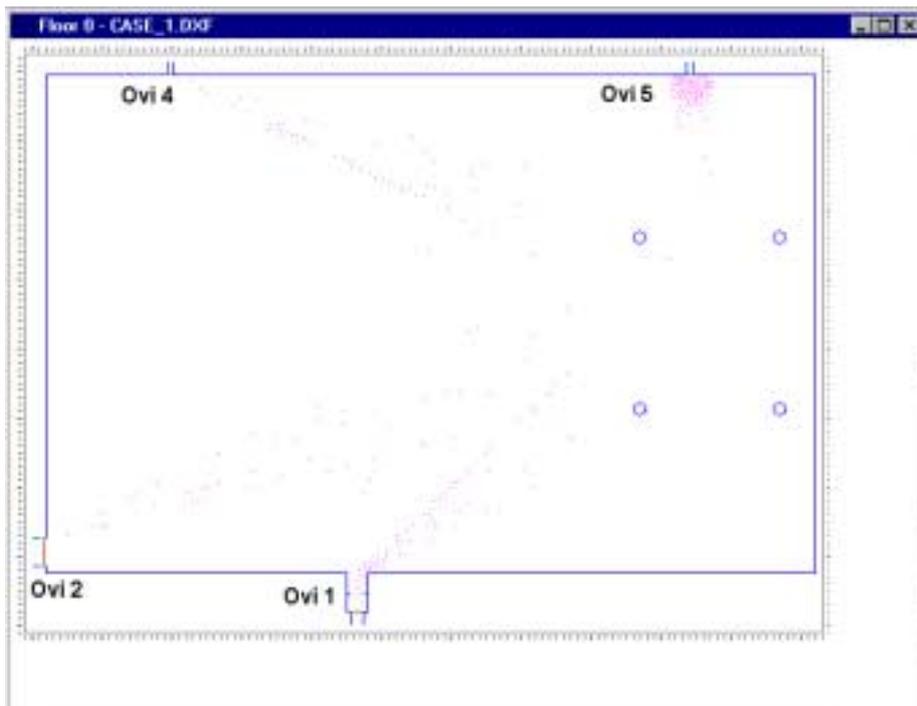
Ohjelma ei tunne logaritminormaalijakautumaa, joten tapauksen (c) logaritminormaalijakautuma korvattiin kahdella tasan jakautuneella jakautumalla siten, että 400 henkilön reagointiajat olivat tasaisesti jakautuneet aikavälille 20–130 s (eli $75 \text{ s} \pm 55 \text{ s}$) ja 100 henkilön vastaavasti tasaisesti jakautuneet aikavälille 130–300 s (eli $215 \text{ s} \pm 85 \text{ s}$).

Simulex-ohjelman oletusarvoihin kuuluu, että henkilöt poistuvat aina lähimmän uloskäytävän kautta, vaikka se olisi hyvinkin ruuhkainen ja vain hieman kauempana olisi täysin vapaita uloskäytäviä. Tämä ongelma on vältettävissä siten, että ohjelmassa on mahdollisuus määrittellä, minkä uloskäytävän kautta kukin henkilö poistuu. Tarkasteltavana olevassa urheiluhallissa on esteetön näkyvyys kaikille käytettäville uloskäytäville, joten oletettiin, että ihmisten käyttäytymistä poistumisen aikana hallitsee "kassajonopriaate", eli ruuhkautuneelle ovelle ei jäädä odottamaan, jos vapaa ovi on näkyvissä. Muutaman koelaskennan perusteella valittiin seuraavaa jakautumisen hallin eri ovien kesken (ovien numerointi on sama kuin liitteessä A):

