

# Pelastustoimen vasteen simulointi suurpalossa

SIREENI-projektin tulokset

Simo Hostikka | Terhi Kling | Jukka Vaari | Tuomo Rinne |  
Johannes Ketola



# **Pelastustoimen vasteen simulointi suurpalossa**

SIREENI-projektin tulokset

---

Simo Hostikka, Terhi Kling, Jukka Vaari & Tuomo Rinne  
VTT

Johannes Ketola  
Pelastusopisto

ISBN 978-951-38-7895-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 2242-122X (URL: <http://www.vt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2012

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT  
PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)  
02044 VTT  
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT  
PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)  
FI-02044 VTT  
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland  
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)  
FI-02044 VTT, Finland  
Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Toimitus Anni Repo

## **Pelastustoimen vasteen simulointi suurpalossa**

SIREENI-projektin tulokset

**Simo Hostikka, Terhi Kling, Jukka Vaari, Tuomo Rinne & Johannes Ketola.**

Espoo 2012. VTT Technology 61. 77 s. + liitt. 13 s.

## **Tiivistelmä**

SIREENI-projektissa kehitettiin uusia menetelmiä pelastustoiminnan ajallisen keston ja tehokkuuden arviointiin suurpalotilanteessa. Pelastustoiminnan ajallista kehitystä simuloitiin stokastisella operaatioaikamallilla, jossa kunkin toimijan tehtäviä mallinnetaan viiveillä sekä virheistä tai poikkeuksellisista olosuhteista johtuvilla lisäviiveillä. Malli ottaa huomioon eri toimijoiden väliset riippuvuudet, ja sen avulla voidaan simuloida koko pelastustoimintaan liittyvän toimijaverkoston yhteistoimintaa. Mallin parametreja, viiveitä, lisäviiveitä sekä lisäviiveiden toteutumisen todennäköisyyksiä käsitellään satunnaismuuttujina, joiden jakaumat määritetään kokeellisesti tai asiantuntija-arvioiden avulla. Simuloinnin tuloksena saadaan pelastustoimen resurssien kertymä ajan funktiona.

Numeeristen palosimulointien avulla määritettiin vesitykkien tuottama jäähdytysteho vesitykkien määrän ja käytettävän funktiona. Ensimmäinen määritettiin palavan kohteen läheisyydessä oleviin pintoihin kohdistuva lämpörasitus simuloimalla paloa ilman jäähdytystä. Vesitykin suihkulle luotiin virtauslaskentamalli ja mallin avulla simuloitiin lämpörasituksen muutosta erilaisilla vesitykkien lukumäärän ja suuntauksen yhdistelmillä. Lisäksi simuloitiin kiinteään sammutusjärjestelmän tuottamaa jäähdytysvaikutusta kahdella erilaisella suutintyyppillä ja erilaisilla vesivuon arvoilla.

Tulokset osoittavat, että monimutkaisen toimijaverkoston suorittaman pelastustoiminnan määrällinen arviointi on erittäin vaikeaa, ellei mahdollista ottaa huomioon eri toimenpiteisiin ja vaiheisiin liittyvät epävarmuudet. Mallinnuksen hyödyt syntyvät kahdessa vaiheessa: Alkuvaiheessa määritellään toimijat, heidän roolinsa ja keskinäiset riippuvuudet. Tämä prosessi vähentää toimintaan liittyvää hämmennystä ja väärinkäsityksiä sekä auttaa toimijoita tunnistamaan omaan ja yhteistoimintaan liittyviä kehityskohteita. Simuloinnin tuloksena saatava hyöty taas liittyy pelastustoimen vaikuttavuuden mittaamiseen ja resursointiin sekä sovelluskohteen riskien arviointiin. Yhdistämällä operaatioajan ja jäähdytystehon simulointitulokset pystyttiin tuottamaan jäähdytystehon ajallinen kertymäfunktio sekä todennäköisyysjakaumat tietyn jäähdytystehon saavuttamiseen kuluvalle ajalle. Nämä ovat olennaisen tärkeitä tuloksia, kun halutaan arvioida pelastustoimen vaikuttavuutta suurpalossa.

Sovellusesimerkinä tarkasteltiin Tampereen rautatieaseman eteläpuolisen rataalueen päälle rakennettavan kannen alapuolista säiliövaunupaloa. Esimerkkiin liittyvät yksityiskohdat valittiin siten, että ne palvelisivat mahdollisimman hyvin simulointimenetelmien kehitystä ja testausta.

### **Asiasanat**

response time, emergency service, simulation, water cannon, FDS, Monte Carlo

## Alkusanat

Pelastustoimen vasteen simulointi suuronnettomuuksissa (SIREENI) -projekti toteutettiin VTT:n ja Pelastusopiston yhteistyönä vuosina 2011–2012. Projektin rahoittajia olivat Palosuojelurahasto, sisäasiainministeriö, Liikennevirasto sekä VTT ja Pelastusopisto.

Projektille nimetty ohjausryhmä osallistui aktiivisesti työn suuntaamiseen ja edesauttoi sovelluskohteen parissa tehtävän työn saamista liikkeelle. Ohjausryhmän jäseniä olivat Taito Vainio, Outi Luukkonen, Pekka Mutikainen, Esa Kokki ja Eila Lehmus.

Tampereen keskusareenaan liittyvään tiedonhankintaan ja ongelmanmäärittelyyn osallistuivat ainakin seuraavat henkilöt: Jonas Eriksson (VR, ohjauspalvelu), Laura Järvinen (VR Track OY), Juha Kaivonen (NCC Rakennus OY), Jari Kallio (NCC Rakennus Oy), Atte Kanerva (Liikennevirasto), Johannes Ketola (Pelastusopisto), Juha-Pekka Laaksonen (L2), Timo Lopenen (Pelastusopisto), Matti Honkanen (Pelastusopisto), Outi Luukkonen (Liikennevirasto), Arto Malin (Eltel), Timo Meuronen (Aihio Arkkitehdit), Pekka Mutikainen (Tampereen aluepelastuslaitos), Nina Mähönen (VR Transport), Ilpo Nurminiemi (Pöyry), Matti Ovaska (VR Track Oy), Lauri Paavilainen (Tampereen aluepelastuslaitos), Tomi Pulkkinen (Ramboll), Esa Roisko (VR, vetopalvelu), Risto Röman (VR Track Oy), Juha Salovaara (VR Track Oy), Reino Smolander (Pöyry), Jukka-Pekka Sääski (Eltel), Teemu-Taavetti Toivonen (Tampereen aluepelastuslaitos) ja Taito Vainio (SM, Pelastusosasto). Häätokeskuksen toiminnan määrittelyyn osallistuivat Pelastusopiston hätäkeskusopetusyksiköstä Titta Lindholm, Juha-Pekka Iso-Ilomäki ja Timo Laatikainen.

# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä .....</b>	<b>3</b>
<b>Alkusanat.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Johdanto .....</b>	<b>7</b>
1.1 Taustaa.....	7
1.2 Työn tavoitteet ja toteutus .....	8
<b>2. Sovellusesimerkki.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Operaatioaikamallinnus .....</b>	<b>14</b>
3.1 Menetelmän kuvaus.....	14
3.2 Toimijat ja roolit .....	15
3.3 Laskentamallin kuvaus.....	20
3.4 Aineiston kerääminen .....	25
3.4.1 Asiantuntija-arviot .....	25
3.4.2 Vesitykkiselvitysten mittaukset .....	26
3.4.2.1 Mittausjärjestelyt .....	26
3.4.2.2 Tulokset.....	27
3.5 Operaatioaikamallin parametrit.....	33
3.6 Operaatioaikasimulointien tulokset .....	36
3.7 Vertailu tilastoihin .....	42
<b>4. Palosimulointi .....</b>	<b>44</b>
4.1 Menetelmän kuvaus.....	44
4.2 Laskentamallin kuvaus.....	44
4.3 FDS-mallin parametrit.....	47
4.3.1 Palaminen .....	47
4.3.2 Materiaalit ja pinnat.....	48
4.3.3 Vesisuureet .....	49
4.4 FDS-simulointien tulokset .....	51
4.4.1 Palo ilman jäädytystä .....	51
4.4.2 Vesitykkien simulointi.....	53
4.4.2.1 Vesitykin kantama .....	53
4.4.2.2 Vesitykkien sijoittelu .....	56

4.4.2.3	Vesitykkien jäähdytysvaikutus.....	58
4.4.3	Sprinklauksen simulointi.....	61
4.4.3.1	Suutintyytit .....	61
4.4.3.2	Suutinten sijoittelu .....	63
4.4.3.3	Sprinklerijärjestelmien jäähdytysvaikutus.....	64
4.4.4	Havainnot palosimuloinneista.....	67
<b>5.</b>	<b>Simulointitulosten yhdistäminen.....</b>	<b>69</b>
5.1	Deterministinen tarkastelu.....	69
5.2	Tulosten yhdistäminen todennäköisyyspohjaisesti .....	71
<b>6.</b>	<b>Johtopäätökset .....</b>	<b>73</b>
6.1	Simulointimenetelmät.....	73
6.2	Johtopäätökset sovellusesimerkin simuloinneista.....	74
6.3	Jatkotutkimustarpeet.....	75
	<b>Lähdeluettelo.....</b>	<b>76</b>

## **Liitteet**

Liite 1: Kartta alueesta

Liite 2: Toimijoiden roolit ja niiden väliset kytkennät

Liite 3: Monte Carlo -simuloinnit, tapaus 1: Toimintavalmiusajat mallinnettiin pelastuslaitoksen operaatiosuunnitelman mukaisesti

Liite 4: Monte Carlo -simuloinnit, tapaus 2: Toimintavalmiusajat laajennetaan jakaumiksi

Liite 5: Keskimääräisen toimintavalmiusajan muuntaminen jakaumaksi



# 1. Johdanto

## 1.1 Taustaa

Pelastuslaitokset ja palokunnat ovat tärkeä osa kuntien ja suurten teollisuuslaitosten turvallisuusinfrastruktuuria. Varautuminen suuronnettomuuksiin on yksi pelastustoimen strategiassa asetetuista tavoitteista [1]. Julkisen talouden säästö- ja tehostamistoimet kuitenkin edellyttävät, että resurssien jakaminen on mahdollisimman optimaalista ja että pelastustoimen yhteiskunnalle tuottamaa lisäarvoa pystytään mittaamaan.

Suurpalojen menestyksellä sammuttaminen edellyttää, että käytössä on riittävästi resursseja (henkilöstöä, kalustoa, vettä) ja että resurssit saadaan riittävän nopeasti käyttöön. Usein organisaation tehokkuuden arviointi perustuu tilastoihin. Ne eivät kuitenkaan sisällä riittävästi aineistoa suurpaloista, eikä suurpaloihin liittyviä riskejä tai resurssitarpeita pystytä niiden avulla perustelemaan. Toimintaa suurpaloissa voidaan arvioida myös harjoitusten yhteydessä. Harjoitukset ovatkin tehokas tapa toimintatavoissa ja yhteysverkostoissa olevien puutteiden havaitsemiseen. Tieto on luonteeltaan enimmäkseen kvalitatiivista, ja mahdollisten numeeristen arvojen edustavuutta on vaikea arvioida. Empiiristä tietoa pelastuslaitoksen toimien vaatimista ajoista huoneistopaloissa ja liikenneonnettomuuksissa ovat keränneet Suomessa Jäntti ym. [2]. Pyrkimys sammutus- ja pelastustoimien ajallisen keston ymmärtämiseen on nähtävissä myös sisäasiainministeriön julkaisemassa toimintavalmiuden suunnitteluohjeessa, jossa pelastustoimen toimintavalmiusaika on jaettu lähtö- ja ajoaikaan sekä ensitoimenpiteisiin kuluvaan aikaan [3].

Tässä työssä tutkimme matemaattisen mallinnuksen ja simuloinnin käyttöä pelastustoimen vasteen arvioimiseksi. Wiiikinkoski ja Rantanen ovat työssään kokeilleet formaalin prosessimallinnusmenetelmän (BPMN, Business Process Model Notation) soveltamista moniviranomaisyhteistyön kuvaamiseen [5]. Työssä arvioitiin eri tietokoneohjelmien soveltuvuutta tehtävään ja todettiin, että prosessikuvauksen käyttäminen helpottaa laajan, kompleksisen moniviranomaistilanteen tapahtumien hahmottamista [5]. Menetelmä auttoi havaitsemaan kriittiset toimet ja eri toimijoiden väliset yhteydet. Työssä kehitettyjä malleja ei kuitenkaan käytetty organisaation toiminnan kvantitatiiviseen arviointiin. BPMN-mallinnusta on Suomessa sovellettu mm. hätäkeskusten toimintaprosessin arviointiin [6]. Palokunnan toiminnan ajoittamisen mallinnusta ovat aiemmin tutkineet Marchant ym. [4], jotka kehittivät

tapahtumapohjaisen menetelmän palokuntien ja paloinsinöörien työkaluksi (Fire Brigade Intervention Model).

Ydinvoimaloiden paloturvallisuustutkimuksen puitteissa on VTT:ssä kehitetty stokastinen malli organisaation toiminnan kvantitatiiviseen mallintamiseen ja simulointiin [7, 8]. Mallin avulla on tähän mennessä arvioitu ydinvoimalan palokunnan toiminta-aikaa kaapelitilan palotilanteessa. Mallin kehittäminen lähti liikkeelle ihmisen toiminnan luotettavuuden arvioinnista (Human Reliability Analysis, HRA), ja sen avulla yhdistetään organisaation toimien ajoitus todennäköisyyspohjaiseen palosimulointiin. Mallia käytetään Monte Carlo -simuloinnin tapaan, valiten eri toimien kestot ja niihin liittyvien virheiden esiintyminen satunnaisesti ennalta määrityistä todennäköisyysjakaumista. Kuten Wiikinkoski ja Rantanen [5] aiemmin, myös VTT:n työssä todettiin, että mallinnuksen suurin hyöty liittyy monen toimijan yhteistoimintaa vaativien tehtävien tunnistamiseen ja kuvaukseen. Jo ensimmäisessä sovelluksessa pystyttiin tuottamaan kvantitatiivinen arvio sammuttamiseen kuluva ajasta, yhdistäen lähtötietoina harjoituksissa kerättyä mittaustietoa ja asiantuntija-arvioita.

Eräs suurpalon sammuttamiseen liittyvistä haasteista on riittävien resurssien arvioiminen ja hälyttäminen riittävän aikaisin. Vakiintuneet käsitteet, kuten pelastusyksikkö, -joukkue ja -komppania, auttavat hälytyksen määrittelyä, mutta yhteys palon fyysisen koon tai kehityksenopeuden ja tarvittavien sammutusresurssien välillä voi käytännön tilanteessa olla vaikeasti hahmotettava. Tässä työssä tutkittiin virtauslaskentaan perustuvan palosimuloinnin hyödyntämistä sammutustoimien resursoinnin suunnittelussa. Samalla tutkittiin vesitykkien käyttöön liittyviä taktisia valintoja, joiden kokeellinen tutkiminen olisi vaikeaa.

## 1.2 Työn tavoitteet ja toteutus

Päätavoitteena oli pelastustoimen vasteen arviointiin käytettävien menetelmien kehittäminen. Päähuomio kiinnitettiin suurpalojen sammuttamiseen tarvittavan ajan ja resurssien arviointiin. Tavoitteena oli myös lisätä tietoa pelastuslaitoksen sammutussuihkujen ominaisuuksista. Työ voi osaltaan parantaa sammutushenkilöstön työturvallisuutta suurpaloissa.

Operaatioaikamallinnuksen avulla tuotettiin tietoa siitä, missä ajassa sammutus- ja jäähdytysresurssit ovat käytettävissä ja toimintavalmiina. Simuloinnin tuloksena pidettiin vesitykkien toimintavalmiusaikojen ajallisia jakaumia. Palosimuloinnin avulla taas selvitettiin, kuinka suuri jäähdytysvaikutus saavutetaan tietyllä määrällä jäähdytysresursseja. Resursseina käsiteltiin vesitykkeitä eri konfiguraatioissa. Vertailun vuoksi simuloitiin sprinklerien toimintaa eri virtaamilla. Lopuksi muodostettiin käsitys jäähdytysvaikutuksen ajallisesta kehityksestä yhdistämällä simuloitujen toimintavalmiusaikojen jakaumat jäähdytysvaikutuksiin. Työssä ei tarkasteltu palon vaikutuksia rakenteille tai palon leviämiskä. Myöskään vesitykkien tai sprinklereiden sammutusvaikutusta ei tutkittu.

Työ toteutettiin projektin alussa valitun sovellusesimerkin puitteissa. Näin varmistettiin, että pystytään vastaamaan käytännön elämässä esiintyviin haasteisiin.

Valittu sovellusesimerkki osoittautui työn edetessä niin vaativaksi, että simulointimenetelmien yleinen kehittäminen jäi varsin vähäiseksi. Sovellusesimerkin mallinnus tapahtui VTT:n tutkijoiden toimesta. Mallin luomiseksi ja tarvittavien parametrien määrittämiseksi järjestettiin työpajatyypisiä kokouksia kohteen suunnitteluun ja operointiin liittyvien tahojen kanssa.

Julkaisun rakenne on seuraava: Luvussa 2. esitellään aluksi työn pohjaksi valittu sovellusesimerkki (Tampereen keskusareena), koska suurin osa mallinnustyöstä on ollut hyvin sovelluskeskeistä. Luvussa 3 raportoidaan operaatioaikamallinnuksen menetelmä, lähtötietojen keräämisen käytetyt menetelmät, itse lähtötiedot sekä operaatioaikamallinnuksen tulokset tiivistetysti. Simulointitulokset on pääosin esitetty liitteissä. Luvussa 4 esitellään vesitykkien toimintaa kuvaava simulointimalli sekä simulointitulokset. Lisäksi esitetään simulointitulokset sprinklerien toiminnasta. Luvussa 5 yhdistetään operaatioaika- ja sammutusmallien tulokset toisiinsa ja luvussa 6 esitetään johtopäätökset sekä jatkotutkimustarpeet.

## 2. Sovellusesimerkki

Tampereen rautatieaseman eteläpuolisen rata-alueen päälle on suunnitteilla kansirakenne (Liite 1), jonka päälle on tarkoitus rakentaa monitoimihalli, toimisto- ja asuinrakennuksia sekä kaupallisia tiloja. Sovellusesimerkiksi valittiin kyseisen kansirakenteen alapuolella tapahtuva palavan nesteen säiliövaunun palo. Aineesta riippuen kyseessä on enintään 2,5 TJ palokuorma; muuten kansirakenteen alla on vain vähäinen määrä palokuormaa (alle  $600 \text{ MJ/m}^2$ ). Alustavan turvallisuus- ja paloteknisen suunnitelman mukaan kannen kantavat rakenteet mitoitetaan kestäämään palavan nesteen säiliövaunun palo, jossa 200 MW paloteholla polttoaine riittää teoreettisesti noin 3,5 tunnin paloon [9]. Todellisuudessa paloteho jää pienemmäksi kuin laskennallinen paloteho eikä kaikki polttoaine osallistu palamiseen.

Palavan nesteen säiliövaunut pyritään tulipalotilanteessa ensisijaisesti ajamaan pois kannen alta. Nyt kuitenkin oletetaan tämän olevan syystä tai toisesta mahdollista. Tällainen tilanne voi syntyä, jos vaunut ovat esimerkiksi ilkvallan tai kolarin seurauksena suistuneet raiteiltaan tai jarruputket tai johtimet ovat palon johdosta vaurioituneet. Käytännössä vaunu ei pala, vaan vuoto palaa vaunun alla; palava neste esiintyy vaunun alla lammikkona tai suihkuaa. Riskinä on, että kyseinen tai viereinen vaunu kuumenee niin että repeää. Tilanteessa on tärkeää selvittää nopeasti, mikä aine on kyseessä, sillä se vaikuttaa pelastushenkilöstön varusteisiin ja toimintatapaan [10]. Tämä tutkimus rajataan kuitenkin tulipaloihin eikä esim. myrkkypilven leviämistä tai ihmisjoukkojen evakuoimista tarkastella. Tarkastelu rajataan koskemaan pelastustoimintaa kansirakenteen alapuolisissa tiloissa. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään kokonaisuudessaan kansirakenteen päällä olevat rakenteet ja toiminta.

Ennen pelastustoiminnan aloittamista ajojohtimeen on tehtävä ns. hätämaadoitus [11]. Hätämaadoitus tehdään onnettomuuspaikan molemmin puolin joko paluukiskoon tai metalliseen ratajohtopylvääseen. Ellei paikalla ole sähköalan ammattihenkilöä, hätämaadoituksen tekeminen on tehtävään koulutetun veturimiehistön, työkoneenkuljettajan, pelastuslaitoksen tai rautatieyrityksen pelastusyksikköön kuuluvan henkilön velvollisuus. Ennen hätämaadoituksen tekemistä on otettava yhteys käyttökeskukseen, joka erottaa jännitteestä kaikkien raiteiden ajojohtimet onnettomuuspaikan molemmin puolin erotusjaksosta erotusjaksoon. Hätämaadoituksen teon jälkeen sähköalan ammattihenkilön tulee tarkistaa maadoitukset ja tehdä tarvittavat lisämaadoitukset.

Liikennevirasto ylläpitää www-sivuillaan ohjetta varautumisesta rautatieonnettomuuksiin [12]. Ohje määrittää toimenpiteet, joihin tulee ryhtyä onnettomuuden sattua, ja kuinka onnettomuuksiin sekä poikkeustilanteisiin tulee varautua ennakolta. Ohje koskee Liikenneviraston omaa toimintaa sekä kaikkia niitä yrityksiä ja yhteisöjä, jotka harjoittavat liikennöintiä Suomen valtion rataverkolla tai soveltuvin osin yksityisraiteilla (liikennöitsijät). Lisäksi ohje koskee yrityksiä ja yhteisöjä, joiden kanssa Liikennevirasto on tehnyt palvelusopimuksen, kuten liikenteenohjaus tai kunnossapito (palveluntuottajat). Ohjeen perusteena ovat rautatielaki (304/2011), pelastuslaki (379/2011) ja asetus vaarallisten aineiden kuljetuksesta rautatiellä (195/2002).

Rautatieonnettomuuden tapahduttua on noudatettava pelastustoimesta annettuja lakeja, asetuksia ja ohjeita. Pelastuslaitoksen toiminnan toimintavalmiusvaatimukset määrittää sisäasiainministeriön julkaisemassa toimintavalmiuden suunnitteluohjeessa [3]. Suunniteltu kansirakenne sijaitsee niin sanotulla ensimmäisellä riskialueella, joten ensimmäisen pelastusyksikön tulee saavuttaa kohde pääsääntöisesti kuuden minuutin kuluessa hälytyksestä, ja pelastusjoukkue pyritään saamaan kokonaisuudessaan paikalle 20 minuutin kuluessa hälytyksestä. Pelastusjoukkue hälytetään, jos hätäilmoituksen sisällön tai kohteen laadun perusteella on pääteltävissä, ettei pelastusyksikkö riitä tehtävän suorittamiseen. Pelastuskomppania hälytetään tilanteisiin, joissa pelastusjoukkue ei todennäköisesti riitä. Pelastuskomppania hälytetään aina, kun suuret henkilömäärät ovat vaarassa tai kun palo tai muu onnettomuus kohteen laadun tai hätäilmoituksen perusteella todetaan levinneeksi tai se uhkaa levitä laajaksi.

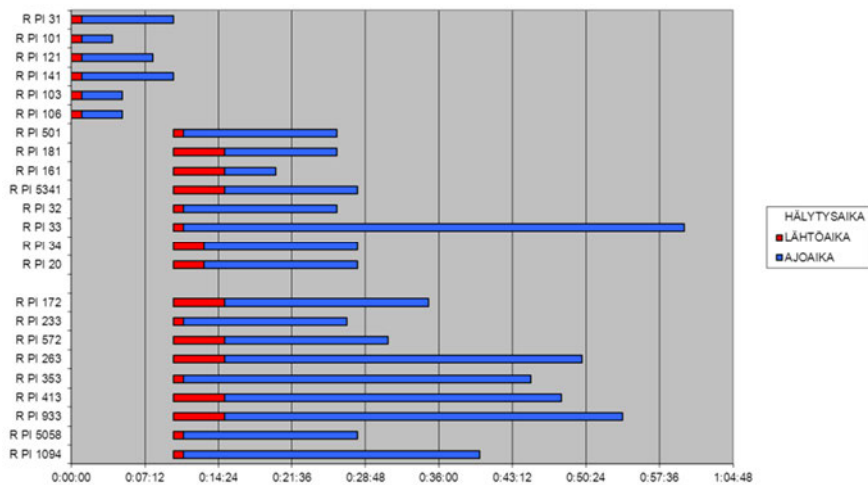
- **Yksikkö** on henkilön tai henkilöstön, kulkuneuvon ja kaluston muodostama toimintakokonaisuus, joka kykenee itsenäiseen toimintaan. Yksiköitä ovat esim. **pelastusyksikkö**, sammutusyksikkö, raivausyksikkö, säiliöyksikkö ja tikasyksikkö.
- **Pelastusryhmä** koostuu johtajasta, vähintään kolmesta ja enintään seitsemästä henkilöstä sekä tehtävän mukaisista ajoneuvoista ja kalustosta.
- **Pelastusjoukkue** koostuu johtajasta, vähintään kahdesta ja enintään viidestä pelastusryhmästä.
- **Pelastuskomppania** koostuu johtajasta, pelastustoiminnan johtajaa avustavasta esikunnasta, vähintään kahdesta ja enintään viidestä pelastusjoukkueesta.

Tampereen aluepelastuslaitos on laatinut erityisen operatiivisen suunnitelman [13] koskien Tampereen kansi- ja keskusareenan alapuolisia tiloja. Suunnitelman tarkoitus on antaa kuva pelastuslaitoksen suorittaman pelastustoiminnan järjestelystä onnettomuustilanteessa, jossa kansirakenteen alapuolella syttyy tulipalo. Todennäköistä on, että kohteeseen hälytetään aluksi vain joukkue esimerkiksi hätäilmoituksen "kannen alta tulee savua" perusteella. Kuvassa 1 on toimintajaotuskaavio tällaisesta tilanteesta, jossa päivystävä palomestari kohteeseen tultuaan laajentaa hälytyksen koskemaan komppaniaa ja lisää vasteeseen lisäksi seitsemän säiliöautoa, vaarallisten aineiden torjuntakontin ja suurtehopumpun.

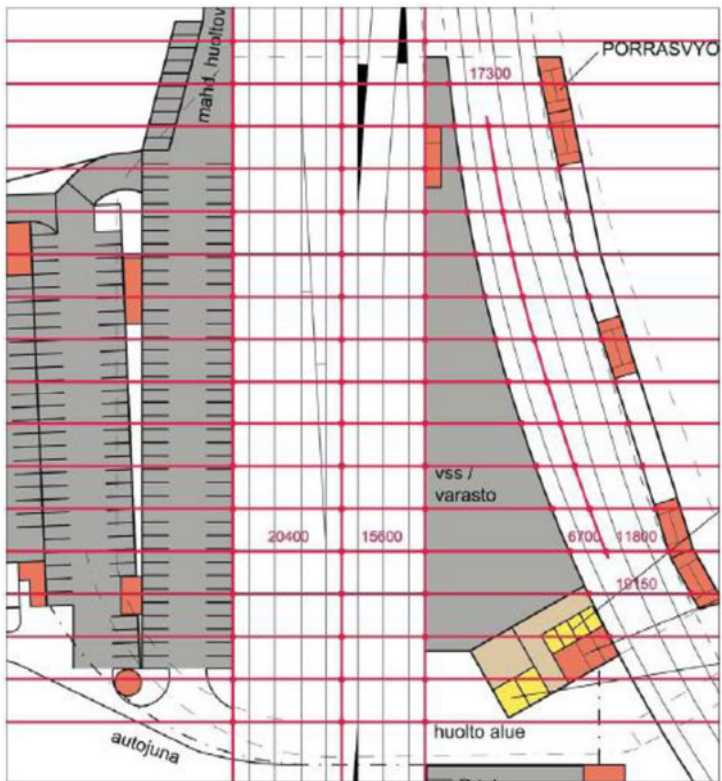
## 2. Sovellusesimerkki

Sammutusreitti kannen alle on suunniteltu radan länsipuolelle. Rataosuus kannen alla on leveä, raiteita on useita ja sammuttaminen vaikeutuu, kun palavan nesteen kuljetusvaunun etäisyys sammutusreitiltä kasvaa. Erityisen haasteellista on, jos vaunu on Jyväskylässä tulevalla rataosuudella juuri ennen risteävää kohtaa (kuva 2). Palavan nesteen kuljetusvaunun tarkemman sijainnin perusteella yksiköiden ja vesitykkien sijainti päätetään tapauskohtaisesti. Edellä mainitut rajoitukset huomioon ottaen vaunua pyritään jäähdyttämään ja sammuttamaan molemmilta puolilta rataa.

Pelastuslaitos kuljettaa mukanaan ensi-iskussa tarvittavan määrän sammutusvettä. Lisäveden tarve saadaan kaavoitetuilla alueella yleensä tyydytettyä vesijohtoverkostossa olevista paloposteista. Jäähdyttämisen ja sammuttamisen onnistumiseksi palavan nesteen kuljetusvaunuun tulee kohdentaa vähintään kolme vesitykkiä, joiden yhteenlaskettu tuotto on luokkaa 8–10 m<sup>3</sup>/min. Pöyry Finland Oy:n tekemän selvityksen [11] perusteella lähialueella sijaitsevien palopostien verkostopaine ei tässä tapauksessa ole riittävän suuri turvaamaan riittävän ja katkeamattoman sammutusveden tarvetta. Pelastuslaitos edellyttääkin operatiivisessa suunnitelmassaan [13], että kannen alapuoli varustetaan kiinteällä sammutuslaitteistolla.



**Kuva 1.** Toimintajaotuskaavio kannen alla olevan suurpalon tapauksessa, kun kohteeseen hälytetään aluksi vain joukkue, mutta hälytys laajennetaan myöhemmin koskemaan komppaniaa lisättyä säiliöautoilla, vaarallisten aineiden torjuntakontilla ja suurtehopumpulla [13].



Kuva 2. Risteävä radan kohta [13].

## 3. Operaatioaikamallinnus

### 3.1 Menetelmän kuvaus

Menetelmässä tarkastellaan palotilanteen hallintaan osallistuvien toimijoiden toiminta-aikoja valitussa paloskenaariossa ottamalla huomioon eri osapuolten tehtävien väliset kytkennät ja mahdollisten poikkeamien aiheuttamat lisäviiveet. Laskemalla yhteen toiminnan eri vaiheiden tuottamat aikaviiveet saadaan tuloksena palon sammuttamiseen tai hallintaan saamiseen tähtäävän toiminnan kokonaiskesto-aika. Viiveiden ja mahdollisten poikkeamien todennäköisyyksien arviointi perustuu saatavilla olevaan mittaustietoon sekä asiantuntija-arvioihin.

Palon sammuttamisen operaatioaikamallinnus sisältää seuraavat vaiheet ja toimenpiteet:

1. Määritellään paloskenaario.
2. Määritellään palon sammuttamiseen tähtäävän operatiivisen toiminnan skenaario.
  - a. Määritellään toimijat ja toimijoiden väliset kytkennät.
  - b. Analysoidaan toiminnan vaiheet ja mahdolliset poikkeamat.
  - c. Kuvataan toiminnan aikaviiveet ja mahdollisten poikkeamien aiheuttamat lisäviiveet todennäköisyysjakautumina.
3. Suoritetaan Monte Carlo -analyysi, jonka tuloksena saadaan sammuttamiseen tähtäävän toiminnan kokonaisaikaviiveen todennäköisyysjakauma.

