

Henry Weckman

Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä

| Tehtävä B: Poistumisturvallisuus

Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä

Tehtävä B: Poistumisturvallisuus

Henry Weckman

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-6757-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6758-7 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

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

Copyright © VTT 2005

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4815

VTT Bygg och transport, Stenkarlsvägen 4, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4815

VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4815

Toimitus Anni Kääriäinen

Valopaino Oy, Helsinki 2005

Weckman, Henry. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. Tehtävä B: Poistumisturvallisuus [Improvement of fire safety in underground spaces. Task B: Evacuation safety]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2319. 93 s. + liitt. 13 s.

Avainsanat fire safety, evacuation, human behaviour, calculation methods, simulation tools, underground spaces, subterranean spaces

Tiivistelmä

Tässä julkaisussa kuvataan aluksi poistumista ja poistumisen mitoittamista yleisellä tasolla sekä ihmisten käyttäytymistä poistumisen aikana. Sen jälkeen esitetään poistumisen laskentamenetelmiä, minkä jälkeen esitellään kirjallisuudesta löytyneitä maanalaisia tiloja varten laadittuja laskentamalleja.

Ihmisten käyttäytymisestä maanalaisissa tiloissa tapahtuvissa tulipaloissa on olemassa varsin niukasti tieteellistä tutkimustietoa. Suurin osa tästä tiedosta koskee liikennetunneleita, jotka on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Maanalaisiin tiloihin liittyy joitakin erityispiirteitä, jotka saattavat vaikuttaa ihmisten käyttäytymiseen. Tällaisia erityispiirteitä ovat mm. vaikeudet hahmottaa maanalainen tila ja tilan eri osien keskinäisiä yhteyksiä, mikä voi vaikeuttaa lyhimmän turvaan johtavan kulkureitin löytämistä. Ikku-noiden puuttuminen johtaa myös siihen, että kiintopisteitä on vaikea muodostaa, mikä usein hankaloittaa suunnistamista maanalaisissa tiloissa. Monet ihmiset kokevat myös ahtaan paikan kammoa maanalaisissa tiloissa, mikä tulipalotilanteissa voi edelleen korostua. Savukaasujen nouseminen ylöspäin porrashuoneisiin voi myös vaikeuttaa poistumista, ellei porrashuoneiden suunnittelussa asiaan ole kiinnitetty riittävästi huomiota.

Tämän julkaisun jälkimmäisessä osassa esitetään neljää eri tyyppiä edustavasta maanalaisesta rakennuskohteesta tehtyjen poistumissimulointilaskelmien tulokset. Esimerkkikohteet olivat pysäköintihallina käytetty väestösuoja, urheiluhallina käytetty väestösuoja, metroasema ja yhteiskäyttötunneli. Poistumisaikalaskelmat tehtiin käyttäen sekä poistumisen simulointiohjelmaa että käsilaskentamenetelmää. Saadut tulokset vaikuttavat kvalitatiivisesti arvioituna oikean suuntaisilta.

Weckman, Henry. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. Tehtävä B: Poistumisturvallisuus [Improvement of fire safety in underground spaces. Task B: Evacuation safety]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2319. 93 p. + app. 13 p.

Keywords fire safety, evacuation, human behaviour, calculation methods, simulation tools, underground spaces, subterranean spaces

Abstract

The first part of this publication describes evacuation and the design of evacuation routes on a general level and also the behaviour of people during evacuation. It is followed by a presentation of methods for calculation of evacuation and a literature survey of calculation methods for underground spaces.

Scientific literature on human behaviour in fires in underground spaces seems to be very scarce. Most of the available information is related to traffic tunnels which, however, are outside of the scope of this investigation. Underground spaces have a number of special features which may influence the behaviour of people. Such features are for instance difficulties to perceive an underground space and the internal connections of its different parts, which may impede finding the shortest route to safety. The absence of windows makes it difficult for evacuees to form a point of reference which complicates orientation in underground spaces. Many individuals feel claustrophobic in underground spaces, which may be further emphasised in fire situations. Smoke and combustion products have a tendency to enter stairwells unless sufficient preventive measures have been taken.

The latter part of the publication deals with evacuation simulations applied on four different types of underground spaces. The case studies were: an air raid shelter used as a car park, an air raid shelter used as a sports hall, an underground station and a service tunnel. The evacuation calculations were carried out using both a computer simulation program and a manual calculation method. The results obtained appear to be qualitatively correct.

Alkusanat

Tämä julkaisu kuuluu osana VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa vuosina 2004–2005 käynnissä olleeseen tutkimushankkeeseen HENKILÖTURVALLISUUDEN KEHITTÄMINEN MAANALAISISSA TILOISSA PALORISKEJÄ PIENENTÄMÄLLÄ.

Hankkeessa on tavoitteena laatia maanalaisia tiloja koskevien ohjeiden ja vaatimustasojen pohjaksi yhteenveto paloturvallisuuden arvioinnin menetelmistä ja työkaluista seuraavilla osa-alueilla: palon kehittyminen (syttymissyyt, palokuormat, mitoituspalo), poistumis- ja pelastamisturvallisuus sekä sammutuksen ja savunpoiston vaatimukset. Tutkimus tähtää henkilöturvallisuuden parantamiseen ennaltaehkäisykeinoin vähentämällä tulipaloriskejä, joita aiheutuu maanalaisissa tiloissa työskenteleville sekä tilapäisesti asioiville ja pelastustoimintaan osallistuville. Rakenteiden palomitoituksen ohjeistaminen ei kuulu tähän hankkeeseen.

Hankkeen tulokset luovan pohjan jatkohankkeelle, jossa yhteistyössä viranomaistahojen kanssa laaditaan opas maanalaisten tilojen paloturvallisuussuunnittelusta. Oppaan näkökulmana ovat sekä työturvallisuus että tilapäisesti asioivien henkilöturvallisuus.

Tutkimushanke koostuu kahdesta edellä mainittua tavoitetta tukevasta osahankkeesta:

A: Mitoituspalo ja savun leviäminen

B: Poistumisturvallisuus.

Tämä julkaisu on osahankkeen B loppuraportti.

Hanketta rahoittavat Fläkt Woods Oy, puolustusministeriö, sisäasiainministeriö, Työsuojelurahasto, ympäristöministeriö ja VTT. Kiitämme kaikkia kohde- ja taustatietojen antajia sekä erityisesti hankkeen johtoryhmään kuuluneita henkilöitä:

- Fläkt Woods Oy: *Jouni Tuomi*
- Helsingin pelastuslaitos: *Marko Järvinen*
- Maanalaisten tilojen rakentamisyhdistys MTR ry: *Jouko Ritola, Jukka Pukkila*
- Pääesikunta: *Hannu Kuhanen, Juhani Juutilainen*
- Saanio & Riekkola Oy: *Antti Öhberg, Reijo Riekkola*
- sisäasiainministeriö: *Pekka Rajajärvi*
- sosiaali- ja terveysministeriö: *Erkki Reinikka*
- Työsuojelurahasto: *Riitta-Liisa Lappeteläinen*
- Uudenmaan työsuojelupiiri: *Markku Marjamäki, Timo Pinomäki*
- ympäristöministeriö: *Pirjo Kurki, Teppo Lehtinen, Jorma Jantunen*.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	8
2. Poistumisen mitoittamisen yleisperiaatteet.....	10
3. Ihmisten käyttäytyminen poistumistilanteissa.....	15
3.1 Yleistä.....	15
3.2 Poistumiseen vaikuttavia henkilöominaisuuksia.....	16
3.3 Poistumisen onnistumiseen liittyviä tekijöitä.....	17
3.4 Rakenteellisia tekijöitä.....	19
3.5 Maanalaisten tilojen ongelmia.....	19
4. Poistumisen laskentamalleista.....	22
4.1 Poistumismallien rajoituksia.....	23
4.2 Poistumisen laskenta käsin.....	25
4.2.1 Esimerkki: Poistumisajan laskeminen ruuhkaisissa tiloissa.....	26
4.2.2 Esimerkki: Poistumisajan laskeminen ruuhkattomissa tiloissa.....	29
4.3 Poistumisen laskeminen tietokoneohjelmilla.....	30
4.3.1 Esimerkki: Poistumisen laskentaohjelma <i>Simulex</i>	32
4.4 Savun, palamiskaasujen ja lämmön vaikutusten arviointi ihmisten poistumismahdollisuuksiin.....	35
4.4.1 Savun muodostuminen ja savun vaikutukset.....	36
4.4.2 Myrkyllisten palamiskaasujen muodostuminen.....	39
4.4.3 Myrkyllisten kaasujen vaikutukset.....	42
4.5 Kehittyneemmät poistumismallit.....	47
4.6 Poistumisen laskenta maanalaisissa tiloissa.....	48
4.6.1 Poistumista koskevia vaatimuksia Suomen rakentamismääräyksissä.....	48
4.6.2 Esimerkkejä ulkomaisista vaatimuksista.....	50
4.6.3 Raideliikenteen maanalaisia asemia koskeva laskentamalli.....	51
4.6.4 Kaivoskäytäviä koskeva laskentamalli.....	52
4.6.5 Tunnelipalojen henkilöriskin arviointia koskeva menetelmä.....	53
5. Poistumissimuloinnit esimerkkikohteissa.....	56
5.1 Esimerkkikohte 1: Pysäköintihallina käytetty väestösuoja.....	57
5.2 Esimerkkikohte 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja.....	60

5.3	Esimerkkikohde 3: Metroasema	69
5.4	Esimerkkikohde 4: Yhteiskäyttötunneli	82
6.	Yhteenveto	84
	Lähdeluettelo	87
Liitteet		
	Liite A: Poistumiseen liittyviä käsitteitä	
	Liite B: Simuloidut poistumistapaukset	

1. Johdanto

Paloturvallisuussuunnittelun keskeisimpiä päämääriä on varmistaa, että rakennuskohteessa olevat henkilöt voivat tulipalon sattuessa siirtyä turvaan ennen kuin olosuhteet kohteessa muodostuvat henkilöturvallisuuden kannalta kohtalokkaiksi. Tämän päämäärän saavuttamiseksi onkin useimpien maiden rakentamismääräyksiin sisällytetty erilaisia poistumisjärjestelyjä koskevia vaatimuksia. Vaatimukset koskevat usein esimerkiksi kulkureittien pituuksia, uloskäytävien lukumääriä, mittoja, sijoitusta ja rakenteita sekä turvavalaistusta.

Poistumisjärjestelyjen mitoitus on perinteisesti perustunut eri maiden rakentamismääräyksiin sisältyviin taulukoihin tai vastaaviin, joissa annetaan vaaditut uloskäytävien lukumäärät, leveydet ja kulkureittien enimmäispituudet. Nämä mitat riippuvat yleensä kohteessa olevien henkilöiden lukumäärästä, kohteen mitoista, käytetyistä rakennustarvikkeista sekä rakennuskohteen käyttötarkoituksesta. Tämänkaltaiset menetelmät perustuvat yleiseen, vuosikymmenien varrella kertyneeseen tietämykseen ja kokemukseen poistumisesta, ja ne johtavatkin useimmissa tapauksissa täysin riittäviin ja turvallisiin ratkaisuihin. Näiden menetelmien hyvänä puolena on, että ne ovat yksinkertaisia ja helppoja käyttää. Kuitenkaan ne eivät aina johda turvallisuuden kannalta optimaaliseen lopputulokseen, koska saavutetusta turvallisuustasosta ei ole varmaa tietoa.

Edellä mainittujen ns. taulukkomitoitusmenetelmien lisäksi on monien maiden, mm. Suomen, rakentamismääräyksiin sisällytetty mahdollisuus käyttää analyyttisiä menetelmiä poistumisjärjestelyjen mitoittamiseksi. Niiden avulla on mahdollista suunnitella kuhunkin tilaan entistä paremmin optimoituja poistumisjärjestelyjä. Analyyttisten menetelmien periaatteena on poistumiseen käytettävissä olevan ajan vertaaminen rakennuskohteen kustakin tilasta poistumiseen kuluvaan aikaan. Näillä menetelmillä siis varmistetaan, että rakennuskohteessa olevat henkilöt voivat siirtyä turvaan ennen kuin olosuhteet kohteessa muodostuvat poistumisen kannalta kriittisiksi.

Analyyttiset menetelmät edellyttävät käytännössä, että mallinnetaan valittuja palotapauksia ja lasketaan rakennuskohteen eri tiloissa tulipalon aikana vallitseva lämpötila, lämpösäteily, näkyvyys sekä erilaisten myrkyllisten kaasujen pitoisuudet. Toisaalta mallinnetaan kohteessa olevien henkilöiden poistuminen ja määritetään heidän sijaintinsa koko poistumisen ajan. Jokaisena ajankohtana verrataan jokaisen henkilön sijaintikohdassa vallitsevia olosuhteita (lämpötilaa, lämpösäteilyä, näkyvyyttä, kaasupitoisuuksia) kriittisiksi tunnettuihin raja-arvoihin. Nämä kriittiset arvot voivat vastata tajuttomuuteen tai kuolemaan johtavia arvoja.

Sekä palon kehittymistä että poistumista varten on olemassa useita tarkkuudeltaan eritasoisia laskentamenetelmiä. Yksinkertaisimmat karkeat menetelmät soveltuvat käsilas-

kentaan, mutta toisessa ääripäässä olevat menetelmät edellyttävät jo huomattavia laskentaresursseja. Kaupallisia poistumislaskentaohjelmia lienee tällä hetkellä saatavissa kymmenkunta, ja myös VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa on ollut muutamia näistä koekäytössä (Weckman 1998).

Laskentamalleja on olemassa sekä yleiskäyttöisiä että tiettyjä erikoiskohteita varten tarkoitettuja ohjelmia. Viimeksi mainittuja ovat esimerkiksi laivojen ja lentokoneiden poistumisen laskentaohjelmat. Maanalaisia tiloja varten löytyy kansainvälisestä tieteellisestä kirjallisuudesta vain muutamia laskentamalleja, joista lähes kaikki koskevat maantie- ja raideliikennetunneleita. Metroasemia ja kaivoksia varten on kuitenkin julkaistu erikseen laskentamalleja, joita kuvataan jäljempänä hieman yksityiskohtaisemmin. Näyttääkin siltä, että lukuun ottamatta tie- ja raideliikennetunneleita asemineen poistumisen mitoittamiseen käytetään yleisiä rakennuksia varten tarkoitettuja laskentaohjelmia.

Ruotsissa vuonna 1997 julkaistussa maanalaisia tiloja koskevassa kirjallisuustutkimuksessa havaittiin myös, että liikennetunneleita lukuun ottamatta maanalaisia tiloja koskevia paloalan tutkimuksia on tehty varsin niukasti (Ingason *et al.* 1997).

Tässä julkaisussa kuvataan aluksi poistumista ja poistumisen mitoittamista yleisellä tasolla sekä ihmisten käyttäytymistä poistumisen aikana. Sen jälkeen esitetään poistumisen laskentamenetelmiä, minkä jälkeen esitellään kirjallisuudesta löytyneitä maanalaisia tiloja varten laadittuja laskentamalleja. Liikennetunneleita ei käsitellä tässä julkaisussa. Yleiskuvaukset perustuvat useisiin VTT:ssä aikaisemmin laadittuihin julkaisuihin (Weckman 1997a, 1997b, 1998, Weckman *et al.* 1999, Paloposki *et al.* 2002).

Tutkimushankkeen osahankkeessa A. *Mitoituspalot ja savun leviäminen* on valittu tulipalojen simulointilaskelmien esimerkkikohteiksi neljä erityyppistä maanalaista tilaa. Hankkeen johtoryhmän kanssa yhdessä valitut kohteet edustavat neljää erityyppistä maanalaista rakennuskohdetta: pysäköintihallina käytettyä väestösuoja, urheiluhallina käytettyä väestösuoja, metroasemaa ja yhteiskäyttötunnelia. Tämän julkaisun jälkimmäisessä osassa esitetään osahankkeessa B. *Poistumisturvallisuus* tehdyt poistumissimulointilaskelmien tulokset samoissa kohteissa. Tutkimushankkeen varsinaisessa lopuraportissa (Hostikka *et al.* 2005) on verrattu keskenään palosimulointien ja poistumissimulointien tuloksia ja tehty arvio poistumisen onnistumismahdollisuuksista valituissa tulipalotapauksissa.

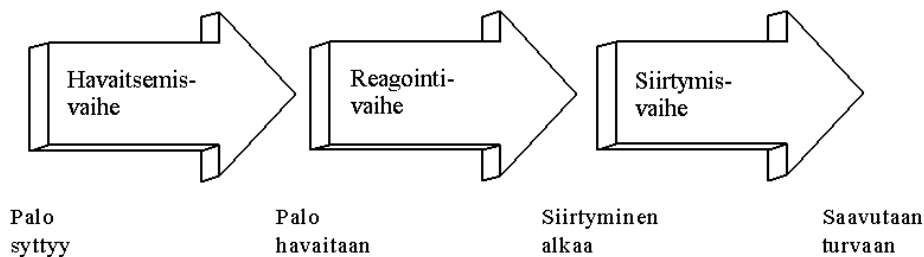
Liite A sisältää poistumiseen ja poistumisjärjestelyihin liittyviä käsitteitä ja määritelmiä.

2. Poistumisen mitoittamisen yleisperiaatteet

Mitoituksen kannalta poistumisen katsotaan alkavan sillä hetkellä, kun palo syttyy, ja päättyvän sillä hetkellä, kun tilassa olevat henkilöt ovat päässeet turvaan. Mallitarkaste-
lujia varten poistuminen jaetaan erillisiin vaiheisiin, joiden lukumäärä kirjallisuudessa vaihtelee hieman. Useimmiten vaiheita on kolmesta viiteen. Yleisimmin käytetyt vaiheet ovat seuraavat:

- *havaitsemisvaihe*, jolla tarkoitetaan aikaa palon syttymisestä siihen, kun henkilöt tulevat tietoisiksi rakennuksessa olevasta palosta
- *reagointivaihe*, joka seuraa välittömästi havaitsemisvaihetta ja päättyy siihen, että henkilöt aloittavat fyysisen siirtymisen
- *siirtymisvaihe*, joka puolestaan seuraa välittömästi reagointivaihetta ja päättyy henkilöiden saapuessa turvaan.

Kuva 1 esittää yksinkertaisen kaaviokuvan poistumisen eri vaiheista.



Kuva 1. Poistumisen vaiheet.

Havaitsemisvaiheen pituus voidaan yleensä arvioida palonkehittymismallien avulla. Erityisesti mikäli rakennus on varustettu automaattisin paloilmalaitteilla, havaitsemisvaiheen pituus voidaan arvioida niiden toiminta-aikojen perusteella. Ellei rakennuksessa ole paloilmalaitteita, havaitsemisvaiheen pituus riippuu siitä, milloin henkilöt itse tulevat tietoisiksi palosta, esimerkiksi haju-, näkö- tai kuuloaistimusten perusteella. Joidenkin maiden poistumisen mitoitusohjeissa esitetään havaitsemisvaiheen pituudelle käytettäviä ohjeellisia arvoja erityyppisiä tiloja varten. Taulukossa 1 esitetään suomalaisiin paloturvallisuussuunnitteluohjeisiin sisältyvät arviot havaitsemisvaiheen pituudesta erityyppisissä tiloissa tapahtuvissa tulipaloissa (RIL 2003). Aivan viime aikoina on myös julkaistu yksityiskohtaisempia tietoja havaitsemis- ja reagointivaiheen kestoajojen ja kautumista erityyppisissä tiloissa (Purser 2005, Purser 2004, Gwynne *et al.* 2003).

Reagointivaiheen aikana esiintyy monenlaista toimintaa. Henkilöt pyrkivät esimerkiksi selvittämään, onko hälytys oikea ja millainen palo on kyseessä; paloa yritetään ehkä sammuttaa, pukeudutaan, kerätään omaisuutta jne. Tämän vaiheen kesto-aika on erityi-

sen vaikeasti arvioitavissa. Usein käytetään tähän tarkoitukseen kokemusperäisiä taulukoituja arvoja. Edellä mainittu taulukko 1 sisältää myös arvioita reagoitivaiheen pituudesta erityyppisissä tiloissa. Havaitsemisvaihe jaetaan usein kahteen osaan, joista ensimmäinen alkaa palon syttymisestä ja päättyy paloilmaisimen tai vastaavan järjestelmän havaitessa tulipalon. Jälkimmäinen osa alkaa palon ilmaisusta ja päättyy hälytyksen antamiseen. Myös reagoitivaihe voidaan jakaa osiin: varsinaiseen reagoitivaiheeseen ja poistumisen valmisteluun. Näiden vaiheiden välinen raja on henkilön päätös poistua rakennuksesta.

Taulukko 1. Esimerkkejä havaitsemis- ja reagoitivaiheen pituuksista erilaisissa tiloissa suomalaisten paloturvallisuussuunnitteluohjeiden mukaan (RIL 2003).

Tilan tyyppi	Havaitsemisvaiheen pituus (min)		Reagoiti- ja päätöksentekovaiheen pituus (min)			
	Onko tilassa automaattinen paloilmaisin?		Poistumishälytyksen antotapa			
	Ei	Kyllä	Ei	Hälytys- kello	Kuulutus	Henkilö- kunta
Tavaratalo	3	1,5	5	3	2	2
Ravintola	2,5	1,5	3	2,5	2	2
Tanssisali	5	2	5	4	3	3
Teatteri	5	5	5	4	2	2
Elokuvateatteri	5	5	5	4	2	2
Hoitolaitos	ei mahd.	2	3	2	2	1
Hotelli	ei mahd.	2	4	4	3	3

Edellä mainituista kolmesta vaiheesta siirtymisvaihe ja sen kesto on kaikkein parhaiten tunnettu ja siten tarkimmin laskettavissa. Kuitenkin on todettu, että varsinaisen siirtymisvaiheen pituus on yleensä vain alle neljäsosa koko poistumisajasta. Toisaalta siirtymisvaiheen pituuteen voidaan parhaiten vaikuttaa poistumisen mitoituksella. Siirtymisvaiheen laskentamalleja ja -menetelmiä käsitellään yksityiskohtaisemmin jäljempänä.

On huomattava, että rajat eri vaiheiden välillä ovat jossain määrin mielivaltaisia. Niinpä ihmisten varsinaisen liikkuminen yhdistetään tavallisesti siirtymisvaiheeseen. Käytännössä ihmiset saattavat liikkua jo havaitsemis- ja reagoitivaiheiden aikana esimerkiksi sen vuoksi, että he haluavat selvittää tilannetta hankkimalla lisätietoa. Määrätietoinen liikkuminen kohti uloskäytävää on kuitenkin siirtymisvaiheen tunnus. Voitaisiin myös ajatella kulkureitin valinnan kuuluvan reagoitivaiheeseen, sillä reitinvalinta on yhteydessä reagoitivaiheen aikana mahdollisesti tapahtuvaan lisätietojen hankintaan. Käytännössä kulkureitin valintaan vaikuttavat kuitenkin myös sellaiset seikat, jotka ilmenevät

vasta siirtymisvaiheen aikana, kuten mahdollinen ruuhkautuminen oviaukossa. Tämän vuoksi reitinvalinta kuuluu luontevammin osaksi siirtymisvaihetta.

Poistumiseen kuluva kokonaisaika muodostuu eri vaiheiden yhteenlasketusta kestoajasta. Poistumisen mitoittaminen voidaan käsitellä rajatilamitoitustehtävänä, jossa poistumiseen käytettyä aikaa verrataan poistumiseen käytettävissä olevaan eli kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluvaan aikaan. Kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika saadaan palonkehittymismalleista yhdistettynä tunnettuihin raja-arvoihin.

Pelkistetyimmillään poistumisen mitoittamisessa määritetään kullekin käytetylle mitoitusalalle rakennuksen kussakin tilassa kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika sekä vastaava poistumiseen käytettävä kokonaisaika, minkä jälkeen tarkistetaan mitoitusehdosta mitoituksen riittävyys seuraavan yhtälön avulla:

$$t_a + t_b + t_m \leq t_{crit} \quad (1)$$

missä	t_a	on havaitsemisvaiheen pituus
	t_b	on reagointivaiheen pituus
	t_m	on siirtymisvaiheen pituus
	t_{crit}	on kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika.

Tarkasteltaessa poistumista rajatilamitoitustehtävänä voidaan yhtälö (1) kirjoittaa seuraavaan muotoon, jossa eri vaiheisiin liittyvät osittaisvarmuuskertoimet on merkitty γ :lla:

$$\gamma_a t_a + \gamma_b t_b + \gamma_m t_m \leq \frac{1}{\gamma_{crit}} t_{crit} \quad (2)$$

Osittaisvarmuuskertoimilla γ_a , γ_b , γ_m ja γ_{crit} korjataan eri vaiheiden kestoaikoihin ja kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluvaan aikaan liittyvät epävarmuudet. Poistumismallien avulla määritetään yhtälön (2) vasemmalla puolella oleva kokonaispoistumisaika tai ainakin joitakin sen osatekijöistä. Kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika voidaan puolestaan laskea palonkehittymismallien avulla. Osittaisvarmuuskertoimien määrittämiseksi on olemassa menetelmiä (Magnusson *et al.* 1995, Paloposki *et al.* 2002), joiden soveltaminen käytännön mitoitustehtäviin on toistaiseksi kuitenkin liian vaikeaa mm. puuttuvien perustietojen puuttuessa. Käytännössä tyydytäänkin poistumistarkasteleissa yksinkertaisempaan yhtälöön (1) ja käytetään *riittävä* varmuutta poistumiseen kuluvan kokonaisajan ja poistumiseen käytettävän ajan välillä. Varmuuden riittävydestä ei ole ehdottomia vaatimuksia, vaan se joudutaan arvioimaan tapauskohtaisesti.

Kuten johdannossa mainittiin, poistuminen katsotaan onnistuneeksi analyyttisiä poistumisen mitoitustapojen käyttöä, mikäli voidaan osoittaa, että kohteessa olevat henkilöt voivat siirtyä turvaan ennen kuin olosuhteet kohteessa muodostuvat poistumisen kannalta kriittisiksi. Menetelmät edellyttävät käytännössä, että mallinnetaan valittuja palotapauksia ja lasketaan rakennuskohteen eri tiloissa tulipalon aikana vallitseva lämpötila, lämpösäteily, näkyvyys sekä erilaisten myrkyllisten kaasujen pitoisuudet. Toisaalta mallinnetaan kohteessa olevien henkilöiden poistuminen ja määritetään heidän sijaintinsa koko poistumisen ajan. Jokaisena ajankohtana verrataan jokaisen henkilön sijaintikohdassa vallitsevia olosuhteita (lämpötilaa, lämpösäteilyä, näkyvyyttä, kaasupitoisuuksia) kriittisiksi tunnettuihin raja-arvoihin. Suomalaisissa paloturvallisuussuunniteluohjeissa luetellaan seuraavat poistumisen kannalta kriittiset raja-arvot (RIL 2003):

Näkyvyys

- Savukaasujen optinen tiheys saa olla enintään 3,3 dB/m aina 2 m korkeuteen lattiapinnasta mitattuna tilassa, jossa palo alkaa edellyttäen, että tilan suurin mitta on enintään 10 m. Jos tilan suurin mitta on yli 10 m, optinen tiheys saa olla enintään 1 dB/m.
- Savukaasujen optinen tiheys saa olla enintään 1 dB/m aina 2 m korkeuteen lattiapinnasta mitattuna kulkureiteissä sen tilan ulkopuolella, jossa palo alkaa.

Kuuman savukaasukerroksen paksuus

- Olettaen, että tulipalon seurauksena tilaan muodostuu alempi kylmä ilmakerros ja ylempi kuuma kaasukerrokset (ns. kaksivyöhykemalli), tulee etäisyyden lattiasta kerrosten väliseen rajapintaan olla
 - vähintään $1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot H$, missä H on tilan korkeus metreinä, kun huonekorkeus on yli 3 m
 - 1,5 m, kun huonekorkeus on enintään 3 m.

Lämpösäteily

Poistumisen aikana henkilöihin saa kohdistua lämpösäteilyä enintään seuraavasti:

- 1 kW/m^2 jatkuvaa lämpösäteilyä
- 10 kW/m^2 enintään 4 s ajan
- 60 kJ/m^2 säteilyenergiaa (+ 1 kW/m^2 jatkuvan säteilyn tuottamaa energiaa).

Lämpötila

- Tilassa, jossa palo alkaa, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ enintään 10 min ajan, edellyttäen, että ilman kosteuspitoisuus on alle 10 %.
- Kulkureiteissä enintään $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sen tilan ulkopuolella, jossa palo alkaa.

Myrkylliset kaasut

Mikäli savukaasujen optinen tiheys on pienempi kuin 1 dB/m , ei poistuvien henkilöiden katsota altistuvan liiallisessa määrin myrkyllisille kaasuille. Muutoin eri kaasujen pitoisuuksien tulisi poistumisen aikana olla seuraavien rajojen puitteissa:

- hiilimonoksidi, CO: $< [2\ 000] \text{ ppm}$
- hiilidioksidi, CO₂: $< [5] \%$
- happi, O₂: $> [15] \%$.

Schneider (2005) on koontanut taulukossa 2 esitetyt poistumisen onnistumisen kannalta kriittiset raja-arvot, joissa otetaan huomioon myös aika, jonka poistuvat henkilöt altistuvat kyseisille olosuhteille.

Taulukko 2. Poistumisen kannalta kriittisten olosuhteiden raja-arvoja (Schneider 2005).

Ominaisuus	Altistusaika		
	30 min	15 min	5 min
Hiilimonoksidipitoisuus (ppm)	100	200	500
Hiilidioksidipitoisuus (til.-%)	1	2	3
Syaanivetyypitoisuus (ppm)	30	40	55
Lämpösäteily (kW/m ²)	1,7	2,0	< 2,5
Lämpötila (°C)	50	50	60
Savuntiheys (m ⁻¹)	0,1–0,2	0,1–0,2	0,1–0,2
Näkyvyys (m)	10–20	10–20	10–20

Edellä luetellut raja-arvot soveltuvat käytettäväksi lähinnä alustaviin käsilaskentamenetelmillä tehtäviin tarkasteluihin. Yksityiskohtaisemmissa tarkasteluissa on syytä käyttää menetelmiä, joissa mm. huomioidaan em. tekijöiden vaikutusaika poistuviin henkilöihin. Näitä menetelmiä tarkastellaan lähemmin luvussa 4.

3. Ihmisten käyttäytyminen poistumistilanteissa

Tulipalojen yhteydessä tapahtuvan poistumisen laskentaan käytetyillä malleilla tarkastellaan usein pelkästään poistumiseen liittyvää fyysistä siirtymisvaihetta. Poistumiseen sisältyy kuitenkin varsinaisen siirtymisvaiheen lisäksi myös muutamia sitä edeltäviä vaiheita, joiden aikana mm. tehdään päätös siirtymisen aloittamiseksi sekä sen valmisteluksi. Näiden edeltävien vaiheiden kesto aika on usein selvästi pidempi kuin siirtymisvaiheen kesto aika, minkä vuoksi on tärkeää tuntee ihmisten käyttäytyminen poistumisen eri vaiheiden aikana sekä yleensä poistumiseen vaikuttavia tekijöitä. Seuraavassa esitetty katsaus perustuu mm. Bryanin (1995), Paulsin (1998) sekä Shieldsin ja Proulxin (1999) julkaisuihin. VTT:ssä on joitakin vuosia sitten laadittu aihetta käsittelevä kirjallisuusselvitys (Weckman 1997b).

3.1 Yleistä

Kun on haastateltu tulipalossa olleita henkilöitä heidän toimenpiteistään ja reaktioistaan, on todettu, että palon alkuvaiheessa tilanteeseen liittyy epäselvyyttä, joka johtuu palosta saatavan informaation epämääräisestä luonteesta. Tällöin henkilöt pyrkivät tutkimaan ja selvittämään, millaisen uhan he ovat kohtaamassa. Eräät tutkijat esittävät, että paloissa ihmiset toimivat roolikäyttäytymismallin mukaisesti. Sen mukaan henkilöiden käyttäytymistä ohjaavat ne odotukset, jotka heillä itsellään on omasta osuudestaan tietyssä tilanteessa. Kun henkilö joutuu palotilanteeseen, hänen käyttäytymistään ohjaavat edelleen ne roolimallin vaikutteet, jotka olivat voimassa ennen uhkatilanteen syntymistä.

Toinen haastattelututkimusten perusteella todettu käyttäytymismalli on ns. liittymismalli. Tämän mallin mukaan ihmisten taipumus toisaalta lähestyä uhkaa ja toisaalta paeta sitä riippuu siitä, missä määrin henkilöt tuntevat ennestään muut paikalla olevat henkilöt ja kohteet. Mallin mukaan ihmiset pyrkivät palotilanteessa normaalioloja enemmän lähestymään entuudestaan tunnettuja tilanteita, jolloin henkilöiden pitäytyminen tutussa ja turvallisessa tilanteessa voittaa pakokäyttäytymisen. Kun poistuminen käynnistyy, ihmiset pyrkivät siirtymään ryhmänä ja ylläpitämään näin yhteyttä tuttuun objektiin eli henkilöön tai paikkaan. Liikkeen suunta ei riipu ainoastaan palon sijainnista vaan myös edellä mainittujen objektien paikasta sekä siitä, miten tunnettuja ne ovat. Tämä tarkoittaa mm. sitä, että jos tietty uloskäytävä ei ole etukäteen tunnettu, henkilöllä on pienempi taipumus käyttää sitä hätätilanteessa, ellei tunnetumpaa tietä ole savun ja liekkien takia mahdotonta käyttää. Uloskäytävän etäisyydellä on kuitenkin selvä vaikutus poistumisen suuntaan.

Tutkimuksissa on myös havaittu, että palotapauksissa paikalla olevan henkilökunnan ja yleisön käyttäytymisen välillä on selvä ero. Henkilökunta käyttää poistuessaan usein

yksinomaan varsinaisia uloskäytäviä, kun sitä vastoin yleisö poistuu varsin usein vain sitä reittiä, jonka kautta se on saapunut kyseiseen tilaan.

3.2 Poistumiseen vaikuttavia henkilöominaisuuksia

Tilassa olevien henkilöiden ominaisuuksilla on ratkaiseva merkitys poistumisen onnistumiseen. Henkilöiden liikkumisnopeudesta erilaisissa tiloissa ja olosuhteissa on olemassa runsaasti tutkimustietoa, mutta siirtymistä edeltävien vaiheiden kestoajan arvioimiseksi tarvitaan erilaista tietoa tilassa olevista henkilöistä. Erityisesti seuraavat tekijät tulisi ottaa huomioon:

Henkinen vireys. Henkilöiden toiminta palon sattuessa vaikuttaa olennaisesti siihen, kuinka he toimivat palotapauksessa. Esim. nukkuvat henkilöt reagoivat selvästi hitaammin kuin hereillä olevat henkilöt.

Liikkuvuus. Mikäli olennainen osa tilassa olevista henkilöistä on liikuntarajoitteisia, tämä tulee ottaa huomioon. Tutkimuksissa on mm. todettu, että pyörätuolia käyttävän henkilön valmistautuminen poistumista varten saattaa kestää kaksi kertaa kauemmin kuin liikkumiskykyisten henkilöiden. Myös muut mahdolliset tekijät, jotka saattavat vaikuttaa henkilöiden liikkuvuuteen, tulee ottaa huomioon.

