

Simo Hostikka, Esko Mikkola, Tuomo Rinne,  
Kati Tillander & Henry Weckman

**Henkilöturvallisuuden kehittäminen  
maalaisissa tiloissa paloriskejä  
pienentämällä**



# **Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä**

Simo Hostikka, Esko Mikkola, Tuomo Rinne,  
Kati Tillander & Henry Weckman  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6755-2 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6756-0 (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

Hostikka, Simo, Mikkola, Esko, Rinne, Tuomo, Tillander, Kati & Weckman, Henry. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä [Improvement of fire safety in underground spaces]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2318. 143 s. + liitt. 9 s.

**Avainsanat** fire safety, safety assessments, requirements, underground spaces, parking facilities, underground stations, service tunnels, evacuation, rescue safety, fire simulation

## Tiivistelmä

Tässä julkaisussa esitetään taustatietoja ja perusteita maanalaisia tiloja koskevien paloturvallisuuden arvioinnin ohjeiden ja vaatimustasojen pohjaksi. Liikenneväylien tunneleita ei käsitellä lyhyitä viittauksia lukuun ottamatta. Yhteenvedossa esitellään seuraaviin osaluokkiin liittyviä menetelmiä ja työkaluja: syttymien estäminen, palon kehittyminen, poistumis- ja pelastamisturvallisuus sekä sammutuksen ja savunpoiston vaatimukset.

Julkaisussa kuvataan maanalaisten tilojen tulipalojen erityispiirteitä, esitetään tilastotietoja myös muista vastaavankaltaisista tiloista, tuodaan esimerkkikohteiden avulla esiin paloturvallisuusanalyysissä oleellisia tekijöitä, yleistetään yhteenvedossa analyysihin ja paloturvallisuuden parantamiseen liittyviä keskeisiä asioita sekä esitetään lopuksi jatkotoimenpiteitä. Neljästä eri tyyppiä edustavasta maanalaisesta rakennuskohteesta esitetään tehtyjen palo- ja poistumissimulointilaskelmien tulokset. Esimerkkikohteet olivat pysäköintihallina käytetty väestösuoja, urheiluhallina käytetty väestösuoja, met-roasema ja yhteiskäyttötunneli.

Maanalaisten tilojen palosimuloinnit tulee yleensä tehdä virtauslaskentaan perustuvilla simulointiohjelmilla, jotka pystyvät ottamaan huomioon virtauksen liikemäärän vaikutuksen tunnelimaisessa geometriassa, erilaisten puhaltimien vaikutuksen sekä geometri-an monimutkaisuuden. Joissakin yksinkertaisissa tilanteissa, kuten hallimaisen tilan savulla täyttymisen laskennassa, voidaan kuitenkin käyttää vyöhykemalleja.

Ihmisten käyttäytymisestä maanalaisissa tiloissa tapahtuvissa tulipaloissa on olemassa varsin niukasti tieteellistä tutkimustietoa. Maanalaisiin tiloihin liittyy joitakin erityispiirteitä, jotka saattavat vaikuttaa ihmisten käyttäytymiseen. Tällaisia ovat mm. vaikeudet hahmottaa maanalainen tila ja tilan eri osien keskinäisiä yhteyksiä, mikä voi vaikeuttaa lyhimmän turvaan johtavan kulkureitin löytämistä. Savukaasujen nouseminen ylöspäin porrashuoneisiin voi myös vaikeuttaa poistumista, ellei porrashuoneiden suunnittelussa asiaan ole kiinnitetty riittävästi huomiota.

Esitetyt tulokset luovat pohjan henkilöturvallisuuden parantamiselle ennaltaehkäisyn keinoin pyrittäessä vähentämään tulipaloriskejä, joita aiheutuu maanalaisissa tiloissa työskenteleville sekä tilapäisesti asioiville ja pelastustoimintaan osallistuville.

Hostikka, Simo, Mikkola, Esko, Rinne, Tuomo, Tillander, Kati & Weckman, Henry. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä [Improvement of fire safety in underground spaces]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2318. 143 p. + app. 9 p.

**Keywords** fire safety, safety assessments, requirements, underground spaces, parking facilities, underground stations, service tunnels, evacuation, rescue safety, fire simulation

## Abstract

This publication gives background information and basics for the preparation of guidelines for fire safety assessments and for the setting of requirement levels for underground spaces. Traffic tunnels are not considered here except for a few short references. The summary presents methods and tools for the following sectors: prevention of ignition, fire development, evacuation and rescue safety, requirements for fire suppression and smoke extraction.

The publication describes specific features of underground fires, statistical information for other similar spaces, essential factors are illustrated by the use of case studies, which are generalised in the summary, important features for the improvement of fire safety and finally a number of further actions are being suggested. Results of fire and evacuation simulations carried out on underground spaces of four different types are presented. The case studies are 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.

Fire simulations of underground spaces should in general be carried out using simulation programs based on flow calculations, as they are able to take into account the effects of the momentum of the flow in tunnel geometries, the effects of various fans and blowers and also the complexity of the geometry. In some simple cases, however, zone models can also be used, for instance for the calculation of smoke filling of spaces of hall type.

Only very few scientific studies concerning the behaviour of people in underground fires are currently available. Underground spaces present 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. Smoke and combustion gases have a tendency to enter stairwells, which may aggravate the evacuation unless the matter has been sufficiently considered in the design of the stairwells.

The presented results create a basis for the improvement of personal safety through preventive measures for the reduction of fire risks to people working in underground spaces and to people engaged in rescue operations or people temporarily visiting underground spaces.

# 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 ennaltaehkäisyyn keinoin vähentämällä tulipaloriskejä, joita aiheutuu maanalaisissa tiloissa työskenteleville sekä tilapäisesti asioiville ja pelastustoimintaan osallistuville. Rakenteiden palomitoitus ja liikenneväylien tunnelit eivät 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 koko hankkeen loppuraportti. Julkaisu sisältää lyhennelmän poistumisturvallisuudesta, josta on laadittu myös erillinen julkaisu (Weckman 2005).

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.....	9
2. Tulipalo maanalaisissa tiloissa.....	12
2.1 Tilastotietoja ja onnettomuustapauksia.....	12
2.1.1 Tulipalojen lukumäärät.....	12
2.1.2 Syttymistaajuudet.....	13
2.1.3 Syttymissyyt.....	14
2.1.4 Taloudelliset vahingot.....	17
2.1.5 Tietoja maanalaisten tilojen tulipaloista ulkomailla.....	19
2.1.5.1 Tukholman metro.....	19
3. Esimerkkikohteiden esittely.....	22
3.1 Yleistä.....	22
3.2 Pysäköintitila.....	22
3.2.1 Kuvaus ja käyttötarkoitus.....	22
3.2.2 Palokuorma.....	22
3.2.3 Palonilmaisu, savunpoisto ja sammutus.....	23
3.3 Liikuntatila.....	25
3.3.1 Kuvaus ja käyttötarkoitus.....	25
3.3.2 Palokuorma.....	26
3.3.3 Palonilmaisu, savunpoisto ja sammutus.....	28
3.4 Metroasema.....	28
3.4.1 Yleistä.....	28
3.4.2 Palokuorma.....	31
3.4.3 Palonilmaisu-, sammutus- ja savunpoistojärjestelmät.....	32
3.5 Yhteiskäyttötunneli.....	33
3.5.1 Palokuorma.....	35
3.5.2 Palonilmaisu-, sammutus- ja savunpoistojärjestelmät.....	36
4. Palosimuloinnit esimerkkikohteissa.....	37
4.1 Palosimulointien kuvaus.....	37
4.1.1 Simulointimenetelmät.....	37
4.1.2 Tarkastelussa käytetyt parametrit.....	37
4.2 Pysäköintitila.....	39



4.2.1	Simulointimalli.....	39
4.2.2	Paloskenaariot .....	42
4.2.3	Tulokset.....	44
	4.2.3.1 Savun leviäminen pysäköintihalleissa .....	44
	4.2.3.2 Ylipaineistuksen toiminta .....	44
4.3	Liikuntatila .....	48
4.3.1	Simulointimalli.....	48
4.3.2	Paloskenaariot .....	49
4.3.3	Tulokset.....	51
	4.3.3.1 Savun leviäminen kahvilan kylmälaitepalossa M1 .....	51
	4.3.3.2 Savun leviäminen laitapinon palossa M2.....	53
	4.3.3.3 Savun leviäminen laitapinon palossa M3.....	58
	4.3.3.4 Rakentelusarjahyllyjen paloteho .....	62
	4.3.3.5 Savun leviäminen Rakentelusarjahyllyn palossa M4.....	65
4.4	Metroasema .....	69
4.4.1	Simulointimalli.....	69
4.4.2	Paloskenaariot .....	70
4.4.3	Tulokset.....	72
	4.4.3.1 Kaapelipalo laiturilla.....	72
	4.4.3.2 Metrovaunupalo 15 MW .....	76
	4.4.3.3 Metrovaunupalo 38 MW.....	79
	4.4.3.4 Paloskenaarioiden vaikutus lippuhallitasolla.....	80
	4.4.3.5 Näkyvyyden heikkeneminen eri tarkastelupisteissä .....	85
	4.4.3.6 Metroaseman palosimulointitulosten tarkastelua.....	86
4.5	Yhteiskäyttötunneli.....	88
4.5.1	Simulointimalli.....	88
4.5.2	Paloskenaariot .....	89
4.5.3	Savunpoisto .....	91
4.5.4	Tulokset.....	92
5.	Poistuminen maanalaisista tiloista .....	95
5.1	Yleistä poistumisesta palotilanteessa .....	95
5.2	Poistumisen mitoittamisen yleisperiaatteita .....	96
5.3	Ihmisten käyttäytymisestä poistumistilanteissa.....	99
5.4	Maanalaisista tiloista poistumisen erityispiirteitä .....	100
5.5	Poistumisen laskenta maanalaisissa tiloissa .....	102
	5.5.1 Poistumista koskevia vaatimuksia Suomen rakentamismääräyksissä ...	102
	5.5.2 Esimerkkejä ulkomaisista vaatimuksista.....	104
	5.5.3 Raideliikenteen maanalaisia asemia koskeva laskentamalli .....	105
	5.5.4 Kaivoskäytäviä koskeva laskentamalli .....	106
	5.5.5 Tunnelipalojen henkilöriskin arviointia koskeva menetelmä .....	107
5.6	Poistumissimuloinnit esimerkkikohteissa .....	109

5.6.1	Pysäköintitila.....	110
5.6.2	Liikuntatila.....	113
5.6.3	Metroasema.....	120
5.6.4	Yhteiskäyttötunneli.....	128
6.	Yhteenveto.....	130
6.1	Uhkakuvien muodostaminen.....	130
6.2	Palotilanteiden simuloinnit.....	130
6.3	Poistumisen simulointi.....	131
6.4	Paloturvallisuuden parantamisen keinoja.....	133
6.4.1	Ennaltaehkäisyn keinoja.....	133
6.4.2	Palotilanteen hallinta.....	135
6.4.3	Yleisiä suosituksia.....	136
7.	Jatkotoimenpiteet.....	138
	Lähdeluettelo.....	140

#### Liitteet

Liite A: Simulointituloksia kaapelipalosta laituritasolla: ilmavirran nopeudet

Liite B: Simulointituloksia: savunpoisto kioskipalossa lippuhallitasolla

Liite C: Metroaseman palosimuloinneissa käytetyt palotehokäyrät

Liite D: Poistumisen laskentaohjelma *Simulex*

# 1. Johdanto

Maanalaisten tilojen rakentaminen kasvaa tasaisesti Suomessa, ja näiden tilojen käyttötarkoitukset vaihtelevat varsin suuresti. Suomessa on suurimmissa asutuskeskuksissa käytössä yhteensä useita kymmeniä maanalaisia tiloja, joissa on pysyviä työpaikkoja mm. laitojen ylläpitoon ja operatiiviseen toimintaan liittyen. Päivittäin tiloissa työskentelee satoja ihmisiä, ja tiloja käyttää eri toimintoihin samanaikaisesti tuhansia henkilöitä. Vuorokaudessa määrä on yhteensä vielä moninkertainen. Tällaisia tiloja ovat mm. liikuntatilat ja pysäköintitilat, joissa yleensä on kohdekohtaisesti 1–2 pysyvää työpaikkaa ja samanaikaisesti asioivien lukumäärä on muutamasta henkilöstä satoihin (mm. Espoo, Helsinki, Turku, Oulu). Prosessilaitoksista voidaan mainita mm. maanalaiset jätevedenpuhdistamot, joita on käytössä ainakin Helsingissä ja Raisiossa ja jollainen Turkuun on rakenteilla. Lisäksi väestönsuojiiin on sijoitettu erilaista rauhanajan toimintaa, joten niissä on yleensä myös työpaikkoja. Myös useat infrastruktuurin tekniset tilat sijaitsevat maan alla (esim. kaapeli- ja huoltotunnelit), ja niissä tehdään säännöllisesti erilaisia huolto- ja asennustehtäviä. Maanalaisissa kaivoksissa Suomessa työskentelee noin 1 000 henkilöä.

Suomen maanalaisista liikennejärjestelmistä merkittävimmät ovat Helsingin metro, Helsingin keskustan maanalainen bussiterminaali ja rakenteilla olevat Vuosaaren sataman liikenneyhteydet, joissa kaikissa on runsaasti työpaikkoja ja joiden päivittäiset käyttäjämäärät ovat suuria. Suomessa rakennetaan lähitulevaisuudessa myös moottoriteille ja kehäteille useita nykyistä pitempiä liikennetunneleita, joiden liikennemäärät ovat huomattavan suuret, joten sitäkin kautta turvallisuusvaatimukset kasvavat.

Maanalaisten tilojen paloturvallisuussuunnittelun keskeisimpiä päämääriä on ennaltaehkäistä tulipaloja ja varmistaa, että kohteessa olevat henkilöt voivat tulipalon sattuessa siirtyä turvaan ennen kuin olosuhteet kohteessa muodostuvat henkilöturvallisuuden kannalta kohtalokkaiksi. Tästä seuraa yleensä vaatimuksia esimerkiksi kulkureittien pituuksille, uloskäytävien lukumäärille, mitoille, sijoitukselle ja rakenteille sekä turvalaistukselle ja ohjeiden annolle. Yksinkertaisimmillaan näitä vaatimuksia voidaan esittää taulukkoarvoina mutta etenkin suurten kohteiden osalta tarvitaan analyyttisiä menetelmiä. Niiden periaatteena on poistumiseen käytettävissä olevan ajan vertaaminen kohteen kustakin tilasta poistumiseen kuluvaan aikaan.

Maanalaisista tiloista poistumiseen liittyen on syytä ottaa huomioon mm. seuraavia asioita: Koska maanalaista tilaa ei voi nähdä ulkoapäin, sen hahmottaminen on vaikeaa ja uloskäytäviin johtavien reittien löytäminen on siten vaikeaa. Ikkunoiden puuttumisen takia kiintopisteiden saaminen on vaikeaa, mikä hankaloittaa suunnistamista tiloissa. Savu saattaa nousta uloskäytävien portaikkoihin, mikä edelleen vaikeuttaa tai estää

poistumista. Ihmiset eivät myöskään jätä mielellään omaisuuttaan (esim. autoa) poistukseen paikalta tai odottavat liian kauan ennen poistumisen aloittamista.

Suomessa ei ole yhtenäisiä paloturvallisuusohjeita, jotka koskisivat kaikkia maanalaisia tiloja. Rakennuksiin kuuluvat tilat ovat toki Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 alaisia, mutta nämä ohjeet eivät anna erityisiä ohjeita maanalaisista tiloista toiminnallisen paloturvallisuustarkastelun pohjalta. Etenkin suurten, monimuotoisten tai muuten vaikeita poistumisteitä sisältävien tilojen osalta toiminnallinen paloturvallisuustarkastelu on välttämätöntä riittävän turvallisuustason ylläpitämiseksi ja taloudellisten riskien hallitsemiseksi niin rakentamis- kuin käyttövaiheessakin.

Tällä hetkellä maanalaisten tilojen turvallisuussuunnittelun vaatimukset asetetaan paikallisesti tapauskohtaisesti, koska suunnittelun perustaksi ei ole yhtenäisiä viranomaisten hyväksymiä ohjeita, jotka olisi toteutettu toiminnallisen paloturvallisuusanalyysin keinoin. Ohjeiden antoa varten tarvitaan pohjatietoa ja täydennyksiä ainakin seuraavista tekijöistä: yleisimmät syttymissyöt, palokuorman määrän ja sijainnin vaikutukset palon kehittymiseen ja savun leviämiseen, rakenteelliset reunaehdot, sammutuksen strategiat, savunpoiston vaatimukset sekä poistumis- ja pelastamisturvallisuus.

Tässä julkaisussa kuvatus hankkeen tavoitteeksi asetettiin laatia maanalaisia tiloja koskevien ohjeiden ja vaatimustasojen pohjaksi yhteenveto paloturvallisuuden arvioinnin menettelmistä ja työkaluista seuraavilla osa-alueilla: palon kehittyminen (syttymissyöt, palokuormat, mitoituspalo), poistumis- ja pelastamisturvallisuus sekä sammutuksen ja savunpoiston vaatimukset. Tutkimuksella tähdätään henkilöturvallisuuden parantamiseen ennaltaehkäisykeinoin vähentämällä tulipaloriskejä, joita aiheutuu maanalaisissa tiloissa työskenteleville sekä tilapäisesti asioiville ja pelastustoimintaan osallistuville. Rakenteiden palomitoituksen ohjeistaminen ja liikennetunnelit eivät kuulu tähän hankkeeseen.

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

Toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua käytettäessä pystytään optimoimaan henkilöturvallisuutta parantavia ratkaisuja yhdessä käyttöön liittyvien toiminnallisten vaatimusten ja kustannustehokkaan rakentamisen kanssa. Käyttämällä mahdollisten palotilanteiden tarkasteluun kokeellisen aineiston avulla todennettuja simulointimenetelmiä voidaan välttää erittäin kalliiden täyden mittakaavan palokokeiden tekeminen.

Käytettäviä malleja ja paloturvallisuusarviointien menetelmiä voidaan hyödyntää myös uusien tilaratkaisujen kehittämisessä, uusien teknologioiden käyttöönotossa sekä jo käytössä olevien tilojen turvallisuustarkasteluissa. Kustannustehokkuus korostuu myös siinä,

että on edullisempaa tehdä turvallisuussuunnittelu uusimpaan paloturvallisuustekniikkaan perustuvilla menetelmillä kuin oppia vahinkojen kautta.

Hankkeen toteutuksen lähtökohdat olivat konkreettiset: Aluksi valittiin yhdessä johtoryhmän kanssa tyypillisiä maanalaisia tiloja tutkimuksen kohteiksi. Niistä on edetty yleisiin periaatteisiin ja menetelmiin. Tutkimus jakautui kahteen päätehtävään, jotka ovat *A: Mitoituspalot ja savun leviäminen* sekä *B: Poistumisturvallisuus*. Näiden pohjalta tässä yhteenvedossa esitetään hankkeen toteutus ja tulokset, joihin kuuluu palosimulointien ja poistumissimulointien tuloksien vertailuja ja arvioita poistumisen onnistumismahdollisuuksista valituissa tulipalotapauksissa.

## **2. Tulipalo maanalaisissa tiloissa**

Maanalaisissa tiloissa paloturvallisuuden merkitys korostuu siitä syystä, että tulipalossa savu pyrkii leviämään ylöspäin käyttäen reittejä, jotka ovat myös poistumiseen tarkoitettuja. Maan alta poistumistiet johtavat aina lopulta ylöspäin. Paloriskeille altistuvien kasvavina kohderyhminä ovat vakituisesti tai tilapäisesti maanalaisissa tiloissa työskentelevät, näissä tiloissa asioivat sekä pelastushenkilöstö.

Etenkin liikennetunneleissa on maailmanlaajuisesti tapahtunut lukuisia tuhoisia tulipaloja, joissa kuolonuhrien määrä on ollut suuri ja taloudelliset menetykset ovat olleet laajoja. Myös Suomessa on varauduttava vakaviinkin onnettomuuksiin, koska kaiken kaikkiaan maanalaisten tilojen käyttö kasvaa jatkuvasti ja palokuormat kohteissa pyrkivät kasvamaan, jolloin myös syytymisten määrä kasvaa.

Maanalaisista tiloista poistumisreittien kokonaispituudet muodostuvat helposti suuriksi, ja kohteen hahmottaminen on yleensä hankalaa, koska kohdetta ei ole voinut nähdä ulkoapäin. Valaistusolosuhteiden saaminen riittäväksi (etenkin jos tilan yläosissa on jo savua) vaatii erityisjärjestelyjä samoin kuin poistumisen opastaminen eri keinoin. Myös tuhopolttojen huomioon ottaminen on oleellisen merkittävää, koska Suomessa tulipaloista jopa kolmannes on tuhopolttoja ja siten niiden osuus taloudellisiin vahinkoihin on merkittävä. Näin mm. vartioinnin ja valvonnan merkitys korostuu näissä tiloissa.

Esitettävissä analyseissä keskitytään palamistuotteiden vaikutusten suhteen pääasiassa tuotteiden näkyvyyttä heikentävään ominaisuuteen, savuun. Vaikka palamistuotteet sisältävät myös haitallisia kaasuja, voidaan useimmiten olettaa, että siellä, missä on vielä savutonta, myrkyllisiä kaasujakaan ei esiinny haitallisen korkeina pitoisuuksina.

### **2.1 Tilastotietoja ja onnettomuustapauksia**

#### **2.1.1 Tulipalojen lukumäärät**

Tilastoaineisto poimittiin sisäasiainministeriön ylläpitämästä onnettomuustietokanta Prontosta syyskuussa 2004. Koska Prontossa ei ole erikseen eritelty maanalaisissa tiloissa syttyneitä tulipaloja, otettiin tarkasteluun mukaan sellaisissa rakennuksissa syttyneet palot, joissa tapahtuva toiminta vastaisi maanalaisissa tiloissa harjoitettavaa toimintaa mahdollisimman läheisesti. Tällä perusteella tarkasteluryhmään valittiin mukaan taulukossa 1 mainitut rakennustyyppit, jotka seuraavat Tilastokeskuksen rakennusluokista (Tilastokeskus 2004).

Taulukko 1. Tarkasteluun mukaan valitut rakennustyyppit.

Rakennustyyppi	Tulipaloja yhteensä 1996–2004	%
162 Kulkuneuvojen suoja- tai huoltorakennus	304	53
163 Pysäköintitalo	16	3
164 Tietoliikenteen rakennus	13	2
169 Muu liikenteen rakennus	20	3
331 Seura- tai kerhorakennus yms.	65	11
353 Tennis-, squash- tai sulkapallohalli	3	0,5
354 Monitoimihalli tai muu urheiluhalli	16	3
359 Muu urheilu- tai kuntoilurakennus	71	12
369 Muu kokoontumisrakennus	54	9
721 Paloasema	4	0,7
722 Väestönsuoja	5	0,9
729 Muu palo- ja pelastustoimen rakennus	4	0,7
<b>Yhteensä</b>	<b>575</b>	

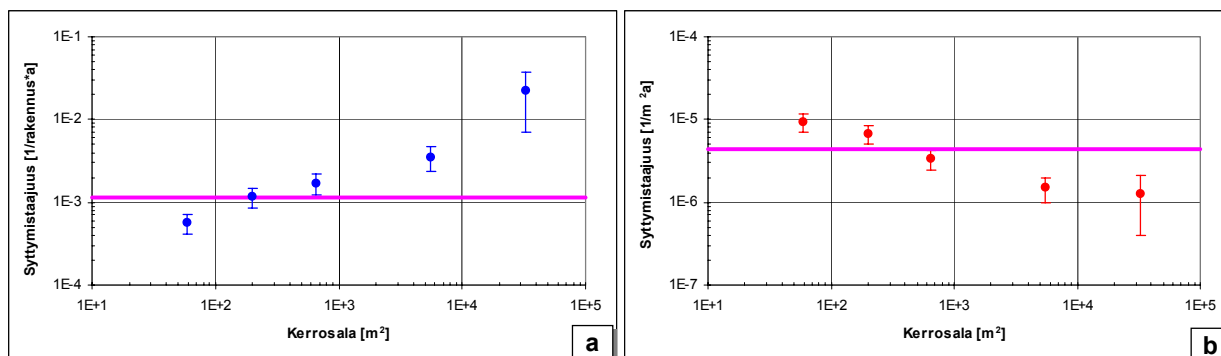
Poiminta kattoi tiedot tulipaloista näissä rakennustyypeissä vuosina 1996–2004. Vuoden 2004 osalta tiedot kattoivat vain alkuvuoden tulipalot. Yhteensä tulipaloja oli syttynyt tarkasteluajavälillä 575 kpl. Kun vajaa vuosi 2004 jätettiin huomioimatta, vuosittainen tulipalojen lukumäärä oli 67 kpl.

### 2.1.2 Syttymistaajuudet

Syttymistaajuustarkastelussa vuoden 2004 tulipalot jätettiin huomioimatta, sillä ne kattoivat vain vuoden alkuosan. Vuosina 1996–2003 (8 vuotta) onnettomuustietokanta Prontoon kirjautuneita tulipaloja syttyi 537 kpl. Suhteutettuna rakennusten lukumäärään (tarkasteluryhmän rakennuksia rakennuskannassa) ja kerrosalaan syttymistaajuuden arvoiksi saatiin seuraavat:

0,0012 1/a-rakennus  
4,4E-6 1/m<sup>2</sup>a.

Syttymistaajuuksien vaihtelu kerrosalan funktiona esitetään kuvassa 1. Vaakaviiva kuvaa syttymistaajuuden keskiarvoa.



Kuva 1. Syttymistaajuus kerrosalan funktiona a) rakennusta kohden, b) kerrosalaneliometriä kohden. Vaakaviivalla on kuvattu keskimääräistä syttymistaajuutta.

### 2.1.3 Syttymissyyt

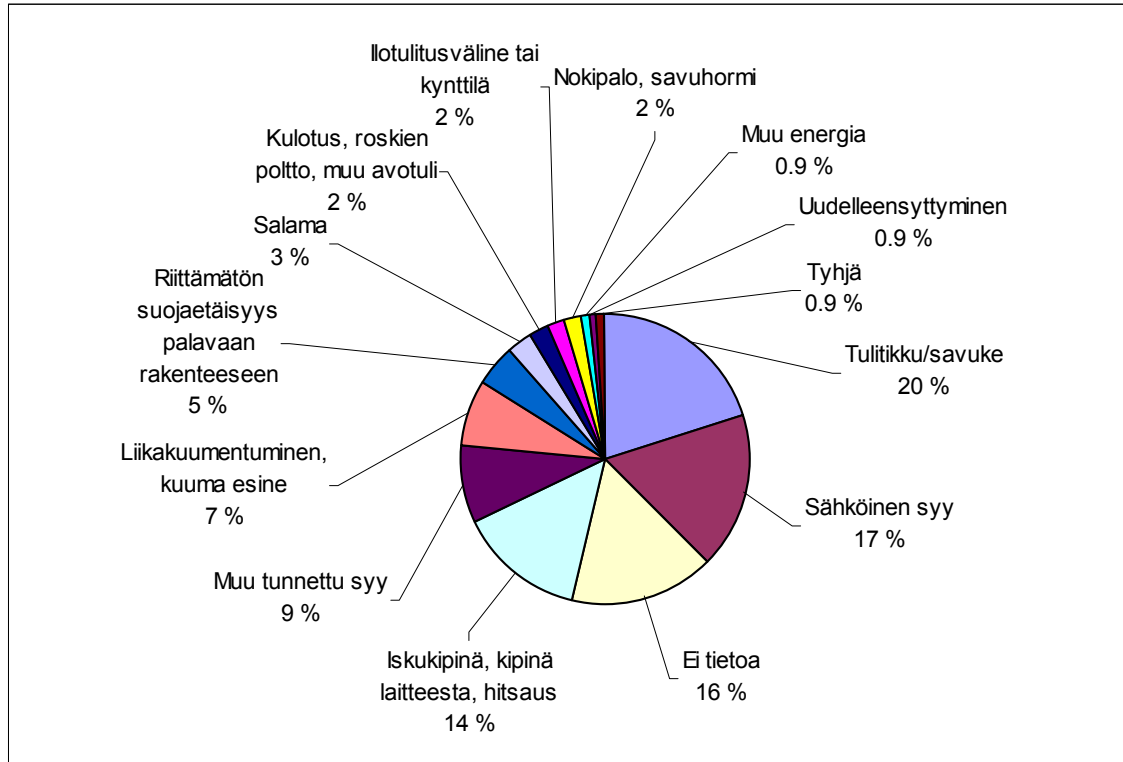
Prontoon kirjatus, pelastusviranomaisen tekemän arvion mukaisesti 45 % tulipaloista aiheutui ihmisen toiminnasta. Seuraavaksi suurin syttymän aiheuttaja oli aineiston mukaan koneen tai laitteen vika (28 %). (Ks. taulukko 2.)

Taulukko 2. Arvio tulipalon aiheuttajasta.

Arvio tulipalon aiheuttajasta	Lkm.	%
Ihmisen toiminta	259	45 %
Koneen tai laitteen vika	162	28 %
Aiheuttaja tuntematon	83	14 %
Muu tunnettu syy	49	9 %
Luonnontapahtuma tai -ilmiö	15	3 %
Palovaarallinen aine	6	1 %
Tyhjä	1	0,2 %
<b>Yhteensä</b>	<b>575</b>	

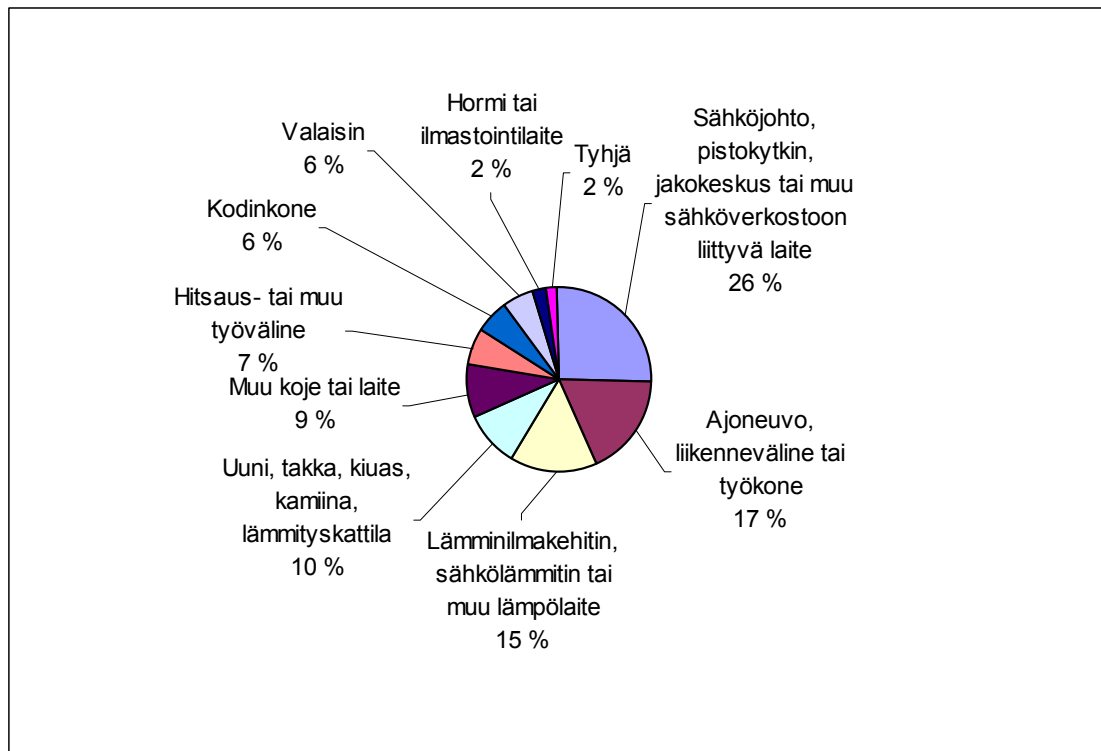


Näissä tulipaloissa yksilöidympi arvio tulipalon syttymissyystä oli kirjattu tunnetuksi 83 %:ssa tapauksista. Yleisimmät syyt olivat tulitikku tai savuke (20 %) sekä sähköiset syyt (17 %). Jakauma esitetään kuvassa 2.



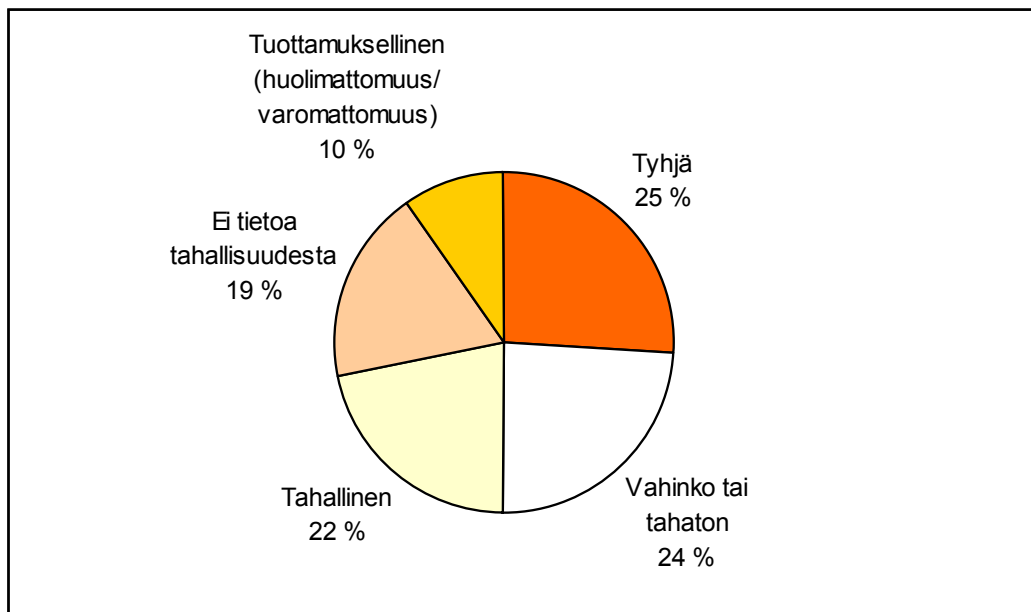
Kuva 2. Arvio tulipalon syttymissyystä (N = 575).

Kun tarkasteltiin taulukossa 2 esitettyä toiseksi yleisintä syttymisen aiheuttajaa ”koneen tai laitteen vika” ja edelleen syttymän aiheuttajaksi epäiltyä konetta tai laitetta, sähkölaitteet osoittautuivat suurimmaksi syttymiä aiheuttavaksi ryhmäksi (26 %) tässä kategoriassa. Ajoneuvojen, liikennevälineiden ja työkonoiden aiheuttamien syttymien osuus oli havaintoaineistossa 17 %. Jakauma esitetään kuvassa 3.



Kuva 3. Tulipalon aiheuttanut kone tai laite niissä tapauksissa, joissa tulipalon aiheuttajaksi oli merkitty kone tai laite (N = 162).

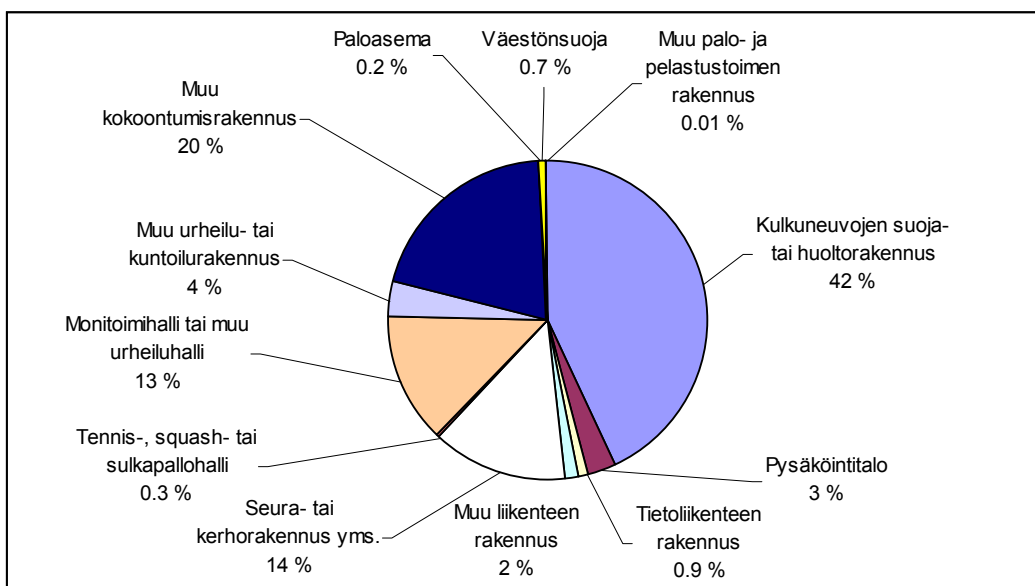
Tulipaloista 22 % oli arvioitu tahallaan sytytetyiksi, 24 % tahattomiksi sekä 10 % tuottamuksellisiksi tulipaloiksi. Arvio tahallisuudesta oli tehty 75 %:ssa tapauksista. Jakauma esitetään kuvassa 4.



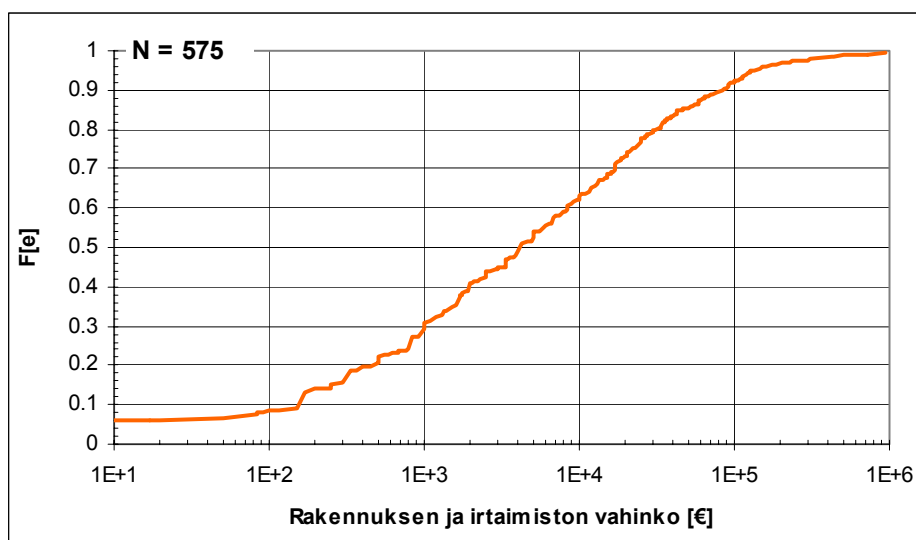
Kuva 4. Arvio tulipalon tahallisuudesta (N = 575).

## 2.1.4 Taloudelliset vahingot

Tarkasteluryhmässä syttyneissä tulipaloissa (1996–2004) aiheutuneet taloudelliset vahingot rakennukselle ja irtaimistolle olivat yhteensä 21,8 miljoonaa euroa. Vahinkosumman jakautuminen eri rakennustyypeissä sattuneille tulipaloille esitetään kuvassa 5 sekä vahingon kertymäkuvaaja kuvassa 6.

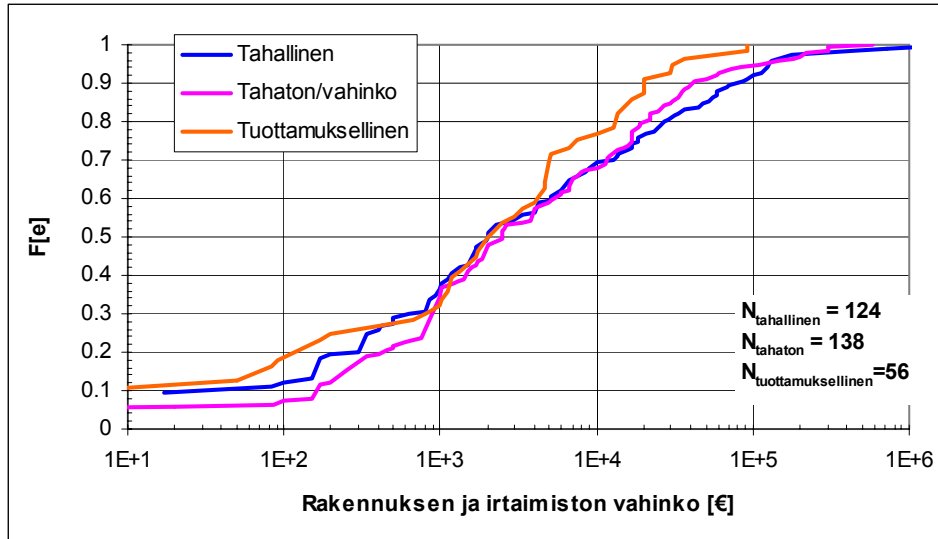


Kuva 5. Rakennuksen ja irtaimistovahingon (21,8 milj. euroa) jakautuminen eri rakennustyyppien kesken.



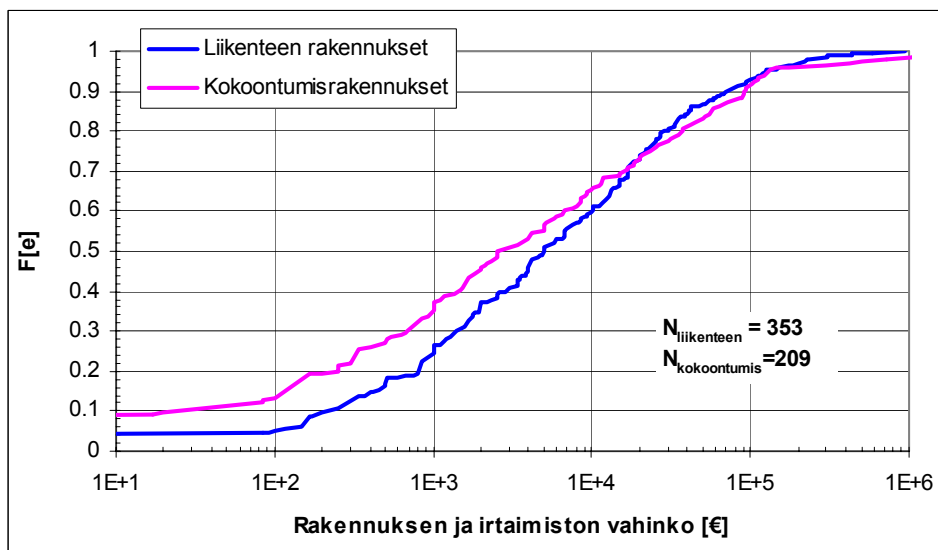
Kuva 6. Rakennuksen ja irtaimiston yhteenlasketun vahingon kertymäkuvaaja.

Kuvassa 7 esitetään tahalliseksi, tahattomiksi sekä tuottamuksellisiksi arvioituissa tulipaloissa syntyneiden vahinkojen kertymäkuvaajat erikseen. Eri kuvaajien väliset erot eivät osoittautuneet merkityksellisiksi.



Kuva 7. Rakennuksen ja irtaimiston yhteenlasketun vahingon kertymäkuvaajat tahalliseksi, tahattomiksi sekä tuottamuksellisiksi arvioituissa tulipaloissa.

Kuvassa 8 esitetään vahingon kertymäkuvaajat liikenteen rakennuksissa (162, 163, 164, 169 taulukossa 1) sekä kokoontumisrakennuksissa (331, 353, 354, 359, 369 taulukossa 1). Näiden rakennustyyppiryhmien vahinkojen välinen ero osoittautui pieneksi. Pienen lukumäärän vuoksi palo- ja pelastustoimen rakennukset (721, 722, 729 taulukossa 1) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 8. Rakennuksen ja irtaimiston yhteenlasketun vahingon kertymäkuvaajat kokoontumis- ja liikenteen rakennuksissa.

## 2.1.5 Tietoja maanalaisien tilojen tulipaloista ulkomailla

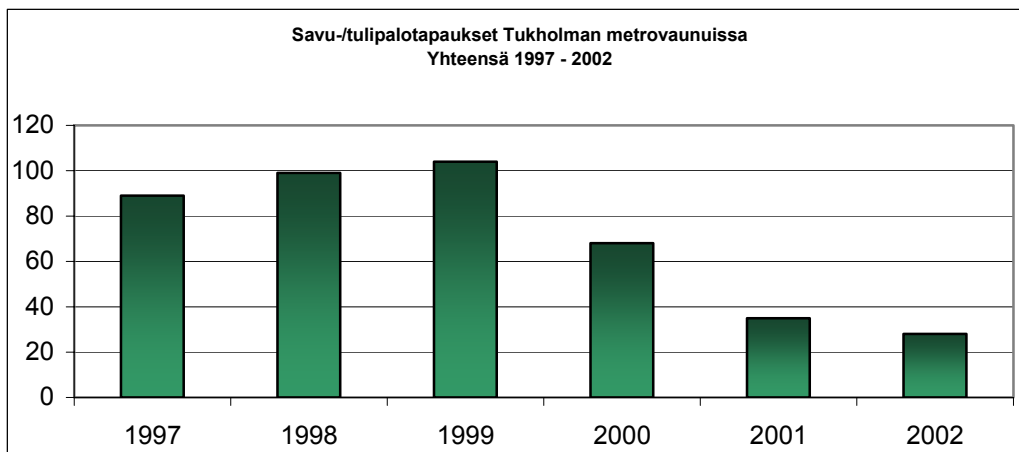
Tunnetuin maanalaisissa tiloissa syttynyt tulipalo ulkomailla lienee Lontoon King's Crossin metroaseman palo vuonna 1987 (Marchant 1989, Anon. 1992), jossa menehtyi 31 ihmistä. Tulipalon arvioidaan saaneen alkunsa puisten liukuportaiden alta, josta se levisi nopeasti ja saartoi metromatkustajia asemalaiturille. Tämän tuhoisan tulipalon tutkimuksessa löydettiin useita epäkohtia tulipalojen ehkäisystä, turvallisuusjohtamisesta sekä onnettomuustilanteiden hallinnasta. Tutkinnan tuloksena esitettiin 157 suositusta yleisen sekä paloturvallisuuden parantamiseksi (Marchant 1989). Tutkimuksen julkaisemisen seurauksena esiteltiin määräykset ”The Fire Precautions (Sub-surface Railway Stations) Regulations 1989”. Onnettomuuden seurauksena mm. kiellettiin tupakointi metroasemilla, poistettiin puiset liukuportaat, asennettiin portaikkoihin sprinklereitä sekä paloilmalaitteita, lisättiin aseman henkilökunnan paloturvallisuuskoulutusta sekä kiinnitettiin huomiota onnettomuudessa toimivien henkilöiden (palokunta, poliisi, ambulanssi) yhteistyön parantamiseen.

Suurin osa läpikäydystä ulkomaisesta aineistosta käsitteli tulipaloja liikennetunneleissa, joissa syttyvät palot oli rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

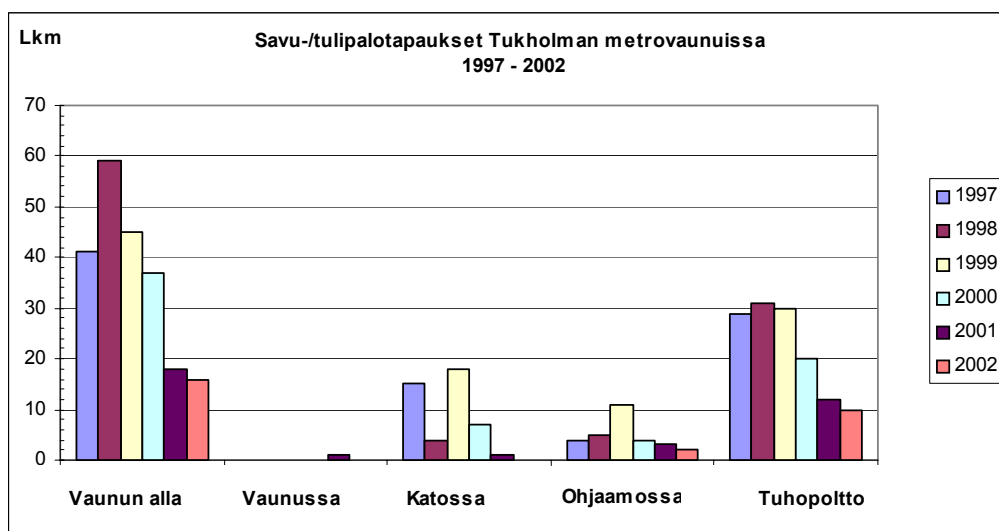
### 2.1.5.1 Tukholman metro

Ruotsissa Tukholman liikennelaitos on tilastoinut metroissa vuosina 1997–2002 sattuneita tulipaloja tai savua aiheuttaneita onnettomuuksia. Suurin osa sattuneista paloista oli hyvin pieniä, ja on huomattava, että käytetty aineisto kattoi tulipalojen lisäksi myös savua aiheuttaneet tapaukset. Seuraavaksi esitellään lyhyesti muutamia tilastoaineistosta tehtyjä yhteenvetoja.