Käytännössä paloskenaario ja operatiivisen toiminnan skenaario määritellään asiantuntijoiden välisenä ryhmätyönä, jolloin lopputuloksena saadaan tapahtumien ajallista etenemistä kuvaava kaavio sekä eri toimijoiden toiminnan yksityiskohtaiset kuvaukset. Mallia tarkennetaan keräämällä tietoa toiminnan ja mahdollisten poikkeamien aiheuttamista aikaviiveistä sekä poikkeamien todennäköisyyksistä. Tilasto- ja mittausaineistoa hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan ja puutteet täydennetään asiantuntija-arvioilla.

Tyypillisesti yksittäiseen toiminnan vaiheeseen liittyvää aikaviivettä kuvataan tilastollisella mallilla ts. todennäköisyysjakaumalla, josta Monte Carlo -simuloinnin yhteydessä arvotaan kyseiseen toimintaan kuuluva aika. Mikäli mallinnettavasta



aikaviiveestä ei ole olemassa tutkittua tai mitattua tietoa eikä sitä voida laskea deterministisesti, kuvataan aikaviivettä esim. tasajakaumalla  $U(a,b)$ , jossa  $a$  ja  $b$  ovat jakauman parametrit ( $\Delta t_{\min}$  ja  $\Delta t_{\max}$ ), jotka määrittävät asiantuntija-arvioiden perusteella.

Tilanteelle oletetaan jokin ”normaali” tai ”optimaalinen” etenemistapa, johon liittyvät aikaviiveet  $\Delta t_i$  realisoituvat jokaisella laskentakerralla. Lisäksi huomioidaan poikkeamat eli aikaviiveet (lisäviiveet)  $\delta t_j$ , jotka realisoituvat vain osassa tapauksista ts. aiheuttavat lisäviiveen jollakin todennäköisyydellä  $p$ . Tällaisia poikkeamia ovat esim. inhimillisten virheiden, laitteiston rikkoutumisien tai satunnaisten ympäristötekijöiden aiheuttamat lisäviiveet. Jos oletetaan, että toimijoiden toiminnot ja niihin liittyvät aikaviiveet toteutuvat peräkkäin, voidaan toiminnan kokonaisaikaviivettä  $\Delta t_{\text{tot}}$  kuvata seuraavalla kaavalla:

$$\Delta t_{\text{tot}} = \sum_i \Delta t_i + \sum_j \delta t_j(p) \quad (1)$$

Joissakin tilanteissa toimijat suorittavat omia tehtäviään toisistaan riippumatta samanaikaisesti. Tällöin rinnakkain esiintyvistä aikaviiveistä  $\Delta t_{i,\text{parallel}}$  huomioidaan laskennassa joko pisin (MAX) tai lyhin (MIN), riippuen siitä, voiko tilanne edetä vasta, kun kaikki ovat suorittaneet oman osuutensa (vrt. vikapuun JA), vai riittääkö, että joku on suorittanut oman osuutensa (vrt. vikapuun TAI). Näihin vaiheisiin liittyviä toteutuneita aikaviiveitä  $\Delta t_{i,\text{realized}}$  voidaan kuvata seuraavasti:

$$\begin{aligned} \Delta t_{i,\text{realized}} &= \text{MAX}(\Delta t_{i,\text{parallel}}) \\ \Delta t_{i,\text{realized}} &= \text{MIN}(\Delta t_{i,\text{parallel}}) \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.2 Toimijat ja roolit

Pelastustoiminta käynnistyy, kun palo havaitaan ja asiasta ilmoitetaan hätäkeskukseen. Palon havaitseminen voi tapahtua mm. seuraavilla tavoilla:

- Kun vaunu suistuu pois raiteiltaan, juna pysähtyy. Veturinkuljettaja arvioi tilanteen ja ilmoittaa liikenteenohjaukseen ja hätäkeskukseen.
- Paloilmaisin reagoi, jolloin tieto välittyy hätäkeskukseen (ja mahdollisesti liikenteenohjaukseen).
- Sprinklaus käynnistyy (jos sellainen on), jolloin tieto välittyy hätäkeskukseen (ja mahdollisesti liikenteenohjaukseen).
- Ohikulkija havaitsee savua ja soittaa hätäkeskukseen.
- Liikenteenohjaus havaitsee järjestelmästä, että jotain on vialla, ja ryhtyy selvittämään tilannetta (valvontakameroita alueella ei ole). Soitto hätäkeskukseen tapahtuu raideliikenneonnettomuuden tai tulipalon perusteella.

### 3. Operaatioaikamallinnus

---

Rata-alueella tapahtuva tulipalo koskee useita toimijoita, joista osaa välittömästi ja osaa myöhemmin esim. raivauksen tai onnettomuustutkinnan yhteydessä. Asiasta välittyy tai välitetään tavalla tai toisella tieto mm. seuraaville toimijoille: liikennöitsijä, liikenteenohjaus, käyttökeskus, hätäkeskus, pelastuslaitos, poliisi, rataliikennekeskus, liikennöitsijän raivausryhmä, isännöitsijä, kunnossapitäjä, sähkökunnossapitäjä, muut alueen työt, onnettomuustutkintakeskus ja Liikenteen turvallisuusvirasto (Trafi). Em. toimijoiden roolit ja niiden väliset kytkennät kuvataan liitteen 2 kaaviossa. Seuraavassa kuvaillaan tilannetta keskeisten toimijoiden näkökulmasta. Kuvaukset perustuvat pääosin kyseisten toimijoiden edustajien kanssa käytyihin keskusteluihin.

#### Veturinkuljettaja (liikennöitsijä)

Kun vaunut syystä tai toisesta joutuvat pois raiteilta, paine häviää jarrujohdoista ja juna pysähtyy. Veturinkuljettaja ilmoittaa liikenteenohjaukseen tilanteesta (ei vielä välttämättä tiedä palosta mitään) ja lähtee tutkimaan tilannetta. Havainnoiminen tapahtuu jalkaisin junan viertä kulkien, jolloin etenemisnopeus riippuu maastosta, valoisuudesta ja mahdollisesta lumipeitteestä (juna on mahdollisesti vain osittain kannen alla). Junan pituus voi vaihdella suuresti: 25 m pituisia vaunuja voi olla 5–50, jolloin junan pituus on 125–1250 m. Tultuaan tietoisesti palosta veturinkuljettaja kertoo lisätietoja liikenteenohjaukseen ja yrittää selvittää, monesko vaunu palaa (vaunujen tunnisteet voivat olla puutteelliset). Liikenteenohjaus selvittää, mitä ainetta palavassa vaunussa on. Junassa on alkusammutuskalusto, mutta voimakkaan palon tapauksessa niiden käyttöä tuskin yritetään. Veturissa on välineet hätämaadoituksen tekemiseen, mutta todennäköisesti kuljettaja ei ota niitä mukaan, kun lähtee selvittämään tilannetta, joten voi mennä aikaa (lisäviive), ennen kuin veturinkuljettaja pääsee tekemään hätämaadoitusta. Hätämaadoitukseen on pyydettävä lupa käyttökeskuksesta. Hätämaadoituksen tekee se, joka on ensiksi paikalla (veturinkuljettaja, pelastuslaitos, raivausryhmä), todennäköisimmin pelastuslaitos. Myöhemmin rataliikennekeskus tiedottaa liikennöitsijälle tilanteen kehityksestä. Kun palo on sammutettu, veturinkuljettaja osallistuu raivaukseen.

#### Liikenteenohjaus

Liikenteenohjaus saa tiedon onnettomuudesta, kun se havaitsee järjestelmästä, että laitteita on vaurioitunut, tai kun liikennöitsijä soittaa ja kertoo suistumisesta. Palo havaitaan näköyhteyden kautta, tai liikennöitsijä ilmoittaa asiasta (valvontakameroita alueella ei ole). Seuraavaksi tapahtuu samanaikaisesti seuraavia asioita (paikalla on useita henkilöitä ja käyttökeskus on aivan vieressä):

- Pyritään estämään muut onnettomuudet keskeyttämällä liikenne.
- Soitto hätäkeskukseen.
- Selvitetään junan lasti vahvistetusta vaunuluettelosta.
- Keskustellaan käyttökeskuksen kanssa tilanteesta.
- Soitto rataliikennekeskukseen ja liikennöitsijän raivausryhmälle.

Liikenteenohjauksella on aina käytössään vaarallisten aineiden kuljetuksista (VAK) vahvistettu vaunuluettelo, eli vaunun sisältö on helposti ja nopeasti selvitettävissä. Mahdollinen lisäviive voi aiheutua siitä, että tieto palosta tulee vasta myöhemmin. Voi myös käydä niin, että painetilanteessa ei heti muisteta selvittää junan lastia, vaan asiaan ryhdytään vasta kun hätäkeskus tai pelastuslaitos kysyy asiaa.

#### Käyttökeskus

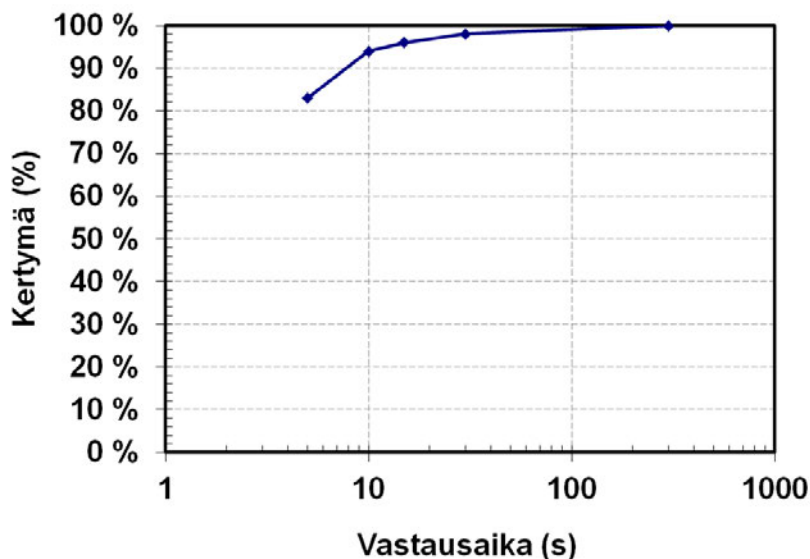
Liikenteenohjaus ilmoittaa palosta käyttökeskukselle. Käyttökeskus voi saada tiedon myös jotain muuta kautta esim. VIRVEstä. Käyttöpäivystäjä kytkee sähköt pois ja hälyttää sähkökunnossapitäjän. Pelastustoimi ottaa yhteyden käyttökeskukseen saadakseen luvan hätämaadoitusten tekemiseen. Sammutustoiminta voi alkaa vasta kun hätämaadoitus on tehty, ja lupa hätämaadoituksen tekemiseen on aina saatava käyttökeskukselta. Hätämaadoitus tehdään kohteen molemmin puolin. Myöhemmin sähkökunnossapitäjän edustajat saapuvat paikalle ja arvioivat lisämaadoitusten tarpeen sekä sähköratarakenteiden kunnon. Kun tilanne sen sallii, palautetaan sähköt. Mahdollinen lisäviive voi aiheutua siitä, että kaikkia pelastajia ei ole koulutettu tekemään hätämaadoitusta tai heillä ei ole välineitä mukana. Jälkimmäisen ongelman poistamiseksi alueelle suunnitellaan asennettavaksi maadoitusvälineitä, jotka ovat tarvittaessa pelastajien käytettävissä.

#### Sähkökunnossapitäjä

Käyttökeskus hälyttää paikalle sähkökunnossapitäjän. Sähkökunnossapitäjä tekee omat maadoitukset, jotka korvaavat hätämaadoituksen. Maadoitetaan vähintään kaksi raidetta molemmin puolin. Sähkökunnossapitäjä arvioi lisämaadoitusten tarpeen (joskus jopa neljä raidetta on maadoitettava) sekä sähköratarakenteiden kunnon.

#### Hätäkeskus

Tieto palosta tulee automaattisesti paloilmamisimesta tai sprinkleristä tai liikennöitsijä, liikenteenohjaus tai ohikulkija ilmoittaa palosta. Kuvassa 3 on hätäkeskuksen vastausaikoja tammi-joulukuussa 2010.

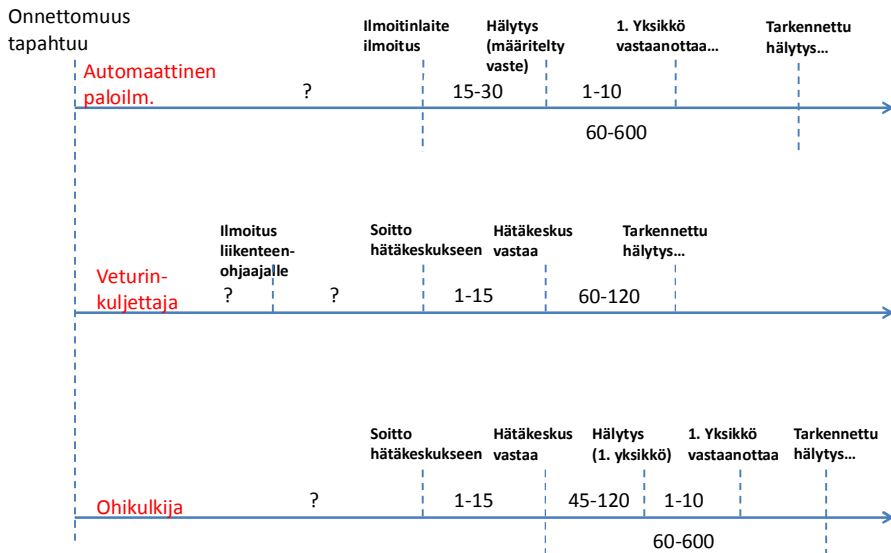


**Kuva 3.** Hätäkeskuksen vastausajat tilastojen perusteella (PRONTO) tammi-joulukuussa 2010.

Hätäkeskus kysyy tiedot (mikä palaa jne.) ja hälyttää pelastuslaitoksen. Yksikönjohtaja pyytää hätäkeskuksesta lisätietoja. Hätäkeskus osallistuu yhteistoimintaan ja tilanteen koordinointiin sekä antaa hätätiedotteita. Pelastustoimintaan voi aiheutua lisäviive, jos ei muisteta kysyä tietoja kyseessä olevasta aineesta. Viimeistään pelastuslaitos kysyy tiedot.

Tilanteen eteneminen riippuu jonkin verran siitä, mitä kautta tieto palosta hätäkeskukseen tulee. Tutkimuksessa hätäkeskukseen tuleva tieto oletetaan tulevaksi ohikulkijan, automaattisen paloilmottimen tai veturinkuljettajan/liikennöitsijän toimesta. Hätäkeskus pyrkii ohikulkijan tapauksessa hälyttämään ensimmäisen yksikön viimeistään 120 s kuluessa siitä kun hätäkeskus on vastannut hätäpuheluun (kuva 4). Tämän jälkeen tarkentavien kysymysten ja saatujen vastausten perusteella hätäkeskus arvioi tarkennetun hälytyksen tarvetta ja laatua, jolloin esimerkiksi paikalle voidaan hälyttää pelastusjoukkue tai -komppania. Automaattisen paloilmottimen tapauksessa hätäkeskukseen automaattisesti ohjautuvassa ilmoituksessa on ennalta määritetty vaste, jonka mukaan yksiköt hälytetään onnettomuuspaikalle. Mikäli hätäkeskukseen soittaa veturinkuljettaja, on hätäkeskuksen vasteena hälyttää tarkennetun hälytyksen mukainen vahvuus (joukkue/komppania).

Hätäkeskuksen toimintaa näissä edellä mainituissa eri vaihtoehdoissa kuvataan seuraavassa kaaviossa (kuva 4). Kuvassa esitetyt aikaviiveet liittyvät sovellus-esimerkin tyyppiseen tilanteeseen.



**Kuva 4.** Hätäkeskuksen toiminta ja siihen liittyvät aikaviiveet eri hälytystapauksissa sovellusesimerkin tyyppisessä tilanteessa. Kuvassa näkyvät numerot ovat eri tapahtumien välisiä ajanhetkiä sekunteina (s).

### Pelastuslaitos

Hälytysilmoitus tehtävästä tulee hätäkeskukselta, minkä jälkeen yksiköt lähtevät kohteeseen. Matkalla pyydetään lisätietoja hätäkeskuksesta ja otetaan yhteys liikenteenohjaukseen. Tällöin varmistetaan, että liikenne on pysäytetty. Käyttökeskukselta pyydetään lupa hätämaadoitusten tekemiseen ja varmistetaan, että sähköt on katkaistu. Tarvittaessa pelastustyön johtaja pyytää hätäkeskukselta lisäresursseja jo matkan aikana.

Onnettomuuspaikalla tilannetta johtaa ensimmäisen paikalle tulevan yksikön esimies. Ensivaiheessa tiedustellaan, mikä palaa ja onko pelastettavia henkilöitä. Pyritään estämään lisäonnettomuudet. Tilannekuvan perusteella tehdään suunnitelma ja päätös toimenpiteistä. Tehokas sammutus- ja pelastustoiminta voi alkaa vasta kun hätämaadoitus on tehty.

Esimerkkitapauksessa viereisiä vaunuja jäähdytetään, jotta ne eivät ylikuumene. Kannen alla käytetään maan tasolle asennettavia irrallisia vesitykkeitä, ei säiliöauton kiinteitä tykkeitä. Yksi keskeinen haaste on veden saatavuus: käytännössä vesi loppuu 4–5 minuutissa, jona aikana on järjestettävä lisäveden syöttö. Lisävettä saadaan esim. palopostiverkostosta ja säiliövuoroajona lähimmältä paloasemalta (keskuspaloasema), mikä kestää 10–15 min.

Lisäviiveitä voi aiheutua mm. seuraavista seikoista:

- Päällekkäinen tehtävä.

### 3. Operaatioaikamallinnus

---

- Hätäkeskuspäivystäjä arvioi tilanteen vain raideliikenneonnettomuutena, jolloin hälytettävä vaste on riittämätön.
- Ensimmäisessä yksikössä ei ole koulutusta tai välineitä hätämaadoitusten tekemiseen. (Alueelle on suunniteltu asennettavaksi välineitä, jotka olisivat pelastuslaitoksen käytettävissä.)
- Letkurikko.

#### Poliisi

Hätäkeskus ilmoittaa poliisille tilanteesta. Poliisin tehtävä on alueen eristäminen (ihmiset, ajoneuvot) ja evakuointi.

#### Rataliikennekeskus

Liikenteenohjaus ilmoittaa palosta. Rataliikennekeskuksen tehtävä on tiedottaa palosta mm. liikennöitsijälle, kunnossapitäjälle, isännöitsijälle, muille alueen toimijoille ja medialle. Rataliikennekeskus myös osallistuu yhteistoimintaan ja nimittää yleisjohtajan.

#### Liikennöitsijän raivausryhmä

Liikennöitsijän raivausryhmä saa tiedon palosta liikenteenohjaukselta, saapuu paikalle pyydettyä ja tekee hätämaadoituksen, jos saapuu paikalle ennen pelastuslaitosta tai jos pelastuslaitos ei sitä jostain syystä pysty tekemään. Liikennöitsijän raivausryhmä osallistuu tarvittaessa sammutuksen aikaiseen raivaukseen sekä raivaa kaluston pois palon sammutuksen jälkeen.

#### Isännöitsijä

Isännöitsijä saa tiedon palosta rataliikennekeskukselta, mutta rooli palotilanteessa on vasta jälkitöissä.

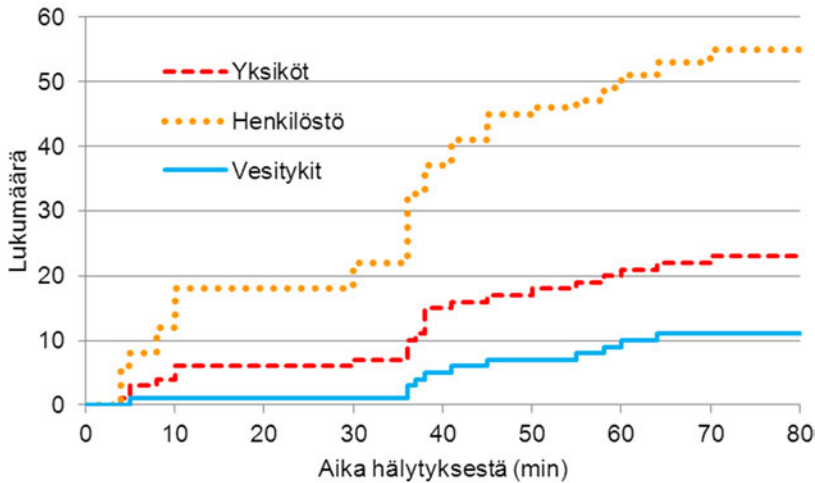
#### Kunnossapitäjä

Kunnossapitäjä saa tiedon palosta rataliikennekeskukselta. Kunnossapitäjä korjaa raiteet, kun palo on sammutettu.

### **3.3 Laskentamallin kuvaus**

Operaatioaikamallissa oletetaan, että pelastuslaitoksen yksiköiden saapuminen onnettomuuspaikalle tapahtuu kuvan 1 mukaisesti, eli kohteeseen hälytetään aluksi joukkue, ja komppania hälytetään vasta kun päivystävä palomestari on saapunut kohteeseen tai hätäkeskus on saanut liikenteenohjaukselta tiedon siitä, että kyseessä on palavan nesteen säiliövaunun palo. Mikäli tilanne etenisi täsmäl-

leen pelastuslaitoksen operatiivisen suunnitelman [13] mukaisesti, resurssien kertyminen onnettomuuspaikalle tapahtuisi hälytyksen jälkeen kuvan 5 mukaisesti. Joukkueen mukana paikalle saapuu vain yksi vesitykki; komppanian mukana vesitykkeitä saapuu useita.

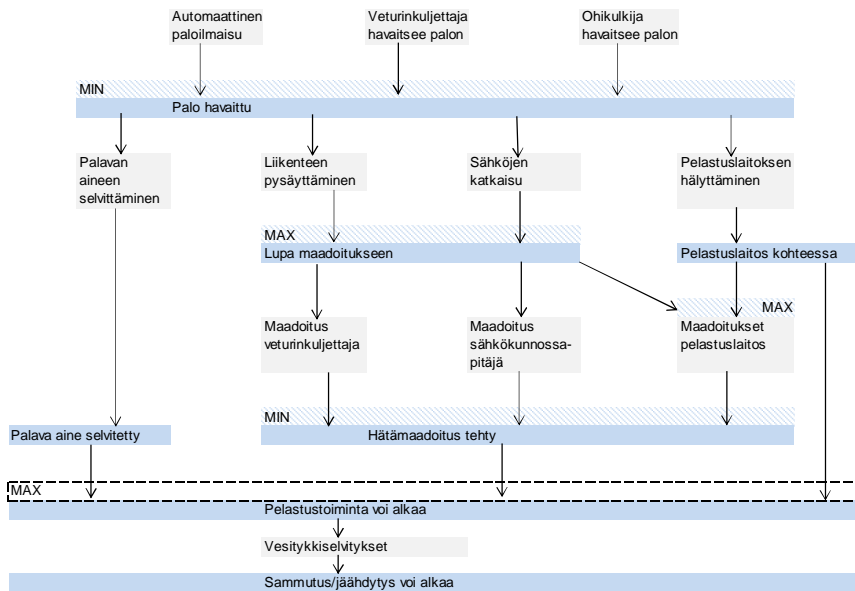


**Kuva 5.** Resurssien kertyminen onnettomuuspaikalle hälytyksen jälkeen.

Hälytyksen ajanhetki määräytyy sen mukaan, miten palo havaitaan ja miten tieto välittyy hätäkeskukselle. Mallissa kaikille vaihtoehdoisille tapahtumaketjuille laskeaan realisaatiot, joissa huomioidaan myös satunnaiset poikkeamat. Tämän jälkeen ”kilpailevia” tapahtumaketjuja verrataan toisiinsa ja esim. vaihtoehdoisista havaitsemistavoista nopein ”voittaa” ja valitaan toteutuneeksi realisaatioksi. Vastaavasti maadoituksen toteuttamiseen kuluva aika lasketaan kaikille toimijoille, joiden toimintaan maadoitus kuuluu ottaen huomioon kyseisen toimijan saapumisaika paikalle ja maadoituksen suorittamiseen kuluva aika; toteutuneessa realisaatiossa maadoituksen tekee se, joka on nopein.

Kullekin toimijalle lasketaan aikajana, joka koostuu peräkkäisistä aikaviiveistä, mukaan lukien mahdollisten poikkeamien aiheuttamat lisäviiveet. Toimijan toiminta käynnistyy, kun hän saa tiedon tilanteesta, jonka jälkeen hän alkaa suorittaa omaa prosessiaan. Aikaviiveitä ja poikkeamien todennäköisyyksiä kuvataan satunnaismuuttujilla, joille arvotaan realisaatiot todennäköisyysjakaumien perusteella. Koska tavoitteena on sammutusresurssien kertymisen aikajakauman simulointi ja sammutus tapahtuu vesitykeillä, kutakin vesitykkiä käsitellään erillisenä ”toimijana”, jolla on oma aikajanansa. Vesitykin aikajana alkaa siitä hetkestä, jolloin kyseinen yksikkö saa hälytyksen ja vesitykki aloittaa matkan kohti onnettomuuspaikkaa. Paikan päällä vesitykki voi joutua odottamaan (tiedustelu, suunnitelma, maadoitukset) ennen kuin se siirretään (selvitykset) toimintapaikkaansa. Vesitykin kannalta ylimääräinen lisäviive voi olla letkurikko, joka aiheuttaa lisäviiveen. Laskentamallin keskeiset prosessit esitetään kuvassa 6.

### 3. Operaatioaikamallinnus



**Kuva 6.** Laskentamallin keskeiset prosessit. MIN tarkoittaa, että ylemmän tason prosesseista nopein ratkaisee tilanteen etenemisen ts. aikaviiveistä valitaan minimi (vrt. TAI vikapuussa: kun jokin edellisistä on tapahtunut, siirrytään seuraavalle tasolle). MAX tarkoittaa, että hitain ratkaisee ts. aikaviiveistä valitaan maksimi (vrt. JA vika- puussa: kaikkien edellisten on tapahduttava, ennen kuin siirrytään seuraavalle tasolle).

Laskentamalli toteutettiin Excel-työkirjana toteutetulla Probabilistic Fire Simulator (PFS) -työkalulla [15], jonka avulla voidaan suorittaa Monte Carlo -analyysi. Seuraavassa kuvataan, miten eri tilanteet ja toimijoiden osuudet ratkaistaan mallissa.

#### Palon sijainti

Palon sijaintia kuvataan satunnaismuuttujalla, joka kuvaa kohtisuoraa etäisyyttä pelastustiestä. Tätä tietoa käytetään vesitykkien selvitysaikojen laskemiseen.

#### Palon havaitseminen

Jos paloilmaisimen toimintavarmuutta kuvataan todennäköisyydellä  $p_1 \in [0,1]$ , voidaan olettaa, että paloilmaisimen toimimattomuus aiheuttaa todennäköisyydellä  $(1-p_1)$  läsäviiveen, jonka pituus määräytyy siitä, millä hetkellä palo havaitaan aistivaraisesti (veturinkuljettaja, ohikulkija).

Oletetaan, että paloilmaisimen reaktioaikaa  $\Delta t_1$  kuvaa jakauma  $U_1$ . Paloilmaisimen reaktioaika mallissa lasketaan seuraavasti:

- Arvotaan luku  $x_1$  väliltä 0–1 ja luku  $y_1$  jakaumasta  $U_1$ .
- Valitaan luku  $z_1 \gg$  aistinvaraiseen havaitsemiseen kuluva aika.
- Jos  $x_1 < p_1$ , niin  $\Delta t_1 = y_1$ , muuten  $\Delta t_1 = y_1 + z_1$ .

Vastaavalla tavalla lasketaan ohikulkijan havaitsemisaikaa kuvaava luku  $\Delta t_2$ , kun ohikulkijan oletetaan havaitsevan palon todennäköisyydellä  $p_2$ . Veturinkuljettaja havaitsee palon sataprosenttisen varmasti, ja havaitsemisaika  $\Delta t_3$  lasketaan kohdassa "veturinkuljettaja" kuvatulla tavalla. Palon havaitsemisajaksi  $\Delta t_{det}$  valitaan kaikkien havaitsemisaikojen minimi

$$\Delta t_{det} = \text{MIN}[\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3].$$



Veturinkuljettaja

Oletetaan, että veturinkuljettaja soittaa ensin liikenteenohjaukseen ( $\Delta t_1$ ) ja sitten hätäkeskukseen ( $\Delta t_2$ ) ja kertoo, että juna on suistunut raiteilta. Tämän jälkeen hän lähtee tutkimaan tilannetta kävelen junan ( $n$  kpl vaunuja, joiden pituus  $l$ ) viertä pitkin paloa kohti (palovaunun järjestysluku veturista käsin  $m$ ) nopeudella  $v$ . Etäisyydeltä  $e_1$  hän havaitsee palon ja informoi tästä liikenteenohjausta ( $\Delta t_3$ ) ja hätäkeskusta ( $\Delta t_4$ ). Vaunun numeron selvittämiseksi hän kävelee vielä etäisyydelle  $e_2$ , minkä jälkeen hän antaa lisätietoja liikenteenohjaukseen ( $\Delta t_5$ ).

Edellä esitetty prosessi kokonaisuudessaan kestää ajan

$$\Delta t_{\text{driver}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + ((m \times l) - e_1) / v + \Delta t_3 + \Delta t_4 + (e_1 - e_2) / v + \Delta t_5.$$

Prosessista poimitaan väliaikoja seuraavasti:

Liikenteenohjaus on tietoinen

- suistumisesta hetkellä  $t = \Delta t_1$
- palosta hetkellä  $t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + ((m \times l) - e_1) / v + \Delta t_3$
- vaunun numerosta hetkellä  $t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + ((m \times l) - e_1) / v + \Delta t_3 + \Delta t_4 + (e_1 - e_2) / v + \Delta t_5$ .

Vastaavalla tavalla lasketaan, milloin hätäkeskukseen soitetaan eri vaiheissa. Hätäkeskuksen toiminta kuvataan tarkemmin kohdassa "hätäkeskus".

Liikenteenohjaus

Liikenteenohjauksessa oletetaan olevan niin monta henkilöä, että kaikki prosessit tapahtuvat **rinnakkain** sen jälkeen, kun tieto tilanteesta on saatu.

- Kun järjestelmästä havaitaan tai veturinkuljettajalta saadaan tieto junan suistumisesta, keskeytetään liikenne, ilmoitetaan hätäkeskukseen ja käyttökeskukseen ja selvitetään junan lasti.
- Kun paloilmoittimesta tai veturinkuljettajalta tulee tieto palosta, keskeytetään liikenne, ilmoitetaan hätäkeskukseen ja käyttökeskukseen ja selvitetään junan lasti.
- Kun saadaan tieto palavan vaunun numerosta, selvitetään kyseessä oleva aine ja ilmoitetaan hätäkeskukseen/pelastuslaitokselle (= lupa pelastustoiminnan aloittamiseen).
- Kun saadaan tieto sähköjen katkaisusta (= lupa maadoitusten tekemiseen) tai maadoitusten valmistumisesta (= lupa pelastustoiminnan aloittamiseen), informoidaan muita toimijoita.

Em. prosessien perusteella voidaan määrittää ajanhetket, jolloin liikenteenohjauksella on tieto

- a) raideliikenneonnettomuudesta
- b) palosta
- c) säiliövaunun palosta
- d) palavasta aineesta.

Vastaavasti voidaan määrittää ajanhetket, jolloin

- e) liikenne on keskeytetty
- f) sähköt on katkaistu → lupa maadoitusten tekemiseen
- g) maadoitukset on tehty → lupa pelastustoiminnan aloittamiseen.

Liikenteenohjauksen oletetaan olevan aina käytettävissä ja em. prosessien mukaisesti selvillä tilanteesta sekä informoivan muita toimijoita tilanteesta.

Lisäviiveenä käsitellään sitä, että palavan aineen selvittäminen unohtuu ja tehdään vasta kun asiaa kysytään hätäkeskuksen tai pelastuslaitoksen taholta.