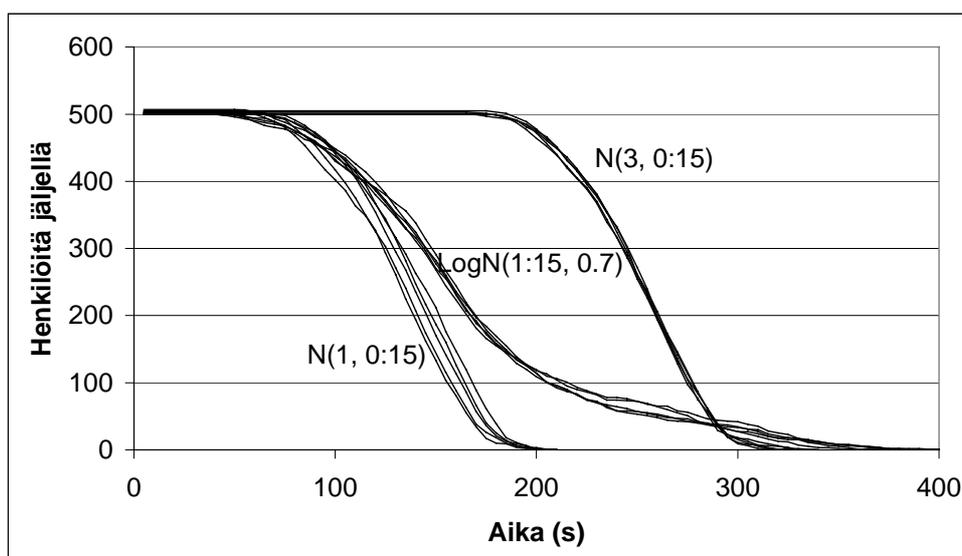
Ovi 1:	130 henkilöä
Ovi 2:	60 henkilöä
Ovi 4:	75 henkilöä
Ovi 5:	235 henkilöä

Kokonaispoistumisajan hajonnan tutkimiseksi toistettiin kaikki laskelmat viisi kertaa, jossa jokaisessa määriteltiin kaikki 500 poistuvaa henkilöä uudelleen. Koska ohjelman käyttämä poistumismalli on deterministinen, on henkilöiden uudelleen määrittely ainoa mahdollisuus aikaansaada vaihtelevuutta kokonaispoistumisaikaan.

Ohjelma suoritetaan graafisessa tilassa, jossa poistuvien henkilöiden liikkeet ja poistumisen eteneminen ovat jatkuvasti seurattavissa tietokoneen näyttöruudulta. Tietokoneen muistiin kirjautuu 5 sekunnin välein poistuneiden henkilöiden lukumäärä. Tässä poistumistapauksessa ohjelman suoritus aika oli noin 3 minuuttia (tietokoneen *Intel® Pentium® III* -prosessorin taajuus 800 MHz). Kuvassa B.3 on näyttöruudun esittämä tilanne, kun poistuminen a)-tapauksen mukaisessa tilanteessa on jatkunut 120 s. Tässä vaiheessa hallista on poistunut 189 henkilöä. Kuten kuvasta selvästi ilmenee, on varsinkin oven 5 kohdalla muodostunut huomattava ruuhka, kun taas ovien 2 ja 4 kohdalla ei ole minikäänlaista ruuhkaa. Kuva B.4 esittää simulointilaskelmien tuloksena saadut urheiluhallissa jäljellä olevien henkilöiden lukumäärää ajan funktiona.



Kuva B.3. Poistumisen simulointi käynnissä Simulex-ohjelmalla tapauksessa a), jossa poistuvien henkilöiden reagointiajan normaalijakautuman mukainen keskiarvo on 60 s ja keskihajonta 15 s. Poistuminen urheiluhallista on jatkunut 120 s, jolloin tilasta on poistunut 189 henkilöä. Kentän oikeassa laidassa olevat neljä pistettä osoittavat alueen, missä hallissa olevat 500 henkilöä sijaitsevat poistumisen alkaessa. Kuvassa on selvästi nähtävissä huomattava ruuhkautuminen oven 5 kohdalla, muiden ovien ollessa vain vähän (ovi 1) tai ei ollenkaan (ovet 2 ja 4) ruuhkaisia.



Kuva B.4. Simulex-ohjelmalla tehtyjen simulointilaskelmien tuloksia. Urheiluhallissa jäljellä olevien henkilöiden lukumäärä ajan funktiona kolmessa tarkastellussa tapauksessa. Kuvassa on esitetty kaikkien toistolaskelmien tulokset.