Kuvassa 9 esitetään metrovaunuissa syttyneiden tulipalojen kokonaislukumäärät vuosina 1997–2002. Yhteensä tapahtumia oli aineiston perusteella sattunut 423 kpl. Kuvassa 10 eritellään metrovaunuissa syttyneiden tulipalojen (ja savua aiheuttaneiden tapahtumien) esiintymiskohdat. Kuten kuva 10 osoittaa, 51 % tapauksista havaittiin vaunun alla ja 31 % luokiteltiin tuhopoltoiksi.



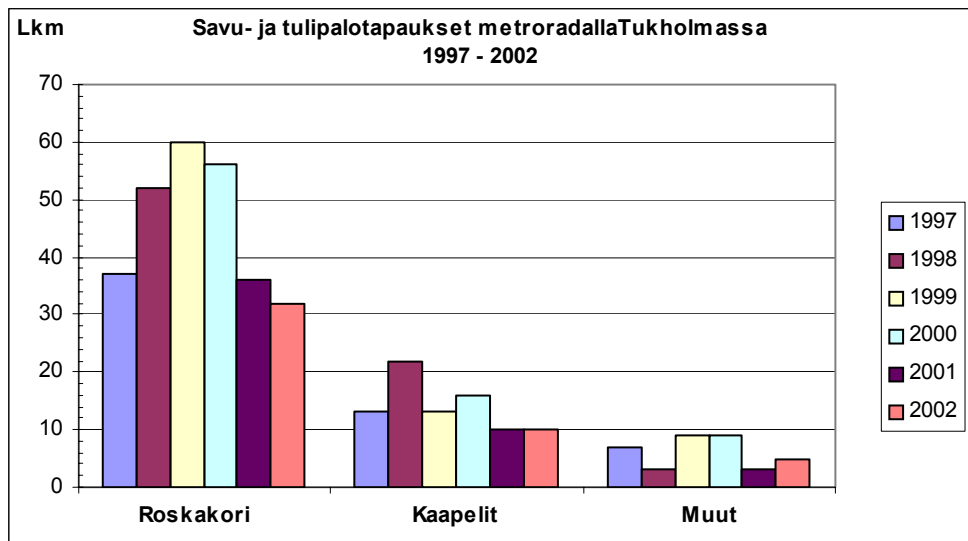
Kuva 9. Savu- ja tulipalotapahtumat metrovaunuissa Tukholmassa vuosina 1997–2002.



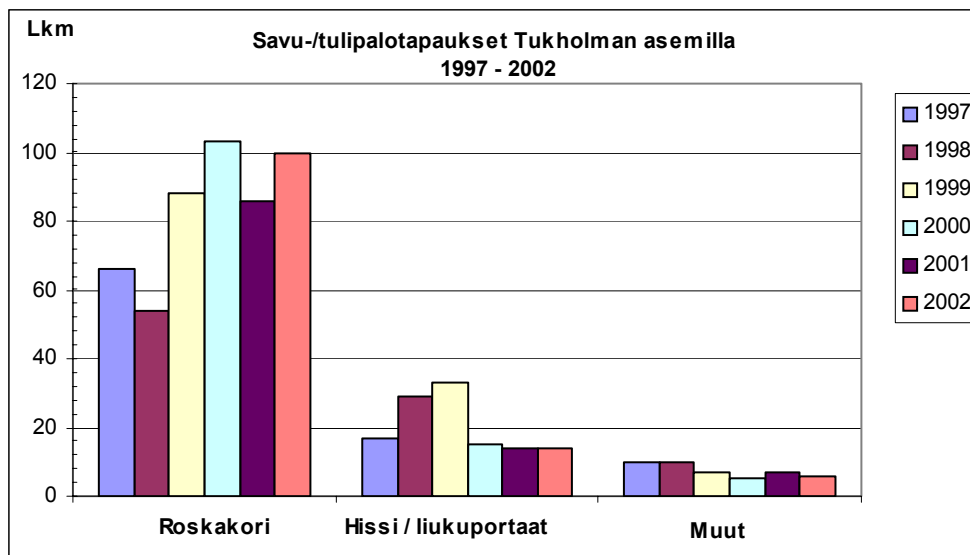
Kuva 10. Savu- ja tulipalotapahtumat metrovaunuissa Tukholmassa vuosina 1997–2002.

Kuva 11 kattaa metroradoilla tapahtuneet savu- ja tulipalotapaukset, joita aineiston perusteella oli sattunut yhteensä 393 kpl. Näistä 69 % oli roskakoripaloja, 21 % kaapeli-paloja ja 9 % muita paloja tai savuamisia.

Kuvassa 12 esitetään Tukholman asemilla sattuneiden tapauksien (yhteensä 664 kpl) lukumäärät vuosittain. Kuten kuva 12 osoittaa, 75 % tapauksista oli roskakoripaloja, 18 % sattui liukuportaissa tai hisseissä ja loput 7 % muualla.



Kuva 11. Savu- ja tulipalotapahtumat metroradalla Tukholmassa vuosina 1997–2002.



Kuva 12. Savu- ja tulipalotapahtumat asemilla Tukholmassa vuosina 1997–2002.

## 3. Esimerkkikohteiden esittely

### 3.1 Yleistä

Hankkeen palo- ja poistumissimulointien kohteiksi johtoryhmä valitsi seuraavat tyyppi-kohteet: pysäköintihallina käytetty väestönsuoja, urheilutilana käytetty väestönsuoja, metroasema liittyvine tiloineen ja yhteiskäyttötunneli. Niiden todettiin edustavan kohtuullisen hyvin erilaisia käyttökohteita niin koon, käyttötarkoituksen, henkilömäärien kuin yleisölle avoimuudenkin suhteen. Seuraavassa on esitelty kukin kohde käyttötarkoituksineen, oletetut tai havaitut palokuormat sekä palonilmaisun, savunpoiston ja sammutuksen järjestelyt.

### 3.2 Pysäköintitila

#### 3.2.1 Kuvaus ja käyttötarkoitus

Tutkittava kohde on rakenteilla oleva maanalainen väestönsuoja, joka normaalioloissa toimii pysäköintitilana. Tila koostuu kolmesta n. 120 m:n pituisesta hallista, niitä yhdistävistä ajo- ja kävelytunneleista, teknisistä tiloista, maanpinnalle johtavista kuiluista (3 kpl) sekä ajotunnelista. Havainnekuvana voidaan käyttää kohteesta muodostettua, kuvassa 13 esitettyä FDS-mallia. Tekniset tilat eivät ole mukana FDS-mallissa. Hallit ovat n. 16 m leveitä ja keskeltä 4,8 m korkeita. Lattiataso on -9,4 m:n korkeudella merenpintaan nähden, ja kuilujen yläpäätt ovat tasolla +8...+13 m.

Pysäköintilaitoksessa on 260 autopaikkaa. Normaalisti tilassa ei ole yhtään vakituista työpistettä, mutta siellä voivat työskennellä mm. siivoajat sekä erilaiset huoltohenkilöt. Lisäksi tilassa voi olla autoistaan poistuvia tai niille palaavia henkilöitä. Uloskäytävinä toimivat maanpinnalle johtavat kuilut sekä ajoluiska.

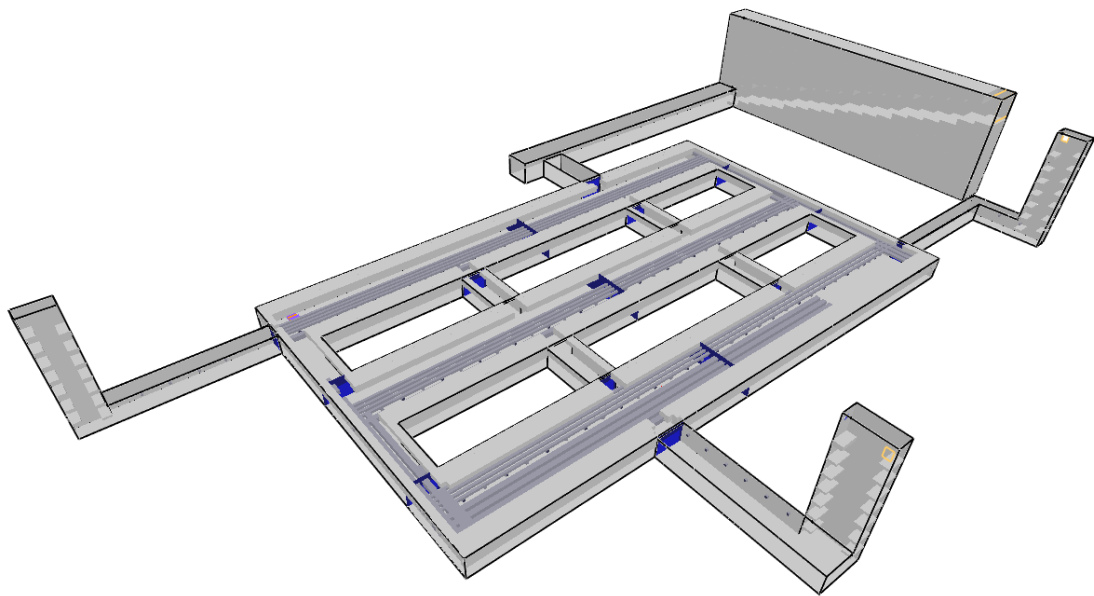
#### 3.2.2 Palokuorma

Pääasiallisena palokuormana toimivat pysäköidyt autot. Autopalo voi syntyä myös mahdollisen kolarin seurauksena. Auton palotehona käytetään eurooppalaisessa pysäköintilaitosten paloturvallisuutta koskeneessa tutkimuksessa kehitettyä käyrää (Joyeux *et al.* 2002), joka esitetään kuvassa 14. Palossa vapautuva kokonaisenergia on 4,3 GJ. Koska tila on sprinklattu, voidaan olettaa, että palo rajoittuu vain yhteen autoon. Sprinklauksen pettäessä tai puuttuessa pitäisi ottaa huomioon myös naapuriautojen syttyminen. Samassa lähteessä esitetään, että naapuriauton voidaan olettaa syttyvän 12 minuutin



kuluttua ensimmäisen auton syttymisestä. Autojen lisäksi tiloissa on kaapeleita, mutta niiden määrä on tilojen kokoon nähden melko vähäinen.

Syttyvä auto voi sijaita missä tahansa pysäköintitilassa. Simuloinneissa palavan auton oletettiin sijaitsevan joko lähellä yhden porraskuilun oviaukkoa tai keskimmaisessa hallissa. Ensimmäisessä tapauksessa tulipalo vaikuttaa poistumisolosuhteisiin estämällä yhden uloskäytävän käytön. Toisessa tapauksessa palon vaikutus ulottuu kaikkein laajimmalle, mikäli savulohkojen ovien sulkeutuminen estyy tai viivästyy.

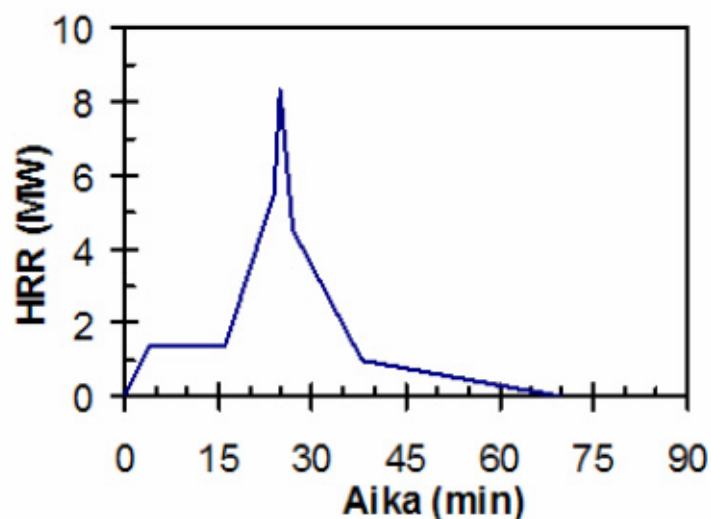


*Kuva 13. Yleiskuva maanalaisen pysäköintitilan FDS-mallista. Tilaan liittyvät tekniset tilat eivät ole mukana mallissa.*

### **3.2.3 Palonilmaisu, savunpoisto ja sammutus**

Paloteknisesti pysäköintilaitos on yhtä palo-osastoa mutta jaettu kuuteen savuosastoon. Tekniset tilat ja uloskäytävät ovat kaikki omia palo-osastojaan.

Tila on varustettu automaattisella, osoitteellisella paloilmoitinjärjestelmällä. Ilmaisimia on 1 kpl / 400 m<sup>2</sup>. Tiloissa on koneellinen ilmanvaihto (tulo ja poisto). Palohälytyksen sattuessa ilmanvaihto kytkeytyy pois päältä ja savulohkojen ovet sulkeutuvat automaattisesti.



Kuva 14. Auton palotehokäyrä (Joyeux et al. 2002).

Savunpoisto suoritetaan koneellisesti, erityisiä kanavia pitkin. Kussakin savulohkossa on yksi savunpoiston päätelaite. Savunpoiston tilavuusvirta on  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , ja savunpoisto tapahtuu vain yhdestä lohkosta kerrallaan. Savunpoistoa ohjataan manuaalisesti maanpinnalla sijaitsevista ohjauskeskuksista. Korvausilma johdetaan sisäänkäyntien kautta ovia avaamalla. Savunpoiston tavoitteena on tarjota pelastushenkilöstölle hyvä näkyvyys sammutushyökkäyksen aikana.

Pysäköintitilat, tekniset tilat, kulkutiet ja ajokäytävä on varustettu automaattisella sprinklerijärjestelmällä. Sprinklerien toimintalämpötila on  $68 \text{ }^\circ\text{C}$  ja suojausala  $12 \text{ m}^2$ .

Poistumisreittien turvaamiseksi porrashuoneet on ylipaineistettu. Ylipaineistus on toteutettu Woods Air Movement Ltd:n ohjeen mukaisesti.<sup>1</sup> Palohälytyksen tullessa kukin porrashuone ylipaineistetaan sen yläpään asennetun, taajuusmuuttajalla varustetun aksiaali-puhaltimen avulla. Ylipaineistusilma purkautuu pakotilanteessa pysäköintihalliin. Paine-erolähetin ohjaa taajuusmuuttajaa siten, että porrashuoneessa ylläpidetään  $+50 \text{ Pa}$ :n ylipaine (MODE 1). Pakotilanteessa puhallin pyrkii tuottamaan virtausnopeuden  $0,75 \text{ m/s}$  yhteen  $2,1 \text{ m}^2$ :n oviaukkoon (MODE 2).

Ylipaineistuksen suunnitteluohjeen taustalla on melko yksinkertainen käsitys tulipalosta. Perusajatuksena on, että ylipaineistuksella tuotetaan niin suuri tilavuusvirta, että savu ei pääse virtaamaan sisään suojattavan tilan aukosta. Savun oletettu virtausnopeus on  $0,9 \text{ m/s}$ , joka perustuu Thomasin korrelaation antamaan arvoon  $2,4 \text{ MW}$ :n tulipalolle.

<sup>1</sup> Smoke Control by Pressurisation, Woods Air Movement Ltd. 1998. Vaihtoehtoinen lähde on CEN-standardiluonnos: Smoke and heat control systems – Part 6: Specification for pressure differential systems – Kits. CEN. prEN 12101-6:2004:E.

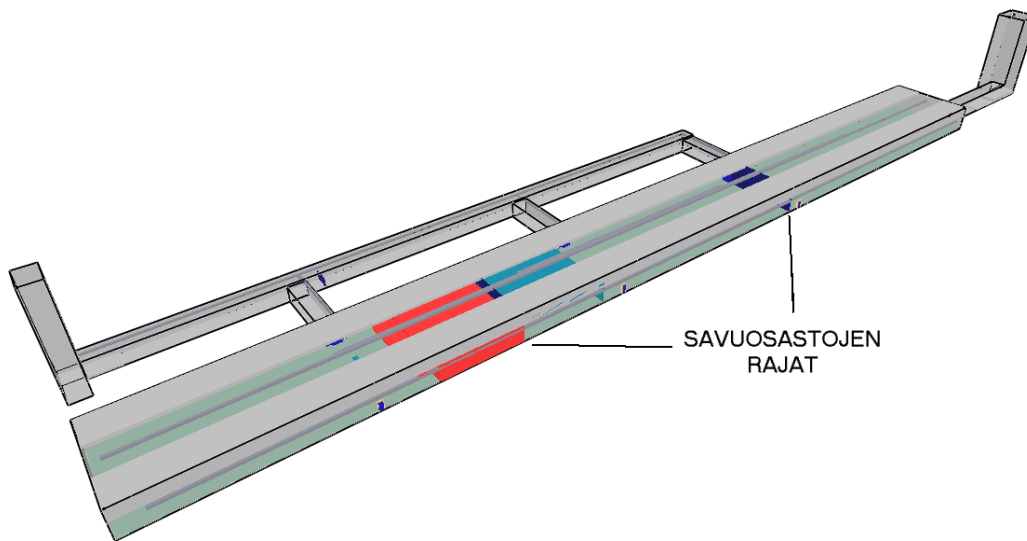
Koska tämä on todettu vaikeaksi saavuttaa käytännössä, todetaan suunnitteluohjeessa riittäväksi arvoksi 0,75 m/s. Puhallin ei kuitenkaan missään tilanteessa saa tuottaa +50 Pa:a suurempaa paine-eroa suojattavan tilan ja sen naapuritilan välille, jotta ovien avaaminen olisi edelleen mahdollista. Ohjeessa edellytetään, että savulle tarjotaan jokin muu reitti pois palotilasta. Tämä onkin looginen vaatimus, jotta ylipaineistus voisi onnistua. Maanalaisissa tiloissa vaatimuksen toteuttaminen voi tosin usein olla hankalaa.

### **3.3 Liikuntatila**

#### **3.3.1 Kuvaus ja käyttötarkoitus**

Tutkittava kohde on maanalainen väestösuoja, joka normaalioloissa toimii liikuntatilana. Tila koostuu yhdestä, n. 240 m pitkästä ja 22 m leveästä hallista, joka on jaettu kolmeen n. 80 m:n pituiseen savuosastoon. Ensimmäisessä osastossa (73 m) toimii kahvio ja toisessa osastossa kuntosali. Muut tilat toimivat palloilukenttinä. Halli on keskikohdastaan 6,7 m ja reunoiltaan 2,9 m korkea. Pääsisäänkäyntiin liittyvät, pääasiallisina uloskäytävinä toimivat käytävät ovat 3,65 m korkeita ja 4,0 m leveitä. Kolmannen osaston päädyistä alkavan uloskäytävän korkeus on 4,5 m ja leveys 4,0 m. Korkeusero hallin lattia- tasolta porraskuilujen yläpintoihin on 25,6 m. Havainnekuva kohteesta esitetään kuvassa 15 kohteen FDS-mallin avulla.

Savuosastojen väliset seinät ovat kevytrakenteisia, ja niissä on yksi ovi. Sisäänkäynti on ensimmäisen osaston kautta, mutta kaikista osastoista on pääsy pääasialliseen uloskäytävään. Lisäksi kolmannen osaston päässä on vain palotilanteissa käytettävä uloskäytävä. Ensimmäisestä ja toisesta osastosta on lisäksi pääsy pysäköintitilaan, joka on jätetty pois tästä tarkastelusta. Myös tekniset tilat on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 15. Yleiskuva maanalaisesta liikuntatilasta.

Ilmanvaihto on mitoitettu siten, että normaalitilassa ensimmäiseen osastoon kohdistuu n.  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  ja toiseen ja kolmanteen  $6,72 \text{ m}^3/\text{s}$  ilmanvaihto (tulo ja poisto). Uloskäytävässä on  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ilmanvaihto. Palohälytyksen tullessa ilmanvaihto kytkeytyy pois päältä.

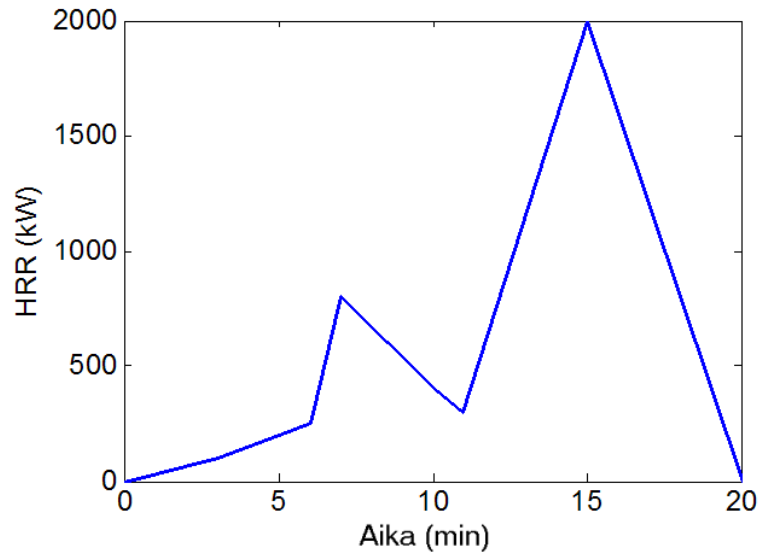
Normaalioloissa tilaa käytetään salibandyn pelaamiseen. Kohteessa voidaan järjestää normaalien harjoitusvuorojen lisäksi pienimuotoisia turnauksia. Ajoittain kohteessa järjestetään lapsille suunnattu näyttely, jossa kahteen ensimmäiseen savuosaan sijoitetaan muovisia rakentelutarjoja, leluja, autoratoja ja muuta lasten huvittelumateriaalia. Kohteen henkilömäärä on 300 henkilöä + 60 henkilöä halleihin liittyvässä pysäköintitilassa.

### 3.3.2 Palokuorma

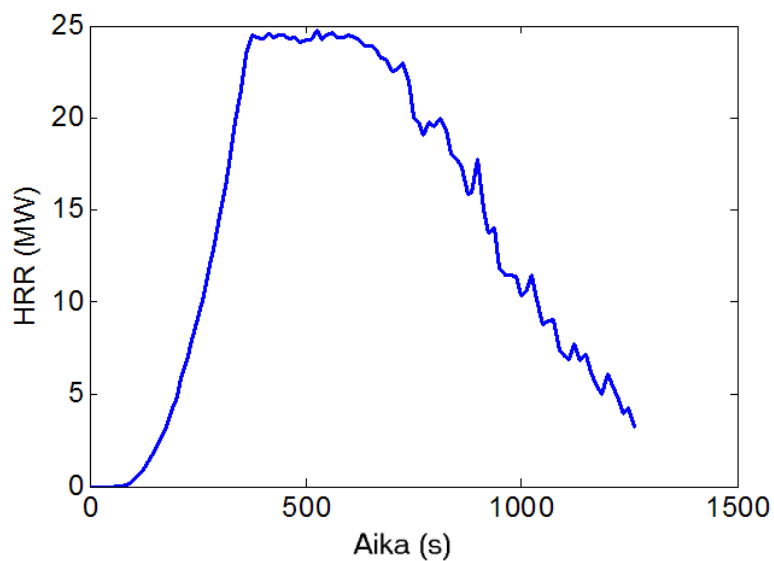
Kohteen paloturvallisuutta tutkittiin kolmen eri paloskenaarion avulla:

1. Kylmälaitteen palo ensimmäisessä osastossa sijaitsevassa kahviossa. Palotehokäyränä käytettiin VTT:n tutkimuksessa (Hietaniemi *et al.* 2001) mitatun käyrän yksinkertaistettua versiota, joka esitetään kuvassa 16.
2. Kuljetusvaunuun pinottujen salibandykentän laitojen palo. Asiantuntija-arvioon perustuva palotehokäyrä esitetään kuvassa 17. Käyrä on piirretty FDS-ohjelman simulointituloksen perusteella, joten käyrässä esiintyvät epätasaisuudet johtuvat simulointimenetelmään liittyvistä heilahteluista. Palotehokäyrän muodostamisessa on oletettu, että kahden kentän laidat on koottu neljään vaunuun, jotka ovat niin lähellä toisiaan, että palo pääsee leviämään vaunusta toiseen. Kokonaisenergiamäärä on 36 GJ.

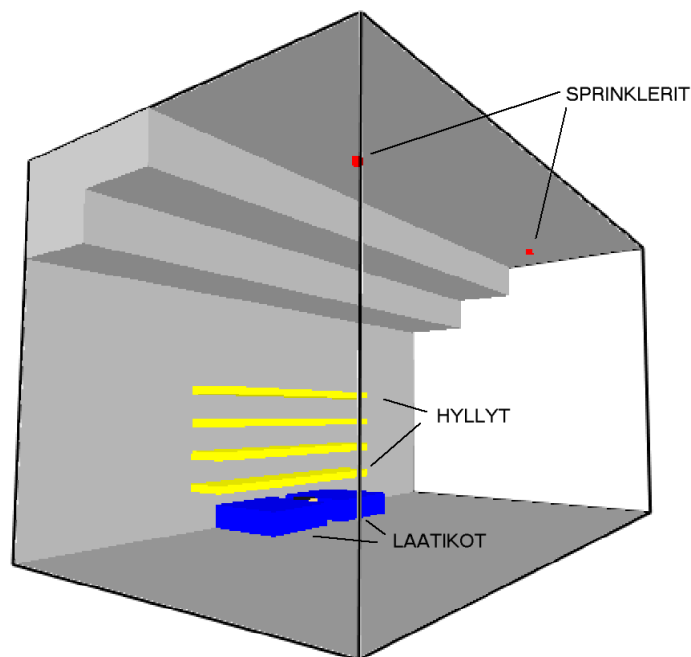
3. Palo seinään kiinnitetyssä, muovisten rakenteluserjojen paketteja sisältävässä hyllystössä. Yleiskuva hyllystöstä esitetään kuvassa 18 FDS-mallin avulla. Hyllyjen leveys on 3,0 m, syvyys 0,5 m ja niiden väli pystysuunnassa on 0,4 m. Hyllystön palotehon selvittämiseksi tehtiin joukko erillisiä simuloiteja, joissa keskityttiin vain hyllystöihin. Simulointien tulosten perusteella tehtiin savunleviämässäsimulointi, jossa rakenteluserjoja sisältävän hyllyn paloteho sijoitettiin toiseen savuosastoon.



Kuva 16. Kylmälaitteen palotehokäyrän yksinkertaistettu esitys (Hietaniemi et al. 2001).



Kuva 17. Laitapinon palotehokäyrä FDS-simuloinnissa.



*Kuva 18. Rakentelusarjahyllyt.*

### 3.3.3 Palonilmaisu, savunpoisto ja sammutus

Paloteknisesti palloiluhalli on yhtä palo-osastoa, joka on jaettu savuosastoihin kevyillä väliseinillä. Uloskäytävät ovat omia palo-osastojaan. Tiloissa on koneellinen ilmanvaihto (tulo ja poisto). Hallien yhteenlaskettu ilmanvaihto on  $16,8 \text{ m}^3/\text{s}$  ja uloskäytävän  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Palohälytyksen sattuessa ilmanvaihto kytkeytyy pois päältä.

Tila on varustettu automaattisilla palonilmaisu- ja sammutusjärjestelmillä. Sammutusjärjestelmänä on märkäsprinklaus, jonka suutinten toimintalämpötila on  $68 \text{ °C}$  ja suojausala  $12 \text{ m}^2$ . Savunpoisto suoritetaan koneellisesti, ja sen tilavuusvirta on  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Savunpoisto tapahtuu vain yhdestä lohkokista kerrallaan. Savunpoistoa ohjataan manuaalisesti maanpinnalla sijaitsevista ohjauskeskuksista. Korvausilma johdetaan sisäänkäyntien kautta ovia avaamalla.

## 3.4 Metroasema

### 3.4.1 Yleistä

Esimerkkikohteena oleva metroasema on rakenteeltaan kolmikerroksinen maanalainen rakennus, jossa liikkuu päivittäin n. 28 000 matkustajaa. Alin kerros eli laituritaso on noin 30 metriä maanpinnan alapuolella, ja siellä ovat sekä etelään että pohjoiseen me-

nevät metroradat. Laituritason yläpuolella, noin 20 metriä ylempänä, sijaitsee varsinainen lippuhallitaso, jonka kautta matkustajaliikenne saapuu mm. laituritasolle. Lippuhallitaso yhtyy useasta kohtaa muihin maanalaisiin liiketiloihin. Kuvassa 19 esitetään FDS-mallin avulla esimerkkikohteena ollut metroasema sekä taulukossa 3 metroaseman tärkeimmät dimensiot.

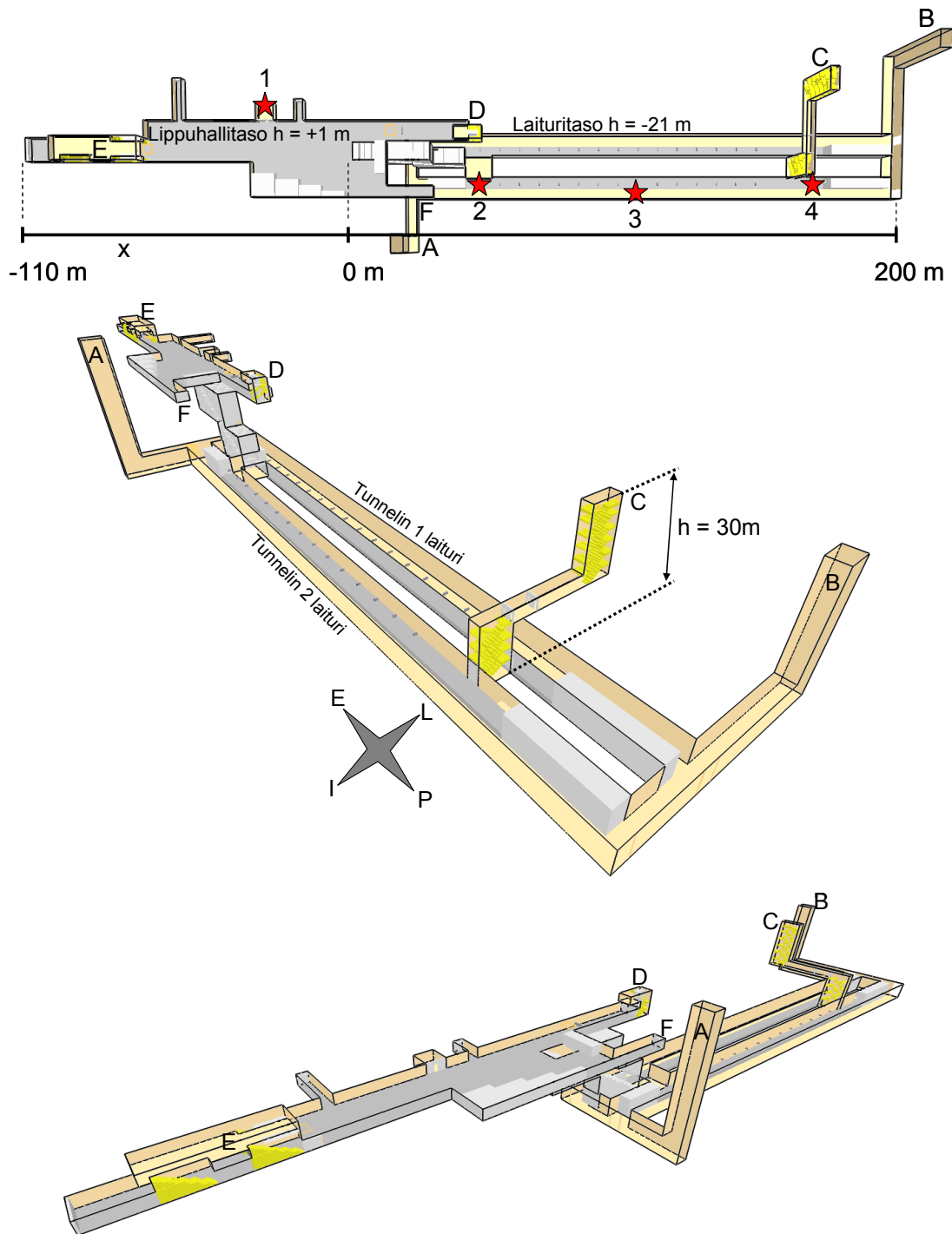
*Taulukko 3. Metroaseman dimensiot.*

<b>Kerros</b>	<b>Pituus (m)</b>	<b>Leveys (m)</b>	<b>Korkeus (m)</b>
Laituritaso	130	8 <sup>a</sup>	6
Lippuhallitaso	110	40 <sup>b</sup>	3

<sup>a)</sup> Yhden metroradan ja laiturin yhteenlaskettu leveys

<sup>b)</sup> Levein kohta lippuhallitasolla

Laituritason ja lippuhallitason yhdistävät liukuportaat, jotka toimivat samalla toisena uloskäytävänä laituritasolta poistuttaessa. Toinen uloskäytävä laituritasolta maantasolle sijaitsee laiturin toisessa päässä. Lippuhallitasolta virallisia uloskäytäviä on kolme (ks. kuva 19). Reitit ovat normaalissa käytössä sisään- ja uloskäynteinä.

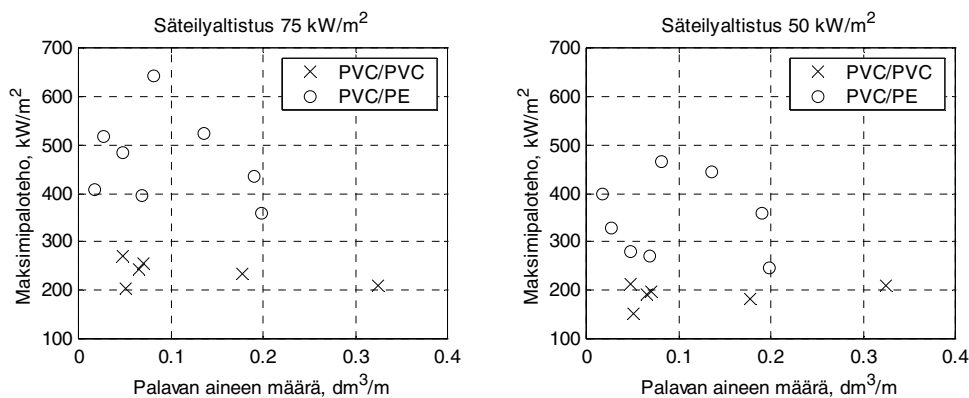


Kuva 19. Metroaseman FDS-malli eri kulmista katsottuna. Kirjaimien selitykset: eteläinen (A) ja pohjoinen (B) savunpoistohormi, laituritason uloskäytävä (C) sekä lippuhallitason osastoidut uloskäytävät maantasolle (D, E ja F). Tähdellä merkityt palon sijainnit, joista 1) kioskipalo kohdassa  $x = -29$  m, 2) kaapelipalo kohdassa  $x = 40$  m, 3) metrovaunupalo kohdassa  $x = 90$  m ja 4) kaapelipalo kohdassa  $x = 170$  m.



### 3.4.2 Palokuorma

Laituritasolla palokuorma koostuu pääasiallisesti kaapeleista sekä itse metrovaunuista. Kaapelia metroasemalla on koko laituritason matkalla (n. 130 m) 3 metrin korkeudella sekä metrotunnelissa. Tavallisimmat kaapelimateriaalit ovat PVC (polyvinyylikloridi) ja PE (polyeteeni), joita esiintyy kaapelien kuoressa ja eristemateriaalina. Polyeteenille lämpöarvo on 43,3 MJ/kg ja PVC:lle 16,4 MJ/kg (Drysdale 1995). Tyypillisesti kaapelien palotehot ovat luokkaa 200–400 kW/m<sup>2</sup>, johon vaikuttavat mm. kaapelin materiaaliominaisuudet ja ympäristöstä aiheutuva lämpökuormitus. Kuvassa 20 esitetään eräiden tyypillisimpien kaapelien (matalajännite-, data- ja puhelinkaapelien) maksimipalotehoarvoja kartiokalorimetrikokeessa 75 kW/m<sup>2</sup> ja 50 kW/m<sup>2</sup> säteilyvuontiheyksillä.



Kuva 20. PVC- ja PE-kaapelien maksimipalotehoja 75 kW/m<sup>2</sup> ja 50 kW/m<sup>2</sup> säteilyvuontiheyksillä. Vaaka-akseli ilmaisee eriste- ja kuorimateriaalin yhteisen tilavuuden pituusyksikköä kohden. Merkintä "PVC/PE" tarkoittaa, että kaapelin kuorimateriaalina on PVC ja eristeenä PE. Näytteen koko 0,1 m × 0,1 m (FIPEC 2000).

Kuvasta 20 nähdään, että polyeteeniä sisältävien kaapelien maksimipalotehot ovat selvästi suurempia kuin täysin PVC:tä sisältävien kaapelien. Tämä selittyy sillä, että PVC-kaapelit sisältävät klooria, joka toimii kemiallisesti palonsuoja-aineena. Palosimuloinneissa kaapelipalon palokuormaksi on otettu tarkasteltavaksi pelkästään laituritason yläpuolella sijaitsevat kaapelit yhteensä 3 m<sup>2</sup> alalta. Kaapelipaloissa käytetty palotehoikäyrä esitetään liitteessä C.

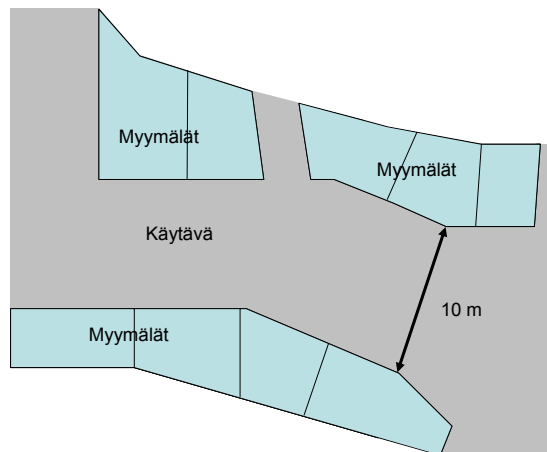
Metrovaunun palokuormasta on arvioita mm. viitteessä Koffel ym. (2004), jonka perusteella metrovaunupalo kehittyi 30 min:n aikana lineaarisesti 15 MW:n paloksi. Palosimulointien herkkyytstarkastelussa (kohta 4.4.3.3) on metrovaunupalon palotehona käytetty myös suurempaa 38 MW:n maksimipalotehoa. Metrovaunussa palokuorma muodostuu muovipohjaisista tuotteista.

Lippuhallitason palokuorma sijoittuu myymälöihin ja kioskeihin, jotka reunustavat molemmin puolin varsinaista jalankulkukäytävää (kuva 21). Myymälöiden keskimääräinen lattiapinta-ala on noin 20–30 m<sup>2</sup>.

Kohteen keskimääräistä palokuormantiheyttä  $q_c$  [J/m<sup>2</sup>] voidaan arvioida käyttämällä kaavaa (1)

$$q_c = \frac{\sum m_i H_i}{A_f} \quad (1)$$

jossa  $m_i$  [kg] on yksittäisen materiaalikomponentin massa ja  $H_i$  [J/kg] tämän lämpöarvo sekä  $A_f$  [m<sup>2</sup>] lattiapinta-ala. Muovituotteille lämpöarvona voidaan pitää n. 40 MJ/kg ja selluloosapohjaisille materiaaleille 17 MJ/kg. Esimerkiksi lehtikioskin 1 000 aikakauslehdettä ( $m_{tot} \approx 300$  kg) muodostuu palokuorman tiheydeksi 255 MJ/m<sup>2</sup>, kun lattiapinta-alaan oletetaan olevan 20 m<sup>2</sup>.

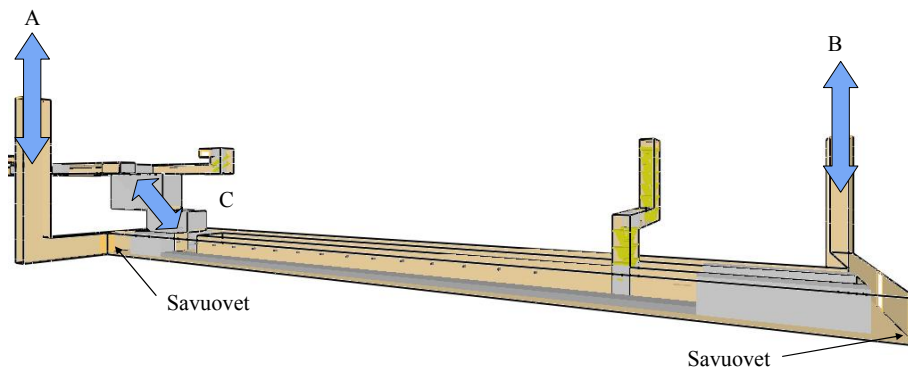


Kuva 21. Osa metroaseman lippuhallitason pohjapiirroksesta, jossa palokuormaa sisältävät myymälät reunustavat jalankulkukäytävää.

### 3.4.3 Palonilmaisu-, sammutus- ja savunpoistojärjestelmät

Yksi paloturvallisuuden liittyvä seikka metroasemalla on lippuhallitason ja liukupor-  
taikon sprinklaus, joka on toteutettu kuivasprinklauksena kaikkialla paitsi myymäläti-  
loissa, joissa on märkäsprinklaus. Lippuhallitasolla on lisäksi paloilmaisimia ja palo-  
ovia, jotka sulkeutuvat ilmaisimien signaalista. Palo-ovet sijaitsevat naapuriliikekeskusten  
liitoskohdissa. Laituritasolla ja laiturien keskellä sijaitsevissa sähkökeskuksissa on paloil-  
maisimet mutta ei sammutusjärjestelmää. Myös metrotunnelissa on ollut jo jonkin aikaa  
käytössä kuitukaapeliin perustuva palonilmaisujärjestelmä.

Metroaseman savunpoistoa varten on laituritasolla ja liukuportaikossa savunpoistopuhaltimet. Lippuhallitasolla erillisiä savunpoistopuhaltimia ei ole, vaan lippuhallitason savunpoisto voidaan toteuttaa avaamalla katossa olevat savunpoistoluukut ja avustamalla liukuportaikon puhaltimella. Laituritason savunpoistopuhaltimet sijaitsevat metroväylien molemmissa päissä (ks. kuva 22), jolloin sammutustaktiikan mukaisesti toisella puhaltimella puhalletaan ilmaa sisään ja toisella ulos. Lisäksi laituritason savunpoisto pyritään toteuttamaan vallitsevan luontaisen ilmavirtauksen suunnassa. Savunpoistopuhaltimien ilmoitettu ilmavirta on  $27,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{puhallin}$ . Savunpoistoa tuetaan liukuportaikon puhaltimilla (2 kpl) ja samalla estetään savun leviäminen lippuhallitasolle. Liukuportaikon savunpoistopuhaltimien ilmoitettu ilmavirta on  $14 \text{ m}^3/\text{s}/\text{puhallin}$ . Laituritason savunpoistoa varten on olemassa molempien metroväylien päissä savuovet (yht. 4 kpl), joilla estetään savun leviäminen metrotunneliin. Savuovet toimivat manuaalisesti, ja niitä käytetään yleensä siinä vaiheessa, kun savunpoisto laituritasolla aloitetaan.



Kuva 22. Metroaseman savunpoistojärjestelyt laituritasolla. Eteläinen (A) ja pohjoinen (B) savunpoistopuhallin sekä liukuportaikon savunpoistopuhallin (C).

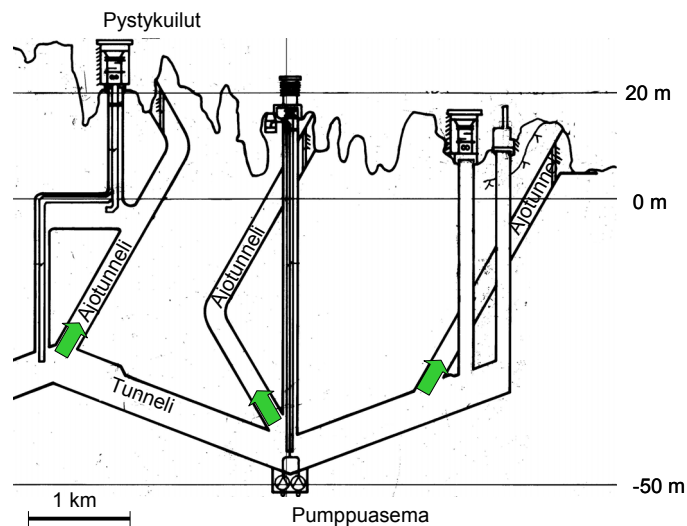
### 3.5 Yhteiskäyttötunneli

Neljäs tarkastelun kohteena ollut maanalainen rakennus oli ns. yhteiskäyttötunneli. Yhteiskäyttötunneli on laaja tunneliverkosto, jonka kokonaispituus on noin 20 km ja joka sijaitsee noin 50 metrin syvyydessä kallioperässä. Tunnelissa kulkee kaukolämpöverkoston lisäksi tietoliikenneverkostoa. Kuvassa 23 on tyypillinen kuva tunnelin sisältä.



*Kuva 23. Yhteiskäyttötunneli, jonka reunoilla kaukolämpöputket. Tunnelin leveys 6,7 m ja korkeus 5 m. Putket rajoittavat ajokaistan n. 3 m levyiseksi.*

Simulointeja varten tarkasteltiin yhteiskäyttötunnelin n. 5 km:n osuutta alkupäästä. Tällä osuudella tunnelissa on ilmanvaihtokanavia, pumppuasema, ajotunneleita sekä valvomoja (kuva 24). Ajotunnelit toimivat samalla uloskäytävinä, joiden pituudet vaihtelivat välillä 270 m ja 450 m. Tarkastelun kohteena olevalla osuudella on myös kokonaisen verkoston pisin yhtämittainen tunneliosuus (3 km), josta ei johda maan päälle ajotunneleita tai ilmanvaihtokanavia. Tunnelin säännöllinen miehittäminen tapahtuu huoltotöiden yhteydessä 1–2 kertaa kuukaudessa.



*Kuva 24. Tarkastelun kohteena ollut osuus yhteiskäyttötunnelista. Kuva edustaa tunnelin pystyleikkausta. Uloskäytävät (ajotunnelit) on kuvattu nuolilla.*

Paloturvallisuuteen liittyvien yleisten käytäntöjen mukaan yhteiskäyttötunnelissa käytettävien ajoneuvojen tulee olla dieselnäyttöisiä ja liikenteen tulee tapahtua tunnelissa vain yhteen suuntaan.

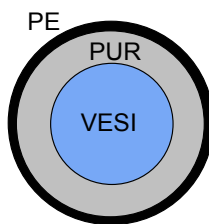
### 3.5.1 Palokuorma

Tunnelin palokuorman muodostavat pääasiassa kaukolämpöputki ja ajoneuvot, joita esiintyy sekä säännöllisten tarkastuskäyntien että lisärakentamisen aikana. Henkilöauton palokuorma ja paloteho on esitetty jo aiemmassa kohdassa 3.2.2, joten tässä yhteydessä tarkastellaan kaukolämpöputken palokuormaa ja sen palotehoa.

Kaukolämpöputki muodostuu kolmesta sisäkkäisestä putkesta (kuva 25), joista sisimmässä kulkee kuuma paineistettu vesi. Sisimmän putken ympärillä on n. 7 cm:n polyuretaanikerros (PUR), joka toimii lämmöneristeenä. Päälimmäisen kerroksen muodostaa 2 cm:n polyeteenikerros (PE). Palokuorma  $q_{tot}$  koostuu siis PUR- ja PE-kerroksista kaavan (2) mukaisesti

$$q_{tot} = \sum (m_i \cdot H_i) = \sum (\rho_i A_i L \cdot H_i) \quad (2)$$

jossa  $m_i$  on materiaalin massa [kg],  $H_i$  materiaalin lämpöarvo [J/kg],  $\rho_i$  materiaalin tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $A_i$  materiaalikerroksen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ] sekä  $L$  putken pituus [m]. Tällöin esim. yhden metrin matkalla kaukolämpöputken palokuormaksi saadaan 3 500 MJ/m, kun käytetään lämpöarvoina  $H_{PE} = 43,3$  MJ/kg ja  $H_{PUR} = 24,4$  MJ/kg.