Käyttökeskus

Kun käyttökeskus on saanut tiedon raideliikenneonnettomuudesta tai palosta, oletetaan käyttökeskuksen suorittavan seuraavat toiminnot **peräkkäin**:

- 1) Kytetään sähköt pois.
- 2) Ilmoitetaan liikenteenohjaukseen.
- 3) Hälytetään paikalle sähkökunnossapitäjä.

### 3. Operaatioaikamallinnus

---

#### Sähkökunnossapitäjä

Kun sähkökunnossapitäjä on saanut tiedon tilanteesta, oletetaan sähkökunnossapitäjän suorittavan seuraavat toimenpiteet **peräkkäin**:

- 1) Saavutaan paikalle.
- 2) Tehdään omat maadoitukset.
- 3) Tehdään mahdollisesti lisämaadoituksia.
- 4) Ilmoitetaan liikenteenohjaukseen.

#### Hätäkeskus

Hätäkeskuksessa oletetaan olevan niin monta henkilöä, että kaikki prosessit tapahtuvat **rinnakkain** sen jälkeen, kun tieto tilanteesta on saatu.

- Kun paloilmoittimesta tulee ilmoitus palosta, tehdään hälytys (1. yksikkö) ja ryhdytään selvittämään, mistä on kyse.
- Kun veturinkuljettajalta/liikenteenohjauksesta tulee tieto palosta, tehdään hälytys (joukkue) ja pyydetään liikenteenohjausta selvittämään, mikä palaa.
- Kun ohikulkija soittaa ja kertoo palosta, tehdään hälytys (1. yksikkö) ja yritetään kyseellä lisätietoja.
- Kun liikenteenohjauksesta tulee tieto palavan nesteen säiliövaunun palosta tai pelastuslaitos pyytää vahvistuksia, tehdään "suurpalohälytys" (komppania).

Em. prosessien perusteella voidaan määrittää ajanhetket, jolloin hätäkeskuksella on tieto

- a) palosta
- b) säiliövaunun palosta
- c) palavasta aineesta.

Vastaavasti voidaan määrittää ajanhetket, jolloin

- d) pelastuslaitos on hälytetty ("palohälytys")
- e) hälytys on laajennettu "suurpalohälytykseksi".

#### Pelastuslaitos

Pelastuslaitoksella oletetaan olevan kaksi erilaista tilannetta, "palohälytys" ja "suurpalohälytys". Palohälytystilanne alkaa joko ilmaisnilmoituksen tai hätäkeskuksen tekemän hälytyksen perusteella, jotka molemmat perustuvat tietoon "savua havaittu". Tässä tapauksessa kohteeseen lähetetään joukkue. Suurpalohälytystilanne alkaa, kun hätäkeskus tekee tarkennetun hälytyksen saatuaan liikenteenohjaukselta tiedon säiliövaunun palosta tai ensimmäisen yksikön esimies toteaa tilanteen ja vaatii lisäresursseja. Suurpalohälytyksen seurauksena kohteeseen lähetetään komppania.

Palohälytyksen jälkeen keskusteluyhteyden oletetaan olevan auki pelastuslaitoksen ja hätäkeskuksen sekä liikenteenohjauksen välillä siten, ettei tämä aiheuta lisäviiveitä pelastuslaitoksen toimintaan. Matkalla kohteeseen pyydetään liikenteenohjaukselta lisätietoja palavasta aineesta, jolloin liikenteenohjaus viimeistään alkaa selvittää asiaa.

Yksiköiden saapumisajat kohteeseen mallinnetaan kahdella eri menetelmällä:

- a) Yksikkökohtaisten lähtö+matka -aikojen oletetaan olevan tarkalleen pelastuslaitoksen operatiivisen suunnitelman mukaisia (kuva 1). Komppanianlähdön aloitushetki riippuu kuitenkin tilanteesta, kuten edellä kuvattiin.
- b) Em. lähtö+matka -aikojen oletetaan olevan keskiarvoja, jotka laajennetaan jakaumaksi kolmen suuren kaupungin (Helsinki, Turku ja Tampere) toimintavalmiusajan analysointien perusteella [19], kuten liitteessä 5 kuvataan.

Ensimmäisen yksikön paikalle saapumisen ja tiedustelun jälkeen tapahtuu yhtäaikaan seuraavia asioita:

- Pyydetään lisäresursseja.
- Ryhdytään tekemään maadoituksia.
- Odotetaan tietoa palavasta aineesta.

Maadoitusten tekeminen voidaan aloittaa vasta, kun liikenne on pysäytetty ja sähköt katkaistu.

Nämä ajanhetket tarkistetaan kohdasta "liikenteenohjaus". Vesitykkiselvitykset voidaan aloittaa vasta, kun maadoitukset on tehty ja tiedetään palavan aineen laatu. Mallissa laskeaan eri toimijoiden maadoitusten tekemiseen kuluva aika ja näistä pienin valitaan maadoitusten valmistumishetkeksi. Ajanhetki, jolloin palavan aineen laatu on selvillä, tarkistetaan kohdasta "liikenteenohjaus".

Vesitykkiselvitykset voidaan aloittaa vasta kun kaikki em. ehdot täyttyvät.

#### Vesitykit

Oletetaan että

$t_{inq}$  = ajanhetki, jolloin vesitykki on saapunut kohteeseen ja kyseisen yksikön tiedustelu on tehty (s).

$t_{ground}$  = ajanhetki, jolloin maadoitukset on tehty (s).

$t_{tox}$  = ajanhetki, jolloin liikenteenohjaus on selvittänyt, mikä aine palaa (s).

$\Delta t_{beg}$  = selvityksen alkutoimet (s).

$\Delta t_{end}$  = selvityksen lopputoimet (s).

$l_{fire}$  = palon kohtisuora etäisyys pelastustiestä (m).

$v_{cannon}$  = letkuselvityksen etenemisnopeus (s/m).

$\Delta t_{water}$  = aika, joka kuluu letkun täyttymiseen vedellä (s).

Hetki  $t_{cannon}$ , jolloin vesitykki on käytettävissä palon sammuttamiseen/jäädymiseen ilman letkurikkoa, lasketaan seuraavasti:

$$t_{cannon} = \text{MAX}(t_{inq}, t_{ground}, t_{tox}) + \Delta t_{beg} + (l_{fire} \times v_{cannon}) + \Delta t_{end} + \Delta t_{water}$$

Letkurikon todennäköisyyden  $p_{broken}$  mukaisesti osassa tapauksista edelliseen lisätään letkurikosta aiheutuva lisäviive  $\Delta t_{broken}$ .

## 3.4 Aineiston kerääminen

### 3.4.1 Asiantuntija-arviot

Todennäköisyysjakauman määrittelyssä voidaan tehdä ero subjektiivisen ja objektiivisen todennäköisyyden välillä. Objektiivinen todennäköisyys viittaa tilanteeseen, jossa muuttujalla on ominaisuuksiltaan tunnettu, mitattu todennäköisyysjakauma. Mittausaineistoa ei kuitenkaan aina ole olemassa. Subjektiiviset todennäköisyydet taas eivät perustu vastaavaan havaintoaineistoon, vaan määrittelijän näkemykseen. Epävarmuuden mittana käytetään yleisesti epävarman suureen ajateltavissa olevien arvojen vaihteluväliä. Se määritellään kolmella suureella (kolmipistemääritys) [16]:

- alin mahdollinen arvio (vastaa arvoa, jonka alittamisen todennäköisyys on esim. 1 % tai 10 %)
- ylin mahdollinen arvio (vastaa arvoa, jonka ylittämisen todennäköisyys on esim. 1 % tai 10 %)
- todennäköisin arvio.

Usein käytetään kolmiojakaumaa sen yksinkertaisuuden ja helpon ymmärrettävyyden vuoksi.

Asiantuntijatietoa tarvitaan silloin, kun käsillä ei ole mitattua tietoa tai sitä ei ole edes periaatteessa mahdollista vielä ollakaan, kuten ennustettaessa. Riskinarviointi

tarkoittaa silloin systeemin toiminnan perinpohjaista selvittämistä ja mahdollisten uhkatekijöiden todennäköisyyksien arviointia. Asiantuntija-arvioiden keräämisestä käytetään englannin kielessä termiä "elicitation" (= houkutellessa esiin), joka kuvaa hyvin arvioinnin suunnittelijan tehtävää: Hänen on pystyttävä houkuttelemaan esiin asiantuntijoiden todellinen tietämys arvioitavasta ilmiöstä. Asiaa koskeva tieto voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen [17]:

- psykologinen ja päätöksentekoteoreettinen kirjallisuus ihmisen tavasta käsitellä todennäköisyyksiä epävarmuuden mittarina
- tilastotieteellinen kehitystyö tietämyksen päivittämisestä todennäköisyyksien avulla (bayesilainen informaation prosessointi)
- joukko tapausselostuksia asiantuntijatiedon käyttämisestä eri tilanteissa.

Tässä tutkimuksessa operaatioaikamallin rakenne ts. toimijoiden roolien ja niiden välisten kytkentöjen määrittely tapahtui asiantuntijoiden välisissä keskusteluissa. Toimijoiden rooleihin liittyvien aikaviiveiden todennäköisyysjakaumien määrittäminen tapahtui puhelinkeskustelujen ja sähköpostien välityksellä. Osoittautui, että asiantuntijat mielellään kuvaavat toimintoihinsa liittyviä aikaviiveitä aikaväleinä (esim. "asiaan kuluu 2–3 min") tai antamalla vain todennäköisimmän arvion (esim. "kesto n. 30 s"). Kun heitä pyydettiin antamaan arvio käyttäen kolmipistemäärittystä, jonka periaate heille lyhyesti selostettiin, tuloksena saatiin esim. "asiaan kuluu 20–30 minuuttia, lähempänä 20 minuuttia". Aikavälien hahmottaminen tätä tarkemmin osoittautui käytännössä vaikeaksi.

#### 3.4.2 Vesitykkiselvitysten mittaukset

##### 3.4.2.1 Mittausjärjestelyt

Vesitykkien selvitysaikoja mitattiin Tampereella Rantatie 8:n kohdalla olevalla puistoalueella 8.6.2012 (kuva 7). Mittauksissa käytettiin Tampereen aluepelastuslaitoksen miehistöä ja kalustoa. Mittausten suunnittelusta vastasi Pelastusopisto. VTT:n tutkijat toimivat tarkkailijoina ja tallensivat kokeet videolle.

Alusta oli kuiva, lyhyeksi leikattu tasainen nummikko, lämpötila n. 20 °C ja aurinko paistoi. Tuuli oli mittausajankohtana niin heikko, että sen vaikutus voidaan jättää huomiotta. Mittausten suorittamisolosuhteet olivat suoritusnopeuden kannalta lähes optimaaliset, mikä huomioitiin lopputuloksia arvioitaessa. Jos epätasaisen alustan, näkemäesteiden tai savun vaikutus sovelluskohteessa on poikkeuksellisen suuri, ei tässä mittauksessa havaittuja aikoja voi käyttää.

Selvitykset tehtiin loivaan ylämäkeen (kuva 8). Kalustona oli kaksi sammu- tusautoa (miehitys 1+3) ja yksi säiliöauto (miehitys 0+1). Vesitykki oli kiinni säiliö- auton katolla (kuva 9). Kussakin kokeessa vesitykki irrotettiin, siihen kiinnitettiin jalka, laskettiin alas ja siirrettiin kohteeseen. Selvityksiin käytettiin säiliöauton letkukehikolle pakattua 76 mm paloletkua. Selvitykset tehtiin kahdella rinnakkaisella 76 mm paloletkulla, koska laskennallisena sammutusvesivirtatavoitteena pidettiin

3 000 litraa/minuutti. Mittauksessa ei otettu kantaa letkujen tai vesilähteen riittävyteen, joten lisävesiselvityksiä ei tehty. Kokeet suoritettiin sammutusasussa. Sammutusauton miehistöllä oli paineilmalaitteet selässä, mutta kasvo-osia ei kiinnitetty. Kokeen suorittajat olivat Tampereen aluepelastuslaitoksen ammattipalomiehiä. Mittausten kulku oli suorittavien henkilöiden tiedossa ennen toiminnan alkamista. Mittaustilanteessa oli käytössä kaksi sammutusauton miehistöä ja he suorittivat selvitykset vuorotellen, joten suoritusten väliin saatiin lepotauko. Kokeista otettiin aikaa ajanottokellolla ja ne kuvattiin videokameroilla. Lopuksi suoritettiin vesitykin virtaamamittaus (kuva 10).

Selvitysaikamittauksia tehtiin viisi. Mittauksilla pyrittiin saamaan selville letkujen ja vesitykin selvitysaika 100 ja 150 metrin päähän yhden sammutusauton ja säiliöauton miehistöllä. Mittauksia tehtiin kahdella tavalla: niin, että molemmat yksiköt olivat yhtä aikaa kohteessa, ja niin, että sammutusauton miehistö oli selvittänyt letkut valmiiksi ennen myöhemmin saapuvaa säiliöautoa, jonka kyydissä vesitykki oli. Selvitykset tehtiin niin sanotusti kuivana, eli letkuja ei paineistettu. Erillisellä mittauksella selvitettiin lisäksi veden kytkemiseen ja letkujen paineistukseen kuluva aika.

#### 3.4.2.2 Tulokset

Suoritetut kokeet ja niiden tulokset esitetään taulukoissa 1 ja 2. Kokeiden perusteella lasketut ja arvioidut aikaviiveet ja etenemisnopeudet esitetään taulukossa 3.

Käytännössä on erittäin vaikeaa mitata tiedusteluaikaa niin, että se vastaisi todellista tapahtumaa. Tästä syystä tiedusteluaika on arvioitu kokemusperäisesti. Käskytykseen ja viestintään kuluvat ajat on huomioitu tiedusteluajoissa. Ensimmäisen yksikön tyyppilliseksi tiedusteluajaksi arvioitiin yksi minuutti, mutta vaihteluväli on suuri. Muun kuin ensimmäisen yksikön tekemän tiedustelun arvioitiin sujuvan nopeammin, mutta vaihtelu on siinäkin suurta.

Mittausten tulosten perusteella tehtiin asiantuntija-arvio sovellusesimerkissä todennäköisesti toteutuvista selvitysajoista (taulukko 3). Arviointi tehtiin kolmiojakamana siten, että mittauksessa saatuja tuloksia ja mittausolosuhteita verrattiin sovellusesimerkissä todennäköisesti vallitseviin olosuhteisiin. Arvioissa otettiin huomioon, että suoritettussa mittauksessa oli todennäköisesti muun muassa helpompi alusta, selkeämpi kokonaistilanne sekä pienempi tilanpaine kuin todellisessa tilanteessa. Siksi todellisen tilanteen selvitysajoiksi arvioitiin pääsääntöisesti pidemmät ajat kuin mittauksessa mitatut ajat. Arvioinnissa ei kuitenkaan otettu huomioon erityisolosuhteita. Esimerkiksi runsas lumisade saattaa aiheuttaa huomattavasti pidempiä selvitysaikoja.

Selvitysaika alkaa fyysisen toiminnan alkaessa eli käskynantohetkestä. Selvitysaika päättyy, kun vesitykki on valmiina sammutustoimintaan ja ”vettä”-merkki annetaan. Tyyppilliseksi selvitysajaksi arvioitiin 100 metrin selvitysmatkalla 5 minuuttia 20 sekuntia ja 150 metrin selvitysmatkalla 6 minuuttia. Veden kytkeytymisajan lasketaan alkavan ”vettä”-merkistä, ja se päättyy sammutusvaikutuksen alkaessa. Käytännössä veden kytkeytymisaika on siis pumpun kytkemiseen ja letkujen täyttämiseen kuluva aika. Koska selvitysmatkat olivat pitkiä ja käytössä oli kaksi rin-

### 3. Operaatioaikamallinnus

---

nakkaista melko suuriläpimittaista letkua, veden kytkeytymiseen kuluvaksi ajaksi arvioitiin mittausten perusteella tyypillisesti yksi minuutti. Yhteensä ensitoimenpiteisiin 100 metrin selvitysmatkalla arvioitiin kuluvan 7 minuuttia 20 sekuntia ja 150 metrin selvitysmatkalla 8 minuuttia. Vesitykkien selvityksen etenemisnopeuksia käytettäessä pitää huomioida, että mittaustulokset pätevät vain 150 metrin matkaan asti. Sitä pidemmällä matkoilla pelastajat eivät pysty kantamaan kaikkia tarvikkeita mukanaan vaan joutuvat hakemaan lisää varusteita autolta.

Mittauksissa selvitettiin myös selvitysaikaa niissä tapauksissa, joissa sammu-  
tustoimintaa rajoittaa paikalle saatujen vesitykkien määrä. Oletuksena oli, että onnettomuustilanteen myöhäisemmässä vaiheessa paikalla on riittävästi henkilöstöä ja letkuja tekemään letkuseelvitykset valmiiksi ennen vesitykin saapumista. Vesitykin saapuessa se viedään valmiiksi selvitetyn letkun päähän. Tätä mitattiin kahdella mittauksella siten, että ensin mitattiin letkujen selvitykseen kuluva aika ja sen jälkeen erillisenä mittauksena pelkän vesitykin selvittämiseen kuluva aika. Arvioitiin, että pelkän vesitykin selvitysaika valmiiksi selvitettyjen letkujen päähän on 100 metrin selvitysmatkalla tyypillisesti 3 minuuttia 30 sekuntia.

Yhtenä mitattavana asiana oli myös letkurikon aiheuttaman vesikatkon pituus. Asia selvitettiin yhdellä mittauksella siten, että veden suihkutessa vesitykistä tilanteen johtaja näytti oletetun vuotokohtan ja vuotavaksi oletettu letku vaihdettiin. Vuotokohta oli tässä tapauksessa letkuseelvityksen puolessavälissä. Mittauksen perusteella arvioitiin, että 76 mm letkun rikkoutumisen aiheuttama lisäviive 150 m selvityksessä on tyypillisesti kolme minuuttia.



**Kuva 7.** Puistoalue ja mittauksissa käytetty kalusto.



**Kuva 8.** Selvitykset tehtiin loivaan ylämäkeen.



**Kuva 9.** Vesitykki säiliöauton katolla.

### 3. Operaatioaikamallinnus



**Kuva 10.** Vesitykin virtaamamittaus.

**Taulukko 1.** Vesitykin selvitysaikamittaus: kokeet 1–4 ja 6 (koetta 5 ei suoritettu).

Suoritettu koe	Selvitysmatka		Tulokset
	Tavoite	Toteutunut	
KOE 1: Yksiköt kohteessa yhtä aikaa, selvitykset kuivana	100 m	n. 90 m (5 letkun mittaa)	Selvitysaika 188 s
KOE 2: Yksiköt kohteessa yhtä aikaa, selvitykset kuivana	150 m	n. 135 m (7 letkun mittaa)	Selvitysaika 203 s
KOE 3: Säiliöauto kohteeseen, kun letkuselvitykset tehty, selvitykset kuivana	100 m	n. 90 m (5 letkun mittaa)	Selvitysaika letkuille 164 s Selvitysaika vesitykille 132 s
KOE 4: Säiliöauto kohteeseen, kun letkuselvitykset tehty, selvitykset kuivana	150 m	n. 135 m (7 letkun mittaa)	Selvitysaika letkuille 180 s Selvitysaika vesitykille 138 s
KOE 6: Yksiköt kohteessa yhtä aikaa, selvitykset märkänä, letkurikko n. puolivälissä selvitystä	150 m	n. 135 m (7 letkun mittaa)	Selvitysaika 203 s Sammutusveden kytkeytymisaika 54 s Vesikatko letkurikon sattuessa 162 s



**Taulukko 2.** Vesitykin virtaamamittaus: koe 7.

KOE 7 (7 letkun mittaa, n. 135 m)	Virtaus	Paine pumpulla	Paine tykillä	Paine- häviö
Kaksi rinnakkaista 76 mm letkua	2250–2400 l/min	980 kPa	500 kPa	480 kPa
Yksi 76 mm letku	1790 l/min	930 kPa	200 kPa	730 kPa

**Taulukko 3.** Asiantuntija-arviot vesitykkiselvityksen eri osiin kuluviista ajoista sovellusesimerkin tyypisessä kohteessa.

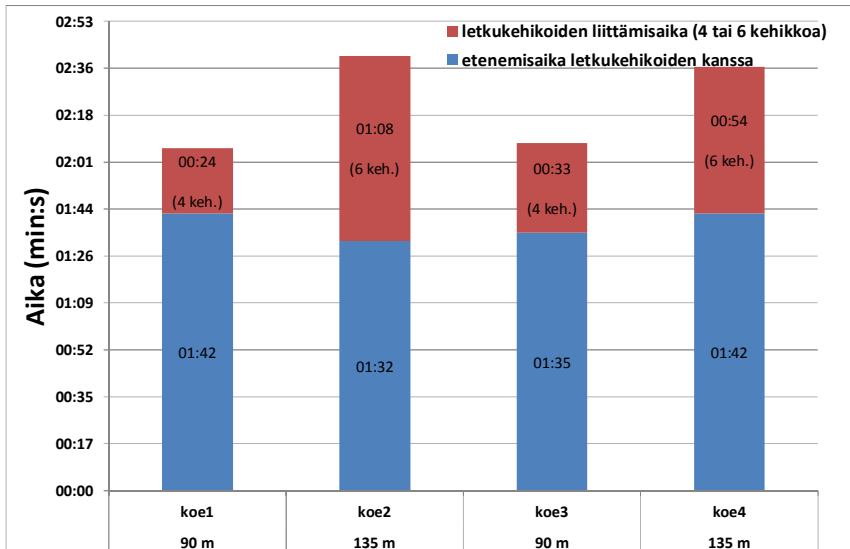
Mittausten perusteella arvioidut ajat (sekuntia)	Min.	Max.	Tyypillinen arvo
Tiedustelu aika, ensimmäinen yksikkö (ei mitattu)	10	120	60
Tiedustelu aika, seuraavat yksiköt (ei mitattu)	0	60	30
Selvityksen alkutoimenpiteet	60	180	120
Etenemisnopeus (m/s) <sup>1,2</sup>	0,5	0,67	0,5
Selvityksen lopputoimenpiteet	60	180	120
Veden kytkeytymiseen kuluva aika	45	90	60
Letkurikon aiheuttama vesikatko	150	180	180

<sup>1)</sup> Pätee vain 150 metriin asti. Pidemmällä matkoilla lisävarusteiden hakemiseen kuluu aikaa.

<sup>2)</sup> Eri kehikoiden välisten letkujen liittämiseen kuluva aika sisältyy etenemisaikoihin.

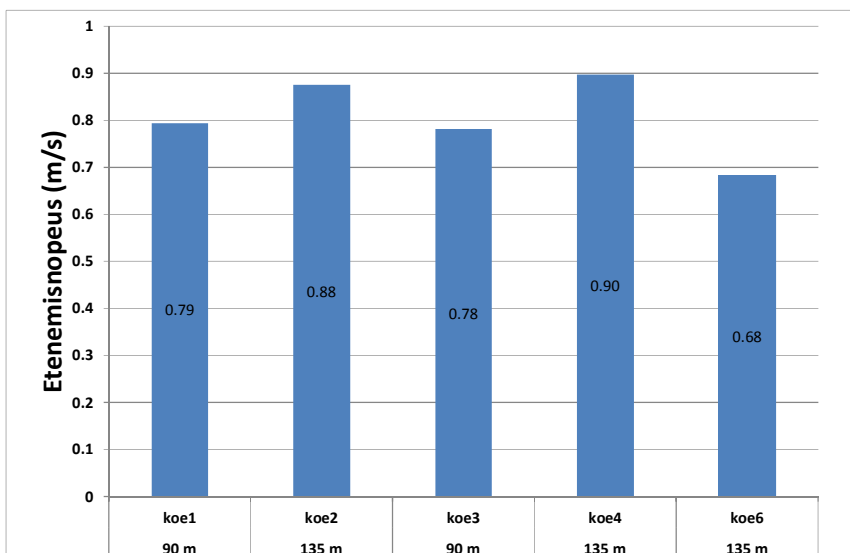
Videoiden avulla pystyttiin jälkikäteen erottamaan tarkemmin eri vaiheita vesitykkiselvityksessä. Edellä esitetyissä taulukoissa nollakohtana on käytetty ajanhetkeä, jolloin yksikönjohtaja antaa käskyn. Aikaan sisältyvät samalla myös vaiheet, joissa pelastajat käskyn saatuaan siirtyivät käskynantopaikalta (sammutusauto) säiliöautolle, ottivat täydet letkukehikot ja ryhtyivät purkamaan niitä. Seuraavissa kuvissa (kuvat 11 ja 12) tarkastelun nollakohtana on ajanhetki, kun ensimmäinen pelastaja on lähtenyt etenemään letkukehikoiden kanssa (muiden yksikön jäsenten seurassa heti perässä). Tällöin mukana ei ole sammutusautolta säiliöautolle kuljettua matkaa tai aikaa eikä myöskään kehikoiden hakemiseen kulunutta aikaa. Tämä tarkastelu tuottaa mm. varsinaisen letkukehikoiden purkamisen yhteydessä tapahtuneen etenemiseen kuluvan ajan sekä letkukehikoiden liittämisaian (tässä tarkasteltu vain neljää tai kuutta ensimmäistä kehikkoa). Tällöin etenemisnopeus ja -aika poikkeavat taulukossa 1 esitetyistä arvoista. Kuvassa 11 esitetään kokeiden 1–4 osalta etenemisaika ja letkujen liittämisaika.

### 3. Operaatioaikamallinnus



**Kuva 11.** Kokeiden 1–4 aikana mitatut etenemis- ja letkuliitosajat.

Kuvassa 12 puolestaan esitetään etenemisnopeus siitä, kun ensimmäinen pelastaja on lähtenyt liikkeelle kehikoiden kanssa päättyen siihen ajanhetkeen, jolloin "vettä"-merkki on annettu.



**Kuva 12.** Kokeiden 1–4 ja 6 aikana mitatut etenemisnopeudet ajanhetkien 1. pelastaja liikkeellä ja "vettä"-merkki välillä.

### 3.5 Operaatioaikamallin parametrit

Taulukoissa 5–12 esitetään laskennoissa käytettyjen satunnaismuuttujien jakaumat. Jakaumia on kuvattu taulukon 4 mukaisilla parametreilla.

**Taulukko 4.** Satunnaismuuttujien kuvaamiseen käytetyt jakaumat ja niiden parametrit.

Jakauma	Parametrit
Vakio	arvo
Tasajakauma	minimi, maksimi
Kolmiojakauma	minimi, maksimi, piikki
Gammajakauma	alfa, beta, $x_{\min}$

**Taulukko 5.** Lähtötilanne (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Palon etäisyys pelastustiestä	Tasajakauma	50, 150	m	Liite 1
Automaattinen paloilmoin havaitsee palon (Toimintavarmuus 85 %)	Tasajakauma	10, 120	s	[18]
Ohikulkija havaitsee palon ja soittaa 112 (Tapahtuman todennäköisyys 50 %)	Tasajakauma	60, 900	s	A
<b>Huom.!</b> Ajanhetki, jolloin veturinkuljettaja havaitsee palon, lasketaan kohdassa "veturinkuljettaja", vrt. taulukko 6.				

**Taulukko 6.** Veturinkuljettaja (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Vaunujen lukumäärä	Tasajakauma	5, 50	-	A
Palovaunun järjestysluku veturista käsin	Tasajakauma	1, 50	-	-
Vaunun pituus	Vakio	25	m	A
Kävelynopeus	Tasajakauma	0,7, 1,3	m/s	[8]
Soitto liikenteenohjaukseen	Tasajakauma	30, 120	s	A
Soitto 112	Tasajakauma	30, 120	s	A
Hätämaadoitus	Tasajakauma	10, 20	min	A
<b>Huom.!</b> Häätokeskuksen vastausaika määritellään kohdassa "häätokeskus", vrt. taulukko 10.				

### 3. Operaatioaikamallinnus

**Taulukko 7.** Liikenteenohjaus (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Liikenteen keskeyttäminen	Tasajakauma	20, 60	s	A
Soitto hätäkeskukseen	Tasajakauma	30, 120	s	A
Tieto tilanteesta käyttökeskukseen	Tasajakauma	2, 45	s	A
Lastin selvittäminen kun vaunun numero on tiedossa	Tasajakauma	20, 30	s	A
<b>Huom.!</b> Lisäviive: unohdetaan selvittää lasti 5 %:n todennäköisyydellä. Viiveen pituus määräytyy siitä, että lasti selvitetään vasta kun hätäkeskus tai pelastuslaitos kysyy lisätietoja.				

**Taulukko 8.** Käyttökeskus (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Kytetään sähköt pois	Kolmiojakauma	60, 300, 120	s	A
Ilmoitetaan liikenteenohjaukseen	Tasajakauma	2, 45	s	A
Hälytetään sähkökunnossapitäjä	Tasajakauma	30, 120	s	A

**Taulukko 9.** Sähkökunnossapitäjä (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Saavutaan paikalle	Kolmiojakauma	20, 70, 45	min	A
Tehdään omat maadoitukset	Vakio	20	min	A
Tehdään lisämaadoitukset (tapahtuman todennäköisyys 10 %)	Vakio	20	min	A
Ilmoitetaan liikenteenohjaukseen	Tasajakauma	30, 120	s	A

**Taulukko 10.** Hätäkeskus (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Vaste ilmoitinlaiteilmoitukseen	Tasajakauma	15, 30	s	A
Vastausaika puhelimeen	Tasajakauma	1, 15	s	A
Hälytysaika 1. yksikkö	Tasajakauma	45, 120	s	A
Hälytyksen vastaanotto	Tasajakauma	1, 10	s	A
<b>Huom.!</b> Oletetaan että tähän kohteeseen lähetetään aina vähintään joukkue. Hälytys laajennetaan komppanialhdöksi, kun saadaan tarkempia tietoja palosta.				

**Taulukko 11.** Pelastuslaitos (A = asiantuntija-arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Ilmoitinilmoituksen kuittaaminen	Tasajakauma	60, 90	s	A
Pyydetään lisätietoja	Tasajakauma	30, 120	s	A
Ensimmäinen tiedustelu	Kolmiojakauma	10, 120, 60	s	A
Seuraavat tiedustelut	Kolmiojakauma	0, 60, 30	s	A
Maadoitukset	Tasajakauma	10, 20	min	A
Lähtöaika+ajoaika, R PI 101 (T11)	Vakio	4	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 103 (T13)*	Vakio	5	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 106 (T16)	Vakio	5	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 121 (T31)	Vakio	8	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 31 (Itä P3)	Vakio	10	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 141 (T41)	Vakio	10	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 161 (T61)	Vakio	20	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 501 (N11)*	Vakio	26	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 181 (L21)*	Vakio	26	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 32 (Länsi P3)	Vakio	26	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 233 (K13)*	Vakio	27	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 5341 (PK23)*	Vakio	28	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 34 (Pirkanmaa P30)	Vakio	28	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 20 (Pirkanmaa P2)	Vakio	28	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 5058 (N18)	Vakio	28	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 572 (Y 12)*	Vakio	31	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 172 (L 12)*	Vakio	35	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 1094 (T18+pumppukontti)	Vakio	40	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 353 (V13)*	Vakio	45	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 413 (VI13)*	Vakio	48	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 263 (PA13)*	Vakio	50	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 933 (O13)*	Vakio	54	min	A [13]
Lähtöaika+ajoaika, R PI 33 (Pohjoinen P3)	Vakio	60	min	A [13]
Jakaumaksi muuttamisen kerroin (ks. liite 5)	Gamma	2,82, 0,27, 0,24		[8]
<b>Huom.!</b> Pelastuslaitoksen yksiköiden lähtöaika + ajoaika -arviot on määritetty seuraavasti: Lähtöajaksi on laskettu vakinaisen henkilöstön miehittämissä yksiköissä 60 s ja sopimuspalokuntien miehittämien yksiköiden osalta aluepelastuslaitoksen ja sopimuspalokunnan välisen sopimuksen mukainen aika (5, 10, 15 min). Ajoaikana on käytetty sitä kokemusperäistä tietoa, että ajomatka pelastuslaitoksen hälytysajossa on keskimäärin 1 km/min. Tähdellä * merkityillä yksiköillä on vesitykki.				