Reagointi- ja siirtymävaiheen yhteispituudeksi saatiin *Simulex*-laskelmilla taulukossa B.2 esitetyt tulokset.

Taulukko B.2. Yhteenveto Simulex-ohjelmalla lasketuista 500 henkilön poistumisajoista tarkastelun kohteena olevassa urheiluhallissa.

Kohdan 5.5 mukainen laskentata- paus	Reagointi- ja siirtymävaiheen yhteispituus			
	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Hajonta
	[s]	[s]	[s]	[s]
Tapaus (a)	202	209	206	2,5
Tapaus (b)	323	339	331	6,9
Tapaus (c)	361	427	393	24,3

Taulukossa on annettu se aika, joka kuluu reagointivaiheen alusta siihen, kun viimeisenkin henkilö on poistunut hallista. Niinpä tapauksessa (c) on kokonaisaika suurempi kuin tapauksessa (b), vaikka tapauksessa (c) noin puolet henkilöistä ehtii jo ulos hallista ennen kuin tapauksessa (b) kukaan on vielä poistunut.

Lähdeluettelo

1. Thompson, P. A. & Marchant, E. W. A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire Safety Journal*, 1995. Vol. 24, s. 131–148.
2. Thompson, P. A. & Marchant, E. W. Testing and application of a computer model “SIMULEX”. *Fire Safety Journal* 1995. Vol. 24, s. 149–166.
3. SIMULEX – User's manual. Glasgow, GB: Integrated Environmental Solutions, 1996. 48 s.

Liite C: Hasofer-Lindin luotettavuusluku

Luotettavuusluvun β_{HL} laskeminen

Rajatilafunktio on tämän raportin päätekstin kohdan 6.3.3 mukaisesti

$$g(r, s) = r - s$$

jolle on voimassa

$$\begin{cases} g(r, s) > 0 \Rightarrow (r, s) \in S & \text{(turvallinen)} \\ g(r, s) = 0 \Rightarrow (r, s) \in L & \text{(rajatila)} \\ g(r, s) < 0 \Rightarrow (r, s) \in F & \text{(turvaton)} \end{cases}$$

Luotettavuusluku β_{HL}

Käytetään seuraavia merkintöjä:

$$r = z_1$$

$$s = z_2$$

Sijoittamalla nämä Hasofer-Lindin menetelmän mukaisiin muuttujiin Z , $E(Z)$, B ja C saadaan

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix}$$

$$E(Z) = \begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{s} \end{pmatrix}$$

$$B = Z - E(Z) = \begin{pmatrix} z_1 - \bar{r} \\ z_2 - \bar{s} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_{z_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{z_2}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_s^2 \end{pmatrix}$$

Koska matriisi C on diagonaalinen, on sen käänteismatriisi

$$C^{-1} = \begin{pmatrix} 1/\sigma_{z_1}^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{z_2}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_s^2 \end{pmatrix}$$

Muodostetaan seuraavaksi neliömuoto

$$\beta^2 = B^T \cdot C^{-1} \cdot B = [Z - E(Z)]^T \cdot C^{-1} \cdot [Z - E(Z)]$$

laskemalla aluksi

$$C^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} 1/\sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_s^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 - \bar{r} \\ z_2 - \bar{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{z_1 - \bar{r}}{\sigma_r^2} \\ \frac{z_2 - \bar{s}}{\sigma_s^2} \end{pmatrix}$$

ja saadaan edelleen

$$\beta^2 = B^T \cdot C^{-1} \cdot B = (z_1 - \bar{r} \quad z_2 - \bar{s}) \begin{pmatrix} \frac{z_1 - \bar{r}}{\sigma_r^2} \\ \frac{z_2 - \bar{s}}{\sigma_s^2} \end{pmatrix} = \frac{(z_1 - \bar{r})^2}{\sigma_r^2} + \frac{(z_2 - \bar{s})^2}{\sigma_s^2}$$