Kuva 25. Kaukolämpöputken poikkileikkaus. PUR = polyuretaani ja PE = polyeteeni. Putken halkaisija on 1,2 m.

Kaukolämpöputken palotehoa  $Q$  voidaan arvioida palavan pinta-alan  $A_f$  mukaan kaavalla (3)

$$Q = \dot{m}'' \cdot A_f \cdot H \quad (3)$$

jossa  $\dot{m}''$  on materiaalin höyrystymisnopeus pinta-alayksikköä kohden [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ] ja  $H$  materiaalin lämpöarvo [J/kg].

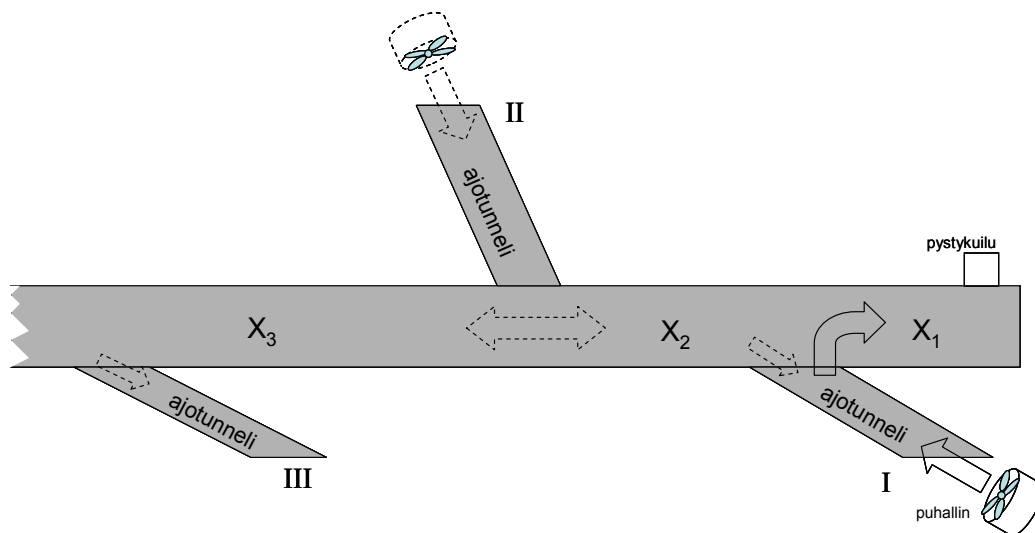
Esimerkiksi metrin matkalla kaukolämpöputken pinta-alaksi saadaan  $3,8 \text{ m}^2$ . Olettamalla, että täysin kehittyneestä palosta aiheutuu  $50 \text{ kW/m}^2$  lämpörasitus (vastaa lieskahtanutta huoneistopaloa), jolloin  $\dot{m}$  vastaa n.  $0,02 \text{ kg/m}^2/\text{s}$  (Hopkins 1995), saadaan kaukolämpöputken palotehoksi  $3,3 \text{ MW/m}$ . Edellä lasketussa on käytetty PE:n lämpöarvoa ja höyrystymisnopeutta, koska PE muodostaa 86 % koko palokuormasta ja sijaitsee päällimmäisenä kerroksena. Lisäksi oletetaan, että kaikki materiaali palaa.

### 3.5.2 Palonilmaisu-, sammutus- ja savunpoistojärjestelmät

Yhteiskäyttötunnelissa on risteysalueilla, ajotunnelien ja varsinaisen tunnelin yhtymäkohdissa, savunilmaisimia, jotka havaitsevat palon, tekevät hälytyksen sekä pysäyttävät normaalin koneellisen ilmanvaihdon kyseiseltä alueelta.

Sammutusjärjestelmää, kuten sprinklereitä, ei yhteiskäyttötunnelissa ole, paitsi risteysalueiden valvontakopeissa, jotka on varustettu hiilidioksidisammutusjärjestelmin ( $\text{CO}_2$ ). Huoltoajoneuvoissa on alkusammutuskalusto mukana.

Savunpoistoa varten ei tunnelissa ole kiinteää järjestelmää, vaan savunpoisto toteutetaan pelastuslaitoksen liikuteltavalla puhaltimella. Tunnelin savunpoisto suoritetaan vaiheittain ajotunnelien päistä ja savu pyritään ohjaamaan aina seuraavasta ajotunnelista ulos kuvan 26 mukaisesti.



Kuva 26. Yhteiskäyttötunnelin savunpoistotapahtuma ylhäältä kuvattuna. Palon sijainnista ( $X_1$ ,  $X_2$  ja  $X_3$ ) riippuen saadaan aikaan tunnelin eri kohtiin pakotettu ilmavirtaus liikuteltavalla puhaltimella. Ilmavirtauksen suuntaa voidaan ohjata aukaisemalla ajotunnelin päissä olevia ovia (I, II ja III) ja pystykuilujen aukkoja. Kuva ei ole mittakaavassa.

## 4. Palosimuloinnit esimerkkikohteissa

### 4.1 Palosimulointien kuvaus

#### 4.1.1 Simulointimenetelmät

Palosimuloinnit tehtiin Fire Dynamics Simulator (FDS) ohjelman versiolla 4 (McGrattan *et al.* 1998, McGrattan 2004). FDS-ohjelma perustuu numeeriseen virtauslaskentaan, jossa ratkaistaan kokoonpuristumattoman kaasun virtausta kuvaavat Navierin–Stokesin yhtälöt sekä lämmönsiirtoon liittyvät yhtälöt. FDS kuvaa virtauksen turbulenssia ns. suurten pyörteiden menetelmällä (Large Eddy Simulation = LES), jossa kulloisenkin hila-resoluution erottamat ilmiöt ratkaistaan ajan suhteen tarkasti ja hilan koppikokoa pienempien ilmiöiden aiheuttama diffuusio mallinnetaan. LES-laskenta vaatii paljon tietokoneresursseja, sillä laskentahilan on oltava riittävän tiheä tärkeimpien virtausilmiöiden ratkaisemiseksi ja numeerisen ratkaisijan aika-askel on pieni, tyypillisesti 0,001...0,01 s. Virtausratkaisijan lisäksi ohjelmassa on fysikaaliset mallit mm. palamiselle, lämpösäteilylle, sprinklerien laukeamiselle, vesipisaroiden kuljettumiselle ja vuorovaikutukselle ilmassa, lämmönjohtumiselle kiinteissä aineissa ja kiinteiden aineiden palamiselle eli pyrolyysille.

FDS-ohjelmaa kehittää National Institute of Standards and Technology Yhdysvalloissa yhteistyössä VTT:n palotutkijoiden kanssa. Ohjelmaa on validoitu monissa erilaisissa tulipalon mallintamiseen liittyvissä tilanteissa, joista on yhteenveto teknisessä manuaalissa (McGrattan 2004). Yleisesti voidaan todeta, että ohjelma toimii paloteknisten suunnitelmien kannalta riittävän tarkasti savun ja lämmön kuljettumiseen liittyvissä ongelmissa, joissa tulipalo on käyttäjän määrittelemä. Tilanteissa, joissa yritetään enustaa palon leviämistä ja siitä johtuvaa palotehon kehitystä, epävarmuus on huomattavasti suurempi.

#### 4.1.2 Tarkastelussa käytetyt parametrit

Simulointituloksia arvioitaessa on tarkastelusuurena käytetty FDS:n näkyvyysparametria (*visibility*). Tämän suureen taustalla on se tieto, että savun tiheys vaimentaa esimerkiksi valaisimesta tulevaa valon sädettä Beer-Lambertin lain mukaisesti

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K_e L} \quad (4)$$

jossa  $I$  on valon säteen intensiteetti savussa,  $I_0$  valon säteen intensiteetti ilman savua,  $K_e$  vaimennuskerroin [ $\text{m}^{-1}$ ] ja  $L$  valon säteen kulkema matka [ $\text{m}$ ]. Vaimennuskerroin voi-

daan vielä ilmaista ominaismassavaimennuskertoimen  $K_m$  [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ] ja savuntiheyden  $\rho_s$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] avulla seuraavasti:

$$K_e = K_m \cdot \rho_s . \quad (5)$$

Ominaismassavaimennuskerroin  $K_m$  ilmaisee tietyllä materiaalilla tyypillisen palossa syntyvän vaimentavan pinta-alan, joka vaihtelee materiaaleittain esim. hiukkasten partikkelikoon mukaan. Palosta syntyvät hiukkaset sirottavat ja absorboivat eri lailla tulevaa valon sädettä riippuen valon aallonpituuden ja partikkelikoon välisestä suhteesta. Savun tiheys ei myöskään ole aina vakio, sillä se riippuu mm. palon kehittymisestä (palotehosta) sekä tarkasteltavasta paikasta korkeussuunnassa.

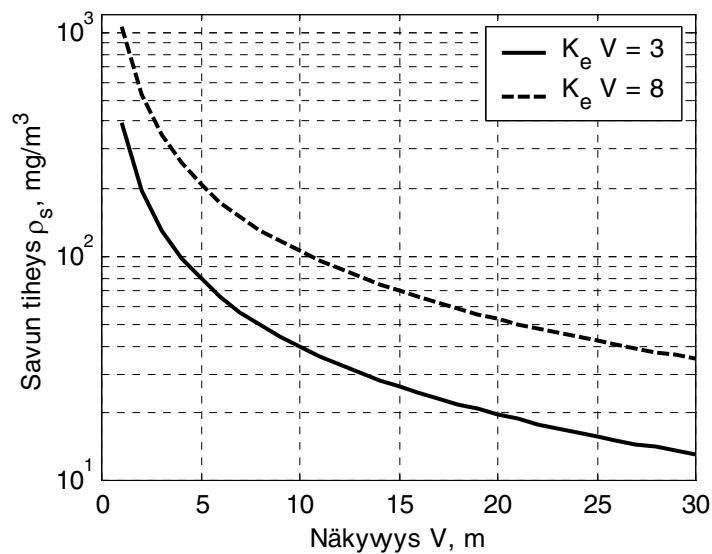
FDS:n käyttämä malli näkyvyyden arvioimiseen perustuu edellä olevaan yhtälöön (5) ja kokeelliseen tutkimukseen (Jin 1978), jossa on saatu seuraavat korrelaatiot näkyvyyden  $V$  [m] ja vaimennuskertoimen  $K_e$  [ $\text{m}^{-1}$ ] välille:

$$K_e \cdot V = 3 \quad (6)$$

$$K_e \cdot V = 8 . \quad (7)$$

Yhtälössä (6) on tarkasteltu valoa heijastavien ja yhtälössä (7) itsestään valaisevien poistumiskylttien näkyvyyttä. FDS-ohjelma antaa ylärajana savuttoman tilan näkyvyydelle 30 m. Lisäksi oletuksena ominaismassavaimennuskertoimelle käytetään arvoa  $7\,600 \text{ m}^2/\text{kg}$ , joka vastaa puun ja useimpien muovien liekehtivästä palamisesta syntyneen savun  $K_m$ -kerrointa. Kuvassa 27 näytetään, yhtälöihin (5), (6) ja (7) perustuen, kuinka savuntiheys ja näkyvyys riippuvat toisistaan.





Kuva 27. Savun tiheyden ja näkyvyyden välinen relaatio yhtälöiden (5), (6) ja (7) esittämällä tavalla. Katkoviivalla kuvattu itsestään valaisevaa objektia ja yhtenäisellä viivalla valoa heijastavaa objektia.

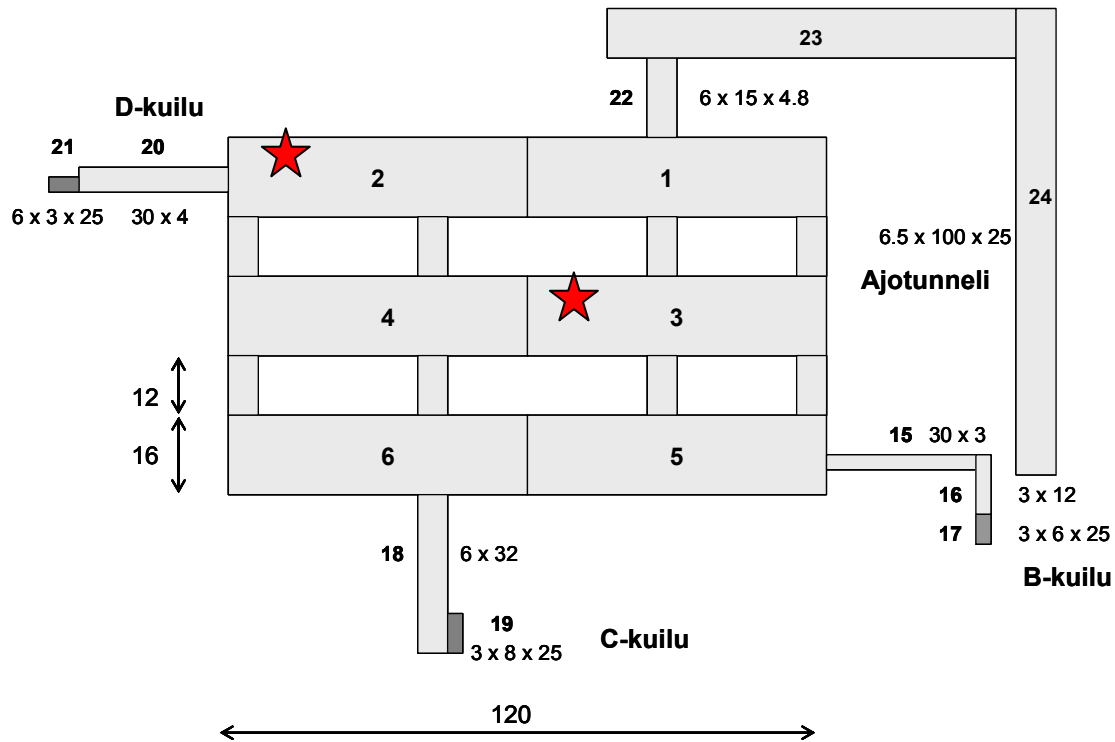
FDS-ohjelmassa näkyvyys alkaa heiketä oletusparametreilla hetkellä, jolloin savun tiheys ylittää arvon  $13,2 \text{ mg/m}^3$ , kun tarkastellaan tilannetta, jossa objektina on valoa heijastava poistumiskyltti. Tässä yhteydessä täytyy muistaa, että ympäristön valaistus vaikuttaa ratkaisevasti myös näkyvyyteen.

Näkyvyysparametriin liittyy siis monia suureita, joista osa perustuu puhtaasti kokeellisiin havaintoihin. Parametria ei tästä syystä pidä käsittää täysin kvantitatiivisesti, vaan se antaa erään pohjan tarkasteluille, joissa pyritään kuvaamaan tämän työn tapaan savun liikkumista rakennuksen sisällä.

## 4.2 Pysäköintitila

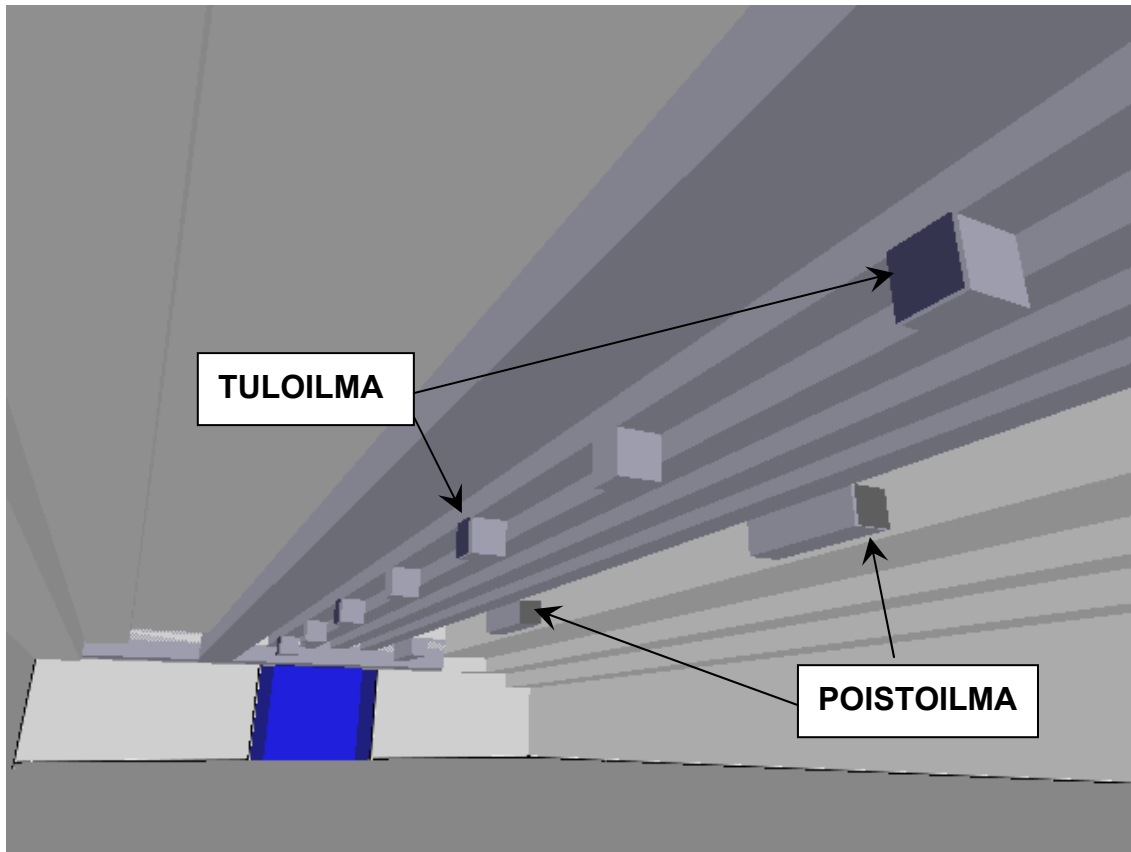
### 4.2.1 Simulointimalli

Pysäköintitilasta muodostettiin yksinkertaistettu, suorakulmaisista lohkoista koottu malli. Mallissa kaarevat tunnelien osat on pelkistetty suoriksi siten, että tunnelien kokonaispi-tuudet ovat mahdollisimman lähellä todellisuutta. Mallin yleiskuva esitetään kuvassa 28, jonka numerot viittaavat FDS-mallin lohkojakoon. Lisäksi kuvaan on merkitty joitakin oleellisia mittoja (m) sekä oletetut syttymiskohdat.



Kuva 28. Yleiskuva pysäköintitilan mallista. Tutkitut syttymiskohdat on merkitty tähdellä.

Normaalitilassa pysäköintihallin ilmanvaihdon kokonaisilmavirta on  $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mallissa pysäköintihalli on jaettu kuuteen päälohkoon, jolloin kuhunkin lohkoon kohdistuu  $2,75 \text{ m}^3/\text{s}$  ilmanvaihto (tulo ja poisto). Tuloilmapäätteiden (87 kpl) ilmavirrat ovat siten 190 l/s ja poistoilman päätelaitteiden (36 kpl) 458 l/s. Porrashuoneissa B ja C kokonaisilmavirta on  $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  ja porrashuoneessa D  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Palohälytyksen tullessa ilmanvaihto kytkeytyy pois päältä, savulohkojen ovet sulkeutuvat ja porrashuoneet paineistetaan puhaltamalla niiden yläosasta ilmaa  $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kuvassa 29 on esimerkki pysäköintihallin ilmastoinnin päätelaitteista FDS-mallissa.



*Kuva 29. Ilmastoinnin päätelaitteet FDS-mallissa.*

Pysäköintitila mallinnettiin suorakulmaisilla ja tasavälisillä hiloilla, joiden koppikoko on 0,50 m. Porrashuoneissa ja niihin johtavissa käytävissä koppikoko on 0,40 m ja ajotunnelissa 0,80 m. Laskentahilan vaikutusta tutkittiin yhdessä simuloinnissa tihentämällä laskentaverkkoa osassa mallia. Tuloksista voitiin päätellä, että käytetty hila on riittävän tiheä savunkuljettumisen simulointiin. Pysäköintihallien kaarevaa kattoa simuloitiin 4-portaisella kiinteällä pinnalla, joka näkyy kuvassa 29.

Pysäköintihallien pinnat oletettiin betoniksi. Ilmastointiputket ja väliovet mallinnettiin ohuilla teräspinnoilla. Ilmastoinnin päätelaitteet on mallinnettu yksinkertaisina sisään- ja ulosvirtausreunaehtoina. Porrashuoneiden ja ajotunnelin aukot ulkoilmaan mallinnettiin vapaille pinnoilla, joissa virtaus voi tapahtua kumpaankin suuntaan tahansa. Pysäköintihallien virtauskenttä saatiin alustettua simuloimalla kunkin palosimulaation alussa 60 s pelkkää ilmastoinnin toimintaa. Ilman lämpötilaksi simuloinnin alussa sekä sisäänvirtausreunoilla oletettiin +20 °C.

Auton paloreaktiona käytettiin heptaanin paloreaktiota, jossa noen tuotto on 1,5 % polttoaineen massasta. Tämän oletuksen vaikutusta savun aiheuttamaan näkyvyyden menettämiseen tutkittiin yhdessä simuloinnissa muuttamalla reaktioksi polystyreenin paloreaktio, jossa noen tuotto on 16,4 % eli likimain kymmenkertainen.

Simuloinnit suoritettiin Dell Precision 430 -työasemassa, jossa oli kaksi 3,2 GHz:n Intel Xeon -prosessoria ja 2 GB muistia. Simuloinneissa hyödynnettiin MPI-protokollan ja lohkojaon avulla toteutettua rinnakkaislaskentaa. Yksi 1 860 s pituinen simulointi kahdella prosessorilla kesti n. 3 h 45 min.

#### **4.2.2 Paloskenaariot**

Simulointeja varten määriteltiin erilaisia paloskenaarioita, joissa varioitiin mm. palavan auton sijaintia, oletettua palamisreaktiota, porrashuoneiden ovien tiloja sekä paineistuspuhaltimen toimintaa. Yhteenveto paloskenaarioista on taulukossa 4.

Taulukko 4. Maanalaisen pysäköintitilan simuloitut tapaukset. Oville 1 = täysin auki, 0 = täysin kiinni. Vinoviivalla (/) merkitään toimintaa ennen / jälkeen palohälytyksen.

	Palotila (kuva 28)	Autojen lukumäärä	Savulohkojen rajat	Ovet Portaiden yläpää	Portaiden alapää	Paineistuksen tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /s)	Ilmanvaihto	Savunpoisto	Ilmaisu
Y2	3	1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	0 / 0	päällä / päällä	ei	ei
Y3	2	1	1 / 0	1 / 1	0 / 0	0 / 2,65	päällä / pois	ei	on
Y4	2	1	1 / 0	1 / 1	0 / 1	0 / 2,65	päällä / pois	ei	on
Y5	2	1	1 / 0	1 / 1	0 / 1	0 / 0	päällä / pois	ei	on
Y6	2	1	1 / 0	0,5 / 0,5	0 / 0,5	0 / 2,65	päällä / pois	ei	on
Y7	Y4 + laskentahilan tiheyden herkkyytarkastelu								
Y8	2	1	1 / 0	0 / 0	0 / 0,5	0 / 2,65	päällä / pois	ei	on
Y9	2	1	1 / 0.1	0 / 0	0 / 0,5	0 / 2,65	päällä / pois	ei	on
Y10	Y4 + reaktiona polystyreeni								
Y11	Y4 + paineistus alhaalla								
Y12	Y11 + raot								
Y13	virheellinen savunpoisto								
Y14	2	1	1 / 0	1 / 1	0 / 1	0 / 2,65	päällä / pois	900 s	on
Y15	2	1, sammutus 900 s	1 / 0	1 / 1	0 / 1	0 / 2,65	päällä / pois	900 s	on
Y16	Y15 + savunpoisto 20 m <sup>3</sup> /s								

## 4.2.3 Tulokset

### 4.2.3.1 Savun leviäminen pysäköintihalleissa

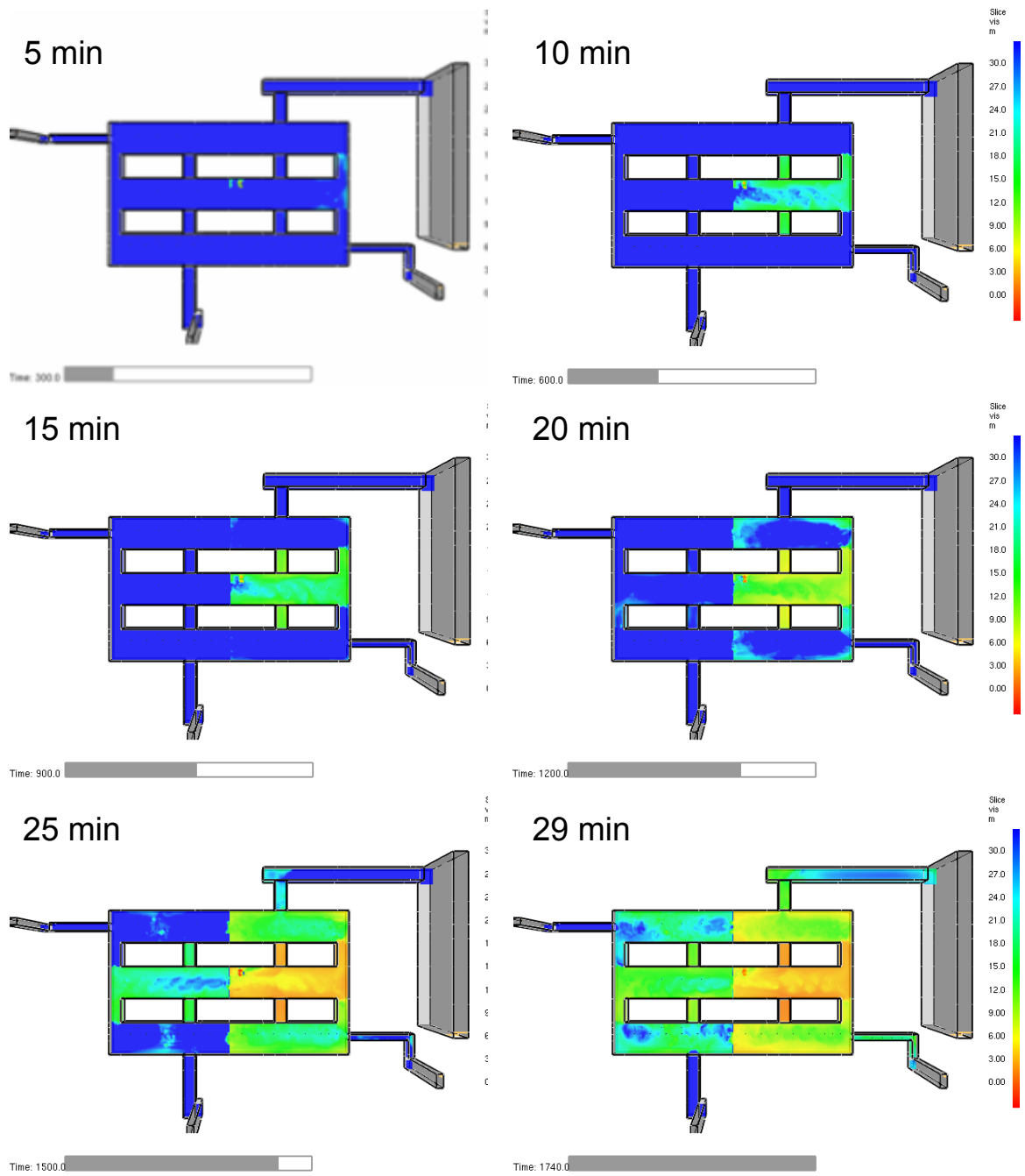
Paloskenaariossa Y2 tutkittiin savun leviämistä tilanteessa, jossa autopalo syttyy hallissa 3 ja savuosastojen sekä porrashuoneiden ovet pysyvät auki koko palotapahtuman ajan. Kuvassa 30 esitetään näkyvyys 1,8 m korkeudella lattiapinnasta 5 minuutin välein. Nähdään, että 10 minuutissa savu on täyttänyt ensimmäisen hallin ja saavuttanut naapurihallit 20 minuutissa. 30 minuutissa savu on saavuttanut ovet kaikkiin porrashuoneisiin ja virrannut sisään yhteen porrashuoneeseen ja ajotunneliin. Huolimatta siitä, että kaikki ovet pysyvät avoinna palon aikana, pysäköintitilassa olevilla ihmisillä on runsaasti aikaa poistua ulkoilmaan. Syttymishallista poistumiseen on aikaa n. 10 minuuttia ja koko tilasta poistumiseen 20–25 minuuttia.

### 4.2.3.2 Ylipaineistuksen toiminta

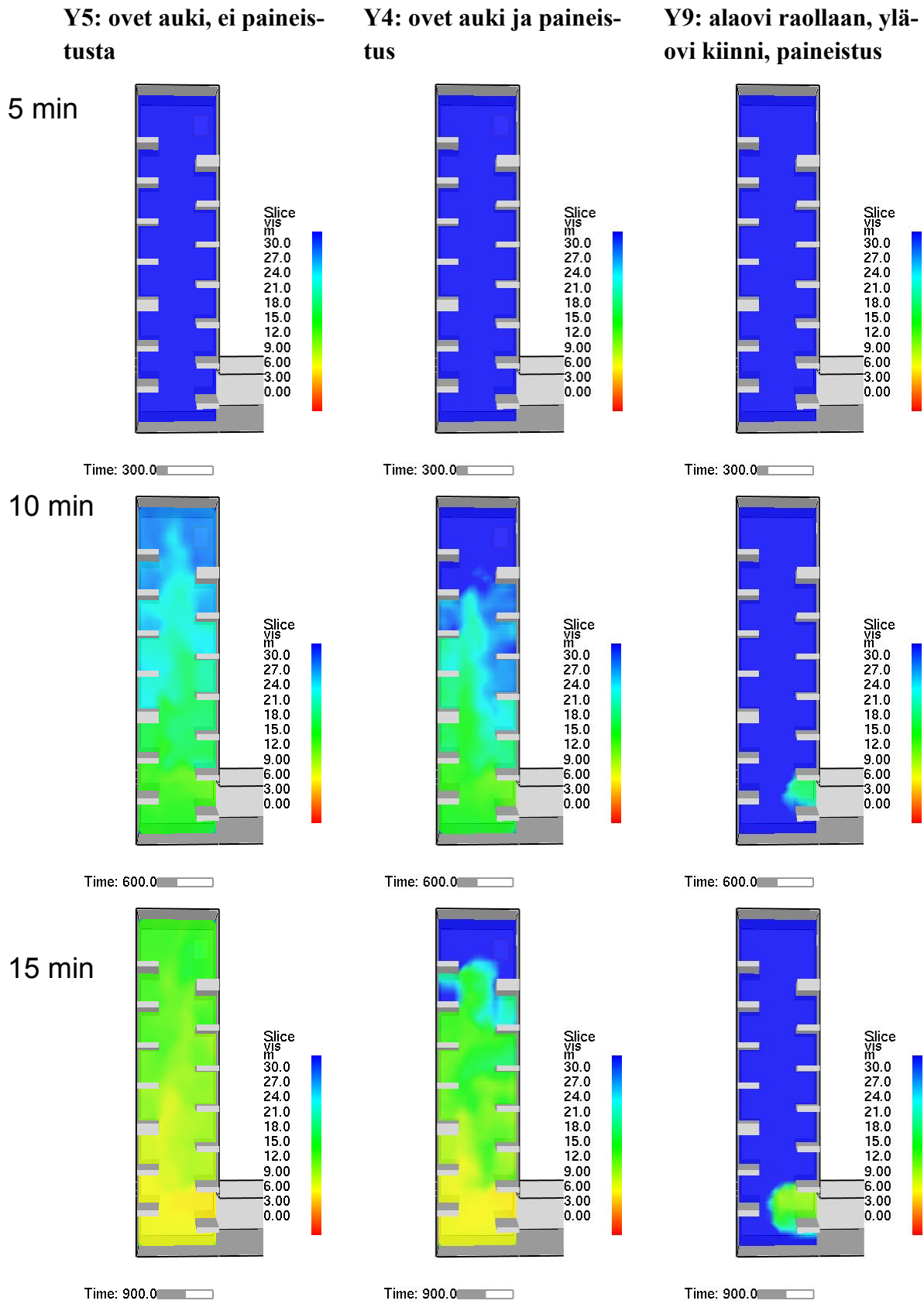
Paloskenaarioissa Y4–Y12 tutkittiin porrashuoneen ylipaineistuksen toimintaa, kun autopalo syttyy lähellä D-kuilun ovea. Kuvassa 31 vertaillaan näkyvyyttä porrashuoneessa kolmessa eri tilanteessa:

- Y5: Porrashuoneen ovet ovat auki, eikä porrashuoneessa ole paineistusta. Alaovi on aluksi suljettu mutta aukeaa palohälytyksen tapahtuessa, n. 2 min kuluttua syttymisestä.
- Y4: Porrashuoneen ovet ovat auki, ja porrashuoneessa on paineistus. Mitoitusperusteiden mukaan ylipaineistuksen ei tarvitse toimia täysin tyydyttävästi tilanteessa, jossa myös yläovet ovat auki.
- Y9: Porrashuoneen yläovi on suljettu ja alaovi raollaan. Porrashuoneessa on paineistus ja pysäköintihallista on pienet vuodot ajotunnelin kautta ulkoilmaan. Skenaario vastaa tilannetta, jossa paineistuksen pitäisi mitoitusperusteiden mukaan toimia.

Kuvasta nähdään, että skenaarioissa Y4 ja Y5 porrashuone täyttyy savulla 10...15 minuutissa. Jos yläovi on auki, on paineistuksesta erittäin vähän hyötyä. Skenaariossa Y9 paineistus pystyy takaamaan hyvän näkyvyyden porrashuoneessa 15...20 minuutin ajan. Tämän jälkeen sinne alkaa työntyä savua, eli ylipaineistus ei toimi halutulla tavalla.

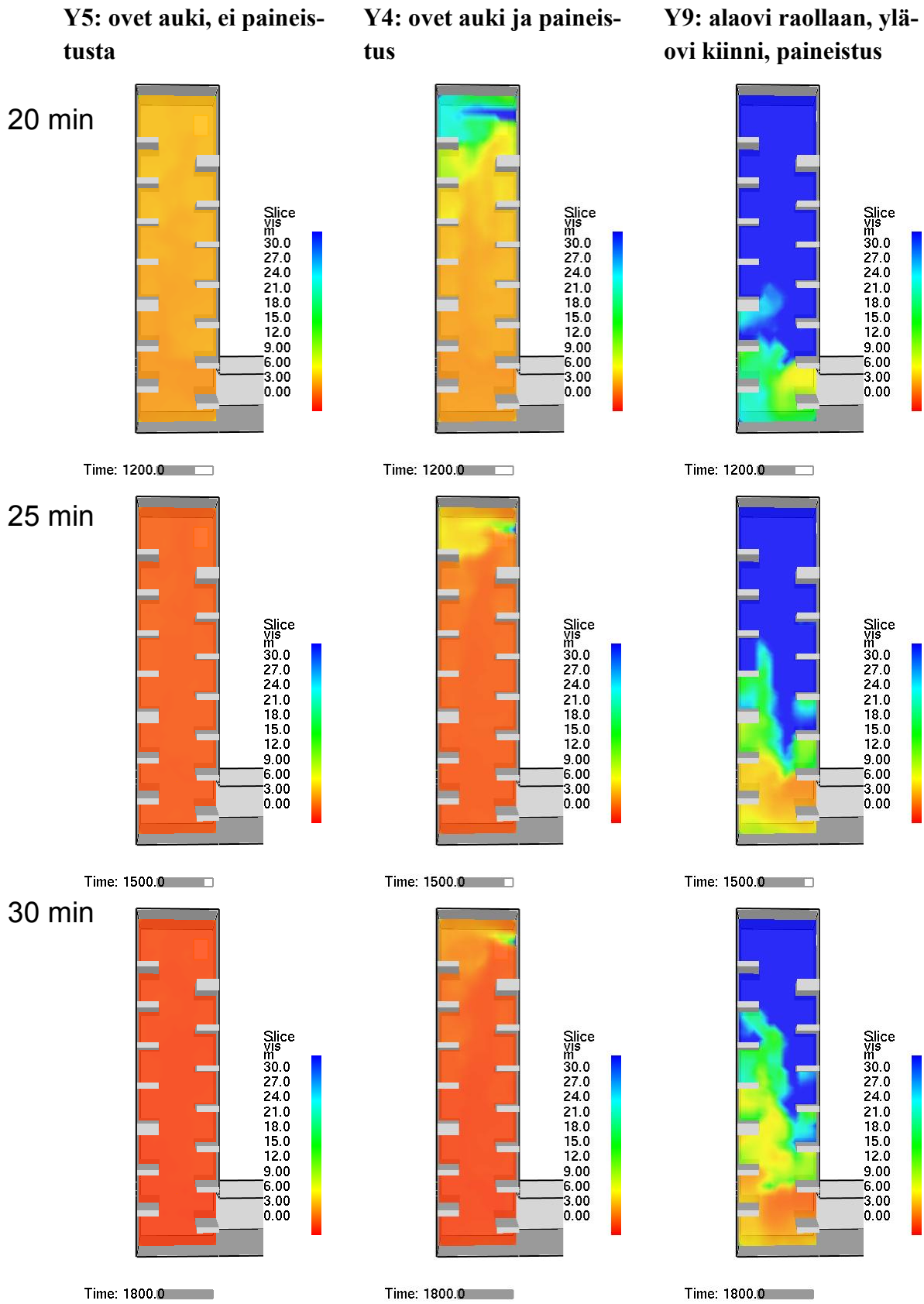


*Kuva 30. Näkyvyys 1,8 m korkeudella skenaariossa Y2.*



Kuva 31. Näkyvyys porrashuoneessa paloskenaarioissa Y5, Y4 ja Y9.



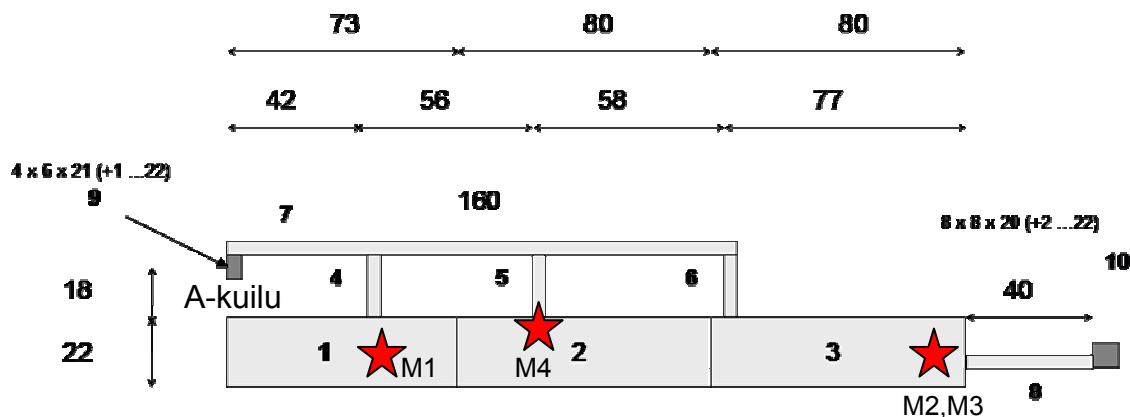


Kuva 31. Näkyvyys porrashuoneessa paloskenaarioissa Y5, Y4 ja Y9 (jatkoa).

## 4.3 Liikuntatila

### 4.3.1 Simulointimalli

Kohteesta muodostettiin yksinkertaistettu, suorakulmaisista lohkoista koottu malli. Mallin yleiskuva esitetään kuvassa 32, jonka numerot viittaavat FDS-mallin lohkojakoon. Lisäksi kuvaan on merkitty joitakin oleellisia mittoja (m) sekä oletetut syttymiskohdat.



Kuva 32. Yleiskuva liikuntatilan mallista. Tutkitut syttymiskohdat on merkitty tähdillä.

Normaalitilassa hallin ilmanvaihdon kokonaisilmavirta on  $16,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tuloilmapäätteiden (70 kpl) ilmavirrat ovat siten 240 l/s ja poistoilman päätelaitteiden (35 kpl) 480 l/s. Porrashuoneeseen A johtavissa käytävissä kokonaisilmavirta on  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ja tuloilman päätelaitteita on 6 kpl. Palohälytyksen tullessa ilmanvaihto kytkeytyy pois päältä. Kuvassa 33 on esimerkki liikuntatilan ilmastoinnin päätelaitteista FDS-mallissa.

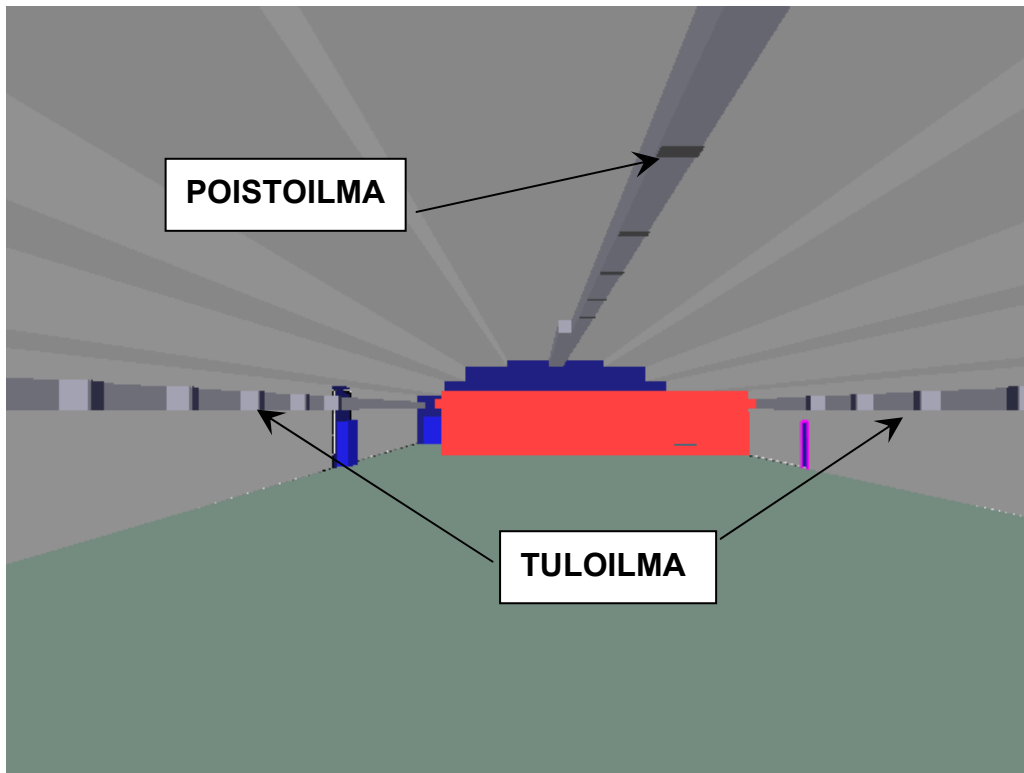
Liikuntahalli mallinnettiin suorakulmaisilla ja tasavälisillä hiloilla, joiden koppikoko on 0,30 m palon syttymishallissa ja 0,50 m muualla. Poistumisteillä koppikoko on 0,40 m. Laskentahilan vaikutusta ei tutkittu, mutta pysäköintitilan yhteydessä tehtyä tarkastelua voidaan soveltaa tässäkin tapauksessa.

Pysäköintihallien pinnat oletettiin betoniksi. Ilmastointiputket ja väliovet mallinnettiin ohuilla teräspinoilla. Ilmastoinnin päätelaitteet on mallinnettu yksinkertaisina sisään- ja ulosvirtausreunaehtoina. Porrashuoneiden aukot ulkoilmaan mallinnettiin vapailla pinoilla, joissa virtaus voi tapahtua kumpaan suuntaan tahansa. Pysäköintihallien virtauskenttä saatiin alustettua simuloimalla kunkin palosimulaation alussa 60 s pelkkää ilmastoinnin toimintaa. Ilman lämpötilaksi simuloinnin alussa sekä sisäänvirtausreunoilla oletettiin  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Paloreaktiona käytettiin heptaanin paloreaktiota, jossa noen tuotto on 1,5 % polttoaineen massasta.

Simuloinnit suoritettiin Dell Precision 430 -työasemassa, jossa oli kaksi 3,2 GHz:n Intel Xeon -prosessoria ja 2 GB muistia. Simuloinneissa hyödynnettiin MPI-protokollan ja lohkojaon avulla toteutettua rinnakkaislaskentaa. Yksi 1 260 s pituinen simulointi kahdella prosessorilla kesti n. 17 h.

#### 4.3.2 Paloskenaariot

Simulointeja varten määriteltiin kolme erilaista paloskenaariota, jotka on kuvattu kohdassa 3.3.2. Laitapinon tapauksessa tehtiin kaksi simulointia: toinen sprinklerien kanssa ja toinen ilman. Yhteenveto paloskenaarioista on taulukossa 5. Savunpoiston toimintaa ei simuloitu.



*Kuva 33. Ilmastoinnin päätelaitteet liikuntatilan FDS-mallissa.*

Taulukko 5. Maanalaisen liikuntatilan simuloitut tapaukset. Oville 1 = täysin auki, 0 = täysin kiinni. Vinoviivalla (/) merkitään toimintaa ennen / jälkeen palohälytyksen.

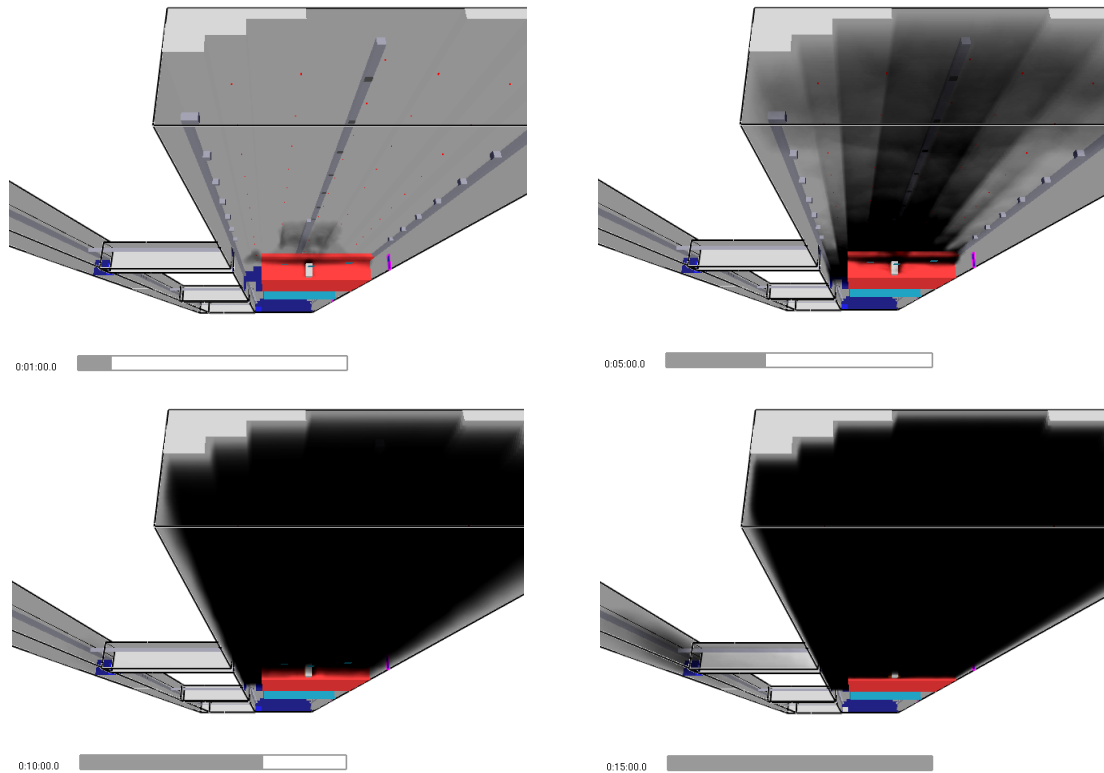
	Palotila (FDS-lohko)	Palolähde	Savulohkojen rajat	Ovet Portaiden yläpää	Halleista käytävään	Ilman- vaihto	Savun- poisto	Ilmaisu	Sprinklaus	Simulointi- aika (min)
M1	1	Jääk.	0 / 0	1 / 1	1 / 1	1 / 0	ei	on	ei	1 + 15
M2	3	Laidat	0 / 0	1 / 1	0 / 1	1 / 0	ei	on	on	1 + 20
M3	3	Laidat	0 / 1	1 / 1	0 / 1	1 / 0	ei	on	ei	1 + 20
M4	2	Rakentelu- sarjat	0 / 1	1 / 1	0 / 1	1 / 0	ei	on	on	1 + 20

### 4.3.3 Tulokset

#### 4.3.3.1 Savun leviäminen kahvilan kylmälaittepalossa M1

Paloskenaariossa M1 palolähde eli kylmälaitte on sijoitettu kahvion rakenteisiin kuuluvan lipan alle. Lipan avulla simuloidaan käytännön rakenneratkaisuja, jotka saattavat hajottaa palossa syntyvän palopatsaan ja alentaa lämpötiloja aivan palolähteen yläpuolella. Palossa hallin kattoon sijoitetut sprinklerit laukeavat n. 14 minuutin kuluttua sytyntymisestä. Simuloinnissa ei otettu huomioon mahdollisia savuilmamaisimia eikä sprinklerien sammutusvaikutusta.