### 3. Operaatioaikamallinnus

---

**Taulukko 12.** Vesitykit (A = asiantuntija-arvio, M = mittauksiin perustuva arvio).

Satunnaismuuttuja	Jakauma	Parametrit	Yksikkö	Lähteet
Selvityksen alkutoimenpiteet	Kolmiojakauma	60, 180, 120	s	A
Selvityksen lopputoimenpiteet	Kolmiojakauma	60, 180, 120	s	A
Letkuseelvityksen etenemisaika per metri	Kolmiojakauma	0,5, 0,67, 0,5	m/s	M, A
Vedellä täyttymiseen kuluva aika	Kolmiojakauma	45, 90, 60	s	M
Lisäviive: Letkurikko (todennäköisyys 5–30 %)	Kolmiojakauma	150, 180, 180	s	M [13]
<b>Huom.!</b> Letkuseelvityksen etenemisaika per metri on konservatiivisesti valittu jonkin verran suuremmaksi kuin kokeissa mitattu etenemisnopeus.				

### 3.6 Operaatioaikasimulointien tulokset

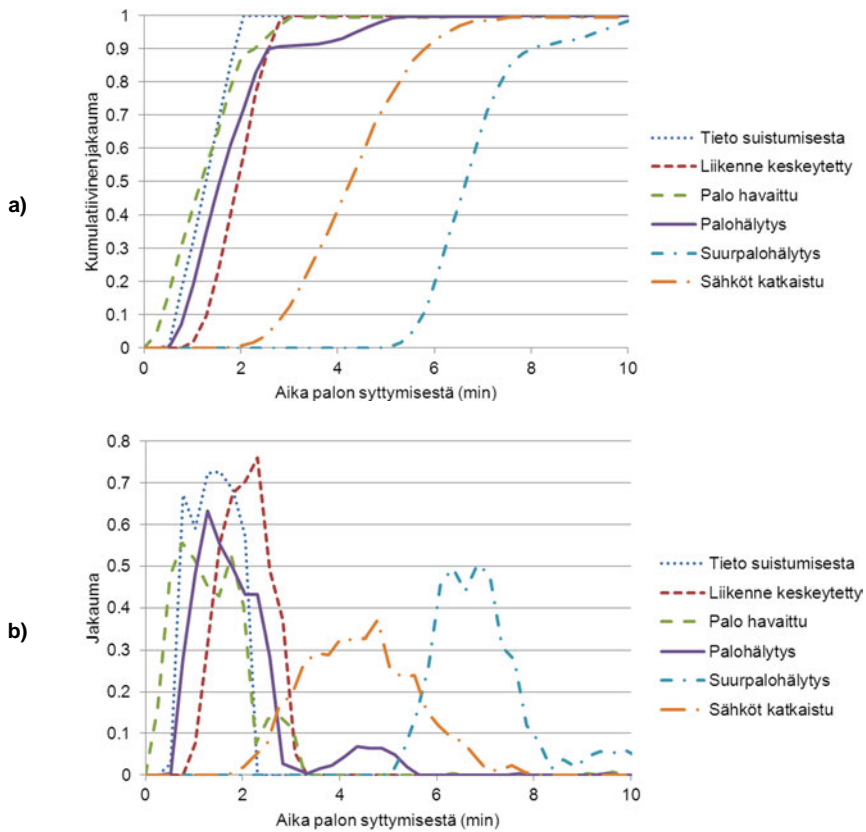
Monte Carlo -simulaatio tehtiin kahdelle eri tapaukselle:

**Tapaus 1:** Yksiköiden saapumisajat kohteeseen mallinnettiin olettaen, että lähtö- ja matka-ajat noudattavat tarkalleen pelastuslaitoksen operatiivisen suunnitelman (kuva 1) mukaisia arvioita.

**Tapaus 2:** Lähtö- ja matka-ajat laajennettiin jakaumiksi menetelmällä, joka kuvataan kohdan 3.3 kohdassa "Pelastuslaitos" ja liitteessä 5.

Kummallekin tapaukselle laskettiin tuhat realisaatiota. Tilanteen kehittyminen eri tapauksissa esitetään liitteissä 3 ja 4.

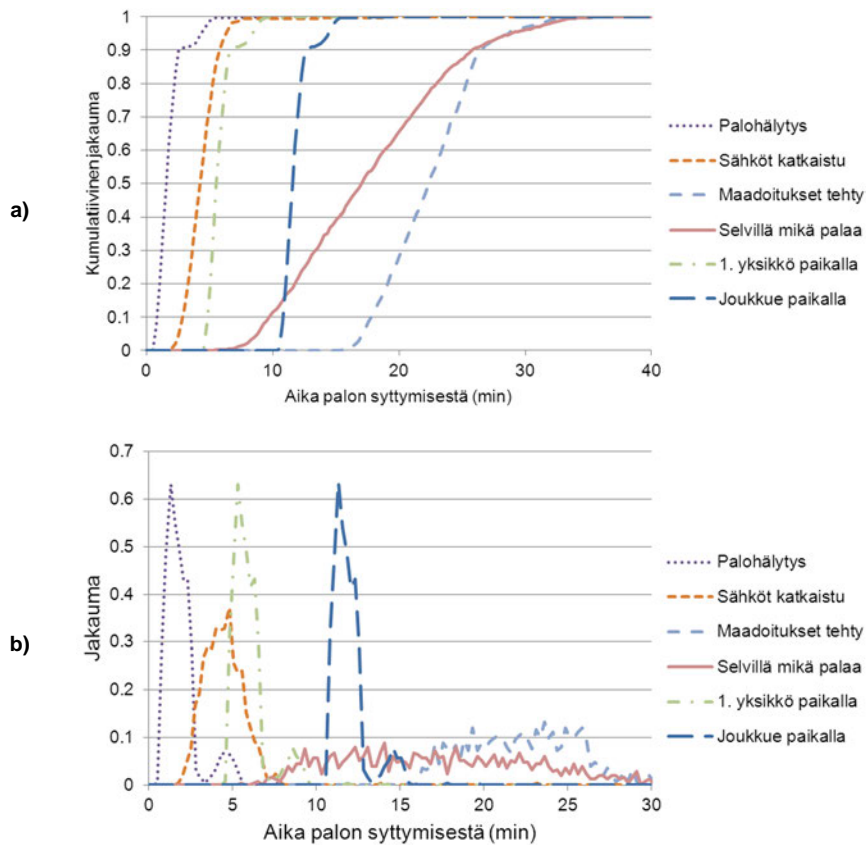
Kuvassa 13 esitetään alkuvaiheen tilanteeseen liittyvien aikaviiveiden jakaumat. Alkuvaiheen tilanteessa tapaukset 1 ja 2 eivät eroa merkittävästi toisistaan (vrt. liitteet 3 ja 4). Palon havaitsemisen jakaumassa esiintyvä "häntä" johtuu siitä, että automaattisen palonilmaisun oletettiin epäonnistuvan 15 %:ssa tapauksista, jolloin palo havaittiin aistein joko veturinkuljettajan tai ohikulkijan toimesta, mikä aiheutti viivettä. Tämä viive näkyy myös palohälytyksen ja suurpalohälytyksen jakaumissa. Liikenteen keskeyttämiseen tai sähköjen katkaisemiseen tämä ei vaikuta, koska näiden toimintojen oletettiin käynnistyvän jo junan pysähtymisen ts. raideliikenneonnettomuuden myötä riippumatta siitä, onko tiedossa, että ratapihalla on myös tulipalo.



**Kuva 13.** Tilanteen alkuvaiheen toimenpiteiden jakaumat a) kertymäfunktioina ja b) tiheysfunktioina.

Kuvassa 14 esitetään pääpiirteittäin tilanteen kehittyminen pelastustoiminnan alkuvaiheessa eli ensimmäisten 40 min aikana. Kuvasta voidaan nähdä, että joukkue on kaikissa tapauksissa kokonaisuudessaan paikalla ennen kuin maadoitukset on tehty ja useimmissa tapauksissa ennen kuin on selvillä, mikä on palava aine. Palavan aineen selvittäminen ja maadoitusten teko tapahtuvat samanaikaisesti eivätkä ole toisistaan riippuvia prosesseja kuin siltä osin, että joissakin tapauksissa veturinkuljettaja voi tehdä maadoitukset, kunhan on ensin selvittänyt tilanteen ja välittänyt tiedot liikenteenohjaukseen. Palavan aineen selvittämiseen liittyvä viive riippuu siitä, kuinka kaukana palava vaunu on veturista. Maadoitukset tehdään kuitenkin pääsääntöisesti ensimmäisen paikalle saapuvan pelastuslaitoksen yksikön toimesta. Laskennoissa oletettiin, että 10 %:ssa tapauksista ensimmäinen pelastuslaitoksen yksikkö ei syystä tai toisesta kykene maadoituksia tekemään, mikä aiheuttaa viiveen, joka näkyy kuvan 14 kumulatiivisessa aikajakaumassa loivempänä häntänä.

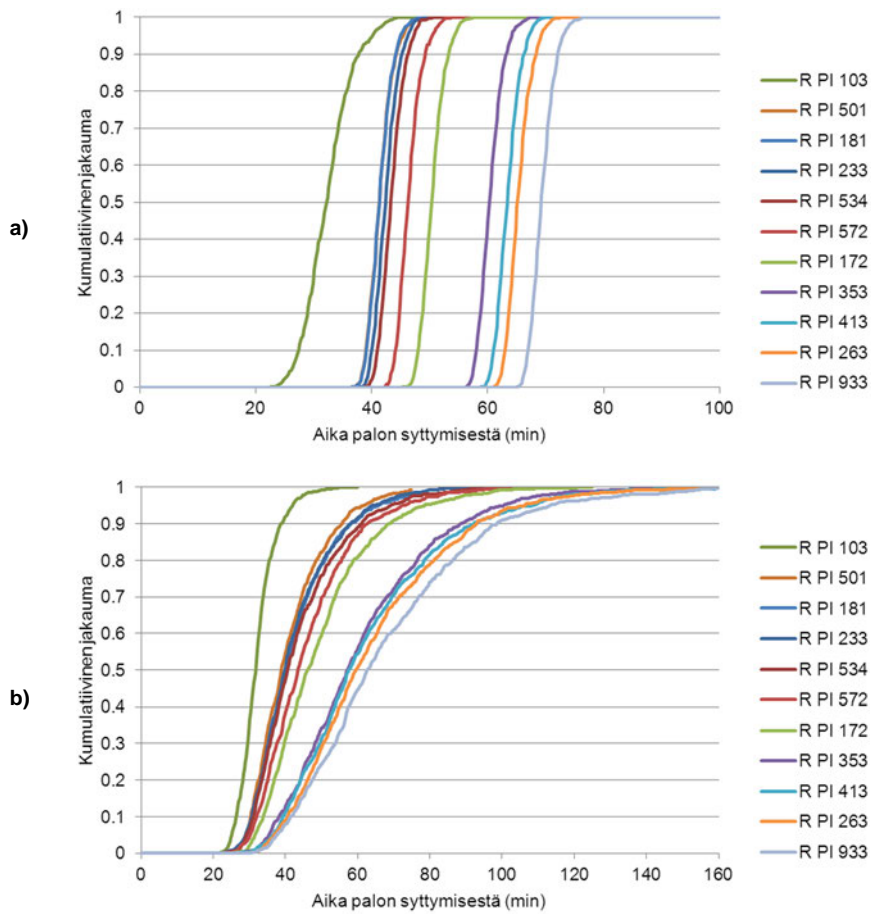
### 3. Operaatioaikamallinnus



**Kuva 14.** Tilanteen päätapatumien aikajakaumat ensimmäisen 40 min aikana (tapaus 1): a) kertymäfunktioina ja b) tiheysfunktioina.

Kuvassa 15 esitetään vesitykkien sammutusvalmiuteen liittyvät aikaviiveet tapauksissa 1 ja 2. Kuvista voidaan nähdä, miten pelastuslaitoksen yksiköiden lähtö- ja matka-aikojen muuttaminen jakaumaksi vaikuttaa tuloksiin: ääritapausten määrä lisääntyy varsinkin jakauman loppupäässä. Tämä on eräs tapa huomioida pelastuslaitoksen saapumisaikoihin liittyvät epävarmuudet, joita ei nyt mallinnettu kovin tarkasti. Jakaumaksi muuttaminen tehtiin konservatiivisesti olettaen, että lähtö- ja matka-aikoihin pätee sama jakauma kuin toimintavalmiusaikoihin tilastollisesti. Todellisuudessa kuitenkin tilastollinen toimintavalmiusaikojen jakauma sisältää myös palon sijainnin tilastollisen vaihtelun. Koska mallissa ei tarkasteltu ainoastaan pelastuslaitoksen toimintaa, joka käynnistyy hälytyksestä, vaan koko prosessia kaikkien toimijoiden osalta, on vesitykkien toimintavalmius laskettu palon syttymishetkestä alkaen. Tulokset ovat numeerisessa muodossa taulukossa 13.





**Kuva 15.** Aikaviive palon syttymishetkestä siihen, että vesitykit ovat toimintavalmiudessa tapauksessa 1 (a) ja tapauksessa 2 (b).

### 3. Operaatioaikamallinnus

**Taulukko 13.** Tulokset numeerisessa muodossa tuhannelle realisaatiolle. Ajat on laskettu alkaen palon syttymisestä, jonka oletetaan tapahtuvan välittömästi, kun juna on suistunut raiteiltaan.

Tapahtuma	Tapaus 1:			Tapaus 2:		
	Keskiarvo t (min)	Minimi t (min)	Maksimi t (min)	Keskiarvo t (min)	Minimi t (min)	Maksimi t (min)
Tieto suistumisesta	1.26	0.51	2.00	1.26	0.51	2.00
Liikenne keskeytetty	1.93	0.90	2.97	1.93	0.90	2.97
Palo havaittu	1.27	0.17	9.58	1.27	0.17	18.77
Palohälytys	1.79	0.45	9.48	1.79	0.45	9.62
Suurpalohälytys	6.82	5.03	14.17	5.80	2.61	14.47
Sähköt katkaistu	4.35	1.69	23.01	4.36	1.69	28.64
Maadoitukset tehty	22.43	15.33	35.77	21.95	14.03	46.90
Selvillä mikä palaa	17.58	5.34	35.97	17.58	5.34	35.97
1. yksikkö paikalla	5.79	4.45	13.48	4.76	2.16	13.46
Joukkue paikalla	11.79	10.45	19.48	14.89	6.71	37.65
Komppania paikalla	66.82	65.03	74.17	89.50	47.20	205.60
Vesitykki sammutusvalmiina:						
R PI 103 (T13)	32.38	22.41	45.67	32.24	21.53	55.34
R PI 501 (N11)	41.50	37.23	49.98	41.19	23.25	101.58
R PI 181 (L21)	41.48	36.55	48.88	42.85	23.11	110.30
R PI 233 (K13)	42.51	37.82	51.92	42.37	23.01	100.69
R PI 5341 (PK23)	43.49	38.65	50.70	43.74	23.20	107.31
R PI 572 (Y 12)	46.48	42.18	55.17	46.15	23.17	115.39
R PI 172 (L 12)	50.49	45.07	57.68	49.33	25.31	129.27
R PI 353 (V13)	60.50	56.19	67.58	61.06	25.28	176.63
R PI 413 (VI13)	63.51	58.75	70.51	62.76	27.35	167.80
R PI 263 (PA13)	65.43	61.05	74.20	64.37	28.45	197.82
R PI 933 (O13)	69.45	65.05	76.68	68.09	30.13	180.21

Herkkyystarkastelulla tutkittiin, mitä tilanteeseen vaikuttaisi, jos a) maadoituksia ei tarvitsisi tehdä ja b) palava aine ja suurpalotilanne olisi alusta alkaen selvillä. Herkkyystarkastelun tulokset ovat taulukossa 14. Havaitaan, että maadoitusten pois jättäminen (tapaus a) vaikuttaisi merkittävästi vain ensimmäisen vesitykin sammutusvalmiuteen saamiseen, joka nopeutuisi n. 5–6 minuutilla. Tämä johtuu siitä, että ensimmäinen vesitykki on kohteessa huomattavasti ennen muita ja joutuu todennäköisemmin tai pitempään odottelemaan maadoitusten valmistumista. Jos tilanteen luonne olisi heti tiedossa (tapaus b), nopeuttaisi se kaikkien vesitykkien sammutusvalmiuteen saamista keskimäärin n. 1,5–2,5 minuuttia. Tämä johtuu siitä, että komppania voidaan hälyttää paikalle saman tien eikä palavan aineen selvittämistä tarvitse odottaa. Ero ei kuitenkaan ole tätä suurempi, koska yksiköt joutuvat odottamaan maadoitusten valmistumista ennen vesitykkiselvityksiin ryhtymistä.

**Taulukko 14.** Herkkyystarkastelu tilanteille, joissa a) ei tehdä maadoituksia ja b) tilanteen vakavuus ja palava aine ovat heti tiedossa.

Tapahtuma	Tapaus 1: Perustapaus			a) ei maadoituksia			b) tilanne heti selvillä			Tapaus 2: Perustapaus			a) ei maadoituksia			b) tilanne heti selvillä		
	t (min)	t (min)	ero	t (min)	t (min)	ero	t (min)	t (min)	ero	t (min)	t (min)	ero	t (min)	t (min)	ero	t (min)	t (min)	ero
Tieto suistumisesta	1.26	1.26	0.00	1.26	1.26	0.00	1.26	1.26	0.00	1.26	1.26	0.00	1.26	1.26	0.00	1.26	1.26	0.00
Liikenne keskeytetty	1.93	1.93	0.00	1.93	1.93	0.00	1.93	1.93	0.00	1.93	1.93	0.00	1.93	1.93	0.00	1.93	1.93	0.00
Palo havaittu	1.27	1.32	0.05	1.03	1.03	-0.24	1.27	1.32	0.05	1.04	1.04	-0.23	1.27	1.32	0.05	1.04	1.04	-0.23
Palohälytys	1.79	1.81	0.02	1.78	1.78	-0.01	1.79	1.85	0.06	1.84	1.84	0.05	1.79	1.85	0.06	1.84	1.84	0.05
Suurpalohälytys	6.82	6.83	0.01	4.50	4.50	-2.32	5.80	5.85	0.06	4.36	4.36	-1.44	6.82	6.85	0.03	4.36	4.36	-1.44
Sähköt katkaistu	4.35	4.41	0.05	4.29	4.29	-0.07	4.36	4.43	0.07	4.33	4.33	-0.03	4.35	4.41	0.05	4.33	4.33	-0.03
Maadoitukset tehty	22.43			22.23	22.23	-0.20	21.95			21.82	21.82	-0.12	22.43			21.82	21.82	-0.12
Selvillä mikä palaa	17.58	17.58	0.00	4.26	4.26	-13.32	17.58	17.58	0.00	4.26	4.26	-13.32	17.58	17.58	0.00	4.26	4.26	-13.32
1. yksikkö paikalla	5.79	5.81	0.02	5.78	5.78	-0.01	4.76	4.82	0.06	4.80	4.80	0.05	5.79	5.81	0.02	4.80	4.80	0.05
Joukkue paikalla	11.79	11.81	0.02	11.78	11.78	-0.01	14.89	14.95	0.06	14.93	14.93	0.05	11.79	11.81	0.02	14.93	14.93	0.05
Komppania paikalla	66.82	66.83	0.01	64.50	64.50	-2.32	89.50	89.56	0.06	88.06	88.06	-1.44	66.82	66.83	0.01	88.06	88.06	-1.44
Vesitykki sammutusvalmiina:																		
R PI 103 (T13)	32.38	26.66	-5.73	30.92	30.92	-1.46	32.24	26.96	-5.28	30.71	30.71	-1.53	32.38	26.66	-5.73	30.71	30.71	-1.53
R PI 501 (N1)	41.50	41.52	0.02	39.15	39.15	-2.34	41.19	40.32	-0.86	39.64	39.64	-1.55	41.50	41.52	0.02	39.64	39.64	-1.55
R PI 181 (L21)	41.48	41.54	0.06	39.21	39.21	-2.27	42.85	42.25	-0.60	41.47	41.47	-1.38	41.48	41.54	0.06	41.47	41.47	-1.38
R PI 233 (K13)	42.51	42.49	-0.02	40.14	40.14	-2.37	42.37	41.79	-0.58	40.94	40.94	-1.43	42.51	42.49	-0.02	40.94	40.94	-1.43
R PI 5341 (PK23)	43.49	43.50	0.01	41.24	41.24	-2.25	43.74	43.13	-0.61	42.27	42.27	-1.47	43.49	43.50	0.01	42.27	42.27	-1.47
R PI 572 (Y 12)	46.48	46.49	0.01	44.19	44.19	-2.29	46.15	45.88	-0.27	44.80	44.80	-1.35	46.48	46.49	0.01	44.80	44.80	-1.35
R PI 172 (L 12)	50.49	50.52	0.03	48.24	48.24	-2.26	49.33	49.04	-0.30	47.93	47.93	-1.41	50.49	50.52	0.03	47.93	47.93	-1.41
R PI 353 (V13)	60.50	60.47	-0.04	58.20	58.20	-2.30	61.06	61.01	-0.05	59.52	59.52	-1.54	60.50	60.47	-0.04	59.52	59.52	-1.54
R PI 413 (V113)	63.51	63.51	0.01	61.12	61.12	-2.38	62.76	62.71	-0.05	61.27	61.27	-1.49	63.51	63.51	0.01	61.27	61.27	-1.49
R PI 263 (PA 13)	65.43	65.55	0.12	63.17	63.17	-2.26	64.37	64.28	-0.09	62.91	62.91	-1.46	65.43	65.55	0.12	62.91	62.91	-1.46
R PI 933 (O13)	69.45	69.49	0.04	67.17	67.17	-2.28	68.09	68.06	-0.03	66.66	66.66	-1.43	69.45	69.49	0.04	66.66	66.66	-1.43

Operaatioaikamallinnuksen yhteydessä tehtiin seuraavat pelastusorganisaation toimintaa koskevat havainnot:

- Odotusaikojen yksiköiden paikalle saapumisen jälkeen aiheuttavat maadoitukset ja palavan aineen selvittäminen; nämä kaksi asiaa tapahtuvat rinnakkain.
- Palavan aineen selvittäminen tapahtuu nopeasti, jos tiedetään vaunun numero. Vaunun numeron selvittäminen voi kestää, jos vaunu on kaukana veturista.
- Eri vaiheissa paikalle saapuvien vesitykkien toimintavalmiusajoissa ei ole suuria eroja, vaikka ensimmäinen vesitykki saapuukin paikalle yleensä huomattavasti ennen muita, koska ennen selvitysten tekemistä odotetaan maadoitusten valmistumista ja palavan aineen selvittämistä.
- Palohälytyksen ajanhetken todennäköisyysjakaumassa näkyvä kaksoispiikki johtuu siitä, että hälytys voi tapahtua kahta reittiä. Jos hälytys tapahtuu palo-ilmaisimen ja automaatin välityksellä, tapahtuu se huomattavasti nopeammin kuin hätäpuhelun seurauksena tapahtuva hälytys. Mallissa oletettiin, että ilmaisimen toimintavarmuus on 85 %. Toisin sanoen 15 %:ssa tapauksista palo havaitaan aistinvaraisesti, jolloin viive on pitempi.
- Tuloksista nähdään, että yksikön toimintavalmiusajan muuttaminen jakaumaksi käyttäen normitettua yleistä toimintavalmiusajan jakaumaa on varsin raju toimenpide. Käytetty yleinen toimintavalmiusajan jakauma on ehkä liian "laaja". Realistisempaan tulokseen päästäisiin käyttäen yksikkökohtaisia jakaumia siten, että olisi erilliset jakaumat lähtöajalle ja matka-

### 3. Operaatioaikamallinnus

---

ajalle. Nythän lähtöaikaan vaikuttaa oleellisesti se, onko kyseessä vakinaisen henkilöstön miehittäjä yksikkö (60 s) vai sopimuspalokunta (sopimuksen mukainen aika 5 min, 10 min tai 15 min), ja matka-aikaan vaikuttaa oleellisesti matkan pituus, joka yleisessä jakaumassa voi vaihdella ja on nyt yksikölle kiinteä (nopeus voi vaihdella).

- Hätämaadoituksen tekemättä jättäminen lyhentäisi merkittävästi vain ensimmäisen vesitykin toimintavalmiusaika.
- Nopea tilannekuvan muodostuminen lyhentäisi vesitykkien toimintavalmiusaikoja vain 1–2 minuuttia, jos joudutaan odottamaan hätämaadoituksen tekemistä.

Lisäksi tehtiin seuraavat mallinnukseen liittyvät havainnot.

- Tiedon taso ja lähde vaikuttavat eri toimijoiden prosesseihin ja niiden aikaviiveisiin.
- Esimerkkitapauksen mallinnuksessa ei päästy kovin yksityiskohtaiselle tasolle lisäviiveiden mallinnuksessa. Monissa tapauksissa, esim. käytettäessä toimintavalmiusaikojen jakaumia, epävarmuudet on huomioitu jo peruskaviiveissä.
- Kokonaistilanteen hahmottaminen monien toimijoiden tilanteessa oli haastavaa, ja lisäksi kaikki suunnitelmat eivät työn suoritusajankohtana olleet valmiita. Esimerkiksi maadoitusjärjestelyjen ja sprinklauksen suunnitelmat olivat vielä täysin avoimet. Tämäntyypisessä kohteessa olisi simuloinnin avulla mahdollista tarkastella vaihtoehtoisten toimenpiteiden vaikutuksia.
- Excelin käyttöön operaatioaikamallinnuksen laskentatyökaluna liittyvät seuraavat ongelmat: 1) Mallin rakentaminen on hidasta ja vaatii suurta tarkkuutta. 2) Menetelmä on virhealtis ja virheitä on jälkeinpäin vaikea jäljittää.

Mallinnuksen toteutuksessa oli seuraavat rajoitukset:

- Ympäristötekijöiden vaikutusta toiminnan aikaviiveisiin ei huomioitu. Esimerkiksi suurtaapahtuma, ruuhka-aika tai poikkeuksellisen huonot sääolosuhteet voisivat aiheuttaa lisäviiveitä toimintaan.
- Veden riittävyteen liittyviä kysymyksiä ei huomioitu. Toiminnan oletettiin etenevän kaikissa vaiheissa aivan kuin vettä olisi rajattomasti saatavilla.

### 3.7 Vertailu tilastoihin

Jotta simulointituloksia voitiin verrata toteutuneissa paloissa havaittuihin toimintavalmiusaikoihin, PRONTOsta haettiin vuosien 2009–2012 aikana tapahtuneet kiireellisiksi merkityt tehtävät, joihin hälytettiin vähintään vahvuus 1+3+9 tai 3+6+18 (päälystö + alipäälystö + miehistö). Yli 2 h pituiset ajat poistettiin tilastosta, koska niiden oletettiin liittyvän merkittävästi erilaisiin tilanteisiin. Vuoden 2012 tulokset vastaavat ennen 19.9.2012 raportoituja tehtäviä. Tulokset esitetään riski-

alueittain taulukoissa 15 ja 16. On huomattava, että tilastoidut toimintavalmiusajat mittaavat aikaa hälytyksestä siihen, kun yksiköt ovat kohteessa.

Tulokset osoittavat, että riskialueella 1, johon sovellusesimerkkimme kuuluu, toimintavalmiusaika vahvuudella 1+3+9 on ollut keskimäärin 13 min 48 s ja vahvuudella 3+6+18 keskimäärin 29 min 33 s. Sovellusesimerkin simuloituissa operaatioajoissa (taulukko 13) joukkue on paikalla keskimäärin 11–13 minuutissa hälytyksestä ja komppania 60–84 minuutissa. Joukkueen simuloitujen lähtö- ja ajoajat ovat siten samaa suuruusluokkaa tilastoissa havaittujen arvojen kanssa. Komppanian kohdalla simuloitujen ajoajat ovat havaintoja pidempiä. Simulointien taustalla oleva operatiivinen suunnitelma näyttää siten olevan tilastoja konservatiivisempi. Oheisia tuloksia voidaan jatkossa hyödyntää, jos halutaan arvioida simulointitulosten yleistettävyyttä muilla riskialueilla tapahtuviin, vastaaviin onnettomuuksiin.

**Taulukko 15.** Vähintään vahvuudella 1+3+9 toteutuneiden hälytysten toimintavalmiusajat riskialueittain PRONTO:n mukaan Suomessa vuosina 2009–2012/elokuu.

Vuosi	Riskialue 1		Riskialue 2		Riskialue 3		Riskialue 4		Yhteensä	
	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)
2009	550	13:53	571	18:34	347	23:41	916	30:13	2384	22:42
2010	552	12:48	531	19:53	356	22:25	1092	32:09	2531	24:10
2011	498	14:10	489	19:43	349	25:29	894	32:58	2056	25:14
2012	345	14:46	333	20:25	227	24:01	559	30:40	1465	23:33
Yhteensä	1945	13:48	1924	19:33	1279	23:53	3461	31:37	8612	23:45

**Taulukko 16.** Vähintään vahvuudella 3+6+18 toteutuneiden hälytysten toimintavalmiusajat riskialueittain PRONTO:n mukaan Suomessa vuosina 2009–2012/elokuu.

Vuosi	Riskialue 1		Riskialue 2		Riskialue 3		Riskialue 4		Yhteensä	
	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)	Lkm.	Keskiaarvo (mm:ss)
2009	2	25:44	5	78:07	5	56:45	5	62:27	17	61:04
2010	4	26:13	6	55:14	1	37:21	8	68:53	19	53:56
2011	4	35:59	6	38:35	5	54:47	5	47:35	20	44:22
2012	4	28:22	1	38:49	4	34:49	4	65:47	13	42:40
Yhteensä	14	29:33	18	55:08	15	48:57	22	62:01	69	50:48

## 4. Palosimulointi

### 4.1 Menetelmän kuvaus

Tässä työssä suoritettujen palosimulointien tarkoituksena on esimerkinomaisesti selvittää, mikä on pelastuslaitoksen tai automaattisen sammutuslaitteiston toiminnan tuottama jäähdytysvaikutus suuressa tulipalossa jäähdytykseen käytettävissä olevan vesivirtaaman funktiona.

Keskusareenalle suoritettussa riskienarvioinnissa yhtenä ei-hyväksyttävänä käytönaikaisena riskinä esiintyy kannen alapuolinen tulipalo junassa, joka on pysähtynyt kannen alle. Tässä työssä tarkastelluksi tulipaloksi valittiin palavaa nestettä sisältävän säiliöjunan yhden vaunun vuodosta johtuva tulipalo, joka voi tuottaa jopa 200 MW palotehon.

Simuloinneissa määritettiin kannen alapintaan ja säiliöjunan vaunujen pintaan saatava keskimääräinen lämpövuoto ( $\text{kW/m}^2$ ) sekä pintojen keskimääräinen lämpötila yhtäältä ilman jäähdytystä (vertailutilanne) ja toisaalta erilaisten jäähdytystapojen ja jäähdyttävien vesimäärien funktiona. Jäähdytystavoiksi valittiin tyypillinen pelastuslaitoksen käytössä oleva vesitykki ja aluelaukaisuun perustuva sprinklerilaitteisto. Vesitykin tapauksessa vesimäärää lisättiin kasvattamalla käytössä olevien tykkien määrää. Yksittäisen vesitykin virtaamaksi oletettiin 3000 l/min, ja tykkeitä oli käytössä 1–8 kpl. Sprinklerilaitteiston tapauksessa kasvatettiin yksittäisen sprinklerisuuttimen vesivirtaamaa. Sprinklerilaitteiston oletettiin toimivan 43,55 m x 14 m (609,7 m<sup>2</sup>) alalla, vesivuon ollessa 10–30 l/m<sup>2</sup>/min. Sprinklerilaitteiston ja vesitykkien yhteistä jäähdytysvaikutusta ei tarkasteltu.