Sosiaaliset suhteet. Tapahtuneissa suurissa paloissa on voitu havaita, että henkilöillä on taipumus pitää yhteyttä perheenjäseniinsä. Mikäli vanhemmat joutuvat erilleen lapsistaan palon yhteydessä, on todennäköistä, että he ensin pyrkivät löytämään lapsensa, ennen kuin he alkavat poistua tilasta.

Rooli ja vastuullisuus. Myös henkilöiden omaksumat roolit ja asenteet tulevat esille hätätapauksissa. Esimerkiksi jos kohteessa on kokeneita ja arvovaltaisia henkilöitä ohjaamassa poistumista, se sujuu yleensä nopeammin ja varsinkin poistumista edeltävät tiedonhankintavaiheet lyhenevät.

Asento. Henkilöiden todennäköinen asento tulee ottaa huomioon. Liikkeessä oleva henkilö alkaa todennäköisesti siirtyä nopeammin uloskäytävään päin kuin istuva tai makaava henkilö.

Omistautuneisuus. Henkilöt ovat joko toiminta- tai päämääräsuuntautuneita, ja heillä on jokin syy olla tietyssä paikassa tiettyyn aikaan. Nämä seikat vaikuttavat myös heidän käyttäytymiseensä. Tunnetaan tapauksia, joissa henkilöt ovat jatkaneet ruokailuaan ravintolassa tai jonottamista kaupan kassajonossa, vaikka on ollut täysin ilmeistä, että lähellä on vakava tulipalo, joka edellyttäisi välitöntä poistumista paikalta.

Katseen suunta. Jos tilassa on jokin tietty kohde, johon katse yleensä kohdistetaan, kuten teatterin näyttämö, henkilöt pyrkivät ensin etsimään sieltä opastusta poistumista varten.

3.3 Poistumisen onnistumiseen liittyviä tekijöitä

Poistumisen onnistumiseen ja tehokkuuteen vaikuttavat erityisesti seuraavat henkilöiden käyttäytymiseen liittyvät tekijät:

Päätöksenteko. Ihmiset tarvitsevat aikaa tehdä päätöksiä erilaisista toimenpiteistä. Ihmisillä on taipumus viivytellä tärkeitäkin toimenpiteitä, elleivät he selvästi koe niitä välttämättömiksi. Henkilöryhmissä ryhmien sisäisillä vuorovaikutuksilla on merkittävä vaikutus päätöksentekoon. On esimerkiksi havaittu, että ryhmässä olevat henkilöt viivyttelevät poistumisen aloittamista, kunnes muu ryhmä on hyväksynyt tarpeen poistua tilasta.

On myös todettu, että henkilöiden toimenpiteet määräytyvät siitä, missä määrin henkilöt ovat tietoisia tulipalosta. Tietoisuusasteet voidaan jakaa neljään ryhmään: (a) henkilö epäilee, että kysymyksessä on tulipalo; (b) henkilö on melko varma, että kysymyksessä on tulipalo; (c) henkilö on varma, että kysymyksessä on tulipalo ja on nähnyt riittävästi savua tietääkseen sen olevan vakava; ja (d) henkilö on nähnyt liekkejä. Tapauksessa (a) yleisin reaktio on selvittää asiaa. Poikkeuksen muodostavat henkilöt, jotka ovat vastuussa henkilöistä, jotka eivät pysty huolehtimaan itsestään (esimerkiksi lapset ja vanhukset). Nämä henkilöt poistuvat usein jo (a)-tapauksessa huollettavat henkilöt mukanaan. Vastaavasti tapauksessa (d) henkilöt reagoivat lähes poikkeuksetta poistumalla. Tapauksissa (b) ja (c) henkilöt reagoivat vaihtelevasti.

Poistumisharjoitukset ja kuulutusjärjestelmän kautta annettavat reaaliaikaiset ilmoitukset ja ohjeet lyhentävät yleensä päätöksentekoon kuluvaan aikaa.

Selvitysaika. Erityisesti kun palosta ei ole varmaa tietoa, henkilöt saattavat käyttää runsaasti aikaa tilanteen selvittämiseen. Tämä koskee varsinkin yksin tai pienissä ryhmissä olevia henkilöitä. On havaittu, että henkilöt saattavat käyttää runsaasti aikaa näennäisesti tuottamattomaan toimintaan. Siitä voi kuitenkin olla se hyöty, että henkilöt saavat toiminnan kautta täsmällisempää tietoa palosta, sen laajuudesta sekä kävelyreittien ja uloskäytävien kunnosta, millä puolestaan voi olla vaikutusta poistumisen tehokkuuteen.

Muut toimenpiteet. Henkilön toimenpiteet sen jälkeen, kun hän on tullut tietoiseksi palosta, saattavat edistää nopeaa poistumista, tai sitten niillä ei ole mitään vaikutusta poistumiseen, ja joissakin tapauksissa ne saattavat jopa haitata poistumista. Tavallisimpia toimenpiteitä ovat oma poistuminen paikalta, toisten henkilöiden hälyttäminen tai pelastaminen, omaisuuden pelastaminen, palon rajoittaminen tai sammuttaminen, palokunnan

hälyttäminen, oma henkinen ja ruumiillinen valmistautuminen poistumiseen ja muut sekalaiset toimenpiteet. Kaikilla näillä toimenpiteillä on jonkinlainen vaikutus poistumisen tehokkuuteen. Reaaliaikaisten kuulutusten antamisen on todettu edistävän poistumista ja vähentävän poistumista edistämättömien toimenpiteiden määrää.

Kulkureitin valinta. Tarkoituksenmukaisen uloskäytävän valinta on erityisen tärkeää kohteissa, joissa henkilöt eivät yleensä käytä portaita, kuten suurissa hotelleissa ja toimistorakennuksissa. Suurissa tuntemattomissa kohteissa suunnistusongelma on perinteisesti ratkaistu uloskäytäviä osoittavin merkinnöin. On havaittu, että ihmiset hahmottavat ympäristönsä parhaiten yksinkertaisilla muodoilla, kuten suorilla janoilla ja suorakaiteilla. Uloskäytävien tulisikin olla mahdollisimman selväpiirteisiä, ja niiden tulisi olla selkeästi havaittavissa. Yksinkertaiset uloskäytäväratkaisut lyhentävät poistumisaikaa monimutkaisiin ratkaisuihin verrattuna.

Yhtyvien henkilövirtojen konfliktitilanteet. Yksinkertaisimmilla poistumismalleilla lasketuissa poistumistapauksissa oletetaan usein, että henkilövirrat käyttäytyvät kuten nesteen virtaus putkessa. Henkilövirtojen oletetaan säätelevän itsensä verrannollisesti yhtyvien henkilövirtojen kapasiteettien suhteessa. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että henkilövirroissa esiintyy pysähdyksiä ja liikkeellelähtöjä, jotka tuovat epäsäännöllisyyttä jatkuvaan virtaan. Erityisesti on todettu, että henkilövirran on hyvin vaikea tunkeutua toiseen virtaan, joka on lähellä kulkureitin kyseisen kohdan maksimikapasiteettia. Tässä tapauksessa ensin mainittu virtaus joutuu usein odottamaan, kunnes toinen virtaus on kokonaan ohittanut yhtymäkohdan. Usein myös molemmat henkilövirrat etenevät vuorotellen yhtymäkohdassa, jolloin molemmissa virroissa esiintyy epäsäännöllisyyttä. Portaissa tämän on havaittu pienentävän henkilövirtaa aina 30–50 % maksimivirtauksesta.

Avustajat. Poistuminen on kaikkein tehokkainta silloin, kun poistuvilla henkilöillä on ollut mahdollisuus harjoitella poistumista etukäteen riittävästi. Kun poistuvilla henkilöillä ei ole ollut riittävästi harjoittelua, on monissa tapauksissa osa henkilökunnasta koulutettu avustamaan ja ohjaamaan poistumista. Tehokkaimmillaan poistuminen avustajia käyttäen on silloin, kun avustajilla on mahdollisuus koota poistuvat henkilöt valmiiksi yhteen ja päästää heidät eteenpäin koordinoitusti muiden vastaavien avustajien kanssa.

Itsesäätely. Suurissa tiloissa, joissa henkilötiheys on korkea, monet henkilöt jäävät tarkoituksellisesti odottamaan ruuhkan purkautumista. Jos nämä henkilöt poistuvat siinä vaiheessa, kun päävirtaus vielä on lähellä maksimikapasiteettiaan, viivästyneellä poistumisen aloittamisella ei yleensä ole vaikutusta poistumisen tehokkuuteen. Jos henkilöt sitä vastoin tulevat yhtymäkohtaan, kun päävirtaus on jo selvästi vähentynyt, poistumistehtävykset pienenee.

Uloskäytävien epätasainen käyttö. Jos jotain uloskäytävää käytetään suhteellisesti enemmän kuin toisia, poistumistehokkuus heikkenee.

Yhteenveto. Usein arvioidaan, että todellinen poistumisaika suurista monikerroksisista kohteista saattaa olla kaksi kertaa laskennallinen poistumisaika, kun henkilöt ovat etukäteen harjoitelleet ja kohteen poistumisjärjestelyt on hyvin organisoitu. Päinvastaisessa tapauksessa todellinen poistumisaika voi olla jopa kolminkertainen laskennalliseen aikaan verrattuna.

3.4 Rakenteellisia tekijöitä

Myös kohteen muotoilulla on huomattava merkitys poistumisen onnistumiseen. Suomen rakentamismääräyskokoelman rakenteellista paloturvallisuutta koskeva osa (E1 2002) sisältää lukuisia poistumisjärjestelyjä koskevia rakenteellisia vaatimuksia. Vaikka poistumisen mitoitus perustuisi toiminnalliseen mitoitukseen, ei näitä vähimmäisvaatimuksia tulisi alittaa. Rakenteellisista tekijöistä tulee erityisesti tarkastella seuraavia:

Uloskäytävät. Sekavia uloskäytäviä tulisi välttää. Portaiden ja tasojen tulisi vastata normaalisti käytössä olevia rakenteita. Ovien tulee avautua pääsääntöisesti kulkusuuntaan, ja niiden avaamiseen tarvittavan voiman tulisi olla suhteutettu poistuvien henkilöiden ominaisuuksiin. Uloskäytävien ulos johtavien ovien tulee olla siten sijoitettu, että henkilöt voivat nopeasti siirtyä pois rakennuksen vierestä ilman ruuhkan muodostumista.

Palonilmais- ja hälytysjärjestelmät. Käytetyn hälytysjärjestelmän tyyppillä on olennainen vaikutus poistumisen käynnistymiseen. Järjestelmätyypit voivat vaihdella yksinkertaisesta kellosta monipuolisiin kuulutusjärjestelmiin.

Opastus. Kaikki uloskäytäviin johtavat kulkureitit tulisi varustaa selkeillä opasteilla ja suuntanuolilla.

Valaistus. Kulkureitit tulisi varustaa riittävällä valaistuksella ja niissä tulisi olla myös turvavalistus.

3.5 Maanalaisten tilojen ongelmia

Edellä esitetyt ihmisten käyttäytymiseen liittyvät tekijät koskevat luonnollisesti myös maanalaisia tiloja. Maanalaisten tilojen erityispiirteiden takia eräät tekijät kuitenkin korostuvat ja saattavat vaikeuttaa poistumista.

Carmody (1994) on käsitellyt psykologisia tekijöitä, jotka liittyvät erityisesti maanalaisista tiloista poistumiseen. Samankaltaisia ilmiöitä esiintyy myös ikkunattomissa maanpäällisissä tiloissa. Poistumiseen vaikuttavista tekijöistä mainitaan mm. seuraavat:

- Koska maanalaista tilaa ei voi nähdä ulkoapäin, sen hahmottaminen on vaikeaa, mikä puolestaan vaikeuttaa tilan eri osien keskinäisten yhteyksien ymmärtämistä ja sen vuoksi lyhimpien kulkureittien löytämistä uloskäytäviin.
- Maanalaiseen tilaan mentäessä kuljetaan alaspäin, mikä aiheuttaa yleistä epävarmuuden tunnetta.
- Ikkunoiden puuttumisen takia kiintopisteiden saaminen on vaikeaa, mikä hankaloittaa suunnistamista tiloissa.
- Jotkut ihmiset kärsivät ahtaan paikan kammosta, joka tulipalon sattuessa voi entisestään pahentua.
- Yleinen käsitys lienee, että maanalaiset tilat ovat erityisen vaarallisia palotilanteissa. Savu saattaa nousta uloskäytävien portaikkoihin, mikäli niiden suunnitteluun ei ole kiinnitetty riittävästi huomiota.

Yleinen käsitys lienee myös, että tulipalotilanteissa ihmisillä olisi erityinen taipumus joutua paniikkiin ja toimia sen vuoksi epä johdonmukaisesti. Varsinkin maanalaisia tiloja on pidetty tässä suhteessa vaarallisina. Useat tutkijat ovat kuitenkin osoittaneet, että tulipaloissa ihmiset yleensä toimivat rationaalisesti ja paniikkikäyttäytyminen on paljon luultua harvinaisempaa¹ (Sime 1990). Canter *et al.* (1992) ovat tutkineet ihmisten käyttäytymistä Lontoossa 1987 sattuneen Kings Cross -maanalaisaseman tulipalossa, jossa menehtyi 31 henkilöä. Myös nämä kirjoittajat pitävät paniikin syntymistä harvinaisena ilmiönä.

Proulx ja Sime (1991) ovat tutkineet poistumisen käynnistymistä maanalaisen asemalla, jossa tehtiin poistumisharjoituksia ilman, että yleisö ja pääosa henkilökunnasta olisivat ennakoita tiedonneet asiasta. Tutkimus osoitti, että tavalla, jolla vaaratilanteesta ilmoitetaan yleisölle, on erittäin suuri merkitys poistumisen nopealle käynnistymiselle. Laituritasolla olevat matkustajat eivät kertaakaan poistuneet laiturilta palohälytyksen soidessa: he päinvastoin odottivat junaansa, lukivat tai seisoskelivat sen sijaan, että olisivat lähteneet liikkeelle. Kokeissa, joissa henkilökunta alkoi ohjata matkustajia pois laiturialueelta, nämä tottelivat välittömästi. Myös aseman kuulutusjärjestelmän kautta luettu todellinen ilmoitus, jossa matkustajille kerrottiin, minkälaisesta tilanteesta oli kysymys ja mitä heidän tuli tehdä, johti nopeaan poistumiseen.

¹ Suomessa on paniikkitilanteita kuitenkin esiintynyt useissa 1700- ja 1800-luvuilla sattuneissa kirkkopaloissa, kuten Keski-Rahkonen (2002b) on osoittanut. Esimerkiksi Juvalla puristui ja murskautui jouluna 1829 yhteensä 15 ihmistä kuoliaaksi ja Sortavalassa jouluna 1843 peräti 54 ihmistä.

Shields ja Boyce (2004) ovat äskettäin esittäneet katsauksen siitä, mitä tällä hetkellä tiedetään ihmisten käyttäytymisestä maanalaisen tilojen tulipaloissa. Katsaus keskittyy erityisesti maantie- ja rautatietunneleissa tapahtuviin paloihin, mutta kirjoittajien havainnot ovat osin sovellettavissa myös muuntyyppisiin maanalaisiin tiloihin. Yleisarvio on, että tietoa on edelleen varsin vaatimattomasti, mikä johtuu maanalaisen tilojen useista erityispiirteistä verrattuna tavanomaisiin maanpäällisiin tiloihin. Vaikka yleisö tuntisikin hyvin maanalaiset tilat, kuten metroasemat, jokapäiväisessä käytössä, ei ihmisillä yleensä ole käsitystä näiden tilojen poistumisjärjestelyistä.

Shields ja Boyce (2004) ovat artikkelissaan tarkastelleet useita viime vuosikymmeninä maanalaisissa tiloissa, lähinnä kuitenkin liikennetunneleissa, tapahtuneita tulipaloja ja tehneet mm. seuraavia johtopäätöksiä:

- Ihmiset eivät usein tiedosta olevansa alttiina välittömälle vaaratilanteelle.
- Turvajärjestelmät ja -laitteet voivat pettää.
- Tulipalo ja savu leviävät nopeasti erityisesti tunneleissa.
- Ihmiset eivät mielellään jätä omaisuuttaan (esim. autoa) poistuakseen paikalta.
- Poistumisreitit tukkeutuvat usein.
- Ihmiset odottavat liian kauan ennen poistumisen aloittamista.
- Erilaiset turvajärjestelmät voivat estää tai haitata poistumista.
- Valvotut maanalaiset tilat ja turvajärjestelmät parantavat henkilöturvallisuutta.
- Loukkuun jääneiden ihmisten pelastaminen voi olla vaikeaa.
- Maanalaisen tilojen suunnittelussa ei ole otettu huomioon riittävän vakavia palotilanteita.

Fraser-Mitchell ja Charters (2005) ovat laatineet kirjallisuuskatsauksen viime vuosikymmenien tunnelipaloissa osallisina olleiden ihmisten käyttäytymisestä tapausten aikana. Nämäkin tapaukset ovat muutamaa metropaloo lukuun ottamatta sattuneet maantie- ja rautatietunneleissa. Kirjoittajat toteavat, että ihmisten käyttäytyminen tunnelipaloissa muistuttaa monilta osin heidän käyttäytymistään tavanomaisissa rakennuspaloissa. Siten tunnelipaloissa voidaan erottaa samat vaiheet kuin rakennuspaloissakin eli havaitsemis-, reagointi- ja siirtymisvaiheet, joiden aikana voi esiintyä monenlaista toimintaa. Koska tunnelipaloissa olosuhteet heikkenevät usein varsin nopeasti, aikaa ja vaihtoehtoja eri toimenpiteitä varten on vähemmän kuin rakennuspaloissa. Ihmiset pyrkivät yleensä siirtymään pois päin liekeistä, vaikka se edellyttäisi kulkemaan savun kautta. Uloskäytävänä käytetään usein pääkulkuaukkoja varsinaisten uloskäytävien sijasta, ellei poistuvia henkilöitä erityisesti opasteta uloskäytävien olemassaolosta. Maantietunnelipaloissa on todettu, että ihmiset eivät mielellään jätä autojaan. Vastaavasti on havaittu, että rautatietunnelipaloissa matkustajat usein ottavat mukaansa matkatavaroita, mikä hidastaa sekä poistumista junasta että liikkumista tunnelissa.

4. Poistumisen laskentamalleista

Useimmat poistumisen laskentamallit ovat tyypiltään pääasiassa deterministisiä, millä tarkoitetaan, että samoilla lähtötiedoilla päädytään aina samaan lopputulokseen. Näissä malleissa poistumassa olevat henkilöt esimerkiksi voidessaan valita useiden eri kulkureittien välillä valitsevat aina lyhimmän tien. Todellisessa tilanteessa henkilöt eivät välttämättä tunne kohdetta riittävän hyvin tietääkseen, mikä on lyhin reitti. Myös monet muut tekijät vaikuttavat reitin valintaan.

Determinististen mallien lisäksi on pyritty kehittämään malleja, joissa eri muuttujia pidetään satunnaismuuttujina ja joissa eri tapahtumat toteutuvat tietyllä todennäköisyydellä. Sekä poistumiseen käytettävissä oleva aika että poistumiseen käytettävä aika ovat satunnaismuuttujia. Malleja varten tarvittavat tiedot voidaan saada osittain tilastotiedoista, joista selviää esimerkiksi se, millä todennäköisyydellä paloilmaisin reagoi palotilanteessa tai palo-ovi teljetään auki-asentoon. Vastaavasti voidaan arvioida todennäköisyys, jolla henkilö valitsee tietyn kulkureitin. Todennäköisyyspohjaisten eli ns. probablististen mallien käyttöä vaikeuttaa käytännössä tarvittavien tilastotietojen puuttuminen. Paloposki *et al.* (2002) ovat tarkastelleet luotettavuusteknisten menetelmien käyttöä poistumislaskentaan ja soveltaneet niitä erään urheiluhallin poistumisturvallisuuden arvioimiseen.

Kaupallisia yleiskäyttöisiä todennäköisyyspohjaisia poistumisen laskentaohjelmia ei tiettävästi ole vielä kehitetty. Saatavissa oleviin tietokonepohjaisiin laskentaohjelmiin, jotka ovat pääasiassa deterministisiä, sisältyy kuitenkin usein joitakin satunnaistekijöitä. Esimerkiksi poistuva henkilö ei aina orjallisesti valitse kaikkein lyhintä reittiä, ja poistuvien henkilöiden liikkuvuuteen ja käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä saatetaan varioida ohjelman eri suorituskerroilla.

Poistumismalleja voidaan jakaa ryhmiin muillakin perusteilla, esimerkiksi sen mukaan, kuinka henkilöryhmien liikkumista on mallinnettu. Vanhimmissa malleissa ihmisjoukon liikkumista rakennuskohteessa kuvattiin hydraulisilla malleilla, joissa liikkuminen on analogista putkistossa tapahtuvan nestevirtauksen kanssa. Näiden yksinkertaisten hydraulisten mallien on kokemukseräisesti todettu vastaavan tyydyttävästi todellista tilannetta poistumistapauksissa, joissa ei esiinny suuria henkilömääriä eikä merkittävää ruuhkautumista. Viimeksi mainituissa tapauksissa hydrauliset mallit eivät toimi oikein, mutta aivan viime vuosina on kehittymässä poistumismalleja, jotka soveltuvat hyvin ruuhkaisten poistumistilanteiden tarkasteluun. Nämä uudemmat ja edelleenkin kehitteillä olevat mallit ovat peräisin liikennevirtojen mallitukseen käytetyistä menetelmistä. Henkilövirtaa ei enää käsitellä nestevirtauksena, vaan henkilöitä tarkastellaan hiukkasina, joiden väliset erilaiset kitkavoimat vaikuttavat henkilöihin ja heidän liikkeisiinsä. Malleja voidaan käyttää myös todellisten paniikkitilanteiden tarkasteluun, joissa on vaarana,

että ihmiset puristuvat kuoliaaksi. Näistä uudemmissa malleista on kirjoittanut suomen kielellä Keski-Rahkonen (2002a).

Vuonna 2005 julkaistiin kaksi laajahkoa katsausta yleisesti saatavissa olevista poistumisen laskentaohjelmista ja -malleista (Kuligowski 2005, Santos & Aguirre 2005). Aikaisemmin on ilmestynyt myös Gwynnen ja Galean (1997) perusteellinen vastaava selvitys tilanteesta viime vuosikymmenen loppupuolella.

4.1 Poistumismallien rajoituksia

Kaikkiin malleihin, yksinkertaisimmasta hydraulisesta mallista monipuolisimpaan käyttäytymismalliin, sisältyy oletuksia, jotka rajoittavat mallin käyttöä tai soveltamisaluetta ja jotka sen vuoksi ovat tärkeitä tuntea. Malleihin sisältyvien rajoitusten lisäksi myös käyttäjien antamat parametriarvot, esimerkiksi henkilön liikkumisnopeuden riippuvuus erilaisista tekijöistä, saattavat aiheuttaa rajoituksia mallien sovellettavuuteen.

Hydraulisten mallien rajoitukset mainittiin edellä, ja ne muuntavatkin poistumisen lähinnä homogeenisen ihmisjoukon siirtymisajan laskemiseksi ja lisäksi yleensä tuottavat liian optimistisia tuloksia. Koska näiden mallien jäljittämä tilanne usein poikkeaa merkittävästi todellisuudesta, tulisi tulosten tulkinnassa noudattaa erityistä varovaisuutta. Käyttäytymismalleihin sisältyy vastaavasti oletuksia, jotka mallien luonteen takia ovat hyvin vaihtelevia.

Sovellettaessa malleja käytännön tapauksiin tulisi tulosten luotettavuutta aina tutkia herkkyyksianalyysin avulla. Herkkyyksianalyysissä varioidaan eri muuttujia ja tutkitaan niiden vaikutusta lopputulokseen. Tällaisella menettelyllä pyritään selvittämään, onko poistumismallin antama tulos vakaa vai voivatko pienetkin lähtötietojen muutokset vaikuttaa olennaisesti lopputulokseen.

Kaikkia olemassa olevia poistumismalleja ei ole riittävästi dokumentoitu, joten niihin liittyviä rajoituksia ei välttämättä tunneta. Seuraavassa on luettelo eräistä keskeisistä tekijöistä, joiden tulisi sisältyä malliin. Vaikka mallissa ei nimenomaisesti ole käsitelty jotain tiettyä tekijää, kyseinen tekijä on kuitenkin sisällytetty malliin, joillakin oletuksilla. Keskeisimmät tekijät ovat seuraavat:

- *Rakennuksen käyttötarkoitus.* Mallin tulisi ottaa huomioon se, mikä vaikutus rakennuksen käyttötarkoituksella on rakennuksessa olevien henkilöryhmien kokoonpanoon. Esimerkiksi lasten ja aikuisten osuudet asuinrakennuksen, hotellin tai toimistorakennuksen käytössä poikkeavat todennäköisesti huomattavasti toisistaan. Mikäli rakennuksessa on liikuntarajoitteisia henkilöitä, ei tapausta voi käsitellä mallilla,

joka olettaa, että henkilöt muodostavat homogeenisen ryhmän. Mallin tulisi myös ottaa huomioon se, että mallin tekemät oletukset henkilöiden käyttäytymisestä ovat sopusoinnussa rakennuksen käyttötarkoituksen kanssa. Asuinrakennuksia varten kehitetyssä mallissa saatetaan esimerkiksi olettaa, että tilat ovat pieniä ja että henkilöt muodostavat perheyhteisöjä. Tällainen malli soveltuu siten huonosti hotelleihin ja erityisesti toimistorakennuksiin, joissa tilat usein ovat avaria eivätkä henkilöt tunne toisiaan erityisen hyvin.

- *Toiminnan vaikutus.* Mallin tulisi ottaa huomioon rakennuksessa olevien henkilöiden toiminnan ja olosuhteiden vaikutukset. Esimerkiksi asuinrakennuksissa useimmat henkilöt ovat päivällä poissa, iltaisin läsnä ja hereillä ja öiseen aikaan vastaavasti läsnä mutta nukkumassa. Toimistorakennuksissa taas on päivällä runsaasti henkilöitä paikalla, jolloin myös mahdolliset palot havaitaan aikaisemmin. Öiseen aikaan paikalla on usein vain vähän ihmisiä, minkä vuoksi palon havaitseminenkin saattaa kestää kauan. Poistumisen havaitsemisaika ja reagointiaika riippuvat selvästi rakennuksessa harjoitettavasta toiminnasta.
- *Ryhmän vaikutus.* Mallin tulisi ottaa huomioon henkilöiden välisten riippuvuussuhteiden vaikutus ihmisten käyttäytymiseen. Jononmuodostuminen ja ruuhkautuminen ovat fysikaalisia ilmiöitä, jotka riippuvat ryhmien koosta, mutta päätöksentekoon liittyy myös erilaisia psykologisia tekijöitä. Esimerkiksi työyhteisössä alaiset saattavat odottaa esimiestensä päätöksiä toimenpiteistä ja niiden käynnistämisestä, vaikka esimiehillä ei välttämättä olisikaan parhaat tiedot kyseisestä palosta tai paloturvallisuudesta yleensä. Perheet pyrkivät poistuessaan liikkumaan yhdessä ja tällöin etenemään hitaimmin liikkuvan perheenjäsenen vauhdilla.
- *Onko rakennus tuttu?* Poistumisteiden valintaan saattaa olennaisesti vaikuttaa se, kuinka hyvin henkilöt sattuvat tuntemaan rakennuksen, josta he joutuvat poistumaan. Tutussa ympäristössä henkilöt voivat usein käyttää tehokkaasti erilaisia olemassa olevia turvallisia poistumisteitä, kun taas vähemmän tutussa ympäristössä henkilöt pyrkivät poistumaan samaa tietä, josta he tulivat rakennukseen. Joissakin malleissa oletetaan, että henkilöt valitsevat aina parhaimman mahdollisen poistumistien. Tämä oletus saattaa päteä asuinrakennuksessa muttei välttämättä pidä paikkaansa hotellissa. Henkilöt tuntevat yleensä oman asuinrakennuksensa paremmin kuin rakennuksen, jossa he työskentelevät. Työpaikkarakennus on vastaavasti paremmin tunnettu kuin rakennukset, joissa vietetään vapaa-aikaa, ja yleensä rakennus, jossa henkilö on aikaisemmin käynyt, on tutumpi kuin rakennus, jossa käydään ensimmäistä kertaa.
- *Yksityiskohtaisuus.* Mallilla, jossa huone muodostaa laskentaverkon yhden solmun, ei kyetä seuraamaan yksilön poistumista kovin yksityiskohtaisesti. Tässä mielessä riittävän yksityiskohtainen malli saattaa puolestaan edellyttää lähtötietoja, joita ei tunneta yhtä yksityiskohtaisesti.

- *Palotilanne.* Mallin tulisi ottaa huomioon ihmisten käyttäytymisen riippuvuus kysymyksessä olevasta palotilanteesta. Esimerkiksi kytevä palo saattaa olla vaikeammin havaittava kuin palo avoliekillä, jolloin poistumisen havaitsemisvaihe ja reagointivaihe vastaavasti saattavat pidentyä. Toisaalta nämä ajat lyhenevät olemattomiin räjähdyskenomaisissa paloissa.

Mallin käyttäjän tulisi tarkastella kriittisesti käyttämäänsä mallia ja siinä tehtyjä oletuksia ja varmistaa, että ympäristöön ja henkilöihin liittyvät oletukset vastaavat mallinnettavaa tapausta. Vasta tällöin voidaan mallin tuloksiin suhtautua riittävän luottavaisesti.

4.2 Poistumisen laskenta käsin

Poistumisen käsilaskentaan soveltuvat menetelmät ovat tyypiltään pääasiassa edellä mainittuja hydraulisia malleja, joissa henkilöiden siirtyminen on analogista nesteen putkivirtausten kanssa. Laskelmissa putkivirtausten virtausvastuksia vastaavat kulkureiteissä ja uloskäytävissä olevat liikkumista hidastavat tekijät, kuten portaat, kapeat käytävät ja oviaukot.

Käsin tehtävissä poistumisaikalaskelmissa valitaan poistumisen havaitsemisvaiheen ja reagointivaiheen pituudet useimmissa tapauksissa taulukoiduista arvoista ja ainoastaan varsinainen fyysinen siirtymisvaihe määritetään laskennallisesti.

Numeerisia laskelmia varten kulkureitit ja uloskäytävät jaetaan usein osiin, joissa määritetään kussakin osassa olevien henkilöiden lukumäärä, sinne saapuvien ja sieltä lähtevien henkilöiden poistumisvauhti sekä saapuvien henkilöiden virta. Laskelmia varten on ensin selvítettävä seuraavat tekijät (Nelson & Mowrer 2002):

- *Henkilömäärä.* Kunkin tilan oletettu suurin henkilömäärä tulee selvittää. Ellei muuta arviota ole käytettävissä, voidaan käyttää erityyppisiä tiloja varten taulukoituja henkilötiheysarvioita.
- *Tehollinen leveys.* Kulkureittien ja uloskäytävien täydestä leveydestä tulee vähentää reunavyöhykkeet, joita ei poistumisessa hyödynnetä. Reunavyöhykkeiden vähennettävät leveydet riippuvat kohteesta esimerkiksi seuraavasti:

portaat	0,15 m
kaidepuut	0,09 m
teattereiden istuimet	0,00 m
käytävät	0,20 m
esteet	0,10 m
ovet	0,15 m.

- *Kulkureitin pituus.* Siirtymiseen käytetty todellinen etäisyys lattiaa ja portaita pitkin rakennuksen jokaisesta kohdasta lähimpään käyttökelpoiseen uloskäytävään. Ellei kaikkien väliseinien ja vastaavien sijaintia varmasti tunneta, voidaan alustavia laskelemia varten kulkureitin pituudeksi määrittää lyhin etäisyys lisättynä 50 %:lla.
- *Poistumisvauhti.* Poistumisvauhti riippuu monista tekijöistä, esimerkiksi henkilöiden ominaisuuksista sekä siitä, onko kyseessä tasainen lattia, portaat vai luiska vai yhtyvätkö useat kulkureitit.

Seuraavassa esitetään kaksi yksinkertaista empiiristä mitoitusmenetelmää, joista ensimmäinen soveltuu tiloihin, joissa on runsaasti ihmisiä ja joissa esiintyy jonkin verran ruuhkaa koko poistumisen ajan. Jälkimmäinen menetelmä soveltuu tiloihin, joissa on vähemmän ihmisiä ja joissa ei esiinny ruuhkaa muualla kuin portaissa ja oviaukoissa.

4.2.1 Esimerkki: Poistumisajan laskeminen ruuhkaisissa tiloissa

Poistumisaikojen laskemiseen erityyppisissä tiloissa, joissa esiintyy jonkin verran ruuhkaa, voidaan käyttää seuraavia yhtälöitä (Nelson & Mowrer 2002):

Poistumisvauhti tasaisella lattialla. Mikäli henkilötiheys on pienempi kuin $0,54 \text{ hlö/m}^2$, käytetään kävelyvauhtina $1,2 \text{ m/s}$. Henkilötiheyden ollessa yli $3,8 \text{ hlö/m}^2$ liikkuminen on erittäin vaikeaa ja vauhti on käytännöllisesti katsoen 0 m/s . Näiden henkilötiheysarvojen välissä vauhti on

$$v = 1,4 \cdot (1 - 0,266 \cdot D) \quad (3)$$

missä v on poistumisvauhti [m/s]
 D on henkilötiheys [hlö/m^2].

Poistumisvauhti portaissa. Poistumisvauhti, joka riippuu henkilötiheydestä sekä portaan askelman etenemän ja nousun suhteesta, on

$$v = k \cdot (1 - 0,266 \cdot D) \quad (4)$$

missä v on poistumisvauhti [m/s]
 k on vakio, $1,00$ – $1,25$ riippuen porrasaskelman noususta ja etenemästä
 D on henkilötiheys [hlö/m^2].

Ominaishenkilövirta. Poistuvien henkilöiden virta tietyn tarkastelukohdan ohi aikayksikköä ja tehollista leveyttä kohden laskettuna on

$$F_s = v \cdot D \quad (5)$$

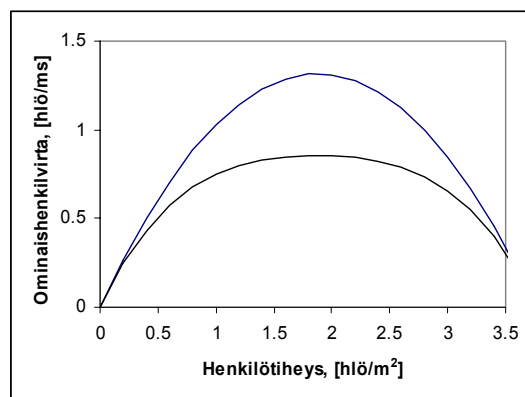
missä F_s on ominaishenkilövirta [hlö/sm]
 v on poistumisvauhti [m/s]
 D on henkilötiheys [hlö/m²].