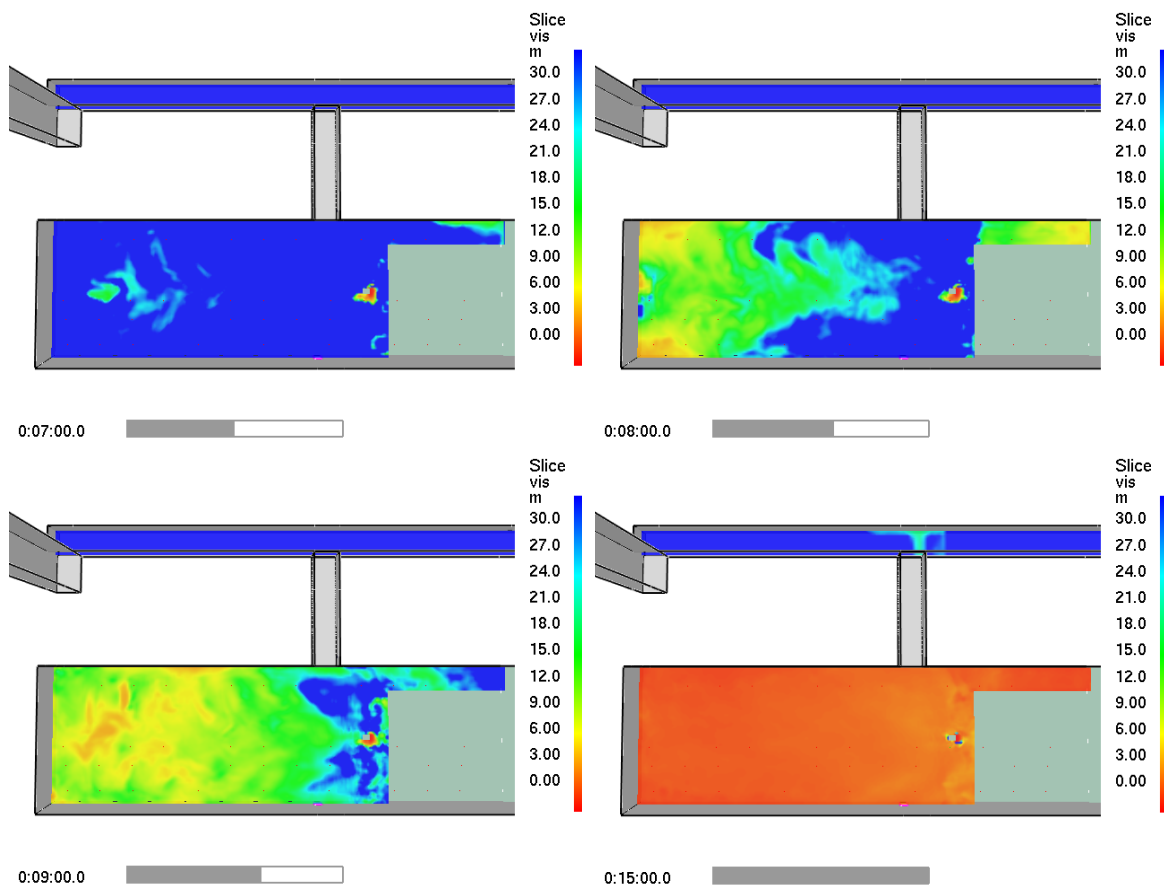
Kuvassa 34 esitetään kolmiulotteisen visualisoinnin avulla savun sijainti ensimmäisessä savuosastossa eri hetkinä. Katselukulma on alaviistosta eli lattian alta, jotta katon rakenteet eivät estäisi näkyvyyttä. Ensimmäisen viiden minuutin aikana savu virtaa katon alla, tavoittaa toisen päädyn ja palaa jonkin matkaa takaisin. 10 minuutin kohdalla poistumistienä toimivassa käytävässä ei ole vielä savua, mutta 15 minuutin kohdalla sitä on jo jonkin verran. Hallin suuri tilavuus toimii siis säiliönä ainakin 10 minuuttia palon alkamisesta.



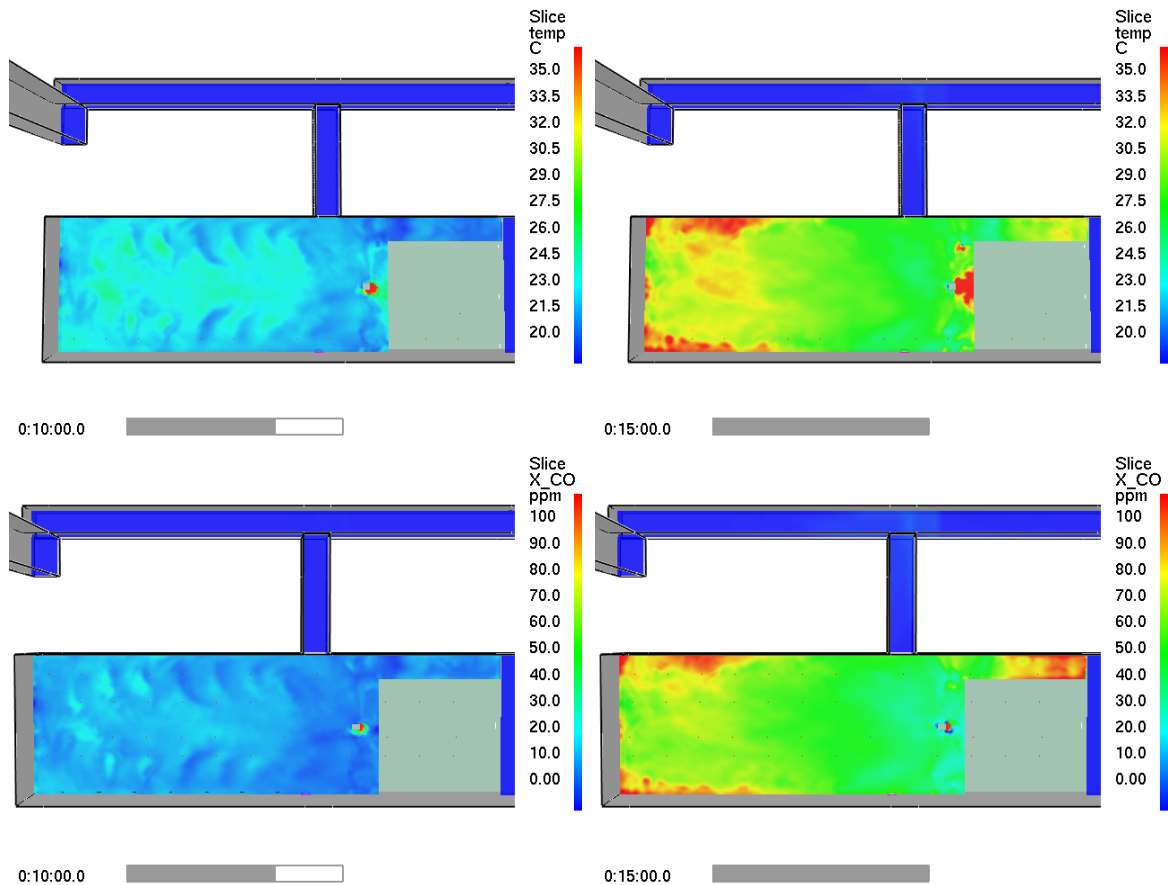
Kuva 34. Savun leviäminen kylmälaitteen palossa. Ajankohdat ovat 1, 5, 10 ja 15 min.

Samaan johtopäätökseen päädytään, kun tutkitaan näkyvyyttä ihmisten oleskelu-  
 vyöhykkeessä. Kuvassa 35 esitetään näkyvyys 1,5 m korkeudella eri hetkinä. Katselu-  
 kulma on nyt ylhäältä alaspäin. Nähdään, että 7 minuutin kuluttua syttymisestä savu  
 alkaa laskeutua ihmisten oleskelukorkeudelle hallin toisessa päässä sekä toiseen osas-  
 toon johtavalla käytävällä. 8 minuutin kuluttua savu häiritsee näkyvyyttä jo puolessa osas-  
 ton pinta-alasta. 9 minuutin kuluttua savu saavuttaa uloskäytävään johtavan oven ja 15  
 minuutin kuluttua se alkaa häiritä näkyvyyttä uloskäytävässä. Vastaava esitys lämpöti-  
 loista ja CO-pitoisuuksista 1,5 m korkeudella (kuva 36) osoittaa, että kumpikaan näistä  
 suureista ei saavuta ihmiselle vaarallista tasoa ensimmäisten 15 minuutin aikana. Näky-  
 vyyden huononeminen ja menettäminen on siten tulipalossa syntyvän savun merkittävin  
 henkilöturvallisuuden vaikuttava seuraus. Palon jatkuessa ja altistuksen pidentyessä  
 myrkylliset aineet ja mahdollinen korkea lämpötila voivat toki aiheuttaa ihmisille vam-  
 moja tai kuoleman.

Näitä lukuja tarkasteltaessa on muistettava, että tulokset vastaavat yhtä nimenomaista  
 palotapausta. Nopeammin kehittyvä palo voisi johtaa näkyvyyden menettämiseen joita-  
 kin minuutteja aikaisemmin.



Kuva 35. Näkyvyys skenaariossa M1 1,5 m korkeudella ajankohtina 7, 8, 9 ja 15 min.



Kuva 36. Lämpötila (ylemmät kuvat) ja CO-pitoisuus (alemmat kuvat) skenaariossa M1 1,3 m korkeudella ajankohtina 10 ja 15 min.

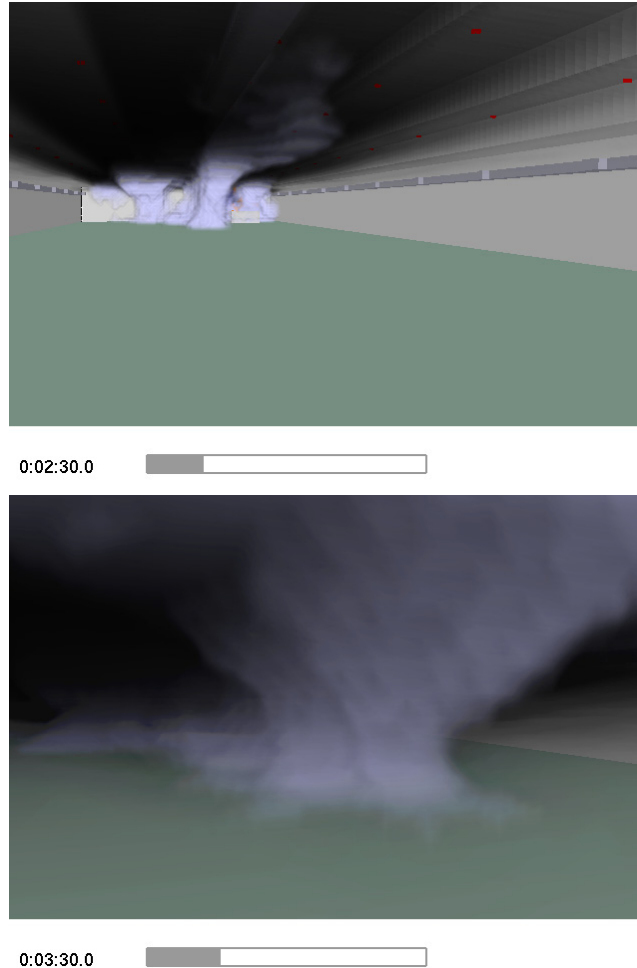
#### 4.3.3.2 Savun leviäminen laitapinon palossa M2

Paloskenaariossa M2 laitapino paloi kolmannen savuosaston päädyssä, lähellä vaihtoehtoisen uloskäytävän ovea. Hallin katossa olevat sprinklerit laukesivat n. 2 minuutin kuluttua syttymisestä. Tällöin hallista käytävään johtavien ovien oletetaan avautuvan, mutta eri savuosastojen väliset ovet pysyvät suljettuina.

Sprinklatussa tilassa näkyvyyden heikkenemiseen vaikuttaa savun lisäksi vesipisaroiden muodostama sumu. Lisäksi sprinklereiden vesisuihkut sekoittavat savukerrosta ja nopeuttavat näin näkyvyyden heikkenemistä myös tilan alaosassa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 37, joka esittää savun ja vesihöyryn yhteisvaikutusta. Suurilla vesihöyrypitoisuuksilla Smokeview-ohjelma kuitenkin liioittelee vesihöyryn vaikutusta, joten seuraavissa kuvissa sitä ei ole otettu mukaan.

Näitä tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että FDS-ohjelma ei ota huomioon useiden suuttimien laukeamisesta johtuvaa putkiston paineen alenemista ja siitä johtuvaa suutin-

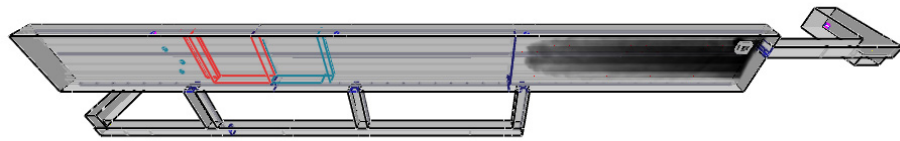
kohtaisen vesivirtauksen huomattavaa pienenemistä. Liian suuri vesivirtaus näkyy esimerkiksi savun jäähtyksen ja sekoittumisen yliarviointina. Tuloksia voidaan siten pitää lähinnä suuntaa antavina, mutta kvantitatiivisia johtopäätöksiä sprinklerien vaikutuksesta savun käyttäytymiseen ei pystytä tekemään.



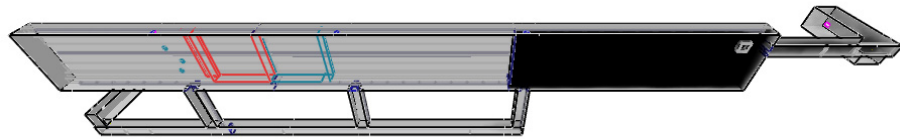
*Kuva 37. Savun ja vesihöyryn yhteisvaikutus näkyvyyden menettämiseen skenaariossa M2.*

Kuvassa 38 esitetään savun leviäminen kohteessa, alaviistosta katsottuna. Nähdään, että kahdessa minuutissa savu on ehtinyt levitä ensimmäisen osaston päästä päähän mutta ei ole vielä katkaissut poistumisreittiä. Viidessä minuutissa syttymisosasto on täytynyt savulla, ja savu häiritsee näkyvyyttä toissijaisessa uloskäytävässä. Kymmenessä minuutissa savu on virrannut pääasialliseen uloskäytävään ja viidessätoista minuutissa se on savun vallassa. Samaan aikaan savu alkaa virrata käytävien kautta muihin savu-osastoihin.

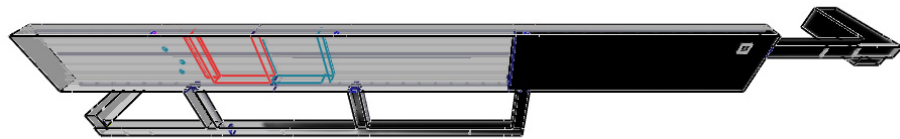




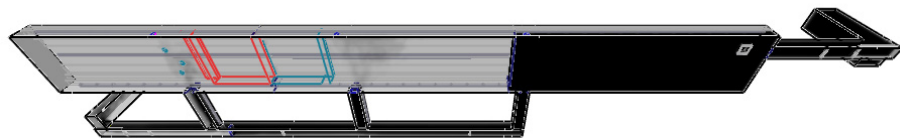
0:02:00.0



0:05:00.0

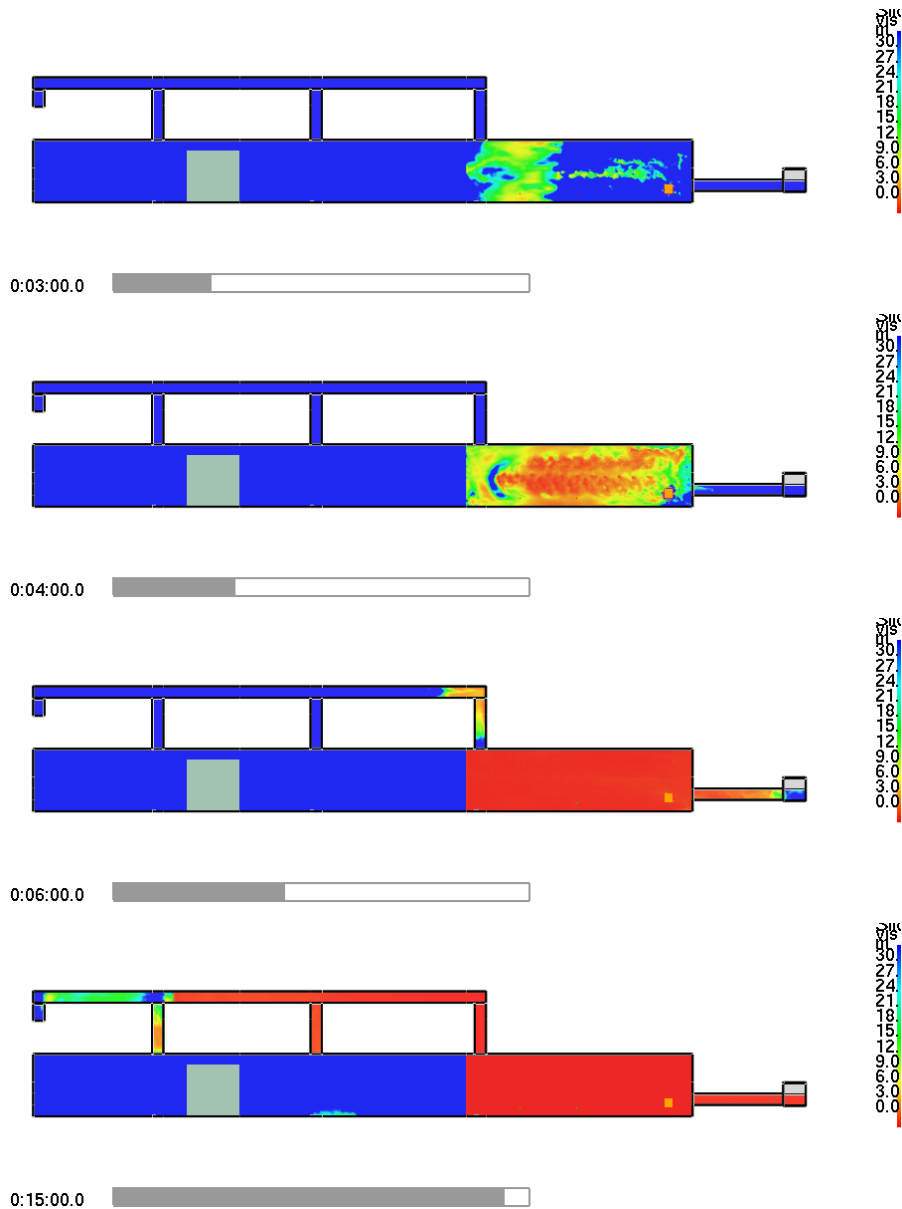


0:10:00.5



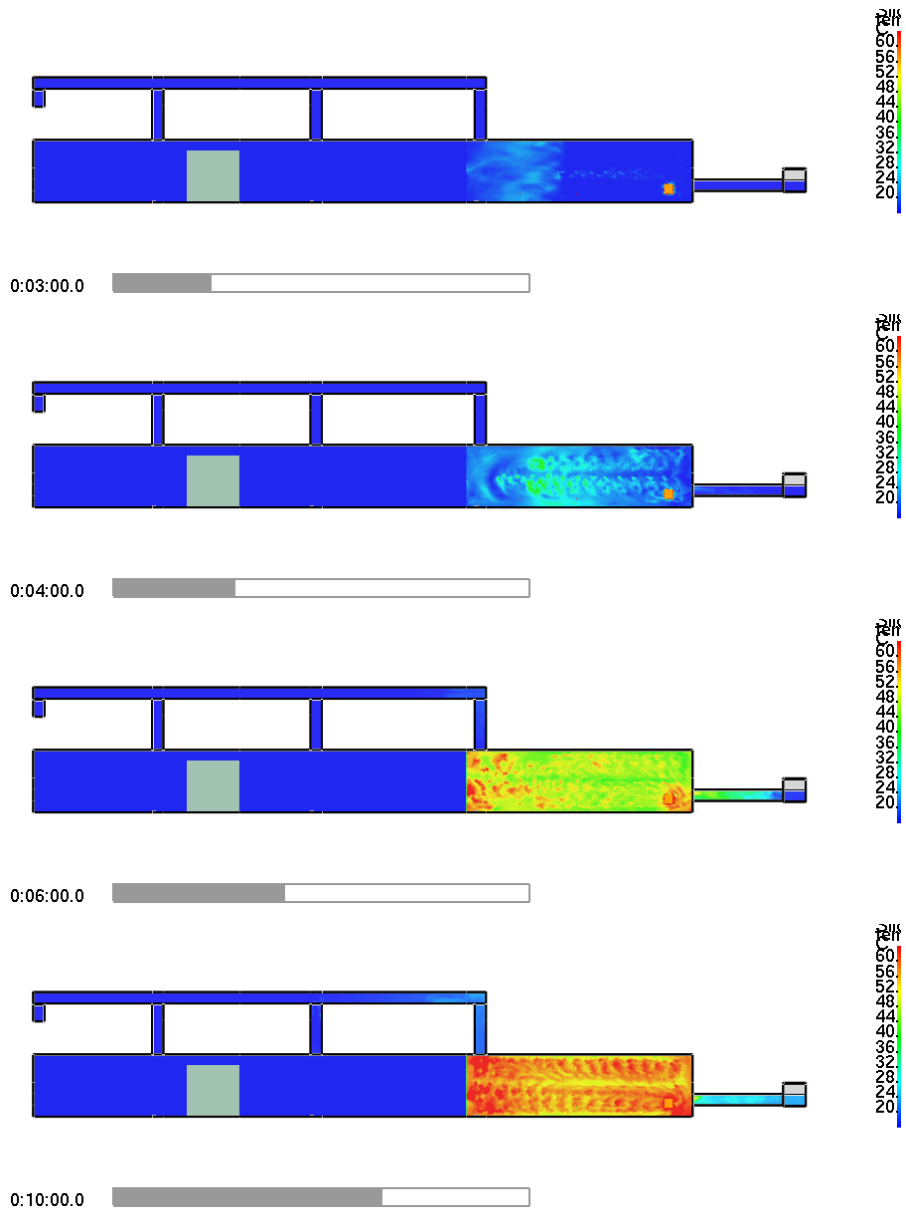
0:15:00.5

*Kuva 38. Savun leviäminen laitapinon palossa (M2). Kuvat ovat ajankohdilta 2, 5, 10 ja 15 minuuttia syttymisestä.*

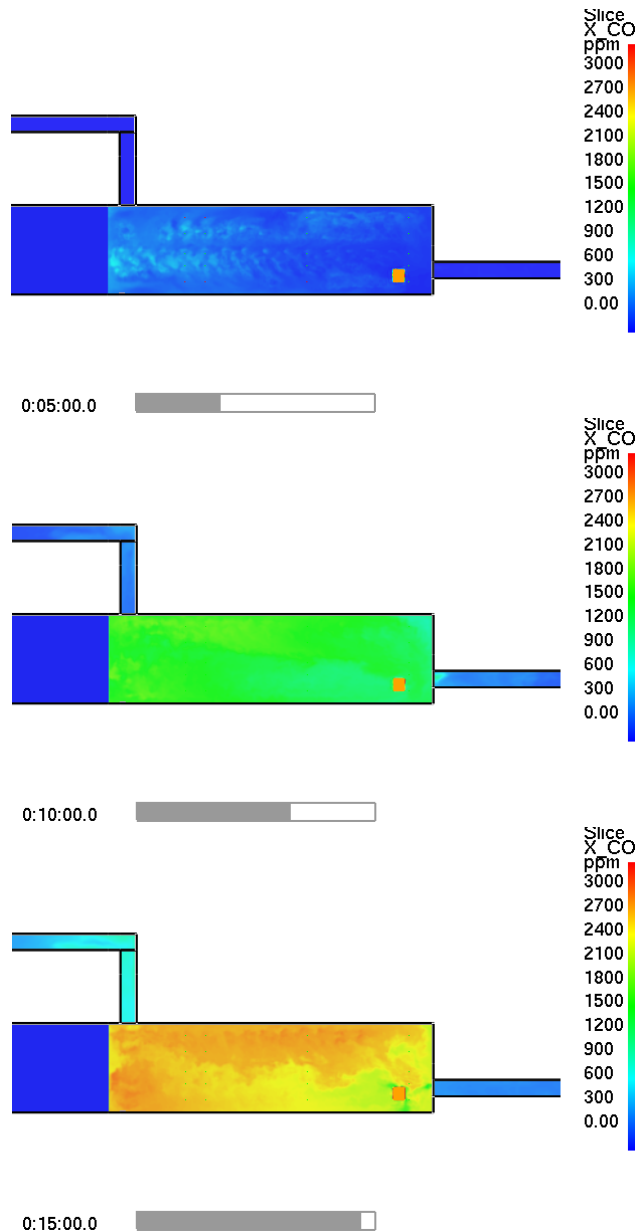


Kuva 39. Näkyvyys 1,3 m korkeudella laitapinon palossa (M2). Kuvat ovat ajankohdilta 3, 4, 6 ja 15 minuuttia syttymisestä.

Kuvassa 39 esitetään näkyvyys 1,8 m korkeudella lattiasta eri ajankohtina. Näkyvyys on heikentynyt koko syttymisosastossa neljän minuutin kuluttua ja 15 minuutissa kaikilla poistumisreiteillä. Sprinklereiden vesisuihkujen vaikutus kaasutilan sekoittumiseen nähdään sekä kuvassa 40 että kuvassa 41, jossa on esitetty lämpötila 1,8 m korkeudella. 10 minuutin jälkeen lämpötila alkaa kuitenkin laskea, koska palo hiipuu hapenpuutteen-  
sa ja koska sprinklereiden runsas vesivirtaus jäädyttää kaasutilaa.



Kuva 40. Lämpötila 1,3 m korkeudella laitapinon palossa (M2). Kuvat ovat ajankohdilta 3, 4, 6 ja 10 minuuttia.



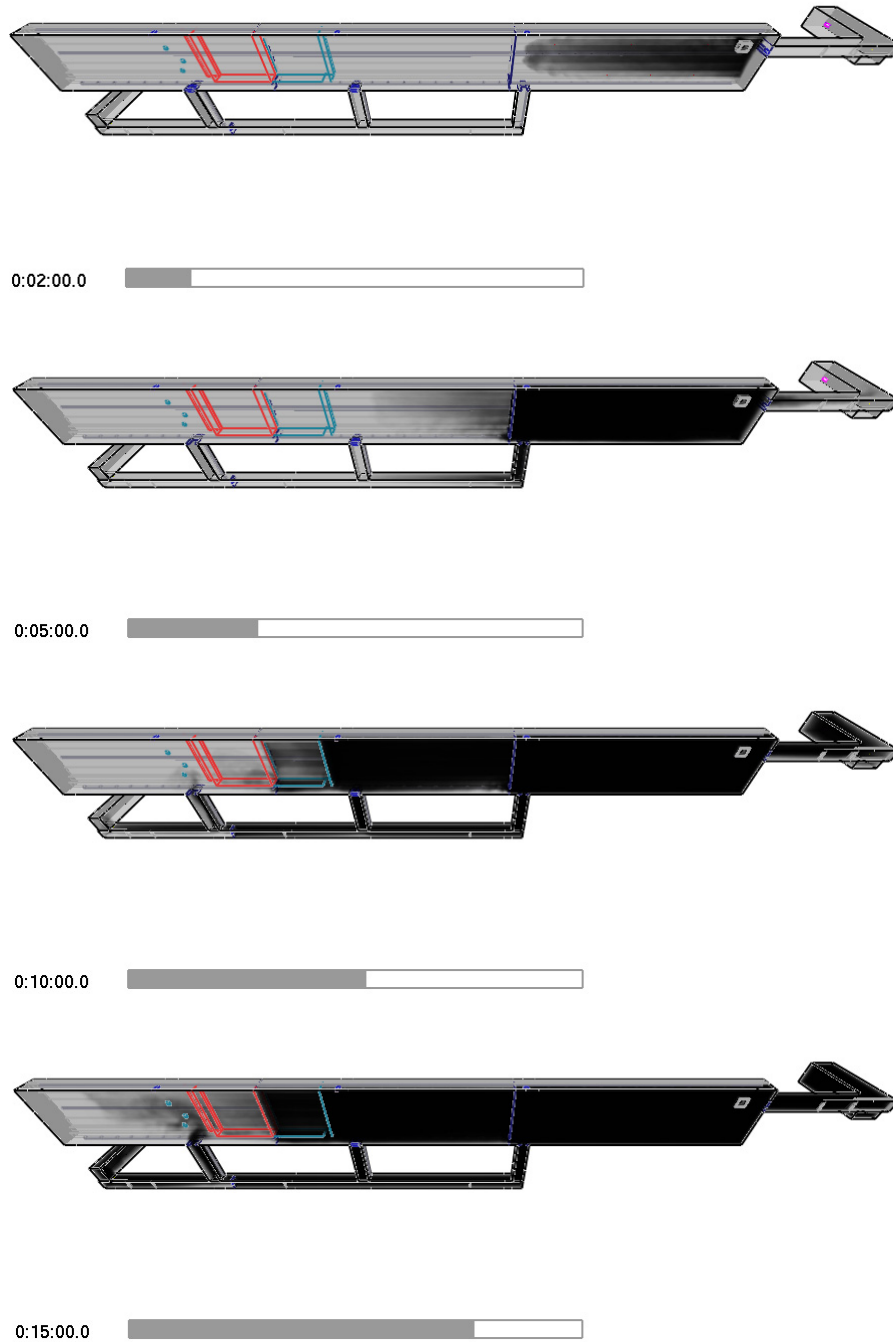
Kuva 41. CO-pitoisuus 1,8 m korkeudella palossa M2 ajankohtina 5, 10 ja 15 minuuttia.

#### 4.3.3.3 Savun leviäminen laitapinon palossa M3

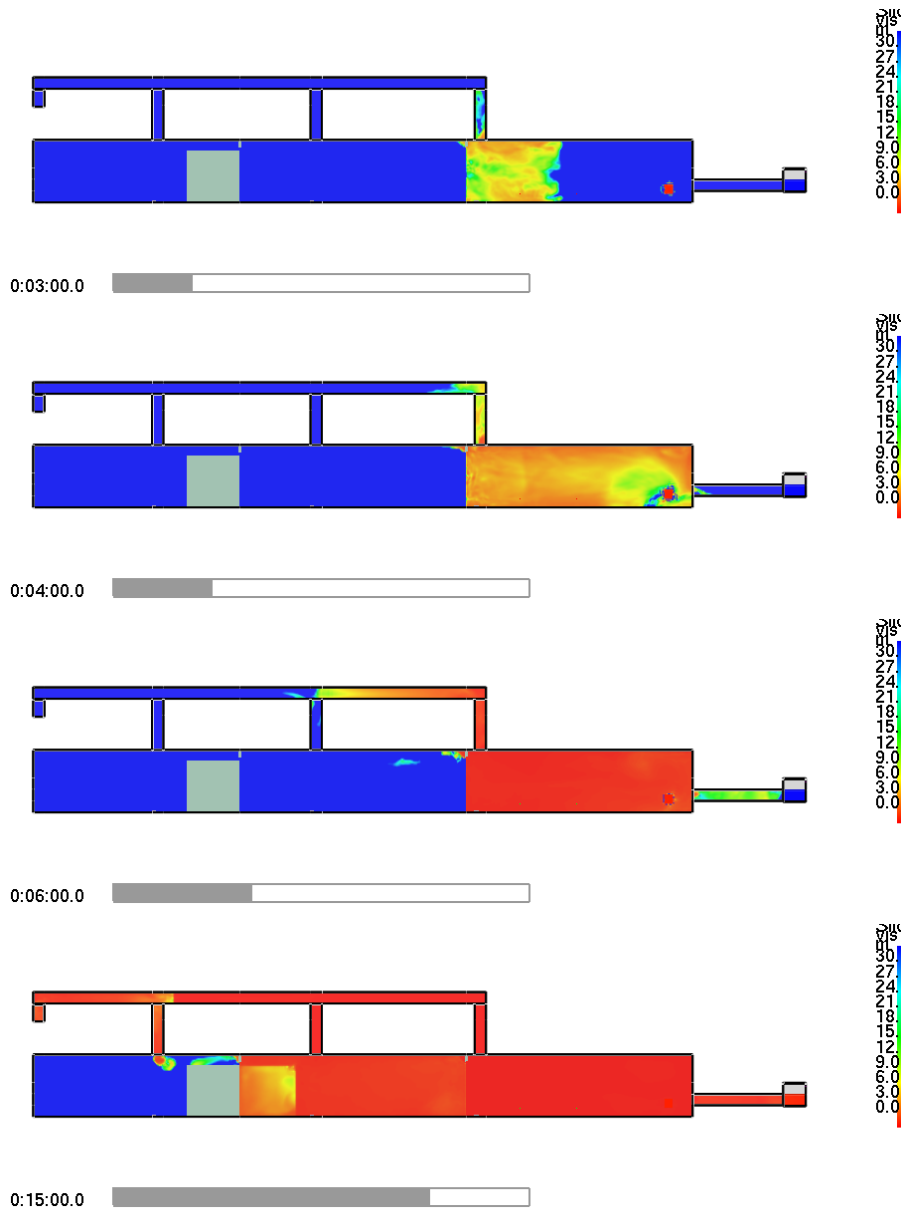
Paloskenaario M3 poikkeaa skenaariosta M2 kahden tekijän osalta: savuosaston sprinklereitä käytetään vain palonilmaisuun, eli niistä ei tule vettä, ja savuosastojen väliset ovet ovat auki palohälytyksen tultua.

Kuvassa 42 esitetään savun leviäminen kohteessa. Vertailu skenaarioon M2 osoittaa, että ilman sprinklereitä savu leviää hieman nopeammin etäälle palolähteestä. Sama ilmiö voidaan nähdä kuvasta 43, jossa esitetään näkyvyys 1,8 m korkeudella. Tämä johtuu todennäköisesti sprinklerien voimakkaasta viilentävästä vaikutuksesta skenaariossa M2.

Sprinkleriputkiston mallintamiseen liittyvien ongelmien takia tästä ei voida päätellä, että sprinklerien lämpölaajenemista hillitsevä vaikutus olisi voimakkaampi kuin niiden savun sekoittumista nopeuttava vaikutus. Lisäksi vesipisaroiden ja höyryn omaa näkyvyyttä heikentävää vaikutusta ei ole otettu huomioon niin savu- kuin näkyvyyskuvissaakaan. Johtopäätösten tekeminen vaatisi mallin parantelua ja systemaattisia numeerisia kokeita riittävän yksinkertaisissa tilanteissa.

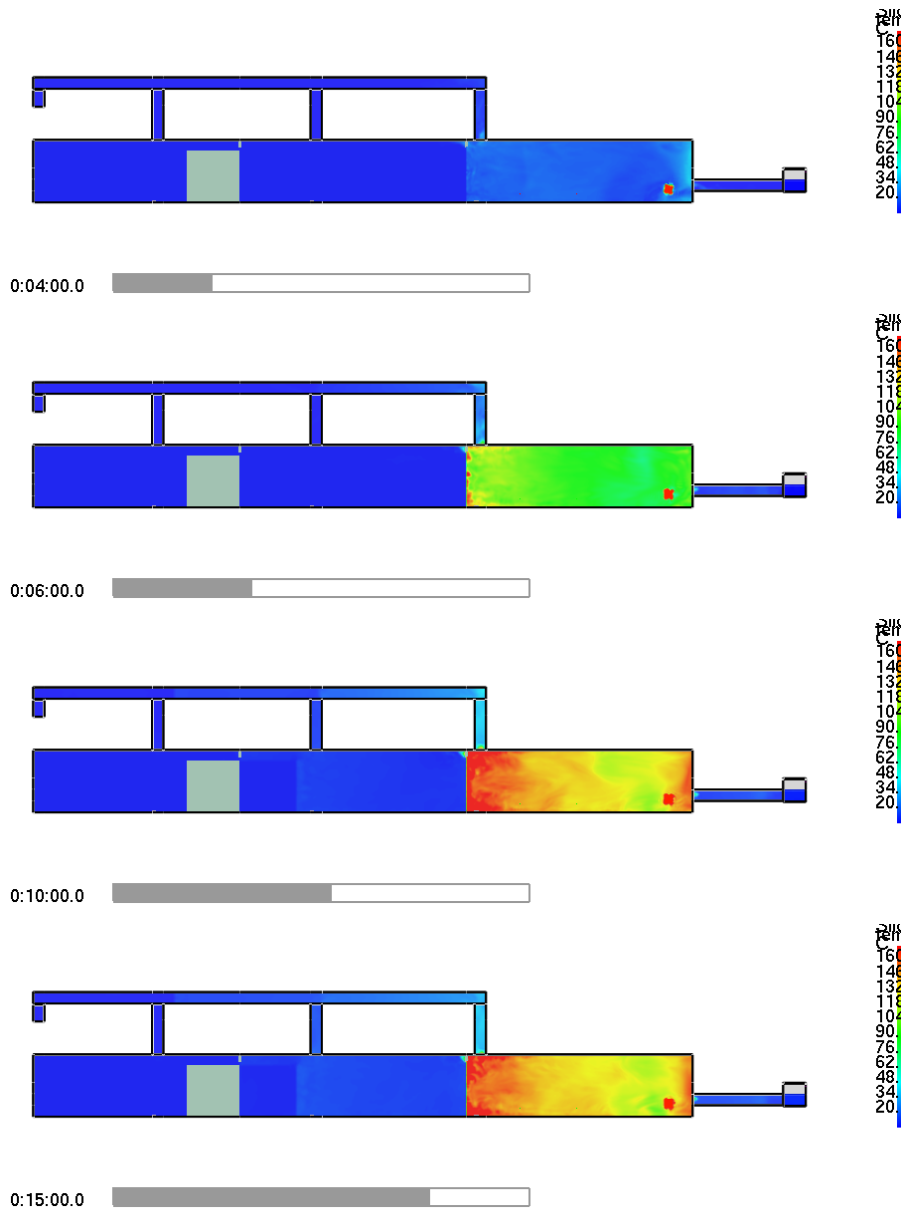


*Kuva 42. Savun leviäminen laitapinnon palossa M3 ajankohtina 2, 5, 10 ja 15 minuuttia.*

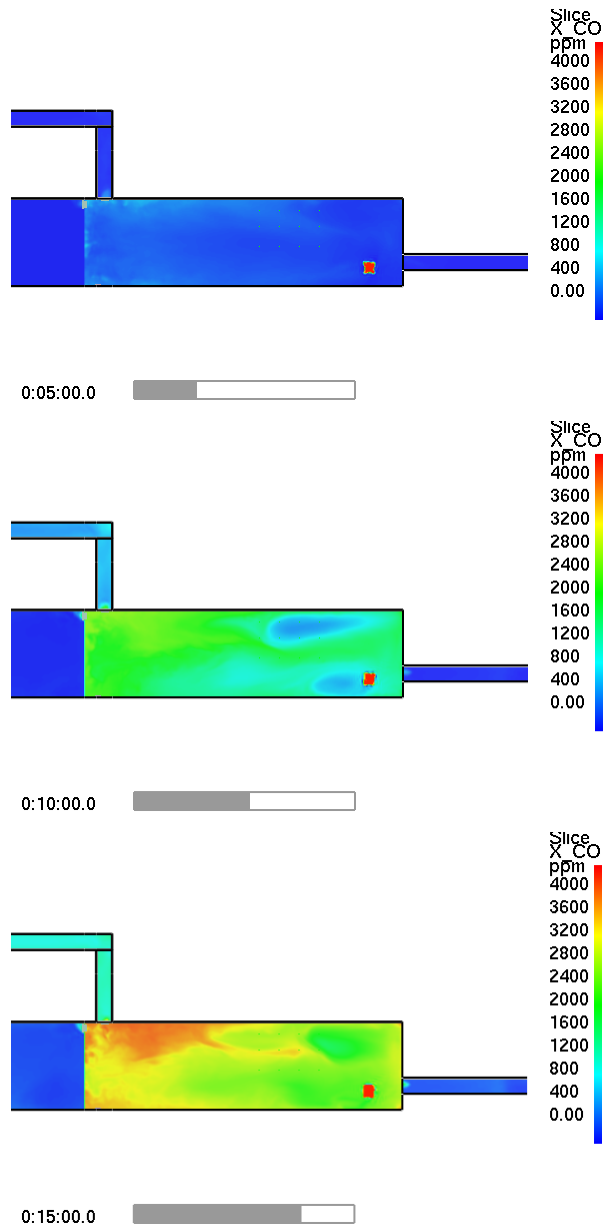


*Kuva 43. Näkyvyys 1,8 m korkeudella skenaariossa M3 ajankohtina 3, 4, 6 ja 15 min.*

Kuvassa 44 esitetään lämpötilat 1,8 m korkeudella eri ajankohtina. Nähdään, että lämpötilat ovat selvästi M2-skenaariota korkeampia ja ne voivat muodostua vaarallisen korkeiksi n. 10 minuutissa. Tämän jälkeen lämpötilat tosin eivät juurikaan nouse, koska palo alkaa hapenpuutteessa hiipua. CO-pitoisuudet syttymishallissa esitetään kuvassa 45.



Kuva 44. Lämpötila 1,8 m korkeudella skenaariossa M3. Kuvat ovat ajankohdilta 4, 6, 10 ja 15 minuuttia. Punainen väri vastaa 160 °C tai kuumempaa.



Kuva 45. CO-pitoisuus 1,8 m korkeudella skenaariossa M3. Kuvat ovat ajankohdilta 5, 10 ja 15 minuuttia.

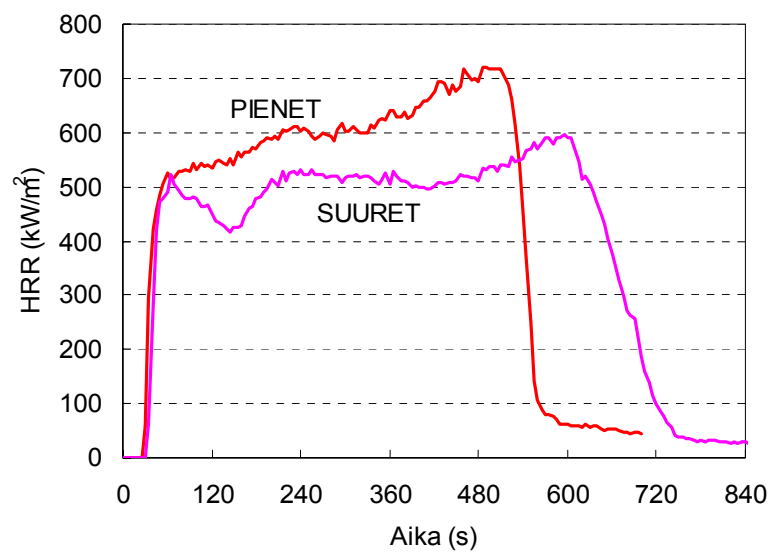
#### 4.3.3.4 Rakenteluserjähyllyjen paloteho

Muovisten rakenteluserjojen palotehon laskentaa varten tehtiin kartiokalorimetrikokeet kahden eri koon rakentelupalikoilla. Valokuvat näytteistä esitetään kuvassa 46 ja kartiokalorimetrikokeessa mitatut palotehokäyrät kuvassa 47. Kartiokalorimetrikokeet tehtiin  $50 \text{ kW/m}^2$  säteilyteholla, ja näytteiden massat olivat 100 g (pienet palikat) ja 110 g (suuret palikat).





Kuva 46. Rakenteluserjojen materiaalinäytteet ennen kartiokalorimetrikokeita. Vasemmalla isot palikat, oikealla pienet.



Kuva 47. Rakenteluserjanäytteiden paloteho kartiokalorimetrikokeessa.

Simuloimalla kartiokalorimetrikokeita etsittiin FDS-ohjelmaan lämpöplastisen materiaalin parametrit, joiden avulla palotehokäyrä saatiin riittävän hyvin toistettua. Parametrit ovat taulukossa 6.

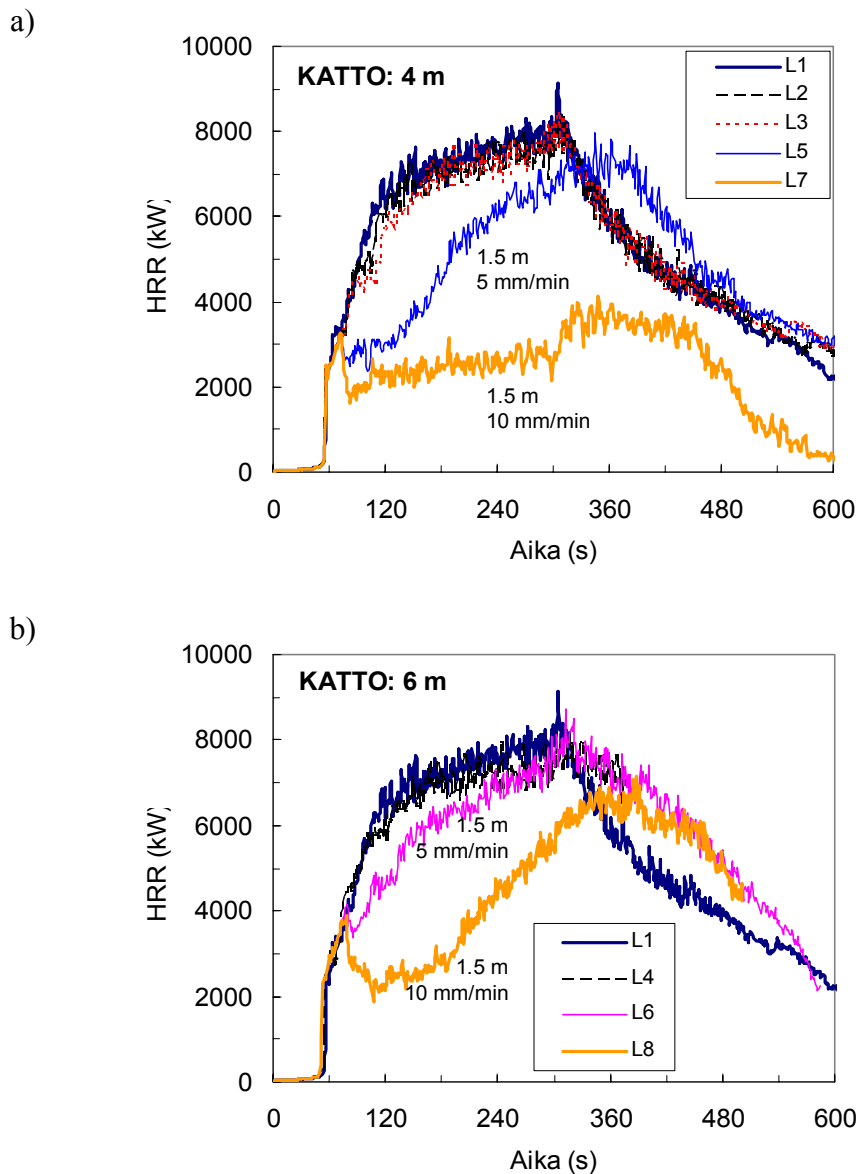
*Taulukko 6. Rakenteluserjämateriaalia edustavan FDS-materiaalimallin parametrit.*

Ominaisuus	FDS-avainsana	Arvo	Yksikkö
Tyyppi		”THERMOPLASTIC”	
Paksuus	DELTA	0,03	m
Syttymislämpötila (massavirtaa 0,02 kg/m <sup>2</sup> /s vastaava lämpötila)	TMPIGN	380	°C
Höyrystymislämpö	HEAT_OF_VAPORIZATION	900	kJ/kg
Palamislämpö	HEAT_OF_COMBUSTION	27000	kJ/kg
Tiheys	DENSITY	423	kg/m <sup>3</sup>
Lämmönjohtavuus	KS	0,1	W/m.K
Ominaislämpökapasiteetti	C_P	1,5	kJ/kg.K
Laskentapisteidien lkm.	WALL_POINTS	30	
Taustareunaehto	BACKING	”INSULATED”	

Rakenteluserjähyllyn palotehon ennustamiseksi tehtiin joukko simuloiteja hyllygeometriassa, joka esitetään kuvassa 18. Samassa yhteydessä tehtiin joukko herkkyystar-kasteluja, joissa varioitiin katon korkeutta hyllyn kohdalla, sprinklerin etäisyyttä seinästä sekä sprinklerin vesivirtaamaa. Yhteenveto simuloituista tapauksista on taulukossa 7. Tuloksina saadut palotehokäyrät ovat kuvassa 48. Sytytyslähteenä on 45 kW poltin suoraan alimman hyllyn alapuolella. Hyllyt syttyvät n. 60 sekunnissa, minkä jälkeen palo leviää nopeasti hyllystöihin ja viereisiin kappaleisiin. Tulokset osoittavat, että ilman sprinklausta hyllyn paloteho kasvaa n. minuutissa yli 6 MW:iin ja 5 minuutissa 8 MW:iin asti. Sprinklauksella voidaan hillitä paloa vain, jos sprinklerit on asennettu 1,5 m päähän seinästä. Normaalilla, 5 mm/min vesivuolla paloteho kasvaa sprinklauksesta huolimatta pikkuhiljaa aina 7 MW:iin asti, mutta 10 mm/min vesivuolla paloteho rajoittuu 2 ja 4 MW:n välille. Palo ei sammu kokonaan, koska hyllystö aiheuttaa katveja, joihin vesi ei pääse. Isomman kattokorkeuden tapauksessa sprinklerien teho on vielä pienempi.