### 4.2 Laskentamallin kuvaus

Simuloinnit suoritettiin käyttäen Fire Dynamics Simulator -ohjelmaa (FDS, versio 6.0.0, SVN 9977), joka on tulipaloon, sen nostevirtauksiin ja lämmönsiirtoon erikoistunut virtauslaskentamalli [20].

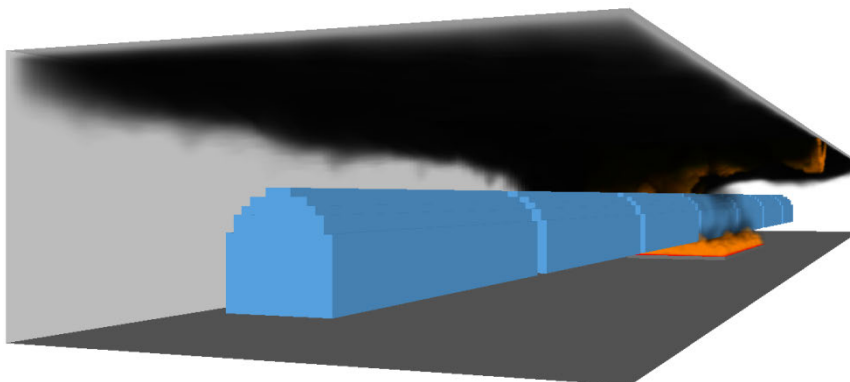
Kuvassa 16 on Keskusareenan kannen alapuolinen ratapiha-alue. Kannella katetun alueen pituus on n. 300 m, ja kannen alapuolinen vapaa korkeus vaihtelee välillä 6,5–8,5 m. Kuvaan on punaisella suorakulmiolla merkitty 100 m pitkä, 15,6 m leveä ja 7,2 m korkea alue, jota simuloinneissa tarkasteltiin. Laskenta-alueen

itäisenä reunana on pysäköintihalliin rajoittuva seinä, muissa suunnissa reunaehto on avoin. Seinä ja kansi oletettiin betoniksi, maanpinta puolestaan soraksi. Paikka-resoluutioksi valittiin 20 cm.



**Kuva 16.** FDS-ohjelmalla mallinnettu osa kannen alapuolisesta ratapihasta.

Säiliöjunan mallinnuksessa lähtökohtana oli VR Transpointin vaunukuvastossa esitetty bensiinivaunu, jonka pituus on 14 m ja ulkohalkaisija 2,8 m. Kokonaisia vaunuja voidaan mallinnettavalle alueelle sijoittaa kuusi kappaletta, kun vaunujen välinen etäisyys on yksi metri. Seitsemännestä vaunusta malliin mahtuu vain osa. Juna sijaitsee leveyssuunnassa mallin keskiakselilla, ja vaunut ovat metrin korkeudella maanpinnasta. Vaunun muoto mallissa ei täysin vastaa todellista sylinterimäistä muotoa (kuva 17). Syy vaunun alapuolen suorakulmaiseen muotoon liittyy siihen, että suorakulmaisella muodolla vaunun pinnan valelu vedellä saadaan paremmin simuloitua. Vaunun tarkalla muodolla ei kuitenkaan menetelmäkehityksen kannalta ole merkitystä. Vuotavan nesteen palo kuvattiin 18 m × 5,6 m kaasupolttimeina, joka oli sijoitettu keskimmäisen vaunun alle.



**Kuva 17.** Säiliöjunan ja nestepaljon sijainti.

Vesisammutusjärjestelmät kuvataan FDS-mallissa suuttimina, jotka syöttävät laskenta-alueeseen pisaroita. Fyysistä suutinta ei mallissa ole, vaan suutin on piste avaruudessa, josta käsin pisarat syötetään laskentaan. Näin ollen myöskään veden pisaroitumista ei erikseen lasketa. Vesisammutusjärjestelmän kuvaamisessa oleellista onkin löytää sellaiset pisaroita koskevat parametrit, että tuloksena syntyy realistinen vesisuihku. Näitä parametreja kuvataan tarkemmin kohdassa 4.3.3.

Simuloinneissa määritettiin kannen alapintaan ja säiliöjunan vaunuihin kohdistuva lämpörasitus käyttämällä seuraavia määrittelyjä simulointien syötetiedoissa:

```
&DEVC XB=..., QUANTITY='WALL TEMPERATURE', STATISTICS='SURFACE INTEGRAL'
```

```
&DEVC XB=..., QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX', STATISTICS='SURFACE INTEGRAL'
```

```
&DEVC XB=..., QUANTITY='CPUA', PART_ID='Water droplets', STATISTICS='SURFACE INTEGRAL'
```

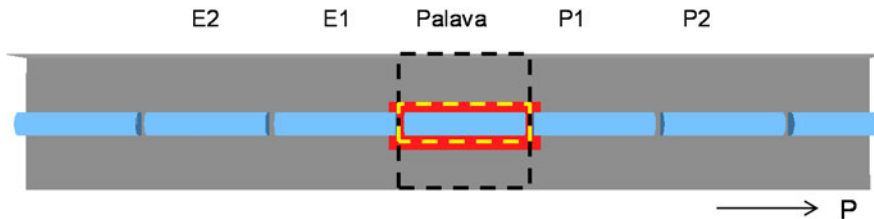
Avainsanalla &DEVC määritellään jokin laite (device), jonka avainsana QUANTITY tarkoittaa jotakin suuretta havainnoivaksi mittariksi. Tavanomaisesti nämä "laitteet" mittaavat suuretta jossain yksittäisessä avaruuden pisteessä (XYZ), mutta mittari voidaan myös luoda siten, että se määrittää keskiarvon jonkin pinnan tai tilavuuden yli. Tällöin termin XB jälkeen tulee kirjoittaa kuusi koordinaattia, jotka määrittävät tilavuuden. Se, lasketaanko keskiarvo pinnan vai tilavuuden yli, riippuu suureesta (QUANTITY). Edellä luetellut suureet ovat kaikki pintaan liittyviä suureita, jolloin lasketaan keskiarvo pinnassa XB olevan pinnan yli, jolloin laskentatavaksi (STATISTICS) määritellään pintaintegraali. Esimerkiksi yksittäisen vaunun keskimääräinen pintalämpötila (WALL TEMPERATURE) saadaan määrittämällä tilavuus XB siten, että se kokonaan ympäröi tämän (mutta vain tämän) vaunun. Kannen alapinnan tapauksessa voidaan z-koordinaatin sekä ala- että ylärajaksi asettaa kannen alapinnan z-koordinaatti.

Suure 'GAUGE HEAT FLUX' määrittää pintaan tulevan lämpövuon siten kuin pintaan asennettu, jäähdytetty lämpövuomittari sen näkisi. Suure CPUA määrittää veden tuottaman jäähdytystehon pinnassa, sisältäen veden höyrystymisen sekä



nestemäisen veden lämmityksen. Tässä työssä raportoidut rakenteisiin ja vaunuihin kohdistuvat lämpörasitukset on laskettu näiden kahden suureen erotuksena.

Kuvassa 18 havainnollistetaan rakenteisiin ja vaunuihin kohdistuvan lämpörasituksen määrittämistä palavan vaunun kohdalla. Keltainen katkoviiva kuvaa tilavuutta, joka ympäröi palavaa vaunua. Musta katkoviiva kuvaa palavan vaunun yläpuolella olevaa kannen alapinnan osaa. Lämpörasitukset kanteen ja vaunuihin määritettiin vastaavalla tavalla myös palavan vaunun ensimmäisten ja toisten lähinaapurien kohdalta.



**Kuva 18.** Rakenteisiin ja vaunuihin kohdistuvan keskimääräisen lämpörasituksen määrittäminen.

### 4.3 FDS-mallin parametrit

#### 4.3.1 Palaminen

Palaminen kuvattiin simulointien syötetiedostoissa alla olevalla &REAC-rivillä:

```
&REAC FUEL= 'N-HEPTANE'
      SUPPRESSION=.FALSE.
      SOOT_YIELD=0.01
      CO_YIELD=0.01 /
```

Käytössä on tällöin FDS:n oletusarvoinen palamismalli, jossa polttoaine ja happi reagoivat äärettömän nopeasti. Polttoaineeksi valittiin n-heptaani, joka vastaa herkästi syttyvää palavaa nestettä. Sekä noen että hiilimonoksidin tuotoiksi asetettiin 0,01 kg/kg. Parametrille SUPPRESSION annettiin arvo FALSE, jolla kytketään pois kaasufaasissa tapahtuva liekin sammutus. Tämä tehtiin siksi, että tässä työssä haluttiin keskittyä nimenomaan veden jäähdytystehon systemaattiseen arviointiin (ei sammutustehon). Lisäksi joissain tapauksissa (erityisesti kun suurta paloa sammutetaan vedellä pienessä tilassa) kaasufaasin sammutusalgoritmi kylläkin sammuttaa liekkiä, mutta tällöin palamaton polttoaine voi syttyä uudelleen kauempana palosta, koska FDS:ssä polttoaineen ja hapen palaminen on oletusarvoisesti spontaania. Tällainen spontaani epäfysikaalinen palaminen vääristää jäähdytystehon arviointia aiheuttamalla lämpörasitusta siellä missä sitä ei kuuluisi olla.

#### 4. Palosimulointi

Varsinainen palo kuvattiin simulointien syötetiedoissa seuraavasti:

```
&OBST XB = 43.0,61.0,-3.0,2.6,0.0,0.2,  
SURF_IDS='FIRE','GROUND','GROUND' /  
  
&SURF ID='FIRE', HRRPUA=1984.0,  
RAMP_Q='HRR_RAMP',COLOR='RED' / 200 MW  
  
&RAMP ID='HRR_RAMP', T=0.0, F=0.0 /  
  
&RAMP ID='HRR_RAMP', T=5.0, F=1.0 /  
  
&RAMP ID='HRR_RAMP', T=3600.0, F=1.0 /
```

Näillä riveillä määritellään kooltaan 18 m × 5,6 m kaasupoltin, joka &REAC-rivin mukaisesti syöttää yläpinnaltaan laskenta-alueeseen kaasumaista n-heptaania siten, että paloteho pinta-alayksikköä kohti on 1984 kW/m<sup>2</sup> ja paloteho siten 200 MW. Numeeristen ongelmien välttämiseksi paloteho kasvatetaan nollassa maksimiarvoonsa viiden sekunnin aikana.

#### 4.3.2 Materiaalit ja pinnat

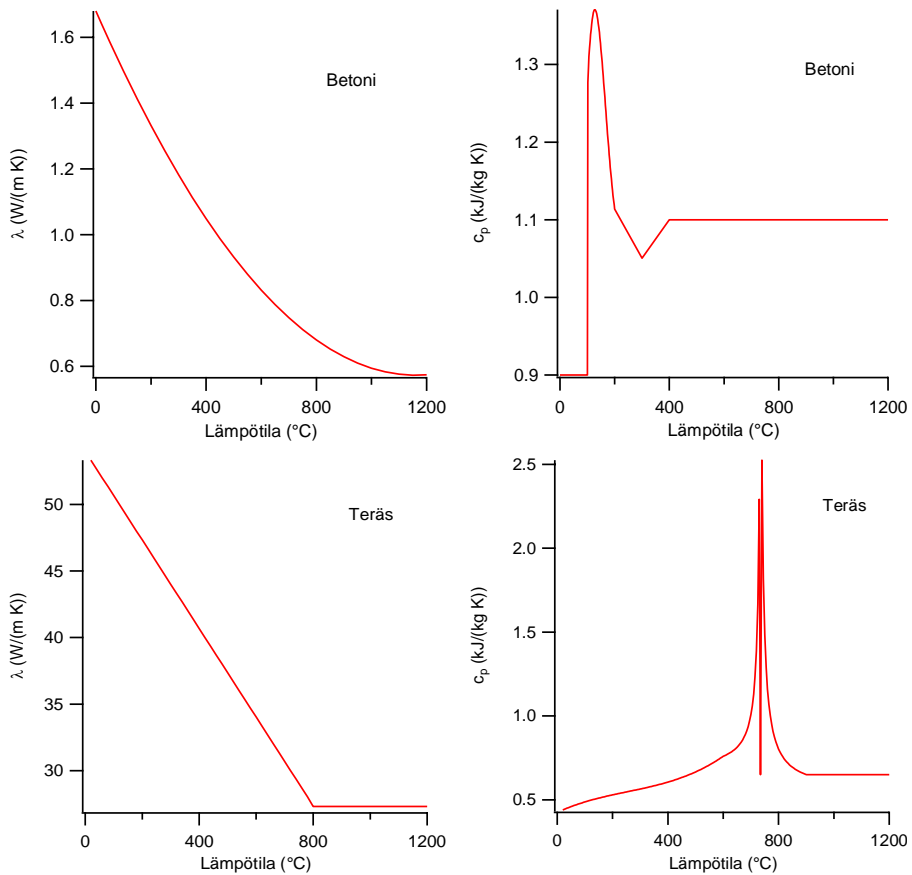
Simuloinneissa käytetyt materiaalmäärittelyt on koottu taulukkoon 17. Betonin ja teräksen lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti oletettiin lämpötilariippuviksi eurokoodien osien 2 ja 3 mukaisesti (kuva 19). Nestemäisen heptaanin parametrit esiintyvät taulukossa, koska säiliövaunujen oletettiin olevan täynnä herkästi palavaa nestettä. Materiaalien avulla määriteltiin simuloinneissa taulukon 18 mukaiset pinnat. Säiliövaunu määritettiin kerrosrakenteena.

**Taulukko 17.** Materiaaliparametrit.

Materiaali	Emissiivisyys	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Lämmönjohtavuus W/(m K)	Ominaislämpökapasiteetti kJ/(kg K)
Betoni	0,9	2400	Ks. kuva 19	Ks. kuva 19
Teräs	0,9	7850	Ks. kuva 19	Ks. kuva 19
Sora	1,0	2000	0,8	0,8
Heptaani	1,0	680	0,12	2,2

**Taulukko 18.** Pintojen määrittelyt.

Pinta	Materiaali	Paksuus (m)	Takapinnan reunaehto
Seinä	Betoni	0,4	Eristetty
Kansi	Betoni	1,6	Eristetty
Maanpinta	Sora	5,0	Vapaa konvektio
Säiliövaunu	Teräs Heptaani	0,01 1,4	Eristetty



**Kuva 19.** Betonin ja teräksen lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin lämpötilariippuvuus.

### 4.3.3 Vesisuuret

Vesisuihku luodaan FDS-simulaation määrittelemällä aluksi laite, jolla on vesisuihkun ominaisuudet. Esimerkiksi syötiedoston rivi

```
&DEVC XYZ= 1.0, 5.0, 0.5
PROP_ID='RM_60_C'
ORIENTATION=1,0,0
QUANTITY='TIME'
SETPOINT= 0.0000 /
```

määrittelee avaruuden pisteeseen (1.0, 5.0, 0.5) laitteen, jolla on tunnuksen 'RM\_60\_C' määäämät ominaisuudet (PROP\_ID), joka osoittaa positiivisen x-akselin suuntaan (ORIENTATION) ja joka aktivoituu kellosta (QUANTITY) ajankohdalla 0.0 s (SETPOINT).

#### 4. Palosimulointi

---

Laitteen ominaisuudet voidaan määritellä esimerkiksi seuraavasti:

```
&PROP ID='RM_60_C'  
PART_ID='Water droplets'  
OFFSET=0.3  
PARTICLES_PER_SECOND=50000  
FLOW_RATE=3000.0  
PARTICLE_VELOCITY=42.5000  
SPRAY_ANGLE=0.0000,10.0000
```

Näin ollen jokainen laite, jonka ominaisuudet määrittelee tunnus 'RM\_60\_C', syöttää laskuun hiukkasia, joiden ominaisuudet määritellään tunnuksen 'Water droplets' avulla. Hiukkaset eivät siis oletusarvoisesti ole vesipisaroita. Parametri OFFSET määrittää, että hiukkaset syötetään laskenta-alueeseen 0,3 m etäisyydellä suuttimen sijaintipaikasta. Hiukkasten syöttönopeudeksi asetetaan 50000 hiukkasta sekunnissa. Ohjelma valitsee hiukkasten massat siten, että jos hiukkaset ovat vettä, suuttimen virtaamaksi tulee 3000 litraa minuutissa. Hiukkasten alkunopeus on 42,5 m/s.

Avainsanan 'SPRAY\_ANGLE' jälkeen tulevat kaksi parametria ovat asteluvut suuttimen keskiakseliin suhteen. Pisaroiden lähtöpaikat arvotaan tasan jakautuneesti näiden astelukujen välille.

Hiukkaset määritellään vesipisaroiksi seuraavasti:

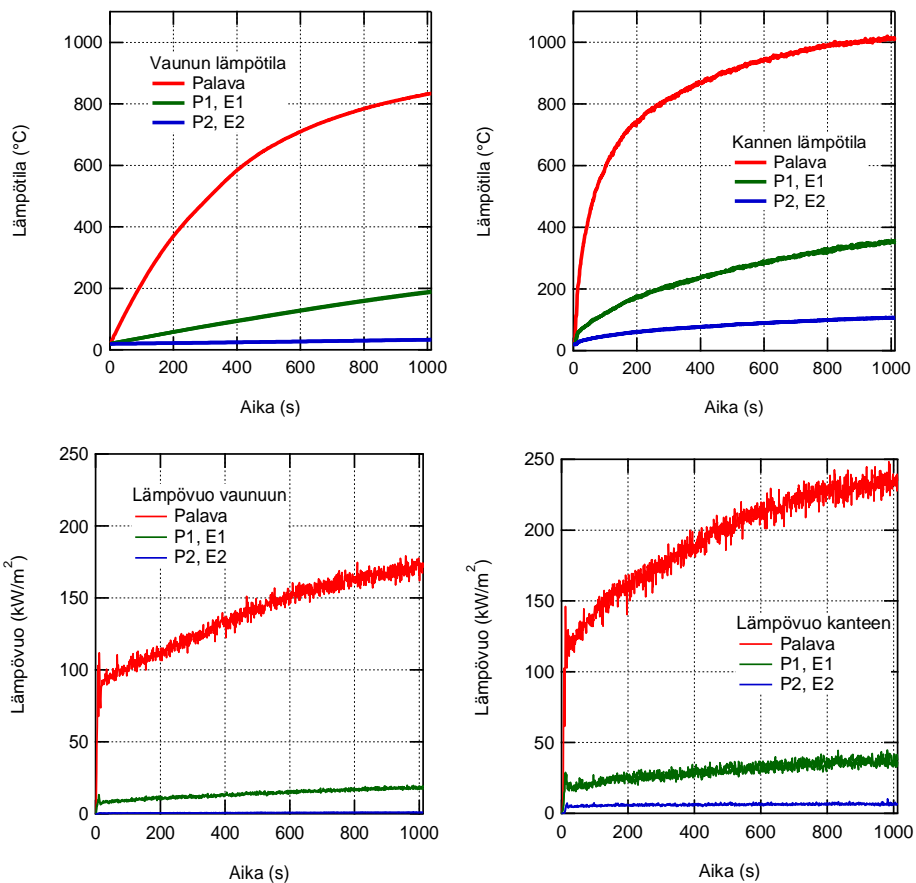
```
&SPEC ID='WATER VAPOR' /  
&PART ID='Water droplets'  
SPEC_ID='WATER VAPOR'  
DIAMETER=2000. /
```

Aluksi FDS-ohjelma ohjataan avainsanan &SPEC avulla erottamaan pisaroista höyrystyvä vesihöyry omaksi kaasukomponentikseen. Tämän jälkeen avainsanan &PART alla määritellään tunnuksen 'Water droplets' omaaville hiukkasille, että ne kaasuuntuessaan tuottavat vesihöyryä. (Mikäli määritettäisiin SPEC\_ID='FUEL', pisarat kaasuuntuisivatkin polttoaineeksi, joka on määritelty &REAC-avainsanan alla.) Juuri määrittely SPEC\_ID='WATER VAPOR' tekee hiukkasista vettä; FDS-ohjelma asettaa tällöin automaattisesti nestemäisen veden ja vesihöyryn fysikaaliset ominaisuudet oikeiksi. Periaatteessa muita määrittelyjä ei tarvita, jos FDS:n oletusarvot määrittämättä jätetyille parametreille ovat sopivat. Kuitenkin käyttäjän on aina järkevää pyrkiä antamaan keskimääräinen pisarakoko, sillä se on keskeisen tärkeä suure vesisuihkujen dynamiikan ja jäähdytyskyvyn kannalta. Edellä olevassa esimerkissä keskimääräiseksi pisarakooksi asetetaan 2000 µm (FDS:n oletusarvo on 500 µm).

## 4.4 FDS-simulointien tulokset

### 4.4.1 Palo ilman jäähdytystä

Vapaasti palavalle nestepalolle tehtiin kaksi simulointia käyttäen palotehon arvoja 200 MW ja 100 MW. Kuvassa 20 esitetään keskimääräinen vaunun pinnan ja kannen alapinnan lämpötila sekä keskimääräinen lämpövuoto vaunuun ja kanteen, kun paloteho oli 200 MW. Kuvassa 21 on vastaavat tulokset 100 MW tapaukselle. Punaiset käyrät edustavat palavan vaunun kohtaa, vihreät käyrät palavan vaunun ensimmäisiä lähinaapureita ja siniset käyrät toisia lähinaapureita.

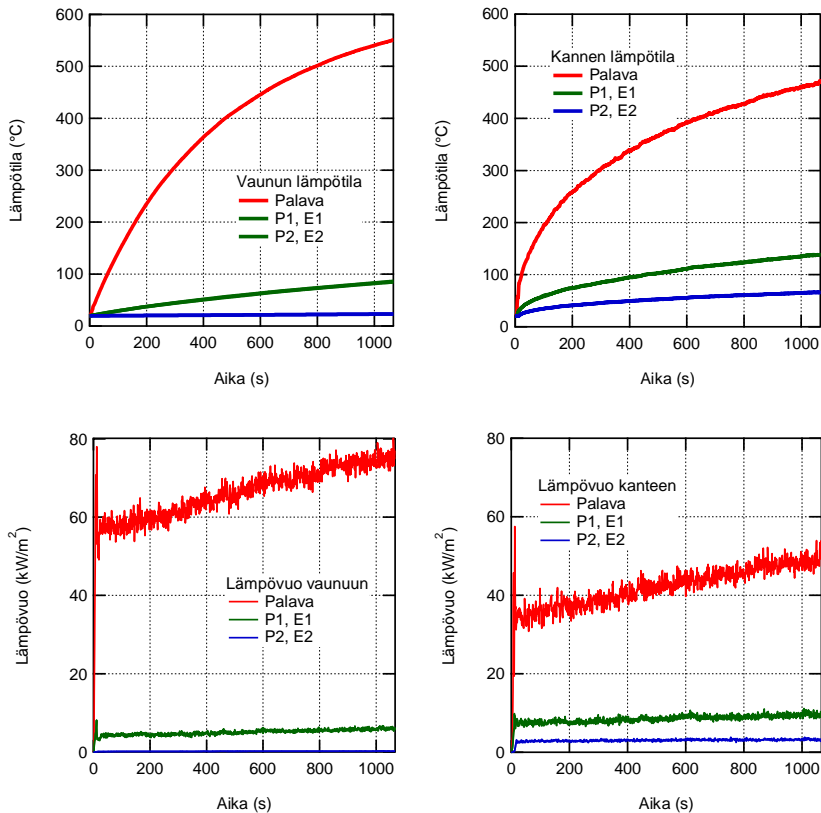


**Kuva 20.** Vaunun ja kannen alapinnan keskimääräinen lämpötila ja vaunuun ja kanteen saatava keskimääräinen lämpövuoto, kun paloteho on 200 MW.

Tuloksista havaitaan, että lämpötilat ja lämpövuotot eivät vielä 1000 s kohdalla ole saavuttaneet vakioarvoa. Syyinä tähän on raskaiden rakenteiden hidas lämpene-

minen. Lämpörasitus palavaan vaunuun ja vaunun yläpuoliseen kanteen on merkittävästi suurempi kuin ensimmäisten lähinaapurien kohdalla. Tuulettomissa olosuhteissa lämpörasitus on symmetrinen palon sijainnin suhteen. Kannen lämpötila kohoaa palavan vaunun kohdalla nopeasti niin korkeaksi, että betoni alkaisi lohkeilla. On syytä huomata, että FDS-mallissa betonin lohkeilua ei ole kuvattu millään tavoin, mikä todennäköisimmin johtaa liian suuriin betonin pintalämpötiloihin ja sitä kautta liian korkeisiin lämpösäteilyn arvoihin. Myös vaunun pintalämpötila on todennäköisesti liian suuri siksi, että FDS:ssä ei ole kuvausta säiliövaunun sisältämän nesteen konvektiosta säiliössä; mallissa lämpö ainoastaan johtuu metallivaipasta nesteeseen, jossa ei ole sisäisiä virtauksia.

Karkea arvio palavan vaunun sisältämän nesteen lämpenemiselle voidaan saada olettamalla koko säiliövaunu tasalämpöiseksi kappaleeksi (ts. teräksen ja heptaanin lämmönjohtavuus äärettömäksi). Jos säiliövaunun seinämän vahvuudeksi oletetaan 7 mm, säiliö sisältää  $80 \text{ m}^3$  heptania ja säiliön pintaan (pinta-ala  $135 \text{ m}^2$ ) kohdistuu 1000 s ajan keskimäärin lämpövuoto  $130 \text{ kW/m}^2$  (kuva 20), nousee säiliön keskimääräinen lämpötila syttymishetken lämpötilaan verrattuna noin  $140 \text{ °C}$ . Heptaanin kiehumispiste on  $98 \text{ °C}$ , joten tällainen lämpörasitus alkaisi kasvattaa painetta säiliön sisällä.



**Kuva 21.** Vaunun ja kannen alapinnan keskimääräinen lämpötila ja vaunuun ja kanteen saatava keskimääräinen lämpövuoto, kun paloteho on 100 MW.

#### 4.4.2 Vesitykkien simulointi

##### 4.4.2.1 Vesitykin kantama

Vesitykkeihin liittyvien simulointien ensimmäisessä vaiheessa tarkasteltiin FDS-ohjelman kykyä tuottaa realistinen tykkiä kuvaava vesisuihku. VTT:n tiedossa ei ole mittauksia, joissa olisi tarkasti määritetty kaikkia kohdassa 4.3.3 mainittuja lähtötietoja, joten monen parametrin kohdalla on jouduttu tyytymään tutkijoiden omiin arvioihin. Lähtökohtana simuloinneille oli Rosenbauer RM60C -tykki, joka tuotteen edustajan (Veljekset Kulmala Oy) mukaan saavuttaa taulukon 19 mukaiset kantamat. Tässä työssä tarkasteltiin virtaamaa 3000 l/min ja suutinpainetta 10 bar.

**Taulukko 19.** Rosenbauer RM60C -vesitykin kantama suorasisuikulla.

Tuotto (l/min) @ 10 bar	Suutin	Kantomatka (m)
3000	HSD 4500	85
4000		90
5000	HSD 6000	93
6000		95
7000		97

Kantaman simuloinnit suoritettiin käyttäen samaa 20 cm paikkaresoluutiota kuin varsinaiset jäähtyessimuloinnitkin. Suihkua kuvattiin syöttämällä 20000 pisaraa sekunnissa vain suihkun akselin suuntaan (ts. `SPRAY_ANGLE = 0.0, 0.0`). Pisaroiden lähtönopeus 10 bar suutinpaineella laskettiin Bernoullin lain avulla:

$$v = 0.95 \cdot \sqrt{2\Delta p / \rho} , \quad (3)$$

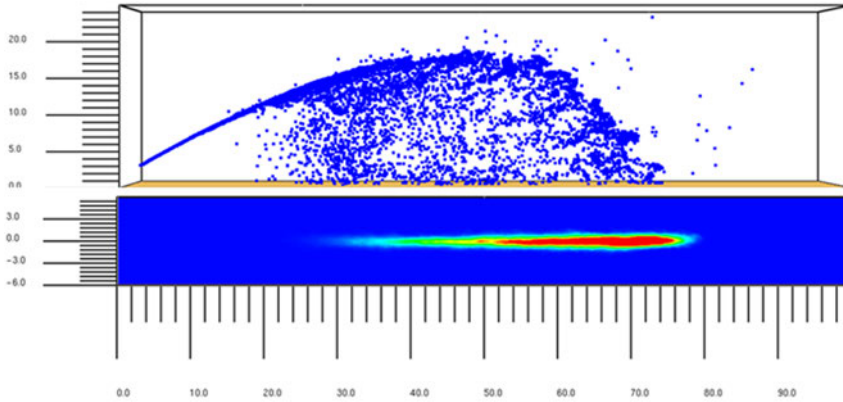
missä  $\Delta p = 2.0 \cdot 10^6$  Pa,  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> ja etutekijä 0.95 huomioi kitkahäviöt suuttimessa. Keskimääräiseksi pisarakooksi valittiin 2000 µm. Valinta on arvio ja perustuu siihen, että suorasisuikulla toimiessaan vesitykin suuttimessa ei ole vettä pisaroivia rakenteita. Tällöin suihkun pisarakojakauma määräytyy tykistä purkautuvan vesipatsaan ja aerodynaamisten voimien vuorovaikutuksesta, ja pisaroitumista hallitsee kaasun Weberin luku (kitkavoiman suhde veden pintajännitykseen):

$$We = \frac{\rho_g v^2 d}{\sigma} . \quad (4)$$

Karkeasti voidaan sanoa, että aerodynaamiset voimat pilkkovat pisaroita pienemmiksi, mikäli  $We > 12$ . Esimerkiksi 2000 µm kokoiselle pisaralle  $We = 12$ , kun nopeus  $v = 11$  m/s. Edellä suihkun lähtönopeudeksi laskettiin 42 m/s, mutta suihku hidastuu haalatessaan mukaansa ympäröivää ilmaa ja pisaroituessaan. Lisäksi on muistettava, että FDS:n pisarakojakaumassa on suurempia ja pienempiä pisaroita kuin 2000 µm.

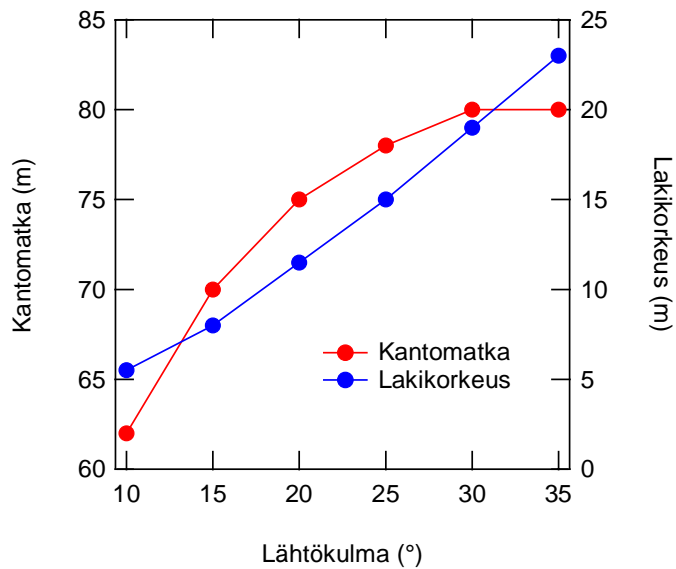
Kuvassa 22 esitetään vesitykin suihkukuvio simulaatiossa, jossa suihkun lähtökulma oli 35 astetta ja suihku sijaitsi 2,5 m korkeudella maanpinnasta (kuvaten tykin sijaintia säiliöauton katolla). Saman kuvan alemmassa osassa esitetään veden kertymä maanpinnan tasossa. Suihkun maksimikantamaksi saadaan tässä tapauksessa noin 80 m. Suurin osa vedestä putoaa 60 m ja 80 m välille. Suihkun ytimestä n. 20 m jälkeen erkanevat pisarat edustavat pisarakojakauman pienikokoisinta osaa eivätkä edusta merkittävää osuutta veden kokonaismassasta. Näin ollen jakauman suurikokoisimmat pisarat lentävät pisimmälle. Leveyssuunnassa vesijakauma on kapea, ja pääosa vedestä on vain n. 1–2 m levyisellä alueella.