Yhtälö (5) voidaan myös esittää seuraavassa muodossa, joka saadaan sijoittamalla yhtälö (4) yhtälöön (5):

$$F_s = k \cdot (1 - 0,266 \cdot D) \cdot D \quad (6)$$

missä merkinnät ovat samat kuin edellä.

Yhtälöstä (6) ilmenee, että ominaishenkilövirran ja henkilötiheyden välinen riippuvuus noudattaa toisen asteen yhtälöä, mikä on myös havaittu ihmisjoukoilla tehdyissä poistumiskokeissa. Henkilötiheyden ylittäessä tietyn arvon (n. 1,5–2 hlö/m²) poistumisvauhti pienenee, kunnes liike pysähtyy lähes kokonaan viimeistään tiheyden lähestyessä arvoa 5 hlö/m². Kuva 2 esittää yhtälön (6) mukaisen ominaishenkilötiheyden riippuvuuden henkilötiheydestä. Ylempi käyrä esittää poistumista tasaisella alustalla ($k = 1,4$) ja alempi portaissa, jossa kerroin $k = 1,0$.



Kuva 2. Ominaishenkilövirran riippuvuus henkilötiheydestä poistumisen aikana. Ylempi käyrä kuvaa poistumista tasaisella alustalla ja alempi portaissa, joiden askelman nousu on 20 cm ja etenemä 25 cm.

Laskettu henkilövirta. Poistuvien henkilöiden kokonaisvirta tietyn kohdan ohi on

$$F_c = F_s \cdot W_e \quad (7)$$

missä F_c on laskettu henkilövirta [hlö/s]
 F_s on ominaishenkilövirta [hlö/sm]
 W_e on tehollinen leveys [m].

Ominaishenkilövirran F_s maksimi-arvo on 1,3 hlö/sm vaakatasossa, luiskissa ja ovissa. Maksimivauhti v vastaavissa tiloissa on 1,2 m/s. Portaiden osalta vastaavat maksimi-arvot vaihtelevat välillä 0,95 ja 1,15 hlö/sm sekä 0,85 ja 1,05 m/s porraskaskelmien muodon mukaan (vrt. myös kuva 2). Jos laskelmissa saadaan ominaishenkilövirralle tai poistumisvauhdille näitä arvoja suurempia lukuja, tulee laskelmissa käyttää annettuja maksimi-arvoja.

Ohitusaika. Ryhmä poistuvia henkilöitä tarvitsee seuraavan ajan ohittaakseen tietyn tarkastelukohdan:

$$t = N / F_c \quad (8)$$

missä	t	on ohitusaika [s]
	N	on henkilöiden lukumäärä [hlö]
	F_c	on laskettu henkilövirta [hlö/s].

Siirtymisaika. Henkilö tarvitsee seuraavan ajan siirtyäkseen tietyn matkan:

$$t = L / v \quad (9)$$

missä	t	on siirtymiseen tarvittava aika [s]
	L	on siirryttävä matka [m]
	v	on poistumisvauhti [m/s].

Kulkureittien muutoskohdat. Edellä lueteltujen yhtälöiden avulla on jo mahdollista laskea yksinkertaisia poistumistapauksia. Käytännössä kulkureitteihin sisältyy kuitenkin ”muutoskohtia”, joissa kulkureitin leveys muuttuu tai henkilövirrat yhtyvät tai jakautuvat. Muutoskohdassa pätee yleisesti

$$\sum F_c(in) = \sum F_c(out) \quad (10)$$

missä	$F_c(in)$	on muutoskohtaan saapuva laskettu henkilövirta [hlö/s]
	$F_c(out)$	on muutoskohdasta lähtevä laskettu henkilövirta [hlö/s].

Yhtälöstä (10) seuraa mm., että kapeassa käytävässä kävelyvauhti kasvaa. Kävelyvauhdilla on kuitenkin reitin tyypistä riippuva maksimi-arvo, jonka johdosta syntyy ruuhkaa. Tällöin yhtälö (10) ei päde, ja poistuvia henkilöitä jää siten reitin varrelle. Jonossa olevien henkilöiden määrä voidaan laskea yhtälöstä

$$N_{jono} = [F_c(in) - F_c(out)] \cdot t \quad (11)$$

missä	N_{jono}	on jonossa olevien henkilöiden lukumäärä [hlö]
	$F_c(in)$	on muutoskohtaan saapuva laskettu henkilövirta [hlö/s]
	$F_c(out)$	on muutoskohdasta lähtevä laskettu henkilövirta [hlö/s]
	t	on aika, jolloin henkilöitä tulee muutoskohtaan [s].

Yhtälön (11) muuttuja $F_c(out)$ voidaan puolestaan laskea yhtälöstä

$$F_c(out) = v_{\max} \cdot D \cdot W_e \quad (12)$$

missä	$F_c(out)$	on muutoskohdasta lähtevä laskettu henkilövirta [hlö/s]
	v_{\max}	on edellä mainittu maksimikävelyvauhti, jota ei saa ylittää [m/s]
	D	on henkilötiheys [hlö/m ²]
	W_e	on tehollinen leveys [m].

4.2.2 Esimerkki: Poistumisajan laskeminen ruuhkattomissa tiloissa

Menetelmä soveltuu vain yksinkertaisiin poistumistapauksiin, joissa henkilövirratt eivät kohtaa tai jakaannu. Tässä menetelmässä poistumisaika jaetaan esteettömään poistumisaikaan U sekä jonotusaikaan ovissa F ja portaissa K (NKB 1994).

Poistuminen on esteetöntä silloin, kun poistuvia henkilöitä on niin vähän, ettei poistumisaika pitene ruuhkautumisen tai jonon muodostumisen takia. Kulkureitti jaetaan vaakasuoraan ja pystysuoraan osaan. Poistumisnopeus vaakasuorassa osassa LR on vakio ja sen arvo on yleensä 1,27 m/s. Pystysuora poistumisnopeus VR riippuu portaikon askelmien muodosta ja saavuttaa maksimiarvon 0,21 m/s, kun askelman etenemä $T = 0,28$ m ja nousu $R = 0,18$ m. Portaiden mittojen poiketessa näistä arvoista korjataan pystysuora poistumisnopeus kertoimella $1,25\sqrt{(R/T)}$.

Esteetön poistumisaika lasketaan yhtälöllä

$$U = \frac{L}{LR} + \frac{1,25 \cdot V}{VR} \cdot \sqrt{\frac{R}{T}} \quad (13)$$

missä	U	on esteetön poistumisaika [s]
	L	on vaakasuora poistumismatka [m]
	LR	on vaakasuora poistumisnopeus [m/s]
	V	on pystysuora poistumismatka [m]
	VR	on pystysuora poistumisnopeus [m/s]
	R	on portaan askelman nousu [m]
	T	on portaan askelman etenemä [m].

Jonotusaika ovissa on

$$F = \frac{P}{B \cdot W} \quad (14)$$

missä	F	on jonotusaika ovessa [s]
	P	on poistuvien henkilöiden lukumäärä [hlö]
	B	on ominaishenkilövirta ovessa [hlö/sm] (yleensä $B = 1$ hlö/sm)
	W	on oviaukon tehollinen leveys [m].

Jonotusaika portaissa on

$$K = \frac{P}{B \cdot (W - 0,3)} \quad (15)$$

missä	K	on ruuhka-aika portaassa [s]
	P	on poistuvien henkilöiden lukumäärä [hlö]
	B	on ominaishenkilövirta portaassa [hlö/sm] (yleensä $B = 1$ hlö/sm)
	W	on portaan tehollinen leveys [m].

Jos kulkureitissä on useita ovia tai portaita, otetaan huomioon ainoastaan pisin yksittäisistä jonotusajoista.

Kokonaispoistumisaika on esteetön poistumisaika U , johon lisätään suurempi arvo jonotusajoista F tai K :

$$T = U + \max \begin{cases} F \\ K \end{cases} \quad (16)$$

missä	T	on kokonaispoistumisaika [s]
	U	on esteetön poistumisaika [s]
	F	on ruuhka-aika ovessa [s]
	K	on ruuhka-aika portaassa [s].

4.3 Poistumisen laskeminen tietokoneohjelmilla

Poistumisen laskennallista arviointia varten on nykyään olemassa useita kymmeniä erilaisia laskentamalleja sekä suuri joukko yleisesti saatavissa olevia kaupallisia tietokoneohjelmia. Mikään näistä ohjelmista ei ole yleiskäyttöinen, kaikkiin ajateltavissa oleviin kohteisiin soveltuva työkalu. Jokaiseen malliin ja ohjelmaan sisältyy jonkinasteisia oletuksia, jotka rajoittavat niiden käyttöä esimerkiksi vain tiettyntyyppisiin tai -kokoisiin

kohteisiin. Valittaessa käytettävää mallia tai ohjelmaa on siten tarkoin selvitettävä niiden soveltamisalue ja niihin liittyvät rajoitukset. Kuten edellä esitettiin, soveltuvat jotkin käsilaskentaan tarkoitetut mallit esimerkiksi vain tapauksiin, joissa poistumisen yhteydessä ei esiinny jononmuodostumista, kun taas toiset edellyttävät, että poistuminen on ruuhkaista. Tietokoneohjelmiin sisältyy usein rajoituksia rakennuksen koon suhteen, tai ne on tarkoitettu vain tiettyjen kohteiden tarkasteluun, esimerkiksi sairaaloita tai lentokoneita varten. Tietokoneen kapasiteettiin liittyvät ominaisuudet, kuten koneen keskusmuistin määrä ja prosessoriteho, ovat usein myös merkittäviä ohjelmien käyttöä rajoittavia tekijöitä.

Gwynne ja Galea (1997) ovat jakaneet olemassa olevat poistumismallit karkeasti kolmeen ryhmään: optimointimalleihin, simulointimalleihin ja riskinarviointimalleihin. Optimointimalleissa oletetaan, että henkilöt poistuvat rakennuksesta mahdollisimman nopeasti ilman minkäänlaista muuta oheistoimintaa. Kulkureitit ja virtausominaisuudet valitaan siten, että poistumisaika tulee mahdollisimman lyhyeksi. Nämä mallit käsittelevät yleensä suuria ihmisjoukkoja, eikä niissä oteta huomioon yksilöllistä käyttäytymistä. Simulointimalleilla pyritään puolestaan jäljittelemään ihmisten käyttäytymistä ja liikkumista poistumistilanteissa mahdollisimman tarkoin. Nämä mallit poikkeavat toisistaan usein merkittävästi erityisesti henkilöiden käyttäytymisen mallinnuksen osalta. Riskinarviointimalleilla pyritään tunnistamaan palon tai siihen liittyvän tapahtuman aiheuttamat poistumiseen liittyvät vaarat sekä kvantifioimaan kyseiset riskit. Toistamalla laskelmat lukuisia kertoja voidaan selvittää tilastollisesti merkittävät vaihtelut, jotka aiheutuvat rakenteellisista tai palontorjuntatoimenpiteisiin kohdistuvista muutoksista.

Poistumisen laskemiseen kehitetyissä tietokoneohjelmissa jaetaan yleensä rakennus elementteihin tai soluihin ja liikkeet tapahtuvat näiden solmujen (*nodes*) välisiä säikeitä (*arcs*) pitkin. Näin muodostuneita solmuverkkoja Gwynne ja Galea (1997) jakavat kahteen päätyyppiin: karkeat verkot ja hienot verkot. Vanhimmissa liikkumismalleissa yksi solmu saattaa edustaa kokonaista huonetta, jolloin verkon muodostaminen suuremman rakennukseen on kohtalaisen yksinkertaista (karkea verkko). Uudemmissa malleissa rakennusten lattiapinta voi puolestaan olla jaettu esimerkiksi 25 cm × 25 cm tai 50 cm × 50 cm kokoisiin ruutuihin, joista kukin vastaa yhtä solmua (hieno verkko). Liikkeiden simuloiminen näin tiheässä verkossa voidaan tehdä varsin tarkasti, mutta suurten kohteiden laskeminen saattaa vaatia merkittävää laskentakapasiteettia – esimerkiksi 1 000 m² tilassa voi olla 16 000 solmua, joita yhdistää kymmeniä tuhansia säikeitä.

Laskentamalleissa poistuvia ihmisiä tarkastellaan joko yksilöinä tai ryhmänä. Yksilöllisessä tarkastelutavassa kullekin henkilölle voidaan usein määrittää yksilölliset ominaisuudet tai ne voidaan antaa satunnaisesti poistuville henkilöille. Nämä ominaisuudet vaikuttavat eri tavalla henkilön käyttäytymiseen ja liikkumiseen poistumisen aikana. Näissä malleissa laskelmat tehdään yksilön tarkkuudella mutta niihin voidaan myös

sisällyttää ryhmän käyttäytymistä kuvaavia tekijöitä. Ryhmätarkastelutapaa esiintyy erityisesti vanhemmissa malleissa. Niissä kaikilla henkilöillä on samat ominaisuudet ja laskelmat tehdään vain ihmisjoukon tarkkuudella.

Suurimmat erot eri mallien välillä näkyvät siinä, miten henkilöiden käyttäytyminen on otettu huomioon. Yksinkertaisimmissa malleissa ei henkilöiden käyttäytymistä ole lainkaan otettu huomioon (ei käyttäytymissäantöjä). Tällaiset mallit ovat puhtaita liikkumismalleja, ja liikkumiseen vaikuttavat ainoastaan ulkoiset fyysiset tekijät. Seuraavan ryhmän muodostavat käyttäytymismallit, jotka perustuvat toiminnallisiin analogioihin (toiminnalliset analogiamallit). Niissä sovelletaan tiettyjä käyttäytymistä kuvaavia yhtälöitä kaikkiin poistuviin henkilöihin, jolloin ne kaikki toimivat samalla tavalla. Nämä yhtälöt voivat perustua täysin toisiin tieteenaloihin kuin käyttäytymistieteeseen. Moniin menetelmiin sisältyy erilaisia käyttäytymissäantöjä, joihin ei ohjelman käyttäjä mitenkään pysty vaikuttamaan (sisäänrakennetut käyttäytymissäännöt). Useimpiin malleihin sisältyy kuitenkin selkeästi määriteltyjä käyttäytymissäantöjä (käyttäytymissäantömallit). Niihin saattaa esimerkiksi sisältyä sääntö, joka toteaa: ”Jos henkilö on savun täyttämässä tilassa, hän poistuu lähimmän käyttökelpoisen uloskäytävän kautta.” Viimeisimmän ryhmän muodostavat tekoälyyn perustuvat mallit (tekoälymallit). Niissä yksilöt on ohjelmoitu jäljittelemään ihmisen käyttäytymistä mahdollisimman tarkoin.

Esimerkkinä tietokoneohjelmista tarkastellaan seuraavassa hieman lähemmin erästä Suomessakin yleisesti käytettyä poistumisen mitoitukseen käytettyä tietokoneohjelmaa ja sen ominaisuuksia.

4.3.1 Esimerkki: Poistumisen laskentaohjelma *Simulex*

Simulex (Thompson & Marchant 1995a) on 1990-luvun puolivälissä kehitetty tietokone-malli, 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 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 poistumiskokeissa saatuihin kokeellisiin tuloksiin, jolloin niiden on todettu olevan hyvässä sopusoinnussa keskenään (Thompson & Marchant 1995b).

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 nopeudellaan 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 $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ solmuverkon pohjapiirustuksen päälle sekä laskee lyhimmän reitin 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 $0,8$ ja $1,7 \text{ m/s}$, ja kunkin henkilön liikkeellelähtösuunnalla on myös satunnainen alkuarvo. Henkilön liikkumisnopeus portaissa alaspäin on $0,5$ kertaa esteetön liikkumisnopeus ja ylöspäin vastaavasti $0,35$ kertaa. Ohjelma on täysin graafinen, ja kuvaruudulta voidaan havainnollisesti seurata evakuoinnin edistymistä. Kuvassa 3 on esimerkki *Simulex*-ohjelman näytöstä simuloinnin aikana.

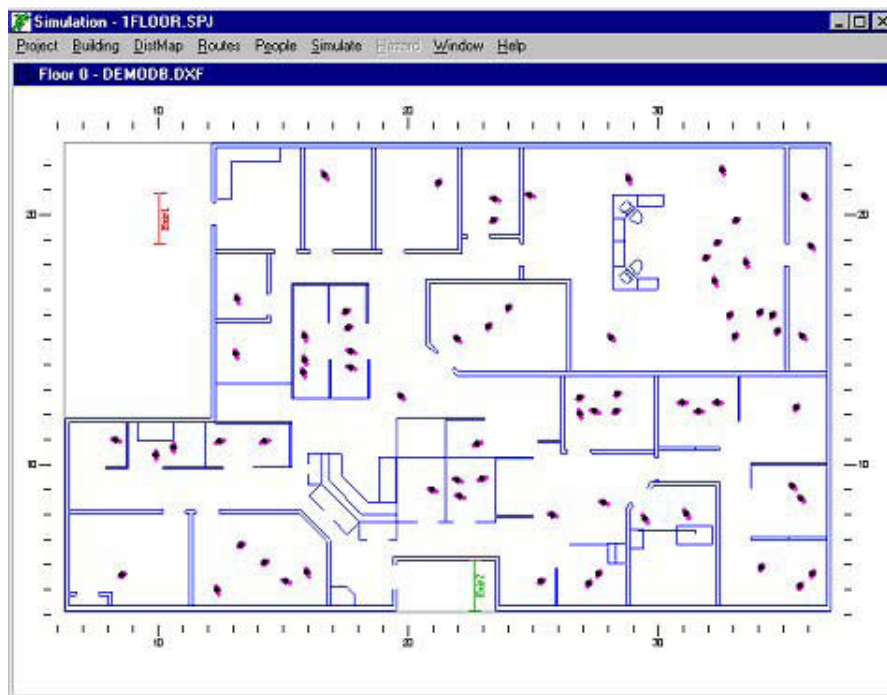
Simuloinnin aika-askelen pituus on $0,1 \text{ s}$, jossa ajassa nopeinkin kävelijä siirtyy vain $0,17 \text{ m}$. Jokaisen aika-askelen kohdalla määritetään kunkin henkilön sijainti ja etäisyydet toisiin henkilöihin tai esteisiin, minkä perusteella lasketaan seuraavaa liikettä varten tarvittavat parametrit.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

Mallissa otetaan huomioon henkilöiden välisen etäisyyden vaikutus liikkumisnopeuteen. Jos henkilöiden liikesuunnat ja -nopeudet ovat sopivat, toinen henkilö voi ohittaa toisen, minkä jälkeen ohittavan henkilön nopeus taas kasvaa. Ohitusalgoritmia ei käytetä, jos henkilötiheys on yli 2 hlö/m^2 . Mikäli henkilö törmää kiinteään esteeseen, hänen suuntaansa muutetaan siten, että hänen olkapäänsä etäisyys seinästä on vähintään 50 mm .

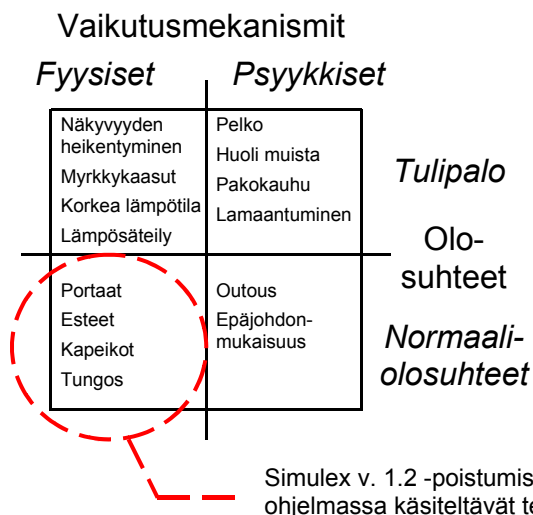
VTT:n käyttämä *Simulex*-ohjelman versio (1.2) käsittelee ainoastaan liikkumiseen vaikuttavia fyysisiä tekijöitä normaaliolosuhteissa, kuten portaiden, esteiden, kapeikkojen ja tungoksen vaikutusta liikkumiseen. Liikkumiseen vaikuttaa useita muitakin tekijöitä, joita mallissa ei oteta huomioon, kuten kuvan 4 esittämistä poistumisen vaikutusmekani-

nismeista voidaan nähdä. Ohjelman uudempiin versioihin ja eräisiin toisiin poistumisen laskentaohjelmiin sisältyy mahdollisuus ottaa huomioon myös joitakin nyt puuttuvia tekijöitä.

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 kierrettävissä siten, että ohjelmalla voidaan määritellä, minkä uloskäytävän kautta yksittäinen henkilö tai tietty henkilöryhmä poistuu.



Kuva 3. SIMULEX-ohjelman näyttö poistumissimuloinnin aikana.



Kuva 4. 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 (Paloposki et al. 2002).

4.4 Savun, palamiskaasujen ja lämmön vaikutusten arviointi ihmisten poistumismahdollisuuksiin

Kaikissa tulipaloissa muodostuu savua, erilaisia kaasumaisia palamistuotteita ja lämpöä. Ihmisen altistuessa palon ja siitä syntyvien kaasujen ja savun vaikutuksille voi niistä aiheutua sekä fysiologisia että psykologisia seurauksia, jotka merkittäväällä tavalla saattavat vaikuttaa ihmisten poistumisedellytyksiin.

Poistumisen onnistuminen riippuu suurelta osin siitä, kuinka henkilö on mieltänyt tilanteen, jossa hän kulloinkin on. Savun ja liekkien näkeminen, kuumuuden tunteminen sekä silmien ja ylempien hengityselinten ärsytys luovat yhdessä henkilölle käsityksen vallitsevasta tilanteesta, mikä edelleen vaikuttaa esimerkiksi kulkureitin valintaan tai siihen, ryhtyykö henkilö lainkaan poistumaan. Tässä mainittujen psykologisten tekijöiden vaikutusten arvioiminen on erittäin vaikeaa, eikä vaikutuksia yleensä pystytä mallintamaan kvantitatiivisesti.

Tulipalossa muodostuu lukuisia palamistuotteita, jotka myös vaikuttavat ihmisten poistumismahdollisuuksiin. Savusta johtuva näkyvyyden heikkeneminen vaikuttaa ihmisen kykyyn nähdä ja hahmottaa kulkureitit. Tämä on myös voitu osoittaa kokeellisesti siten, että savun tiheyden lisääntyessä ihmisten liikkumisnopeus alenee. Eri aistien ja ylempien hengityselinten ärsytys yleensä vielä pahentaa savun haittavaikutuksia, mikä edelleen vähentää liikkumisnopeutta, kykyä suoriutua fyysisiä ponnistuksia vaativista tehtävistä sekä kykyä hahmottaa poistumisreittejä. Tukahduttavat myrkylliset aineet vaikuttavat

keskushermostoon, mikä voi johtaa aistiharhoihin, sekavuuteen, fyysisten voimien heikkenemiseen, motoriikan häiriintymiseen, tajuttomuuteen ja ääritapauksissa kuolemaan. Kuumuus voi puolestaan aiheuttaa lämpöhalvauksen, hypertermiaa sekä palovammoja iholla tai hengitystiehyeissä. Yhteensä nämä tekijät voivat merkittävästi haitata tai jopa estää ihmisten poistumisen palokohteesta.

Tässä luvussa esitetyt tiedot perustuvat mm. Purserin (1995), Hartzellin (2001), Curtatin (1996) ja Babrauskasin *et al.* (1991) julkaisuihin sekä kansainvälisen standardisointijärjestön ISO:n julkaisuihin ISO/TR 13387-4 (1999), ISO 13344 (2004) ja ISO/TS 13571 (2002).

4.4.1 Savun muodostuminen ja savun vaikutukset

Tulipaloissa erilaisista palavista aineista, kuten palavista rakenteista, eristeistä, pinnoitteista, asennuksista, sisusteista ja huonekaluista, kehittyvän savun määrä riippuu useista tekijöistä. Aineen kemiallinen koostumus on eräs tärkeä tekijä. Monet puhtaat aineet, kuten hiilimonoksidi, formaldehydi ja metanoli, eivät kehitä lainkaan näkyvää savua, jos ne palavat riittävässä ilmamäärässä. Toisista orgaanisista aineista kehittyy puolestaan runsaasti savua vastaavissa olosuhteissa. Happipitoiset orgaaniset nesteet, kuten alkoholit, kehittävät vähemmän savua kuin vastaavat puhtaat hiilivedyt. Tyydyttymättömien hiilivetyjen kehittämän savun määrä on suurempi kuin tyydytettyjen hiilivetyjen. Vastaava havainto pätee myös kiinteillä aineilla. Happipitoinen polttoaine, kuten puu, kehittää palaessaan vähemmän savua kuin esimerkiksi hiilivety pohjainen polyeteeni. Aromaattisista yhdisteistä, esimerkiksi polystyreenistä, kehittyy erityisen runsaasti savua. Palosuoja-aineet kasvattavat usein tuotteista kehittyvän savun määrää verrattuna suojaamattomaan tuotteeseen. Toisaalta tuotteet palavat huonommin, mikä osittain kompensoi lisääntyntä savua.

Myös ympäristötekijöillä on suuri vaikutus kehittyvän savun määrään. Kokeellisesti on voitu osoittaa, että esimerkiksi lämpösäteily, happipitoisuus, ilmanvaihto sekä palavan esineen geometria ja suunta vaikuttavat savunkehitykseen. Koska nämä tekijät riippuvat myös palon vaiheesta, on savun kehittyminen yleensä hyvinkin erilaista ennen lieskahdusta ja sen jälkeen. Savunkehittymistä arvioitaessa on lisäksi otettava huomioon palamisnopeus ja palavan alueen pinta-ala. Vaikka tuote kehittäisikin vain vähän savua pinta-alayksikköä kohti, saattaa savun määrä kuitenkin muodostua huomattavaksi palon leviessä laajan pinnan yli. Pienillä happipitoisuuksilla savun kehittyminen kasvaa usein merkittävästi.

Palamisprosessi vaikuttaa luonnollisesti myös savun kehittymiseen, koska savua muodostuu lähinnä epätäydellisen palamisen tuloksena. Kytevässä palamisessa vapautuu

erilaisia haihtuvia aineita, jotka sekoittuessaan kylmän ilman kanssa tiivistyvät pallomaisiksi pisaroiksi, jotka näkyvät vaaleana savuaerosolina. Liekehtivässä palamisessa kehittyy puolestaan mustaa, hyvin epäsäännöllisistä hiilipitoisista hiukkasista muodostuvaa savua. Savuhiukkaset muodostuvat kaasufaasisissa alueissa, joissa happipitoisuus on riittävän pieni epätäydellistä palamista varten. Esimerkiksi selluloosapohjaisista aineista kehittyy kytevässä palossa selvästi enemmän savua kuin liekehtivässä palamisessa, ja ilmanvaihdon rajoittaessa palamista kehittyvän savun määrä kasvaa merkittävästi. Ajan kuluessa savuhiukkasten koko kasvaa niiden törmätessä ja tarttuessa toisiinsa.

Savun aiheuttama näkyvyyden heikkeneminen johtuu valon absorptiosta savuhiukkasiin sekä valon siroamisesta hiukkasista. Käytännössä näkyvyyden mittana käytetään usein etäisyyttä, jolla tietty kohde ei enää ole näkyvissä. Tavallisimmat tekijät, joilla savuntiheyttä kuvataan, ovat savun optinen ominaistiheys OD ja vaimennuskerroin k . Useimmat kirjallisuudessa ilmoitetut eri aineiden savunkehittymistä kuvaavat ominaisuudet on mitattu pienikokoisissa laboratoriotestilaitteissa. Valitettavasti näiden koetulosten ja todellisia tilanteita jäljittelevien täyden mittakaavan kokeiden tulosten välillä ei ole selkeää riippuvuutta.

Jin (1978, 1981, 1985 yhdessä Yamadan kanssa) on klassisissa tutkimuksissaan havainnut, että näkyvyyden ja savuntiheyden (vaimennuskertoimen k) tulo on lähes vakio, riippuen mm. valaisevan kohteen tyypistä seuraavasti:

- valaiseva kohde (*light-emitting source*): $k \cdot V = 8$
- heijastava kohde (*reflecting light source*): $k \cdot V = 3$
- lattiat ja katot (yleinen näkyvyys): $k \cdot V = 2$

missä k on vaimennuskerroin [m^{-1}] ja V näkyvyys [m].

Jinin tutkimuksessa on myös selvitetty savua sisältävässä tilassa liikkuvien ihmisten kävelynopeuden riippuvuutta näkyvyydestä ja savun laadusta (väri, ärsyttävyys jne.). Näitä tuloksia on hyvin yleisesti käytetty uloskäytävien ja poistumisreittien toiminnallisuudessa mitoituksessa.

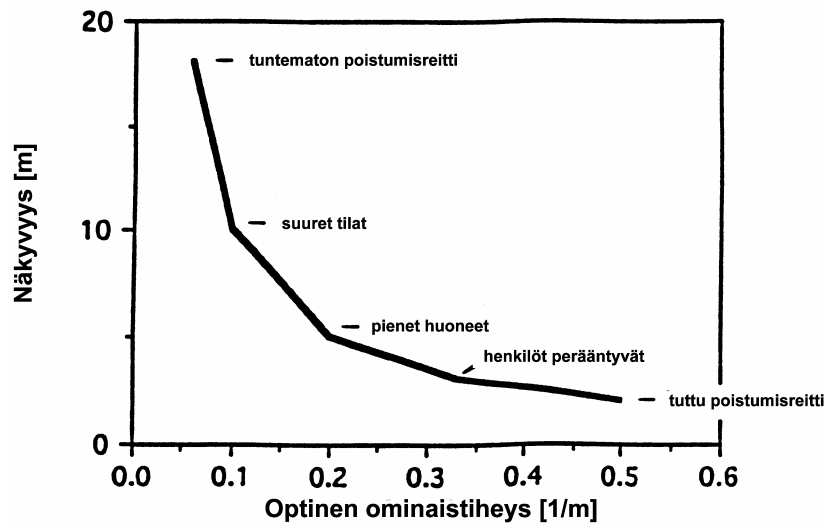
Frantzich ja Nilsson (2003) ovat äskettäin pyrkineet omissa tutkimuksissaan varmistamaan Jinin havaintoja. Tutkimuksissa käytettiin selvästi sankempaa savua kuin Jinin kokeissa, joten tulosten täydellistä vastaavuutta ei voitu saada aikaan. Tulosten trendit olivat kuitenkin täysin samat.

Jin (2002) on edelleen esittänyt arvioita suurimmista savuntiheysarvoista, joissa poistuminen vielä on mahdollista (*maximum allowable smoke density*). Hänen arvionsa riippuvat siitä, kuinka hyvin henkilöt tuntevat tilat, josta he poistuvat (V on näkyvyys):

- tunnettu tila: $k = 0,5 \text{ m}^{-1}$ $V = 4 \text{ m}$
- tuntematon tila: $k = 0,15 \text{ m}^{-1}$ $V = 13 \text{ m}$.

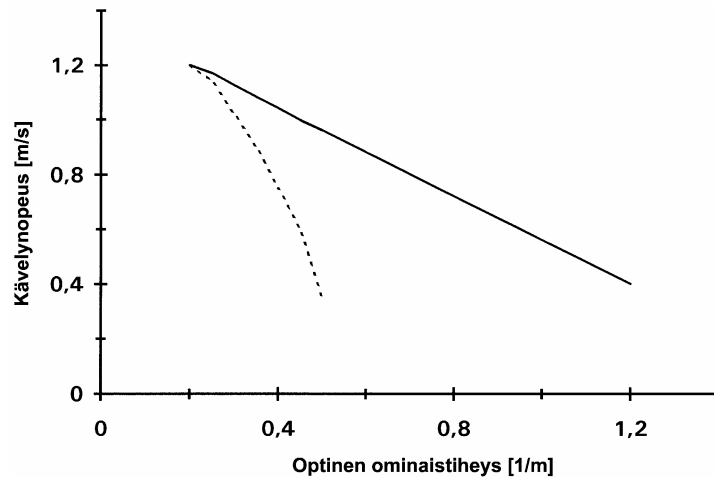
Jensen (1993) arvioi, että vasta savuntiheyden olleessa yli $k = 3,5 \text{ m}^{-1}$, mikä vastaa alle 1 m näkyvyyttä, ei poistuminen enää ole mahdollista (*survival limit*).

Kokeellisesti on osoitettu, että savusta johtuva näkyvyyden heikkeneminen riippuu lähinnä vain savun pitoisuudesta eikä esimerkiksi altistusajan pituudesta. Edelleen on havaittu, että näkyvyyden heikkeneminen on hyvin yksilöllistä. Poistumisen kannalta ovat kuitenkin tilan koko ja tilojen tunteminen monissa tapauksissa tärkeämpiä kuin pelkkä näkyvyysarvo. Kuvassa 5 esitetään poistumisen kannalta näkyvyyden vähimmäisvaatimus sekä sitä vastaava optinen ominaistiheys tunnettavuudeltaan erilaisissa tiloissa.



Kuva 5. Näkyvyyden ja optisen ominaistiheyden välinen riippuvuus erityyppisissä poistumisreiteissä. Kriittinen savuntiheys riippuu tilan koosta ja tunnettavuudesta (Jin 1978).

Kuvassa 6 esitetään ärsyttävän ja ei-ärsyttävän savun vaikutukset poistuvien henkilöiden kävelynopeuteen.



Kuva 6. Savuntiheyden vaikutus henkilöiden poistumisnopeuteen (katkoviiva vastaa silmiä ärsyttävää savua ja yhtenäinen viiva savua, joka ei ärsytä silmiä) (Jin 1978).

Frantzich (1994) mainitsee, että joistakin rakennustarvikkeista ja sisustusmateriaaleista palossa kehittyvän savun määrä (savupotentiaali) on pyritty selvittämään kokeellisilla tutkimuksilla. Kirjoittaja korostaa kuitenkin, että tätä alaa ei ole riittävästi tutkittu ja mittauksissa saadaan usein toisistaan huomattavasti poikkeavia arvoja sen mukaan, kuinka mittaukset tehdään.

4.4.2 Myrkyllisten palamiskaasujen muodostuminen

Tulipaloissa syntyvien myrkyllisten kaasujen koostumus riippuu paitsi palavasta aineesta myös palo-olosuhteista. Koska palaminen on luonteeltaan hapettumisprosessi, orgaaniset yhdisteet muuttuvat erilaisiksi hapettuneiksi yhdisteiksi ilmanvaihdon tai hapensaannin mukaan. Orgaaniset yhdisteet hapettuvat aldehydeiksi, orgaanisiksi hapoiksi, hiilimonoksidiksi (CO) ja hiilidioksidiksi (CO₂). Palamiskaasujen hiilimonoksidi- ja hiilidioksidipitoisuuksien suhde, jota usein käytetään palon luonteen kuvaamiseen, riippuu enemmän ilmanvaihto-olosuhteista kuin palavien aineiden koostumuksesta.