*Taulukko 7. Yhteenveto rakenteluserjähyllyn simuloituista tapauksista.*

	Katto- korkeus (m)	virtaama (mm/min)	Sprinklerien etäisyys (m)	korkeus (m)
<b>L1</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	–	–
L2	4	5	3	3,8
L3	4	10	3	3,8
L4	6	5	3	5,8
L5	4	5	1,5	3,3
L6	6	5	1,5	5,3
L7	4	10	1,5	3,3
L8	6	10	1,5	5,3



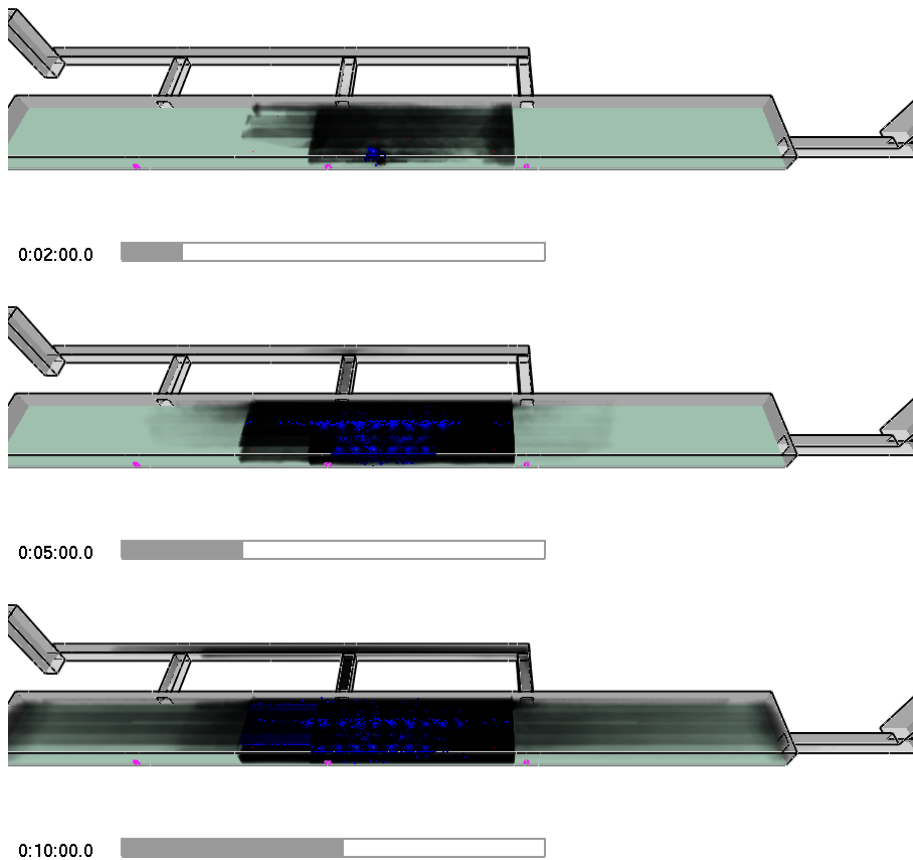
Kuva 48. Rakentelusarjahyllystön ennustetut palotehokäyrät.

#### 4.3.3.5 Savun leviäminen Rakentelusarjahyllyn palossa M4

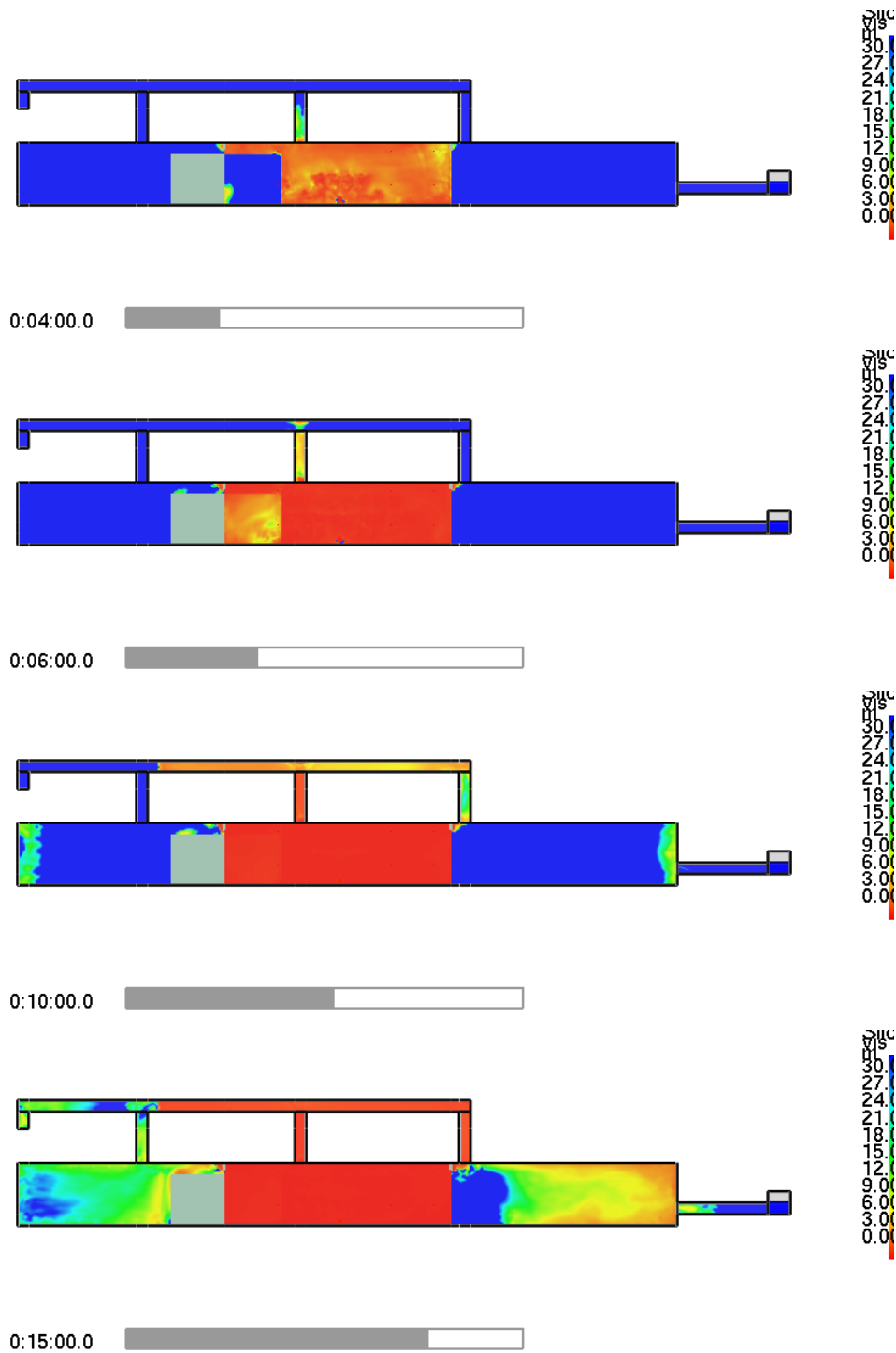
Rakentelusarjahyllyn palosta syntyvän savun leviämistä simuloitiin asettamalla palavaa hyllystöä vastaava palolähde keskimmäiseen savuosastoon (ks. kuva 32). Palotehokäyränä käytettiin 1,5 m etäisyydeltä ja 5 mm/min vesivuolla sprinklatun hyllystön ennustettua käyrää (L5).

Savun leviämistä kohteessa havainnollistetaan kuvassa 49 ja näkyvyyttä 1,8 m korkeudella kuvassa 50. Siniset pisteet savun seassa esittävät sprinklereistä lähteneitä vesipisaroita. Sprinklerit laukeavat lähes koko savuosaston matkalta. Tällöin FDS-ohjelma

yliarvioi niistä tulevaa vesivirtausta, mikä aiheuttaa epävarmuutta savunleviämistuloksiin. Skenaarioiden M2 ja M3 vertailu kuitenkin osoitti, ettei sprinklauksen vaikutus ollut erityisen merkittävä. Kuvista voidaan nähdä, että ensimmäinen savuosasto täyttyy jo n. kahdessa minuutissa ja että neljässä minuutissa savu alkaa virrata uloskäytävään ja viereisiin osastoihin. Kymmenessä minuutissa savu on saavuttanut pääsisäänkäynniltä vasemmanpuoliseen osastoon johtavan käytävän ja viereisten osastojen päädyt. Samalla se vaikeuttaa pääsyä vaihtoehtoiseen uloskäytävään kolmannen osaston päädyssä.

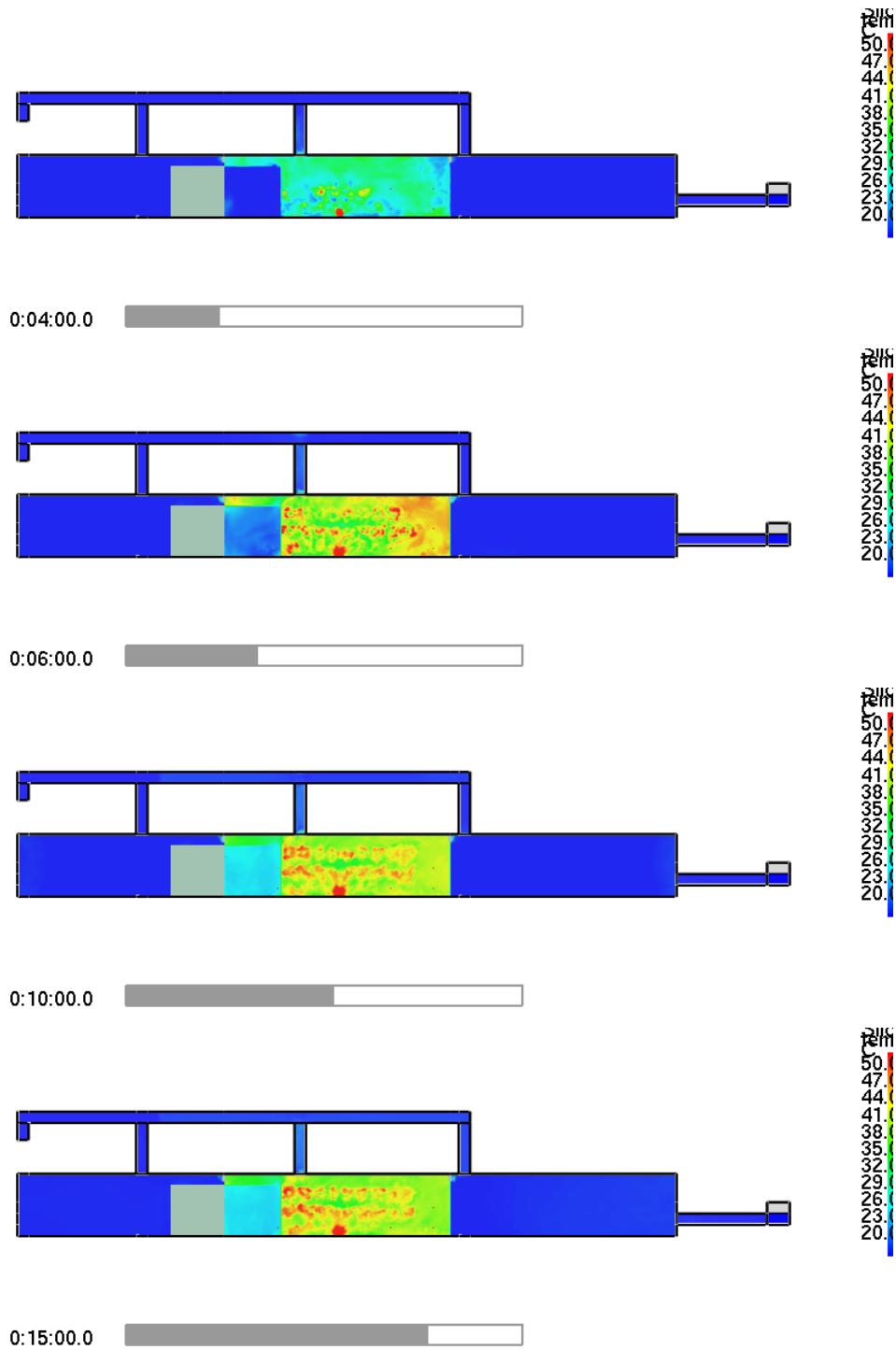


*Kuva 49. Savun leviäminen skenaariossa M4. Kuvat ovat ajankohdilta 2, 5 ja 10 minuuttia.*

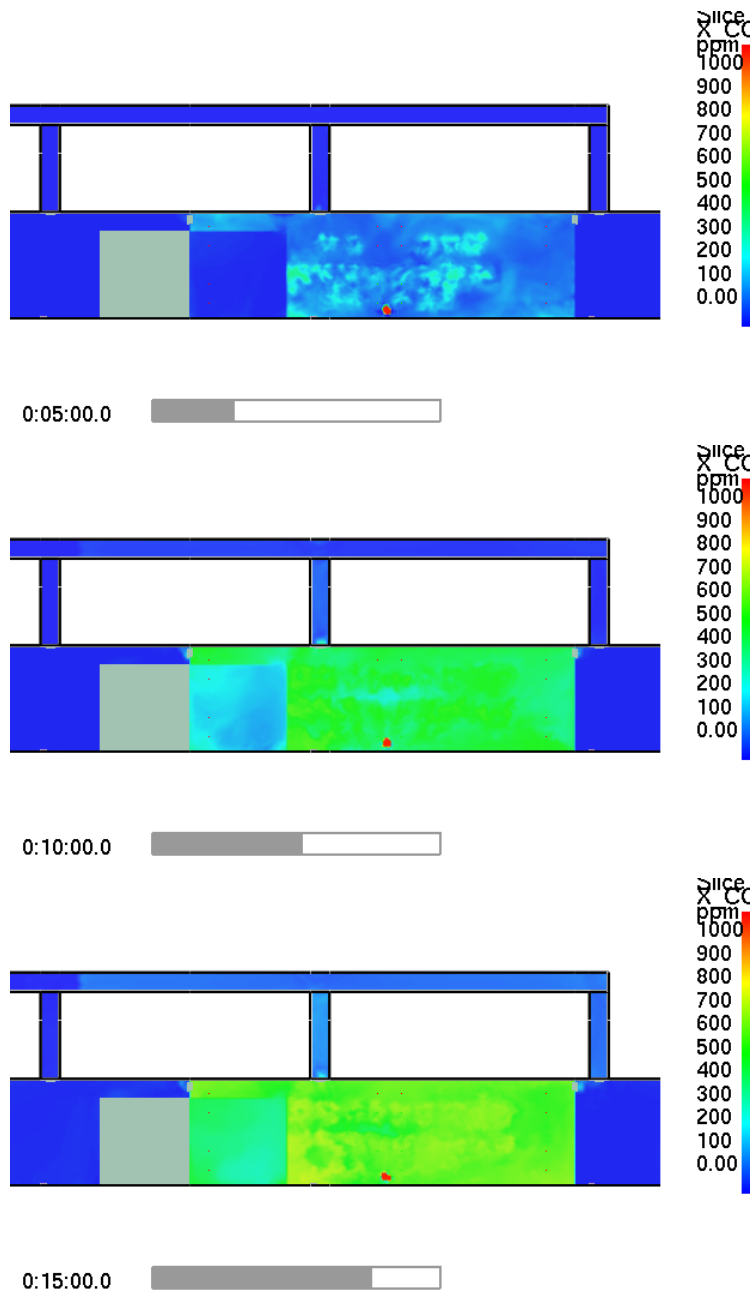


*Kuva 50. Näkyvyys 1,8 m korkeudella skenaariossa M4 ajankohdilta 4, 6, 10 ja 15 min.*

Kuvassa 51 esitetään lämpötilat 1,8 m korkeudella eri ajankohtina. Sprinklerien runsaan jäähdyttävän vaikutuksen takia lämpötilat pysyvät hyvin matalina koko kohteessa eivät-  
kä juurikaan nouse 6 minuutin jälkeen. CO-pitoisuudet esitetään kuvassa 52.



Kuva 51. Lämpötila 1,8 m korkeudella skenaariossa M4. Kuvat ovat ajankohdilta 4, 6, 10 ja 15 minuuttia. Punainen väri vastaa 50 °C tai kuumempaa.



Kuva 52. CO-pitoisuus 1,8 m korkeudella skenaariossa M4. Kuvat ovat ajankohdilta 5, 10 ja 15 minuuttia.

## 4.4 Metroasema

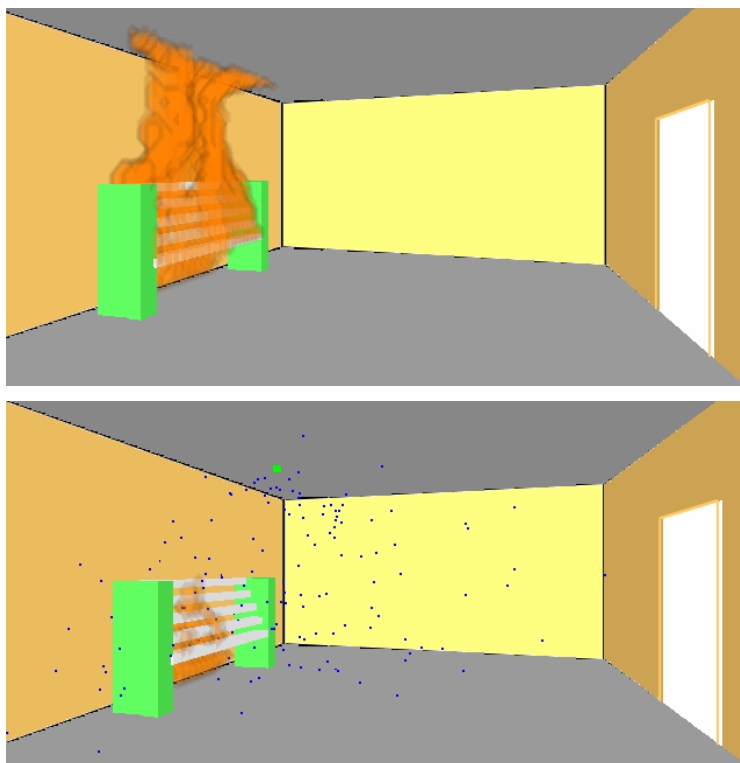
### 4.4.1 Simulointimalli

Tietokonesimulaatioita varten metroasemaa on pelkistetty jättämällä lippuhallitason myymälätilat pois, koska simuloinneissa on pyritty keskittymään tiloihin, joissa savu kulkeutuu pitkin poistumisreittejä. Laituritason ja lippuhallitason välissä sijaitsevaa tek-

nistä tilaa ei myöskään ole otettu simulointeihin mukaan, koska varsinaista avointa yhteyttä ei teknisten tilojen ja em. kerrosten välillä ole. Smokeview-ohjelmalla luotu visuaalinen malli FDS:n käyttämästä geometriasta on esitetty aiemmin kuvassa 19.

#### 4.4.2 Paloskenaariot

Eri paloskenaariota varioitiin kerroksen, paikan, palokuorman ja savunpoiston suhteen taulukon 8 mukaisesti. Metroaseman palokuormista on voitu laskea syntyvää palotehoa (luku 3.4.2), jota on käytetty FDS-mallin syöteparametrina. Simuloinneissa esiintyvät palotehokäyrät ajan funktiona esitetään liitteessä C. Simuloinneissa kioski1–kioski3 tilannetta on tarkasteltu muodostamalla erillinen geometria kioskitilassa tiheällä hilalla. Tiheä hilarakenne (n. 10 cm) mahdollistaa liekin leviämisen ja palon kehittymisen mallinnuksen, mutta sitä ei voi soveltaa koko metroaseman tilavuuteen, koska hilojen lukumäärä kasvaisi liian suureksi. Erillisessä kioskirakennuksessa on mallinnettu palavaa lehtihyllyä ja saatu näin palotehokäyrät tapauksille, joissa sprinklerit ovat ja eivät ole päällä (kuva 53).



*Kuva 53. Paloskenaario tapauksesta, jossa lehtihylly palaa vapaasti (ylhäällä), ja tapauksesta, jossa sprinkleri on lauennut ja rajoittaa paloa (alhaalla). Tapauksissa tarkasteltu hetkeä 13 min palon syttymisen jälkeen. Lehtihyllyn leveys 2 m, korkeus 1,4 m ja syvyys 0,6 m.*



Taulukko 8. Metroaseman simulointeihin käytetyt paloskenaariot.

Simulointi	Palokuorma	Palon sijainti	Savunpoiston alkamisajankohta	Savunpoiston suunta	Tuulen nopeus laituritasolla	Sprinklaus
K1	kaapelit <sup>a</sup>	laituritaso (x = 170 m) <sup>b</sup>	10 min <sup>c</sup>	EP <sup>d</sup>	0,2 m/s <sup>g</sup>	–
K2	kaapelit	laituritaso (x = 40 m)	10 min	EP	0,2 m/s	–
K3	kaapelit	laituritaso (x = 40 m)	10 min	PE <sup>e</sup>	0,2 m/s	–
K4	kaapelit	laituritaso (x = 170 m)	10 min	PE	0,2 m/s	–
K5	kaapelit	laituritaso (x = 40 m)	–	–	–	–
K6	kaapelit	laituritaso (x = 170 m)	–	–	–	–
M1	metrovaunu	laituritaso (x = 90 m)	–	–	0,2 m/s	–
M2	metrovaunu	laituritaso (x = 90 m)	10 min	EP	0,2 m/s	–
M3	metrovaunu	laituritaso (x = 90 m)	10 min	PE	0,2 m/s	–
M4	metrovaunu	laituritaso (x = 90 m)	–	–	0,2 m/s	–
kioski1	lehtihylly	lippuhallitaso (x = –29 m)	20 min	alhaalta ylös <sup>f</sup>	–	päällä <sup>h</sup>
kioski2	lehtihylly	lippuhallitaso (x = –29 m)	20 min	alhaalta ylös	–	ei
kioski3	lehtihylly	lippuhallitaso (x = –29 m)	10 min	alhaalta ylös	–	päällä

<sup>a)</sup> Kaapelit sijaitsivat 3 m korkeudella laituritasosta.

<sup>b)</sup> Palot ovat kaikki sijainneet tunnelin 2 laiturilla (kaapelit) tai sen vieressä kulkevalla metroradalla (metrovaununupalo).

<sup>c)</sup> Samaa aikaa käytetty laituritason savuovien sulkeutumiseen ja lippuhallitason savuluukkujen avautumiseen.

<sup>d)</sup> Etelästä pohjoiseen laituritasolla (etelä-suunnassa x = 40 m ja pohjoinen-suunnassa x = 170 m).

<sup>e)</sup> Pohjoisesta etelään laituritasolla.

<sup>f)</sup> Liukuportaiden puhaltimien suunta, laituritason puhaltimet eivät käytössä.

<sup>g)</sup> Tuulen suunta sama kuin savunpoiston suunta, paitsi tapauksissa M1 ja M4, joissa tuulen suunta pohjoisesta etelään.

<sup>h)</sup> Sprinklerit vaikuttavat vain kioskin sisällä.

Kaikissa simuloinneissa uloskäytävät avautuneet 2 min kuluessa ja sulkeutuneet savunpoiston alkamisajankohtana. Lisäksi kaikissa simuloinneissa käytettiin muunneltua polystyreenin paloreaktiota, jossa noen tuotto oli 7,5 %.

### 4.4.3 Tulokset

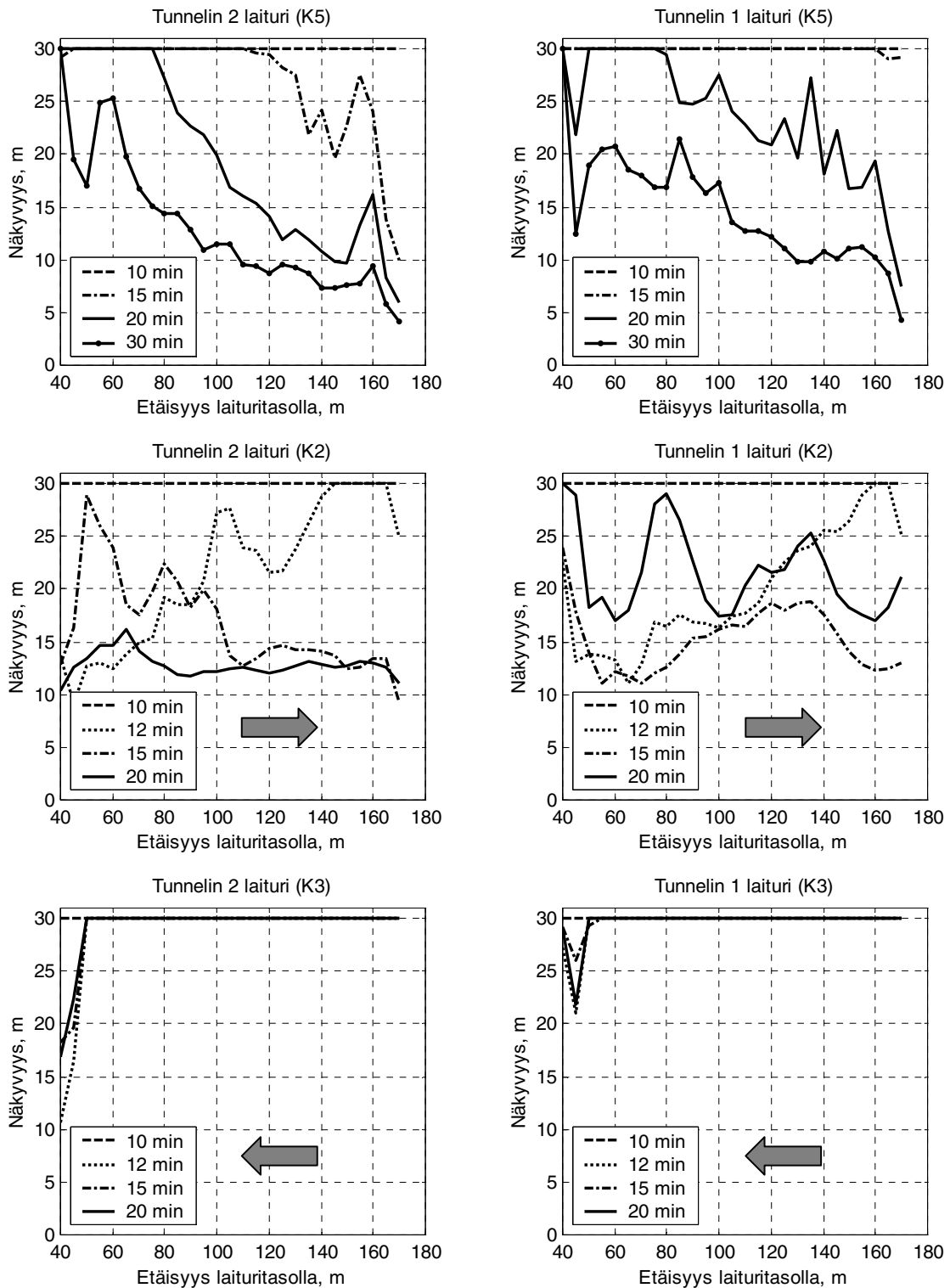
#### 4.4.3.1 Kaapelipalo laiturilla

Kuvissa 54 ja 55 esitetään paloskenaarioiden K1–K6 tuloksia. Tarkastelussa on käsitelty näkyvyys-suuretta tunnelien 1 ja 2 laiturien keskilinjoilla 1,5 m korkeudella 5 m välein pituussuuntaan nähden. Tällä korkeudella valtaosan ihmisistä voidaan olettaa altistuvan savulle.

Simulointitapauksessa K5, jossa ei ole savunpoistoa, näkyvyys pysyy molemmilla laitureilla suurimmaksi osaksi hyvänä aina 15 minuuttiin saakka, minkä jälkeen näkyvyys vähenee jyrkästi molemmilla laitureilla edettäessä kohti pohjoisosaa.

Tapauksessa K2, jossa savunpoisto on mukana, havaitaan selvästi, kuinka savunpoisto ei toimi etelä-pohjoissuunnassa, kun kaapelipalo sijaitsee tunnelin 2 laiturin eteläpäädyssä. Savunpoisto sekoittaa savupatjan jo 12 minuutin kohdalla (2 minuuttia savunpoiston aloittamisesta). Näkyvyys laiturilla asettuu 20 minuutin kohdalla lopulliselle tasolle. Tunnelin 2 laiturilta on avoin yhteys tunnelin 1 laiturille samalla kohtaa, missä palo sijaitsee, jolloin savunpoiston aikana savu levittäytyy molemmille laitureille.

Tapauksessa K3 savunpoisto ei aiheuta laitureilla juurikaan poikkeavuutta savunpoiston käynnistyshetken 10 min ja savunpoisto pystyy pitämään käytännössä koko laituriosuuden puhtaana savusta. Ainoastaan palon kohdalla ( $x = 40$  m) on pientä vaihtelua, joka johtuu liukuportaiden puhaltimien aiheuttamasta ilmavirrasta alas laituritasolle sekä siitä, että liukuportaiden savunpoisto tuo ensimmäisten minuuttien aikana mukanaan laituritasolle myös lippuhallitasolle kulkeutunutta savua.



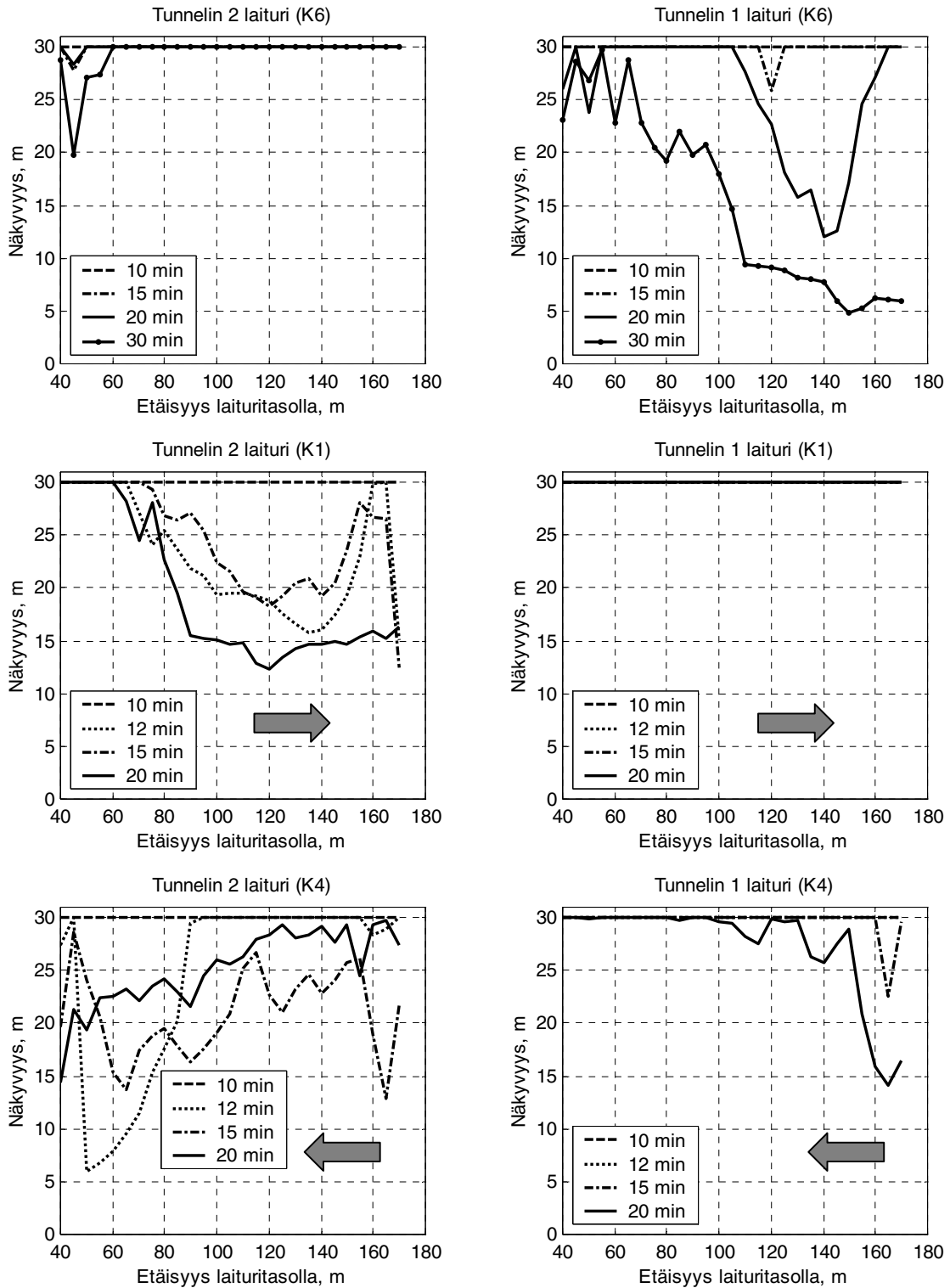
Kuva 54. Savun leviäminen ja savunpoistotapahtuma simuloinneissa K5, K2 ja K3. Paloskenaariona kaapelipalo kohdassa  $x = 40$  m. Ylimmissä kuvissa ei ole savunpoistoa. Alemmissä kuvissa savunpoisto tapahtuu nuolen osoittamassa suunnassa.

Kuvassa 55 kaapelipalon sijainti ( $x = 170$  m) on eri kuin kuvan 54 simuloinneissa. Tämä vaikuttaa osaltaan savun leviämiseen ja näkyvyyden heikkenemiseen, sillä tapauksesta K6 nähdään, ettei tunnelin 2 laiturilla näkyvyys heikkene juuri lainkaan. Kun verrataan tapauksia K5 ja K6, on tunnelin 1 laiturilla tilanne riippumatta kaapelipalon sijainnista hyvin samankaltainen, sillä noin puolet laiturista on näkyvyydeltään alle 25 m. Tunnelin 1 laiturin puolessa välissä eri suunnista tulevat savupatjat törmäävät ja sekoittuvat.

Simuloinnissa K1 havaitaan, ettei savunpoisto riitä puhaltamaan tunnelin 2 laituria puhtaaksi kuin ensimmäiset 40 m, vaikka palo sijaitsee pohjoisosassa laituria. Sen sijaan tunnelin 1 laiturin näkyvyys on koko ajan 30 m.

Tapauksessa K4 on havaittavissa samankaltainen käytös kuin tapauksessa K2 (kuva 54), jossa savunpoisto sekoittaa savupatjan ja heikentää näkyvyyttä, kun puhallus tapahtuu samasta päädyistä, jossa palo sijaitsee. Poikkeuksen muodostaa tunnelin 1 laiturin, jossa avoimen yhteyden sijoittuminen ennen paloa savunpoiston suunnassa vaikuttaa siten, ettei laiturille ohjaudu lisää savua palosta.

Liitteessä A esitetään, kuinka savunpoistosta simulointitapauksissa K1–K4 syntyvä ilmavirtauksen suuruus laituritasolla riippuu savunpoiston suunnasta. Ainoastaan etelä-pohjoissuunnassa tapahtuvassa savunpoistossa liukuportaiden puhaltimet pystyvät tukemaan savunpoistoa laituritasolla.



Kuva 55. Savun leviäminen ja savunpoistotapahtuma simuloinneissa K6, K1 ja K4. Paloskenaariona kaapelipalo kohdassa  $x = 170$  m. Ylimmissä kuvissa ei ole savunpoistoa. Alemmissä kuvissa savunpoisto tapahtuu nuolen osoittamassa suunnassa.

#### 4.4.3.2 Metrovaunupalo 15 MW

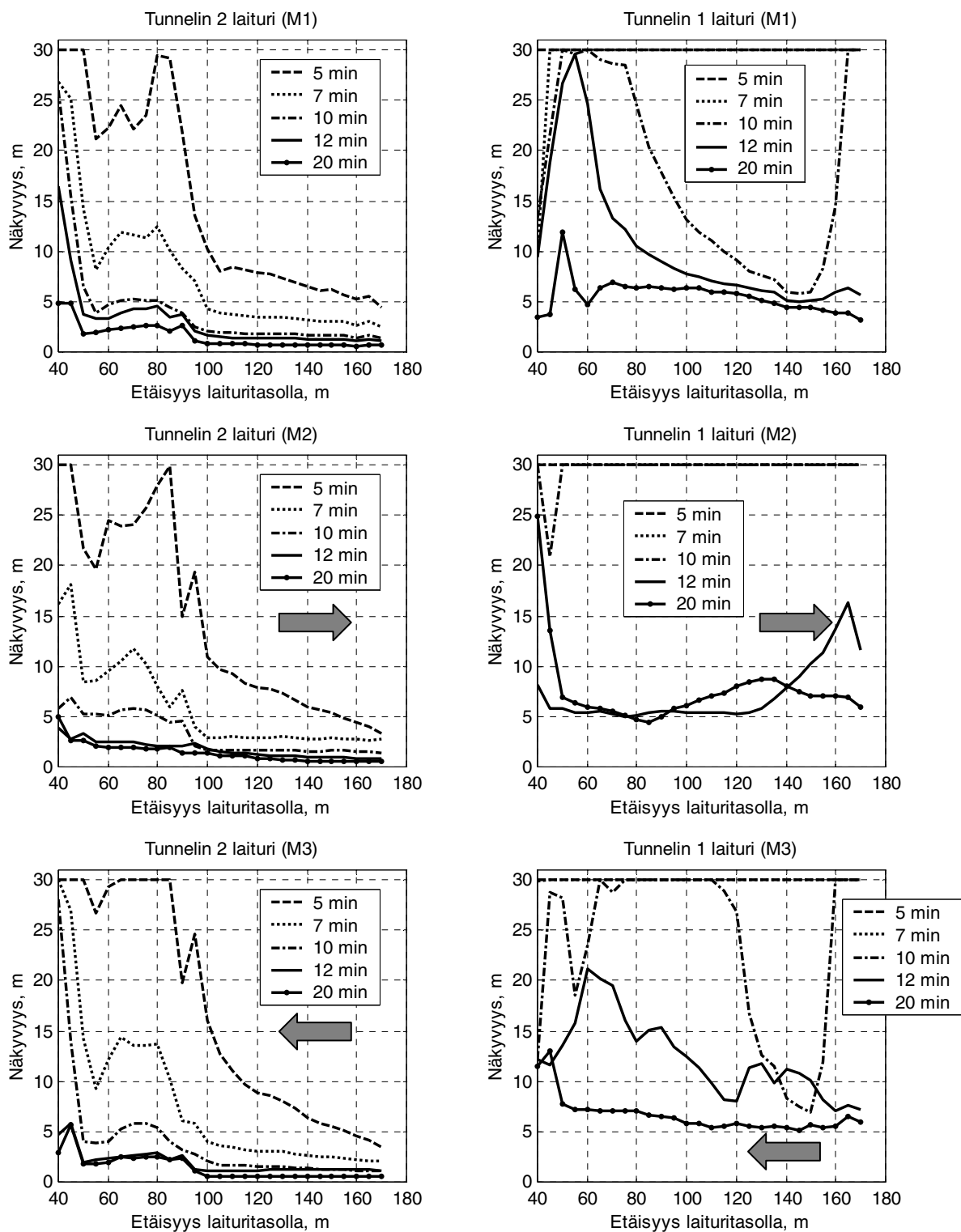
Metrovaunupalojen tulosten käsittelyssä on noudatettu samaa analysointitapaa kuin kaapelipalojen osalta. Kuvassa 56 esitetään simulointitulokset tapauksista M1–M3. Savunmuodostus ja sen kuljettuminen on huomattavasti nopeampaa kuin kaapelipaloissa, koska metrovaunupalossa paloteho on selvästi suurempi.

Simulointitapauksessa M1 on näytetty, kuinka savu leviää ja näkyvyys laskee tunnelin 2 laiturilla jo noin 5 minuutin kohdalla huomattavan alas. Näkyvyys on heikointa juuri siinä suunnassa, jossa laiturin uloskäytävä sijaitsee ( $x = 160$  m).

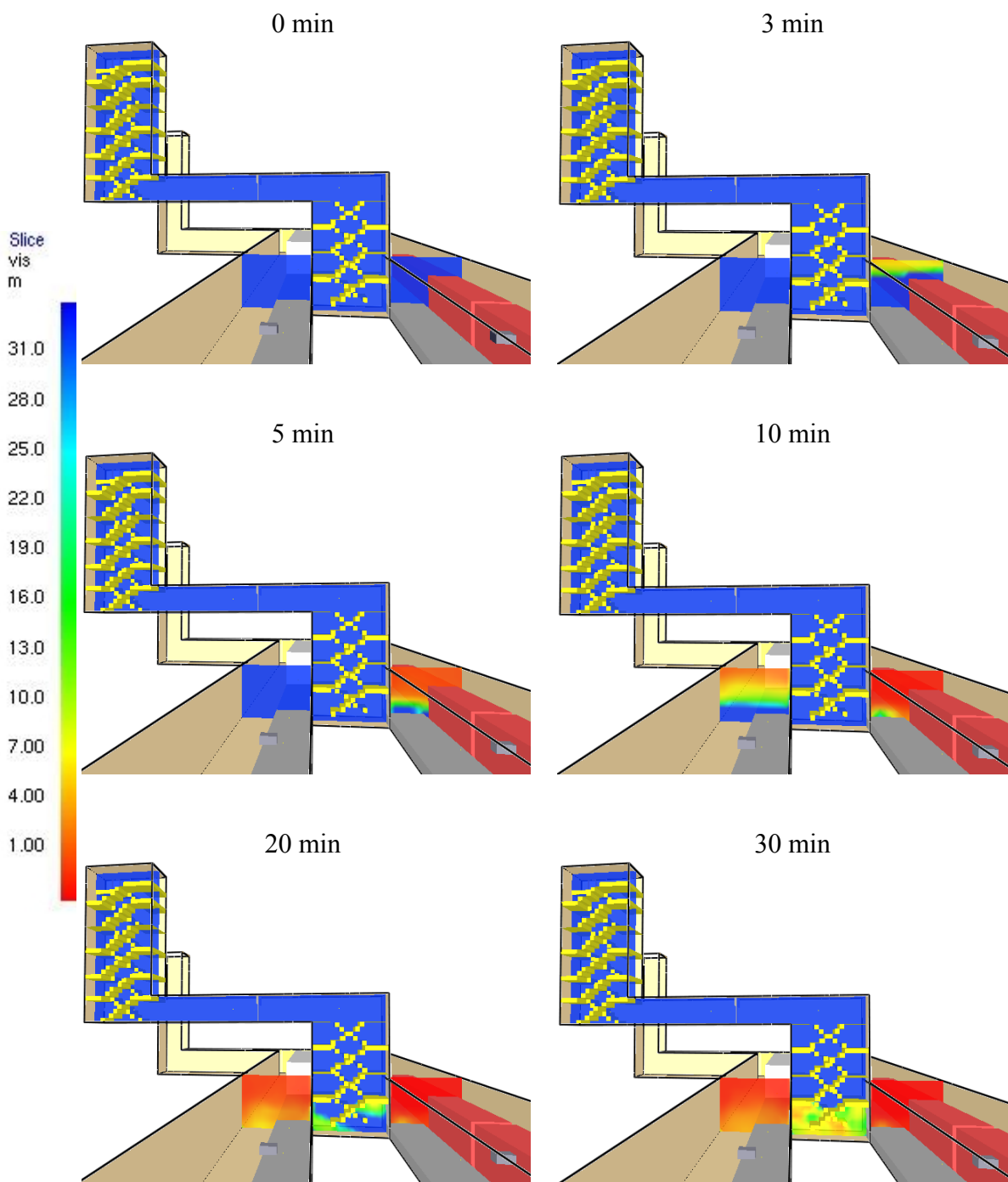
Tarkasteltaessa tunnelin 2 laituria keskenään tapauksissa M1, M2 ja M3 havaitaan, ettei savunpoistolla ole merkitystä. Molempien savunpoistosuuntien luoma näkyvyys eri hetkinä muistuttaa hyvin paljon tapausta M1, jossa ei ole savunpoistoa lainkaan.

Tunnelin 1 laiturilla näkyvyys on vielä hyvä 7 minuutin kohdalla, mutta savupatja heikentää näkyvyyttä noin 10 minuutin kohdalla, minkä jälkeen tilanne muistuttaa kaikissa tapauksissa (M1, M2 ja M3) tunnelin 2 laituria.

Tunnelin 2 laiturin metrovaunupaloskenaarioista (M1, M2 ja M3) voidaan havaita, että näkyvyys heikkenee enemmän laiturin pohjoissuunnassa kuin eteläsuunnassa. Tämä johtuu siitä, että palosta syntyvä lämmin ilma kulkeutuu ylemmälle lippuhallitasolle laiturien eteläsuunnassa olevien liukuportaiden kautta ja kuljettaa samalla savua mukanaan eikä näin pääse kasaantumaan koko laiturin korkeudelta. Kuvasta 57 nähdään eräs kiinnostava yksityiskohta: simulointitapauksessa M1 savu ei kulkeudu laituritason uloskäytävän sisällä ensimmäistä porrastasannetta korkeammalle, koska vastakkaisuuntainen ilmavirta (osa palon korvausilmasta) tulee tätä kautta laituritasolle. Uloskäytävän ovet ovat simuloinnissa avoinna laituritasolta poistuvien ihmisten vuoksi.



Kuva 56. Savun leviäminen ja savunpoistotapahtuma simuloinneissa M1, M2 ja M3. Paloskenaariona metrovaunupalo kohdassa  $x = 90$  m. Ylimmissä kuvissa ei ole savunpoistoa. Alemmissä kuvissa savunpoisto tapahtuu nuolen osoittamassa suunnassa.