Hasofer-Lindin luotettavuusindeksi on

$$\beta_{HL} = \sqrt{\min(\beta^2)}$$

kun minimoinnin rajoite-ehdona on

$$g(z) = z_1 - z_2 = 0$$

eli

$$z_1 = z_2 = z$$

josta seuraa

$$\begin{aligned} \beta^2 &= \frac{(z - \bar{r})^2}{\sigma_r^2} + \frac{(z - \bar{s})^2}{\sigma_s^2} = \frac{z^2 - 2\bar{r}z + \bar{r}^2}{\sigma_r^2} + \frac{z^2 - 2\bar{s}z + \bar{s}^2}{\sigma_s^2} \\ &= \left(\frac{1}{\sigma_r^2} + \frac{1}{\sigma_s^2} \right) z^2 - 2 \left(\frac{\bar{r}}{\sigma_r^2} + \frac{\bar{s}}{\sigma_s^2} \right) z + \left(\frac{\bar{r}^2}{\sigma_r^2} + \frac{\bar{s}^2}{\sigma_s^2} \right) \end{aligned}$$

Etsitään neliömuodon β^2 minimi asettamalla

$$\frac{d(\beta^2)}{dz} = 2 \left(\frac{1}{\sigma_r^2} + \frac{1}{\sigma_s^2} \right) z - 2 \left(\frac{\bar{r}}{\sigma_r^2} + \frac{\bar{s}}{\sigma_s^2} \right) = 0$$

josta saadaan

$$z = \frac{\frac{\bar{r}}{\sigma_r^2} + \frac{\bar{s}}{\sigma_s^2}}{\frac{1}{\sigma_r^2} + \frac{1}{\sigma_s^2}} = \frac{\sigma_s^2 \bar{r} + \sigma_r^2 \bar{s}}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2}$$

Ratkaistaan seuraavaksi β^2 . Helpoin tapa edetä on palata yhtälöön

$$\beta^2 = \frac{(z - \bar{r})^2}{\sigma_r^2} + \frac{(z - \bar{s})^2}{\sigma_s^2}$$

missä siis äskeisen perusteella

$$z - \bar{r} = \frac{\sigma_s^2 \bar{r} + \sigma_r^2 \bar{s}}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} - \bar{r} = \frac{\sigma_s^2 \bar{r} + \sigma_r^2 \bar{s} - \sigma_s^2 \bar{r} - \sigma_r^2 \bar{r}}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} = \frac{\sigma_r^2 (\bar{s} - \bar{r})}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2}$$

$$z - \bar{s} = \frac{\sigma_s^2 \bar{r} + \sigma_r^2 \bar{s}}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} - \bar{s} = \frac{\sigma_s^2 \bar{r} + \sigma_r^2 \bar{s} - \sigma_s^2 \bar{s} - \sigma_r^2 \bar{s}}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} = \frac{\sigma_s^2 (\bar{r} - \bar{s})}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2}$$

joten

$$\begin{aligned} \beta^2 &= \frac{1}{\sigma_r^2} \left[\frac{\sigma_r^2 (\bar{s} - \bar{r})}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} \right]^2 + \frac{1}{\sigma_s^2} \left[\frac{\sigma_s^2 (\bar{r} - \bar{s})}{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} \right]^2 = \frac{\sigma_r^2 (\bar{s} - \bar{r})^2 + \sigma_s^2 (\bar{r} - \bar{s})^2}{(\sigma_s^2 + \sigma_r^2)^2} \\ &= \frac{(\sigma_r^2 + \sigma_s^2) (\bar{r} - \bar{s})^2}{(\sigma_s^2 + \sigma_r^2)^2} = \frac{(\bar{r} - \bar{s})^2}{\sigma_r^2 + \sigma_s^2} \end{aligned}$$

sillä $(\bar{r} - \bar{s})^2 = (\bar{s} - \bar{r})^2$.