Syaanivedyn (HCN) muodostuminen palossa riippuu palavasta materiaalista, koska sitä voi syntyä ainoastaan typpipitoisten aineiden palaessa. Tämän lisäksi syaanivedyn muodostuminen riippuu palamislämpötilasta siten, että korkeissa lämpötiloissa muodostuu enemmän syaanivetyä. Jos happea on riittävästi läsnä, voi myös muodostua pieniä määriä typen oksideja (NO_x).

Halogeenipitoisista eli fluori-, kloori- tai bromipitoisista muoveista kehittyä palaessa halogeenivetyhappoja (HF, HCl ja HBr). Nämä hapot muodostuvat palamisprosessin pyrolyysivaiheessa, eivätkä ne enää hapetu. Halogeenivetyjä muodostuu siten myös kyteivissä paloissa.

Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidia eli häkää muodostuu sekä kytevässä että liekehtivässä palossa. Sen muodostuminen kytevässä palossa on hyvin monimutkainen prosessi, eikä sitä tunneta kvantitatiivisesti vielä riittävän hyvin. Hiilimonoksidin muodostuminen liekehtivässä palossa riippuu voimakkaasti hapen saannista. Hapensaantia voi rajoittaa joko tuloilman alentunut happipitoisuus tai alentunut tilavuusvirtaus. Hiilimonoksidin muodostumisen arvioimiseksi käytetään usein apuvälineenä palavan aineen ja ilman ekvivalenssisuhdetta ϕ :

$$\phi = \frac{(kg_{\text{palava aine}} / kg_{\text{ilma}})}{(kg_{\text{palava aine}} / kg_{\text{ilma}})_{\text{stök}}} \quad (17)$$

Yhtälössä (17) tarkoitetaan alaviitteellä ”stök” ns. stökiometristä suhdetta, jossa palavan aineen ja hapen välinen suhde on sellainen, että se riittää palavan aineen täydelliseen palamiseen ilman ylimääräistä happea. Siten, jos $\phi = 1$, vallitsee palavan aineen ja ilman välillä stökiometrinen suhde. Jos $\phi < 1$, tarkoittaa se, että palon ilmanvaihto on hyvä, kun taas jos $\phi > 1$, palon ilmansaanti on rajoitettu. Jälkimmäiset olosuhteet edistävät hiilimonoksidin muodostumista.

Tutkimuksissa on todettu, että paloissa, joissa on runsas ilmanvaihto ($\phi \ll 1$), muodostuu hyvin vähän hiilimonoksidia. Määrät pysyvät pieninä, kunnes ϕ saavuttaa arvon noin 0,5. Tätä suuremmilla arvoilla muodostuvan hiilimonoksidin määrä kasvaa nopeasti ϕ :n kasvaessa ja vakiintuu useimmilla aineilla välille 0,1 ja 0,2 $kg_{CO}/kg_{\text{palavaa ainetta}}$ ekvivalenssisuhteen ϕ ollessa hieman yli 1. Huonepalokokeissa on havaittu, että lieskahdus tapahtuu yleensä suunnilleen samoihin aikoihin, kun ϕ saavuttaa arvon 0,5, jota suuremmilla arvoilla hiilimonoksidin muodostuminen alkaa kasvaa merkittävästi. Lieskahduksen aikana hiilimonoksidin muodostuminen kasvaa huomattavasti myös, koska se riippuu palamisnopeudesta, joka lieskahduksen tapahtuessa kasvaa olennaisesti. Havaittu hiilimonoksidin muodostumisen kasvaminen lieskahduksen tapahtuessa johtuu siten kahdesta syystä: palaminen muuttuu ilmanvaihtorajoitteiseksi ja palamisnopeus kasvaa merkittävästi.

Palamisen ekvivalenssisuhteen ϕ ollessa yli 1 hiilimonoksidin muodostuminen pysyy kohtalaisen vakaana, ja muodostumisnopeus riippuu siten lähinnä palamisnopeudesta. Hiilimonoksidin muodostumisnopeus voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{m}_{CO} = f_{CO} \cdot \dot{m}_{\text{palava aine}} \quad (18)$$

missä f_{CO} on hiilimonoksidin muodostuminen [$kg_{CO}/kg_{\text{palavaa ainetta}}$]
 \dot{m}_{CO} on hiilimonoksidin muodostumisnopeus [kg_{CO}/s]
 $\dot{m}_{\text{palava aine}}$ on palavan aineen palamisnopeus [$kg_{\text{palavaa ainetta}}/s$].

Hiilimonoksidin muodostumisnopeus tilavuusyksikköinä on

$$\dot{V}_{CO} = \dot{m}_{CO} / \rho \quad (19)$$

missä	\dot{V}_{CO}	on hiilimonoksidin muodostumisnopeus [m^3/s]
	\dot{m}_{CO}	on hiilimonoksidin muodostumisnopeus [kg_{CO}/s]
	ρ	on hiilimonoksidin tiheys, $1,25 \text{ kg}/m^3$ (NTP).

Hiilidioksidi (CO_2)

Paloissa, joissa on hyvä ilmanvaihto ($\phi \ll 1$), lähes kaikki palavan aineen sisältämä hiili hapettuu hiilidioksidiksi. Vaikka palaminen olisi ilmanvaihdon rajoittamaa, hiilestä hapettuu kuitenkin vielä 90–95 % hiilidioksidiksi, lopun ollessa hiilimonoksidia, nokea sekä palamatta jääneitä tuotteita.

Muodostuvan hiilidioksidin määrä voidaan laskea suoraan palamisen reaktioyhtälöstä kertomalla saatu maksimimäärä palamisen tehokkuusasteella (käytännössä 90–95 %). Mikäli palavan aineen kemiallinen bruttokaava on tunnettu, on hiilidioksidin muodostuminen $f_{CO_2} = 44/(\text{aineen molekyylipaino})$. Hiilidioksidin muodostumisnopeus saadaan kertomalla f_{CO_2} palavan aineen palamisnopeudella $\dot{m}_{\text{palava aine}}$ ja tilavuusyksiköissä ilmaistuna vastaavalla tavalla kuin edellä hiilimonoksidille.

Syaanivety (HCN)

Palossa muodostuvan syaanivedyn maksimimäärä voidaan arvioida palavan aineen kemiallisen koostumuksen perusteella olettaen, että kaikki aineen sisältämä typpi muuttuu syaanivedyksi. Syaanivedyn määrä on siten $f_{HCN}(\text{max}) = 27/(\text{aineen molekyylipaino})$. Typen konversioastetta syaanivedyksi ei tunneta eikä myöskään muodostumisen riippuvuutta muista palamista kuvaavista parametreista. Siten ainoastaan muodostumisen maksiminopeus on laskettavissa.

Halogeenivedyt (HF , HCl ja HBr)

Näiden yhdisteiden palossa muodostuvat maksimimäärät voidaan arvioida vastaavalla tavalla kuin edellä. Halogeenien konversioasteet ovat todennäköisesti lähellä arvoa 1, joten määrät ovat laskettavissa suoraan palavan aineen kemiallisen koostumuksen perusteella vastaavalla tavalla kuin edellä. Lisäksi on huomattava, että halogeenivetyjen pitoisuus alenee yleensä varsin nopeasti niiden imeytyessä lähellä oleviin pintoihin tai liuetessa veteen. Käytännössä maksimimääriä ei siten yleensä tavata palojen yhteydessä.

4.4.3 Myrkyllisten kaasujen vaikutukset

Tulipaloissa vapautuvista myrkyllisistä aineista osa on tukahduttavia ja osa ärsyttäviä aineita. Tukahduttavat aineet aiheuttavat ihmiskehossa hapenpuutetta, joka vaikuttaa keskushermostoon, mistä voi seurata tajuttomuutta ja ääritapauksissa kuolema. Näiden aineiden vaikutusten vakavuusaste riippuu ihmisen saamasta annoksesta, eli vaikutus riippuu sekä kaasun pitoisuudesta että altistusajasta. Vaikutukset tulevat vakavammiksi annoksen kasvaessa. Paloissa syntyvistä kaasumaisista tukahduttavista myrkyllisistä aineista on eniten tutkittu hiilimonoksidia ja syaanivetyä.

Hiilimonoksidin tukahduttava vaikutus perustuu sen kykyyn sitoutua veren hemoglobiiniin arvioilta 250 kertaa tehokkaammin kuin happi, minkä seurauksena hiilimonoksidi syrjäyttää nopeasti hapen verestä. Syaanivetyä pidetään puolestaan 25 kertaa myrkyllisempänä kuin hiilimonoksidi. Syaanivedyn vaikutus perustuu siihen, että vesiliukoinen syanidi-ioni leviää nopeasti kehon kaikkiin soluihin, joissa se reagoi erään hapensiirrossa keskeisen entsyymin kanssa. Lyhytaikainen altistus korkeille syaanivetypitoisuuksille on, toisin kuin hiilimonoksidilla, selvästi vaarallisempaa kuin pitkäaikainen altistus alemmille pitoisuuksille.

Toisin kuin välittömästi vaikuttavilla tukahduttavilla myrkyillä, ärsyttävillä kaasumaisilla palamistuotteilla on paljon monimutkaisemmat vaikutusmekanismit. Ärsyttävien kaasujen pitoisuuksien vaikutusten kvantitatiivinen arviointi ihmisten poistumismahdollisuuksien kannalta on usein vaikeaa. Useimmat ärsyttävät kaasumaiset aineet aiheuttavat aisteissa, ylemmissä hengityselimissä ja keuhkoissa havaittavia oireita.

Aistien ja ylempien hengityselinten ärsytysvaikutukset näyttävät riippuvan lähinnä vain kaasun pitoisuudesta, ja ne voivat vaihdella hyvin lievästä haitasta ankaraan kipuun. Tällaisia vaikutuksia ovat esimerkiksi kyynelehtiminen, refleksinomainen silmien räpytely, kipu nenässä, kurkussa ja rinnassa, hengityksen pidättäminen, yskiminen, limaeritys ja kouristukset hengitystiehyeissä. Altistuksen vaikutusten ennustaminen on vaikeaa, koska ihmisillä tehtyjä kontrolloituja kokeita on hyvin vähän. Pääosa ihmisiä koskevista havainnoista on saatu teollisuudessa sattuneista onnettomuuksista, joissa kuitenkin monissa tapauksissa ei ole tarkkoja tietoja pitoisuuksista. Eläinkokeita on sitä vastoin tehty runsaasti, mutta on epävarmaa, missä määrin näitä tietoja voi hyödyntää arvioitaessa niiden vaikutuksia ihmisten poistumisedellytyksiin. Eläimillä tehdyt kokeet ja yksi ihmisillä tehty koe viittaavat siihen, että aistien ja ylempien hengityselinten ärsytykset eivät juurikaan haittaisi poistumista. Altistuksen alkaessa esiintyy erilaisia ongelmia, mutta näyttää siltä, että ihmisten tottuessa savuun heidän toimintakykynsä taas paranee.

Riittävän suurina pitoisuuksina useimmat ärsyttävät kaasut voivat tunkeutua syvemmälle keuhkoihin, joissa ne voivat aikaansaada erilaisia reaktioita. Nämä vaikutukset riippuvat

saadusta annoksesta, eli niihin vaikuttavat sekä kaasupitoisuus että altistus-aika. Reaktiivilla ei yleensä ole välitöntä vaikutusta turvalliseen poistumiseen, mutta niistä saattaa aiheutua erilaisia jälkiseurauksia, jotka voivat ilmetä vasta muutaman tunnin tai päivän kuluttua altistuksen päättymisestä. Pahimmissa tapauksissa voi syntyä kuolemaan johtava keuhkopöhö. Eläinkokeissa on todettu, että limakalvot poistavat suuren osan vesiliukoisista ärsyttävistä aineista. Limakalvoilla on kuitenkin tietty maksimikapasiteetti, jota suuremmilla määrillä ne eivät enää kykene poistamaan tällaisia aineita.

Suurin osa kokeellisesta toksikologisesta aineistosta on saatu terveillä eläimillä tehdyissä tutkimuksissa. Ihmisten keskuudessa on kuitenkin ryhmiä, jotka saattavat olla herkempiä myrkyvaikutuksille kuin muut. Tällaisia ryhmiä ovat mm. lapset ja vanhuksat sekä astmaattiset henkilöt, joita arvioidaan olevan 15 % lapsista ja 5 % aikuisväestöstä. Lapset ovat herkempiä sen vuoksi, että heidän hengitystilavuutensa suhteessa painoon on suurempi kuin aikuisilla. Vanhemmat henkilöt ja erityisesti ne, joilla on verenkiertohäiriöitä, ovat myös erityisen herkkiä myrkyllisille kaasuille. Tällaiset henkilöryhmät on myös otettava huomioon suunniteltaessa turvallisia poistumisteitä. Turvallisina pidettävien altistusrajojen tulee siten olla selvästi alempia kuin terveillä eläimillä tehdyissä laboratorioskokeissa todetut rajat.

Myrkyllisten kaasujen vaikutusten arviointi

Kaasumaisten palamistuotteiden myrkyvaikutusten arvioimiseksi on käytössä useita malleja, joista tässä käsitellään lähemmin ns. myrkyllisten kaasujen mallia (*Toxic Gas Model*) (Purser 1995).

Myrkyllisten kaasujen mallissa tarkastellaan erikseen tukahduttavien ja ärsyttävien kaasujen vaikutukset. Tukahduttavien kaasujen aiheuttaman vaaran arvioimiseksi on selvitettävä jokaisen myrkyllisen kaasun aiheuttaman altistuksen annos, eli määritettävä kyseisen kaasun pitoisuus-aikakäyrän alle jäävä altistus-ajan pituinen pinta-ala (pitoisuus-käyrän aikaintegraali). Kullekin tukahduttavalle kaasulle määritetään vaikuttava annosuhte (FED-arvo, *Fractional Effective Dose*) tarkasteluajankohtana. Kaikkien tukahduttavien kaasujen samana ajankohtana yhteenlaskettuja FED-arvoja verrataan annettuun kokonais-FED-raja-arvoon. Jos yhteenlaskettu FED-arvo on suurempi kuin FED-raja-arvo, ei kaasuille altistuneiden henkilöiden poistumista voida enää pitää turvallisena.

Ärsyttävien kaasujen aiheuttaman vaaran arvioimiseksi riittää, että selvitetään jokaisen kaasun pitoisuus. Vastaavalla tavalla kuin edellä, kullekin ärsyttävälle kaasulle määritetään vaikuttava pitoisuussuhde (FEC-arvo, *Fractional Effective Concentration*) tarkasteluajankohtana. Kaikkien ärsyttävien kaasujen vastaavana ajankohtana yhteenlaskettuja hetkellisiä FEC-arvoja verrataan annettuun kokonais-FEC-raja-arvoon. Jos yhteenlaskettu

FEC-arvo on suurempi kuin FEC-raja-arvo, kaasujen katsotaan voivan merkittävästi vaikuttaa altistuneiden henkilöiden turvalliseen poistumiseen.

Asetettaessa kriteerejä henkilöturvallisuuden ja henkilöiden poistumisedellytysten suhteen on otettava huomioon, että eri ihmisten reaktiot tietyille kertyneelle FED-arvolle ja hetkelliselle FEC-arvolle ovat tilastollisesti jakautuneita. FED- ja FEC-arvojen raja-arvot valitaan siten, että kaasujen vaikutus ihmisten poistumisedellytyksiin on hyväksyttävän pieni.

Ihmisten reaktioiden tilastollisen jakautuman frekvenssikäyrän maksimi on määritelmän mukaan kohdassa, jossa kokonais-FED- tai FEC-arvo saavuttaa arvon 1,0. Kokonais-FED- tai FEC-arvon ollessa 1,0 katsotaan, että palamiskaasuilla on poistumista vakavasti haittaavia vaikutuksia 50 %:lle altistuneista henkilöistä.

Perinteinen tapa asettaa turvallisia raja-arvoja kemiallisille aineille on pienentää kokeellisesti todettuja altistusannoksia tai pitoisuusarvoja siten, että ne paremmin ottaisivat huomioon ihmisten reaktioihin liittyvät tilastolliset vaihtelut. Toksikologiassa tämä on yleensä tehty kertomalla kokeellisesti määritetyt raja-arvot kahdesti luvun 10 kerrannaisilla. Näistä ensimmäisellä pyritään ottamaan huomioon virheet, jotka syntyvät ekstrapoloitaessa mittaustulokset eläimistä ihmisiin, ja toisella otetaan puolestaan huomioon ihmispopulaation heterogeenisuus. Ensimmäinen tekijä on perusteltua jättää ottamatta huomioon palamistuotteiden välittömien myrkyllisyysvaikutusten ja lyhytaikaisen altituksen vuoksi sekä siksi, että kriteerejä asetettaessa käytetään sekä ihmis- että eläindataa. Pienillä laboratoriokoe-eläimillä on myös suurempi hengitystiheys kuin ihmisillä, joten sitä kautta saadaan myös pieni lisävarmuustekijä. Ihmispopulaatioiden vaihteluiden osalta on rajoitetuissa farmakokineettisissä kokeissa todettu, että populaatiotekijän 10-kertainen muutos vastaa 7–9 standardipoikkeamaa reaktioiden tilastollisessa jakautumassa normaalilla aikuisväestöllä. Tämä ottaa käytännössä huomioon kaikkein herkimmätkin henkilöryhmät.

FED- ja FEC-raja-arvoina käytetään yleensä arvoa 0,1, jolloin lähes kaikki palamiskaasuille altistetut henkilöt, mukaan lukien herkempiin aliryhmiin kuuluvat henkilöt, voivat poistua turvallisesti.

Myrkyllisten kaasujen malli

Tukahduttaville kaasuille käytetyn FED-mallin periaate selviää yksinkertaisimmassa muodossaan seuraavasta yhtälöstä:

$$FED = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(Ct)_i} dt \quad (20)$$

missä	FED	on FED-arvo
	C_i	on kaasun ”i” pitoisuus
	$(Ct)_i$	on kaasulle ”i” ominainen lamaantumista aiheuttava altistus
	t	on aika.

Kullekin tukahduttavalle kaasulle määritetään tarkasteluajankohtaa vastaava FED-arvo. Kaikkien kaasujen yhteenlaskettua arvoa verrataan annettuun kokonais-FED-rajearvoon, jossa otetaan huomioon myös herkät alaryhmät. Jos yhteenlaskettu FED-arvo ylittää raja-arvon (yleensä 0,1), kyseisistä tiloista ei ole mahdollista poistua turvallisesti.

Seuraavassa esitetään edellinen yhtälö laajennetussa muodossa (aikayksikkönä on minuutti):

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \frac{[CO]}{35000} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\exp([HCN] / 43)}{220} dt \quad (21)$$

Yhtälössä käytetyt hiilimonoksidin ja syaanivedyn (Ct)-arvot on saatu eri apinalajeilla tehdyissä kokeissa. Syaanivedyn (Ct)-arvo on vakio vain rajoitetulla pitoisuusalueella. Laskelmissa ei yleensä tarvitse ottaa huomioon happipitoisuuden pienenemistä, ellei se alene pienemmäksi kuin 13 %. Yhtälö pätee vain lyhytaikaisissa altistuksissa, joissa ei esiinny suuria fyysisiä ponnistuksia edellyttävää toimintaa.

Jos hiilidioksidipitoisuus nousee suuremmaksi kuin 2 %, on edellä laskettu tukahduttavien kaasujen kokonais-FED-arvo kerrottava empiirisellä tekijällä V_{CO_2} , joka ottaa huomioon kiihtyvää hengityksestä (eli hyperventilaatiosta) johtuvan kasvavan altistuksen:

$$V_{CO_2} = \exp \frac{[\% CO_2]}{4} \quad (22)$$

Aisteja, ylempiä hengityselimiä ja keuhkoja ärsyttävien palamiskaasujen ärsyttävä vaikutus arvioidaan vastaavasti FEC-arvojen avulla. Kokonais-FEC-arvoa verrataan asetettuun raja-arvoon (yleensä 0,1), ja mikäli se ylittyy, osoittaa se, että olosuhteet todennäköisesti haittaavat tai estävät herkimpien poistuvien henkilöiden turvallisen poistumisen. Kokonais-FEC-arvo lasketaan seuraavalla yhtälöllä, jossa pitoisuusyksikkönä on [ppm]:

$$FEC = \frac{[HCl]}{1000} + \frac{[HBr]}{1000} + \frac{[HF]}{500} + \frac{[SO_2]}{150} + \frac{[NO_2]}{250} + \frac{[akroleiini]}{30} + \frac{[CH_2O]}{250} + \sum \frac{[ärsyttävä_aine]_i}{[rajapitoisuus]_i} \quad (23)$$

Paloissa muodostuu useita muitakin ärsyttäviä kaasuja kuin yhtälöön sisältyy, esimerkiksi isosyanaatteja, aldehydejä, alkoholeja, ketoneja, nitrilejä jne. Puutteellisten analyttisten menetelmien ja aineiden riittämättömien myrkyllisyystietojen vuoksi niitä ei kuitenkaan ole voitu sisällyttää yhtälöön.

Kuten edellä esitettiin, lasketaan FEC-arvo erikseen kaikille ärsyttävälle kaasukomponentille tarkasteluajankohtana. Yhteenlaskettua FEC-arvoa verrataan kokonais-FEC-raja-arvoon, joka on yleensä 0,1. Jos yhteenlaskettu arvo ylittää raja-arvon, muodostavat kaasut huomattavan vaaran, joka vaikuttaa epäsuotuisasti henkilöiden turvalliseen poistumiseen.

Kuumuuden vaikutukset

Tulipalossa syntyvä kuumuus voi aiheuttaa altistuneille henkilöille terveydellisiä haittoja kolmella eri tavalla. Liiallisesta kuumuudesta voi seurata lämpöhalvaus (hypertermia) sekä ihon tai hengitystiehyiden eriasteisia palovammoja. Hengitystiehyihin ei yleensä synny palovammoja hengitettäessä kuumaa ilmaa, jonka kosteuspitoisuus on pienempi kuin 10 %. Toisaalta, hengitystiehyihin saattaa muodostua vammoja jo 60 °C:n lämpötilassa, jos ilman kosteuspitoisuus on 100 %. Tällainen tilanne voi syntyä helposti käytettäessä vettä tulipalon sammuttamiseen.

Säteilylämpö. Ihmisten ihon sietorajana lämpösäteilyä vastaan pidetään arvoa 2,5 kW/m². Tätä pienempiä arvoja paljas iho sietää useita minutteja mutta suurempia arvoja vain joitakin sekunteja. Ihmisen ihon sieto aika lämpösäteilyn intensiteeteille voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$t_{\text{Irad}} = \frac{80}{q^{1,33}} \quad (24)$$

missä t_{Irad} on lamaan tumamiseen kuluva aika [min]
 q on lämpösäteilyn intensiteetti [kW/m²].

Konvektiolämpö. Kokeellisissa tutkimuksissa on todettu, että suojaamaton iho sietää kuivassa ilmassa noin 120 °C:n lämpötiloja. Tätä korkeammat lämpötilat aiheuttavat ankaraa kipua sekä palovammoja muutamassa minuutissa. Hypertermia voi kuitenkin syntyä tätä alemmissa lämpötiloissa riippuen altistuksen pituudesta. Aika, joka kuluu

ihmisen lamaanumiseen konvektion kautta kuivasta ilmasta (alle 10 % kosteutta) siirtyvästä lämmöstä, lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$t_{lconv} = 180 \exp(-T / 36) \quad (25)$$

missä t_{lconv} on lamaanumiseen kuluva aika [min]
 T on ilman lämpötila [°C].

Lämpöaltistus. Vastaavalla tavalla kuin edellä tukahduttavien myrkyllisten kaasujen osalta voidaan myös lämpöaltistusta tarkastella ”annoksena”, jonka vakavuuden arvioimiseksi voidaan käyttää FED-mallin muunnosta. Lämpöaltistuksen liittyvä FED-arvo lasketaan seuraavalla yhtälöllä, joka pätee palolämpötilan ollessa suhteellisen vakaa tai lämpötilan noustessa:

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{1}{t_{lrad}} + \frac{1}{t_{lconv}} \right] dt \quad (26)$$

4.5 Kehittyneemmät poistumismallit

Kuten edellä olevista luvuista on käynyt ilmi, poistumistapahtumaan ja sen lopputulokseen voi vaikuttaa suuri määrä tekijöitä erityisesti, kun poistuminen tapahtuu tulipalotilanteessa. Kaupallisesti saatavissa olevat poistumismallit eivät yleensä ota huomioon niinkin keskeisiä tekijöitä kuin tulipalon ja sen tuottaman kuumuuden, savun ja myrkyllisten palamistuotteiden vaikutuksia ihmisten poistumiseen. Poistumisen laskentaohjelmassa *buildingEXODUS* palotilanteen tiedot voidaan kuitenkin antaa ohjelmalle aikasarjoina, jotka on saatu palonkehittymismallista *CFAST* (Gwynne *et al.* 2001). Tämä palonkehittymismalli on ns. kaksivyöhykemalli, joka ei sovellu suurten tilojen palojen laskentaan.

Poistumismalleissa ei myöskään oteta huomioon poistuvien henkilöiden usein suuresti-kin poikkeavia fyysisiä ja psyykkisiä ominaisuuksia eikä ihmisjoukon psyykkistä ja fyysistä dynamiikkaa (Gwynne *et al.* 2003).

VTT:n tutkijat ovat jo usean vuoden ajan osallistuneet yhdysvaltalaisen *National Institute of Standards and Technologyn (NIST)* kehittämän palosimulointiohjelman *Fire Dynamics Simulator (FDS)* kehitystyöhön (Hostikka 2003). Simulointiohjelma *FDS* on tyypiltään kenttämalli, joka soveltuu myös suurikokoisissa tiloissa tapahtuvien tulipalojen simulointiin, toisin kuin vyöhykemallit. VTT:ssä on kehitteillä *FDS*-mallin yhteydessä toimiva evakuointimoduuli *FDS-Evac* (Korhonen *et al.* 2005), jossa lähtökohtana ei yleisimpien poistumisen laskentaohjelmien tapaan ole ihmisvirtauksen analogia nestevirtauk-

sen kanssa. Mallissa on sen sijaan käytetty monen kappaleen fysiikan teoriasta peräisin olevaa rakeisen aineen virtausta, ja tämän analogian pohjalta laadittu malli toimii hyvin myös paniikkitilanteissa. Mekaniikan lakeihin perustuvien voimien lisäksi mallissa on otettu huomioon myös sosiaalinen voima, josta kuitenkin toistaiseksi on olemassa vain niukasti tutkimustietoa. Ihmiset saattavat myös poistumisen aikana muuttaa päätöksiään ja jatkaa poistumistaan aivan toiseen suuntaan kuin alkujaan oli tarkoitus. Mallin jatkokehitystyössä tullaan erityisesti keskittymään näihin tekijöihin liittyvien ilmiöiden tutkimiseen.

4.6 Poistumisen laskenta maanalaisissa tiloissa

Kuten johdannossa mainittiin, liikennetunneleita koskevia poistumisen laskentamenetelmiä käsitellään lukuisissa julkaisuissa. Muiden maanalaisten tilojen poistumisasioista näyttäisi olevan julkisesti saatavissa olevassa kirjallisuudessa vain muutamia kirjoituksia. Lyhyt soittokierros muutamalle kotimaiselle maanalaisten tilojen suunnittelijalle viittaa siihen, että maanalaisten tilojen poistumisjärjestelyihin sovelletaan tavallisesti yleisiä rakentamista koskevia määräyksiä eli Suomen rakentamismääräyskokoelman osaan E1 (2002) sisältyviä vaatimuksia. Tilanne näyttäisi olevan myös kansainvälisesti lähes sama, kuten kansainvälisen maanalaisten tilojen rakentamisyhdistysten kattojärjestön ITA:n selvityksistä ilmenee (Nordmark 1998, 2004).

4.6.1 Poistumista koskevia vaatimuksia Suomen rakentamismääräyksissä

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 lukuun 10 sisältyvistä poistumista koskevista vaatimuksista tulisi erityisesti kiinnittää huomio seuraaviin vaatimuksiin, joiden noudattaminen maanalaisissa tiloissa voi olla ongelmallista:

(10.1.1) Rakennuksesta tulee voida turvallisesti poistua tulipalossa tai muussa hätätilanteessa. Rakennuksessa tulee olla riittävästi sopivasti sijoitettuja, tarpeeksi väljiä ja helppokulkuisia uloskäytäviä niin, että poistumisaika rakennuksesta ei ole vaaraa aiheuttavan pitkä.

Ohje: Uloskäytävänä ei pidetä hissiä tai muuta vastaavaa laitetta. Jokaiselta poistumisalueelta on oltava mahdollista kuljettaa uloskäytävän kautta liikuntakyvytön henkilö pareilla.

(10.1.2) Uloskäytävän tulee johtaa ulos maan pinnalle tai muulle palon sattuessa turvalliselle paikalle.

Tämän kohdan mukaan on periaatteessa mahdollista, että henkilöt eivät lainkaan poistuisi rakennuskohteesta vaan siirtyisivät kyseisessä kohteessa olevaan tarkoitusta varten erityisesti suunniteltuun tilaan, jossa he voisivat olla turvallisesti koko tulipalon ajan tai josta heidät voitaisiin turvallisesti pelastaa. Suomalaisen paloturvallisuussuunnitteluoppaan (RIL 2003) mukaan menettelyä ei kuitenkaan tulisi käyttää: ”Tällainen menettely

ei kuitenkaan kuulu suomalaiseen turvallisuuskulttuuriin, eikä siitä ulkomailla ole yksinomaan myönteisiä kokemuksia, joten kyseistä tapaa tulisi välttää.”

(10.2.1) Etäisyys poistumisalueen kustakin kohdasta uloskäytävään määritetään lyhintä kulkukelpoista reittiä pitkin. Jos kulkureitit kahteen erilliseen uloskäytävään osittain yhtyvät, yhteisen osan pituus lasketaan kaksinkertaisena.

On huomattava, että uloskäytävällä tarkoitetaan E1:n (2002) määritelmän mukaan poistumisalueelta suoraan ulos johtavaa ovea taikka rakennuksessa tai sen ulkopuolella olevaa tilaa, jonka kautta turvallinen poistuminen on palon sattuessa mahdollista maan pinnalle tai muulle turvalliselle paikalle.

(10.2.2) Suurin sallittu etäisyys lähimpään uloskäytävään on esitetty taulukossa 10.2.2.

Kyseisessä taulukossa tarkoitettu suurin sallittu enimmäispituus on 45 m. Tätä vaatimusta lieneekin käytännössä kaikkein vaikein noudattaa. Erään ratkaisun ongelmaan tarjoaa E1:n (2002) tähän kohtaan liittyvä ohjeteksti:

Ohje: Taulukossa 10.2.2 olevia etäisyyksiä voidaan ylittää, mikäli [...] rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla.

(10.3.1) Rakennuksen jokaiselta poistumisalueelta, jossa muutoin kuin tilapäisesti oleskelee tai työskentelee henkilöitä, tulee yleensä olla vähintään kaksi erillistä, tarkoituksenmukaisesti sijoitettua uloskäytävää.

Ohje: Kun uloskäytävä on tarkoitettu vain palossa tai muussa onnettomuustilanteessa käytettäväksi ja kun poistuvien henkilöiden määrä on vähäinen, uloskäytävän ei tarvitse täyttää kaikkia sitä koskevia vaatimuksia.

(10.4.1) Uloskäytävän vähimmäisleveys lasketaan uloskäytävän kautta poistuvien henkilöiden lukumäärän perusteella. Poistumisalueen henkilömäärä saadaan jakaa eri uloskäytävien osalle ja uloskäytävien leveydet lasketaan yhteen.

Henkilöiden määränä on ensisijaisesti käytettävä suurinta poistumisalueelle aiotua henkilömäärää. Jos samaan uloskäytävään liittyy useita poistumisalueita, leveys mitoitetaan henkilömäärältään suurimman poistumisalueen mukaan.

(10.4.2) Uloskäytävän leveyden tulee yleensä olla vähintään 1 200 mm.

(10.4.3) Uloskäytävien yhteenlaskettu vähimmäisleveys on 1 200 mm ensimmäistä 120 henkeä kohden, ja leveyttä lisätään 400 mm kutakin seuraavaa 60:tä henkeä kohden.

Uloskäytävään johtavan sisäisen käytävän leveys lasketaan, kuten uloskäytävän leveys, käytävää kulkevan henkilömäärän mukaan.

Ohje: Uloskäytävän leveys mitataan vaakatasossa kohtisuoraan poistumissuuntaan vastaan. Vähimmäisleveyden sisäpuolella ei saa olla muita kaventavia esteitä kuin jalkalistat, reunapalkit ja käsijohteet.

(10.4.4) Uloskäytävään johtavien ja huoneista sisäiseen käytävään johtavien ovien määrän ja leveyden tulee olla niitä käyttävään henkilömäärään nähden riittäviä.

(10.4.5) Uloskäytävän vapaan korkeuden tulee olla vähintään 2 100 mm.

Ohje: Vähimmäiskorkeuden alapuolella ei saa olla esteitä, kuten palkkeja, putkia tai valaisimia. Oviaukkojen kohdalla korkeus saa olla välttämättömien karmien ja kynnysten verran pienempi.

(10.6.1) Uloskäytävän kulkusuunnassa olevien ovien tulee yleensä avautua poistumissuuntaan.

(10.6.2) Poistumiseen tarvittavan oven tulee avautua poistumissuuntaan, jos sen kautta poistuvien henkilöiden määrä on yli 60.

Selostus: Näitä ovat ovet, joiden kautta on pääsy ulos, uloskäytävään tai uloskäytävään johtavaan sisäiseen käytävään.

(10.6.3) Uloskäytävien ja niihin johtavien tilojen ovien tulee olla hätätilanteessa helposti avattavissa.

Ohje: Uloskäytävien ja niihin johtavien tilojen ovissa ei tule yleensä käyttää lukkoja, jotka avaimetta voi takalukita siten, ettei niitä sisäpuolelta saa auki ilman avainta.

Kulunvalvonnan järjestelyt eivät saa estää turvallista poistumista rakennuksesta.

(10.6.4) Majoitustilojen, hoitolaitosten sekä kokoontumis- ja liiketilojen uloskäytävät ja kulkureitit niille tulee yleensä varustaa turva- ja merkkivalaistuksella.

(10.6.5) Mikäli uloskäytävien ovet ja pääsy niille eivät ole selvästi nähtävissä tai muut ovet voivat harhauttaa ulos pyrkijöitä, uloskäytävät ja pääsy niille tulee tarvittaessa merkitä.

(10.7.1) Henkilöturvallisuuden kannalta vaativiin kohteisiin, joissa poistumisturvallisuuden riskit johtuvat tilojen käyttötavasta ja henkilöiden rajoitetusta tai alentuneesta toimintakyvystä, voidaan edellyttää tehtäväksi kohdekohtainen poistumisaikalaskelma.

(10.7.2) Poistumisaikalaskelma voidaan edellyttää tehtäväksi myös muihin kohteisiin, mikäli niiden suuri koko tai poikkeukselliset olosuhteet voivat vaarantaa henkilöturvallisuutta.

Viimeksi mainitun kohdan mukaan on ilmeisesti mahdollista, että viranomaiset voivat vaatia poistumisaikalaskelman laatimista maanalaisten tilojen osalta.