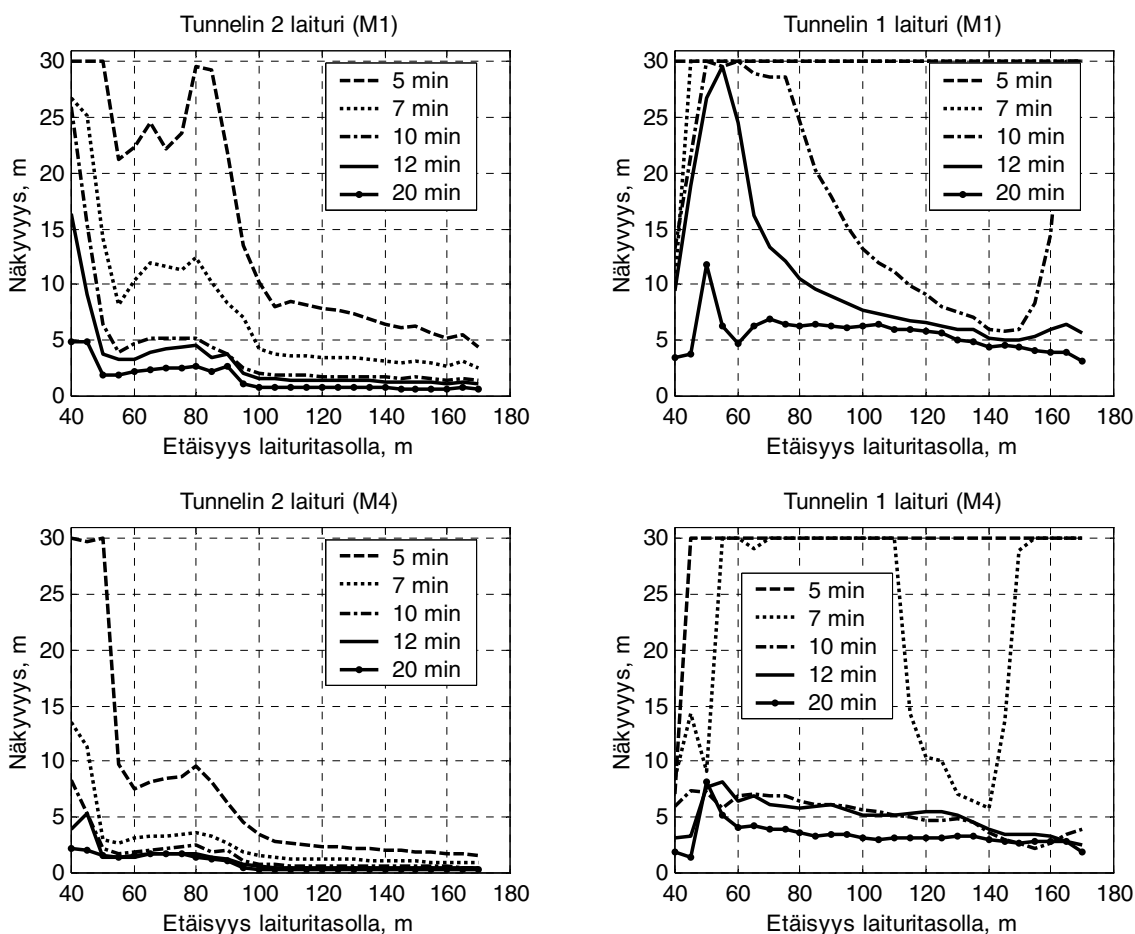


*Kuva 57. Metrovaununpalo laituritasolla tapauksessa M1. Kuvassa tarkastellaan näkyvyyttä laituritason uloskäytävässä eri hetkinä. Kuvan vieressä väriasteikko, joka ilmaisee tason ( $x = 160\text{ m}$ ) näkyvyyden metreinä.*



#### 4.4.3.3 Metrovaunupalo 38 MW

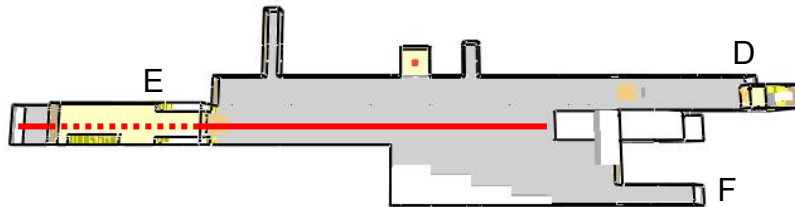
Kuvassa 58 tarkastellaan paloteholtaan suuremman metrovaunupalon (38 MW) vaikutusta laiturien näkyvyyteen. Vertailussa on käytetty tapausta M1, jossa maksimipaloteho on 15 MW. Tapaukset M1 ja M4 eroavat toisistaan vain maksimipalotehon suhteen. Tuloksista havaitaan, että tapauksessa M4 tunnelin 2 laituria peittyy 5 minuutin kuluessa savunpatjan alle myös laiturin eteläpäästä, joka tapauksessa M1 on vielä lähes kirkas ensimmäisen 40 metrin matkalta. Tunnelin 1 laiturilla ero voidaan huomata 10 minuutin kohdalla, sillä tapauksessa M1 laiturin eteläosa on jälleen kirkas, kun tapauksessa M4 koko tunnelin 1 laituria on savunpatjan alla. Voidaan sanoa karkeasti, että tunnelin 1 laiturilla tapaus M4 aiheuttaa samankaltaisen tilanteen 7 minuutissa, kuin mitä se on 10 minuutissa tapauksessa M1.



Kuva 58. Metrovaunupalo simulointitapauksissa M1 (paloteho 15 MW) ja M4 (paloteho 38 MW). Tapauksissa ei ole savunpoistoa. Kuvassa tarkastellaan näkyvyyttä laitureilla eri hetkinä palon syttymisestä. Palon sijainti kohdassa  $x = 90$  m.

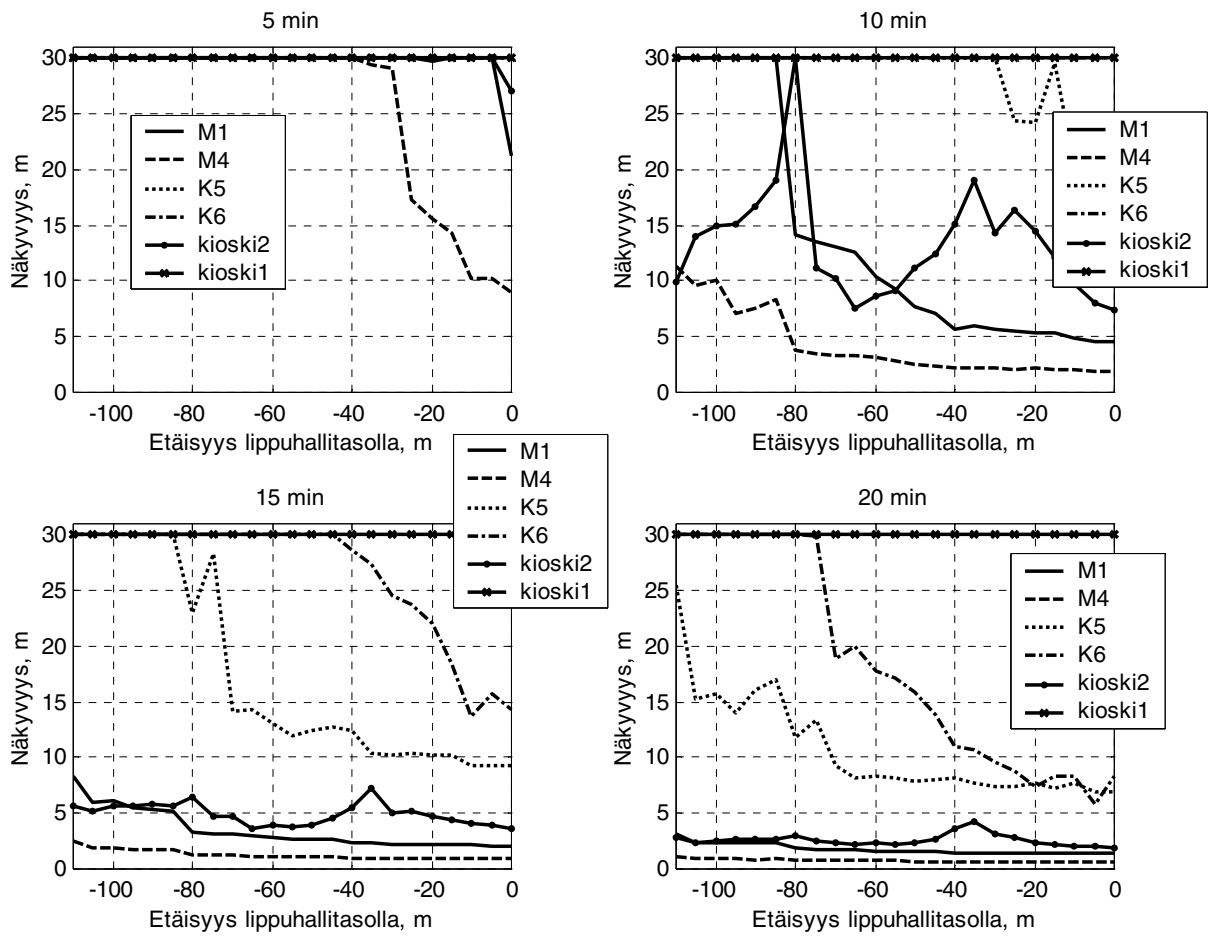
#### 4.4.3.4 Paloskenaarioiden vaikutus lippuhallitasolla

Lippuhallitason näkyvyyttä tarkastellaan kuvan 59 mukaisesti lippuhallitason keskilinjalta x-suunnassa välillä  $x = -110-0$  m korkeudella 1,5 m.



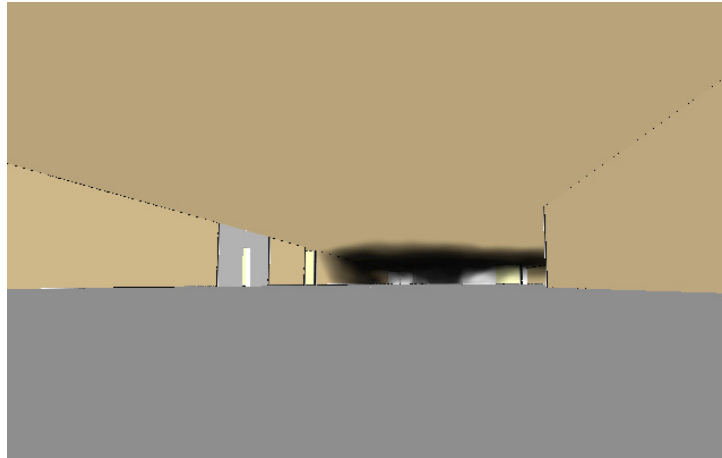
*Kuva 59. Näkyvyys-suureen tarkastelulinja (punainen viiva) metroaseman palosimuloinneissa lippuhallitasolla.*

Kuvassa 60 esitetään näkyvyys lippuhallitasolla eri simulointitapauksissa, joihin ei ole liitetty savunpoistoa mukaan. Tuloksista nähdään, kuinka savu on noussut metrovaunupalotapauksissa M1 ja M4 jo 5 minuutin kuluessa liukuportaita pitkin ja on näin saavuttanut lippuhallitason. 10 minuutin kohdalla tapaus M4 on peittänyt alleen koko lippuhallitason. Tapaukset kioski2 ja M1 muistuttavat muina hetkinä hyvin paljon toisiaan – niissä lippuhallitaso täyttyy nopeasti savusta. Kaapelipalojen K5 ja K6 välinen ero johtuu palon sijainnista, joka tapauksessa K5 on  $x = 40$  m ja tapauksessa K6  $x = 170$  m. Tapauksessa kioski1, jossa sprinklerit pienentävät palotehoa, ei savua muodostu niin paljoa, että näkyvyys heikkenisi. Kuvassa 61 esitetään, kuinka savupatja liikkuu lippuhallitasolla ja heikentää näkyvyyttä laituritason metrovaunupalossa.



Kuva 60. Savun leviäminen lippuhallitasolla metroaseman paloskenaarioissa eri hetkinä. Savunpoisto ei ole päällä. Kohdassa  $x = 0$  m alkavat liukuportaat laituritasolle ja kohdassa  $x = -29$  m sijaitsee kioskipalo. Näkyvyys on mitattu lippuhallitason keskilinjalta.

4 min



7 min



9 min

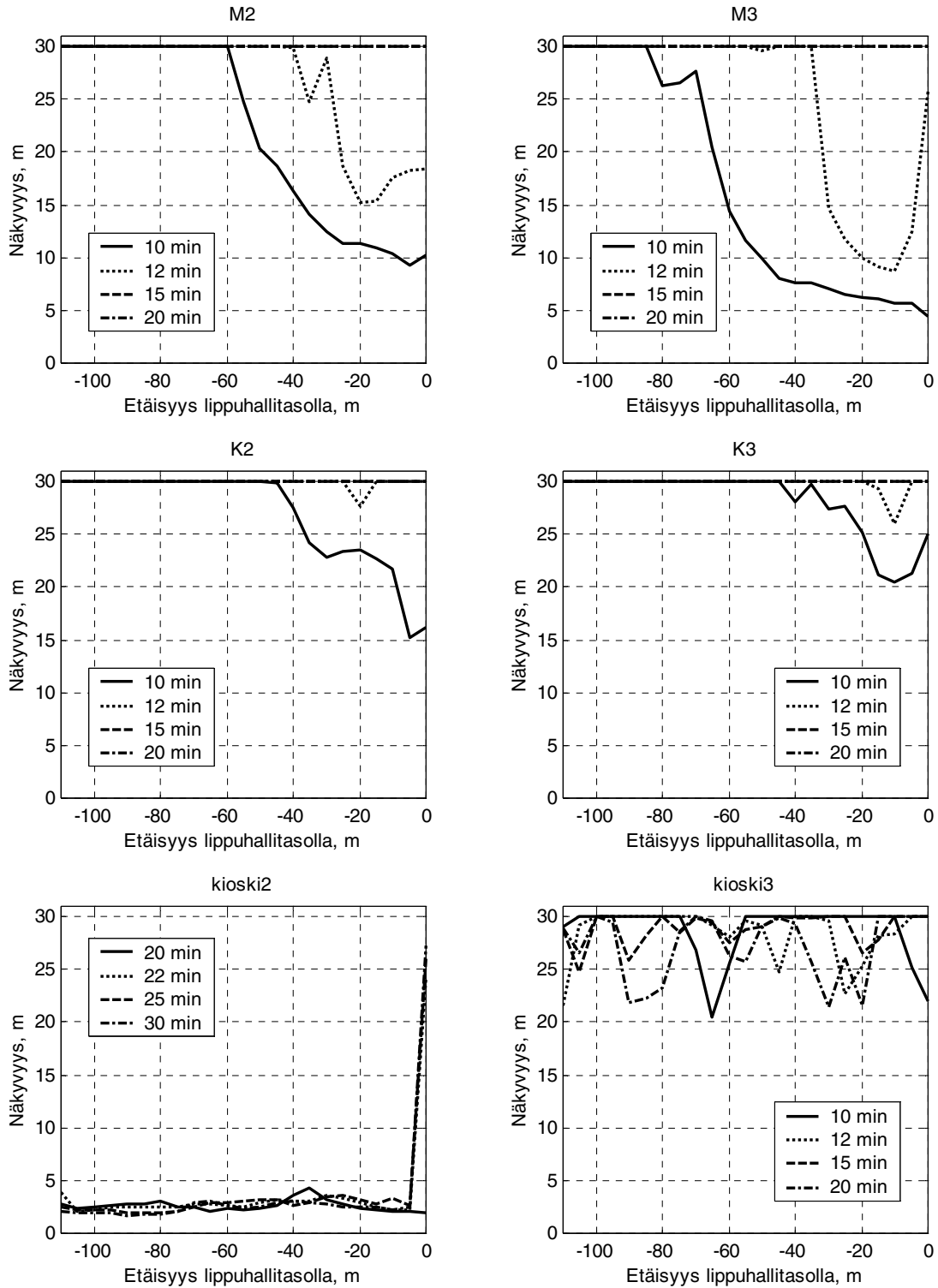


*Kuva 61. Näkyvyyden heikkeneminen lippuhallitasolla metrovaunupalossa M1 eri ajan-kohtina. Tilannetta katsotaan 50 metrin etäisyydeltä liukuportaikon yläpäästä.*

Kuvassa 62 tarkastellaan lippuhallitasoa savunpoiston tehokkuuden suhteen. Aikaväleinä on tarkasteltu savunpoiston aloittamishetkeä sekä hetkiä +2, +5 ja +10 minuuttia savunpoiston aloittamisen jälkeen. Tapauksessa kioski2 savunpoisto on aloitettu hetkellä 20 min, kun muissa aloittamishetki on ollut 10 min. Tuloksista havaitaan, että savunpoisto toimii tehokkaasti lippuhallitasolla (ja myös liukuportaissa) silloin, kun palon

sijainti on alemmalla laituritasolla. Lippuhallitasolla näkyvyys on normaali 5 minuutissa savunpoiston kytkemisestä tapauksissa M2, M3, K2 ja K3. Kioskipalojen osalta savunpoisto ei kykene parantamaan näkyvyyttä lippuhallitasolla lukuun ottamatta poistumistietä D (liite B), jossa savunpoiston ilmavirtaus ohjautuu viereisestä savunpoistoluukusta ulos.

Kuvasta 62 nähdään samalla ero savunkuljettumisnopeuksissa (tapaukset M2 ja M3), joissa luonnollisen ilmavirtauksen suuruus (0,2 m/s) vaikuttaa eri suuntiin laituritasolla. Pohjois-eteläsuunnassa tapahtuva ilmavirtaus työntää savua luonnollisesti paljon nopeammin etelän suunnassa olevalle lippuhallitasolle kuin etelä-pohjoissuunnassa tapahtuva ilmavirtaus.



Kuva 62. Metroaseman paloskenaarioiden vaikutus lippuhallitasolla. Savunpoisto on käynnistetty hetkellä 10 min, paitsi "kioski2"-tapauksessa, jossa käynnistysaika on 20 min.

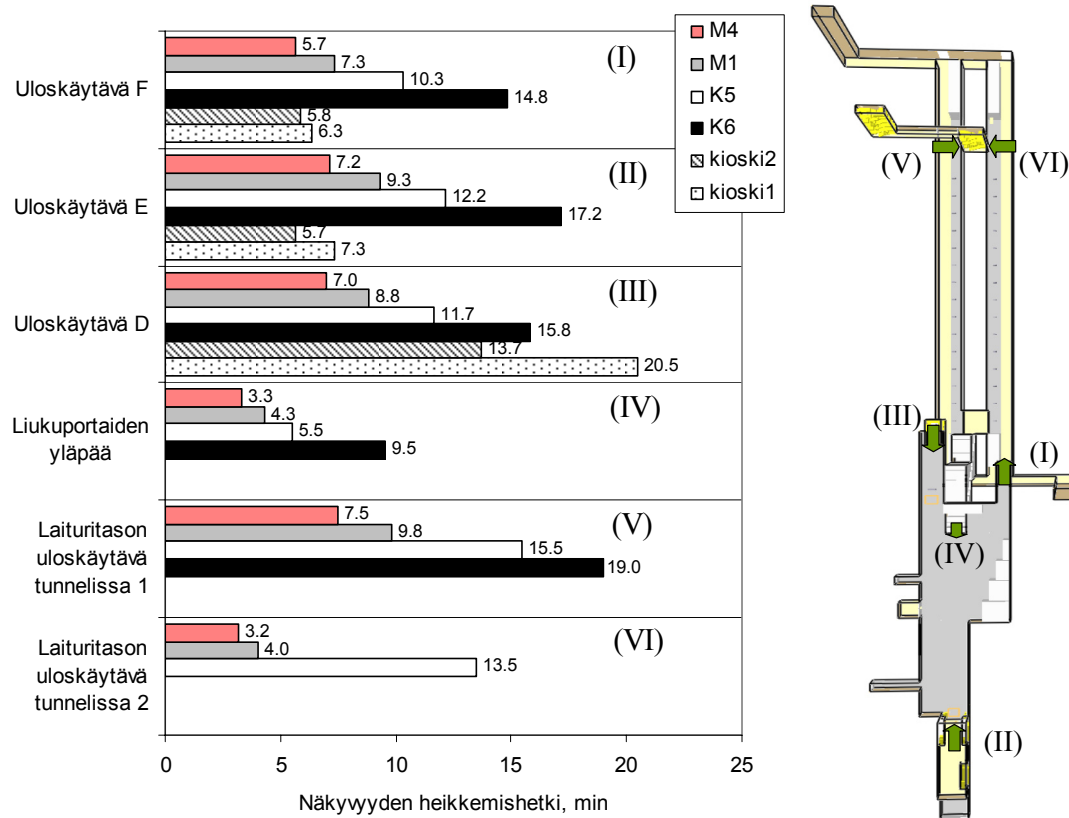
#### 4.4.3.5 Näkyvyyden heikkeneminen eri tarkastelupisteissä

Vertailtaessa eri paloskenaarioiden vakavuutta savun leviämisenopeuden suhteen metroasemalla on seuraavassa tarkasteltu ihmisten poistumisen kannalta tärkeitä reittejä (kuvan 19 mukaan), joihin savun kulkeutumisella on suuri merkitys. Tunnelien 1 ja 2 laituritasojen uloskäytävien tarkastelupisteet ovat kohdassa  $x = 160$  m 1,5 metrin korkeudella laituritasosta. Lippuhallitasolla uloskäytävän F tarkastelupiste on kohdassa  $x = 27$  m myös 1,5 metrin korkeudella lippuhallitasosta, mutta uloskäytävien E ja D tarkastelupisteet ovat katutasolla 1,5 metrin korkeudella. Lippuhallitason ja katutason korkeusero on noin 5 metriä.

Kuvassa 63 esitetään, kuinka savu on kulkeutunut eri tarkastelupisteisiin metroasemalla ja heikentänyt näkyvyyttä perustasosta tiettyinä hetkenä. Havaitaan, että savu kulkeutuu metroaseman tarkastelupaikkoihin selvästi nopeimmin metrovaunupalojen M1 ja M4 tapauksissa. Tapahtuma on noin 2–3 kertaa nopeampi kuin esimerkiksi kaapelipalossa K6.

Laituritasoa tarkasteltaessa huomataan, että näkyvyys laiturin uloskäytävän edessä tunnelissa 2 heikkenee tapauksessa M4 noin 7,5 minuutissa ja tapauksessa M1 noin 10 minuutissa. Vastaavat ajat tunnelin 2 osalta ovat noin 3 min ja 4 min. Tunnelin 1 kautta tapahtuvassa poistumisessa laituritason uloskäytävää pitkin maantasolle on siis noin 2 kertaa enemmän aikaa kuin tunnelin 2 kautta tapahtuvassa poistumisessa, mikäli palo havaitaan samanaikaisesti molemmilla laitureilla. Tilanne olisi luonnollisesti päinvastainen, mikäli palo sijaitisi tunnelissa 1.

Näkyvyyden heikkenemishetki liukuportaiden yläpäässä on eräänlainen nollakohta lippuhallitason savun täyttymiselle. Kuvasta 63 huomataan, että kaapelipalossa K5 ja metrovaunupaloissa M1 ja M4 ero liukuportaiden yläpään näkyvyyden heikkenemishetkelle ei ole kovin suuri. Lippuhallitason savun täyttymisen nopeudesta saa käsityksen vertailemalla esimerkiksi näkyvyyden heikkenemishetkiä liukuportaiden yläpään ja uloskäytävän E välillä. Tämän välin (n. 90 m) savu etenee noin 4–5 minuutissa metrovaunupalojen osalta ja noin 7 minuutissa tapauksessa K5. Nähdään myös, että savun leviämisen erot kaapelipalojen ja metrovaunupalojen välillä uloskäytävien D, E ja F osalta pysyvät jokseenkin vakioina. Kioskipalot kioski1 ja kioski2 täyttävät savulla ensimmäisinä uloskäytävät E ja F mutta eivät uloskäytävää D.



Kuva 63. Metroaseman paloskenaarioista analysoidut näkyvyyden heikkenemishetket (aika, jolloin näkyvyys < 30 m) eri tarkastelupisteissä, jotka osoitettu vihrein nuolin ja numeroin oikeassa kuvassa. Tapaukset, joissa vaakapalkkia ei ole näkyvissä, tarkoittavat, ettei kyseisessä kohdassa näkyvyys ole heikentynyt simuloinnin kuluessa.

#### 4.4.3.6 Metroaseman palosimulointitulosten tarkastelua

Savunpoistolla pyritään ensisijaisesti luomaan palomiesten toimintaedellytykset ja saavuttamaan näin hyvä näkyvyys lähestyttäessä esim. palavaa kohdetta. Metroaseman palosimuloinneista saadut tulokset osoittavat, että savunpoisto laituritasolla ei ole riittävän tehokasta tai sillä ei ole vaikutusta, kun paloteho on suuri. Näin käy esimerkiksi metrovaunupalojen osalta. Palon sijainti suhteessa savunpoiston suuntaan vaikuttaa myös savunpoiston onnistumiseen, sillä palon sijainti aivan savunpoiston alkupäässä vain sekoittaa savua ja heikentää näin näkyvyyttä. Lippuhallitason savunpoistolla saatiin aikaan hyvä näkyvyys silloin, kun palo sijaitti alemmalla laituritasolla. Palon sijaitessa lippuhallitasolla savunpoisto ei ollut riittävän tehokasta, kun paloteho oli suuri (tapaus kioski2).

Simuloinneissa savunpoiston aloitus on tapahtunut hetkellä 10 min. Todellisuudessa savunpoiston käynnistäminen metroasemalla voi kestää jopa 30 min. Esimerkiksi kaapelipalojen tapauksissa savu olisi laituritasolla 30 min:n kuluessa peittänyt suurimman



osan alleen, jolloin savunpoiston toimintamahdollisuudet tässä vaiheessa heikkenevät. Tällöin savunpoiston aloitusajankohta voi nousta ratkaisijaksi tietyissä tapauksissa.

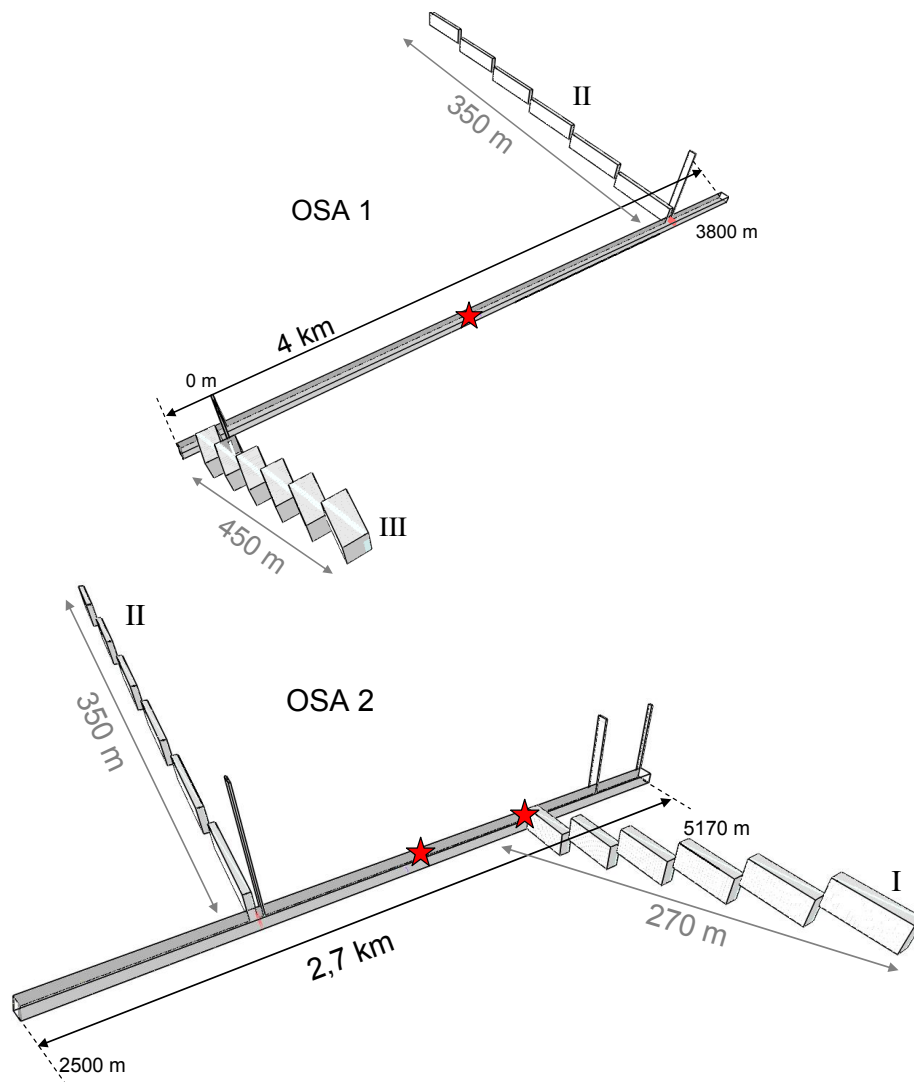
Metroaseman palosimuloinneissa ei ole otettu huomioon kuiva-asennettuja sprinklereitä, jotka sijaitsevat lippuhallitasolla sekä liukuportaikossa. Liukuportaikon sprinklereiden laukeamislämpötila 68 °C saavutetaan metrovaunupalon M4 tapauksessa noin 10 minuutissa ja tapauksessa M1 noin 15 minuutissa. Kioskipalon (kioski2) tapauksessa lippuhallin katon lämpötila on riittävä noin 3 minuutissa aiheuttamaan sprinklerijärjestelmän laukeamisen. Lauenneet sprinklerit vähentävät näkyvyyttä ja sekoittavat lisää savua (vertaa kohta 4.3.3.2) mutta myös hillitsevät palon kehittymistä sekä jäähdyttävät kuumia kaasuja. Palon hillitseminen esimerkiksi tapauksessa kioski3 osoittautui hyödylliseksi, sillä pienestä palosta syntyi selvästi vähemmän näkyvyyttä heikentävää savua.

Simuloinneissa pintojen näkyvyyden oletetaan heikentyvän pelkästään nokihiukkasten takia, mutta simuloinneissa ei huomioida sitä, että todellisuudessa hitaasti laskeutuva savupatja voi peittää katossa sijaitsevat valaisimet ja heikentää ympäristön valaistusta jo ennen kuin savua välttämättä havaitaan alempana. Tällöin syntyvä tilanne hankaloittaa entisestään ihmisten poistumista ja pelastamista.

## 4.5 Yhteiskäyttötunneli

### 4.5.1 Simulointimalli

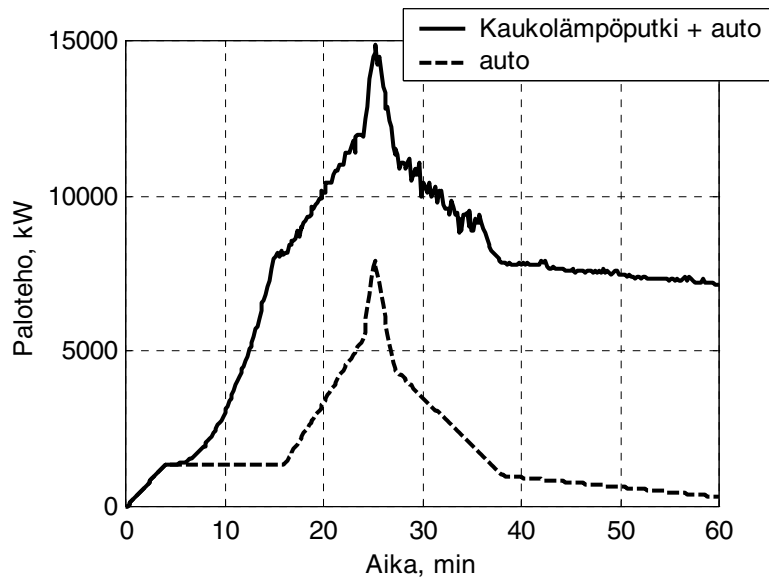
Yhteiskäyttötunnelin alustavissa simuloinneissa havaittiin, ettei tunnelin palosimulointeihin tarvinnut käyttää koko tunnelin pituutta, sillä noin 60 minuutin simuloinneissa käytetyillä paloskenaarioilla savu ei ehtinyt levittäytyä läheskään koko tunnelin matkalle. Näin ollen simulointien nopeuttamiseksi tunnelista muodostettiin kaksi erillistä osaa kuvan 64 mukaisesti.



Kuva 64. Yhteiskäyttötunnelin simulointimallin osa 1 (ylhäällä) ja osa 2 (alhaalla). Kuvaa on skaalattu tunnelin pituussuunnassa tekijällä 0,1. Ajotunnelit numeroitu kuten kuvassa 26. Palojen syttymiskohdat merkitty tähdillä. Ajotunnelien kaltevuus on 1:7.

## 4.5.2 Paloskenaariot

Yhteiskäyttötunnelin paloskenaariot valittiin paikan ja savunpoistotaktiikan suhteen taulukossa 9 esitetyllä tavalla. Palosimuloinneissa Y11–Y22 kokonaispaloteho on saatu 2 metrin matkalla palavan kaukolämpöputken ja auton yhteisenä palotehona. Näin ollen luvun 3.5.1 esitetty palotehoarvio kaukolämpöputkelle on kaksinkertainen. Simulointien palotehokäyrät ovat kuvassa 65.



*Kuva 65. Yhteiskäyttötunnelin palosimuloinneissa käytetyt palotehokäyrät. Yhtenäisellä viivalla on esitetty kaukolämpöputken ja auton synnyttämä yhteinen paloteho sekä katkoviivalla yksittäisen auton synnyttämä palotehokäyrä.*

Taulukko 9. Yhteiskäyttötunnelin simulointeihin käytetyt paloskenaariot.

Simulointi	Tunnelin osa	Palokuorma	Palon sijainti	Etäisyys lähimpiin savuilmaisimiin	Savunpoiston aloitusajankohta	Savunpoiston suunta
Y11	osa 1	KLP <sup>a</sup> + auto	x = 1 563 m <sup>b</sup>	1 680 m	50 min	II → III <sup>e</sup>
Y12	osa 1	KLP + auto	x = 1 563 m	1 680 m	30 min	II → III
Y21	osa 2	KLP + auto	x = 3 833 m <sup>c</sup>	600 m	30 min	II → I
Y22	osa 2	KLP + auto	x = 3 833 m	600 m	30 min	I → II
Y23	osa 2	auto	x = 4 425 m <sup>d</sup>	0 m	–	–

<sup>a)</sup> KLP = kaukolämpöputki.

<sup>b)</sup> Palon sijainti tunnelissa puolivälissä ajotunnelien III ja II risteyskohtia (tunnelin alkukohta 0 m ajotunnelin III suunnassa).

<sup>c)</sup> Palon sijainti tunnelissa puolivälissä ajotunnelien II ja I risteyskohtia.

<sup>d)</sup> Palon sijainti tunnelissa ajotunnelin I risteyskohdassa.

<sup>e)</sup> Merkinnän ensimmäinen numero viittaa ajotunnelin numeroon, josta puhalletaan tunnelin sisään kohti toista ajotunnelia (jälkimmäinen numero).

Simuloinneissa käytetty polyuretaanin paloreaktiota, jossa noen tuotto on 10 %.

### 4.5.3 Savunpoisto

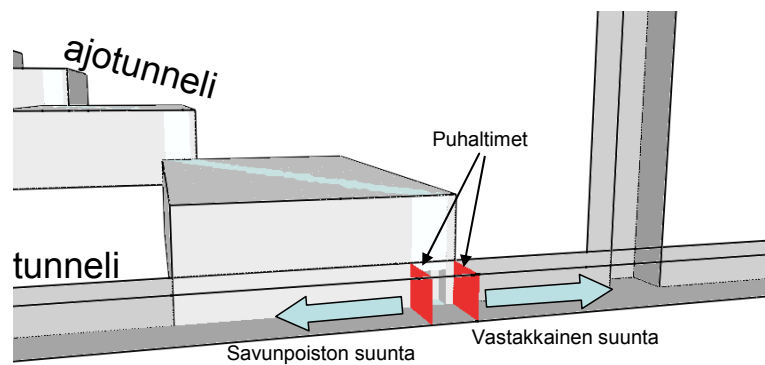
Savunpoiston mallinnuksessa käytettiin esitietoja Helsingin pelastuslaitoksen tekemästä kokeesta, jossa yhteiskäyttötunneliin puhallettiin liikuteltavalla puhaltimella ilmaa kuvan 26 ja taulukon 9 mukaisesti eri suunnilta. Savunpoiston aikaisessa koetilanteessa (ilmavirran jakauduttua) ilmavirran suuruus mitattiin noin 2 metrin korkeudelta keskeltä tunnelia ajotunnelin ja varsinaisen tunnelin risteyskohtien molemmin puolin. Tällä tiedolla pystyttiin simulointeihin asettamaan vastaavansuuruiset puhaltimet (kuva 66) tunnelin sisälle ja puhaltamaan niillä eri suuntiin, aivan kuten koetilanteessa. Taulukossa 10 esitetään koetilanteen tulokset.

Taulukko 10. Yhteiskäyttötunnelin savunpoistokokeen tulokset.

Savunpoiston suunta	Ilmavirran nopeus savunpoistosuuntaan	Ilmavirran nopeus vastakkaiseen suuntaan
II → III <sup>a</sup>	2,6 m/s	0,4 m/s
II → I	2,8 m/s	0,6 m/s
I → II	3,2 m/s	0,1 m/s

<sup>a)</sup> Merkinnän ensimmäinen numero viittaa ajotunnelin numeroon, josta puhalletaan tunnelin sisään kohti toista ajotunnelia (jälkimmäinen numero).

Puhaltimesta tuleva ilmavirran suuruus ajotunnelin yläpäässä oli 36 m/s.



Kuva 66. Esimerkkitapaus savunpoiston toteuttamisesta yhteiskäyttötunnelin palosimuloinneissa.

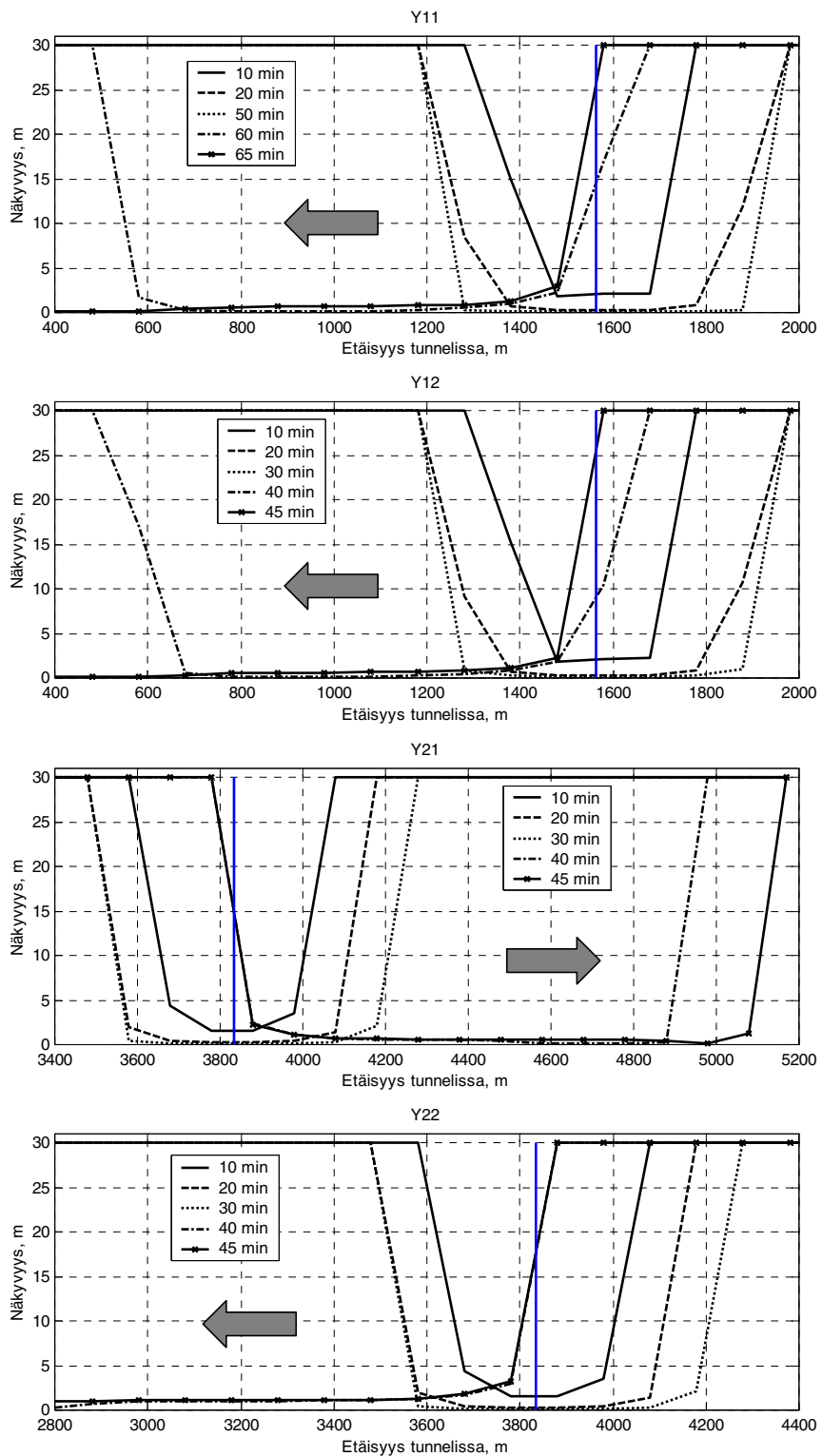
#### 4.5.4 Tulokset

Yhteiskäyttötunnelien palosimuloinnit esitetään kuvassa 67. Tuloksista havaitaan, ettei savupatja etene enää tunnelissa n. 30 minuutin jälkeen käytetyllä paloteholla (vrt. tapaukset Y11 ja Y12), kun palo sijaitsee tunnelissa puolivälissä tunnelin risteysalueita.

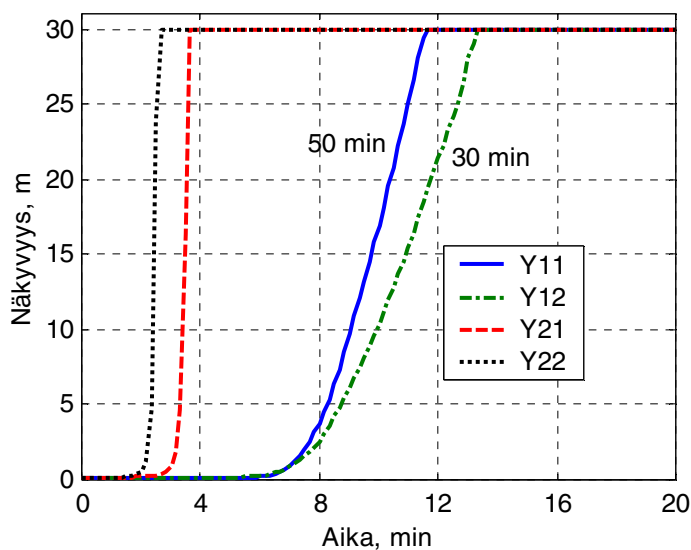
Palosta lähtevä savupatja ulottuu noin 400–500 metrin päähän palosta. Tästä seuraa olennaisin tulos: savupatjan leviäminen ei aiheuttaisi tositilanteessa automaattista hälytystä tunneliverkostossa kyseisissä tapauksissa, koska palo ei etene risteysalueille, joissa savuilmaisimet sijaitsevat. Tämän vuoksi simuloinneissa savunpoiston aloitus on käynnistetty 30 minuutin kohdalla, sen jälkeen, kun savupatjan liike on pysähtynyt. Savupatjan liike on nopeinta siinä vaiheessa, jossa paloteho kasvaa. Lopulta jäljellä on kauko-ämpöputken aiheuttama paloteho, joka ei siis riitä levittämään savua.

Itse savunpoisto toimii tehokkaasti, ja savunpoiston kytkemisen jälkeen savupatja poistuu nopeasti haluttuun suuntaan. Savunpoiston ajallista kestoa tarkastellaan kuvassa 68, jossa seurataan palopaikan läheistä kohtaa ja sen näkyvyyttä ajan funktiona. Kuvasta 68 havaitaan, että tunnelin lyhyemmässä osassa tunnelista saadaan poistettua savu noin 2–4 minuutin kuluttua (tapaukset Y11 ja Y12) ja tunnelin pidemmässä osassa 11–13 minuutissa savunpoiston aloittamisesta (tapaukset Y21 ja Y22). Savunpoiston nopeus ei juuri poikkea puhaltimen antamasta ilmavirran lähtönopeudesta. Tapauksien Y21 ja Y22 ero kuvassa 68, käytettäessä samaa savunpoiston puhallusnopeutta, johtuu palon kehitysvaiheesta, jolloin 30 min:n aikana palosta syntyvä vastakkaisuuntainen ilmavirtaus on suurempi kuin 50 min:n kohdalla.

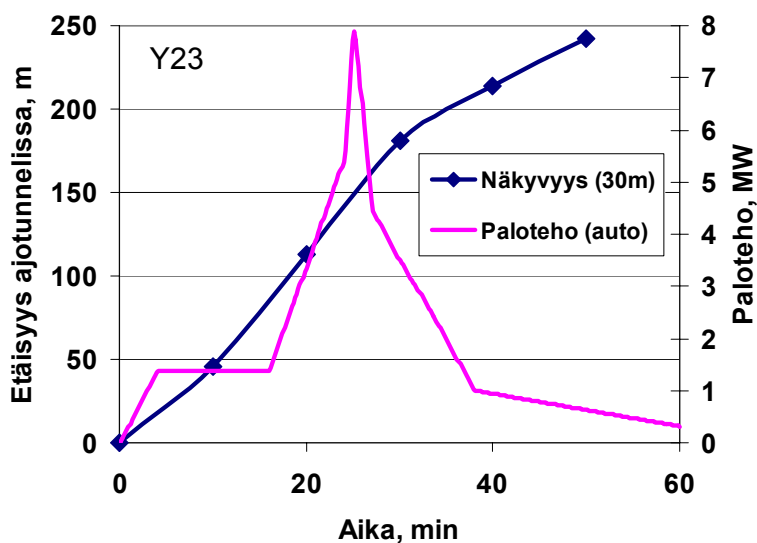
Simulointitapauksessa Y23 on tarkasteltu yksittäisen autopalon aiheuttamaa savun leviämistä ajotunnelissa I. Palo sijaitsee varsinaisen tunnelin ja ajotunnelin I risteyskohdassa. Tulokset esitetään kuvassa 69. Tuloksista havaitaan, että savu leviää noin 50 minuutissa kauttaaltaan koko ajotunneliin. Savun leviämistä on tarkasteltu hetkellä, jolloin näkyvyys heikkenee arvosta 30 m. Savun leviäminen on lineaarista aina 30 minuuttiin saakka, kunnes se hidastuu autosta syntyvän palotehon hiipuesssa.



Kuva 67. Yhteiskäyttötunnelin palosimulointien tulokset tapauksissa Y11, Y12, Y21 ja Y22. Ylimmässä kuvassa savunpoisto on käynnistetty hetkellä 50 min ja muissa hetkellä 30 min. Nuoli kuvaa savunpoistosuuntaa tunneliin nähden. Poikkiviiva kuvaa palon sijaintia.



Kuva 68. Näkyvyys palopaikan vieressä eri paloskenaarioissa sen jälkeen, kun savunpoisto on kytketty päälle hetkellä 0 min. Merkinnit 50 min ja 30 min kuvaavat savunpoiston aloittamisaikaa.



Kuva 69. Näkyvyyden heikentyminen yhteiskäyttötunnelin ajotunnelissa I simulointitapauksessa Y23. Kuvassa näkyvyyttä tarkasteltu hetkellä  $V \leq 30$  m. Toisella pystyakselilla kuvattu samanaikaista auton palotehoa.



## 5. Poistuminen maanalaisista tiloista<sup>2)</sup>

### 5.1 Yleistä poistumisesta palotilanteessa

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. 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 paremmin optimoituja poistumisjärjestelyjä. Analyyttisten menetelmien periaatteena on poistumiseen käytettävissä olevan ajan vertaaminen rakennuskohteen kustakin tilasta poistumiseen kuluvaan aikaan. Analyyttisillä 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 hetkenä verrataan jokaisen henkilön sijaintikohdassa vallitsevia olosuhteita (lämpötilaa, lämpösäteilyä, näkyvyyttä, kaasupitoisuuksia) kriitti-

---

<sup>2)</sup> Tämä luku on lyhennelmä tutkimushankkeen poistumisturvallisuutta koskevan osatehtävän raportista (Weckman 2005).