Lopputuloksena saadaan tässä tapauksessa

$$\beta_{HL} = \sqrt{\beta^2} = \frac{\bar{r} - \bar{s}}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} = \beta_{\text{CORNELL}}$$



Tekijä(t) Paloposki, Tuomas, Myllymäki, Jukka & Weckman, Henry			
Nimeke Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan			
Tiivistelmä <p>Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin luotettavuusteknisten menetelmien käyttöä paloturvallisuus-analyysieihin. Esimerkkikohteeksi valittiin erään olemassa olevan urheiluhallin poistumisturvallisuus tilanteessa, jossa seiväshyppypatja syttyy palamaan hallissa järjestettävän yleisötilaisuuden aikana.</p> <p>Tutkittavat menetelmät olivat Cornellin menetelmä, Hasofer-Lindin menetelmä ja Monte Carlo -menetelmä. Kaikki kolme menetelmää soveltuivat valitun kohteen ja poistumistahtuman tarkasteluun hyvin. Menetelmät antoivat hyvin samankaltaisia tuloksia, kuten oli tässä tapauksessa odotettavissakin näiden menetelmien teorian pohjalta. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että kyseisen urheiluhallin poistumisturvallisuus tarkastellussa palotilanteessa on hyvä.</p> <p>Menetelmien käytön suurin ongelma on luotettavien lähtötietojen saaminen. Tämä koskee erityisesti poistumista, joka teknisten seikkojen lisäksi riippuu myös kohteessa olevien ihmisten käyttäytymisestä, esimerkiksi siitä, miten he reagoivat havaitessaan tulipalon sekä miten ja mitä kautta he päättävät siirtyä turvaan tulipalon aiheuttamasta uhasta.</p>			
Avainsanat sports hall, fire safety, fire protection, reliability, methods, evacuation			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6113-9 (nid.) 951-38-6114-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinnumero R1SU00271	
Julkaisu-aika Joulukuu 2002	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivu- ja 53 s. + liitt. 13 s.	Hinta B
Projektin nimi Turvalliset rakennukset (Turvaverkko): Luotettavuustekniset menetelmät palotekniikassa		Toimeksiantaja(t) VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka	
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 2181
VTT-TIED-2181

Author(s) Paloposki, Tuomas, Myllymäki, Jukka & Weckman, Henry			
Title Application of reliability techniques for calculation of the evacuation safety of a sports hall			
Abstract <p>This report describes a study on the use of reliability methods for conducting fire safety analyses. The methods were applied to evaluate the evacuation safety of a sports hall in a situation where a pole jump mattress is ignited during a public event.</p> <p>The applied reliability methods were the Cornell method, Hasofer-Lind method and Monte Carlo method. All methods proved to be suitable for studying the selected case. In this particular case, the methods also gave very similar results as was expected based on the theory of these methods. The results indicated that the evacuation safety of the sports hall appears to be good in the studied fire scenario.</p> <p>The biggest problem with the use of these methods is obtaining reliable initial data. This applies particularly to evacuation, which is depending on the behaviour of the occupants; e.g. how they react to the observation of a fire and how and through which routes they will escape to safety from the threat posed by the fire.</p>			
Keywords sports hall, fire safety, fire protection, reliability, methods, evacuation			
Activity unit VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-2181 (soft back ed.) 951-38-2181 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R1SU00271	
Date December 2002	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 53 p. + app. 13 p.	Price B
Name of project Turvalliset rakennukset (Turvaverkko): Luotettavuus- tekniset menetelmät palotekniikassa		Commissioned by VTT Building and Transport	
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	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