4.6.2 Esimerkkejä ulkomaisista vaatimuksista

Yhdysvaltalaisen paloalan järjestön *National Fire Protection Association*in standardi NFPA 520 (2005) koskee useimpien maanalaisten tilojen paloturvallisuutta. Standardi jakaa maanalaiset tilat kahteen pääryhmään: rakennuksiin (*buildings*) ja yleisiin alueisiin

(*common spaces*). Ensin mainituilla tarkoitetaan maanalaisia tiloja, jotka on osastoitu yleisistä tiloista palonkestävin rakennusosin. Jälkimmäisillä tarkoitetaan puolestaan kaikkia muita tiloja, erityisesti kulkuväyliä, teitä, rautateitä jne.

Rakennustyyppisiä tiloja koskevat normaalit poistumisjärjestelyjä varten olevat vaatimukset (mm. NFPA:n *Life Safety Code*). Yleisten alueiden poistumisjärjestelyistä on standardissa muutamia erillisiä vaatimuksia, joista voidaan mainita mm. seuraavat:

- Tilassa tulee olla vähintään kaksi ulos johtavaa uloskäytävää, joiden etäisyys toisistaan on vähintään 91 m. Kulkureitti uloskäytävään tai suojatilaan saa olla enintään 610 m. Mikäli henkilömäärä on yli 5 000, tulee uloskäytäviä olla vähintään kolme.
- Kulkureittien leveyden määrittämiseksi varten käytettävä laskennallinen henkilömäärä on joko 150 % maanalaisten tilojen rakennustyyppisten tilojen enimmäishenkilömäärästä tai laskennallisesta henkilötiheydestä 186 m²/hlö saatava henkilömäärä. Näistä valitaan suurempi luku mitoituslaskelmien perusteeksi.
- Vaakatasossa olevan kulkureitin mitoitusleveyden tulee olla 0,5 cm/hlö ja portaissa vastaavasti 0,8 cm/hlö, aina kuitenkin vähintään 1,12 m. Henkilömääränä tulee käyttää edellisessä kohdassa mitoituslaskentaa varten määritettyä henkilömäärää.
- Turva- ja merkkivalaistuksesta on erilliset säännökset. Eniten yksityiskohtaisia vaatimuksia esitetään maanalaisiin tiloihin sijoitettavia suojatiloja varten (tiloissa tulee mm. olla viestintäyhteyksiä sekä ruokaa ja juomaa).

4.6.3 Raideliikenteen maanalaisia asemia koskeva laskentamalli

Toinen maanalaisiin tiloihin liittyvä NFPA-julkaisu on raideliikennettä koskeva standardi NFPA 130 (2003, 2004). Tämän tutkimuksen kannalta on olennaista, että se koskee myös mm. metroasemia. Kirjallisuustietojen mukaan kyseistä standardia on sovellettu monien maiden metroasemien suunnittelussa (Papaioannou 1998, Nordmark 2004). Standardi sisältää mm. poistumisjärjestelyjä koskevia vaatimuksia erikseen raideliikenteen asemia, raideosuuksia (ml. tunneleita) ja liikkuvaa kalustoa varten. Tässä tarkastellaan ainoastaan asemia koskevia vaatimuksia.

Asemien osalta annetaan yksinkertaiset toiminnalliset vaatimukset: kaikkien ihmisten on voitava poistua aseman laiturialueelta 4 minuutin sisällä ja saapua turvalliseen paikkaan 6 minuutin sisällä poistumisen alkamisesta. Näiden vaatimusten lisäksi standardi sisältää lukuisia asemien rakenteita koskevia vähimmäisvaatimuksia, joita ovat mm. seuraavat (mitat on annettu standardissa ensin SI-mittayksikköinä):

- Kulkureitin pituus laiturialueella saa olla enintään 91,4 m.

- Kulkureittien tehollisen leveyden tulee laiturialueilla, käytävillä ja luiskissa (kaltevuus $\leq 4\%$) olla vähintään 1,12 m. Laskettaessa tehollista leveyttä tulee tilan todellisesta leveydestä vähentää 304,8 mm seinästä ja 457,2 mm laiturin reunasta. Näiden reittien laskennallisena enimmäiskapasiteettina käytetään 0,0819 hlö/(mm·min) ja ihmisten kävelynopeutena 37,8 m/min.
- Kulkureittien tehollisen leveyden tulee portaissa, pysäytetyissä liukuportaissa ja luiskissa (kaltevuus $> 4\%$) olla vähintään 1,12 m. Näiden reittien laskennallisena enimmäiskapasiteettina ylöspäin liikuttaessa käytetään 0,0516 hlö/(mm·min) ja ihmisten kävelynopeutena (vaakaprojektio) 12,19 m/min.
- Kulkureiteillä olevien ovien ja porttien vähimmäisleveyden tulee olla 914,4 mm ja laskennallisen enimmäiskapasiteetin 0,0819 hlö/(mm·min). Erilaisten lipuntarkastusporttien mitoista on useita vaatimuksia.
- Jokainen laiturin on varustettava toisella uloskäytävällä, jonka vähimmäisleveys on 1,12 m.
- Laskennallisena henkilömääränä käytetään henkilömäärää, joka vastaa pahimman ruuhkatilanteen mukaista henkilömäärää. (Standardissa kuvataan yksityiskohtaisemmin tämän ajankohdan määrittämistä, mm. tilannetta, jossa laiturin jokaiselle raiteelle saapuu samanaikaisesti täysinäinen juna, jonka kaikki henkilöt poistuvat tarkasteltavalle asemalle. Lisäksi asemalla odottaa tietty henkilömäärä junan tuloa.)

Standardin liitteenä on useita havainnollisia asemien poistumisjärjestelyjen riittävyttä koskevia laskentaesimerkkejä.

4.6.4 Kaivoskäytäviä koskeva laskentamalli

Tanaka *et al.* (1992, 1994) ovat kehittäneet tietokonepohjaisen laskentamallin, joka on ensisijaisesti suunniteltu käytettäväksi kaivoksista tapahtuvan poistumisen tarkasteluun. Mallissa, joka perustuu useisiin poistumiskokeisiin, otetaan huomioon tavanomaisten liikkumiseen liittyvien tekijöiden lisäksi myös poistuvien henkilöiden päätöksentekoon ja muuhun käyttäytymiseen liittyviä tekijöitä. Malliin on sisällytetty mm. seuraavat kulkureitin valintaan vaikuttavat säännöt:

- Henkilö pyrkii ensisijaisesti poistumaan samaa tietä, jota pitkin hän on tullut.
- Kulkureitin risteyskohdassa valitaan valoisampi tie.
- Kulkureitin risteyskohdassa valitaan savuton tie.
- Käännyttään, jos kohdataan savua.
- Kulkureitin risteyskohdassa valitaan tie, jossa ilma on raittiimpi.

Laskentaohjelma pystyy käsittelemään enintään 300 henkilön poistumistapauksia. Henkilöiden kävelynopeus, joka perustuu japanilaisiin tutkimuksiin, riippuu ainoastaan henkilötiheydestä seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$v = \frac{1,5}{D} \quad (27)$$

missä v on kävelynopeus [m/s]
 D on henkilötiheys [hlö/m²].

Mallia on edellä mainituissa julkaisuissa käsitelty lähinnä kvalitatiivisella tasolla. Malli on laadittu Macintosh[®]-tietokoneita varten, eikä kirjallisuudesta löydy viitteitä, että sitä olisi kehitetty edelleen. Mallin perusteena olevien käytännön poistumiskokeiden tuloksia on kuitenkin kuvattu myöhemmin lukuisissa julkaisuissa (Tanaka *et al.* 1995, 1996, 1997, 1998 ja 1999). Tekijä on vahvistanut, että mallia ei sen valmistumisen jälkeen enää ole kehitetty (Tanaka 2004).

4.6.5 Tunnelipalojen henkilöriskin arviointia koskeva menetelmä

Dray *et al.* (1995) ovat esittäneet menetelmän tai metodologian *Simulation of Personnel Evacuation from Complex Spaces* (SPECS), jolla voidaan analysoida tunnelipaloihin liittyviä vaaratekijöitä ja suunniteltujen turvajärjestelyjen tehokkuutta. Kirjoittajat mainitsevat mm., että menetelmän tuottamia tuloksia voidaan käyttää kustannus-hyötyanalyysiin sekä eri suunnitteluvaihtoehtojen keskinäiseen vertailuun.

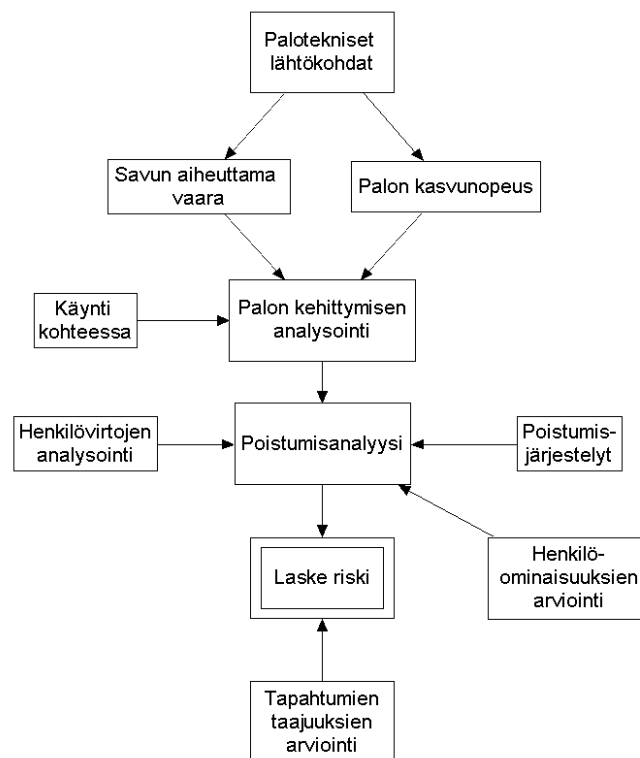
Analyysi voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

- *Kohteen jakaminen poistumisanalyysin kannalta tarkoituksenmukaisiin alueisiin.* Esimerkiksi poistumisedellytykset, palokuorma ja riskitekijät vaihtelevat sen mukaan, missä tulipalo saa alkunsa. Maanalaisen rautatieaseman tapauksessa tyypillisiä alueita ovat lippuhalli, liukuportaat, laituritaso tai niiden osa.
- *Poistumistapahtuman tarkastelu.* Arvioidaan poistumisreitit ja -tavat eri tiloista ottaen huomioon palotapaukset erikseen kussakin tilassa. Tarkastelussa tulee ottaa huomioon eri henkilöryhmien poistuminen, mm. tavallisten matkustajien, liikuntarajoitteisten matkustajien ja henkilökunnan poistuminen. Tässä vaiheessa otetaan myös huomioon henkilökunnan toiminta yleisön hälyttämisessä.
- *Henkilövirtojen määrittäminen.* Poistumisreittien määrittelyn jälkeen lasketaan perinteisiä menetelmiä käyttäen henkilövirrat reittien eri kohdissa. Tässä otetaan huomioon esimerkiksi kulkureitin leveys, henkilötiheys ja liukuportaiden nopeus. Ana-

lyysin perusteella on mahdollista todeta poistumisreittien mahdolliset ”pullonkaulat” ja tehdä tarvittavat muutokset suunnitelmiin tilanteen korjaamiseksi.

- *Tulipalon kehittyminen.* Arvioidaan kunkin tilan palokuorma, mahdolliset syttymislähteet ja palontorjuntatoimenpiteet. Menetelmässä suositellaan kenttämällin käyttöä mm. tulipalon lämpötilojen, savuntiheyden ja myrkyllisten kaasujen pitoisuuksien tilastollisten jakaumien määrittämiseksi.
- *Palontorjuntatoimenpiteet.* Selvitetään kussakin tilassa olevat automaattiset palonilmoittimet, automaattiset sammutusjärjestelmät ja osastoivat rakenteet sekä niiden luotettavuudet tilastotietojen perusteella.
- *Riskianalyysi.* Tapahtumapuutekniikkaa käyttäen lasketaan tulipalon vaikutusten aiheuttamat henkilöriskit. Tällä tavalla on mahdollista selvittää kvantitatiivisesti tiettyyn henkilömäärään liittyvä palotapahtuman riski. Analyysi toistetaan eri henkilömäärillä.
- *Henkilöominaisuuksien arviointi.* Selvitetään yleisön ja henkilökunnan toimintaan, kuten poistumisreittien löytämiseen ja erilaisiin poistumista edistäviin toimenpiteisiin, liittyvät todennäköisyysjakautumat.

Yhdistetään edellä mainittujen vaiheiden tiedot kuvan 7 esittämällä tavalla ja lasketaan menetelmän mukainen henkilöriski.



Kuva 7. Tunnelipalojen henkilöriskin arviointimenetelmä Drayn et al. (1995) mukaan.

Menetelmä on artikkelissa (Dray *et al.* 1995) kuvattu vain periaatteellisella tasolla, ja tietolähteiden osalta viitataan lähinnä 1970- ja 1980-luvuilta peräisin oleviin tutkimuksiin. Menetelmän käytettävyyttä rajoittavat analyysijä varten tarvittavien tilastotietojen puutteellisuudet.

Kirjallisuudessa SPECS-menetelmään on viitattu muutaman kerran katsaustyyppisissä tutkimuksissa 1990-luvun loppupuolella. Menetelmän kehittäjien verkkosivuilla SPECS-menetelmä on kuitenkin edelleen mainittu (Anon. 2004).

5. Poistumissimuloinnit esimerkkikohteissa

Tutkimushankkeen *Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä* osahankkeessa A. *Mitoituspalot ja savun leviäminen* (Hostikka *et al.* 2005) on valittu tulipalojen simulointilaskelmien esimerkkikohteiksi neljä erityyppistä maanalaista tilaa. Valitut kohteet ovat olemassa olevia tiloja, mutta niistä käytetään tässä yhteydessä yksilöimisen sijasta vain niiden käyttöä luonnehtivia kuvauksia:

- kohde 1: pysäköintihallina käytetty väestösuoja
- kohde 2: urheiluhallina käytetty väestösuoja
- kohde 3: metroasema
- kohde 4: yhteiskäyttötunneli.

Tässä luvussa esitetään osahankkeessa B. *Poistumisturvallisuus* tehdyt poistumissimulointilaskelmien tulokset kyseisissä kohteissa. Tutkimushankkeen varsinaisessa loppuraportissa (Hostikka *et al.* 2005) palosimulointien ja poistumissimulointien tuloksia verrataan keskenään ja arvioidaan poistumisen onnistumismahdollisuuksia valituissa tulipalotapauksissa.

Koska käyttökelpoista, erityisesti maanalaisia tiloja varten tarkoitettua poistumisen laske-
kentaohjelmaa ei näyttäisi olevan käytettävissä, on kolmen ensimmäisen esimerkkikohteen poistumissimuloinnit tehty edellä kohdassa 4.3.1 esitetyllä *Simulex*-ohjelmalla (ohjelmaversio 1.2 [Anon. 1996]). Neljännen tapauksen poistuminen on laskettu yksinkertaisella käsilaskentamenetelmällä.

Tutkittavista kohteista laadittiin *Simulex*-ohjelmalla tehtäviä simuloiteja varten mittatarkat pohjapiirustukset kohteiden eri tasoista. Piirrokset laadittiin kaikissa tapauksissa *Autodesk AutoCAD LT 2000i* -ohjelmalla ja tallennettiin simulointiohjelman käyttämässä DXF-muodossa. Portaita ei piirretä erikseen, koska ne luodaan interaktiivisesti ohjelman sisällä. Simuloinnit toteutetaan vaiheittain siten, että ensiksi luetaan ohjelman tilasta laaditut DXF-muotoiset tiedostot. Seuraavaksi eri tasot (myös maanpinta) yhdistetään toisiinsa portailta, joiden leveys ja pituus vastaavat mitoiltaan todellista tilannetta. Kolmannessa vaiheessa määritellään maanpinnan tasolla sijaitsevat kohdat, joissa poistuvien henkilöiden katsotaan saapuneen turvaan. Seuraavassa vaiheessa tilaan sijoitetaan poistuvat henkilöt, joiden ominaisuudet voidaan valita tietyissä rajoissa. Lopuksi simulointi käynnistetään, jolloin poistuvien henkilöiden liikkeitä ja poistumisen etene-
minen ovat jatkuvasti seurattavissa tietokoneen näyttölaitteelta. Poistuneiden henkilöiden lukumäärä kirjautuu tietokoneen muistiin 5 sekunnin välein.

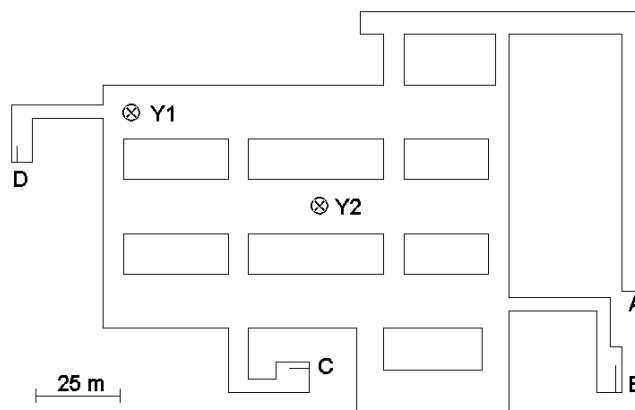
Poistuvien henkilöiden ominaisuudet valitaan *Simulex*-ohjelmassa kahdeksasta valmiiksi määritellystä henkilöryhmästä. Tässä tutkimuksessa on käytetty seuraavia henkilöryhmiä (suluissa ryhmien kokoonpanot):

- toimistohenkilöstöä ”*Office staff*” (40 % miehiä, 30 % naisia, 30 % keskimääräisiä)
- työmatkalaisia ”*Commuters*” (30 % miehiä, 30 % naisia, 10 % lapsia, 30 % keskimääräisiä).

Ohjelma valitsee kaikille henkilöille satunnaisesti esteettömän kävelynopeuden arvon, joka on 0,8–1,7 m/s. Kävelynopeus portaissa alaspäin on 0,5 kertaa em. arvo ja portaissa ylöspäin 0,35 kertaa vastaava arvo. Henkilöiden todellinen kävelynopeus on kuitenkin usein näitä arvoja pienempi, koska nopeus riippuu etäisyydestä ympärillä oleviin henkilöihin, seiniin tai muihin esteisiin. Edellä mainitut ihmistyypit, miehet, naiset, lapset ja keskimääräiset henkilöt, poikkeavat toisistaan ohjelmassa ainoastaan fyysisen kokonsa suhteen, jolla siten on vaikutus yksilöiden nopeuteen henkilöryhmässä.

5.1 Esimerkkikohde 1: Pysäköintihallina käytetty väestösuoja

Tarkastelujen kohteeksi valittu väestösuoja toimii normaalioloissa noin 260 henkilöautolle tarkoitettuna pysäköintihallina. Kuvassa 8 on poistumissimuloinneissa käytetty kohdetta esittävä pohjapiirros. Varsinaisena pysäköintitilana toimii kolme noin 120 m pitkää ja 16,5 m leveää hallia. Piirroksessa ajoluiska on merkitty kirjaimella **A** ja kirjaimilla **B**, **C** ja **D** on merkitty maanpinnan tasolle johtavien porrashuoneiden ja hissikuilujen paikat. Porrashuoneet on erotettu hallitilasta osastoivin ovin. Tunnuksilla **Y1** ja **Y2** on merkitty palosimuloinneissa käytettyjen mitoituspalojen sijainnit.



Kuva 8. Esimerkkikohde 1: Pysäköintihallina käytetty väestösuoja. Merkinnot: **A** – ajoluiska; **B**, **C** ja **D** – maanpinnan tasolle johtavat porrashuoneet ja hissikuilut; **Y1** ja **Y2** – mitoituspalojen paikat palosimuloinneissa.

Simuloituja poistumistilanteita on kolme, joista jokainen tilanne toistettiin 10 kertaa. Ohjelman suoritus aika *Intel Pentium*TM 800 MHz -prosessorilla varustetulla tietokoneella oli vain muutama minuutti.

Perustapaus: Normaali poistuminen (ei palotilannetta), jolloin kaikki uloskäytävät ovat esteettömästi käytettävissä. Henkilöiden oletettiin poistuvan lähimmän uloskäytävän kautta. Henkilömääräksi oletettiin 50 henkilöä, jotka edustivat henkilöryhmää ”toimistohenkilöstö”. Henkilöiden reagoitajaksi oletettiin 60 ± 15 s (tasajakautuma). Kymmenessä tehdyssä simuloinnissa saatiin poistumisajan keskiarvoksi $m = 4$ min 44 s (hajonta $s = 20$ s, maksimiaika *max* 5 min 17 s, minimiaika *min* 4 min 22 s). Porrashuoneet **B**, **C** ja **D** ovat rakentamismääräysten tarkoittamia uloskäytäviä, joiden kautta turvallinen poistuminen maan pinnalle on mahdollista. Sen vuoksi on tarkasteltu erikseen myös aikaa, jolloin viimeinen kyseistä uloskäytävää käyttävä henkilö on siirtynyt hallitilasta porrashuoneeseen. Kymmenessä simuloinnissa saatiin taulukossa 3 esitettävät tulokset.

Taulukko 3. Poistuminen esimerkkikohteen 1 pysäköintihallina käytetystä väestösuojasta. Perustapaus (ei palotilannetta). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen tiettyä uloskäytävää käyttävä henkilö on siirtynyt hallitilasta kyseiseen porrashuoneeseen. Simulointi on toistettu 10 kertaa.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]			
	Keskiarvo <i>m</i>	Hajonta <i>s</i>	Maksimiarvo <i>max</i>	Minimiarvo <i>min</i>
Viimeinen maan pinnalla	4:44	0:20	5:17	4:22
Viimeinen porrashuoneeseen B	2:39	0:14	2:56	2:11
Viimeinen porrashuoneeseen C	2:57	0:13	2:59	2:22
Viimeinen porrashuoneeseen D	2:56	0:20	3:01	2:13
Viimeinen ajoluiskaan A	1:59	0:08	2:07	1:44

Palotapaus Y1: Koska palotapauksessa **Y1** tulipalon oletetaan syttyvän uloskäytävän **D** edessä, ei kyseinen uloskäytävä ole käytettävissä. Henkilöiden oletettiin poistuvan lähimmän käyttökelpoisen uloskäytävän kautta. Henkilöominaisuudet ovat samat kuin perustapauksessa. Simuloinneissa saatiin poistumisajan keskiarvoksi 4 min 54 s ($s = 18$ s, *max* 5 min 29 s, *min* 4 min 36 s). Taulukossa 4 esitetään kymmenessä simuloinnissa saadut tulokset.

Taulukko 4. Poistuminen esimerkikohteen 1 pysäköintihallina käytetystä väestösuojasta. Palotapaus **Y1** (palo estää uloskäytävän **D** käytön). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen tiettyä uloskäytävää käyttävä henkilö on siirtynyt hallitilasta kyseiseen porrashuoneeseen. Simulointi on toistettu 10 kertaa.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]			
	Keskiarvo <i>m</i>	Hajonta <i>s</i>	Maksimiarvo <i>max</i>	Minimiarvo <i>min</i>
Viimeinen maan pinnalla	4:54	0:18	5:29	4:36
Viimeinen porrashuoneeseen B	2:40	0:12	2:57	2:19
Viimeinen porrashuoneeseen C	2:50	0:14	3:14	2:32
Viimeinen ajoluiskaan A	1:51	0:16	2:16	1:17

Palotapaus **Y2**: Palotapauksen **Y2** tulipalon oletetaan estävän ajoluiskan **A** ja uloskäytävän **B** käytön. Henkilöiden oletettiin poistuvan lähimmän käyttökelpoisen uloskäytävän kautta. Henkilöominaisuudet ovat samat kuin perustapauksessa. Simuloinneissa saatiin poistumisajan keskiarvoksi 5 min 9 s ($s = 16$ s, max 5 min 30 s, min 4 min 36 s). Taulukossa 5 esitetään kymmenessä simuloinnissa saadut tulokset.

Arvioitaessa poistumisen onnistumista on palotapauksissa **Y1** ja **Y2** poistumisaikaan vielä lisättävä aika, joka kuluu palon syttymisestä siihen, kun paloilmotitimet tms. antavat hälytyksen hallissa oleville henkilöille (vrt. Hostikka *et al.* [2005]).

Tarkastelluissa kolmessa tapauksessa henkilömäärä (50 hlöä) on hyvin pieni hallin pinta-alaan nähden eikä ruuhkautumista porrashuoneiden ovissa juurikaan pääse tapahtumaan. Tällöin poistumisaika riippuu lähes yksinomaan kävelymatkan pituudesta. Tässä tapauksessa olisi käsilaskentamenetelmillä päädytty hyvin samankaltaisiin poistumisaikoihin. Laskelmissa on oletettu, että hissejä ei käytetä poistumiseen vaan poistuminen tapahtuu yksinomaan portaiden (ja ajoluiskan kautta). Hissien käyttö lyhentäisi todennäköisesti kokonaispoistumisaikoja pieni henkilömäärä huomioon ottaen.

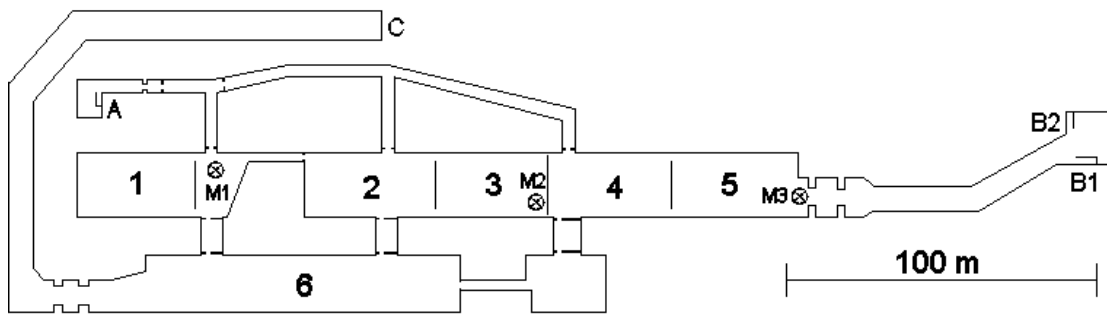
Taulukko 5. Poistuminen esimerkikohteen 1 pysäköintihallina käytetystä väestösuojasta. Palotapaus Y2 (palo estää uloskäytävän B ja ajoluiskan A käytön). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen tiettyä uloskäytävää käyttävä henkilö on siirtynyt hallitilasta kyseiseen porrashuoneeseen. Simulointi on toistettu 10 kertaa.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]			
	Keskiarvo <i>m</i>	Hajonta <i>s</i>	Maksimiarvo <i>max</i>	Minimiarvo <i>min</i>
Viimeinen maan pinnalla	5:09	0:16	5:30	4:36
Viimeinen porrashuoneeseen C	3:21	0:16	3:49	2:59
Viimeinen porrashuoneeseen D	2:47	0:16	3:19	2:29

5.2 Esimerkkikohte 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja

Esimerkkikohteen 2 väestösuojassa on normaalioloissa viisi 36 m × 18 m kokoista salibandykenttää, kahvio sekä noin 80 henkilöautolle tarkoitettu pysäköintihalli. Kuvassa 9 on poistumissimuloinneissa käytetty kohdetta esittävä pohjapiirros. Salibandykentät ja kahvio sijaitsevat 233 m × 21 m kokoisessa hallissa ja pysäköintitila 100 m × 18 m kokoisessa hallissa. Piirroksessa on numeroilla 1–5 merkitty viisi salibandykenttää ja numerolla 6 pysäköintihalli. Kahvila aputiloineen sijaitsee kenttien 1 ja 2 välissä. Maanpinnalle johtavien porrashuoneiden ja hissikuilujen paikat on merkitty kirjaimilla A, B1 ja B2. Porrashuoneet on erotettu käytävistä osastoivin ovin. Ajoluiska on merkitty kirjaimella C. Tunnuksilla M1, M2 ja M3 on merkitty palosimuloinneissa käytettyjen mitoituspalojen sijainnit.

Normaaliolojen suunnitellut henkilömäärät ovat 60 hlöä/salibandykenttä eli yhteensä 300 henkilöä ja autohallissa vastaavasti 60 henkilöä. Kokonaishenkilömäärä on siten 360. Osan vuodesta salibandytilat toimivat myös näyttelytilana. Edellä mainitut henkilömäärärajoitukset koskevat myös näyttelytoimintaa.



Kuva 9. Esimerkkikohde 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja. Merkinnät: 1–5 – sali-bandykentät; 6 – pysäköintihalli; A, B1 ja B2 – maanpinnan tasolle johtavat porashuoneet ja hissikuilut; C – ajoluiska; M1, M2 ja M3 – mitoituspalojen paikat palo-simuloinneissa.

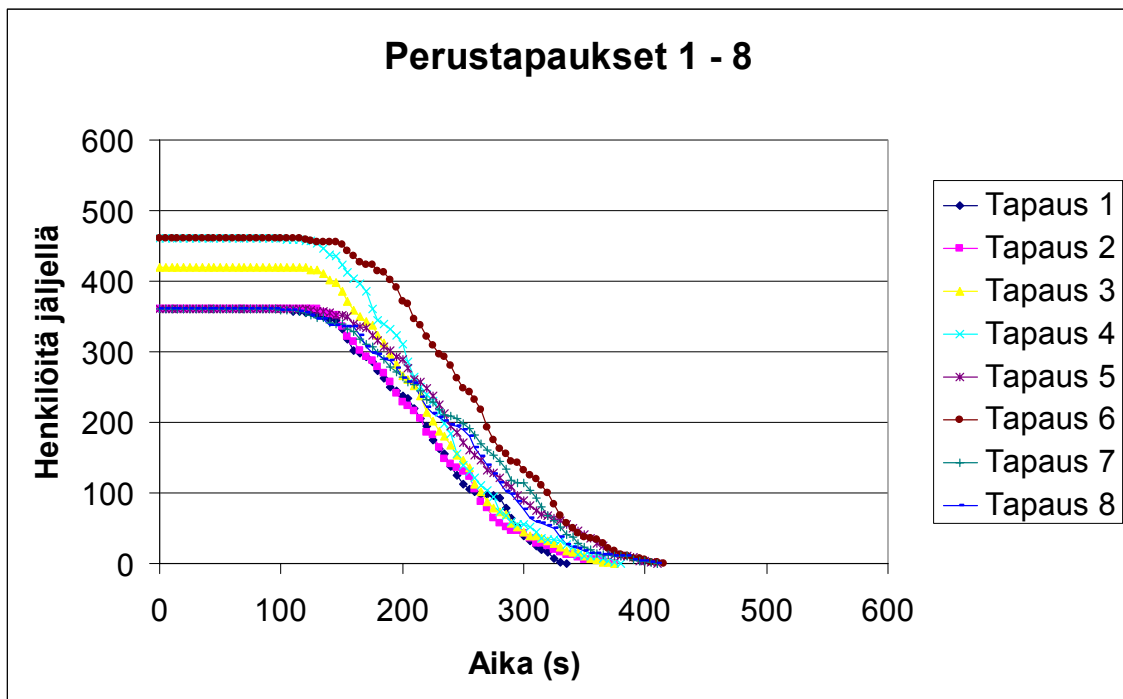
Simuloituja poistumistilanteita on neljä, joista jokaisesta on simuloitu 3–8 tapausta, yhteensä 19 tapausta. Ohjelman suoritus aika oli näissä tapauksissa 3–4 tuntia.

Perustapaukset 1–8: Normaali poistuminen (ei palotilannetta). Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat” ja heidän reagointiaikansa oletettiin olevan $1 \pm 0,5$ s (tasajakautuma). Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- *Tapaus 1:* 360 henkilöä, poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta.
- *Tapaus 2:* 360 henkilöä, pakotettu poistuminen – kentät 1 ja 2 uloskäytävän A kautta; kentät 3–5 uloskäytävien B1 ja B2 kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.
- *Tapaus 3:* 400 henkilöä, pakotettu poistuminen kuten Tapaus 2 mutta suuremmalla henkilömäärällä.
- *Tapaus 4:* 460 henkilöä, pakotettu poistuminen kuten Tapaukset 2 ja 3 mutta vielä suuremmalla henkilömäärällä.
- *Tapaus 5:* 360 henkilöä, uloskäytävä A ei ollut käytössä – poistuminen lähimmän käyttökelpoisen uloskäytävän kautta.
- *Tapaus 6:* 460 henkilöä, kuten Tapaus 5, mutta suuremmalla henkilömäärällä.
- *Tapaus 7:* 360 henkilöä, uloskäytävät B1 ja B2 eivät olleet käytössä – poistuminen lähimmän käyttökelpoisen uloskäytävän kautta.
- *Tapaus 8:* 360 henkilöä, uloskäytävät B1 ja B2 eivät olleet käytössä – pakotettu poistuminen – kentät 1–5 uloskäytävän A kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.

Yksityiskohtaisempia tietoja näistä sekä myöhemmin esitetyistä tapauksista on liitteessä B.

Kuvassa 10 esitetään väestösuoja, sen käytävissä, portaikoissa ja ajoluiskassa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 1–8 kokonaispoistumisajat olivat 5:35, 6:15, 6:15, 6:20, 6:50, 6:55, 6:50 ja 6:50 min:s. Tapaukset, joissa joko uloskäytävä **A** tai uloskäytävät **B1** ja **B2** eivät olleet käytettävissä, näyttävät vaikuttavan poistumisaikaan vähemmän kuin 1 minuutin.



Kuva 10. Esimerkkikohde 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja. Simulointilaskelmien tulokset perustapauksissa 1–8: väestösuojan tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen.

Taulukossa 6 esitetään aika, jolloin viimeinen henkilö on poistunut kentältä 1–6, sekä aika, jolloin viimeinen uloskäytävää **A** tai **B** käyttävä henkilö on siirtynyt vastaavaan porrashuoneeseen (porrashuoneita **B1** ja **B2** tarkastellaan tässä yhdessä).

Taulukko 6. Poistuminen esimerkkitilanteen 2 urheiluhallina käytetystä väestösuojasta. Perustapaukset 1–8 (ei palotilannetta). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen henkilö on poistunut kentältä 1–6, sekä ajat, jolloin viimeinen uloskäytävää A tai B (B1 ja B2 yhdessä) käyttävä henkilö on siirtynyt vastaavaan porrashuoneeseen. Aika alkaa poistumisen käynnistymisestä, jolloin kaikki henkilöt alkavat samanaikaisesti poistua hallitiloista.