**Kuva 22.** Ylhäällä: vesitykin suorasuihkun simulointi 35 asteen lähtökulmalla sivulta katsottuna. Alhaalla: maanpinnan tasolle kertyneen vesimäärän jakauma ylhäältä katsottuna. Akselien yksikkönä metri.

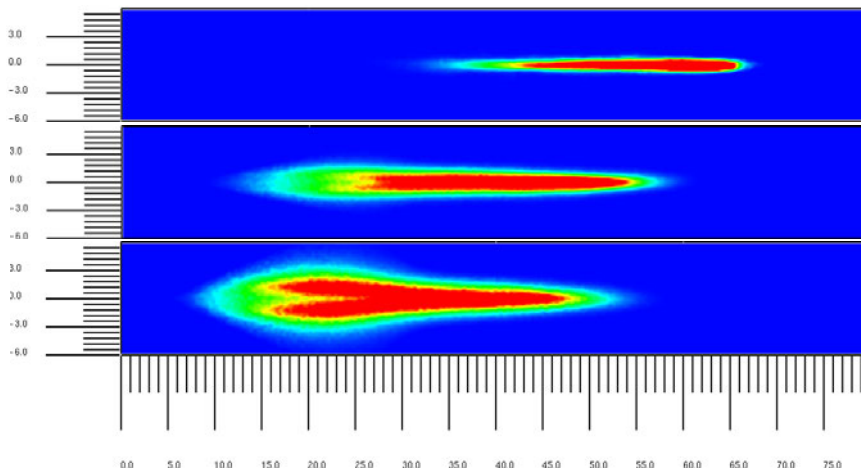
Kuvassa 23 esitetään vesitykin suorasuihkun kantomatka ja suihkun lakikorkeus lähtökulman funktiona, kun suihku sijaitsee 2,5 m korkeudella maanpinnasta. Kantomatkan maksimi saavutetaan 30–35 asteen lähtökulmalla. Suihkun lakikorkeudella on merkitystä tämän työn kannalta, sillä kannen alapuolinen vapaa korkeus on 6,5–8,5 m, joten suihkun suurinta mahdollista kantamaa ei voi hyödyntää matalassa tilassa.



**Kuva 23.** Vesitykin suorasuihkun kantomatka ja suihkun lakikorkeus lähtökulman funktiona.

#### 4. Palosimulointi

Suihkun leveyden vaikutusta kantamaan tarkasteltiin 20 ja 40 asteen suihkukulmilla, kun suihkun lähtökulmaksi valittiin 15 astetta. Kuvassa 24 esitetään veden kertymä maanpinnan tasolle suorasisuikun sekä 20 ja 40 asteen suihkukulman tapauksissa. Suihkukulman leventäminen pienentää suihkun kantamaa. Tämä johtuu siitä, että suihkun leventäminen kasvattaa suihkuun haalautuvan ilman määrää ja tätä kautta suihkun kokema aerodynaamista vastusta. Veden jakauma leveysuunnassa alkaa kasvaa merkittävästi vasta kun suihkukulma on 40 astetta. On kuitenkin huomattava, että näitä simulointituloksia vastaavaa koedataa ei ole olemassa.



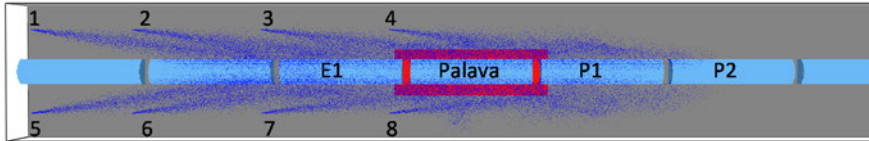
**Kuva 24.** Veden kertymä maanpinnan tasolle suorasisuikun sekä 20 ja 40 asteen suihkukulman tapauksissa. Lähtökulma 15 astetta.

##### 4.4.2.2 Vesitykkien sijoittelu

Edellä esitetyt vesitykkien kantamaa koskeneet simulaatiot muodostivat perustan valinnalle, joka tehtiin vesitykkien sijoittelun suhteen jäähdysyssimuloinneissa. Yhtäältä tykki halutaan sijoittaa turvallisen etäisyyden päähän palosta, mikä puoltaa suurta kantamaa ja kapeaa suihkua. Toisaalta tykillä halutaan saavuttaa mahdollisimman tehokas vesivalelu, mikä puoltaa pientä kantamaa ja leveää suihkua. Tässä työssä valittiin kompromissi näiden lähestymistapojen väliltä valitsemalla suihkukulmaksi 20 astetta ja suihkun lähtökulmaksi 15 astetta. Kun lisäksi tykki sijoitettiin lähelle maanpintaa (vastaa todellista tilannetta, jossa säiliöautoa ei ajeta kannen alle), saavutettiin n. 50 metrin kantama n. kuuden metrin lakikorkeudella. Vaunun valedun tehokkuus pyrittiin maksimoimaan valitsemalla suihkun suunta mahdollisimman yhdensuuntaiseksi raiteen kanssa. Käytännössä tykki sijoitettiin viiden metrin kohtisuoralle etäisyydelle sen raiteen keskilinjalta, jolla palava juna sijaitsi.

Tykkien sijoittelua simuloinneissa havainnollistetaan kuvassa 25. Numerot 1–8 kuvaavat mahdollisia tykkien paikkoja. Kun yhtä vaunua jäähdytettiin kahdella

tykillä, tykit sijaitsivat siis vastakkaisilla puolilla raidetta. Niinpä esimerkiksi vaunua E1 jäähdytettiin tykeillä, jotka olivat asemissa 1 ja 5, ja vaunua P2 tykeillä, jotka olivat asemissa 4 ja 8. Vaunuun E2 ei kohdistettu jäähdyttäviä suihkuja. Tämä valinta tehtiin, koska lähes junan suuntaisesti ammutut vesisuihkut painavat liekkiä alavirran suuntaan.



**Kuva 25.** Vesitykkien sijoittelu jäähdytys­simuloinneissa. Asemat 1–4 sijaitsevat seinän puolella.

Taulukossa 20 esitetään tässä työssä simuloitua jäähdytystapaukset. Yhdellä tykillä jäähdytettiin ainoastaan palavaa vaunua. Toinen tykki kohdistettiin joko palavaan vaunuun tai sen ensimmäisiin lähinaapureihin (joko E1 tai P1). Yhtä vaunua jäähdytettiin korkeintaan kahdella tykillä.

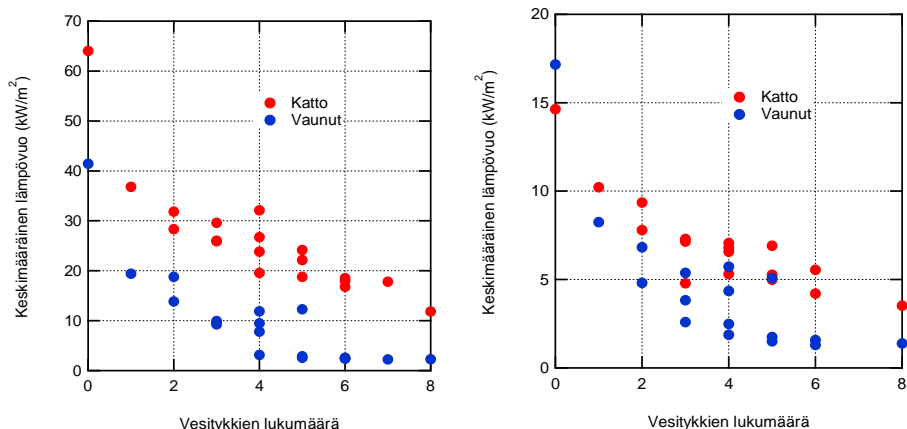
**Taulukko 20.** Vesitykkien jäähdytys­simuloinnit.

Paloteho 200 MW			Paloteho 100 MW		
Tapaus	Tykkien asemat	Tykkejä	Tapaus	Tykkien asemat	Tykkejä
1	2	1	19	2	1
2	2,3	2	20	2,3	2
3	2,3,4	3	21	2,3,4	3
4	1,2,3	3	22	1,2,3	3
5	1,2,3,4	4	23	1,2,3,4	4
6	2,6	2	24	2,6	2
7	2,3,6	3	25	2,3,6	3
8	2,3,6,7	4	26	2,3,6,7	4
9	2,3,4,6	4	27	2,3,4,6	4
10	2,3,4,6,7	5	28	2,3,4,6,7	5
11	2,3,4,6,7,8	6	29	2,3,4,6,7,8	6
12	1,2,3,6	4	30	1,2,3,6	4
13	1,2,3,6,7	5	31	1,2,3,6,7	5
14	1,2,3,5,6,7	6	32	1,2,3,5,6,7	6
15	1,2,3,4,6	5	33	1,2,3,4,6	5
16	1,2,3,4,6,7	6	34	1,2,3,4,6,7	6
17	1,2,3,4,5,6,7	7	35	1,2,3,4,5,6,7	7
18	1,2,3,4,5,6,7,8	8	36	1,2,3,4,5,6,7,8	8

## 4.4.2.3 Vesitykkien jäähdytysvaikutus

Vesityykkien jäähdytysvaikutuksen kvantitatiivinen arviointi suoritettiin määrittämällä kannen alapintaan ja vaunujen pintaan saatavat keskimääräiset lämpövuot aika-keskiarvona aikaväliltä 900–1000 s. Kuvassa 26 esitetään keskimääräiset lämpövuot vaunujen E2–P2 määrittämän alueen yli laskettuina keskiarvoina vesityykkien määrän funktiona palotehoille 200 MW ja 100 MW. Vesityykkien määrä nolla edustaa vapaata paloa. Kvalitatiivisesti 200 MW ja 100 MW tulokset käyttäytyvät samalla tavoin tykkien lukumäärän kasvaessa. Ensimmäisen vesityykin kohdistaminen palavaan vaunuun karkeasti ottaen puolittaa lämpörasituksen niin kanteen kuin vaunuihin. Tämän jälkeen tykkien määrän lisääminen pienentää lämpörasitusta vähemmän, ja tykkien sijoittelun vaihtelu aiheuttaa merkittävää hajontaa lämpövuohon tykkien lukumäärän ollessa vakio.

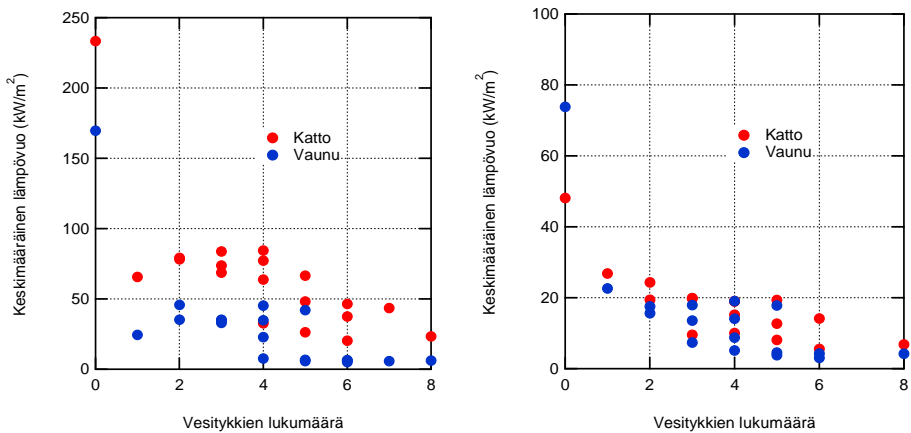
Huomionarvoista tuloksissa on, että kanteen kohdistuva lämpövuoto pienenee tykkien vaikutuksesta siitä huolimatta, että tykit eivät kastele kannen alapintaa. Tähän epäsuoraan jäähdytykseen vaikuttavat tekijät ovat vesisuihkun aiheuttama liekin jäähdytys (pisaroiden lämpeneminen ja höyrystyminen liekissä), vaunujen pintojen jäähdytys (vaunujen yläpinnat säteilevät vähemmän kohti kattoa) ja liekin paikan siirtyminen (liekki ”nojaa” suihkuista poispäin ja on näin ollen kauempana kannen alapinnasta). Mikäli simulaatioissa olisi kyetty realistisesti huomioidaan vesihöyryn aiheuttama liekin sammutusvaikutus, tykkien jäähdyttävä vaikutus kanteen olisi ollut vielä suurempi.



**Kuva 26.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan vaunujen E2–P2 määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna. Vasemmalla: paloteho 200 MW. Oikealla: paloteho 100 MW.

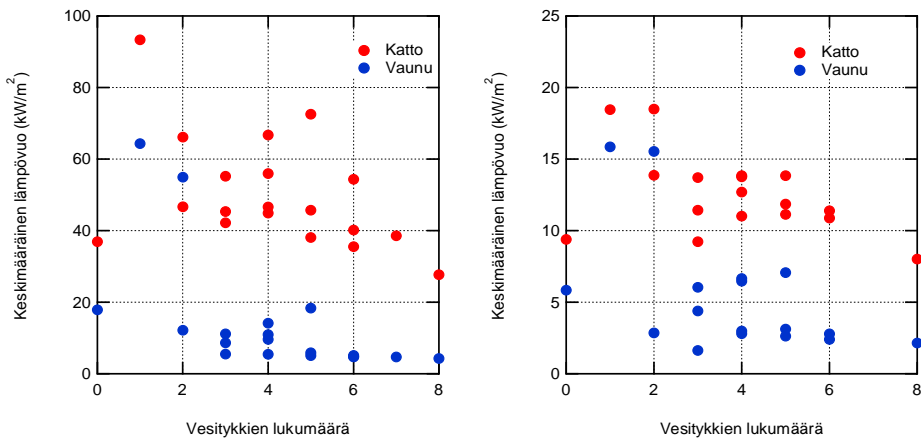
Kuvassa 26 esiintyvän hajonnan ymmärtämiseksi tarkastellaan yksittäisten vaunujen ja niiden kohdalla olevan kannen alapinnan osan saamaa lämpörasitusta tykkien määrän funktiona. Keskimääräinen lämpövuoto vaunuun ja kannen alapintaan

palavan vaunun kohdalla esitetään kuvassa 27, vaunun P1 kohdalla kuvassa 28, vaunun E1 kohdalla kuvassa 30 ja vaunun P2 kohdalla kuvassa 31. Kuvan 27 perusteella jo yhden tykin kohdistaminen palavaan vaunuun tuottaa tehokkaan jäähdytysvaikutuksen niin vaunuun kuin kanteen vaunun kohdalla. Kuitenkin kuvasta 28 havaitaan, että tämä kasvattaa huomattavasti vaunuun P1 kohdistuvaa lämpörasitusta. Tämä johtuu siitä, että lähes junan suunnassa ammuttu vesisuihku siirtää liekkiä vaunun P1 ympärille (kuva 29). Tämän jälkeen vaunun P1 kannalta on suuri merkitys sillä, minne toinen vesitykki suunnataan. Kuvan 28 mukaan tapauksessa, jossa toinen tykki suunnataan vaunuun P1 (taulukon 20 tapaus 6), saadaan merkittävästi parempi jäähdysteho kuin jos toinenkin tykki suunnattaisiin palavaan vaunuun (tapaus 2). Liekin paikkaa vaunun P1 ympärillä havainnollistetaan kuvassa 29.

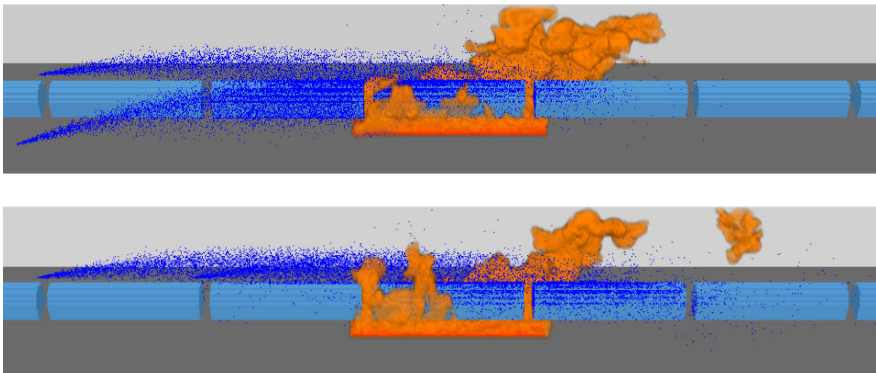


**Kuva 27.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan palavan vaunun määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna. Vasemmalla: paloteho 200 MW. Oikealla: paloteho 100 MW.

#### 4. Palosimulointi

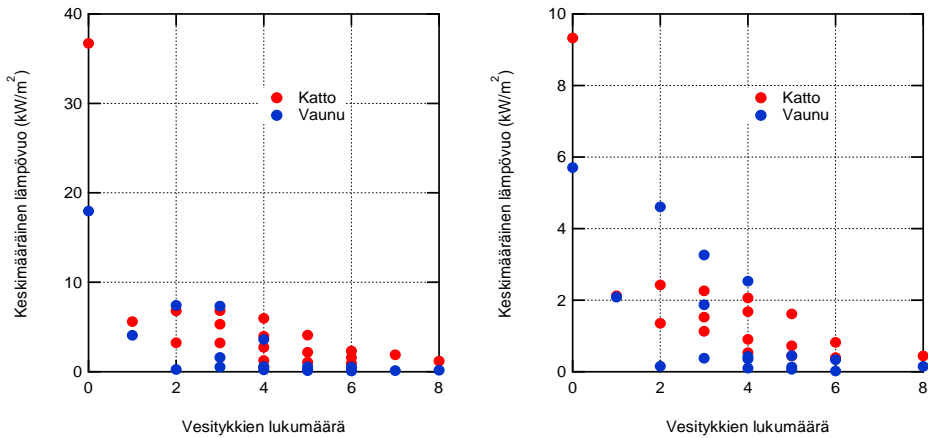


**Kuva 28.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan vaunun P1 määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna. Vasemmalla: paloteho 200 MW. Oikealla: paloteho 100 MW.

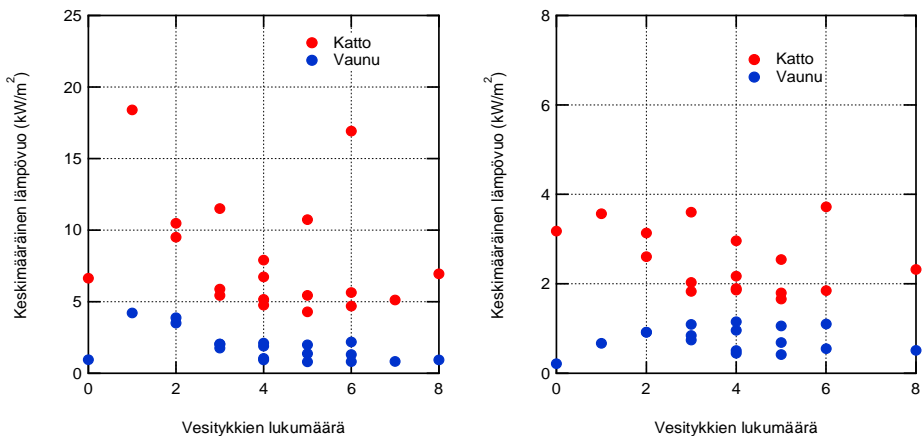


**Kuva 29.** Vesitykkien vaikutus liekin paikkaan 200 MW:n paloteholla. Yllä: kaksi tykkiä palavaan vaunuun. Alla: yksi tykki palavaan vaunuun, yksi tykki vaunuun P1.

Kolmannen tykin suuntauksella ei palavan vaunun kannalta ole enää suurta merkitystä, mutta vaunuun P1 kohdistuva lämpörasitus pienenee tehokkaimmin, jos kolmas tykki suunnataan vaunuun P2 (tapaus 3). Neljän tykin tehokkaimmaksi sijoitteluksi osoittautui tapaus 8, jossa kaksi tykkiä kohdistetaan palavaan vaunuun ja kaksi tykkiä vaunuun P1. Tämän jälkeen tykkien määrän lisääminen ei enää merkittävästi kasvattanut jäähdytystehoa. Kuten kuvista 30 ja 31 nähdään, lämpörasitus vaunuihin E1 ja P2 on jo ensimmäisen tykin jälkeen niin pieni, että tykkien suuntaaminen tähän vaunuun ei tuota merkittävästi lisää jäähdytystehoa.



**Kuva 30.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan vauunun E1 määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna. Vasemmalla: paloteho 200 MW. Oikealla: paloteho 100 MW.



**Kuva 31.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan vauunun P2 määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna. Vasemmalla: paloteho 200 MW. Oikealla: paloteho 100 MW.

#### 4.4.3 Sprinklauksen simulointi

##### 4.4.3.1 Suutintyypit

Tässä työssä tarkasteltiin sekä conventional- että spray-tyyppisiä avosuuttimia. FDS-malliin luodut kuvitteelliset suuttimet erosivat toisistaan ainoastaan hajotuskuvion suhteen. Conventional-tyyppiselle suuttimelle suihkukulmaksi annettiin

#### 4. Palosimulointi

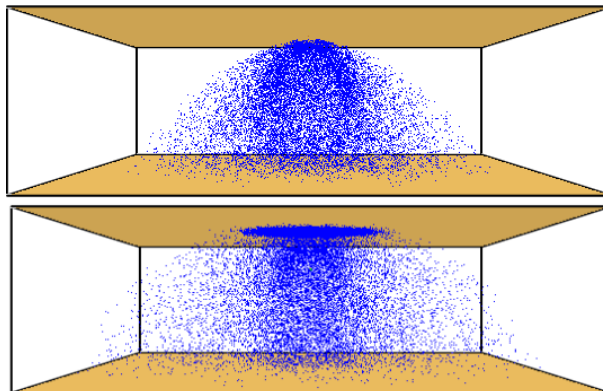
SPRAY\_ANGLE = 40, 130, kun taas spray-tyyppiselle suuttimelle suihkukulmaksi annettiin SPRAY\_ANGLE = 50,80. Keskimääräiseksi pisarakooksi oletettiin 1200 µm. Pisaroiden lähtönopeus määritettiin olettamalla aluksi suuttimelle jokin realistinen K-arvo ja virtaama Q. Kun nämä tunnetaan, voidaan suutinpaine p ratkaista kaavalla

$$p = \left( \frac{Q}{K} \right)^2. \quad (5)$$

Tämän jälkeen lähtönopeus laskettiin Bernoullin lain avulla kuten kohdassa 4.4.2.1 tehtiin vesitykeille, kuitenkin käyttäen etutekijän arvoa 0,6, joka on tyypillinen hajottajalevyillä varustetuille suuttimille. Tässä työssä käytetyt suuttimet on koottu taulukkoon 21. Spray- ja conventional-tyyppisten suuttimien hajotuskuvia verrataan kuvassa 32.

**Taulukko 21.** Simuloinneissa käytetyt avosuutintyyppit.

Suutintyyppi	K-arvo l/min/bar <sup>1/2</sup>	Virtaama l/min	Suutinpaine bar	Lähtönopeus m/s	Suojausala m <sup>2</sup>	Vesivuo mm/min
K115 spray/conv	115	120	1,09	8,9	11,7	10,2
K160 spray/conv	160	240	2,25	12,7	11,7	20,5
K240 spray/conv	240	360	2,25	12,7	11,7	30,7

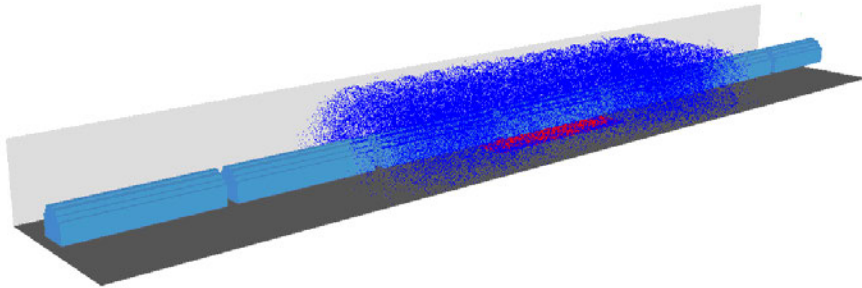


**Kuva 32.** Suutinten hajotuskuvat. Vasemmalla: spray-tyyppinen suutin. Oikealla: conventional-tyyppinen suutin.



## 4.4.3.2 Suutinten sijoittelu

Työn lähtökohtana oli aluelaukaisuun perustuva avosuutinjärjestelmä, koska suuttimet sijaitsevat ulkotilassa. Suutinten sijoittelua havainnollistetaan kuvassa 33. Suuttimet sijoitettiin kattamaan palavan vaunun ja sen ensimmäisten lähinaapurien käsittämä osa laskenta-alueesta. Yksittäisen suuttimen suojausala oli  $11,7 \text{ m}^2$  ( $3,5 \text{ m} \times 3,35 \text{ m}$ ), ja suuttimia oli 52 kpl neljässä raiteen suuntaisessa rivissä. Suojattu alue oli tällöin mitoiltaan  $43,55 \text{ m} \times 14 \text{ m}$  ( $609,7 \text{ m}^2$ ). Suuttimet sijaitsivat  $0,2 \text{ m}$  kannen alapinnan alapuolella, ja suihkujen keskiakselit osoittivat suoraan alaspäin. Työssä simuloidut jäähdytystapaukset esitetään taulukossa 22.



**Kuva 33.** Sprinklerisuutinten sijoittelu.

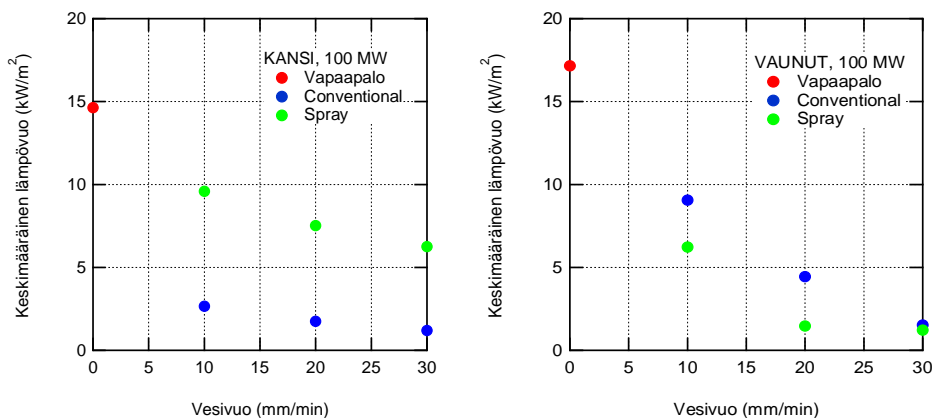
**Taulukko 22.** Sprinklerijärjestelmien jäähdytyssimuloinnit.

	Paloteho (MW)	Vesivuo (mm/min)	Suutintyyppi
Tapaus 35	100	10	K115 conventional
Tapaus 36	100	20	K160 conventional
Tapaus 37	100	30	K240 conventional
Tapaus 38	100	10	K115 spray
Tapaus 39	100	20	K160 spray
Tapaus 40	100	30	K240 spray
Tapaus 41	200	10	K115 conventional
Tapaus 42	200	20	K160 conventional
Tapaus 43	200	30	K240 conventional
Tapaus 44	200	10	K115 spray
Tapaus 45	200	20	K160 spray
Tapaus 46	200	30	K240 spray

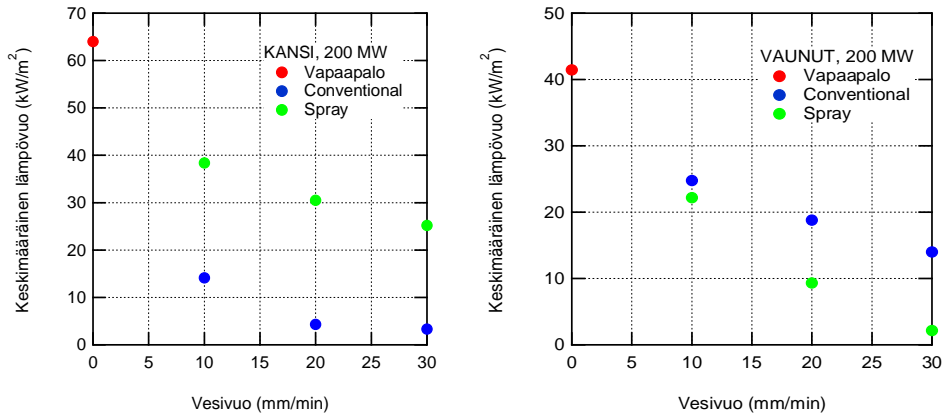
## 4.4.3.3 Sprinklerijärjestelmien jäähdytysvaikutus

Sprinklerijärjestelmien jäähdytysvaikutuksen kvantitatiivinen arviointi suoritettiin samoin kuin vesitykkien ts. määrittämällä kannen alapintaan ja vaunujen pintaan saatavat keskimääräiset lämpövuot aikakeskiarvona aikaväliltä 900–1000 s. Kuvassa 34 esitetään keskimääräiset lämpövuot vaunujen E2–P2 määrittämän alueen yli laskettuina keskiarvoina vesivuon funktiona paloteholle 100 MW. Vesivuon arvo nolla edustaa vapaata paloa. Vastaavat tulokset paloteholle 200 MW ovat kuvassa 35.

Suutinten erilaisten hajotuskuvioitten toiminta näkyy selkeästi tuloksissa. Conventional-tyyppiset suuttimet tuottavat kannen alapintaan suuremman jäähdytys-tehon, koska ne valelevat kannen alapintaa vedellä. Spray-tyyppiset suuttimet puolestaan jäädyttävät tehokkaammin vaunuja, koska kaikki vesi suunnataan suuttimista alaspäin. Kuitenkin spray-suutinten tuottama epäsuora jäähdytysvaikutus alentaa myös kannen alapintaan kohdistuvaa lämpörasitusta merkittävästi. Tämä epäsuora jäähdytysvaikutus aiheutuu pääosin pisaroiden lämpenemisestä ja höyrystymisestä kaasussa, sillä sprinklerijärjestelmän pisarakoko on pienempi kuin vesitykeillä ja vesi on jakautunut tasaisesti suureen kaasutilavuuteen.



**Kuva 34.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan vaunujen E2–P2 määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna, kun paloteho on 100 MW.

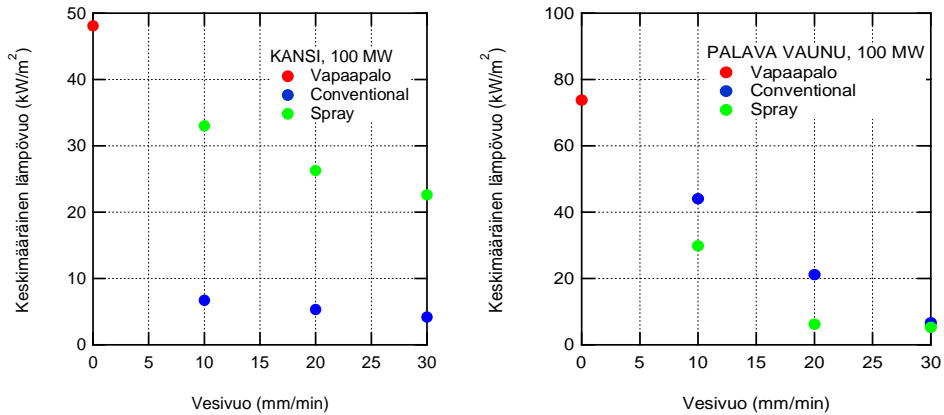


**Kuva 35.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunujen pintaan vaunujen E2–P2 määrittämän alueen yli keskiarvoistettuna, kun paloteho on 200 MW.