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

- 2120 Koota, Jaana. Construction site safety. Case United States. 2001. 39 p. + app. 3 p.
- 2121 Tervonen, Juha & Räsänen, Jukka. Environmental assessment of strategic transport actions. SEA in CODE-TEN. 2001. 25 p. + app. 7 p.
- 2123 Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebbar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. 2002. 95 s. + liitt. 51 s.
- 2124 Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. 2002. 51 s. + liitt. 13 s.
- 2125 Riihimäki, Markku & Siekkinen, Heidi. Asiakastarpeet kiinteistöliiketoiminnassa. Liike- ja toimistokiinteistöt. 2002. 74 s. + liitt. 10 s.
- 2126 Kauppinen, Anna-Kaisa, Pietilä, Paula, Sundbäck, Liisa & Kaleva, Hanna. Kiinteistöjohtamisen tehostaminen – vaihtoehtona ulkoistaminen. Ulkoistamisen edellytykset ja päätöksenteon mallintaminen. 2002. 73 s. + liitt. 4 s.
- 2128 Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. 2002. 125 s. + liitt. 63 s.
- 2134 Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut. 2002. 279 s. + liitt. 9 s.
- 2136 Hietaniemi, Jukka & Baroudi, Djebbar. Physical Interpretation of Temperature Data Measured in the SBI Fire Test. Nordtest Technical Report 416. Nordtest Project No. 1381-98. 2002. 47 p. + app. 4 p.
- 2144 Saari, Mikko, Pallari, Marja-Liisa, Salonvaara, Mikael, Kääriäinen, Hannu, Viitanen, Hannu, Humala, Iris, Liski-Markkanen, Sari, Malin, Anne & Laitinen, Kirsi. Terveen saunan tekijät. 2002. 60 s. + liitt. 47 s.
- 2147 Ritola, Jouko & Vuopio, Jaakko. Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta. 2002. 124 s.
- 2154 Vainio, Terttu, Jaakkonen, Liisa, Nippala, Eero, Lehtinen, Erkki & Isaksson, Kaj. Korjausrakentaminen 2000–2010. 2002. 60 s. + liitt. 25 s.
- 2158 Shukuya, Masanori & Hammache, Abdelaziz. Introduction to the Concept of Exergy – for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems. 2002. 14 p. + app. 17 p.
- 2159 Tillander, Kati, Lindblom, Towe & Keski-Rahkonen, Olavi. Taloudelliset vahingot rakennuspa-loissa. 2002. 107 s. + liitt. 5 s.
- 2161 Koivu, Tapio. Kiinteistö- ja rakennusalan tuotemallien ja yhteensopivuuden tulevaisuus. Vaihtoehtoisia skenaarioita ja teknologiapolkuja. 2002. 53 s. + liitt. 11 s.
- 2166 Kääriäinen, Hannu, Tulla, Kauko & Vähäsöyrinki, Erkki. Öljysäiliöiden suojarakenteiden kunto ja kunnonhallinta. CISTERI-projekti. 2002. 33 s. + liitt. 22 s.
- 2167 Tapio, Juha, Häkkänen, Helinä, Pajunen, Kirsi, Kaitanen, Susanna & Mäkinen, Tapani. Sakkolain-säädännön uudistamisen vaikutukset ylinopeusrangaistuksiin, ajonopeuksiin ja liikenneturval-lisuuteen. 2002. 36 s. + liitt. 7 s.
- 2168 Ojanen, Tuomo & Salonvaara, Mikael. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet. 2002. 66 s. + liitt. 3 s.
- 2170 Mikkola, Kati & Riihimäki, Markku. Omakotitalorakentajien valmius ympäristöystävällisiin rakentamistapoihin. 2002. 53 s. + liitt. 2 s.
- 2181 Paloposki, Tuomas, Myllymäki, Jukka & Weckman, Henry. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan. 2002. 53 s. + liitt. 13 s.

Julkaisussa tarkastellaan luotettavuusteknisten menetelmien käyttöä paloturvallisuusanalyysihin. Menetelmiä sovelletaan esimerkkikohteeksi valittuun urheiluhalliin, jota on myös aikaisemmin käytetty erityyppisten paloturvallisuusanalyysien kohteena. Luotettavuusteknisiä menetelmiä käytetään valitun kohteen poistumisturvallisuuden arvioimiseen tilanteessa, jossa seiväshyppypatja syttyy palamaan yleisötilaisuuden aikana. Käytetyt luotettavuustekniset menetelmät ovat Cornell-, Hasofer-Lind- ja Monte Carlo -menetelmät. Menetelmät soveltuvat valitun kohteen ja poistumistapahtuman tarkasteluun hyvin. Menetelmien käytön suurin ongelma on luotettavien lähtötietojen saaminen. Tämä koskee erityisesti poistumista, joka riippuu kohteessa olevien ihmisten käyttäytymisestä palotilanteessa.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374