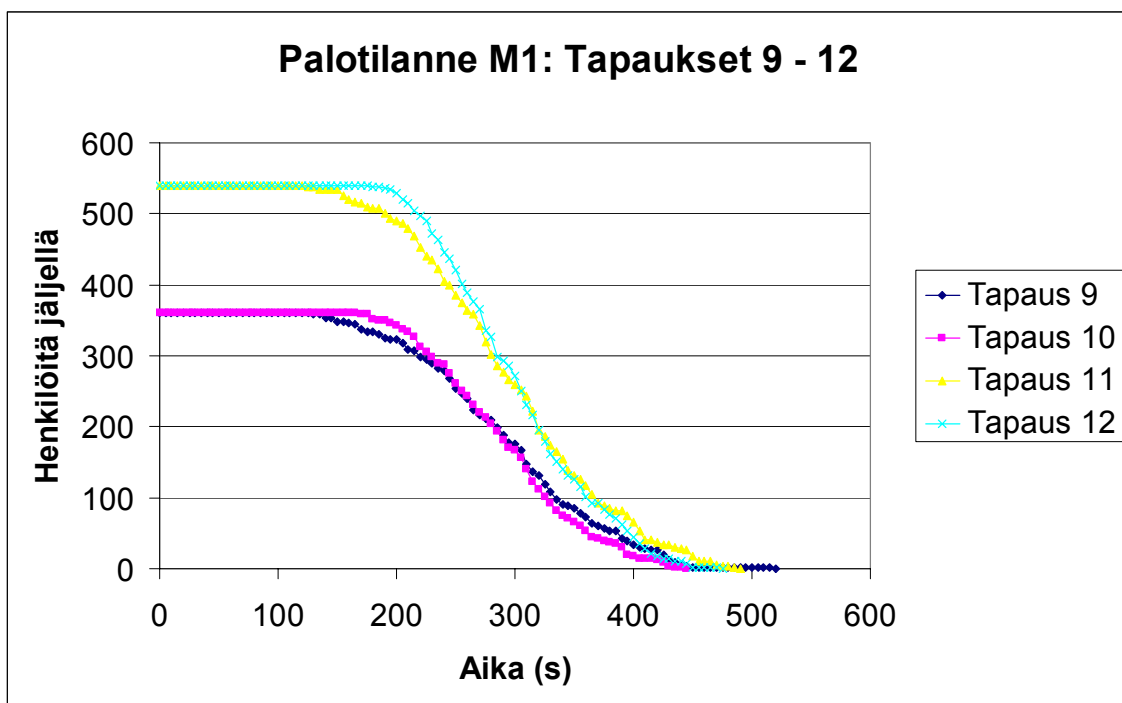
Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]							
	Tapaus:							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Viimeinen maan pinnalla	5:35	6:15	6:15	6:20	6:50	6:55	6:50	6:50
Viimeinen kentältä 1	2:15	1:22	1:20	1:26	1:12	1:13	2:28	2:29
Viimeinen kentältä 2	1:45	0:49	0:46	0:45	0:31	0:32	1:53	1:53
Viimeinen kentältä 3	0:51	0:39	0:40	0:42	1:09	1:16	1:00	1:00
Viimeinen kentältä 4	0:44	1:25	1:25	1:31	2:00	2:05	1:22	1:22
Viimeinen kentältä 5	1:38	2:18	2:18	2:27	2:54	3:00	0:44	0:43
Viimeinen kentältä 6	1:08	2:01	2:03	2:01	2:16	2:22	0:51	2:11
Viimeinen porrashuoneeseen A	3:25	2:32	2:37	2:43	–	–	4:40	4:40
Viimeinen porrashuoneeseen B	3:28	4:05	4:09	4:18	4:43	4:50	–	–

Palotilanne M1 – tapaukset 9–12: Tulipalon oletetaan syttyneen kahvilan keittiössä sali-bandykenttien 1 ja 2 välissä. Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat”. Heidän reagointiaikansa oletettiin vaihtelevan eri kentillä seuraavasti sen mukaan, kuinka kaukana he sijaitsivat syttymiskohdasta: Kenttä 1 – 15 ± 5 s (tasajakautuma), kenttä 2 – 30 ± 15 s, kenttä 3 – 45 ± 15 s, kentät 4 ja 5 – 60 ± 30 s. Pysäköintihallissa olevien henkilöiden reagointiaikoina käytettiin aikoja 120 ± 30 s ja 30 ± 15 s. Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- Tapaus 9: 360 henkilöä, pakotettu poistuminen – kenttä 1 uloskäytävän A kautta; kentät 2–5 uloskäytävien B1 ja B2 kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.
- Tapaus 10: 360 henkilöä, uloskäytävä A ei ollut käytettävissä – pakotettu poistuminen – kenttä 1 uloskäytävän C (ajoluiska) kautta; kentät 2–5 uloskäytävien B1 ja B2 kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.

- *Tapaus 11*: 540 henkilöä, pakotettu poistuminen kuten Tapaus 9 mutta suuremmalla henkilömäärällä.
- *Tapaus 12*: 540 henkilöä, uloskäytävä A ei ollut käytettävissä – pakotettu poistuminen kuten Tapaus 10 mutta suuremmalla henkilömäärällä.

Kuvassa 11 esitetään väestösuoja, sen käytävissä, portaikoissa ja ajoluiskassa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 9–12 kokonaispoistumisajat olivat 8:40, 7:25, 8:10 ja 7:55 min:s. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta. Näiden tulosten mukaan henkilömäärällä – 360 tai 540 – ei näyttäisi olevan suurtakaan vaikutusta kokonaispoistumisaikaan. Taulukossa 7 on yksityiskohtaisempia tietoja simulointien tuloksista tapauksissa 9–12.



Kuva 11. Esimerkkikohde 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja. Simulointilaskelmien tulokset palotilanteessa **M1**, tapauksissa 9–12: väestösuojan tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

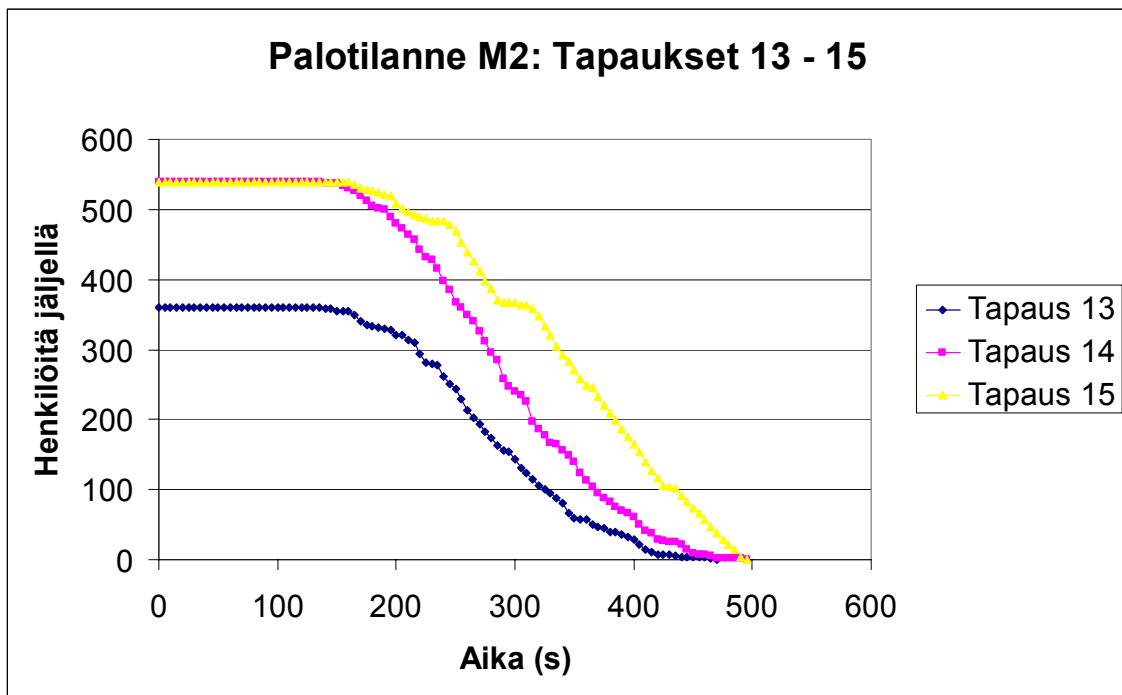
Taulukko 7. Poistuminen esimerkkitilanteen 2 urheiluhallina käytetystä väestösuojasta. Palotilanne M1 (palo kentän 1 viereisessä kahviossa). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen henkilö on poistunut kentältä 1–6, sekä ajat, jolloin viimeinen uloskäytävää A tai B (B1 ja B2 yhdessä) käyttävä henkilö on siirtynyt vastaavaan porrashuoneeseen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]			
	9	10	11	12
Viimeinen maan pinnalla	8:40	7:25	8:10	7:55
Viimeinen kentältä 1	1:08	1:07	1:09	1:17
Viimeinen kentältä 2	1:19	1:19	1:24	1:24
Viimeinen kentältä 3	2:01	2:01	2:08	2:09
Viimeinen kentältä 4	2:48	2:49	2:58	2:58
Viimeinen kentältä 5	3:41	3:40	3:55	3:55
Viimeinen kentältä 6	4:42	2:42	4:33	2:57
Viimeinen porrashuoneeseen A	2:15	–	2:22	–
Viimeinen porrashuoneeseen B	5:23	5:25	5:45	5:44

Palotilanne M2 – tapaukset 13–15: Tulipalon oletetaan syttyneen salibandykentällä 3. Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat”. Heidän reagointiaikansa oletettiin vaihtelevan eri kentillä seuraavasti sen mukaan, kuinka kaukana he sijaitsivat syttymiskohdasta: Kentät 1 ja 3 – 30 ± 15 s (tasajakautuma), kenttä 2 – 15 ± 5 s, kenttä 4 – 45 ± 15 s, kenttä 5 – 60 ± 15 s. Pysäköintihallissa olevien henkilöiden reagointiaika oli 120 ± 30 s. Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- *Tapaus 13:* 360 henkilöä, pakotettu poistuminen – kenttä 1 uloskäytävän A kautta; kentät 2–5 uloskäytävien B1 ja B2 kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.
- *Tapaus 14:* 540 henkilöä, pakotettu poistuminen kuten Tapaus 13 mutta suuremmalla henkilömäärällä.
- *Tapaus 15:* 540 henkilöä, uloskäytävät B1 ja B2 eivät olleet käytettävissä – pakotettu poistuminen – kentät 1–5 uloskäytävän A kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.

Kuvassa 12 esitetään väestösuoja, sen käytävissä, portaikoissa ja ajoluiskassa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 13–15 kokonaispoistumisajat olivat 7:50, 8:15 ja 8:15 min:s. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta. Tapausten 13–15 käyrän poikkeava muoto johtuu siitä, että poistuminen tapahtuu lähes yksinomaan uloskäytävän A kautta, jossa esiintyy ruuhkautumista poistumisen päättymiseen asti. Taulukossa 8 on yksityiskohtaisempia tietoja simulointien tuloksista tapauksissa 13–15.



Kuva 12. Esimerkkikohde 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja. Simulointilaskelmien tulokset palotilanteessa M2, tapauksissa 13–15: väestösuojan tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

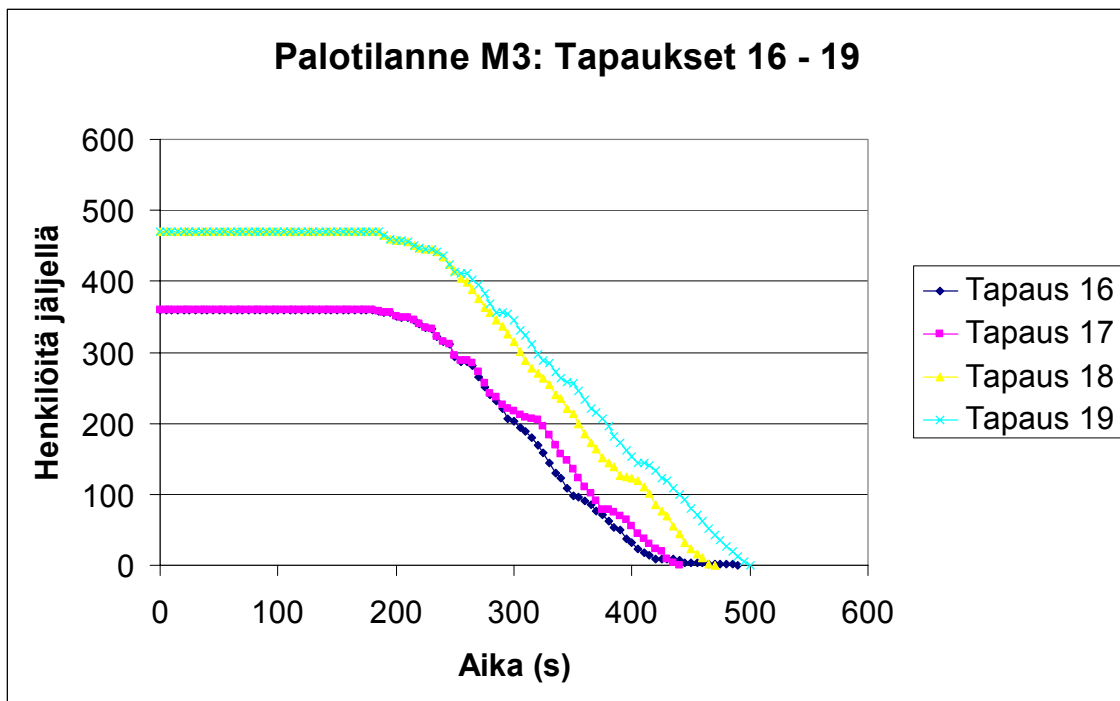
Taulukko 8. Poistuminen esimerkkikohteen 2 urheiluhallina käytetystä väestösuojasta. Palotilanne M2 (palo kentässä 3). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen henkilö on poistunut kentältä 1–6, sekä ajat, jolloin viimeinen uloskäytävää A tai B (B1 ja B2 yhdessä) käyttävä henkilö on siirtynyt vastaavaan porrashuoneeseen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]		
	Tapaus:		
	13	14	15
Viimeinen maan pinnalla	7:50	8:15	8:15
Viimeinen kentältä 1	1:18	1:21	4:14
Viimeinen kentältä 2	0:55	0:58	3:40
Viimeinen kentältä 3	1:32	1:44	1:21
Viimeinen kentältä 4	2:17	2:36	2:22
Viimeinen kentältä 5	3:08	3:29	1:48
Viimeinen kentältä 6	4:20	4:27	3:10
Viimeinen porrashuoneeseen A	2:23	2:34	6:06
Viimeinen porrashuoneeseen B	4:55	5:22	–

Palotilanne M3 – tapaukset 16–19: Tulipalon oletetaan syttyneen salibandykentällä 5 siten, että se kaikissa tapauksissa estää uloskäytävien B1 ja B2 käytön. Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat”. Heidän reagointiaikansa oletettiin vaihtelevan eri kentillä seuraavasti sen mukaan, kuinka kaukana he sijaitsivat syttymiskohdasta: Kenttä 1 – 120 ± 30 s (tasajakautuma), kenttä 2 – 60 ± 15 s, kenttä 3 – 45 ± 15 s, kenttä 4 – 30 ± 15 s, kenttä 5 – 15 ± 5 s. Pysäköintihallissa olevien henkilöiden reagointiaika oli 120 ± 30 s. Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- *Tapaus 16:* 360 henkilöä, pakotettu poistuminen – kentät 1–5 uloskäytävän A kautta; pysäköintihalli uloskäytävän C (ajoluiska) kautta.
- *Tapaus 17:* 360 henkilöä, pakotettu poistuminen – kentät 1–5 ja pysäköintihalli uloskäytävän A kautta.
- *Tapaus 18:* 470 henkilöä, pakotettu poistuminen kuten tapaus 16 mutta suuremmalla henkilömäärällä.
- *Tapaus 19:* 470 henkilöä, pakotettu poistuminen kuten tapaus 17 mutta suuremmalla henkilömäärällä.

Kuvassa 13 esitetään väestösuoja, sen käytävissä, portaikoissa ja ajoluiskassa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 16–19 kokonaispoistumisajat olivat 8:10, 7:20, 7:50 ja 8:20 min:s. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta. Tapausten 18 ja 19 käyrien poikkeavat muodot johtuvat siitä, että poistuminen tapahtuu lähes yksinomaan uloskäytävän A kautta, jossa esiintyy ruuhkautumista poistumisen päättymiseen asti. Taulukossa 9 on yksityiskohtaisempia tietoja simulointien tuloksista tapauksissa 16–19.



Kuva 13. Esimerkkikohde 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja. Simulointilaskelmien tulokset palotilanteessa M3, tapauksissa 16–19: väestösuojan tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

Taulukko 9. Poistuminen esimerkkikohteen 2 urheiluhallina käytetystä väestösuojasta. Palotilanne M3 (palo kentässä 5, joka estää uloskäytävien B1 ja B2 käytön). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä ajat, jolloin viimeinen henkilö on poistunut kentältä 1–6, sekä ajat, jolloin viimeinen uloskäytävää A käyttävä henkilö on siirtynyt porrashuoneeseen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]			
	16	17	18	19
Viimeinen maan pinnalla	8:10	7:20	7:50	8:20
Viimeinen kentältä 1	3:03	4:05	3:10	4:14
Viimeinen kentältä 2	2:19	3:31	2:22	3:40
Viimeinen kentältä 3	1:30	1:30	1:30	1:31
Viimeinen kentältä 4	1:38	1:37	1:49	1:50
Viimeinen kentältä 5	0:57	0:56	1:01	1:01
Viimeinen kentältä 6	4:13	3:24	3:56	3:07
Viimeinen porrashuoneeseen A	4:56	5:12	5:38	6:12

5.3 Esimerkkikohde 3: Metroasema

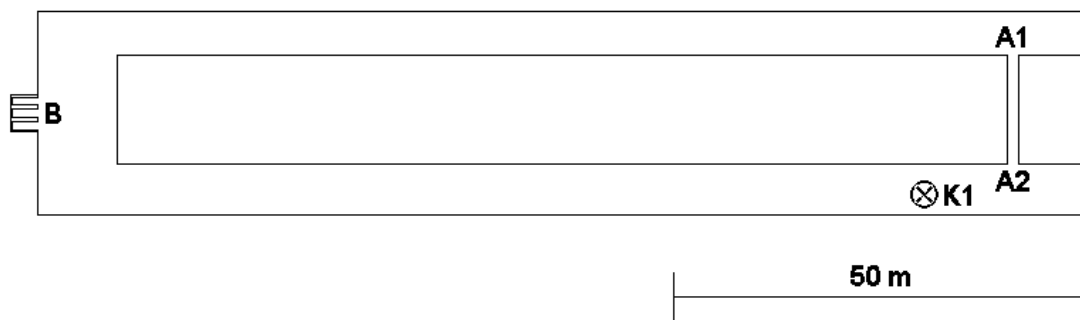
Esimerkkikohteen 3 metroasema on rakenteeltaan kolmikerroksinen maanalainen tila, jossa liikkuu päivittäin noin 25 000 matkustajaa. Alin kerros, noin 130 m pitkä ja 25 m leveä laituritaso, sijaitsee noin 30 m maanpinnan alapuolella, ja siellä ovat sekä etelään että pohjoiseen menevät metroradat. Laituritason yläpuolella, noin 20 m ylempänä, sijaitsee varsinainen lippuhallitaso (noin 110 m × 40 m leveimmältä kohdalta), jonka kautta matkustajaliikenne kulkee laituritasolle. Lippuhallitaso yhtyy useasta kohdasta muihin maanalaisiin liiketiloihin. Laituritason ja lippuhallitason välissä sijaitsee aseman tekninen tila, johon matkustajilla ei ole pääsyä.

Laituritasoa ja lippuhallitasa yhdistävät liukuportaat, joiden kautta matkustajat normaalitilanteessa kulkevat. Laituritason toisessa päässä sijaitsee osastoitu uloskäytävä, johon on yhteys molemmilta laitureilta. Lippuhallitasolta on kolme suoraan maanpinnan tasolle johtavaa kulkureittiä. Kulkuyhteyksiä on myös monien lippuhallitasaan liittyvien

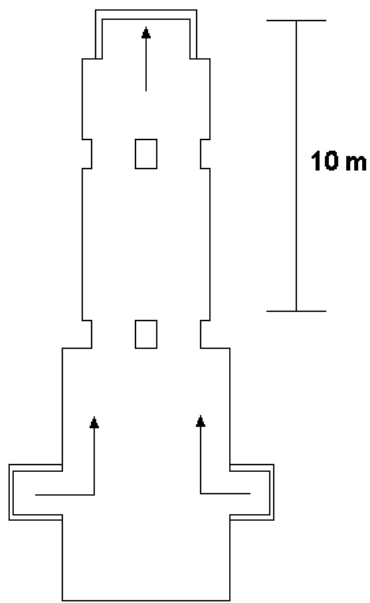
muiden tilojen kautta. Teknisessä tilassa on kaksi lippuhallitasolle johtavaa kulkureittiä, joista toisesta on myös suora yhteys maanpinnan tasolle.

Edellä mainitussa kansainvälisen maanalaisten tilojen rakentamisyhdistysten kattojärjestön ITA:n selvityksessä (Nordmark 2004) käsitellään kohtalaisen yksityiskohtaisesti myös tässä tarkasteltua esimerkkitilanteen 3 metroasemaa. Selvityksestä käy mm. ilmi, että poistumisajalle laituritasolta tai lippuhallitasolta ei ole asetettu minuuttimääräistä vaatimusta. Muutamissa maissa on asetettu raideliikennettä koskevaan standardiin NFPA 130 (2003, 2004) tai kansallisiin säädöksiin viitaten vaatimuksiksi 5–7 min.

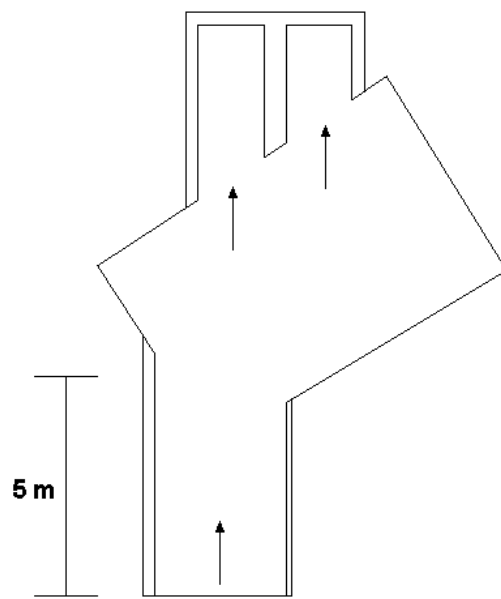
Kuvissa 14a–14e esitetään poistumissimuloinneissa käytettyä kohdetta esittävät eri tasojen pohjapiirroksot. Piirroksissa on tunnuksilla **A1** ja **A2** merkitty laituritasolta osastoituu uloskäytävään johtavien ovien sijainti. Tunnuksella **B** on merkitty lippuhallitasolle johtavien liukuportaiden sijainti. Kirjaimilla **C** ja **D** on merkitty tekniikkatason kulureitit lippuhallitasolle. Kirjaimilla **E–H** on merkitty maanpinnan tasolle johtavat kulureitit ja ovien tai vastaavien sijainnit. Tunnuksilla **K1**, **K2** ja **K3** on merkitty palosimuloinneissa käytettyjen mitoituspalojen sijainnit.



*Kuva 14a. Esimerkkikohde 3: Metroasema – laituritaso. Merkinnyt: **A1** ja **A2** – osastoituu uloskäytävään johtavat ovet; **B** – lippuhallitasolle johtavat liukuportaat; **K1** – mitoituspalon paikka palosimuloinneissa.*

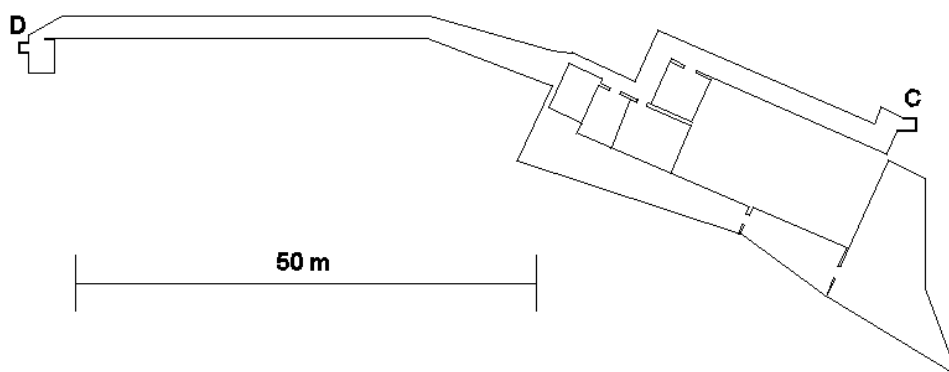


Laituritason uloskäytävä – Osa 1

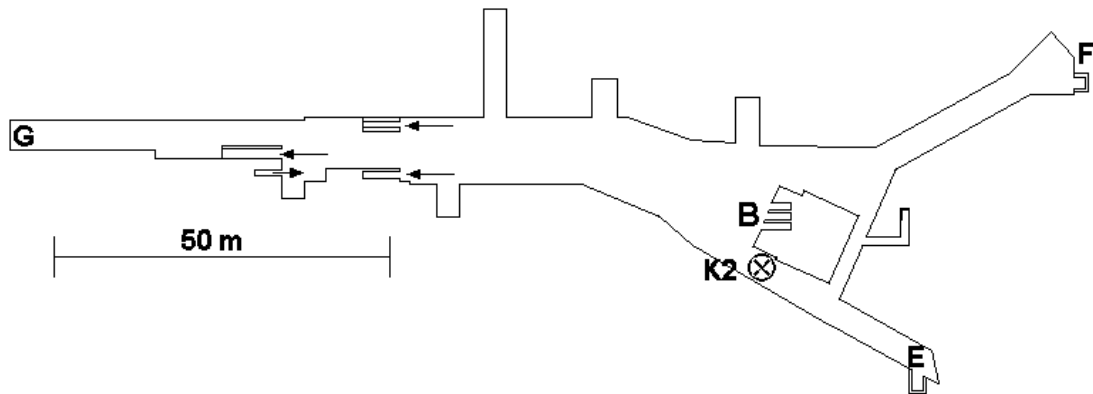


Laituritason uloskäytävä – Osa 2

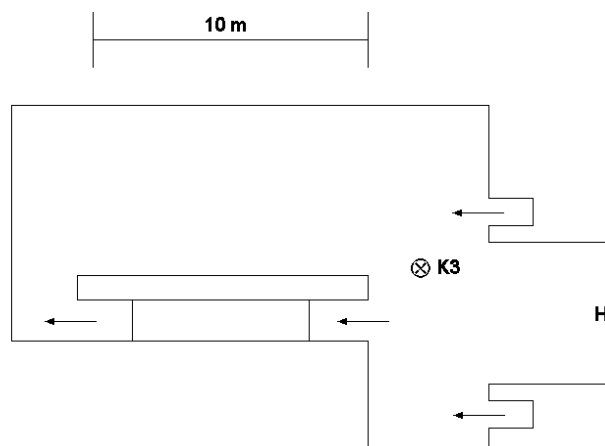
Kuva 14b. Esimerkkikohde 3: Metroasema – laituritasolta johtavan osastoidun uloskäytävän tiloja, jotka sijaitsevat noin 10 m laituritason yläpuolella. Kuvaan 14a merkityistä ovista *A1* ja *A2* kuljetaan portaikkoon, joka johtaa vasemmanpuoleisen kuvan esittämään tilaan, josta edelleen kuljetaan lyhyen portaikon kautta oikeanpuoleisen kuvan esittämään tilaan. Viimeksi mainitusta tilasta johtaa porrashuone suoraan maanpinnan tasolle.



Kuva 14c. Esimerkkikohde 3: Metroasema – tekniikkataso. Merkinnät: *C* ja *D* – kulku-reitti lippuhallitasolle (jälkimmäisestä on yhteys myös maanpinnan tasolle).



Kuva 14d. Esimerkkikohde 3: Metroasema – lippuhallitaso. Merkinnät: **B** – laituritasolle johtavat liukuportaat; **E**, **F** ja **G** – kulkuyhteydet maanpinnan tasolle; maanpinnan tasolla sijaitsevaan tilaan johtavien liukuportaiden ja portaiden sijainti on merkitty nuolin; **K2** – mitoituspalon paikka palosimuloinneissa.



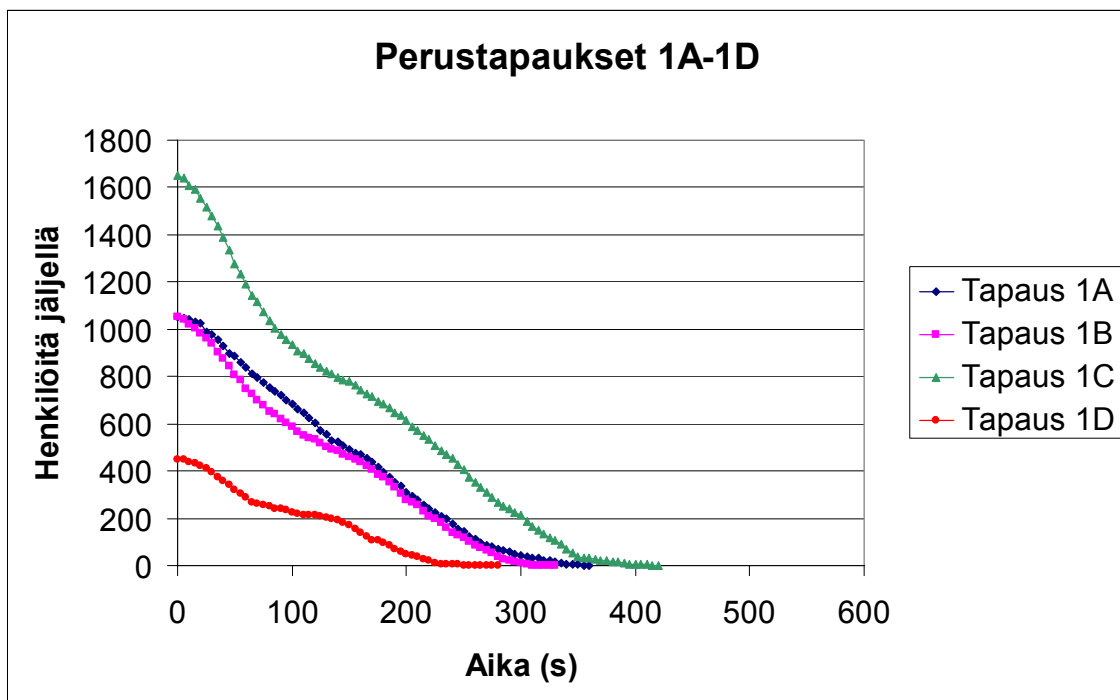
Kuva 14e. Esimerkkikohde 3: Metroasema – maanpinnan tasossa sijaitseva tila, josta on yhteys lippuhallitasolle. Merkinnät: **H** – kadulle avautuva ovi; lippuhallitasolle johtavien liukuportaiden ja portaiden sijainti on merkitty nuolin; **K3** – mitoituspalon paikka palosimuloinneissa.

Simuloituja poistumistilanteita on neljä, joista jokaisesta on simuloitu 3–4 tapausta, yhteensä 13 tapausta. Ohjelman suoritus aika oli näissä tapauksissa 6–7 tuntia.

Perustapaukset 1A–1D: Normaali poistuminen (ei palotilannetta). Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat” ja heidän reagointiaikansa oletettiin olevan $1 \pm 0,5$ s (tasajakautuma). Henkilömääriä ja uloskäytävien käyttöä varioitiin seuraavasti (liitteessä B on yksityiskohtaisempia tietoja simuloituista tapauksista):

- *Tapaus 1A*: 1 050 henkilöä (laituritaso 500, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 500), poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta.
- *Tapaus 1B*: 1 050 henkilöä, pakotettu poistuminen – kaikki uloskäytävät käytössä.
- *Tapaus 1C*: 1 650 henkilöä (laituritaso 800, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 800), pakotettu poistuminen – kaikki uloskäytävät käytössä.
- *Tapaus 1D*: 450 henkilöä (laituritaso 200, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 200), pakotettu poistuminen – kaikki uloskäytävät käytössä.

Kuvassa 15 esitetään metroaseman eri tasoilla, sen käytävissä, portaikoissa ym. tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 1A–1D kokonaispoistumisajat olivat 6:00, 5:30, 7:00 ja 4:40 min:s. Kaikissa simuloituissa tapauksissa syntyi huomattavaa ruuhkautumista, mikä näkyy myös kokonaispoistumisajan selvästä riippuvuudesta henkilömäärään.



Kuva 15. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset perustapauksissa 1A–1D: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen.

Taulukossa 10 esitetään aika, jolloin viimeinen henkilö poistuu uloskäytävään **A** (uloskäytävät **A1** ja **A2** tarkastellaan tässä yhdessä), aika, jolloin viimeinen laituritasolla oleva henkilö siirtyy liukuportaaseen **B**, aika, jolloin viimeinen tekniikkatasolla oleva henkilö siirtyy porrashuoneeseen **C** tai **D**, sekä aika, jolloin viimeinen lippuhallitasolla oleva henkilö siirtyy portaisiin **E** tai **F** sekä uloskäytävään **G**.

Taulukko 10. Poistuminen esimerkkikohteen 2 metroasemalta. Perustapaukset (ei palotilannetta). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä aika, jolloin viimeinen henkilö poistuu uloskäytävään A (uloskäytävät A1 ja A2 tarkastellaan tässä yhdessä), aika, jolloin viimeinen laituritasolla oleva henkilö siirtyy liukuportaaseen B, aika, jolloin viimeinen tekniikkatasolla oleva henkilö siirtyy porrashuoneeseen C tai D, sekä aika, jolloin viimeinen lippuhallitasolla oleva henkilö siirtyy portaisiin E tai F sekä uloskäytävään G. Aika alkaa poistumisen käynnistymisestä, jolloin kaikki henkilöt samanaikaisesti alkavat poistua hallitiloista.