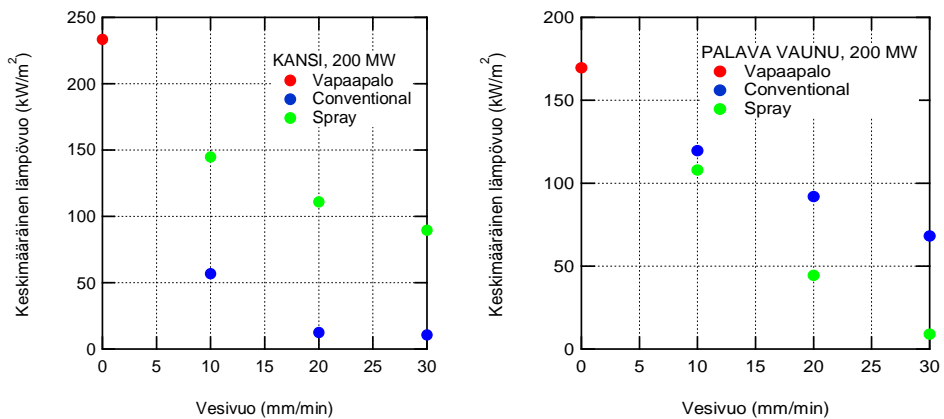
Jos halutaan karkeasti verrata vesitykkien ja sprinklerijärjestelmän jäähdytystehoa, voidaan aluksi todeta, että vesivuo 10 mm/min tarkoittaa 52:ta suutinta, joista jokainen tuottaa 120 l/min. Kokonaisvirtaama on siis 6240 l/min, mikä vastaa noin kahta vesitykkiä. Tällöin vesivuo 20 mm/min vastaa noin neljän vesitykin virtaamaa ja vesivuo 30 mm/min noin kuuden vesitykin virtaamaa. Tämän jälkeen kuvien 34 ja 35 tuloksia voi verrata kuvassa 26 esitettyihin tuloksiin. Vertailu osoittaa, että jos tarkastellaan suureen alueeseen (vaunujen E2–P2 määrittämä alue) kohdistuvaa lämpörasitusta, vesitykkien ja sprinklerijärjestelmien jäähdytysteho samalla vesivirtaamalla on samankaltainen siitä huolimatta, että vesitykkien jäähdytysvaikutus keskittyy pienelle alalle, kun taas sprinklerien jäähdytysvaikutus on hajautettu suurelle alalle. Vertailuun vaikuttaa luonnollisesti oletus aluelaukaisujärjestelmän mitoitusalueesta, joka tässä työssä ei perustunut mihinkään tiettyyn suunnittelusääntöön.

Tarkastellaan vielä sprinklerijärjestelmien jäähdytystehoa yksittäisten vaunujen kohdalla. Kuvassa 36 on keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunuun palavan vaunun kohdalla paloteholle 100 MW. Vastaavat tulokset paloteholle 200 MW ovat kuvassa 37. Kuvissa 38 ja 39 esitetään samat tulokset vaunun P1 kohdalla. Vaunun E1 kohdalta määritettyjä tuloksia ei ole esitetty, sillä ne ovat likimain identtiset P1-kohdan tulosten kanssa. Syy tähän on, että sprinklerijärjestelmän toiminta ei aiheuta sellaisia horisontaalisia virtauksia, jotka painaisivat liekkiä johonkin tiettyyn suuntaan.

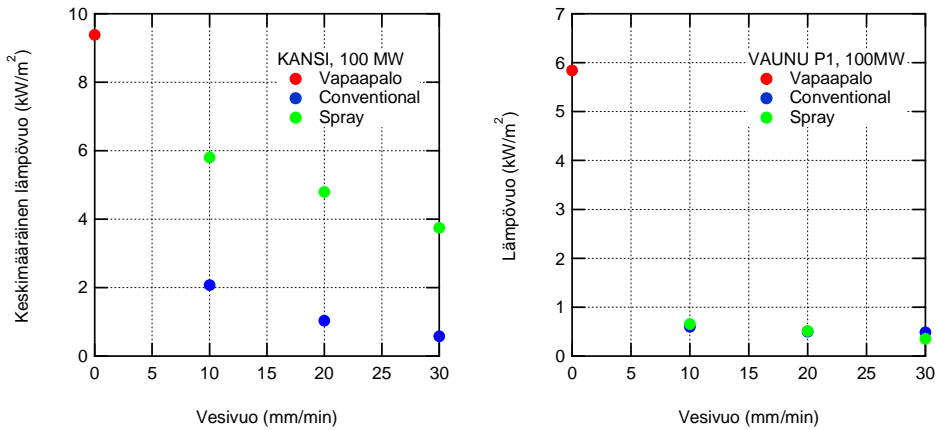
#### 4. Palosimulointi



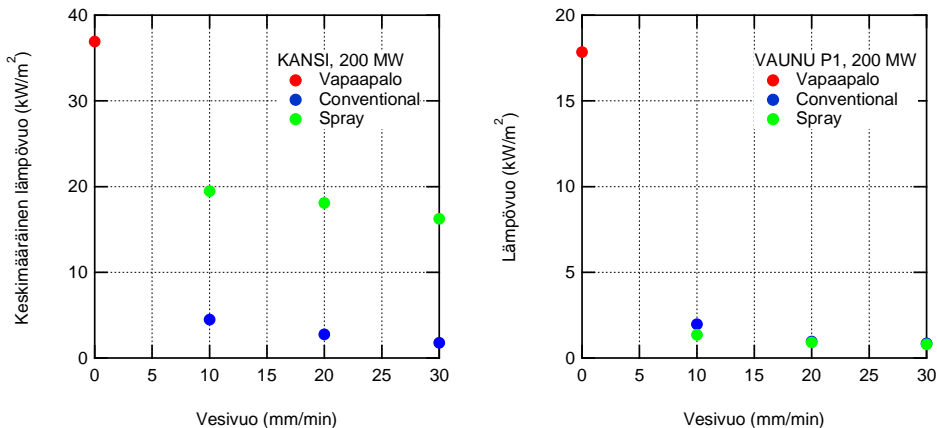
**Kuva 36.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunuun palavan vaunun kohdalla paloteholle 100 MW.



**Kuva 37.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunuun palavan vaunun kohdalla paloteholle 200 MW.



**Kuva 38.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunuun vaunun P1 kohdalla paloteholle 100 MW.



**Kuva 39.** Keskimääräiset lämpövuot kannen alapintaan ja vaunuun vaunun P1 kohdalla paloteholle 200 MW.

#### 4.4.4 Havainnot palosimuloinneista

Suoritettujen palosimulointien perusteella voidaan todeta, että FDS-ohjelman avulla voidaan simuloida vesitykkien toimintaa realistisesti ja kohtuullisin kustannuksin. Tämä antaa palotutkijoille ja -insinööreille mahdollisuuden tarkastella tykkien käyttöperiaatteita ahtaissa ja/tai matalissa tiloissa, jollainen tämän työn esimerkkikohdekin oli.

Tulokset osoittavat, että vesitykkien jäähdytysteho on herkkä tykkien sijoittelulle. Yhdelläkin tykillä on merkittävä jäähdyttävä vaikutus, mutta riski naapurivaunun

#### 4. Palosimulointi

---

lämpenemiseen kasvaa vain yhden tykin tapauksessa, koska vesitykit voivat siirtää liekin paikkaa ja samalla suurimman lämpörasituksen paikkaa. Tämä on huomioitava tykkien sijoittelussa.

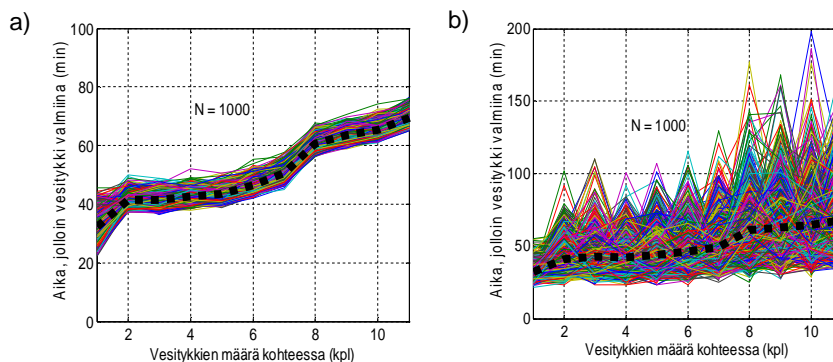
Vesitykkien ja sprinklerijärjestelmän jäähdytystehojen havaittiin olevan karkeasti samansuuruiset. Epäsuoran jäähdytyksen merkitys erottuu simulaatioissa, sillä vaikka tykit tai spraysprinkleri eivät kastele kantta, lämpörasitus kanteen vähenee niiden liekkiä ja kuumia vaunuja jäähdyttävän vaikutuksen ansiosta. Samoin tulokista näkyy ero eri sprinklerisuutintyyppien (spray vs. conventional) välillä.

## 5. Simulointitulosten yhdistäminen

### 5.1 Deterministinen tarkastelu

Operaatioaikamallin avulla on tuotettu koko systeemiä ja/tai sen osatekijöitä kuvaavia tuloksia aikajakaumina. Palosimuloinnin avulla on tarkasteltu erilaisilla vesitykkimäärillä saavutettavaa jäähdytysvaikutusta. Tämän luvun tarkoituksena on yhdistää päätuloksia näistä kahdesta simulointijoukosta ja muodostaa käsitys siitä, kuinka nopeasti tietty jäähdysteho voidaan saavuttaa.

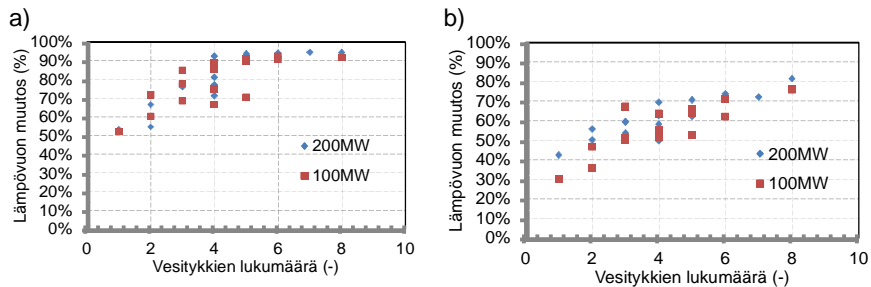
Operaatioaikamallin tuottamien realisaatioiden avulla voidaan tarkastella, miten toimintakuntoisten vesitykkien lukumäärä kehittyi onnettomuuspaikalla suuronnettomuustilanteessa. Kuvan 40 käyräparvessa esitetään tuhannen yksittäisen laskentatapauksen (ohuet viivat) tuottamat tulokset toimintavalmiiden (paineellistettujen) vesitykkien kertymiselle onnettomuuspaikalle. Lisäksi kuvassa esitetään kaikista eri tapauksista laskettu keskiarvo (musta katkoviiva). Havaitaan, että n. 20 min jälkeen onnettomuuspaikalla on ensimmäinen toimintavalmis vesitykki. Ajallisesti suurin vesitykkien kertymäjakso ajoittuu n. 40 min kohdalle (palon syttymisestä). Lähtötiedoissa yksiköiden toiminta-aikojen muuttaminen jakaumaksi tuottaa yksittäisten simulointitulosten kohdalla suuremman hajonnan (kuva 40b), mutta keskiarvo on kuitenkin käytännössä samansuuruinen kuin kuvassa 40a.



**Kuva 40.** Vesitykkien ajallinen kertyminen onnettomuuspaikalle operaatioaikamallin tuloksissa. Lähtötiedoissa yksikköjen toiminta-aikojen on kuvattu a) käyttäen operatiivisen suunnitelman mukaisia arvoja ja b) muuttamalla operatiiviset toiminta-ajat jakaumiksi.

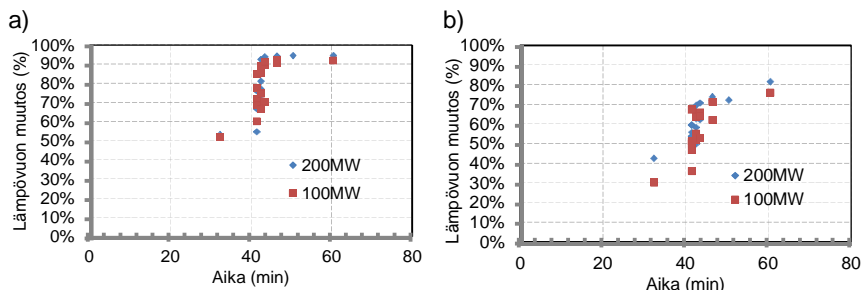
## 5. Simulointitulosten yhdistäminen

Palosimulointien perusteella tulipalosta aiheutuva lämpörasitus (naapuri)vaunuun on n. 40 kW/m<sup>2</sup> ja kattoon n. 65 kW/m<sup>2</sup>, kun vesitykit eivät ole käytössä (kuva 26). Absoluuttisten arvojen sijaan seuraavassa on tarkasteltu lämpövuon muutosta (0 % silloin, kun vesitykkeitä ei ole vielä onnettomuuspaikalla) toimivien vesitykkien lukumäärän suhteen (kuva 41). Kuvasta 41a havaitaan, että jo ensimmäisellä toimivalla vesitykillä saavutetaan n. 50 % lämpörasituksen alenema (verrattuna tilanteeseen, jossa ei ole jäähdystä) ja kehitys jatkuu aina siihen asti, kunnes paikalla on 4–5 toimivaa vesitykkiä ja lämpörasituksen alenema on n. 90 %. Vastaava ilmiö on havaittavissa kattoon kohdistuvassa lämpörasituksessa (kuva 41b), mutta ensimmäisen vesitykin aiheuttama muutos on n. 30 % ja kehittyä ylöspäin päättyen n. 70 %:iin, kun vesitykkien lukumäärä kasvaa.



**Kuva 41.** Toiminnassa olevien vesitykkien lukumäärän vaikutus a) vaunun ja b) katon lämpörasituksen alenemaan (suhteellinen muutos prosentuaalisesti verrattuna tapaukseen, jossa ei sammuteta).

Yhdistämällä kuvien 40a (keskiarvokuvaaja) ja 41 tulokset saadaan koko operatiivista toimintaa kuvaava jäähdysteho vesitykeillä kyseisessä suuronnettomuusskenaariossa (kuva 42). Kuten edellisissäkin kuvissa, samat ilmiöt ovat havaittavissa kuvan 42 tuloksista, joissa siis korostuu ajanhetken n. 40 min kohdalla tapahtuva jäähdystehon kasvu (lämpörasituksen alenema). Operatiivisessa mielessä tuo on siis se ajanhetki, jolloin suurpalo voidaan saada hallintaan.



**Kuva 42.** Operatiivista toimintaa kuvaavan ajan vaikutus palon hallintaan, jossa tarkastellaan a) vaunun ja b) katon lämpörasituksen alenemaa (suhteellinen muutos prosentuaalisesti verrattuna tapaukseen, jossa ei sammuteta).



## 5.2 Tulosten yhdistäminen todennäköisyyspohjaisesti

Kohdassa 5.1 operaatioaikoja ja jäähdytystehoja (lämpörasituksen alenema) käsiteltiin deterministisesti muodostamalla ensin operaatioajoista keskiarvoa kuvaava tulos ja tämän jälkeen tähän yhdistettiin jäähdytysteho eri vesitykkimäärillä.

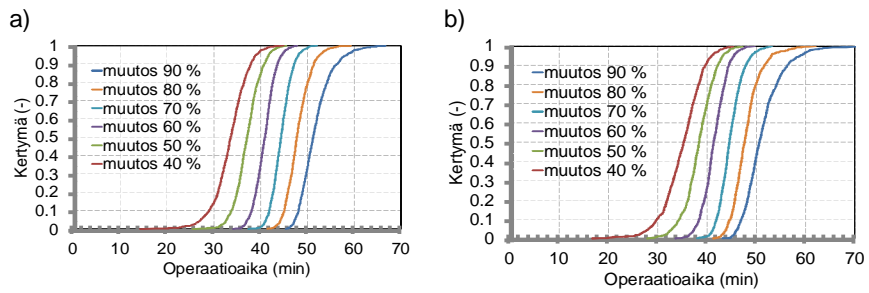
Tuotettujen realisaatioiden avulla operaatioaikaa ja jäähdytystehoa on mahdollista tarkastella myös todennäköisyyspohjaisesti, sillä tuhatta laskettua operaatioaikaa eri vesitykkimäärillä voidaan tarkastella yksittäisinä tuloksina. Samoin vesitykkeillä jäähdyttäminen sisältää vaihtelua. Kuten aiemmista tuloksista on havaittu, vesitykkien sijoittelu, lukumäärä ja suuntaaminen vaikuttavat jäähdytystehoon. Simulointien lähtöarvojen valintaa ei kuitenkaan tehty todennäköisyyspohjaisesti, eivätkä jäähdytystehoissa havaitut hajonnat anna oikeaa kuvaa kokonaan tai osittain satunnaisten olosuhteiden aiheuttamasta hajonnasta. Simuloinnissa ei myöskään huomioitu sitä, että esim. savu haittaa oleellisesti vesitykkien suuntaamista. Jäähdytystehoissa voi siten todellisuudessa esiintyä enemmän hajontaa kuin mitä simulointien perusteella nähtiin.

Tarkastellaan mielivaltaista tilannetta, jossa operatiivinen ryhmittäminen ja sitä kautta vesitykkien saapuminen on satunnainen (em. tuhat realisaatiota operaatioajoille) tapahtuma. Tähän yhdistetään operaatioajasta riippumattomat tiedot vesitykkien jäähdytystehosta ja sen vaihtelusta. Esimerkiksi neljällä vesitykillä voi 200 MW palon tapauksessa saada aikaan 49 %:sta 92 %:iin olevan jäähdytystehon. Tuloksena saadaan tuhat kappaletta erilaisia jäähdytystehon ja operaatioajan riippuvuuksia, joista voidaan kiinnittää jatkotarkasteluihin kriittiset ajankohdat; tässä tapauksessa ne ajankohdat, jolloin jäähdytysteho (lämpörasituksen alenema) on 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 % tai 90 %.

Kuvassa 43 esitetään todennäköisyyspohjainen tarkastelu tulosten yhdistämiselle. Kuvan tuloksia luetaan siten, että vasemmalta alkaen käyrästä tulee vastaan 40 % jäähdytystehoa kuvaava käyrä, jota voidaan pitää helpoimmin ja nopeimmin saavutettavana tilana operatiivisessa mielessä. Vastaavasti oikeanpuoleisin käyrä (90 % muutos) edustaa vaikeimmin saavutettavaa tilannetta, joka myös ajallisesti saavutetaan muita myöhemmin. Pystysuunnassa voidaan tarkastella eri osuuksia toteutuneista tapauksista, esim. arvo 0,5 (P = 50 %) edustaa mediaania (tässä tapauksessa 500 kpl tapauksista) ja tätä tunnuslukua vastaava ajanhetki luetaan vaakariviltä. Kuvasta 43 nähdään esimerkiksi se, että 40 % jäähdytysteho voidaan saavuttaa n. 30 min kuluessa palon syttymisestä n. 10 % todennäköisyydellä. Vastaavasti todennäköisyys, että 40 % jäähdytystehon saavuttamiseen menee aikaa enemmän kuin 40 min, on vain pari prosenttia. Huomattakoon, että 200 MW ja 100 MW palojen välillä ei tässä tarkastelussa ole olennaista eroa.

## 5. Simulointitulosten yhdistäminen

---



**Kuva 43.** Valittujen jäähdytystehojen saavuttamishetkien kertymäfunktiot, kun palon koko on a) 200 MW ja b) 100 MW.

## 6. Johtopäätökset

### 6.1 Simulointimenetelmät

Työssä kehitettiin uusia simulointimenetelmiä, joilla voidaan arvioida suurpalotilanteen pelastustoimintaan kuuluvien tehtävien ajallista kestoa ja sammutustoiminnan tehokkuutta. Pelastustoiminnan ajallista kehitystä simuloitiin stokastisella operaatioaikamallilla ja vesitykkien ja automaattisten sammutusjärjestelmien tuottamaa jäähdytysvaikutusta numeerisin palosimuloinnein.

Projektin aikana todettiin, että mallinnuksen hyödyt saavutetaan kahdessa vaiheessa: Alkuvaiheessa määritellään toimijat, heidän roolinsa ja toimijoiden keskinäiset riippuvuudet. Tämä prosessi auttaa toimijoita tunnistamaan omaan ja yhteistoimintaan liittyviä kehityskohteita sekä vähentää toimintaan liittyvää hämmennystä ja väärinkäsityksiä. Projektin loppuvaiheessa, simuloinnin tuloksena saavutettava hyöty taas liittyy pelastustoimen vaikuttavuuden mittaamiseen ja resursointiin sekä sovelluskohteen riskien arviointiin. Työn aikana havaittiin, että monimutkaisen toimijaverkoston suorittaman pelastustoiminnan määrällinen arviointi on erittäin vaikeaa, ellei mahdotonta, ilman nyt kehitetyn menetelmän kaltaista tai vastaavaa työkalua, jonka avulla on mahdollista ottaa huomioon eri toimenpiteisiin ja vaiheisiin liittyvät epävarmuudet. Operaatioaikamallin ja viiveitä ja niiden todennäköisyyksiä koskevien asiantuntija-arvioiden avulla pystytään yleistämään toimijaverkoston kuvaus ja toimintaa koskevat havainnot ajallisiksi jakaumiksi. Samalla pystytään tunnistamaan toiminnan kestoon voimakkaimmin vaikuttavat tehtävät. Menetelmää olisi mahdollista hyödyntää esimerkiksi suuronnettomuusharjoitusten suunnittelussa ja analysoinnissa.

Virtauslaskentaan perustuvan palosimuloinnin osoitettiin soveltuvan hyvin sammutus- tai jäähdytystoiminnan taktiikan tutkimiseen. Simulointien avulla voidaan löytää optimaalinen tapa hyödyntää rajallisia resursseja tilanteissa, joiden tutkiminen käytännön kokeilla ja harjoituksilla olisi vaikeaa. Simuloinnin avulla voidaan lisäksi vertailla vaihtoehtoisia tai toisiaan täydentäviä sammutusratkaisuja.

Yhdistämällä operaatioajan ja jäähdytystehon simulointitulokset pystyttiin tuottamaan jäähdytystehon ajallinen kertymäfunktio sekä todennäköisyysjakaumat tietyn jäähdytystehon saavuttamiseen kuluvalle ajalle. Tuloksia hyödynnettäessä pitää kuitenkin ottaa huomioon, että nyt jäähdytys­simulointeja ei tehty todennäköisyyspohjaisesti. Jäähdytystehojen jakaumina käytettiin eri suuntaus-, sijoittelu-

ja lukumäärävariaatioiden aiheuttamaa hajontaa. Tuloksia voidaan hyödyntää, kun arvioidaan pelastustoimen vaikuttavuutta suurpaloissa yleisellä tasolla. Lisäksi ne antavat uudenlaisen mahdollisuuden arvioida paloriskejä yksittäisissä kohteissa, koska nyt tuotettujen tulosten avulla pystytään arvioimaan, saadaanko tietty palo hallintaan ja palavan kohteen ympäristö suojattua.

### 6.2 Johtopäätökset sovellusesimerkin simuloinneista

Sovellusesimerkinä tarkasteltiin Tampereen rautatieaseman eteläpuolisen rata-alueen päälle rakennettavan kannen alapuolista säiliövaunupaloa. Tuloksia hyödynnettäessä tulee ottaa huomioon seuraavat rajoitukset:

- 1) Esimerkkiin liittyvät yksityiskohdat valittiin siten, että ne palvelisivat mahdollisimman hyvin simulointimenetelmien kehitystä ja testausta. Lähtötietojen tarkkuus ja kattavuus ei ollut laskentamenetelmien kehityksen kannalta olennaista, eikä tietoja valittu kohteen paloteknisen suunnittelun näkökulmasta. Mm. pelastusyksiköiden saapumisajat arvioitiin hyvin karkeasti.
- 2) Vesitykkien simulointimallin parametrit määritettiin ainoastaan suihkun mittoja (heitto ja leveys) koskevien tietojen perusteella. Mallin luotettavuutta voitaisiin parantaa mittaamalla vesivuojakaumia eri paineilla ja suihkukulmilla.
- 3) Vesitykkien suuntauksen oletettiin onnistuvan täydellisesti haluttuun kohtaan. Käytännön hankaluuksista ja savun heikentämästä näkyvyydestä aiheutuvia suuntausongelmia ei otettu huomioon. Todellisuudessa jäähdystehot voivat siten jäädä merkittävästi simuloituja alhaisemmiksi.
- 4) Vesitykkiselvitykset oletettiin tehtäviksi melko lähelle palavaa junaa, jolloin suihkut joudutaan suuntaamaan lähes junan suuntaisesti. Joissain tilanteissa olisi mahdollista suunnata vesitykit sivulta käsin, jolloin myös vaunujen jäähdystehot voisivat olla erilaiset.
- 5) Sammutusveden loppumista ja lisäveden hankkimista ei otettu huomioon.
- 6) Letkuissa tapahtuvien painehäviöiden aiheuttamia muutoksia vesitykkien suihkuihin ei otettu huomioon.
- 7) Vesitykkien sammutusvaikutusta ei otettu huomioon. Tästä syystä todellinen jäähdystysvaikutus voisi olla simuloitua suurempi.
- 8) Jäähdystehon hajonta voi todellisuudessa olla huomattavasti laajempi kuin simuloinneissa havaitut erot eri sijoittelu-, suuntaus- ja lukumäärävaihtoehtojen välillä.

Sammutus- ja jäähdystoiminnan merkittävimmät viiveet ja odotusajat aiheutuvat hätämaadoitusten tekemisestä ja palavan aineen selvittämisestä (tilannekuvan luominen). Näiden tehtävien nopeuttamista tai välttämistä erilaisten teknisten järjestelmien avulla tulisi harkita.

Vesitykkien ja sprinklerijärjestelmän jäähdytystehojen havaittiin olevan karkeasti samansuuruiset. Ensimmäisen vesitykin kohdistaminen palavaan vaunuun karkeasti ottaen puolittaa lämpörasituksen kanteen ja vaunuihin. Riski naapurivaunun lämpenemiseen kuitenkin kasvaa vain yhden tykin tapauksessa, koska vesitykit voivat siirtää liekin ja samalla suurimman lämpörasituksen paikkaa. Simuloinnin avulla löydettiin myös naapurivaunujen kannalta tehokas ratkaisu tykkien sijoitteluun.

Yhdistämällä simuloitua operaatioajaa ja jäähdytystehoa osoitettiin, että jäähdytysteho alkaa merkittävästi kasvaa noin 40 min kuluttua syttymisestä. Tämä on se aika, jolloin suurpalo voidaan saada hallintaan.

### 6.3 Jatkotutkimustarpeet

Sovellusesimerkkiin liittyvät tiedonkerääminen ja simuloinnit osoittautuivat niin työläiksi, että operaatioaikamallin menetelmäkehitykseen ei jäänyt tämän projektin puitteissa aikaa. Sovellusesimerkin työstäminen antoi kuitenkin erittäin hyvän pohjan mallin jatkokehitykselle. Excel-pohjainen työkalu on toiminut kehitysvaiheessa hyvin, koska käyttäjä voi hyvin vapaasti luoda kytkentöjä tietokannan ja mallin eri olioiden välille. Jatkossa on kuitenkin tarpeen, että mallista tulee helpokäyttöisempi ja sen muokkaaminen uusiin sovelluksiin nopeutuu. Jatkokehityksen tärkeimpänä tavoitteena voidaan pitää mallin käytettävyyden parantamista. Käytettävyys koostuu mallin käyttöliittymän selkeydestä ja käyttäjäystävällisyydestä, alhaisesta virhealttiudesta, luodun mallin dokumentoinnin helppoudesta ja kytkettävydestä muihin tulipalojen ja onnettomuuksien ohjelmistoihin ja tietokantoihin. Käytettävyyden parantaminen lisäisi mahdollisuuksia mallin laajempaan soveltamiseen riskienhallintatyön osana. Käytännön kokemuksia tulisi kerätä esimerkiksi suuronnettomuusharjoitusten yhteydessä. Lisäksi simulointimallin ominaisuuksien syvempi matemaattinen analyysi olisi hyödyksi. Mallin luomiseen soveltuvien formaalien menetelmien kehittäminen voisi nopeuttaa mallin luontia ja parantaa prosessin luotettavuutta.

Työn tulokset osoittavat, että numeerisella simuloinnilla voidaan tuottaa tietoa pelastuslaitosten sammutusmenetelmien optimaalisista ja mahdollisesti haitallisista käyttötavoista. Simulointi voidaan tässä yhteydessä nähdä tietokoneella suoritettuna kokeena, jonka tekeminen todellisuudessa ei olisi mahdollista. Vesitykkien käyttöä katetuissa tiloissa ja tunneleissa tulisi tutkia lisää, jotta voitaisiin luoda selkeät ja kattavat ohjeet eri tilanteisiin. Simuloinnin avulla voidaan selvittää oikeat työskentelytavat myös tilanteissa, joissa todellisuudessa ei alhaisen näkyvyyden vuoksi pysty näkemään suihkun vaikutusta liekkeihin ja ympäröivien kohteiden lämpenemiseen. Sitä ennen tulisi simulointimallin luotettavuutta parantaa mittamalla vesivuojakaumia eri paineilla ja suihkukulmilla ja sovittamalla mallin parametrit niiden avulla. Sekä sprinklauksen että pelastuslaitoksen suihkujen käyttöä jännitteisissä kohteissa tulisi tutkia lisää, jotta niihin liittyvät riskit voitaisiin hallita.