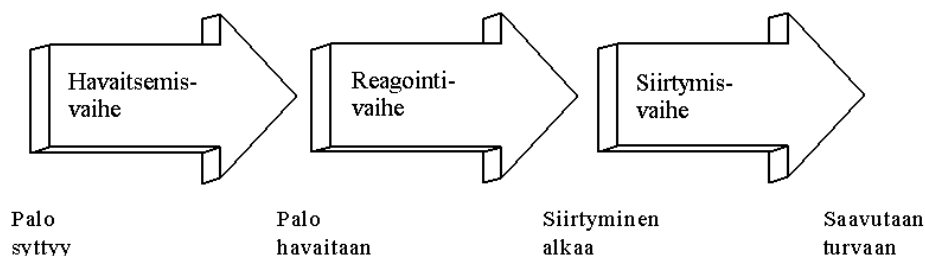
siksi tunnettuihin raja-arvoihin. Nämä kriittiset arvot voivat vastata tajuttomuuteen tai kuolemaan johtavia arvoja.

## 5.2 Poistumisen mitoittamisen yleisperiaatteita

Mitoituksen kannalta poistumisen katsotaan alkavan sillä hetkellä, kun palo syttyy, ja päättyvän sillä hetkellä, kun tilassa olevat henkilöt ovat päässeet turvaan. Mallitarkaste-  
luja 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 70 esittää yksinkertaisen kaaviokuvan poistumisen eri vaiheista.



*Kuva 70. Poistumisen vaiheet.*

Havaitsemisvaiheen pituus voidaan yleensä arvioida palonkehittymismallien avulla. Erityisesti mikäli rakennus on varustettu automaattisin paloilmalaittein, 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.

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. Havaitsemisvaihe jaetaan usein kahteen osaan, joista ensimmäinen alkaa palon syttymisestä ja päättyy paloilmasisimen tai vastaavan järjestelmän havaitessa tulipalon. Jälkimmäinen osa alkaa palon ilmaisusta ja päättyy hälytyksen antamiseen. Myös reagoitivaihe voidaan jakaa varsinaiseen reagoitivaiheeseen ja poistumisen valmisteluun. Näiden vaiheiden välinen raja on henkilön päätös poistua rakennuksesta.

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 varsinainen 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 oviaukon ruuhkautuminen. 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 mitoituspallolle rakennuksen kussakin tilassa kriittisten olosuhteiden syntymiseen kuluva aika sekä vastaava poistumiseen käytettävä kokonaisaika, minkä jälkeen tarkistetaan mitoitusehdosta mitoituksen riittävyys:

$$t_a + t_b + t_m \leq t_{crit} \quad (8)$$

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

Kuten johdannossa mainittiin, analyttisiä poistumisen mitoitusten menetelmiä käytettäessä poistuminen katsotaan onnistuneeksi, 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 hetkenä 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.

#### **Kuumien savukaasukerroksen paksuus**

- Olettaen, että tulipalon seurauksena tilaan muodostuu alempi kylmä ilmakerros ja ylempi kuuma kaasukerros (ns. kaksiväiyökemalli), 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

- $1 \text{ kW/m}^2$  jatkuvaa lämpösäteilyä
- $10 \text{ kW/m}^2$  enintään 4 s:n ajan
- $60 \text{ kJ/m}^2$  säteilyenergia (+  $1 \text{ kW/m}^2$  jatkuvan säteilyn tuottamaa energiaa).

#### **Lämpötila**

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

#### **Myrkylliset kaasut**

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

- hiilimonoksidi, CO:  $< [2000] \text{ ppm}$
- hiilidioksidi, CO<sub>2</sub>:  $< [5] \%$
- happi, O<sub>2</sub>:  $> [15] \%$ .

### 5.3 Ihmisten käyttäytymisestä 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 tuntea ihmisten käyttäytyminen poistumisen eri vaiheiden aikana sekä yleensä poistumiseen vaikuttavia tekijöitä.

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.

## 5.4 Maanalaisista tiloista poistumisen erityispiirteitä

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 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 epäjohdonmukaisesti. Varsinkin maanalaisia tiloja on pidetty tässä suhteessa vaarallisina. Useat tutkijat ovat kuitenkin osoittaneet, että tulipaloissa ihmiset yleensä toimivat rationaalisesti ja paniikkikäyttäytyminen on paljon luultua harvinaisempaa (Sime 1990). Canter *et al.* (1992) ovat tutkineet ihmisten käyttäytymistä Lontoossa 1987 sattuneessa Kings Cross -maanalaisaseman tulipalossa, jossa menehtyi 31 henkilöä. Myös nämä kirjoittajat pitivät paniikin syntymistä harvinaisena ilmiönä.

Proulx ja Sime (1991) ovat tutkineet poistumisen käynnistymistä maanalaisen asemalla, jossa tehtiin poistumisharjoituksia ilman, että yleisö ja pääosa henkilökunnasta olisivat ennakolta olleet tietoisia 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, vaan 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.

Shields ja Boyce (2004) ovat äskettäin esittäneet katsauksen siitä, mitä tällä hetkellä tiedetään ihmisten käyttäytymisestä maanalaisten tilojen tulipaloissa. Katsaus keskittyy erityisesti maantie- ja rautatietunneleissa tapahtuviin paloihin, mutta kirjoittajien havainnot ovat osin sovellettavissa myös muuntymisiin maanalaisiin tiloihin. Yleisarvio on, että tietoa on edelleen varsin vaatimattomasti, mikä johtuu maanalaisten 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) poistukseen 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.
- Maanalaisten tilojen suunnittelussa ei ole otettu huomioon riittävän vakavia palotilanteita.

Fraser-Mitchell ja Charters (2005) ovat laatineet kirjallisuuskatsauksen viime vuosikymmenten tunnelipaloissa osallisina olleiden ihmisten käyttäytymisestä tapausten aikana. Nämäkin tapaukset ovat muutamaa metropaloa 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.

## 5.5 Poistumisen laskenta maanalaisissa tiloissa

Liikennetunneleita koskevia poistumisen laskentamenetelmiä käsitellään lukuisissa julkaisuissa, mutta 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).

### 5.5.1 Poistumista koskevia vaatimuksia Suomen rakentamismääräyksissä

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 lukuun 10 sisältyvistä poistumista koskevista vaatimuksista tulisi erityisesti kiinnittää huomio seuraaviin, 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 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.

## 5.5.2 Esimerkkejä ulkomaisista vaatimuksista

Yhdysvaltalaisen paloalan järjestön *National Fire Protection Association*in standardi NFPA 520 (2005) koskee useimpien maanalaisen tilojen paloturvallisuutta. Standardi jakaa maanalaiset tilat kahteen pääryhmään: rakennuksiin (*buildings*) ja yleisiin alueisiin (*common spaces*). Ensimmäisillä 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  $186 \text{ m}^2/\text{hlö}$  saatava henkilömäärä. Näistä valitaan suurempi luku mitoituslaskelmien perusteeksi.
- Vaakatasossa olevan kulkureitin mitoitusleveyden tulee olla  $0,5 \text{ cm}/\text{hlö}$  ja portaissa vastaavasti  $0,8 \text{ cm}/\text{hlö}$ , 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).

### 5.5.3 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  $0,0819 \text{ hlö}/(\text{mm}\cdot\text{min})$  ja ihmisten kävelynopeutena  $37,8 \text{ m}/\text{min}$ .

- Kulkureittien tehollisen leveyden tulee portaissa, pysäytetyissä liukuportaissa ja luisissa (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.

#### 5.5.4 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:

$$v = \frac{1,5}{D} \quad (9)$$

missä  $v$  on kävelynopeus [m/s]  
 $D$  on henkilötiheys [hlö/m<sup>2</sup>].

Mallia on edellä mainituissa julkaisuissa käsitelty lähinnä kvalitatiivisella tasolla. Malli on laadittu Macintosh<sup>®</sup>-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).

### 5.5.5 Tunnelipalojen henkilöriskin arviointia koskeva menetelmä

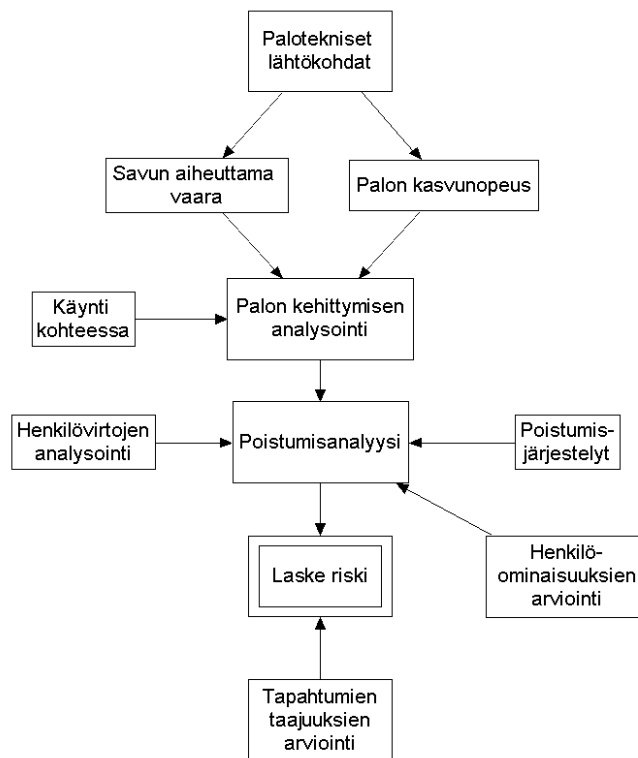
Dray *et al.* (1995) ovat esittäneet menetelmän tai metodologian *Simulation of Personnel Evacuation from Complex Spaces* (SPECS), jolla voidaan analysoida tunnelipaloihin liittyviä vaaratekijöitä ja suunniteltujen turvajärjestelyjen tehokkuutta. Kirjoittajat mainitsevat mm., että menetelmän tuottamia tuloksia voidaan käyttää kustannushyötyanalyysihin 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. Analyysin 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 kenttämallin 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 71 esittämällä tavalla ja lasketaan menetelmän mukainen henkilöriski.



Kuva 71. 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 peräisiin oleviin tutkimuksiin. Menetelmän käytettävyyttä rajoittavat analyysensä varten tarvittavien tilastotietojen puutteellisuudet.

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

## 5.6 Poistumissimuloinnit esimerkkikohteissa

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

Tutkittavista kohteista laadittiin *Simulex*-ohjelmalla tehtäviä simulointeja varten mittatarkat pohjapiirustukset kohteiden eri tasoista. Piirroksia 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 ohjelmaan tilasta laaditut DXF-muotoiset tiedostot. Seuraavaksi eri tasot (myös maanpinta) yhdistetään toisiinsa portaita, 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 eteneminen 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):

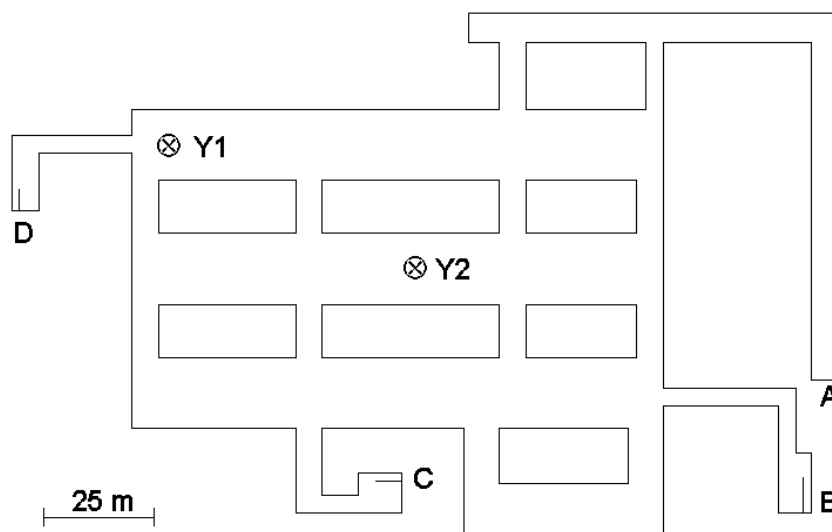
- toimistohenkilöstöä ”*Office staff*” (40 % miehiä, 30 % naisia, 30 % keskimääräisiä)
- työmatkalaisia ”*Commuters*” (30 % miehiä, 30 % naisia, 10 % lapsia, 30 % keskimääräisiä).

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.

### 5.6.1 Pysäköintitila

Tarkastelujen kohteeksi valittu väestösuoja toimii normaalioloissa noin 260 henkilöautolle tarkoitettuna pysäköintihallina. Kuvassa 72 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 hissi-kuilujen paikat. Porrashuoneet on erotettu hallitilasta osastoivin ovin. Tunnuksilla **Y1** ja **Y2** on merkitty palosimuloinneissa käytettyjen mitoituspalojen sijainnit.



Kuva 72. Esimerkkikohde 1: Pysäköintihalli. Merkinnät: A – ajoluiska; B, C ja D – maanpinnan tasolle johtavat porrashuoneet ja hissi-kuilut; Y1 ja Y2 – mitoituspalojen paikat palosimuloinneissa.

Simuloituja poistumistilanteita on kolme, joista jokainen tilanne toistettiin 10 kertaa. Ohjelman suoritus-aika *Intel Pentium*<sup>TM</sup> 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 reagointiajaksi oletettiin  $60 \pm 15$  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 11 esitettävät tulokset.

*Taulukko 11. Poistuminen pysäköintihallista. 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>B</b>	2:39	0:14	2:56	2:11
Viimeinen porrashuoneeseen <b>C</b>	2:57	0:13	2:59	2:22
Viimeinen porrashuoneeseen <b>D</b>	2:56	0:20	3:01	2:13
Viimeinen ajoluiskaan <b>A</b>	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 12 esitetään kymmenessä simuloinnissa saadut tulokset.

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 13 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.

*Taulukko 12. Poistuminen pysäköintihallista. 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>	Maksimi- arvo <i>max</i>	Minimi- arvo <i>min</i>
Viimeinen maan pinnalla	4:54	0:18	5:29	4:36
Viimeinen porrashuoneeseen <b>B</b>	2:40	0:12	2:57	2:19
Viimeinen porrashuoneeseen <b>C</b>	2:50	0:14	3:14	2:32
Viimeinen ajoluiskaan <b>A</b>	1:51	0:16	2:16	1:17

*Taulukko 13. Poistuminen pysäköintihallista. 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>	Maksimi- arvo <i>max</i>	Minimi- arvo <i>min</i>
Viimeinen maan pinnalla	5:09	0:16	5:30	4:36
Viimeinen porrashuoneeseen <b>C</b>	3:21	0:16	3:49	2:59
Viimeinen porrashuoneeseen <b>D</b>	2:47	0:16	3:19	2:29

Tarkastelluissa kolmessa tapauksessa on henkilömäärä (50 hlö) hyvin pieni hallin pinta-alaan nähden eikä porrashuoneiden ovissa pääse tapahtumaan ruuhkautumista. 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.

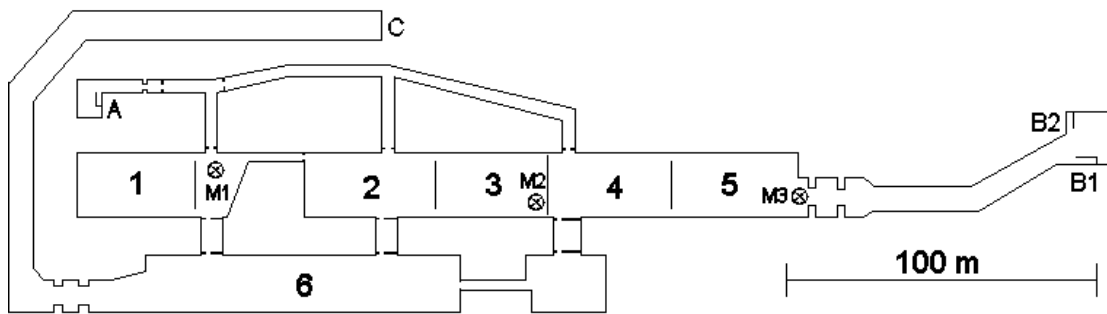
Arvio poistumisen onnistumisesta: Pysäköintitilaa koskevien palosimulointien tulokset on esitetty edellä kohdassa 4.2.3. Palotapauksen **Y2** osalta todetaan, että hallissa olevilla ihmisillä on runsaasti aikaa poistua – varsinaisesta hallitilasta noin 10 minuuttia ja koko pysäköintitilasta porrashuoneineen ja ajoluiskineen 20–25 minuuttia. Taulukon 13 mukaan kaikki henkilöt ovat siirtyneet hallitiloista porrashuoneisiin 4 minuutin sisällä ja saapuneet maanpinnan tasolle 6 minuutin sisällä palon alkamisesta, kun heidän reagointi-aikansa oletettiin olevan  $60 \pm 15$  s. Tässä tapauksessa on poistumiseen käytettävissä olevan ajan ja poistumiseen käytetyn ajan välillä niin suuri erotus, että poistumista palotapauksessa voidaan pitää turvallisena.

Palotapauksen **Y1** mukaisissa palosimuloinneissa on tutkittu erityisesti porrashuoneen **D** ylipaineistuksen toimintaa erilaisissa paineistusolosuhteissa. Palosimulointien mukaan porrashuoneessa **D** säilyy hyvä näkyvyys ainakin 10 minuutin ajan. Palotapauksen **Y1** mukaisissa poistumissimuloinneissa oletettiin, ettei porrashuonetta **D** käytetä poistumiseen lainkaan, koska palon oletettiin syttyvän sen läheisyydessä. Mikäli porrashuoneen alaosassa olisi palon syttyessä henkilöitä, heillä olisi kuitenkin runsaasti aikaa kulkea portaita pitkin maanpinnan tasolle, ennen kuin porrashuone täyttyisi savulla.

## 5.6.2 Liikuntatila

Esimerkkikohteen 2 liikuntatilassa on viisi  $36 \text{ m} \times 18 \text{ m}$  kokoista salibandykenttää, kahvio sekä noin 80 henkilöautolle tarkoitettu pysäköintihalli. Kuvassa 73 on poistumissimuloinneissa käytetty kohdetta esittävä pohjapiirros. Salibandykentät ja kahvio sijaitsevat  $233 \text{ m} \times 21 \text{ m}$  kokoisessa hallissa ja pysäköintitila  $100 \text{ m} \times 18 \text{ m}$  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 73. Esimerkkikohde 2: Liikuntatila. Merkinnot: 1–5 – salibandykentät; 6 – pysäköintihalli; A, B1 ja B2 – maanpinnan tasolle johtavat porrashuoneet ja hissikulut; C – ajoluiska; M1, M2 ja M3 – mitoituspalojen paikat palosimuloinneissa.

Simuloituja poistumistilanteita on neljä, joista jokaisesta on simuloitu 3–8 tapausta, yhteensä 19 tapausta. Ohjelman suoritusaika 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.

Taulukossa 14 esitetään simulointien tuloksina kokonaispoistumisaika eli aika, jolloin viimeinen henkilö saapuu maanpinnalle. Taulukossa 14 on lisäksi 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). Aika alkaa poistumisen käynnistymisestä, jolloin kaikki henkilöt samanaikaisesti alkavat poistua hallitiloista.

*Taulukko 14. Poistuminen liikuntatilasta. 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 samanaikaisesti alkavat 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 <b>1</b>	2:15	1:22	1:20	1:26	1:12	1:13	2:28	2:29
Viimeinen kentältä <b>2</b>	1:45	0:49	0:46	0:45	0:31	0:32	1:53	1:53
Viimeinen kentältä <b>3</b>	0:51	0:39	0:40	0:42	1:09	1:16	1:00	1:00
Viimeinen kentältä <b>4</b>	0:44	1:25	1:25	1:31	2:00	2:05	1:22	1:22
Viimeinen kentältä <b>5</b>	1:38	2:18	2:18	2:27	2:54	3:00	0:44	0:43
Viimeinen kentältä <b>6</b>	1:08	2:01	2:03	2:01	2:16	2:22	0:51	2:11
Viimeinen porrashuoneeseen <b>A</b>	3:25	2:32	2:37	2:43	–	–	4:40	4:40
Viimeinen porrashuoneeseen <b>B</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** –  $15 \pm 5$  s (tasajakautuma), kenttä **2** –  $30 \pm 15$  s, kenttä **3** –  $45 \pm 15$  s, kentät **4** ja **5** –  $60 \pm 30$  s. Pysäköintihallissa olevien henkilöiden reagointiaikoina käytettiin aikoja  $120 \pm 30$  s ja  $30 \pm 15$  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.

Taulukossa 15 esitetään simulointien tulokset tapauksissa 9–12. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

*Taulukko 15. Poistuminen liikuntatilasta. 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 <b>1</b>	1:08	1:07	1:09	1:17
Viimeinen kentältä <b>2</b>	1:19	1:19	1:24	1:24
Viimeinen kentältä <b>3</b>	2:01	2:01	2:08	2:09
Viimeinen kentältä <b>4</b>	2:48	2:49	2:58	2:58
Viimeinen kentältä <b>5</b>	3:41	3:40	3:55	3:55
Viimeinen kentältä <b>6</b>	4:42	2:42	4:33	2:57
Viimeinen porrashuoneeseen <b>A</b>	2:15	–	2:22	–
Viimeinen porrashuoneeseen <b>B</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 si-

jaitsivat syttymiskohdasta: Kentät **1** ja **3** –  $30 \pm 15$  s (tasajakautuma), kenttä **2** –  $15 \pm 5$  s, kenttä **4** –  $45 \pm 15$  s, kenttä **5** –  $60 \pm 15$  s. Pysäköintihallissa olevien henkilöiden reagointi-aika oli  $120 \pm 30$  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.

Taulukossa 16 esitetään simulointien tulokset tapauksissa 13–15. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

*Taulukko 16. Poistuminen liikuntatilasta. 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]		
	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 reagoituaikansa oletettiin vaihtelevan eri kentillä seuraavasti sen mukaan, kuinka kaukana he sijaitsivat syttymiskohdasta: Kenttä **1** –  $120 \pm 30$  s (tasajakautuma), kenttä **2** –  $60 \pm 15$  s, kenttä **3** –  $45 \pm 15$  s, kenttä **4** –  $30 \pm 15$  s, kenttä **5** –  $15 \pm 5$  s. Pysäköintihallissa olevien henkilöiden reagoituaika oli  $120 \pm 30$  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.

Taulukossa 17 esitetään simulointien tulokset tapauksissa 16–19. Aika alkaa hetkestä, jolloin poistuvat henkilöt tulevat tietoisiksi tulipalosta.

*Taulukko 17. Poistuminen liikuntatilasta. Palotilanne M3 (palo kentässä 5, mikä 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 <b>1</b>	3:03	4:05	3:10	4:14
Viimeinen kentältä <b>2</b>	2:19	3:31	2:22	3:40
Viimeinen kentältä <b>3</b>	1:30	1:30	1:30	1:31
Viimeinen kentältä <b>4</b>	1:38	1:37	1:49	1:50
Viimeinen kentältä <b>5</b>	0:57	0:56	1:01	1:01
Viimeinen kentältä <b>6</b>	4:13	3:24	3:56	3:07
Viimeinen porrashuoneeseen <b>A</b>	4:56	5:12	5:38	6:12



Arvioitaessa poistumisen onnistumista on palotapauksissa **M1** – **M3** poistumisaikaan vielä lisättävä aika, joka kuluu palon syttymisestä siihen, kun paloilmotitimet tms. antavat hälytyksen tai hallissa olevat henkilöt muuten havaitsevat alkavan palon.

Arvio poistumisen onnistumisesta: Liikuntatilaa koskevien palosimulointien tulokset on esitetty edellä kohdassa 4.3.3. Palotapauksen **M1** osalta todetaan kohdassa 4.3.3.1, että noin 7 minuutin kuluttua palon alkamisesta savukerros on laskeutunut 1,5 m korkeudelle kahviossa ja kentän **1** eräissä osissa ja saavuttaa 9 minuutin kohdalla oven, joka avautuu näiltä alueilta käytävään, joka johtaa uloskäytävään **A**. Noin 15 minuutin kohdalla viimeksi mainitussa käytävässä on niin paljon savua, että se haittaa näkyvyyttä. Taulukossa 15 esitetään simulointien tulokset paloon **M1** liittyvissä tapauksissa 9–12. Kentällä **1** olleet 60 tai 90 henkilöä siirtyvät pois alueelta runsaan minuutin kuluttua siitä, kun he tulivat tietoisiksi palosta. Koska he olivat lähellä palon alkamiskohtaa, heidän reagointiajaksi oletettiin  $15 \pm 5$  s. Vaikka reagointiaika olisi selvästi pitempi, on poistuvien henkilöiden käytettävissä oleva aika kuitenkin pitempi kuin poistumiseen kuluva aika. Kentillä **2–5** ja **6** olleiden henkilöiden oletettiin poistuvan uloskäytävien **B1**, **B2** ja **C** kautta.

Palotapaukseen **M2** liittyviä palosimulointien tuloksia on analysoitu kohdassa 4.3.3.5. Tulosten mukaan kenttä **3** täyttyy savusta jo noin 2 minuutin kuluttua palon syttymisestä, ja noin 4 minuutin kohdalla savua alkaa virrata käytävään, joka johtaa kentältä **3** uloskäytävään **A**. Noin 10 minuutin kohdalla savu on osittain täyttänyt koko käytävän ja levinnyt toisille kentille ja mm. vaikeuttanut siirtymistä uloskäytäviin **B1** ja **B2** johtavaan käytävään. Poistumissimulointien 13–15 tulokset ovat taulukossa 16. Tulosten mukaan kentällä **3** olleet 60 tai 90 henkilöä ovat poistuneet kentältä 1 min 45 s kuluttua siitä, kun he tulivat tietoisiksi tulipalosta. Henkilöiden oletettu reagointiaika oli  $30 \pm 15$  s. Tässä tapauksessa poistumiseen käytettävissä olevan ajan ja poistumiseen käytetyn ajan erotus on niin pieni, että on täysin mahdollista, että osa henkilöistä altistuu savukaasujen vaikutuksille. Muilla kentillä olleet henkilöt ehtivät sen sijaan siirtyä uloskäytäviin **A**, **B1** tai **B2** riittävällä marginaalilla.

Palotapauksen **M3** palosimulointeja on käsitelty kohdissa 4.3.3.2 ja 4.3.3.3. Kenttä **5**, jossa palo syttyy, täyttyy savusta tulosten mukaan noin 5 minuutin kuluttua syttymisestä. Tässä vaiheessa savu haittaa myös näkyvyyttä kentältä **5** uloskäytäviin **B1** ja **B2** johtavassa käytävässä. Noin 10 minuutin kohdalla savu on levinnyt osaan kentältä **4** uloskäytävään **A** johtavaan käytävään. Poistumissimulointien tulokset tapauksissa 16–19 ovat taulukossa 17. Kentällä **5** olleet 60 tai 90 henkilöä poistuvat noin 1 minuutin kuluttua siitä, kun he tulivat tietoisiksi palosta joko uloskäytävään **A** johtavan käytävän tai pysäköintihallin **6** kautta. Henkilöiden oletettu reagointiaika on  $15 \pm 5$  s. Uloskäytäviä **B1** ja **B2** ei palotapauksessa **M3** käytetä poistumiseen. Palotapauksessa **M3** kentältä **5** poistuvilla henkilöillä on suurempi turvamarginaali kuin edellä palotapauksen **M2** kentällä **3** olleilla henkilöillä, ja onkin todennäköistä, että he eivät poistumisen aikana joudu savukaasujen vaikutusten alaisiksi. Palotapauksen **M3** muilla kentillä olleet henkilöt ehtivät

siirtyä uloskäytävään **A** noin 6 minuutin kohdalla, jolloin savu vasta alkaa levitä uloskäytävään johtavaan käytävään.

### 5.6.3 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.

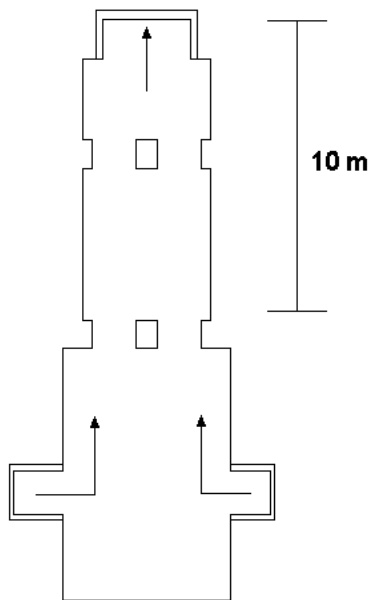
Laituritasoa ja lippuhallitasa yhdistävät liukuportaat, joiden kautta matkustajat normaalitilanteessa kulkevat. Laituritason toisessa päässä sijaitsee osastoitu uloskäytävä, johon on yhteys molemmilta laitureilta. Lippuhallitasolta on kolme suoraan maanpinnan tasolle johtavaa kulkureittiä. Kulkuyhteyksiä 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 metroasemaa. Selvityksestä käy mm. ilmi, että poistumisajalle laituritasolta tai lippuhallitasolta ei ole asetettu minuuttimääräisiä vaatimuksia. Muutamisissa maissa on asetettu raideliikennettä koskevaan standardiin NFPA 130 (2003, 2004) tai kansallisiin säädöksiin viitaten vaatimuksiksi 5–7 min.

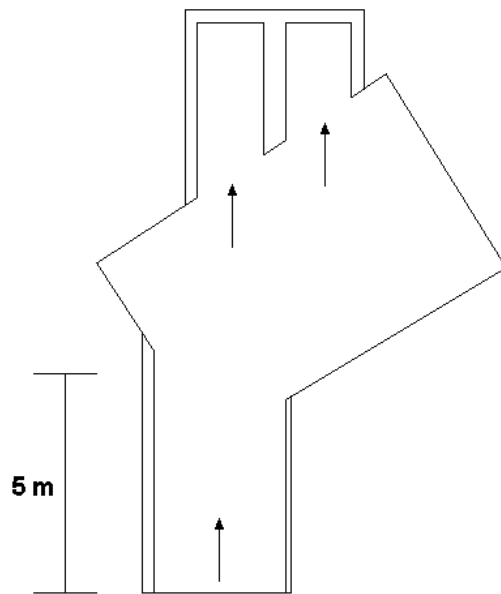
Kuvissa 74–78 esitetään poistumissimuloinneissa käytettyä kohdetta esittävät eri tasojen pohjapiirroksiset. Piirroksissa on tunnuksilla **A1** ja **A2** merkitty laituritasolta osastoituun uloskäytävään johtavien ovien sijainti. Tunnuksella **B** on merkitty lippuhallitasolle johtavien liukuportaiden sijainti. Kirjaimilla **C** ja **D** on merkitty tekniikkatason kulkureitit lippuhallitasolle. Kirjaimilla **E–H** on merkitty maanpinnan tasolle johtavat kulkureitit ja ovien tai vastaavien sijainnit. Tunnuksilla **K1**, **K2** ja **K3** on merkitty palosimuloinneissa käytettyjen mitoituspalojen sijainnit.



Kuva 74. Esimerkkikohde 3: Metroasema – laituritaso. Merkinnyt: **A1** ja **A2** – osastoitun uloskäytävään johtavat ovet; **B** – lippuhallitasolle johtavat liukuportaat; **K1** – mitoituspalon paikka palosimuloinneissa.

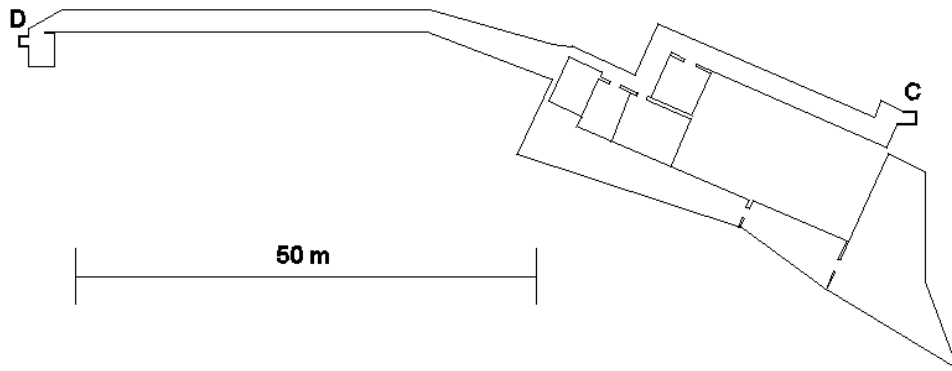


Laituritason uloskäytävä – Osa 1

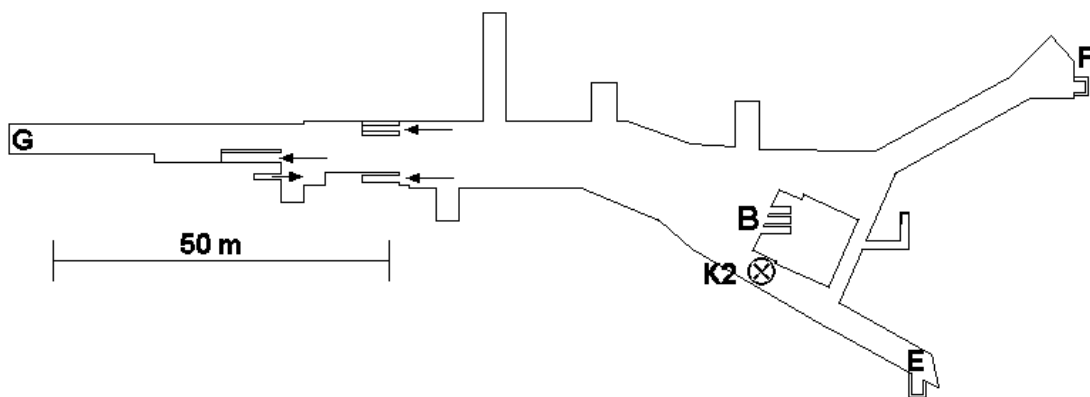


Laituritason uloskäytävä – Osa 2

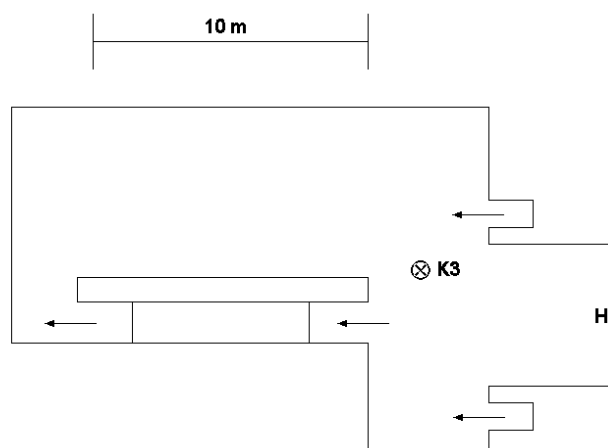
Kuva 75. Esimerkkikohde 3: Metroasema – laituritasolta johtavan osastoidun uloskäytävän tiloja, jotka sijaitsevat noin 10 m laituritason yläpuolella. Kuvaan 14a merkityistä ovista **A1** ja **A2** kuljetaan portaikkoon, joka johtaa vasemmanpuoleisen kuvan esittämään tilaan, josta edelleen kuljetaan lyhyen portaikon kautta oikeanpuoleisen kuvan esittämään tilaan. Viimeksi mainitusta tilasta johtaa portaikko suoraan maanpinnan tasolle.



Kuva 76. Esimerkkikohde 3: Metroasema – tekniikkataso. Merkinnät: **C** ja **D** – kulureitti lippuhallitasolle (jälkimmäisestä on yhteys myös maanpinnan tasolle).



Kuva 77. 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 78. 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:

- *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.

Taulukossa 18 esitetään simulointien tuloksina kokonaispoistumisaika eli aika, jolloin viimeinen henkilö saapuu maanpinnalle. Taulukossa 18 on lisäksi aika, jolloin viimeinen laituritasolla oleva henkilö siirtyy uloskäytävään **A** (uloskäytäviä **A1** ja **A2** tarkastellaan tässä yhdessä) tai 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 18. Poistuminen 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 kuulutusjärjestelmän 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.

Taulukossa 19 esitetään simulointien tulokset tapauksissa 2A–2C.

*Taulukko 19. Poistuminen 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]		
	Tapaus:		
	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.

Taulukossa 20 esitetään simulointien tulokset tapauksissa 3A–3C.

*Taulukko 20. Poistuminen 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.

Taulukossa 21 esitetään simulointien tulokset tapauksissa 4A–4C.

*Taulukko 21. Poistuminen esimerkkikohteen 2 metroasemalta. Palotapaus K3 (palo katusosassa, 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

Arvioitaessa poistumisen onnistumista on palotapauksissa **K1–K3** poistumisaikaan vielä lisättävä aika, joka kuluu palon syttymisestä siihen, kun paloilmittimet tms. antavat hälytyksen hallissa oleville henkilöille.

Arvio poistumisen onnistumisesta: Metroasemaa koskevien palosimulointien tulokset on esitetty edellä kohdassa 4.4.3. Tässä tarkasteltua laituritasolla tapahtuvaa palotapausta **K1** vastaavia palosimulointeja on analysoitu kohdissa 4.4.3.1–4.4.3.3, joista ensin mainittu koskee kaapelipaloja ja jälkimmäinen metrovaununpaloja. Tarkasteluissa on erityisesti kiinnitetty huomiota savun leviämiseen ja näkyvyyden heikkenemiseen metroase-

man eri tasoilla ja uloskäytävien kohdalla. Kohdassa 4.4.3.5 on esitetty yhteenveto näkyvyyden heikkenemisestä poistumisen kannalta kriittisissä pisteissä. Tarkastelluissa kaapeli- ja metrovaunupaloissa näkyvyys alkoi heiketä uloskäytävän **A1** kohdalla tapauksesta riippuen 7,5–19 minuutin kuluttua palon syttymisestä. Taulukon 19 esittämien palotapauksen **K1** poistumissimulointien tulosten mukaan viimeinen uloskäytävää **A1** käyttävä henkilö siirtyi uloskäytävään henkilömäärästä riippuen 4–5 minuutin kuluttua poistumisen käynnistymisestä. (Palotapauksessa **K1** oletettiin, että uloskäytävä **A2** ei ollut käytettävissä.) Vaikka simuloinnit osoittavat, että poistumiseen käytettävissä oleva aika on suurempi kuin poistumiseen käytetty aika, ei erotus kuitenkaan ole kovinkaan suuri. Siten on täysin mahdollista, että osa uloskäytävän **A1** kautta poistuvista henkilöistä saattaa altistua savun vaikutuksille laituritasolla.

Poistuttaessa laituritasolta on oletettu, että huomattava osa poistuvista henkilöistä pyrkii poistumaan laiturialueen eteläpäässä sijaitsevien liukuportaiden **B** kautta, vaikka kuulutusjärjestelmän kautta henkilöitä ohjattaisiinkin käyttämään uloskäytäviä **A1** ja **A2**. Kohdan 4.4.3.5 mukaan näkyvyys liukuportaissa alkaa kuitenkin heiketä hyvin nopeasti palon syttymisen jälkeen. Näkyvyys heikkenee liukuportaiden *yläpään* kohdalla simulointitapauksesta riippuen 3,3–9,5 minuutin kuluttua palon syttymisestä. Kaikki tehdyt poistumissimuloinnit osoittavat, että viimeinen henkilö siirtyy liukuportaiden *alapään* kohdalle 1–5 minuutin kuluttua poistumisen käynnistymisen jälkeen (taulukot 19, 20 ja 21). Tässä tapauksessa on siten suuri todennäköisyys, että liukuportaiden kautta poistuvat henkilöt altistuvat savukaasujen vaikutuksille laituritasolla tapahtuvassa palossa.

Lippuhallitasolla tapahtuvaa paloa **K2** vastaavien kioskipalosimulointien tuloksia on tarkasteltu kohdassa 4.4.3.4. Kioskipalot vaikuttavat vain lippuhallin tilojen kautta tapahtuvaan poistumiseen. Palosimulointitulosten mukaan näkyvyys alkaa heiketä lippuhallitasolla olevien, maanpinnan tasolle johtavien portaiden **E** osalta 5,8–6,3 minuutin, portaiden **F** osalta 13,7–20,5 minuutin ja portaiden **H** osalta 5,7–7,3 minuutin kohdalla. Vastaavat poistumissimuloinneissa saadut ajat vaihtelevat taulukoiden 19, 20 ja 21 mukaan välillä 3 ja 7 minuuttia. Tässäkin tapauksessa on siten täysin mahdollista, että osa lippuhallitasolla olevista henkilöistä tai osa lippuhallitasolle laituritasolta siirtyvistä henkilöistä altistuu savukaasujen vaikutuksille.

#### 5.6.4 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 yhtämittainen tunneliosuus oli 3 km, mistä ei johtanut maanpäälle ajotunneleita tai ilmanvaihtokanavia.

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

Tunnelissa liikutaan ja sieltä poistutaan yleensä dieselmoottoriajoneuvoilla, 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.

Arvio poistumisen onnistumisesta: Yhteiskäyttötunnelia koskevien palosimulointien tulokset on esitetty edellä kohdassa 4.5.4. Tulosten mukaan savu leviää tunnelissa 10 minuutin aikana palon syttymisestä tapauksesta riippuen 215–280 m etäisyydelle syttymiskohdasta. Vastaavat matkat 20 minuutin kuluttua ovat 340–420 m. Tuuletuksen käynnistäminen aiheuttaa sen, että savu leviää ilmavirtauksen suunnassa 40 minuutin kuluttua palon alkamisesta noin 1 100–1 200 m palon syttymiskohdasta.

Käyttäen edellä mainittua kävelynopeutta 1,4 m/s voidaan todeta, että 10 minuutin aikana henkilö kävelee 840 m, 20 minuutin aikana vastaavasti 1 680 m ja 40 minuutin aikana 3 360 m. Näiden laskelmien mukaan poistuvat henkilöt eivät altistu savun vaikutuksille, mikäli he alkavat poistua heti tulipalon syttyttyä.

## 6. Yhteenvetoa

Yhteenveto-osaan on koottu maanalaisten tilojen paloturvallisuuden kannalta keskeisiä asioita suunnitteluvaiheesta alkaen. Seuraavassa tarkastellaan palosimuloinnin ja poistumisanalyysien menetelmiä sekä paloturvallisuuden parantamisen keinoja: ennaltaehkäiseviä toimia, palonaikaista tilanteen hallintaa, kohteen mahdollisen käyttötavan muutosten huomioon ottamista sekä yleisiä suosituksia paloturvallisuuden parantamiseksi.

### 6.1 Uhkakuvien muodostaminen

Maanalaisten tilojen paloturvallisuusanalyysien alkuvaiheeseen kuuluu sopiminen siitä, minkälaisiin uhkakuviin tulee varautua. Tällöin tulee tarkastella ainakin seuraavia asioita:

- Minkä tyyppisiin tulipaloihin tulee varautua (tyypilliset tulipalot tilastojen ja tiedossa olevien tapausten pohjalta – syttymistavat, paikat ja palon kehittyminen – mahdolliset vaaralliset aineet, mahdolliset räjähdykset jne.)?
- Missä laajuudessa tuhopolton mahdollisuus on otettava huomioon (miten tuhopolttojen tulipalot poikkeavat tyypillisistä ”normaaleista” tulipaloista)?
- Miten varaudutaan tilanteisiin, jossa käyttäjät tai paikalla olevat kykenevät tai eivät kykene osallistumaan sammutus- ja pelastustehtäviin?
- Miten palokunnan toimintamahdollisuudet otetaan huomioon?
- Miten varaudutaan poikkeaviin henkilömääriin tarkasteltavissa tiloissa?
- Miten rakenteelliset seikat ja automatisoidut turvallisuussysteemit vaikuttavat palon leviämiseen ja ihmisten poistumismahdollisuuksiin?
- Varaudutaanko pääasiallisesta käyttötavasta poikkeaviin käyttötarkoituksiin (esim. urheilutila näyttelytilana)?
- Varaudutaanko myöhemmin tapahtuviin käyttötavan muutoksiin?

Uhkakuvatarkastelun perusteella saadaan paloturvallisuusanalyysien pohjaksi rajattua sellaiset tapaukset, joiden voidaan olettaa olevan joko yleisiä tai seurauksiltaan sellaisia, että niiden tarkastelua voidaan pitää perusteltuna.

### 6.2 Palotilanteiden simuloinnit

Maanalaisten tilojen palosimuloinnit tulee yleensä tehdä virtauslaskentaan perustuvilla simulointiohjelmilla, jotka pystyvät ottamaan huomioon virtauksen liikemäärän vaikutuksen tunnelimaisessa geometriassa, erilaisten puhaltimien vaikutuksen sekä geometrian

monimutkaisuuden. Joissakin yksinkertaisissa tilanteissa, kuten hallimaisen tilan täytymisen laskennassa, vyöhykemalleja voidaan kuitenkin käyttää.

Savun leviämisen laskennassa luotettavia tuloksia voidaan usein saada varsin karkeilla-kin laskentahiloilla. Tunnelimaisissa kohteissa resoluution määrää yleensä tilan korkeus. Hyvän virtausnopeusjakauman laskemiseksi tila on korkeussuunnassa jaettava vähintään kymmeneen osaan. FDS-ohjelman tapauksessa samaa resoluutiota on sovellettava muissakin suunnissa. Aikakeskiarvoistettuja virtausyhtälöitä (RANS) käyttävien simulointiohjelmien tapauksessa hilajakoa voidaan väljentää tunnelien pituussuunnassa. Jos palosimuloinnissa pyritään oletetun palon sijaan ennustamaan palon kehittymistä, on varmistauduttava siitä, että hilaresoluutio on riittävän hyvä liekinleviämisen kannalta. Yleensä simuloinnit kannattaa jakaa kahteen vaiheeseen: Ensimmäisessä vaiheessa simuloidaan pelkästään palavaa kohdetta kohteen kokoon nähden hyvällä resoluutiolla. Tarvittava resoluutio riippuu yleensä syttymislähteen koosta. Toisessa vaiheessa ensimmäisen vaiheen tuloksena saatu palotehokäyrä sijoitetaan oletettuna palotehona koko kohteen simulointiin. Hilaresoluution vaikutusta laskentatuloksiin tulisi tutkia muuttamalla sitä ainakin jossakin kohteen oleellisessa osassa ja vertaamalla tuloksia. Yleensä täydellistä hilariippumattomuutta ei voida saavuttaa, mutta käyttäjällä pitää olla tuntuma tuloksiin liittyvistä epävarmuuksista. Usein laskentamenetelmästä johtuvat epävarmuudet ovat kuitenkin varsin pieniä lähtöoletuksiin liittyviin epävarmuuksiin verrattuna.

Kun palosimulointien tulosten perusteella tehdään johtopäätöksiä tarkasteltujen ratkaisujen turvallisuudesta, on tiedettävä, kuinka herkkiä tulokset ovat käytettyjen syötesuureitten muutoksille. Tavoitteena voidaan pitää, että eri syötesuureille tehdään järjestelmälliset herkkyyksianalyysit tai että simulointi tehdään Monte Carlo -tyyppisesti, jolloin syötesuureita varioidaan tilastollisten jakauman avulla. Raskaiden simulointien ollessa kyseessä näihin tekniikoihin ei usein kuitenkaan ole varaa. Tällöin yksinkertaisemmat laskentamenetelmät, kuten vyöhykemallit ja analyttiset kaavat, voivat antaa kuvan tulosten herkkyydestä.

Palosimuloinnin tekijän tulee osoittaa kykynsä ohjelman käyttöön simuloimalla jotakin mahdollisimman samankaltaista koetilannetta ja vertaamalla laskettuja ja simuloituja tuloksia toisiinsa. Tällaisen ”käyttäjävalidoinnin” tulee olla henkilökohtainen, ei esimerkiksi yrityskohtainen. Vastuu simulointien oikeellisuudesta on simulointien tekijällä.