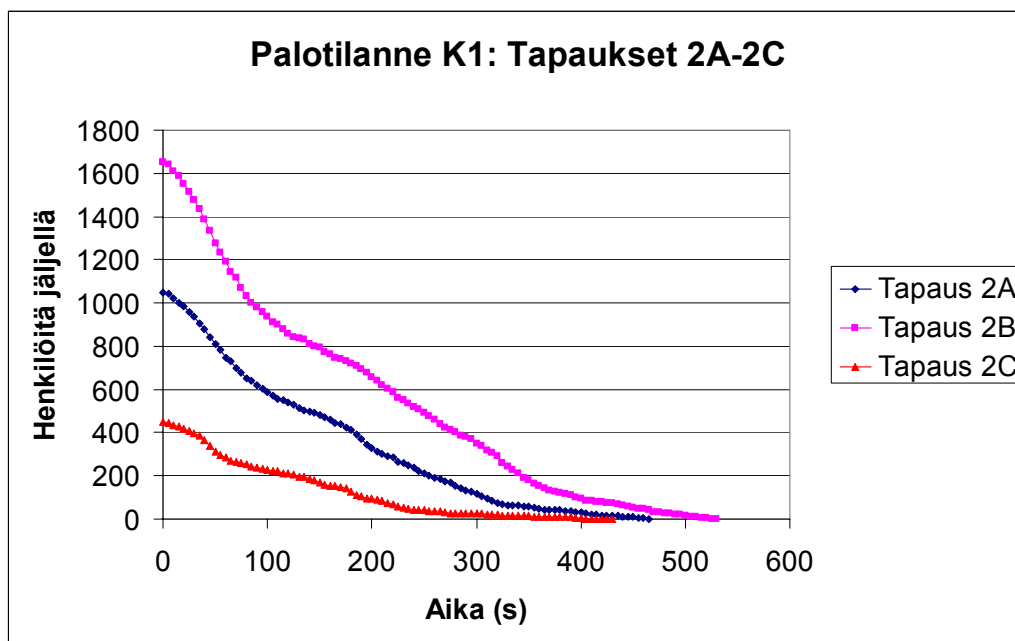
Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]			
	1A	1B	1C	1D
Viimeinen maan pinnalla	6:00	5:30	7:00	4:40
Viimeinen uloskäytävään A	1:39	1:53	2:28	1:13
Viimeinen liukuportaaseen B	3:12	2:03	3:59	1:17
Viimeinen porrashuoneeseen C	2:10	1:51	1:57	1:50
Viimeinen porrashuoneeseen D	0:47	1:10	1:03	1:12
Viimeinen portaaseen E tai F	5:32	4:10	6:32	3:28
Viimeinen uloskäytävään G	0:41	5:29	5:47	4:39

Palotilanne K1 – tapaukset 2A–2C: Tulipalon oletetaan syttyneen laituritasolla (tai junassa), minkä seurauksena uloskäytävä A2 ei ole käytettävissä. Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat” ja heidän reagointiaikansa oletettiin olevan $1 \pm 0,5$ s. Perusteena tälle olettamukselle on, että matkustajille ilmoitetaan aseman kuu-lutusjärjestelmän kautta palosta ja heitä kehoitetaan välittömästi poistumaan asemalta. Proulxin ja Simen (1991) mukaan tehokas hälytystapa on kuulutusjärjestelmän kautta luettu todellinen ilmoitus, jossa matkustajille kerrotaan, minkälaisesta tilanteesta on kysymys ja mitä heidän tulee tehdä. Tällainen ilmoitus johtaa nopeaan poistumisen käynnistymiseen. Vaikka reagointiaika tässä tapauksessa on oletettu erittäin lyhyeksi, ei sillä todennäköisesti ole kovinkaan suurta vaikutusta lopputulokseen, koska kulkureitit ja uloskäytävät ruuhkautuvat nopeasti käynnistymisen alkamisen jälkeen. Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- Tapaus 2A: 1 050 henkilöä (laituritaso 500, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 500), pakotettu poistuminen – uloskäytävä A2 ei ollut käytössä.

- *Tapaus 2B*: 1 650 henkilöä (laituritaso 800, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 800), pakotettu poistuminen – uloskäytävä **A2** ei ollut käytössä.
- *Tapaus 2C*: 450 henkilöä (laituritaso 200, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 200), pakotettu poistuminen – uloskäytävä **A2** ei ollut käytössä.

Kuvassa 16 esitetään metroaseman eri tasoilla, sen käytävissä, portaikoissa ym. tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 2A–2C kokonaispoistumisajat olivat 7:45, 8:50 ja 7:10 min:s. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta. Perustapauksiin 1B–1D verrattuna kokonaispoistumisajat pitenevät noin 2 minuutilla. Taulukossa 11 on yksityiskohtaisempia tietoja simulointien tuloksista tapauksissa 2A–2C.



Kuva 16. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset palotilanteessa **K1**, tapauksissa 2A–2C: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

Taulukko 11. Poistuminen esimerkikohteen 2 metroasemalta. Palotapaus K1 (palo laituritasolla tai junassa, mikä estää uloskäytävän A2 käytön). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä aika, jolloin viimeinen henkilö poistuu uloskäytävään A (tässä tapauksessa uloskäytävä A1), aika, jolloin viimeinen laituritasolla oleva henkilö siirtyy liukuportaaseen B, aika, jolloin viimeinen tekniikkatasolla oleva henkilö siirtyy porrashuoneeseen C tai D, sekä aika, jolloin viimeinen lippuhallitasolla oleva henkilö siirtyy portaisiin E tai F sekä uloskäytävään G. Aika alkaa poistumisen käynnistymisestä, jolloin kaikki henkilöt samanaikaisesti alkavat poistua hallitiloista.

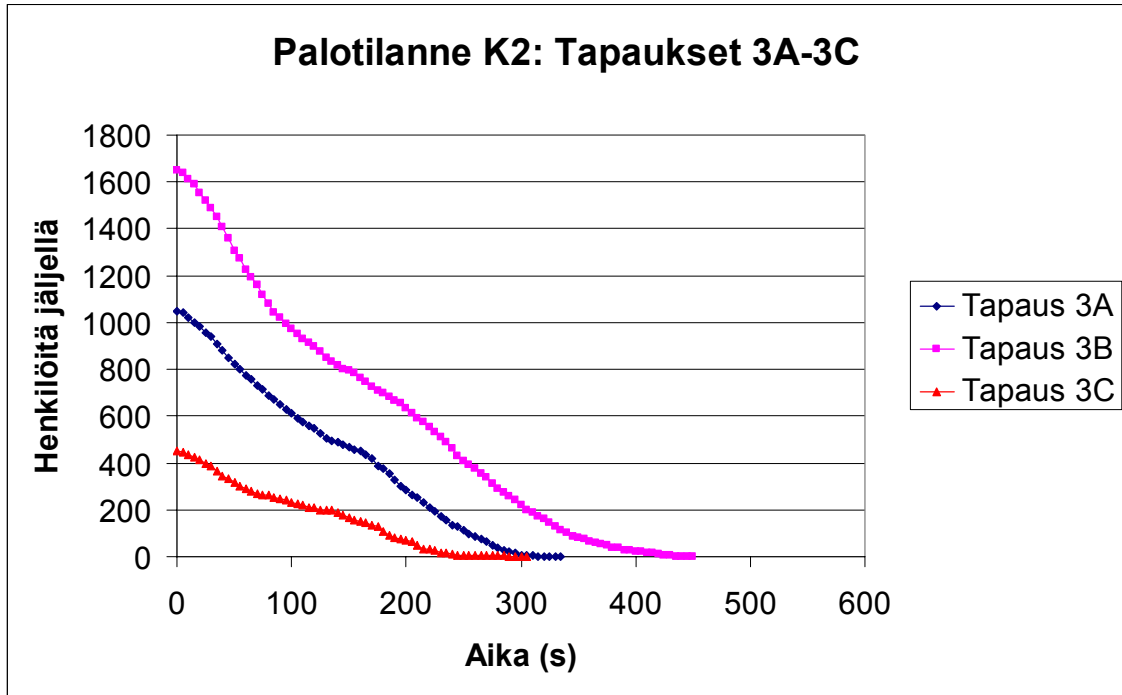
Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]		
	2A	2B	2C
Viimeinen maan pinnalla	7:45	8:50	7:10
Viimeinen uloskäytävään A	5:00	5:34	4:23
Viimeinen liukuportaaseen B	2:04	3:57	1:21
Viimeinen porrashuoneeseen C	1:50	1:58	1:50
Viimeinen porrashuoneeseen D	1:10	1:03	1:11
Viimeinen portaaseen E tai F	4:13	6:36	3:30
Viimeinen uloskäytävään G	5:04	5:42	5:09

Palotilanne K2 – tapaukset 3A–3C: Tulipalon oletetaan syttyneen lippuhallitasolla, minkä seurauksena uloskäytävä E ei ole käytettävissä. Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat” ja heidän reagointiaikansa oletettiin olevan $1 \pm 0,5$ s. Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- *Tapaus 3A:* 1 050 henkilöä (laituritaso 500, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 500), pakotettu poistuminen – uloskäytävä E ei ollut käytössä.
- *Tapaus 3B:* 1 650 henkilöä (laituritaso 800, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 800), pakotettu poistuminen – uloskäytävä E ei ollut käytössä.
- *Tapaus 3C:* 450 henkilöä (laituritaso 200, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 200), pakotettu poistuminen – uloskäytävä E ei ollut käytössä.

Kuvassa 17 esitetään metroaseman eri tasoilla, sen käytävissä, portaikoissa ym. tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 3A–3C kokonaispoistu-

misajat olivat 5:35, 7:30 ja 5:05 min:s. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta. Perustapauksiin 1B–1D verrattuna kokonaispoistumisajat ovat vain hieman pidentyneet. Taulukossa 12 on yksityiskohtaisempia tietoja simulointien tuloksista tapauksissa 3A–3C.



Kuva 17. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset palotilanteessa **K2**, tapauksissa 3A–3C: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

Taulukko 12. Poistuminen esimerkkikohteen 2 metroasemalta. Palotapaus K2 (palo lippuhallitasolla, mikä estää uloskäytävän E käytön). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä aika, jolloin viimeinen henkilö poistuu uloskäytävään A (uloskäytävät A1 ja A2 tarkastellaan tässä yhdessä), aika, jolloin viimeinen laituritasolla oleva henkilö siirtyy liukuportaaseen B, aika, jolloin viimeinen tekniikkatasolla oleva henkilö siirtyy porrashuoneeseen C tai D, sekä aika, jolloin viimeinen lippuhallitasolla oleva henkilö siirtyy portaaseen F sekä uloskäytävään G. Aika alkaa poistumisen käynnistymisestä, jolloin kaikki henkilöt samanaikaisesti alkavat poistua hallitiloista.

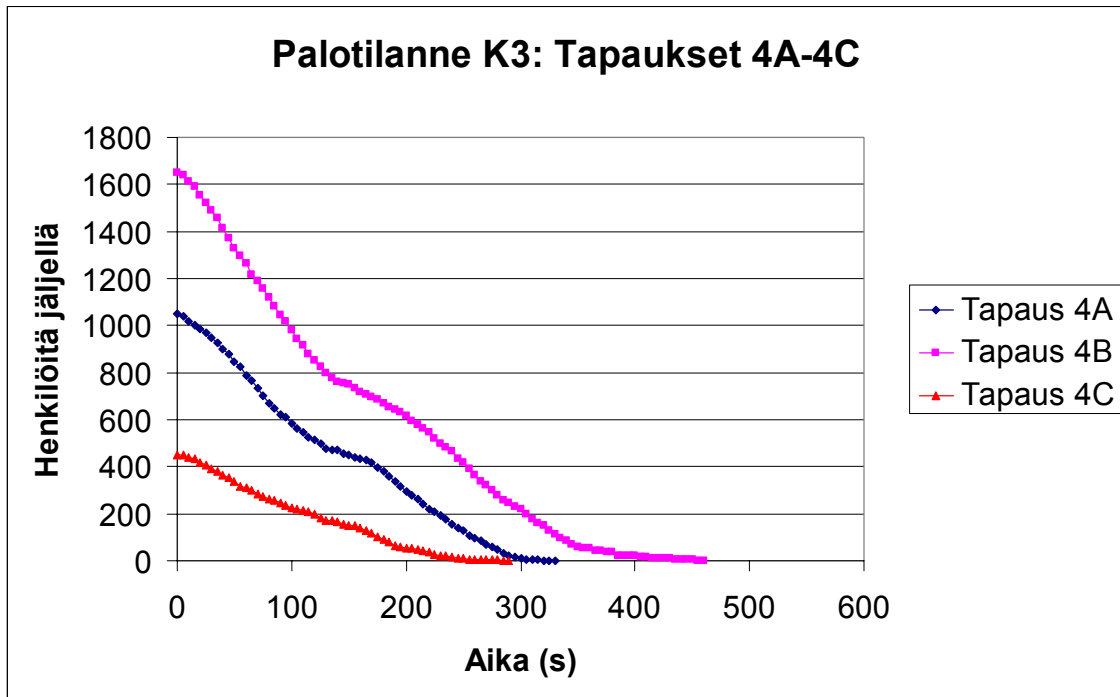
Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]		
	3A	3B	3C
Viimeinen maan pinnalla	5:35	7:30	5:05
Viimeinen uloskäytävään A	1:56	2:26	1:12
Viimeinen liukuportaaseen B	1:54	4:08	1:15
Viimeinen porrashuoneeseen C	1:38	1:35	1:50
Viimeinen porrashuoneeseen D	1:10	1:03	1:08
Viimeinen portaaseen F	4:25	6:44	3:44
Viimeinen uloskäytävään G	5:32	7:29	5:00

Palotilanne K3 – tapaukset 4A–4C: Tulipalon oletetaan syttyneen lippuhallitason keski-vaiheelta katutasossa sijaitsevassa tilassa, minkä seurauksena uloskäytävä H ei ole käytettävissä. Henkilöiden oletettiin edustavan henkilöryhmää ”työmatkailijat” ja heidän reagointiaikansa oletettiin olevan $1 \pm 0,5$ s. Henkilömääriä ja käytettävissä olevia uloskäytäviä varioitiin seuraavasti:

- *Tapaus 4A:* 1 050 henkilöä (laituritaso 500, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 500), pakotettu poistuminen – uloskäytävä H ei ollut käytössä.
- *Tapaus 4B:* 1 650 henkilöä (laituritaso 800, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 800), pakotettu poistuminen – uloskäytävä H ei ollut käytössä.
- *Tapaus 4C:* 450 henkilöä (laituritaso 200, tekniikkataso 50, lippuhallitaso 200), pakotettu poistuminen – uloskäytävä H ei ollut käytössä.

Kuvassa 18 esitetään metroaseman eri tasoilla, sen käytävissä, portaikoissa ym. tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen käynnistymisen jälkeen. Henkilön katsottiin

poistuneen tilasta hänen saapuessaan maanpinnalle. Tapausten 4A–4C kokonaispoistumisajat olivat 5:30, 7:40 ja 4:50 min:s. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta. Ajat ovat lähes samat kuin perustapauksissa 1A–1D. Taulukossa 13 on yksityiskohtaisempia tietoja simulointien tuloksista tapauksissa 4A–4C.

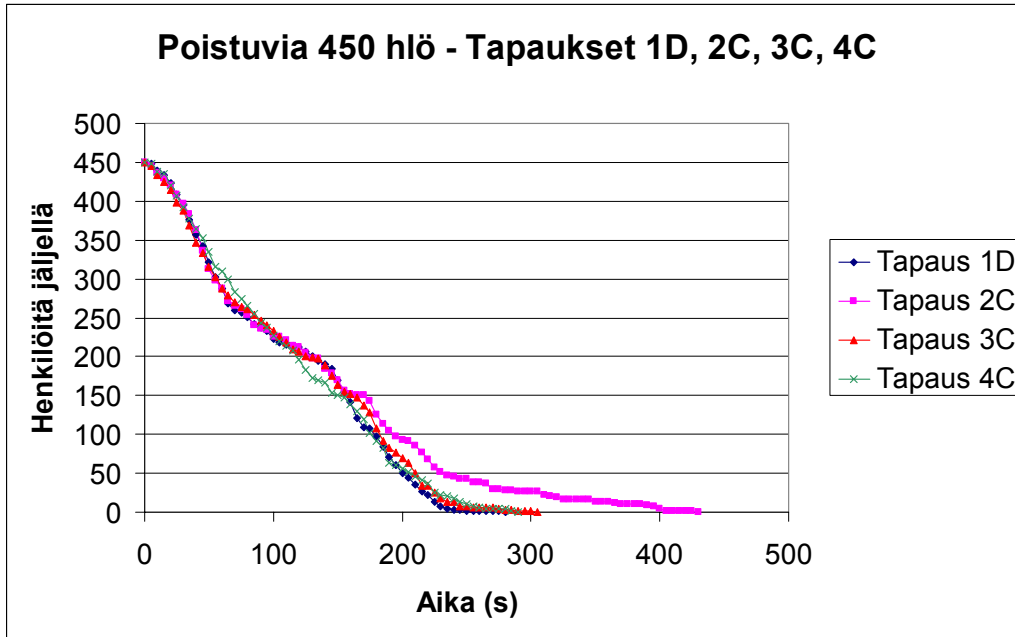


Kuva 18. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset palotilanteessa **K3**, tapauksissa 4A–4C: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

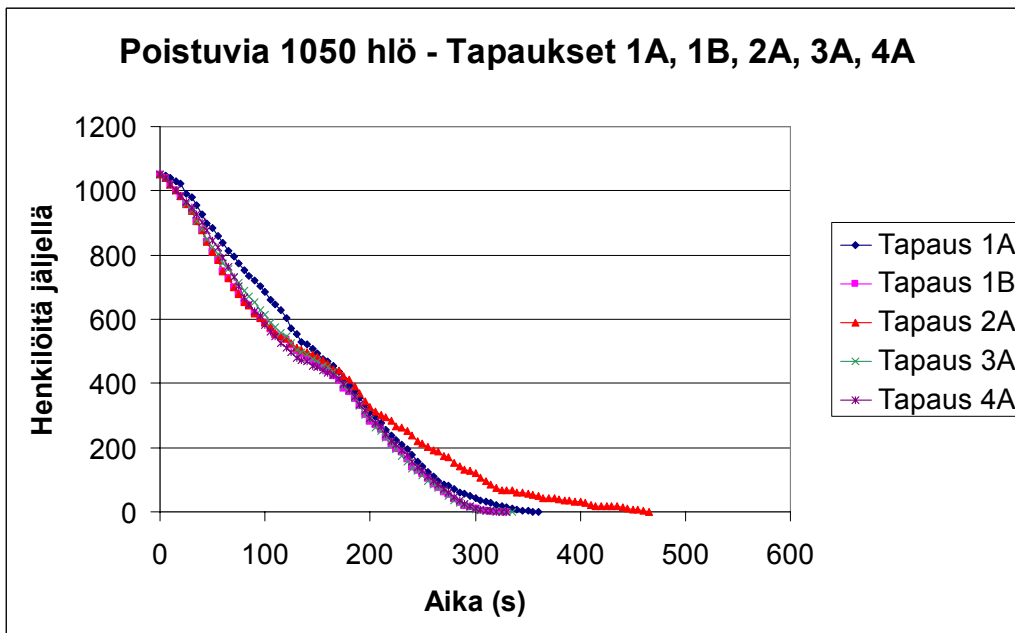
Taulukko 13. Poistuminen esimerkkikohteen 2 metroasemalta. Palotapaus K3 (palo katussa, mikä estää uloskäytävän H käytön). Aika, jolloin kaikki henkilöt ovat saapuneet maan pinnan tasolle, sekä aika, jolloin viimeinen henkilö poistuu uloskäytävään A (uloskäytävät A1 ja A2 tarkastellaan tässä yhdessä), aika, jolloin viimeinen laituritasolla oleva henkilö siirtyy liukuportaaseen B, aika, jolloin viimeinen tekniikkatasolla oleva henkilö siirtyy porrashuoneeseen C tai D, sekä aika, jolloin viimeinen lippuhallitasolla oleva henkilö siirtyy portaisiin E tai F sekä uloskäytävään G. Aika alkaa poistumisen käynnistymisestä, jolloin kaikki henkilöt samanaikaisesti alkavat poistua hallitiloista.

Tapahtuma	Poistumisaika [min:s]		
	4A	4B	4C
Viimeinen maan pinnalla	5:30	7:40	4:50
Viimeinen uloskäytävään A	1:53	2:28	1:31
Viimeinen liukuportaaseen B	2:02	3:59	1:05
Viimeinen porrashuoneeseen C	1:50	1:35	1:50
Viimeinen porrashuoneeseen D	1:10	1:04	1:00
Viimeinen portaaseen E tai F	4:09	6:03	3:04
Viimeinen uloskäytävään G	5:29	7:40	4:49

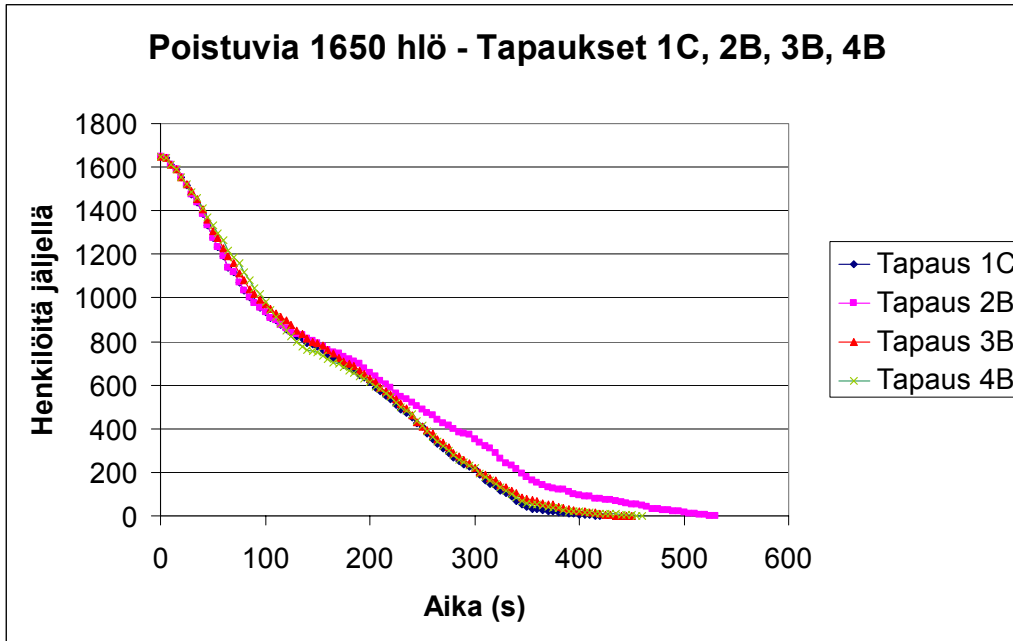
Kuviin 19–21 on koottu vertailun vuoksi perustapauksen ja kolmen palotapauksen poistumisaikakäyrät, kun poistuvien henkilöiden määrä on 450, 1 050 ja 1 650. Kaikissa tapauksissa poistumisaika on pisin palotilanteessa K2.



Kuva 19. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset tapauksissa, joissa poistuvien henkilöiden lukumäärä on 450: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.



Kuva 20. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset tapauksissa, joissa poistuvien henkilöiden lukumäärä on 1 050: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.



Kuva 21. Esimerkkikohde 3: Metroasema. Simulointilaskelmien tulokset tapauksissa, jossa poistuvien henkilöiden lukumäärä on 1 650: metroaseman tiloissa olevien henkilöiden lukumäärä poistumisen alkamisen jälkeen. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

5.4 Esimerkkikohde 4: Yhteiskäyttötunneli

Esimerkkikohteen 4 yhteiskäyttötunneli on laaja, syvällä kallioperässä sijaitseva tunneliverkosto, jonka kokonaispituus on noin 20 km. Tunnelissa kulkee kaukolämpöverkoston lisäksi tietoliikenneverkostoa. Simulointeja varten on tarkastelujen kohteeksi valittu noin 5 km osuus yhteiskäyttötunnelin toisesta päästä. Tällä osuudella tunnelissa on ilmanvaihtokanavia, pumppuasema, ajotunneleita sekä valvomoja. Tunnelin leveys on 6,7 m ja korkeus 5 m. Putket rajoittavat ajokaistan noin 3 m levyiseksi.

Tunnelissa on 2–3 km:n välein maanpinnalle johtavat ajotunnelit, joiden pituudet vaihtelevat 270–450 m. Tarkastelun kohteena olevalla osuudella pisin yhtämittäinen tunneliosuus oli 3 km, mistä ei johtanut maanpäälle ajotunneleita tai ilmanvaihtokanavia.

Tunnelin säännöllinen miehittäminen tapahtuu huoltotöiden yhteydessä 1–2 kertaa kuukaudessa. Koska samanaikainen henkilömäärä tunnelissa on varsin pieni, ei ole tarvetta käyttää poistumisen simulointiohjelmia vaan poistumisajat voidaan arvioida oletetun liikkumisnopeuden ja etäisyyden perusteella.

Tunnelissa liikutaan ja sieltä poistutaan yleensä dieselmootoriajoneuvoilla, jolloin poistumisaika ei palotapauksessa muodostu poistujien kannalta kriittiseksi. Mikäli itse ajoneuvo syttyy palamaan tai sitä ei muusta syytä voida käyttää palotapauksessa, tunnelista joudutaan poistumaan jalan. Ellei tilanne ole erityisen uhkaava, poistuvat henkilöt todennäköisesti kävelevät ulos tunnelista: 3 km pituinen tunneliosuus taittuu kävelynopeudella 1,4 m/s (reipas kävelynopeus) runsaassa puolessa tunnissa. Juosten matkaan kuluisi ehkä 15 minuuttia. Tämän jälkeen seuraa vielä 270 m pituinen jyrkähkö nousu ajotunnelissa maan pinnalle. Kirjallisuudesta ei löydy luotettavia tietoja kävelynopeuksista ylöspäin luiskissa. Portaissa kävelynopeuksia sen sijaan on mitattu. Esimerkiksi *Simulex*-ohjelmassa käytetään kävelynopeuden oletusarvona portaissa ylöspäin 0,35 kertaa esteetön kävelynopeus. Esteettömän kävelynopeuden ollessa edellä mainittu 1,4 m/s olisi kävelynopeus portaissa ylöspäin noin 0,5 m/s, jolloin kulkuaika ajoluiskassa olisi 9 minuuttia. Kokonaispoistumisaika voisi siten vaihdella noin 25 minuutista 40 minuuttiin sen mukaan, juoksevatko vai kävelevätkö tunnelista poistuvat henkilöt.

6. Yhteenveto

Paloturvallisuussuunnittelun keskeisimpiä päämääriä on varmistaa, että rakennuskohteessa olevat henkilöt (yleisö, tiloissa työskentelevät henkilöt ja pelastushenkilökunta) voivat tulipalon sattuessa siirtyä turvaan ennen kuin olosuhteet kohteessa muodostuvat henkilöturvallisuuden kannalta kohtalokkaiksi.

Ihmisten käyttäytymisestä tulipalotilanteissa ja poistumisen aikana on olemassa kohtalaisen paljon tutkimustietoa, erityisesti tavanomaisten maanpäällisten rakennuskohteiden osalta. Maanalaisiin tiloihin liittyy kuitenkin erityispiirteitä, jotka saattavat omalla tavallaan vaikuttaa ihmisten käyttäytymiseen. Tällaisia erityispiirteitä ovat mm. vaikeudet hahmottaa maanalainen tila ja tilan eri osien keskinäisiä yhteyksiä, mikä voi vaikeuttaa lyhimmän turvaan johtavan kulkureitin löytämistä. Ikkunoiden puuttuminen johtaa myös siihen, että kiintopisteitä on vaikea muodostaa, mikä usein hankaloittaa suunnittamista maanalaisissa tiloissa. Monet ihmiset kokevat myös ahtaan paikan kammoa maanalaisissa tiloissa, mikä tulipalotilanteissa voi edelleen korostua. Savukaasujen nouseminen ylöspäin porrashuoneisiin voi myös vaikeuttaa poistumista, ellei porrashuoneiden suunnittelussa asiaan ole kiinnitetty riittävästi huomiota.

Ihmisten käyttäytymisestä maanalaisissa tiloissa tapahtuvissa tulipaloissa on varsin niukasti tieteellistä tutkimustietoa. Suurin osa olemassa olevasta tiedosta koskee liikennetunneleita, jotka on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Aivan viimeaikaisimmista tutkimuksista voidaan mainita mm. Boerin (2002), Shieldsin ja Boycen (2004) sekä Fraser-Mitchellin ja Chartersin (2005) selvitykset. Heidän havaintojensa mukaan ihmiset eivät maanalaisissa tiloissa usein tiedosta olevansa alttiina välittömälle vaaratilanteelle, jolloin poistumisen aloittaminen saattaa viivästyä. Ihmiset eivät myöskään mielellään halua jättää omaisuuttaan, kuten autoaan tai matkatavaroitaan, poistua paikalta.

Poistumisen laskentamalleja ja -ohjelmia on useita kymmeniä erilaisia maanpäällisiä rakennuskohteita varten, mutta vain muutama on tarkoitettu erityisesti maanalaisia tiloja varten. Viimeksi mainituista ilmeisesti vain raideliikennettä koskeva standardi NFPA 130 (2003, 2004) on yleisesti käytössä kansainvälisesti. Useiden muiden mallien kehitystyö näyttää kokonaan hiipuneen.

Standardi NFPA 130 (2003,2004) koskee kaikkia raideliikenteeseen liittyviä kohteita, niin liikkuvaa kalustoa, asemia kuin raideosuiksiakin. Tämän tutkimuksen aihepiiriin kuuluvista kohteista standardia on sovellettu monien maiden metroasemien suunnitteluun (Papaioannou 1998, Nordmark 2004).

Metroasemien poistumisjärjestelyjen osalta standardissa annetaan yksinkertaiset toiminnalliset vaatimukset: kaikkien ihmisten on voitava poistua aseman laiturialueelta 4 minuutin

sisällä ja saapua turvalliseen paikkaan 6 minuutin sisällä poistumisen alkamisesta. Näiden vaatimusten lisäksi standardi sisältää lukuisia asemien rakenteita, esimerkiksi kulkureittien enimmäispituuksia ja vähimmäisleveyksiä, koskevia vähimmäisvaatimuksia.

Koska monimutkaisia maanalaisia tiloja varten ei ilmeisesti ole yleisesti saatavissa laskenta- tai simulointiohjelmia, on käytännön suunnittelutyössä käytetty tavanomaisia rakennuskohteita varten tarkoitettuja ohjelmia ja menetelmiä. Niiden oikeasta toiminnasta ei ole aina varmuutta esimerkiksi laskettaessa poistumista ylöspäin portaissa, joissa tasoero saattaa olla useita kymmeniä metrejä.

Tämän tutkimuksen jälkimmäisessä osassa on tarkasteltu poistumista neljässä erityyppisessä maanalaisessa rakennuskohteessa, joita ovat pysäköintihallina käytetty väestösuoja, urheiluhallina käytetty väestösuoja, metroasema ja yhteiskäyttötunneli. Poistumisaikalaskelmat tehtiin käyttäen sekä poistumisen simulointiohjelmaa (*Simulex*) että käsilaskentamenetelmää. Kohteissa tarkasteltiin poistumista sekä normaaliolosuhteissa että palotilanteissa, jolloin osa uloskäytävistä tai poistumisreiteistä ei ollut käytettävissä.

Pysäköintihallina käytetyn väestösuojan tapauksessa tarkasteltiin kahta palotilannetta: Toinen palo sijaitti lähellä erästä uloskäytävänä toimivaa porrashuonetta, jota ei palon vuoksi voitu käyttää. Toinen palo sijaitti keskellä hallia, ja sen oletettiin estävän poistumisen ajoluiskan ja erään uloskäytävänä toimivan porrashuoneen kautta. Tarkasteluissa tapauksissa oli poistuvien henkilöiden oletettu lukumäärä (50 hlöä) niin pieni hallin kokoon nähden, että ruuhkautumista porrashuoneiden ovissa ei juurikaan pääse tapahtumaan. Poistumisaika riippuu siten lähes yksinomaan kävelymatkan pituudesta. Kaikki henkilöt saapuvat simulointilaskelmien mukaan maan pinnalle 5–6 minuutin kuluttua siitä, kun he aloittivat siirtymisen kohti uloskäytäviä. Viimeiset henkilöt poistuivat hallitilasta uloskäytävinä toimiviin porrashuoneisiin 3–4 minuutin kuluttua siirtymisen alkamisesta.

Urheiluhallina käytetyn väestösuojan tapauksessa tarkasteltiin kolmea palotapausta kolmella eri salibandykentällä, jotka estivät tiettyjen uloskäytävien tai poistumisreittien käytön. Simuloiduissa tapauksissa oli henkilömäärä niin suuri (360–540 hlöä), että ruuhkautumista syntyi lähes kaikille käytettävissä oleville uloskäytävillä. Kaikki henkilöt saapuivat simulointilaskelmien mukaan maanpinnan tasolle 7–9 minuutin kuluttua siitä, kun heidän oletettiin tulleen tietoisiksi tulipalosta. Ajat, jolloin viimeiset henkilöt poistuivat eri salibandykentiltä sekä jolloin he saapuivat uloskäytävinä toimiviin porrashuoneisiin, on määritetty: ajat vaihtelevat kentästä ja tapauksesta riippuen 1–6 min.

Metroaseman esimerkkitapauksessa on myös tarkasteltu poistumista kolmessa palotilanteessa. Ensimmäisen palon oletettiin syttyneen laituritasolla tai asemalla olevassa metrovaunussa, toisen lippuhallitasolla ja kolmannen aseman katutasossa sijaitsevassa osassa.

Tässäkin tapauksessa palo esti tiettyjen poistumisreittien ja uloskäytävien käytön. Poistuvien henkilöiden oletettu lukumäärä oli niin suuri (450–1 650 hlöä), että ruuhkautumista esiintyi uloskäytävissä. Kokonaispoistumisajat vaihtelivat henkilömäärästä ja palotapauksesta riippuen 5–9 min siitä, kun henkilöt aloittivat siirtymisen kohti uloskäytäviä.

Yhteiskäyttötunnelin tapauksessa poistuminen tapahtuu yleensä moottoriajoneuvolla. Mikäli ajoneuvoa ei syystä tai toisesta ole mahdollista käyttää, poistutaan tunnelista jalan. Tässä tapauksessa poistumisaika arvioidaan kävelynopeuden ja -matkan perusteella. Tarkastelun kohteena olevassa tunneliosuudessa voi poistumisaika olla 25–40 min kävelynopeudesta riippuen, mikäli poistuminen alkaa mahdollisimman etäällä ajoluiskasta tarkastelujen kohteena olevassa tunneliosuudessa.

Tässä tutkimuksessa ei ole tehty arvioita poistumisen onnistumisesta eli siitä, ehtivätkö poistuvat henkilöt siirtyä turvaan, ennen kuin olosuhteet muuttuvat henkilöturvallisuuden kannalta kriittisiksi. Tämä tarkastelu on tehty tutkimushankkeen loppuraportissa (Hostikka *et al.* 2005).

Lähdeluettelo

Anon. 1996. Simulex. Evacuation modelling software. User's manual. Glasgow, GB: Integrated Environmental Solutions Ltd. 48 s.

Anon. 2004. Crowd safety [verkkodokumentti]. London, GB: 2050 Consulting Ltd. Saatavissa: http://www.2050consulting.com/crowd_safety.htm. [Viitattu 20.9.2005.]

Babrauskas, V., Levin, B. C., Gann, R. G., Paabo, M., Harris Jr., R. H., Peacock, R. D. & Yusa, S. 1991. Toxic potency measurement for fire hazard analysis. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 119 s. (NIST Special Publication 827.)

Boer, L. C. 2002. Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel. Soesterberg, NL: TNO Human Factors. 71 s. (TNO Report TM-02-C034.)

Bryan, J. L. 1995. Behavioral response to fire and smoke. Teoksessa: DiNenno, P. E. *et al.* (toim.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2. p. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-241-3-262. ISBN 0-87765-354-2.

Canter, D., Donald, I. & Chalk, J. 1992. Pedestrian behaviour during emergencies underground: The psychology of crowd control under life threatening circumstances. Teoksessa: Vardy, A. E. (toim.). Proceedings of the First International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels. Dundee, GB: University of Dundee. S. 135-150.

Carmody, J. C. 1994. Psychological issues in the design of underground facilities. Teoksessa: Proceedings of the International Symposium on Underground Openings for Public Use. Oslo, N: Norwegian Society of Chartered Engineers.