### **6.3 Poistumisen simulointi**

Koska on ilmeistä, että maanalaisten tilojen poistumistarkasteluja varten ei ole yleisesti saatavissa olevia laskentaohjelmia, joudutaan useimmissa tapauksissa käyttämään perinteisille maanpäällisille rakennuskohteille tarkoitettuja ohjelmia. Tällöin on erityisen tärkeää selvittää käytettävän ohjelman rajoitukset, eli on varmistauduttava, että ohjel-

maan ei sisälly sen kaltaisia rajoituksia, jotka mitä ilmeisimmin johtaisivat täysin virheellisiin tuloksiin. Eräs yleinen tekijä, jota ohjelmat eivät aina käsittele oikein, on poistuminen *ylöspäin* portaissa. Rakennuksissa poistutaan yleensä *alaspäin* maanpinnan tasolle, minkä laskeminen hallitaan ohjelmissa yleensä hyvin. Vaikka ohjelma pystyy käsittelemään henkilöiden liikkumista ylöspäin, on ohjelman oikea toiminta pyrittävä varmistamaan esimerkiksi määrittelemällä yksittäisen poistuvan henkilön keskimääräinen kävelynopeus. Useimmissa ohjelmissa oletetaan, että liikkumisnopeus ylöspäin (ja myös alaspäin) on vakio ja riippuu vain ulkoisista esteistä, kuten etäisyydestä toisiin poistuviin ihmisiin, seiniin tai muihin esteisiin ja portaiden muodosta ja jyrkkyydestä. Mikään ohjelma ei kuitenkaan ota huomioon, että liikuttaessa ylöspäin useita kymmeniä metrejä kävelynopeus pienenee väsymyksen seurauksena. Vertailukohteena voidaan mainita, että esimerkiksi maanpäällisessä 10-kerroksisessa rakennuksessa portaiden nousu ylöspäin on usein 33–35 m. Tässä tutkimuksessa käytetty *Simulex*-ohjelman versio 1.2 käsittelee oikein liikkumista portaissa ylöspäin mutta ei ota huomioon nopeuden pienenemistä suurilla tasoeroilla.

Poistuvien henkilöiden lukumäärän ollessa suuri syntyy poistumisreiteissä väistämättä ruuhkatilanteita. Useimmat nykyisin saatavissa olevat poistumisen laskentaohjelmat käsittelevät hyvin poistumista kohtalaisessa ruuhkassa. Näiden poistumismallien lähtökohtana on ihmisvirtauksen analogia nestevirtauksen kanssa. Tämän lähestymistavan on todettu toimivan huonosti erittäin ruuhkaisissa tilanteissa (”paniikkitalanteissa”). Aivan viime vuosina on kehitetty malleja, joissa on käytetty monen kappaleen fysiikan teoriasta peräisin olevaa rakeisen aineen virtausta. Tämän analogian pohjalta laaditut mallit toimivat hyvin myös paniikkitalanteissa. Malleissa on usein otettu huomioon mekaniikan lakeihin perustuvien voimien lisäksi myös sosiaalinen voima, josta kuitenkin toistaiseksi on olemassa vain niukasti tutkimustietoa (Korhonen *et al.* 2005).

Yksinkertaisissa poistumistapauksissa, joissa poistuvien henkilöiden lukumäärä on pieni eikä ruuhkautumista kulkureiteissä ole odotettavissa, poistumisaikalaskelmat voidaan tehdä myös perinteisillä käsilaskentamenetelmillä.

Kokonaispoistumisaikoja tarkasteltaessa on muistettava poistumisen alkamishetkeen liittyvät suuret epävarmuudet, jotka liittyvät siihen, miten ihmiset havaitsevat tulipalon ja tulevat tietoisiksi poistumistarpeesta. Nämä epävarmuudet tulee ottaa huomioon verrattaessa laskettuja poistumisaikoja palosimuloinneista saataviin, käytettävissä oleviin poistumisaikoihin.

Poistumislaskennan tuloksia arvioitaessa oleellisia ovat saatujen tulosten herkkyydet suhteessa käytettyjen lähtötietojen muutoksiin. Tästä syystä tulee aina tutkia kriittisten parametrien vaikutuksia riittävän laajalla alueella mukaan lukien myös varsin epätodennäköisiä arvoja.

## 6.4 Paloturvallisuuden parantamisen keinoja

Seuraavassa esitetään projektin aikana esiin tulleita ja muuhun aineistoon pohjautuvia niin yleisiä kuin yksityiskohtiinkin liittyviä ohjeita tai suosituksia, joilla paloturvallisuutta voidaan parantaa maanalaisissa tiloissa.

### 6.4.1 Ennaltaehkäisyn keinoja

*Syttymien estäminen ja rajoittaminen.* Maanalaisten tilojen rakenteissa, laitteissa ja asennuksissa tulee käyttää materiaaleja ja tuotteita, jotka ovat joko palamattomia tai eivät ole helposti syttyviä. Palavia materiaaleja ja tuotteita käytettäessä tulee varmistua siitä, että ne tuottavat mahdollisimman vähän lämpöä ja savua sekä myrkyllisiä kaasuja ja että ne suojataan asianmukaisesti. Kaikenlaisen (myös tilapäisen) syttymiskelpoisen palokuorman rajoittamiseen tulee kiinnittää huomiota, ja tilojen käytön kannalta välttämättömän herkästi syttyvää tai merkityksellistä palokuormaa sisältävän materiaalin suojaaminen on suunniteltava siten, että se ei lisää palon syttymisen riskiä. (Esimerkkeinä kaapeleiden materiaalivalinnat, kaukolämpöputkien eristeiden valinta ja suojaaminen, autojen pysäköinnin kieltäminen huoltotunneleissa jne.) Myös yleiseen siisteyteen tulee kiinnittää huomiota: tiloja ei tule käyttää esimerkiksi tilapäisinä varastoina.

*Palon leviämisen ja vahinkojen rajoittaminen.* Palokuorman määrää tulee rajoittaa ja huolehtia palavien materiaalien, tuotteiden, laitteiden jne. sijoittamisesta tai suojaamisesta siten, että ne eivät edistä palon leviämistä. Tähän kuuluu myös mm. läpivientien osastoivuuden toimivuus, mahdollisten ontelotilojen varmistaminen niin, ettei palon leviäminen ole mahdollista niiden kautta, ja yleinen siisteys tiloissa (ei tilapäisiä varastoja, jotka voivat sisältää palokuormaa). Oletettujen palotilanteiden analyysien pohjalta tulee rakenteita (betoni, kivipinnat) suojata lohkeilulta pelastustoimintojen varmistamiseksi ja muiden vahinkojen pienentämiseksi.

*Teknisten suunnitteluarvojen soveltuvuus.* Palon ilmaisen, sammutusmenetelmien käytön ja savunpoiston suunnitteluarvojen soveltuvuuteen maanalaisissa tiloissa tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tällöin tulee ottaa huomioon mm. ilmavirtausten voimakkuudet ja suunnat, vallitsevat paine-erot, käytävien ja poistokanavien pituudet sekä vallitsevat olosuhteet esim. lämpötilan ja kosteuden suhteen.

*Uloskäytävät.* Sekavia uloskäytäviä tulisi välttää. Portaiden ja tasojen tulisi vastata normaalisti käytössä olevia rakenteita. Ovien tulee olla erityisen selvästi merkittyjä. Ovien tulee avautua pääsääntöisesti kulkusuuntaan ja niiden avaamiseen tarvittavan voiman tulee olla suhteutettu poistuvien henkilöiden ominaisuuksiin. Uloskäytävistä ulos johtavien ovien tulee olla sijoitettu siten, että niiden luokse ei synny ruuhkaa poistumistilanteessa.

*Poistumisreittien käytettävyys.* Uloskäytävillä tai niiden välittömään läheisyyteen ei saa muodostaa esteitä edes tilapäisesti (esim. tavaravarastoja). Uloskäytävien ovien käytettävyys tulee suunnitella niin, että normaalikäyttöön liittyvät rajoitukset tai ovissa olevat ohjeet eivät palotilanteessa estä tai hidasta ovien käyttämistä. Ovet tulee voida avata normaalisti mahdollisesti syntyvistä paine-eroista huolimatta.

*Opastus.* Kaikkien uloskäytäviin johtavien kulkureittien tulisi olla hyvin valaistuja sekä varustettu selkeillä opasteilla ja suuntanuolilla, jotka on sijoitettu myös lattiaan tai muuten niin alas, että mahdollinen ylempänä oleva savukerros ei estä niiden näkymistä (alle 1,5 metrin korkeudelle lattiatasosta).

*Valaistus.* Valaistuksesta poistumisreiteillä tulee huolehtia siten, että ylempänä oleva savukerros ei haitallisesti heikennä valaistusolosuhteita; osa valaisimista on sijoitettava riittävän alas.

*Pelastustoiminnan mahdollisuudet.* Tilojen suunnittelussa tulee ottaa huomioon pelastustoimen mahdollisuudet siirtyä kohteen kaikkiin osiin. Tässä tulee ottaa huomioon myös poistuvien ja pelastajien eri kulkusuunnat sekä liikuntarajoitteisten ja liikuntakyvyttömiä pelastamisen mahdollisuudet. Savutuuletuksella voidaan luoda mahdollisuuksia pelastustoiminnalle.

*Henkilömäärän hallinta.* Tällä tarkoitetaan henkilömäärän rajoittamista suunnittelun perusteella sekä tunnistamista (missä, kuinka monta). Analyysseissa on otettava myös huomioon ihmisten suhtautuminen (reagointiajat sekä se, miten kulkureitit valitaan – yleensä palataan samaa reittiä kuin on tultu), henkilöstön vaihtuvuus ja se, miten otetaan huomioon poistumisen opastuksen eri keinot.

*Huolto- ja muutostyöt.* Maanalaisten tilojen huoltotyöt tulee ohjeistaa siten, että niiden aikana tai seurauksena ei heikennetä paloturvallisuutta. Huoltotöiden suunnitelmissa tulee tarkastella paloturvallisuuteen vaikuttavat asiat ja esittää niihin liittyvät ratkaisut. Kohteen huoltokirjaan tulee raportoida paloturvallisuuteen vaikuttavat tehdyt toimenpiteet. Kohteen käyttötavan tai tilajaon muutokset vaativat erillisen paloturvallisuustarkastelun, ellei niitä ole alkuperäisissä suunnitelmissa otettu huomioon. Kaikki tehdyt muutokset ja niiden seuraukset paloturvallisuusjärjestelyihin tulee dokumentoida.

*Rakentamisen aikainen paloturvallisuus.* Maanalaisten tilojen rakentamisen aikaisen paloturvallisuuden suunnittelussa voidaan hyödyntää valmiin tilan palon kehittymisen ja poistumiseen tarvittavien aikojen tuloksia suoraan vain niiltä osin kuin tilaratkaisut, tekniset laitteet ja muut olosuhteet ovat identtisiä. Muuten analyysit rakentamisen vaiheen tilanteita ja olosuhteita varten on tehtävä erikseen.



## 6.4.2 Palotilanteen hallinta

*Henkilökunnan toiminta.* Henkilökunnan koulutuksesta palotilanteiden varalta tulee huolehtia. Koulutuksessa tulee kiinnittää huomiota mm. seuraaviin asioihin: kohteen uhkakuvien tiedostaminen, yleisen siisteyden ja järjestyksen ylläpito, palotilanteen tehtävät ja työnjako, kohteessa työskentelevien ja vierailevien henkilöiden toiminnan seuranta sekä tarvittaessa järjestyksen ylläpito poistumistilanteessa. Henkilökunnan toimintavalmiutta tulee ylläpitää säännöllisin harjoituksin. Palotilanteiden varalta henkilökuntaa tulee ohjeistaa myös siitä, miten ihmiset suhtautuvat (mahdollinen paniikki, miten saada tilanne hallintaan) ja kuinka yleisesti ihmiset pyrkivät poistumaan siihen suuntaan, mistä ovat tulleet. Lisäksi on mietittävä, miten henkilöstön vaihtuvuus otetaan huomioon.

*Kuulutukset.* Henkilöturvallisuutta voidaan merkittävästi parantaa huolehtimalla sopivalla tavalla toteutettavista kuulutuksista poistumisen ohjaamiseksi oikeaan suuntaan tai oikeisiin suuntiin. Kuulutuksissa annettavien ohjeiden tulee perustua varmistettuun tietoon.

*Liikuntarajoitteiset ja liikuntakyvyttömät.* Evakuointisuunnitelmissa tulee arvioida kohteessa olevien liikuntarajoitteisten ja liikuntakyvyttömien määrät ja suunnitella kohteeseen soveltuvat evakuoinnin toimintatavat.

*Poistumismahdollisuuksien varmentaminen.* Poistumisolosuhteiden varmentamiseksi tulee poistuvia ohjata niille uloskäytävälle, joille voidaan turvata korvausilman saanti tai savun pysyminen poissa hengityskorkeudelta (esim. paineistuksen avulla). Henkilökunnan toimintakykyä voidaan parantaa mm. pelastautumismaskin avulla.

*Savunpoisto.* Savunpoiston mitoituksen tulee perustua tapauskohtaiseen tarkasteluun. Aina tarkastelun ei tarvitse olla virtaussimulointi, mutta usein virtaussimulointi voi olla tarpeen savunpoiston todellisen suorituskyvyn arvioimiseksi. Maanalaisissa tiloissa tulee kiinnittää erityistä huomiota korvausilman saantiin.

*Paineistus.* Poistumisreittien suojaukseen käytettävä paineistus pitää mitoittaa tapauskohtaisen simuloinnin tai maanalaisiin tiloihin soveltuvan ohjeen avulla. Yleisen, maanpäällisten kerrostalojen rappukäytävien suojaukseen tarkoitetun ohjeen soveltuvuus maanalaisiin tiloihin on kyseenalainen.

*Pelastushenkilöstön turvallisuus.* Pelastustehtävissä tulee ottaa huomioon paikallisetkin palopesäkkeet, jotka voivat aiheuttaa esim. betonin ja kalliopinnan lohkeilua. Myös näkyvyys saattaa olla käytännössä olematon, joten sen seuraukset tulee suunnitella kohdekohtaisesti. Jo 40 metriä ylittävät savusukellusetasuudet ovat erittäin vaativia.

*Erityisratkaisut.* Kohdekohtaiset erityiset palon aikaiset toimintaratkaisut tulee suunnitella ennalta ja määrittellä olosuhteet, joissa niitä voidaan käyttää. Tällaisia erityisratkaisuja voivat olla esimerkiksi hissien ja metrojunan käyttö poistumiseen.

### 6.4.3 Yleisiä suosituksia

*Rakennuslupa.* Maanalaisten tilojen toteutuksen yleiseksi ehdoksi ehdotetaan rakennuslupamenettelyä.

*Paloturvallisuussuunnittelun toteutus.* Kohdekohtaista toiminnallista paloturvallisuustarkastelua ehdotetaan pääsääntöiseksi tavaksi maanalaisten tilojen paloturvallisuussuunnittelussa.

*Poistuminen.* Maanalaisista tiloista poistuminen tapahtuu ylöspäin, ja poistumismatkat voivat kokonaisuudessaan olla pitkiä, mikä tulee ottaa huomioon malleissa käytettäviä kulkunopeuksia valittaessa. Poistumisen alkamishetken ja palonilmaisun ajankohdan eroavuudet erilaisissa olosuhteissa tulee ottaa huomioon poistumisanalyyseissa.

Seuraavassa esitetään tässä hankkeessa tarkasteltujen tyyppikohteiden analyyseistä opittuja yleisiä suosituksia.

*Pysäköintihallit.* Poistumisen turvaamiseksi porrashuoneisiin toteutettavien ylipaineistusten suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota seuraavien asioiden osalta: Savun oletetut virtausnopeudet ovat sopusoinnussa oletettuihin tulipaloihin, syntyvä paine-ero ei saa estää ovien avaamista normaalilla tavalla, ja savun poistolle täytyy järjestää toimivat reitit. Riittävän tehokas, olosuhteisiin sopeutettu savunpoisto on turvattava (maan päällä olevien rakennusten ohjeavot eivät ole aina riittäviä). Savulohkoihin perustuvan savunhallinnan on todettu toimivan hyvin pysäköintitiloissa.

*Liikuntatilat.* Tilojen käyttötapojen vaihdellessa tai muuttuessa on aina erikseen tarkastettava paloturvallisuutta, jos aikaisempiin oletuksiin verrattuna käyttäjämäärä (hetkellisenkin) kasvaa tai jos palokuorma kasvaa tai sen sijoittelu ja laatu voivat vaikuttaa turvallisuuteen. Henkilökunnan koulutus tulee järjestää niin, että siinä otetaan huomioon sekä ennalta ehkäisevä että palotilanteen aikainen toiminta. Paikalla olevan henkilökunnan määrä tulee suhteuttaa tiloissa asioivien henkilöiden lukumäärään.

*Metroasemat.* Henkilökunnan koulutus tulee järjestää niin, että siinä otetaan huomioon sekä ennalta ehkäisevä että palotilanteen aikainen toiminta. Esimerkiksi valvomohenkilökunnan koulutuksessa tulisi painottaa valvonnan merkitystä (tuhopoltojen estäminen), palon kehittymisen nopeutta (simulointien hyödyntäminen) sekä tilanteiden hallintaa (poistumisen ohjaaminen, kuulutukset).

*Yhteiskäyttötunnelit.* Palon automaattinen ilmaisu tulee suunnitella siten, että ilmaisiverkosto on riittävän tiheä myös tilanteisiin, joissa savu ei leviä kuin muutaman sadan metrin alueelle. Ajoneuvojen ja muun tilapäisen palokuorman oleminen tiloissa on rajattava mahdollisimman lyhytaikaiseksi. Yleiset turvallisuussuositukset (mm. dieselkäyttöisten ajoneuvojen käyttöpakko sekä liikenteen kulku yhteen suuntaan) todettiin hyödyllisiksi.

## 7. Jatkotoimenpiteet

Palo- ja poistumissimulointimenetelmiä tulee jatkossakin kehittää, jotta ne vastaisivat entistä paremmin käyttäjäkunnan tarpeita. Fysikaalisten mallien suhteen tässä projektissa havaittiin kehitystarpeita mm. seuraavilla alueilla:

- Sprinkleriputkistojen todenmukaisen toiminnan simuloiminen pitäisi toteuttaa siten, että useiden sprinklereiden laukeaminen pienentää suutinkohtaista vesimäärää.
- Palotehon ennustamiseen tarvittavia malleja tulee jatkuvasti kehittää, jotta oletetusta palonkehityksestä päästään lähemmäksi palon kehittymisen ennustamista. Esimerkiksi kaasutiiviissä tiloissa syntyvien painevaikutusten mallintaminen vaatii jatkokehitystä.
- Palosimuloinnin ja evakuoinnin laskenta tulee voida yhdistää tavalla, joka ottaa huomioon ihmisten ja tulipalon väliset vuorovaikutukset. Savun näkyvyyttä heikentävän vaikutuksen tulee näkyä evakuointilaskennassa.

Palosimuloinnin käytettävyyden kannalta merkittävin kehitystarve liittyy simuloinnin lähtötietojen nopeaan ja luotettavaan generoimiseen. Tulevaisuudessa simulointi pitää pystyä yhdistämään rakennusten tuotemalleihin ja niistä saataviin yksityiskohtaisiin 3D-esityksiin, jotta palosimulointi muodostuisi luontevaksi osaksi suunnitteluprosessia ja tapahtuisi mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Nykyisessä muodossaan simulointi on hyvin työlästä ja virhealtista, mikä rajoittaa sen käyttöä vain erityiskohteisiin.

Poistumiseen liittyvä suurin haaste on ihmisten ja heidän ympäristönsä välisten fyysisten ja psyko-sosiaalisten vuorovaikutusten systemaattinen selvittäminen. Ratkaisevan tärkeää on sekä laskennassa käytettävien syöttötietojen realistisuus että laskennan antamien tulosten oikeellisuus. Syöttötietojen hankkiminen ja luominen vaatii poikkitieteellistä lähestymistapaa, joka ottaa huomioon ihmisen käyttäytymisen. Tulosten oikeellisuuden varmistaminen vaatii huolellisesti valmisteltuja kokeita, joissa ihmisten liikettä havainnoidaan systemaattisesti ja liikkeestä kerätään määrällistä tietoa. Kokeet on tehtävä täydessä mitataavassa, jotta saadaan esiin ihmisten määrän vaikutus poistumisen dynamiikkaan.

Tässä julkaisussa esitetyt palo- ja henkilöturvallisuuteen liittyvät analyysit ja taustatiedot on syytä saada maanalaisten tilojen paloturvallisuussuunnittelun ohjeen muotoon. Tämä ohje onkin suunniteltu toteutettavaksi Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n oppaan muodossa.

Tilastojen nykyistä paremman hyödynnettävyyden kannalta olisi tarpeen, että onnettomuustietokanta PRONTOssa maanalaiset tilat otettaisiin omaksi alakohdakseen rakennuspaloihin. Tällöin niistä saataisiin rakennusselosteen kautta täsmällistä ja käyttökelpoista tietoa.

Lainsäädännön osalta on tarpeen saada rakennuslupamenettely pakolliseksi kaikille maanalaisille tiloille, jotta voidaan varmistua siitä, että niiden paloturvallisuudesta huolehditaan asianmukaisesti koko maassa.

## Lähdeluettelo

Anon. 1992. Fire Safety Journal, Vol. 18, No. 1. Special Issue: The King's Cross Underground Fire. 123 s.

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](http://www.2050consulting.com/crowd_safety.htm). [Viitattu 20.9.2005.]

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.

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.

Drysdale, D. 1995. Thermochemistry. Teoksessa: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2. painos. Quincy, MA: Society of Fire Protection Engineers. S. 1–83. ISBN 0-87765-354-2.

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.

FIPEC. 2000. Fire Performance of Electric Cables – new test methods and measurement techniques. Final Report on the European Commission SMT Programme Sponsored Research Project (SMT4-CT96-2059). Interscience Communications Limited. 410 s. ISBN 0-9532312-5-9.

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.)

Hietaniemi, J., Mangs, J. & Hakkarainen, T. 2001. Burning of Electrical Household Appliances. An Experimental Study. VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2084. Espoo: VTT. 60 s. + liitt. 23 s.

Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2084.pdf>.

Hopkins, D. 1995. Predicting the Ignition Time and Burning Rate of Thermoplastics in the Cone Calorimeter. NIST-GCR-95-677. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 191 s.

Jin, T. 1978. Visibility Trough Fire Smoke. *Journal of Fire & Flammability*, Vol. 9, s. 135–155.

Joyeux, D., Kruppa, J., Cajot, L.-G., Schleich, J.-B., van de Leur, P. & Twilt, L. 2002. Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings. Final report on Contract No 7215-PP/025, 1 July 1998 to 30 June 2001. EUR 20466 EN (2002). 223 s.

Koffel, W, Aaby, M., Aler C., Gilyeat, S., Klepitch, D., Mayl, E. et al. 2004. Performance-Based Design Analysis – Seattle Transportation Center. Proceedings of the 5th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods. Luxemburg. Case Studies. Vol. 2.

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

Marchant, E. 1989. Book Review: Investigation into the King's Cross Underground Fire. *Fire Safety Journal*, Vol. 15, No. 1, s. 107–109.

McGrattan, K. B., Baum, H. R. & Rehm, R. G. 1998. Large Eddy Simulations of Smoke Movement. *Fire Safety Journal*, Vol. 30, No. 2, s. 161–178.

McGrattan, K. (toim.). 2004. Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical Reference Guide. Special Publication 1018. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 94 s.

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.

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.)

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.

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.

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

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. *Fires and human behaviour*. 2. painos. London, GB: David Fulton Publishers. S. 63–81. ISBN 1-85346-139-3.

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

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., 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., 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., 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., 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.

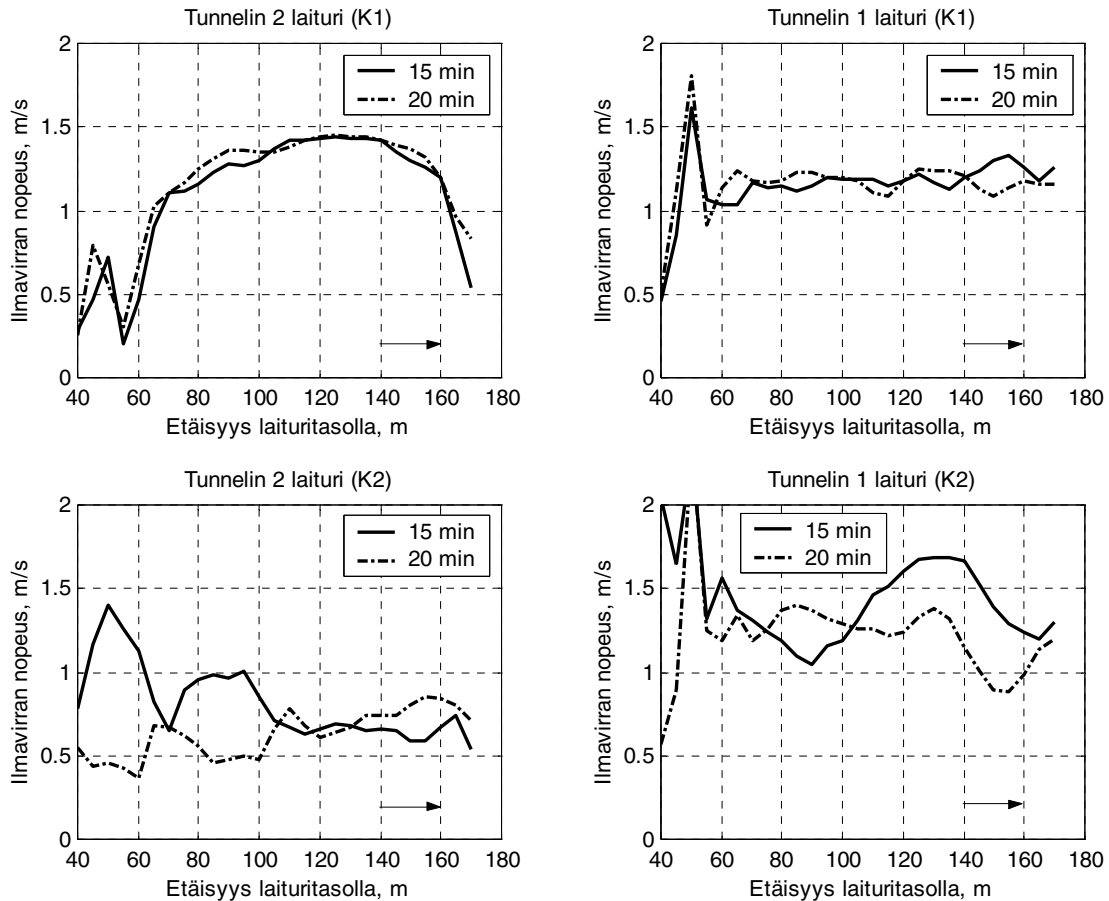
Tilastokeskus. 2004. Rakennusluokitus 1994. Saatavissa:  
[http://www.stat.fi/tk/tt/luokitukset/index\\_muut\\_keh.html](http://www.stat.fi/tk/tt/luokitukset/index_muut_keh.html). [Viitattu 3.11.2004.]

Weckman, H. 2005. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. Tehtävä B: Poistumisturvallisuus. VTT Tiedotteita 2319. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 93 s. + liitt. 13 s. ISBN 951-38-6757-9.  
<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2319.pdf>.

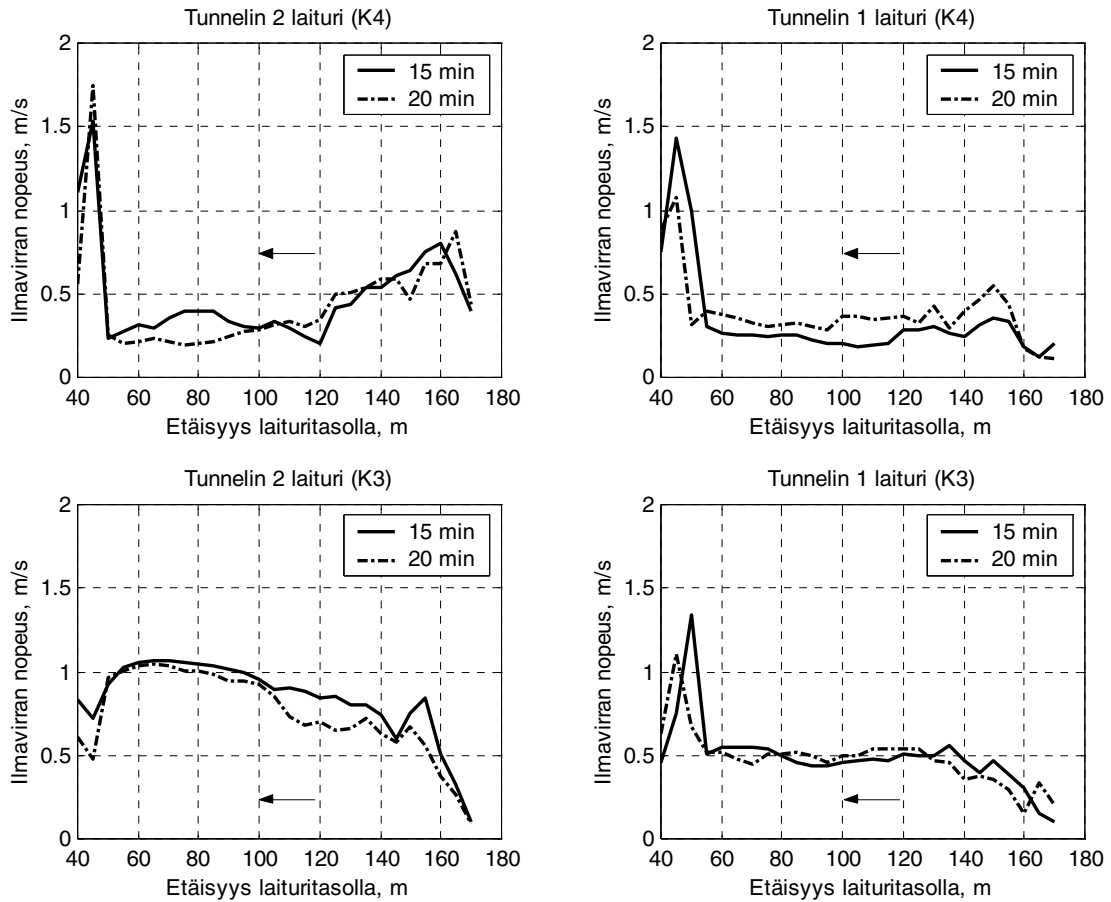


## Liite A: Simulointituloksia kaapelipalosta laituritasolla: ilmavirran nopeudet

Kuvissa 79 ja 80 esitetään simulointien K1–K4 savunpoiston seurauksena syntyvien ilmavirtausten suuruutta metroaseman laituritasoilla.

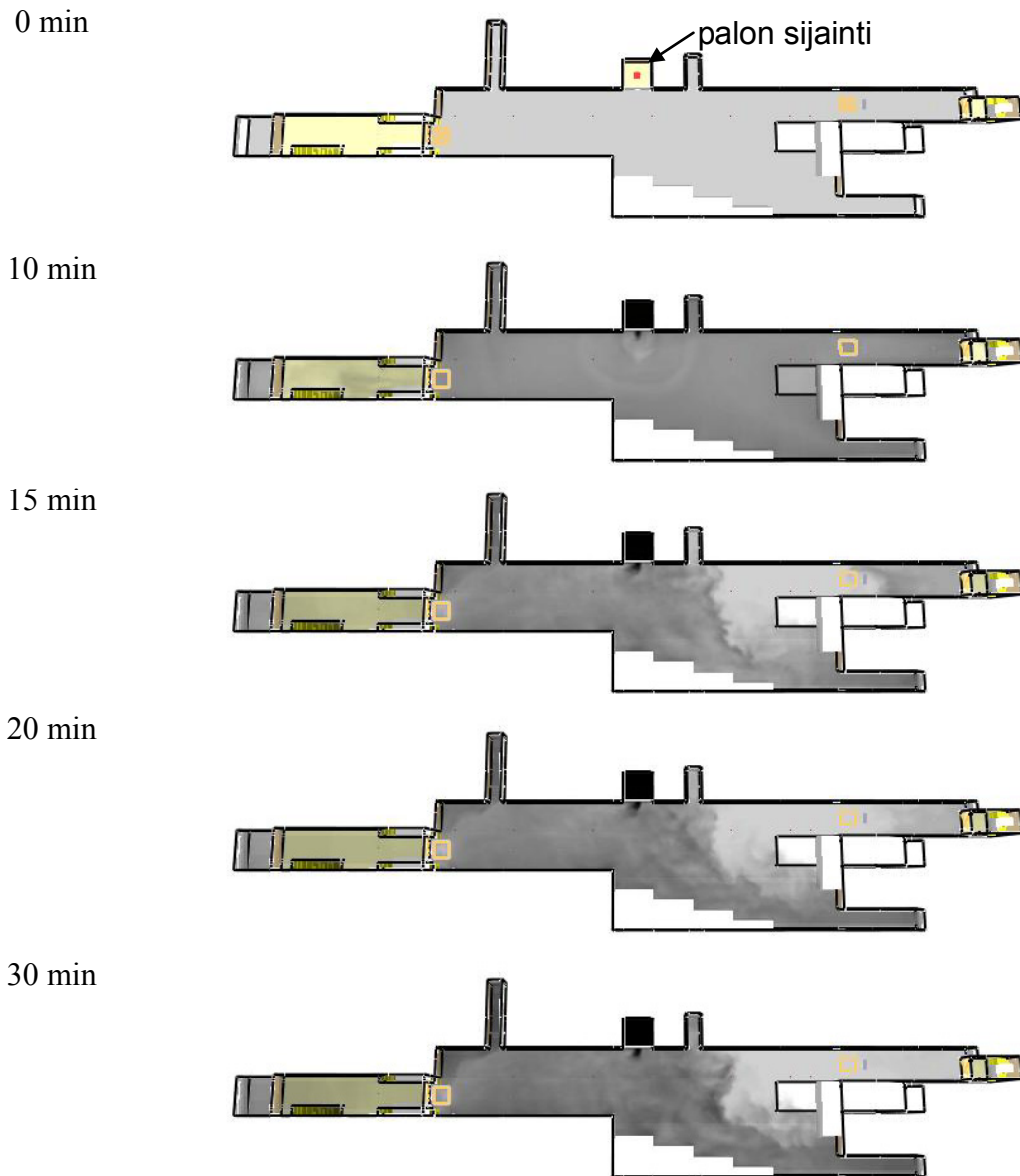


Kuva 79. Savunpoistopuhaltimien aiheuttama ilmavirtaus laituritasolla ajankohtina 15 ja 20 min. Ylemmissä kuvissa kaapelipalon sijainti kohdassa  $x = 170$  m (simulointi K1) ja alemmissa  $x = 40$  m (simulointi K2). Savunpoiston suunta kuvattu nuolilla. Ilmavirtaus mitattu 1,5 m korkeudelta. Savunpoisto käynnistetty hetkellä 10 min.



Kuva 80. Savunpoistopuhaltimien aiheuttama ilmavirtaus laituritasolla ajankohtina 15 ja 20 min. Ylempissä kuvissa kaapelipalon sijainti kohdassa  $x = 170$  m (simulointi K4) ja alemmissa  $x = 40$  m (simulointi K3). Savunpoiston suunta kuvattu nuolilla. Ilmavirtaus mitattu 1,5 m korkeudelta. Savunpoisto käynnistetty hetkellä 10 min.

## Liite B: Simulointituloksia: savunpoisto kioskipalossa lippuhallitasolla

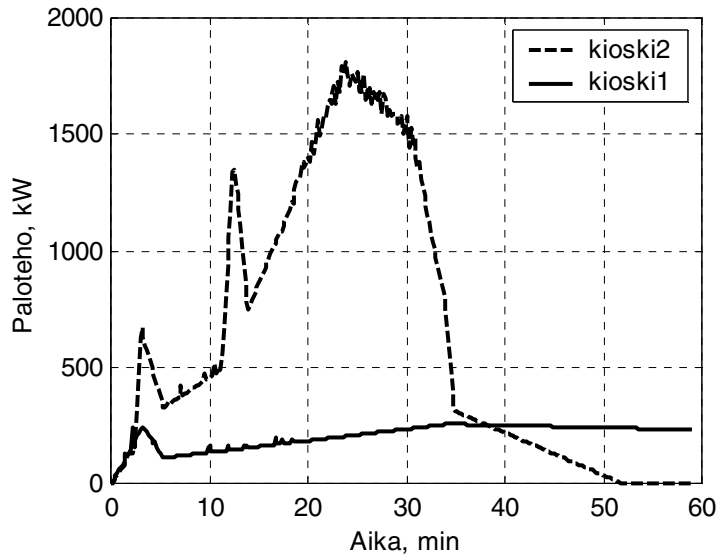


*Kuva 81. Lippuhallitason savunpoistotapahtuma simuloinnissa kioski3. Savunpoisto käynnistyy, ja savunpoistoluukut (avoimet neliöt lippuhallitason katossa) avautuvat ajankohtana 10 min. Savunpoistosta aiheutuva ilmavirtaus tulee liukuportaiden puhal-  
timista.*

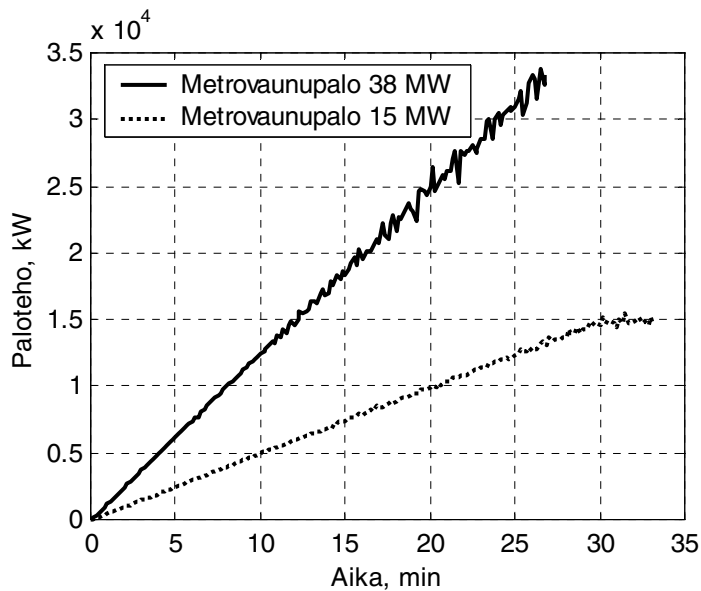


## Liite C: Metroaseman palosimuloinneissa käytetyt palotehokäyrät

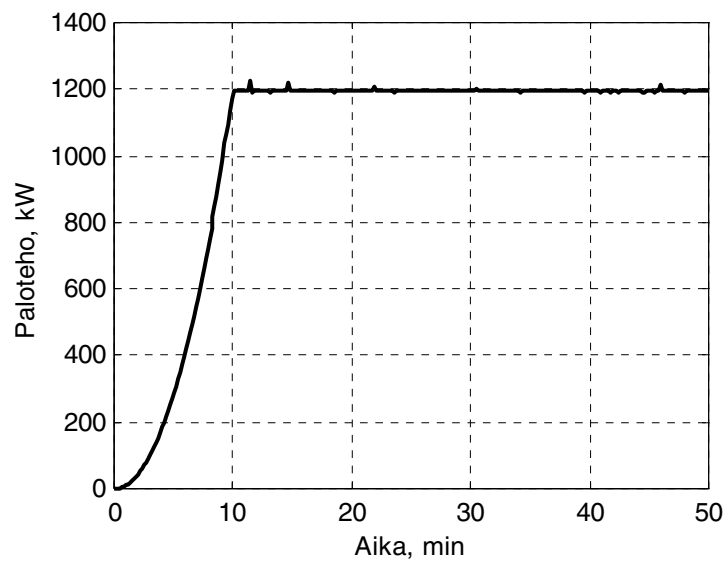
Kuvissa 82–84 esitetään FDS-ohjelman käyttämät palotehot kioski-, metro- ja kaapeli-paloskenaarioissa.



Kuva 82. Kioskipaloskenaariossa käytetyt palotehokäyrät tapauksille, jossa sprinklerit toimivat (kioski1) ja eivät toimi (kioski2).



Kuva 83. Metrovaunupaloskenaarioissa käytetyt palotehokäyrät. Katkoviivalla kuvattu simulointitapauksissa M1–M3 ja yhtenäisellä viivalla tapauksessa M4 käytettyä palotehokäyrää. Palotehokäyrien kulmakertoimet on laskettu siten, että maksimipaloteho (ilmoitettu selitteessä) saavutetaan 30 min kuluessa syttymisestä.



*Kuva 84. Kaapelipaloskenaarioissa käytetty palotehokäyrä.*



## Liite D: 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 m<sup>2</sup> 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 sopuinnussa 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 m × 0,25 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 m/s, ja kunkin henkilön liikkeellelähtösuunnalla on myös satunnainen alkuarvo. Henkilön liikkumisnopeus portaisa alaspäin on 0,5 kertaa esteetön liikkumisnopeus ja ylöspäin vastaavasti 0,35 kertaa. Ohjelma on täysin graafinen, ja kuvaruudulta voidaan havainnollisesti seurata evakuoinnin edistymistä. Kuvassa 85 on esimerkki *Simulex*-ohjelman näytöstä simuloinnin aikana.

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

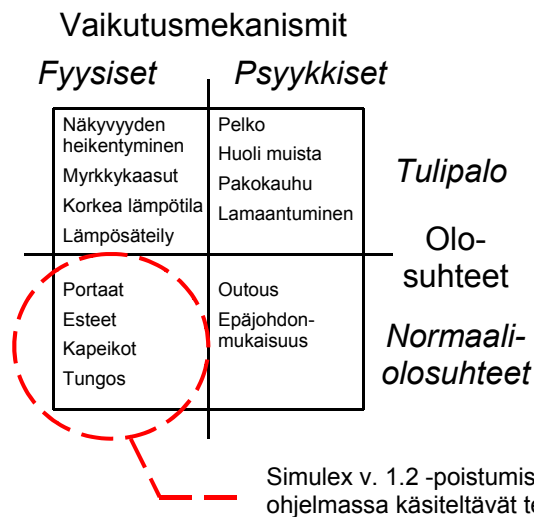
Mallissa otetaan huomioon henkilöiden välisen etäisyyden vaikutus liikkumisnopeuteen. Jos henkilöiden liikesuunnat ja -nopeudet ovat sopivat, toinen henkilö voi ohittaa toisen, minkä jälkeen ohittavan henkilön nopeus taas kasvaa. Ohitusalgoritmia ei käytetä, jos henkilötiheys on yli 2 hlö/m<sup>2</sup>. 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 86 esittämistä poistumisen vaikutusmekanismeista 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 85. SIMULEX-ohjelman näyttö poistumissimuloinnin aikana.



Kuva 86. 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).

## **Liitteen lähdeluettelo**

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>.

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.

Tekijä(t) Hostikka, Simo, Mikkola, Esko, Rinne, Tuomo, Tillander, Kati & Weckman, Henry			
Nimeke <b>Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä</b>			
Tiivistelmä Tässä julkaisussa esitetään taustatietoja ja perusteita maanalaisia tiloja koskevien paloturvallisuuden arvioinnin ohjeiden ja vaatimustasojen pohjaksi. Liikenneväylien tunneleita ei käsitellä lyhyitä viittauksia lukuun ottamatta. Yhteenvedossa esitellään seuraaviin osa-alueisiin liittyviä menetelmiä ja työkaluja: syttymien estäminen, palon kehittyminen, poistumis- ja pelastamisturvallisuus sekä sammutuksen ja savunpoiston vaatimukset. Julkaisussa kuvataan maanalaisten tilojen tulipalojen erityispiirteitä, esitetään tilastotietoja myös muista vastaavankaltaisista tiloista, tuodaan esimerkkikohteiden avulla esiin paloturvallisuusanalyysissä oleellisia tekijöitä, yleistetään yhteenvedossa analyysihin ja paloturvallisuuden parantamiseen liittyviä keskeisiä asioita sekä esitetään lopuksi jatkotoimenpiteitä. Neljästä eri tyyppiä edustavasta maanalaisesta rakennuskohteesta esitetään tehtyjen palo- ja poistumissimulointilaskelmien tulokset. Esimerkkikohteet olivat pysäköintihallina käytetty väestösuoja, urheiluhallina käytetty väestösuoja, metroasema ja yhteiskäyttötunneli. Maanalaisten tilojen palosimuloinnit tulee yleensä tehdä virtauslaskentaan perustuvilla simulointiohjelmilla, jotka pystyvät ottamaan huomioon virtauksen liikemäärän vaikutuksen tunnelimaisessa geometriassa, erilaisten puhaltimien vaikutuksen sekä geometrian monimutkaisuuden. Joissakin yksinkertaisissa tilanteissa, kuten hallimaisen tilan savulla täyttymisen laskennassa, voidaan kuitenkin käyttää vyöhykemalleja. Ihmisten käyttäytymisestä maanalaisissa tiloissa tapahtuvissa tulipaloissa on olemassa varsin niukasti tieteellistä tutkimustietoa. Maanalaisiin tiloihin liittyy joitakin erityispiirteitä, jotka saattavat vaikuttaa ihmisten käyttäytymiseen. Tällaisia ovat mm. vaikeudet hahmottaa maanalainen tila ja tilan eri osien keskinäisiä yhteyksiä, mikä voi vaikeuttaa lyhimmän turvaan johtavan kulkureitin löytämistä. Savukaasujen nouseminen ylöspäin porrashuoneisiin voi myös vaikeuttaa poistumista, ellei porrashuoneiden suunnittelussa asiaan ole kiinnitetty riittävästi huomiota. Esitetyt tulokset luovat pohjan henkilöturvallisuuden parantamiselle ennaltaehkäisyn keinoin pyrittäessä vähentämään tulipaloriskejä, joita aiheutuu maanalaisissa tiloissa työskenteleville sekä tilapäisesti asioiville ja pelastustoimintaan osallistuville.			
Avainsanat fire safety, safety assessments, requirements, underground spaces, parking facilities, underground stations, service tunnels, evacuation, rescue safety, fire simulation			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1000, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6755-2 (nid.) 951-38-6756-0 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Projektinumero R4SU00443	
Julkaisu-aika Joulukuu 2005	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 143 s. + liitt. 9 s.	Hinta D
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: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	



Author(s) Hostikka, Simo, Mikkola, Esko, Rinne, Tuomo, Tillander, Kati & Weckman, Henry			
Title <b>Improvement of fire safety in underground spaces</b>			
Abstract This publication gives background information and basics for the preparation of guide-lines for fire safety assessments and for the setting of requirement levels for under-ground spaces. Traffic tunnels are not considered here except for a few short references. The summary presents methods and tools for the following sectors: prevention of ignition, fire development, evacuation and rescue safety, requirements for fire suppression and smoke extraction. The publication describes specific features of underground fires, statistical information for other similar spaces, essential factors are illustrated by the use of case studies, which are generalised in the summary, important features for the improvement of fire safety and finally a number of further actions are being suggested. Results of fire and evacuation simulations carried out on underground spaces of four different types are presented. The case studies are 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. Fire simulations of underground spaces should in general be carried out using simulation programs based of flow calculations, as they are able to take into account the effects of the momentum of the flow in tunnel geometries, the effects of various fans and blowers and also the complexity of the geometry. In some simple cases, however, zone models can also be used, for instance for the calculation of smoke filling of spaces of hall type. Only very few scientific studies concerning the behaviour of people in underground fires are currently available. Underground spaces present 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. Smoke and combustion gases have a tendency to enter stairwells, which may aggravate the evacuation unless the matter has been sufficiently considered in the design of the stairwells. The presented results create a basis for the improvement of personal safety through preventive measures for the reduction of fire risks to people working in underground spaces and to people engaged in rescue operations or people temporarily visiting under-ground spaces.			
Keywords fire safety, safety assessments, requirements, underground spaces, parking facilities, underground stations, service tunnels, evacuation, rescue safety, fire simulation			
Activity unit VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6755-2 (soft back ed.) 951-38-6756-0 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )			Project number R4SU00443
Date December 2005	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 143 p. + app. 9 s.	Price D
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, Finnish Ministry of the Environment, VTT Technical Research Centre of Finland	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

Tässä julkaisussa esitetään taustatietoja ja perusteita maanalaisia tiloja koskevien paloturvallisuuden arvioinnin ohjeiden ja vaatimustasojen pohjaksi. Julkaisussa kuvataan maanalaisten tilojen tulipalojen erityispiirteitä ja tilastotietoja, tuodaan esimerkkikohteiden avulla esiin paloturvallisuusanalyysseissa oleellisia tekijöitä, yleistetään paloturvallisuuden parantamiseen liittyviä keskeisiä asioita sekä esitetään jatkotoimenpiteitä. Neljästä maanalaisesta rakennuskohteesta esitetään tehtyjen palo- ja poistumissimulointilaskelmien tulokset. Esitetyt tulokset luovat pohjan henkilöturvallisuuden parantamiselle ennaltaehkäisyä keinoihin pyrittäessä vähentämään tulipaloriskejä, joita aiheutuu maanalaisissa tiloissa työskenteleville sekä tilapäisesti asioiville ja pelastustoimintaan osallistuville.

---

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

---