Curtat, M. R. 1996. Tenability of conditions for people exposed to fire hazards in a building. Teoksessa: Cox, G., Curtat, M., di Blasi, C. & Kokkala, M. Reaction to fire of construction products. Area B: Fire modelling. London, GB: Construction Research Communications. S. 186-215. (EUR 16959, EP 38.) ISBN 1-86081-109-4.

Dray, P., Harris, D. & Proctor, P. 1995. Evaluating personal risks associated with tunnels. Teoksessa: Vardy, A. E. (toim.). Proceedings of the Second International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels. Dundee, GB: University of Dundee, Independent Technical Conference. S. 137-144. ISBN 0-95200-832-7.

E1. 2002. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E1: Rakenteellinen paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2002. Helsinki: Ympäristöministeriö. 40 s. ISBN 951-37-3762-4.

Frantzich, H. 1994. En modell för dimensionering av förbindelser för utrymning utifrån funktionsbaserade krav. Lund, SE: Brandteknik, Lunds tekniska högskola. 75 s. (Rapport 1011.) ISSN 1102-8246, ISRN LUTVDG/TVBB-1011-SE.

Frantzich, H. & Nilsson, D. 2003. Utrymning genom tät rök: Beteende och förflyttning. Lund, SE: Brandteknik, Lunds tekniska högskola. 83 s. (Rapport 3126.) ISSN 1402-3504, ISRN LUTVDG/TVBB-3126-SE.

Fraser-Mitchell, J. & Charters, D. 2005. Human behaviour in tunnel fire incidents. Teoksessa: Papers presented at the Eighth International Symposium on Fire Safety Science. Beijing, CN: China Fire Protection Association. 12 s. (CD-ROM.)

Gwynne, S. & Galea, E. R. 1997. A review of the methodologies and critical appraisal of computer models used in the simulation of evacuation from the built environment. London, UK: University of Greenwich, Centre for Numerical Modelling and Process Analysis. 93 s. (CMS Press Paper No. 97/IM/21.) ISBN 1-899991-21-2.

Gwynne, S., Galea, E. R., Lawrence, P. J. & Filippidis, L. 2001. Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. Fire Safety Journal, Vol. 36, s. 327-357.

Gwynne, S., Galea, E. R., Parke, J. & Hickson, J. 2003. The collection and analysis of pre-evacuation times derived from evacuation trials and their application to evacuation modelling. Fire Technology, Vol. 39, s. 173-195.

Hartzell, G. E. 2001. Engineering analysis of hazards to life safety in fires: The fire effluent toxicity component. Safety Science, Vol. 38, s. 147-155.

Hostikka, S. 2003. Fire Dynamics Simulator -ohjelman uusia ominaisuuksia ja sovelluksia. Palontorjuntateknikka, Vol. 33, No. 3-4, s. 23-25.

Hostikka, S., Mikkola, E., Rinne, T., Tillander, K. & Weckman, H. 2005. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. VTT Tiedotteita 2318. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 143 s. + liitt. 9 s. ISBN 951-38-6755-2. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2318.pdf>.

Ingason, H., Bengtson, S. & Hiort, F. 1997. Brand och brandskydd i undermarksanläggningar. Borås, SE: SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. 90 s. + liitt. 16 s. (SP Rapport 1997:41.) ISBN 91-7848-700-5.

ISO/TR 13387-4. 1999. Fire safety engineering. Part 4: Initiation and development of fire and generation of fire effluents. Genève, CH: International Organization for Standardization. 35 s.

ISO/TS 13571. 2002. Life-threatening components of fire. Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data. Genève, CH: International Organization for Standardization. 21 s.

ISO 13344. 2004. Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents. 2. p. Genève, CH: International Organization for Standardization. 14 s.

Jensen, G. 1993. Evacuating in smoke. Trondheim, NO: IGP A/S. 41 s.

Jin, T. 1978. Visibility through fire smoke. *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 9, s. 135–155.

Jin, T. 1981. Studies of emotional instability in smoke from fires. *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 12, s. 130–142.

Jin, T. & Yamada, T. 1985. Irritating effects of fire smoke on visibility. *Fire Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, s. 79–90.

Jin, T. 2002. Visibility and human behavior in fire smoke. Teoksessa: DiNenno, P. J. *et al.* (toim.). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3. p. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-42–2-53. ISBN 0-87765-451-4.

Keski-Rahkonen, O. 2002a. Voiko paniikkia mallittaa? *Palontorjuntatekniikka*, Vol. 32, s. 16–19.

Keski-Rahkonen, O. 2002b. Miksi paniikkeja joulukirkoissa? *Palontorjuntatekniikka*, Vol. 32, s. 20–24.

Korhonen, T., Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. 2005. Poistumisaikalaskelmat palotilanteissa. *Palontorjuntatekniikka 2005* (Erikoisnumero), s. 106–110.

Kuligowski, E. 2005. Review of 28 egress models. Teoksessa: Peacock R. D. & Kuligowski, E. D. (toim.). *Workshop on building occupant movement during fire emergencies*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. S. 66–88. (NIST Special Publication 1032.)

Magnusson, S. E., Frantzich, H. & Harada, K. 1995. Fire safety design based on calculations. Uncertainty analysis and safety verification. Lund, SE: Lund Institute of Technology, Department of Fire Safety Engineering. 120 s. (Report 3078.) ISSN 1102-8246, ISRN LUTVDG/TVBB-3078-SE.

Nelson, H. E. & Mowrer, F. W. 2002. Emergency movement. Teoksessa: DiNenno, P. J. *et al.* (toim.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3. p. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 3-367-3-380. ISBN 0-87765-451-4.

NFPA 130. 2003. Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 63 s.

NFPA 130. 2004. Tentative interim amendment to the 2003 Edition of the Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2 s. (15.7.2004.) [Tämä lisäys koskee raideliikenteen asemien poistumisjärjestelyjä.]

NFPA 520. 2005. Standard on subterranean spaces. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 17 s.

NKB. 1994. Funktionsbestemte brandkrav og Teknisk vejledning for beregningsmæssig eftervisning. Helsingfors: Nordiska kommittén för byggbestämmelser, NKB. 80 s. (NKB Utskotts- och arbetsrapporter 1994:07.) ISBN 951-53-0024-X.

Nordmark, A. 1998. Fire and life safety for underground facilities: Present status of fire and life safety principles related to underground facilities. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, s. 217-269.

Nordmark, A. 2004. Study of access ways to underground space. Examples of spatial requirement. Lausanne, CH: International Tunneling Association, ITA. 73 s. (ITA Working group No. 3, "Subsurface planning", Final Report, May 2004.)

Paloposki, T., Myllymäki, J. & Weckman, H. 2002. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan. VTT Tiedotteita 2181. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 53 s. + liitt. 13 s. ISBN 951-38-6113-9. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2181.pdf>.

Papaioannou, K. K. 1998. Egress design in underground transport system. The case of the new Athens metro. Teoksessa: Shields, T. J. (toim.). Proceedings of the First International Symposium on Human Behaviour in Fire. Belfast, GB: University of Ulster. S. 809-817. ISBN 1-85923-103-9.

Pauls, J. 1998. A personal perspective on research, consulting and codes/standards development in fire related human behaviour, 1969–1997, with the emphasis on space and time factors. Teoksessa: Shields, T. J. (toim.). Proceedings of the First International Symposium on Human Behaviour in Fire. Belfast, GB: University of Ulster. S. 71–82. ISBN 1-85923-103-9.

Proulx, G. & Sime, J. D. 1991. To prevent ‘panic’ in an underground emergency: Why not tell people the truth? Teoksessa: Cox, G. & Langford, B. (toim.). Proceedings of the Third International Symposium on Fire Safety Science. London, GB: Elsevier. S. 843–852. ISBN 1-85166-719-9.

Purser, D. A. 1995. Toxicity assessment of combustion products. Teoksessa: DiNunno, P. J. (toim.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Quincy, MA: National Fire Protection Association. S. 2-85-2-146. ISBN 0-87765-354-2.

Purser, D. A. 2004. Structural fire engineering design: Aspects of life safety. Garston, GB: Building Research Establishment. 16 s. (Digest 490.) ISBN 1-86081-721-1.

Purser, D. 2005. Occupant behaviour and toxic fire hazards in engineering design of buildings. Teoksessa: Hosser, D. (toim.). 10th International Fire Protection Symposium. Braunschweig, DE: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. S. 253–290. ISBN 3-89288-165-0.

RIL. 2003. Paloturvallisuussuunnittelu – Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 138 s. (RIL 221–2003.) ISBN 951-758-433-3.

Santos, G. & Aguirre, B. E. 2005. A critical review of emergency evacuation simulation models. Teoksessa: Peacock, R. D. & Kuligowski, E. D. (toim.). Workshop on building occupant movement during fire emergencies. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. S. 66–88. (NIST Special Publication 1032.)

Schneider, V. 2005. Modelle der Flucht und Rettung. Teoksessa: Hosser, D. (toim.). 10. Internationales Brandschutz-Symposium. Braunschweig, DE: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. S. 291–304. ISBN 3-89288-165-0.

Shields, T. J. & Proulx, G. 1999. The science of human behaviour; Past research endeavours, current developments and fashioning a research agenda. Teoksessa: Curtat, M. (toim.). Proceedings of the Sixth International Symposium on Fire Safety Science. London, GB: Interscience Communications. S. 95–114. ISBN 0-925-223-25-5.

Shields, T. J. & Boyce, K. 2004. Towards developing an understanding of human behaviour in fire in tunnels. Teoksessa: Proceedings of the Third International Symposium on Human Behaviour in Fire. London, GB: Interscience Communications. S. 215–228. ISBN 0-9541216-6-X.

Sime, J. D. 1990. The concept of panic. Teoksessa: Canter, D. (toim.). Fires and human behaviour. 2. p. London, GB: David Fulton Publishers. S. 63–81. ISBN 1-85346-139-3.

Tanaka, A., Komai, T. & Isei, T. 1992. Design of a simulation system of evacuation from underground. Teoksessa: Boyer, L. L. (toim.). Proceedings of the 5th Int. Conference on Underground Space and Earth Sheltered Structures, ICUSESS '02. Delft, NL: Delft University Press. S. 137–143. ISBN 90-6275-801-0.

Tanaka, A., Komai, T. & Isei, T. 1994. Simulation code for fire escape from underground spaces: ACES. Teoksessa: Proceedings of the International Symposium on Underground Openings for Public Use. Oslo, N: Norwegian Society of Chartered Engineers. S. 377–383.

Tanaka, A., Imaizumi, H., Takahashi, M. & Isei, T. 1995. Transfer speed alternation of human in evacuation from underground opening space to surface. Teoksessa: Proceedings of the 1st International AsiaFlam '95 Conference. London, GB: Interscience Communications. S. 519–524. ISBN 0-9516-3207-8.

Tanaka, A., Takahashi, M., Komai, T & Isei, T. 1996. Evacuation from underground opening space to surface, effect of smoke. Teoksessa: Proceedings of the Seventh International Fire Science and Engineering Conference, Interflam '96. London, GB: Interscience Communications. S. 753–762. ISBN 0-9516-3209-4.

Tanaka, A., Imaizumi, H., Takahashi, M. & Isei, T. 1997. Comparison of upward and downward traveling escape. Teoksessa: Hasemi, Y. (toim.). Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science. New York, NY: Elsevier. S. 1344. ISBN 4-9900625-5-5.

Tanaka, A., Imaizumi, H. & Isei, T. 1998. Way finding in an underground space. Teoksessa: Shields, T. J. (toim.). Proceedings of the First International Symposium on Human Behaviour in Fire. Belfast, GB: University of Ulster. S. 563–572. ISBN 1-85923-103-9.

Tanaka, A., Imaizumi, H. & Isei, T. 1999. Way finding in an underground maze: Cognitive task. Teoksessa: Proceedings of the Eighth International Fire Science and Engineering Conference, Interflam '99. London, GB: Interscience Communications. S. 707–708. ISBN 0-9532-3121-6.

Tanaka, A. 2004. Re: E-inquiry mail. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 18.11.2004.

Thompson, P. A. & Marchant, E. W. 1995a. A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire Safety Journal*, Vol. 24, s. 131–148.

Thompson, P. A. & Marchant, E. W. 1995b. Testing and application of a computer model “SIMULEX”. *Fire Safety Journal*, Vol. 24, s. 149–166.

Weckman, H. 1997a. Rakennusten poistumisteitä koskevat määräykset eri maissa. VTT Tiedotteita 1815. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 54 s. + liitt. 12 s. ISBN 951-38-5090-0.

Weckman, H. 1997b. Rakennuksista poistumisen laskennallinen arviointi. VTT Tiedotteita 1846. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 50 s. + liitt. 11 s. ISBN 951-38-5138-8.

Weckman, H. 1998. Rakennuksista poistumisen laskeminen ja simulointi. Sovellusesimerkki. VTT Tiedotteita 1890. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 50 s. + liitt. 13 s. ISBN 951-38-5195-8.

Weckman, H., Lehtimäki, S. & Männikkö, S. 1999. Evacuation of a theatre: Exercise vs. calculations. *Fire and Materials*, Vol. 23, s. 357–361.

Liite A: Poistumiseen liittyviä käsitteitä

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta (E1 2002) sisältää seuraavat poistumiseen liittyvät määritelmät:

Poistumisalue: Poistumisen järjestämisen kannalta yhtenäinen ja tarkoituksenmukainen rakennuksen osa. Poistumisalue on usein samalla myös palo-osasto.

Uloskäytävä: Poistumisalueelta suoraan ulos johtava ovi taikka rakennuksessa tai sen ulkopuolella oleva tila, jonka kautta turvallinen poistuminen on palon sattuessa mahdollista maan pinnalle tai muulle turvalliselle paikalle.

Osastoitu uloskäytävä: Osastoitu tila, jonka kautta rakennuksesta voidaan poistua turvallisesti.

Palolta suojattu uloskäytävä: Osastoitu uloskäytävä, johon on yhteys ainoastaan kerrostasolla olevan osastoidun tilan kautta.

Palolta ja savulta suojattu uloskäytävä: Osastoitu uloskäytävä, johon on yhteys ainoastaan kerrostasolla olevan osastoidun tilan ja tästä edelleen parvekkeen tai muun ulkoilmaan avoimen tilan kautta siten, että palon ja savukaasujen pääsy uloskäytävään estyy.

Kulkureitti: Lattiapinnan kustakin kohdasta uloskäytävään johtava kulkukelpoinen tie.

Sisäinen käytävä: Poistumisalueeseen kuuluva ja sen tiloista uloskäytävään johtava käytävä.

Varatie: Uloskäytävää vaikeakulkuisempi reitti, jota pitkin on mahdollisuus päästä turvaan palolta

Turvavalaistus: Valaistus, joka tavallisen valaistuksen pettäessä on tarkoitettu takaamaan henkilöturvallisuuden vaatima valaistus.

Merkkivalaistus: Valaistus, joka osoittaa poistumisreitit. Merkkivalaistus toimii tavallisen valaistuksen kanssa yhtä aikaa ja siitä riippumatta.

Tätä kirjoitettaessa (lokakuu 2004) sisäasiainministeriö uusii turva- ja merkkivalaistusta koskevia säädöksiään. Asetuksena annettava uusi säädös tulee tietävästi monilta osin nojaamaan standardiin SFS-EN 1838 (1999), jolloin osa valaistussanastosta mahdolli-

sesti tullaan muuttamaan nykyisin käytössä olevasta. Edellä mainittu standardi sisältää mm. seuraavat määritelmät:

Turvavalaistus (*emergency lighting*): Normaalin valaistuksen virransyötön häiriintyessä käytettävä valaistus. [Aikaisemmin varavalaistus.]

Poistumisvalaistus (*emergency escape lighting*): Turvavalaistuksen osa, jonka tarkoituksena on varmistaa henkilöiden turvallisuus tilasta poistuttaessa tai turvata mahdollisesti vaaraa aiheuttavan prosessin lopettaminen ennen poistumista. [Aikaisemmin poistumistievalaistus.]

Poistumisreitivalaistus (*escape route lighting*): Poistumisvalaistuksen osa, jonka tarkoituksena on varmistaa, että tilassa olevat henkilöt voivat vaivatta tunnistaa poistumiskeinot ja käyttää niitä turvallisesti.

Avoimen alueen valaistus (*open area lighting*): joissakin maissa paniikinehkäisyvalaistus): Poistumisvalaistuksen osa, jonka tarkoituksena on ehkäistä paniikkia ja varmistaa henkilöiden pääsy paikkaan, josta poistumisreitti voidaan havaita.

Riskialttiin työalueen valaistus (*high risk task area lighting*): Poistumisvalaistuksen osa, jonka tarkoituksena on varmistaa niiden henkilöiden turvallisuus, jotka ovat tekemisissä mahdollisesti vaarallisen prosessin tai tilanteen kanssa. Mahdollistaa toiminnan hallitun pysäyttämisen käyttäjän ja muiden tilassa olijoiden turvallisuutta vaarantamatta. [Aikaisemmin turvavalaistus.]

Varavalaistus (*stand-by lighting*): Turvavalaistuksen osa, jonka tarkoituksena on taata normaalin toiminnan jatkuminen oleellisesti muuttumattomana. [Aikaisemmin toiminnan jatkamisvalaistus.]

Turvallisuuskilpi (*safety sign*): Kilpi, joka yhdessä värin ja geometrisen muodon perusteella viestii yleistä ja graafisella tekstisymbolilla täydennettynä erityistä turvallisuuteen liittyvää asiaa.

Liitteen A lähdeluettelo

E1. 2002. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E1: Rakenteellinen paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2002. Helsinki: Ympäristöministeriö. 40 s. ISBN 951-37-3762-4.

SFS-EN 1838. 1999. Valaistusovellukset. Turvavalaistus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 20 s.

Liite B: Simuloidut poistumistapaukset

Tässä liitteessä esitetään yksityiskohtaiset tiedot esimerkkikohteiden 2 (urheiluhallina käytetty väestösuoja) ja 3 (metroasema) simulointien lähtötilanteista. Erityisesti esitetään tiedot henkilöiden sijainnista poistumisen alkaessa sekä siitä, minkä uloskäytävän kautta henkilöt poistuvat. Lisäksi esitetään mm. tiedot henkilöiden reagointiajoista.

Esimerkkikohte 2: Urheiluhallina käytetty väestösuoja

Kunkin tapauksen osalta mainitaan tilassa olevien henkilöiden kokonaislukumäärä ja tiedot siitä, kuinka monta henkilöä salibandykentillä **1–6** sekä pysäköintihallissa (kenttä **6**) on poistumisen alkaessa, sekä siitä, mitä uloskäytävää (**A**, **B1**, **B2**, **C**) henkilöt käyttävät poistuessaan. Palotilanteita (**M1**, **M2**, **M3**) koskevissa tapauksissa esitetään myös henkilöiden reagointiaika (tasajakauma).

PERUSTAPAUKSET 1–8

Tapaus 1: Poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: Kentät **1–6**: à 60 hlöä = 360 hlöä

Tapaus 2: Poistuminen – **A**: 120 + **B**: 180 + **C**: 60

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 360 hlöä:

- Kenttä **1**: 60 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **2**: 60 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **3**: 30 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 30 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **4**: 30 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 30 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **5**: 30 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 30 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **6**: 60 hlöä → Uloskäytävä **C**

Tapaus 3: Poistuminen – **A**: 140 + **B**: 220 + **C**: 60

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 400 hlöä:

- Kenttä **1**: 80 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **2**: 60 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **3**: 30 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 30 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **4**: 40 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 40 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **5**: 30 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 30 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **6**: 60 hlöä → Uloskäytävä **C**

Tapaus 4: Poistuminen – **A:** 160 + **B:** 240 + **C:** 60

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 460 hlöä:

- Kenttä **1:** 80 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **2:** 80 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **3:** 40 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 40 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **4:** 40 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 40 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **5:** 40 hlöä → Uloskäytävä **B1** & 40 hlöä → Uloskäytävä **B2**
- Kenttä **6:** 60 hlöä → Uloskäytävä **C**

Tapaus 5: Poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta – Uloskäytävä **A** ei käytössä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: Kentät **1–6:** à 60 hlöä = 360 hlöä

Tapaus 6: Poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta – Uloskäytävä **A** ei käytössä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 460 hlöä:

- Kentät **1 & 4:** à 60 hlöä
- Kentät **2, 3, 5 & 6:** à 80 hlöä

Tapaus 7: Poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta – Uloskäytävät **B1** ja **B2** eivät käytössä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: Kentät **1–6:** à 60 hlö = 360 hlöä

Tapaus 8: Poistuminen – **A:** 300 + **C:** 60

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 360 hlöä:

- Kentät **1–5:** à 60 hlöä → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **6:** 60 hlöä → Uloskäytävä **C**

PALOTILANNE M1: TAPAUKSET 9–12

Palotilanteessa **M1** tulipalon oletetaan syttyneen kahvilan keittiössä salibandykenttien **1** ja **2** välissä.

Tapaus 9: Poistuminen – **A:** 60 + **B:** 240 + **C:** 60

Henkilöitä 360:

- Kenttä **1:** 60 hlöä: reagointiaika $15 \pm 5 \text{ s}$ → Uloskäytävä **A**
- Kenttä **2:** 60 hlöä: reagointiaika $30 \pm 15 \text{ s}$ → Uloskäytävä **B1**

- Kenttä 3: 60 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 4: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 5: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 6: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä C

Tapaus 10: Poistuminen – B: 240 + C: 120

Henkilöitä 360:

- Kenttä 1: 60 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä C
- Kenttä 2: 60 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 3: 60 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 4: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 5: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 6: 60 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä C

Tapaus 11: Poistuminen – A: 90 + B: 360 + C: 90

Henkilöitä 540:

- Kenttä 1: 90 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 3: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 4: 90 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 5: 90 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 6: 90 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä C

Tapaus 12: Poistuminen – B: 360 + C: 180

Henkilöitä 540:

- Kenttä 1: 90 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä C
- Kenttä 2: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 3: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 4: 90 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 5: 90 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 6: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä C

PALOTILANNE M2: TAPAUKSET 13–15

Palotilanteessa M2 tulipalon oletetaan syttyneen salibandykentällä 3.

Tapaus 13: Poistuminen – A: 160 + B: 240 + C: 60

Henkilöitä 360:

- Kenttä 1: 60 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 60 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä B1

- Kenttä 3: 60 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 4: 60 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 5: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 6: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä C

Tapaus 14: Poistuminen – A: 90 + B: 360 + C: 90

Henkilöitä 540:

- Kenttä 1: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 90 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 3: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 4: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä B1
- Kenttä 5: 90 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä B2
- Kenttä 6: 90 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä C

Tapaus 15: Poistuminen – A: 540

Henkilöitä 540:

- Kenttä 1: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 3: 90 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 4: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 5: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 6: 90 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A

PALOTILANNE M3: TAPAUKSET 16–19

Palotilanteessa M3 tulipalon oletetaan syttyneen salibandykentällä 5 siten, että se kaikissa tapauksissa estää uloskäytävien B1 ja B2 käytön.

Tapaus 16: Poistuminen – A: 300 + C: 60

Henkilöitä 360:

- Kenttä 1: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 3: 60 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 4: 60 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 5: 60 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 6: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä C

Tapaus 17: Poistuminen – A: 360

Henkilöitä 360:

- Kenttä 1: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A

- Kenttä 2: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 3: 60 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 4: 60 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 5: 60 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 6: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A

Tapaus 18: Poistuminen – A: 390 + C: 80

Henkilöitä 470:

- Kenttä 1: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 3: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 4: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 5: 90 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 6: 80 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä C

Tapaus 19: Poistuminen – A: 470

Henkilöitä 470:

- Kenttä 1: 60 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 2: 60 hlöä: reagointiaika 60 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 3: 90 hlöä: reagointiaika 45 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 4: 90 hlöä: reagointiaika 30 ± 15 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 5: 90 hlöä: reagointiaika 15 ± 5 s → Uloskäytävä A
- Kenttä 6: 80 hlöä: reagointiaika 120 ± 30 s → Uloskäytävä A

Esimerkki 3: Metroasema

Kunkin tapauksen osalta mainitaan tilassa olevien henkilöiden kokonaislukumäärä sekä tiedot siitä, kuinka monta henkilöä eri tasoilla (laituritaso, tekniikkataso, lippuhallitaso) on poistumisen alkaessa, sekä siitä, mitä uloskäytäviä tai kulkureittejä (A1, A2, B–H) henkilöt käyttävät poistuessaan. Laituri- ja tekniikkatasoilta poistuvat henkilöt kulkevat monissa tapauksissa lippuhallitason kautta. Näissä tapauksissa on käytetty nuolimerkin-tää (→) osoittamassa, mitä kautta henkilöt siirtyvät lippuhallitasolle ja mitä kautta lippuhallitasolta maanpinnan tasolle.

PERUSTAPAUKSET 1A–1D

Tapaus 1A: Poistuminen lähimmän uloskäytävän kautta – 1 050 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 500 hlöä
- Tekniikkataso 50 hlöä
- Lippuhallitaso 500 hlöä

Tapaus 1B: Normaali poistuminen – 1 050 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 500 hlöä:
 - 300 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **A1+A2**
 - 100 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **B** \rightarrow **E + F**
 - 50 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **B** \rightarrow **H**
 - 50 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **B** \rightarrow **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **C** \rightarrow **E + F**
 - 20 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **D** \rightarrow **H**
- Lippuhallitaso 500 hlöä
 - 150 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **E + F**
 - 150 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **H**
 - 200 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **G**

Tapaus 1C: Normaali poistuminen – 1 650 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 650 hlöä:

Laituritaso: 800 hlöä:

- 400 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **A1+A2**
 - 200 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **B** \rightarrow **E + F**
 - 100 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **B** \rightarrow **H**
 - 100 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **B** \rightarrow **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **C** \rightarrow **E + F**
 - 20 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **D** \rightarrow **H**
- Lippuhallitaso 800 hlöä
 - 200 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **E + F**
 - 200 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **H**
 - 400 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **G**

Tapaus 1D: Normaali poistuminen – 450 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 200 hlöä:
 - 100 hlöä \rightarrow Uloskäytävä **A1+A2**

- 40 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
- 30 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
- 30 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 200 hlöä
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **G**

PALOTILANNE K1: TAPAUKSET 2A–2C

Palotilanteessa **K1** oletetaan palon syttyneen laituritasolla (tai junassa), minkä seurauksena varauuloskäytävä **A2** ei ole käytettävissä.

Tapaus 2A: Poistuminen – 1 050 henkilöä

Reagointiaika: 1 s ± 0,5 s

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 500 hlöä:
 - 300 hlöä → Uloskäytävä **A1**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 500 hlöä
 - 150 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 150 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tapaus 2B: Normaali poistuminen – 1 650 henkilöä

Reagointiaika: 1 s ± 0,5 s

Henkilöitä: 1 650 hlöä:

- Laituritaso: 800 hlöä:
 - 400 hlöä → Uloskäytävä **A1**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**

- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 800 hlöä
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 400 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tapaus 2C: Normaali poistuminen – 450 henkilöä

Reagointiaika: 1 s ± 0,5 s

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 200 hlöä:
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **A1**
 - 40 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 200 hlöä
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **G**

PALOTILANNE K2: TAPAUKSET 3A–3C

Palotilanteessa **K2** oletetaan palon syttyneen lippuhallitasolla, minkä seurauksena uloskäytävä **E** ei ole käytettävissä.

Tapaus 3A: Poistuminen – 1 050 henkilöä

Reagointiaika: 1 s ± 0,5 s

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 500 hlöä:
 - 300 hlöä → Uloskäytävä **A1 + A2**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **F**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**

- Lippuhallitaso 500 hlöä
 - 150 hlöä → Uloskäytävä **F**
 - 150 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tapaus 3B: Normaali poistuminen – 1 650 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 650 hlöä:

- Laituritaso: 800 hlöä:
 - 400 hlöä → Uloskäytävä **A1 + A2**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **B** → **F**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 800 hlöä
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **F**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 400 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tapaus 3C: Normaali poistuminen – 450 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 200 hlöä:
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **A1 + A2**
 - 40 hlöä → Uloskäytävä **B** → **F**
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **B** → **H**
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 200 hlöä
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **F**
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **H**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **G**

PALOTILANNE K3: TAPAUKSET 4A–4C

Palotilanteessa **K3** oletetaan palon syttyneen Vuorikadun uloskäytävän tasolla, minkä seurauksena uloskäytävä **H** ei ole käytettävissä.

Tapaus 4A: Poistuminen – 1 050 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 500 hlöä:
 - 300 hlöä → Uloskäytävä **A1 + A2**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **G**
- Lippuhallitaso 500 hlöä
 - 150 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 350 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tapaus 4B: Normaali poistuminen – 1 650 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 650 hlöä:

- Laituritaso: 800 hlöä:
 - 400 hlöä → Uloskäytävä **A1 + A2**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**
- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **G**
- Lippuhallitaso 800 hlöä
 - 200 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 600 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tapaus 4C: Normaali poistuminen – 450 henkilöä

Reagointiaika: $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$

Henkilöitä: 1 050 hlöä:

- Laituritaso: 200 hlöä:
 - 100 hlöä → Uloskäytävä **A1 + A2**
 - 40 hlöä → Uloskäytävä **B** → **E + F**
 - 60 hlöä → Uloskäytävä **B** → **G**

- Tekniikkataso 50 hlöä
 - 30 hlöä → Uloskäytävä **C** → **E + F**
 - 20 hlöä → Uloskäytävä **D** → **H**
- Lippuhallitaso 200 hlöä
 - 50 hlöä → Uloskäytävä **E + F**
 - 150 hlöä → Uloskäytävä **G**

Tekijä(t) Weckman, Henry			
Nimeke Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä Tehtävä B: Poistumisturvallisuus			
Tiivistelmä Tässä julkaisussa kuvataan aluksi poistumista ja poistumisen mitoittamista yleisellä tasolla sekä ihmisten käyttäytymistä poistumisen aikana. Sen jälkeen esitetään poistumisen laskentamenetelmiä, minkä jälkeen esitellään kirjallisuudesta löytyneitä maanalaisia tiloja varten laadittuja laskentamalleja. Ihmisten käyttäytymisestä maanalaisissa tiloissa tapahtuvissa tulipaloissa on olemassa varsin niukasti tieteellistä tutkimustietoa. Suurin osa tästä tiedosta koskee liikennetunneleita, jotka on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Maanalaisiin tiloihin liittyy joitakin erityispiirteitä, jotka saattavat vaikuttaa ihmisten käyttäytymiseen. Tällaisia erityispiirteitä ovat mm. vaikeudet hahmottaa maanalainen tila ja tilan eri osien keskinäisiä yhteyksiä, mikä voi vaikeuttaa lyhimmän turvaan johtavan kulkureitin löytämistä. Ikkunoiden puuttuminen johtaa myös siihen, että kiintopisteitä on vaikea muodostaa, mikä usein hankaloittaa suunnistamista maanalaisissa tiloissa. Monet ihmiset kokevat myös ahtaan paikan kammoa maanalaisissa tiloissa, mikä tulipalotilanteissa voi edelleen korostua. Savukaasujen nouseminen ylöspäin porrashuoneisiin voi myös vaikeuttaa poistumista, ellei porrashuoneiden suunnittelussa asiaan ole kiinnitetty riittävästi huomiota. Tämän julkaisun jälkimmäisessä osassa esitetään neljää eri tyyppiä edustavasta maanalaisesta rakennuskohteesta tehtyjen poistumissimulointilaskelmien tulokset. Esimerkkikohteet olivat pysäköintihallina käytetty väestösuoja, urheiluhallina käytetty väestösuoja, metroasema ja yhteiskäyttötunneli. Poistumisaikalaskelmat tehtiin käyttäen sekä poistumisen simulointiohjelmaa että käsilaskentamenetelmää. Saadut tulokset vaikuttavat kvalitatiivisesti arvioituna oikean suuntaisilta.			
Avainsanat fire safety, evacuation, human behaviour, calculation methods, simulation tools, under-ground spaces, subterranean spaces			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1000, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6757-9 (nid.) 951-38-6758-7 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)			Projektinumero R4SU00443
Julkaisu-aika Joulukuu 2005	Kieli suomi, engl. abstr.	Sivuja 93 s. + liitt. 13 s.	Hinta C
Projektin nimi Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä		Toimeksiantaja(t) Fläkt Woods Oy, puolustusministeriö, sisäasiainministeriö, Työsuojelurahasto, ympäristöministeriö, VTT	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Author(s) Weckman, Henry			
Title Improvement of fire safety in underground spaces Task B: Evacuation safety			
Abstract The first part of this publication describes evacuation and the design of evacuation routes on a general level and also the behaviour of people during evacuation. It is followed by a presentation of methods for calculation of evacuation and a literature survey of calculation methods for underground spaces. Scientific literature on human behaviour in fires in underground spaces seems to be very scarce. Most of the available information is related to traffic tunnels which, however, are outside of the scope of this investigation. Underground spaces have a number of special features which may influence the behaviour of people. Such features are for instance difficulties to perceive an underground space and the internal connections of its different parts, which may impede finding the shortest route to safety. The absence of windows makes it difficult for evacuees to form a point of reference which complicates orientation in underground spaces. Many individuals feel claustrophobic in underground spaces, which may be further emphasised in fire situations. Smoke and combustion products have a tendency to enter stairwells unless sufficient measures to prevent it have been taken. The latter part of the publication deals with evacuation simulations applied on four different types of underground spaces. The sample cases were: an air raid shelter used as a car park, an air raid shelter used as a sports hall, an underground station and a service tunnel. The evacuation calculations were carried out using both a computer simulation pro-gram and a manual calculation method. The results obtained appear to be qualitatively correct.			
Keywords fire safety, evacuation, human behaviour, calculation methods, simulation tools, under-ground spaces, subterranean spaces			
Activity unit VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6757-9 (soft back ed.) 951-38-6758-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)			Project number R4SU00443
Date December 2005	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 93 p. + app. 13 p.	Price C
Name of project Improvement of fire safety in underground spaces		Commissioned by Fläkt Woods Oy, Ministry of Defence, Ministry of the Interior, the Finnish Work Environment Fund, Ministry of the Environment, VTT	
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 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

Julkaisussa kuvataan aluksi maanalaisista tiloista poistumista ja poistumisen mitoittamista yleensä sekä ihmisten käyttäytymistä poistumisen aikana. Sen jälkeen esitetään poistumisen laskentamenetelmiä sekä kirjallisuudesta löytyneitä maanalaisia tiloja varten laadittuja laskentamalleja.

Julkaisun jälkimmäisessä osassa esitetään neljää eri tyyppiä edustavasta maanalaisesta rakennuskohteesta tehtyjen poistumissimulointilaskelmien tulokset. Esimerkkikohteet olivat pysäköintihallina käytetty väestösuoja, urheiluhallina käytetty väestösuoja, metroasema ja yhteiskäyttötunneli. Poistumisaikalaskelmat tehtiin käyttäen sekä poistumisen simulointiohjelmaa että käsilaskentamenetelmää.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4404
Faksi 020 722 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4404
Fax 020 722 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4404
Fax + 358 20 722 4374