## Lähdeluettelo

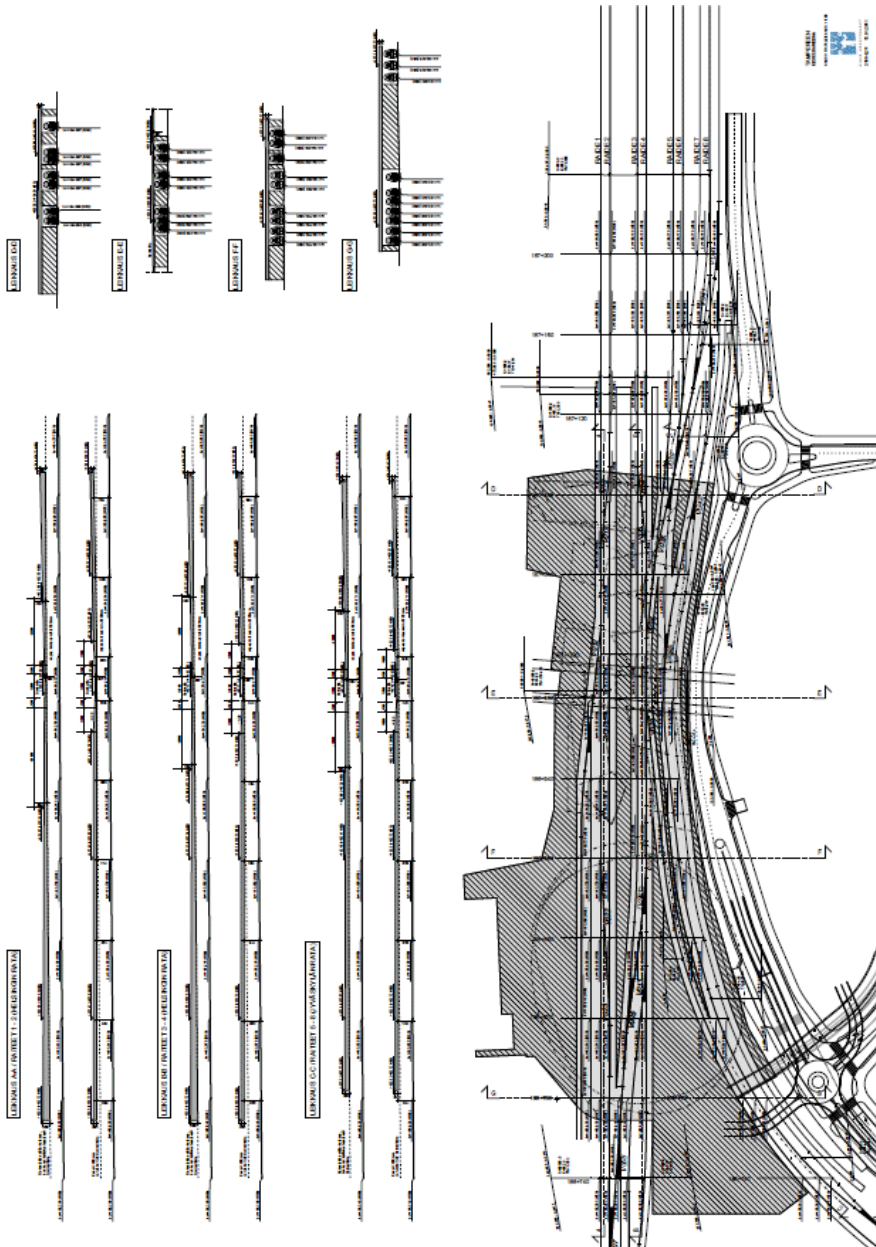
1. Ministry of Interior (Sisäasiainministeriö). 2007. Pelastustoimen strategia 2015. / Rescue Services Strategy 2015. March 2007. Ministry of the Interior Publications 14/2008. Helsinki: Sisäasiainministeriö.
2. Jäntti, J., Miettinen, P. & Tillander, K. 2009. Pelastusyksikön ensimmäisiin toimenpiteisiin kohteessa kuluva aika. Pelastusopiston tutkimusraportti 3/2009. Kuopio: Pelastusopisto. 90 s. + liitt. 28 s. [http://info.pelastusopisto.fi/kirjasto/Sarja\\_B/B3\\_2009.pdf](http://info.pelastusopisto.fi/kirjasto/Sarja_B/B3_2009.pdf).
3. Sisäasiainministeriö, Sisäinen turvallisuus. 2012. Pelastustoimen toiminta-  
valmiuden suunnitteluohje. Sisäasiainministeriön julkaisuja 21/2012. Helsinki:  
Sisäasiainministeriö. 24 s.
4. Marchant, R., Kurban, N. & Wise, S. 2001. Development and Application of  
the Fire Brigade Intervention Model. Fire Technology, 37, 263–278.
5. Wiikinkoski, T. & Rantanen, H. 2010. Eryytilanne prosessina – formaalin  
kuvausmenetelmän käyttökelpoisuus moniviranomaistilanteen yhteistoiminnan  
kehittämisessä. Tutkimusraportti 1/2010. Kuopio: Pelastusopisto. 52 s. + liitt.  
5 s.
6. Linna, P. 2009. Häätokeskuksen vastesuunnitelman vaatimusmäärittely. Diplomi-  
työ. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. 64 s. + liitt. 2 s.
7. Kling, T. 2010. Palo-HRA – Operatiivisen toiminnan malli ydinvoimalaitosten  
paloriskientodennäköisyyspohjaiseen arviointiin. Versio 2. VTT Tutkimus-  
raportti VTT-R-07211-10. Espoo: VTT.
8. Hostikka, S., Kling, T. & Paajanen, A. 2012. Simulation of fire behaviour and  
human operations using a new stochastic operation time model. 11th International  
Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM11),  
Helsinki. 08-Mo3-1.
9. L2 Paloturvallisuus Oy. 2011. Tampereen kansi ja keskusareena, alustava  
turvallisuus- ja palotekninen suunnitelma. Helsinki: L2 Paloturvallisuus Oy.
10. Pelastusopisto. TOKEVA-ohjeet (eTOKEVA). Pelastusopiston taktiset ja tek-  
niset torjuntaohjeet pelastushenkilökunnalle. <http://www.pelastusopisto.fi/pelastus/home.nsf/Pages/09FB5FC4FD31DA6DC22576C500286EA3>.

11. Ratahallintokeskus. 2009. Sähkörataohjeet. Ratahallintokeskuksen julkaisu B22. Helsinki: Ratahallintokeskus.
12. Liikennevirasto. 2011. Ohje varautumisesta rautatieonnettomuuksiin (OVRO). Liikenneviraston ohjeita 16/2011. Helsinki: Liikennevirasto.
13. Tampereen aluepelastuslaitos. 2012. Tampereen kansi- ja keskusareenan alapuolisten tilojen operatiivinen suunnitelma. Tampere: Tampereen aluepelastuslaitos.
14. Pöyry. 2012. Tampereen Keskusareenan palopostien tuotokapasiteettitarkastelu. Vantaa: Pöyry Oyj.
15. Hostikka, S., Keski-Rahkonen, O. & Korhonen, T. 2003. Probabilistic Fire Simulator. Theory and User's Manual for Version 1.2. VTT Publications 503. Espoo: VTT. 72 s. + liitt. 1 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2003/P503.pdf>.
16. Forsström, J. 2006. Ydinjätehuollon kustannusriskianalyysi. Esitutkimus. VTT Working Papers 64. Espoo: VTT. 51 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W64.pdf>.
17. Eerola, M. 2001. Asiantuntijatiedon kvantifiointi riskinarvioinnissa. EELAn julkaisu 2001. Helsinki: EELA, Riskinarvioinnin tutkimusyksikkö, Rolf Nevanlinna instituutti, Helsingin yliopisto. [http://www.evira.fi/files/attachments/fi/riskinarviointi/asiantuntijatiedon\\_kvantifiointi\\_riskinarvioinnissa.pdf](http://www.evira.fi/files/attachments/fi/riskinarviointi/asiantuntijatiedon_kvantifiointi_riskinarvioinnissa.pdf).
18. Liu, Z.G., Kashef, A.H., Loughheed, G.D. & Crampton, G.P. 2011. Investigation on the Performance of Fire Detection Systems for Tunnel Applications – Part 2: Full-Scale Experiments Under Longitudinal Airflow Conditions. Fire Technology, 47, 191–220.
19. Tillander, K., Oksanen, T. & Kokki, E. 2009. Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot. VTT Tiedotteita 2479. Espoo: VTT. 106 s. + liitt. 5 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2479.pdf>.
20. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W. & McDermott, R. 2010. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-5. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 108 s.
21. Sheppard, D. T. 2002. Spray Characteristics of Fire Sprinklers. NIST GCR 02-838. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 206 s.



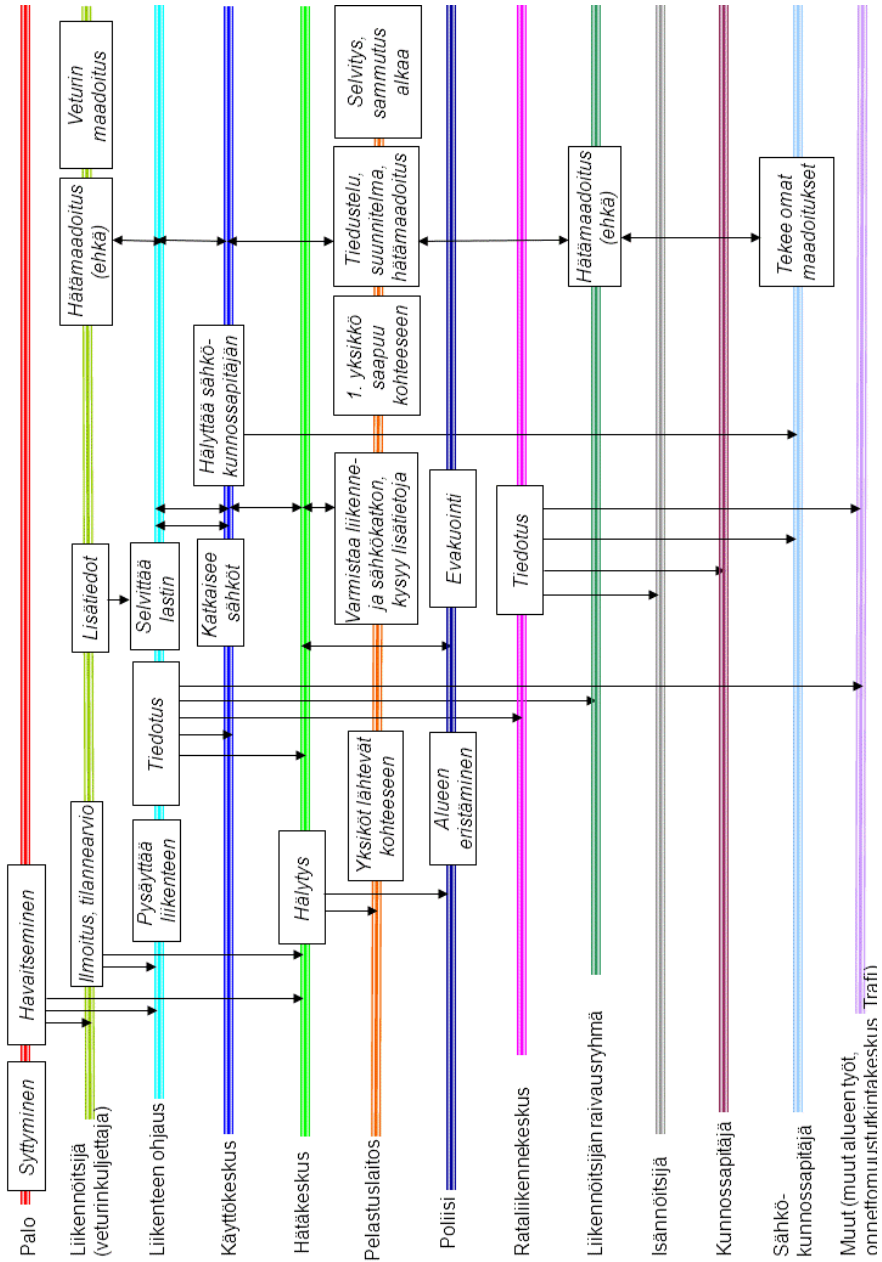


# Liite 1: Kartta alueesta



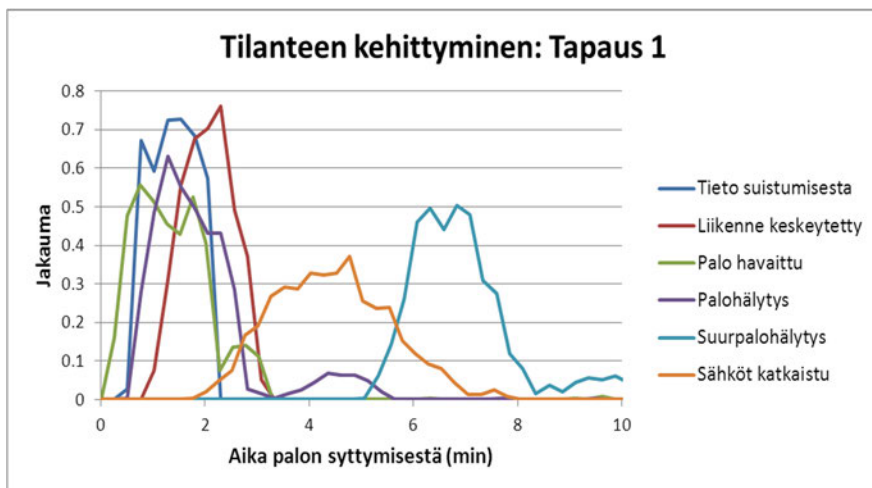
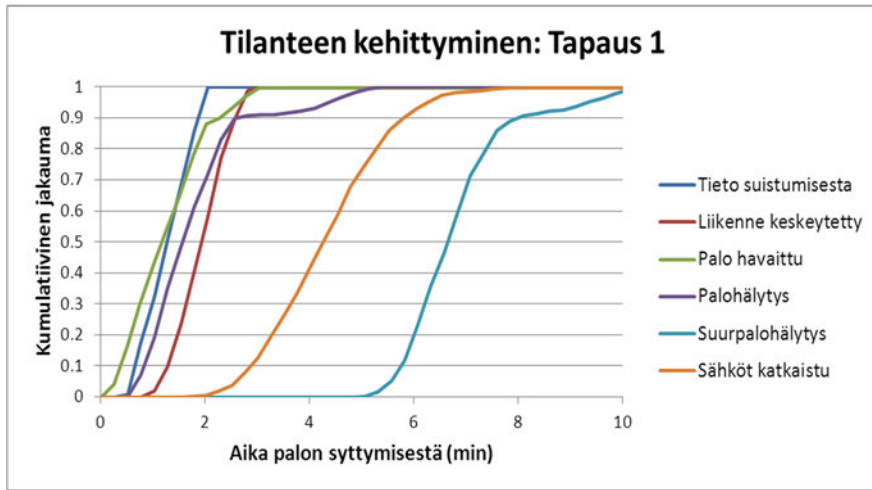


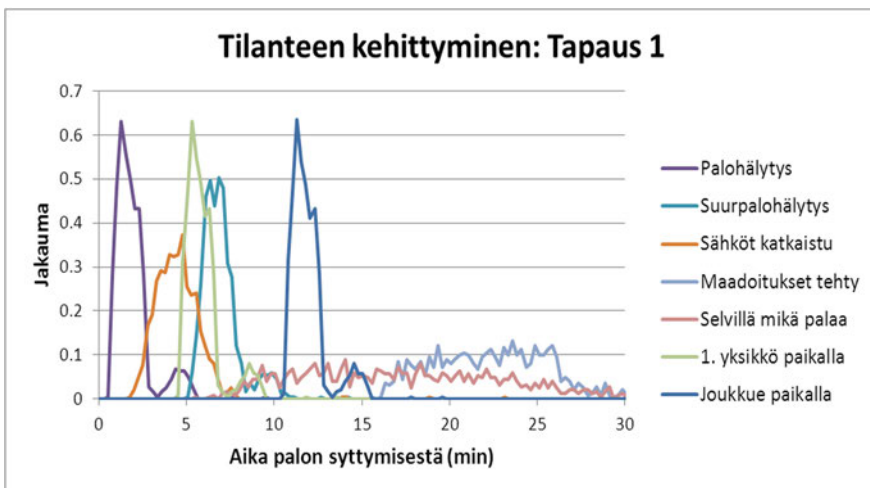
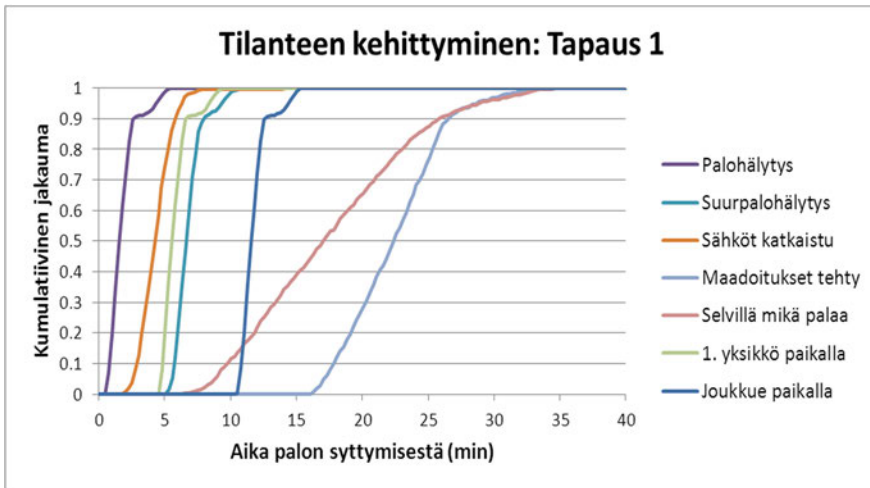
## Liite 2: Toimijoiden roolit ja niiden väliset kytkennät

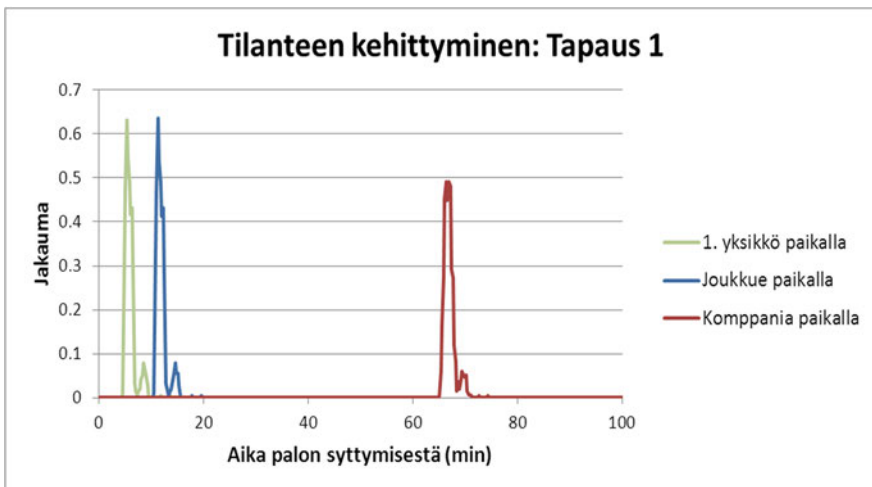
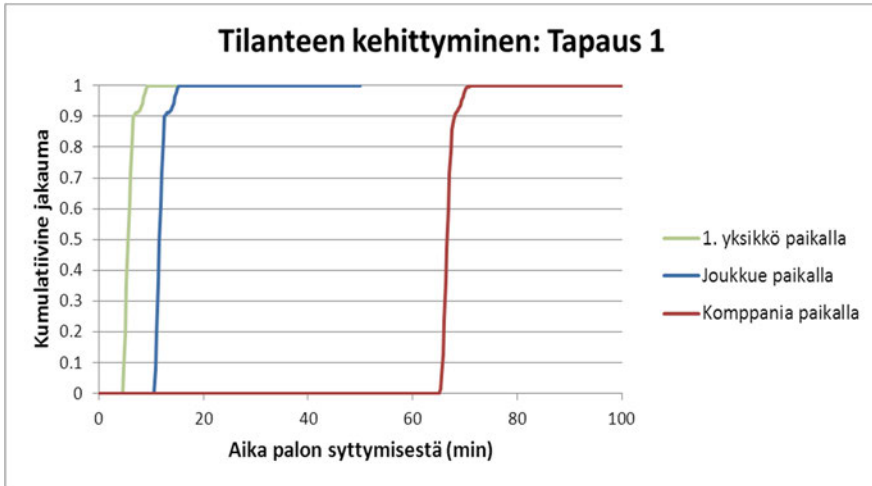


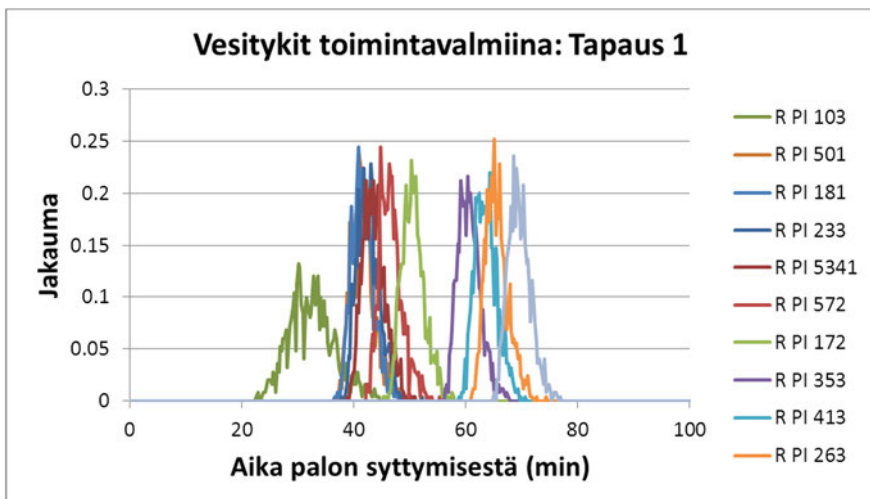
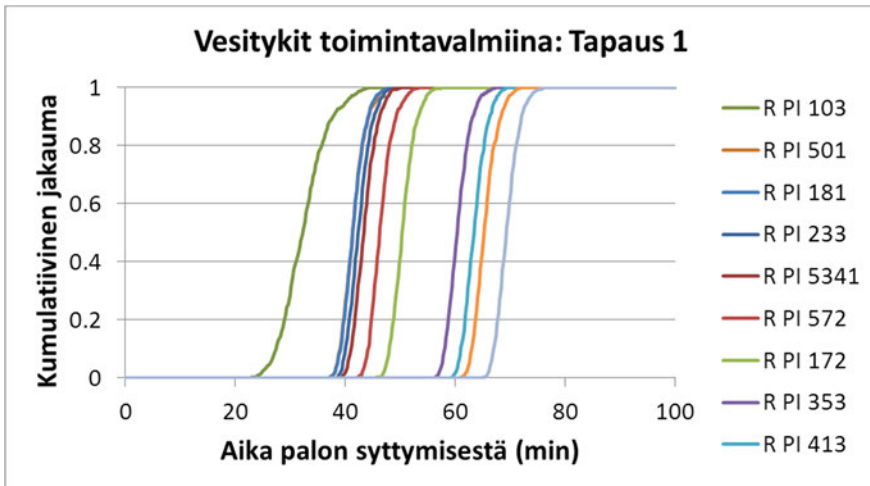


# Liite 3: Monte Carlo -simuloinnit, tapaus 1: Toimintavalmiusajat mallinnettiin pelastuslaitoksen operaatiosuunnitelman mukaisesti



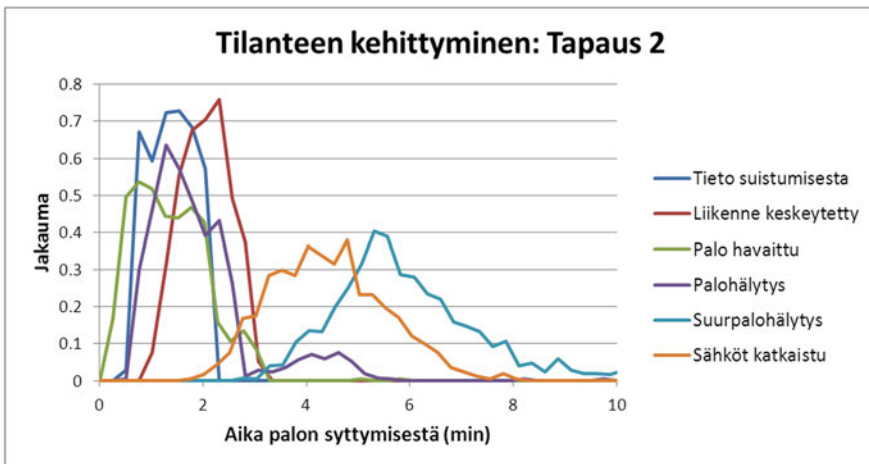
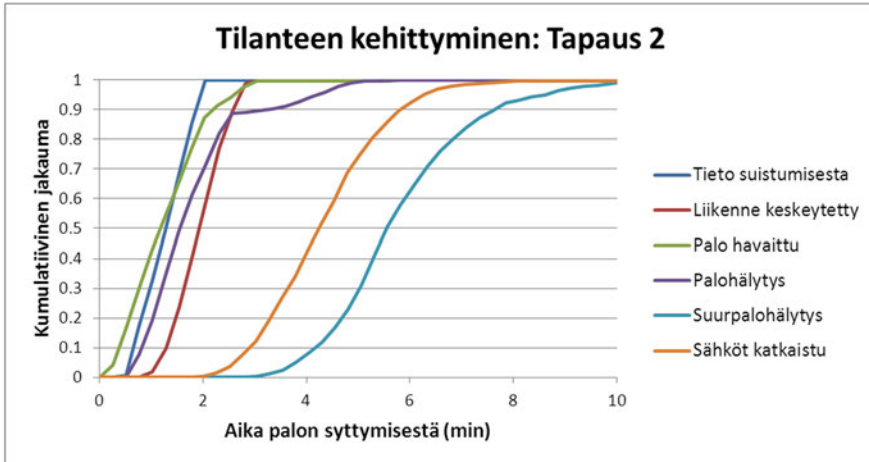


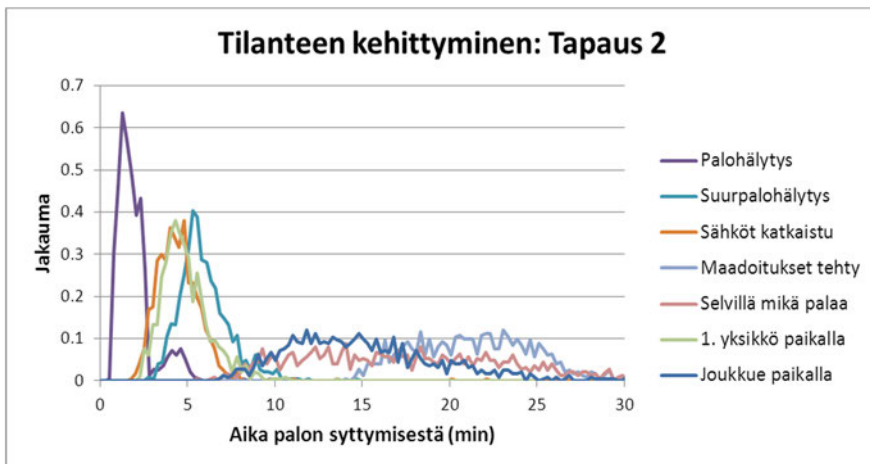
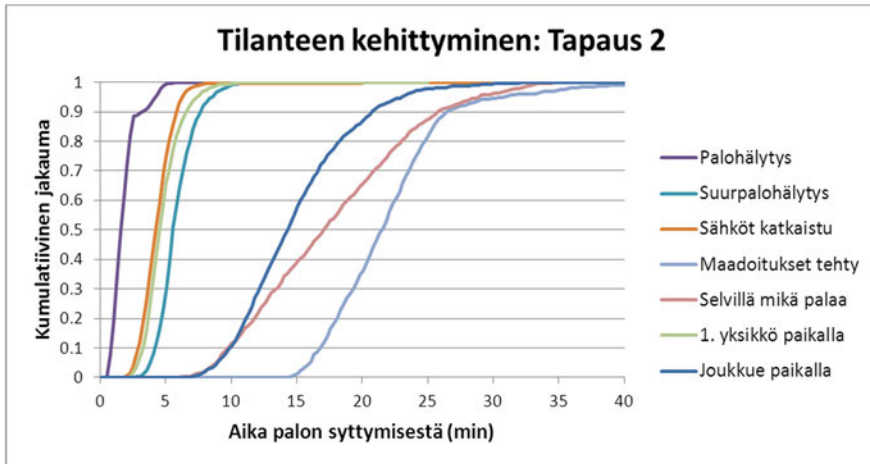


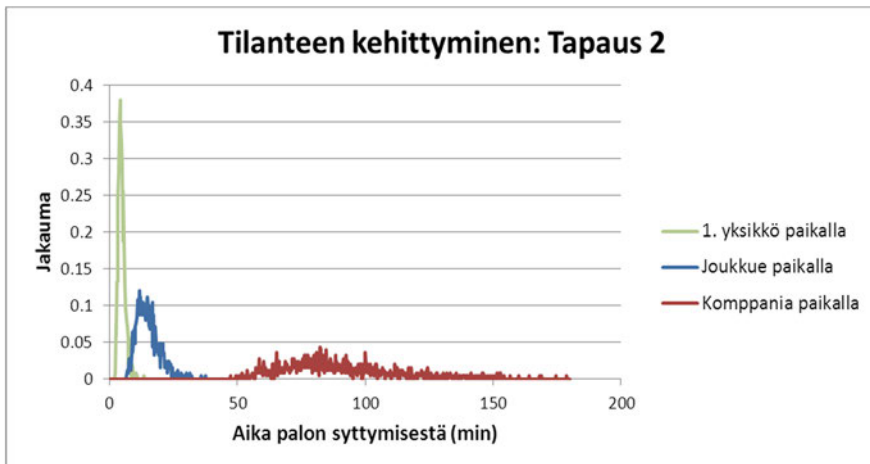
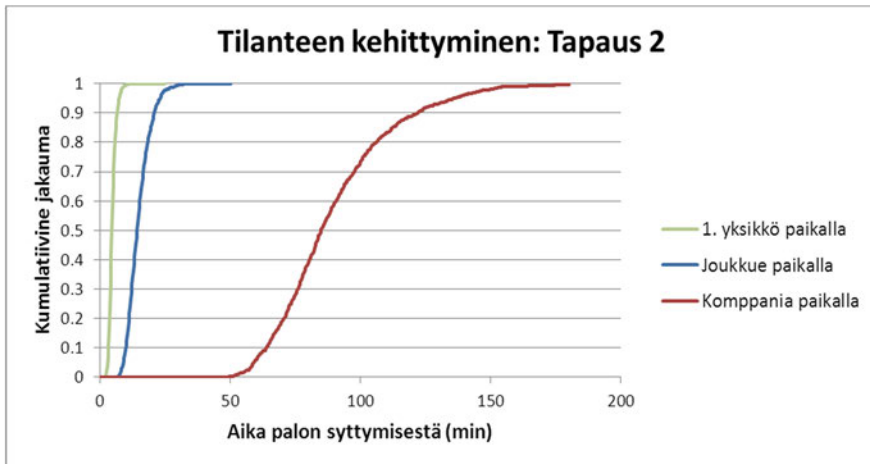


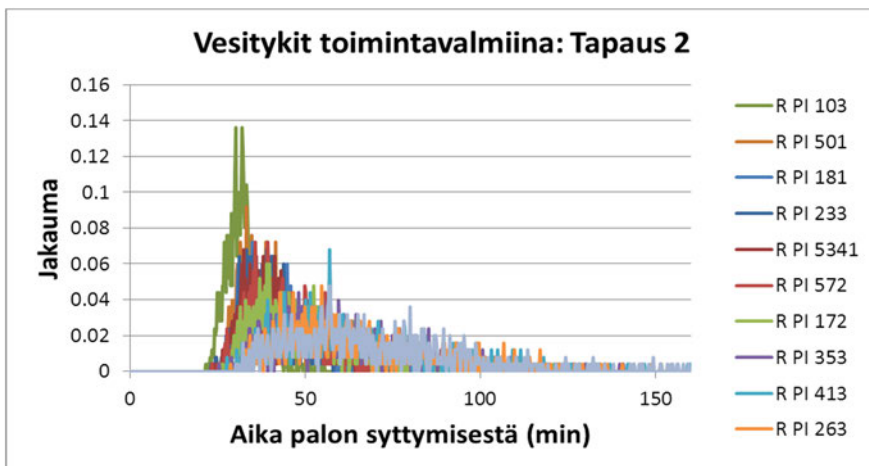
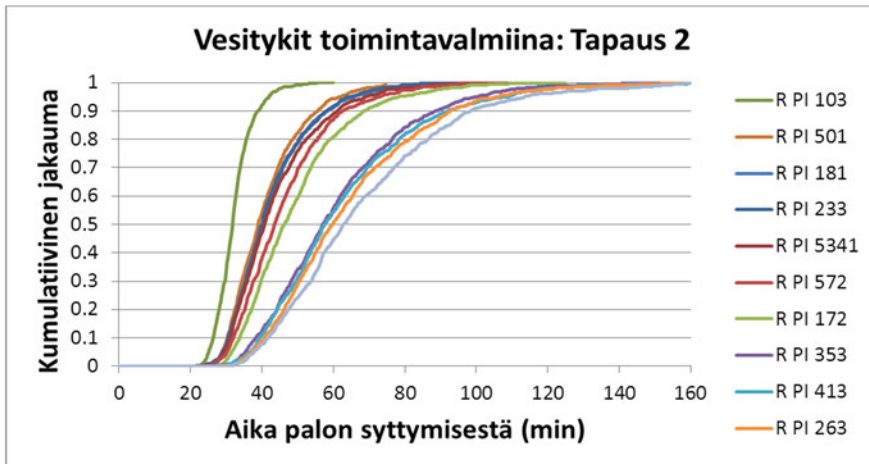


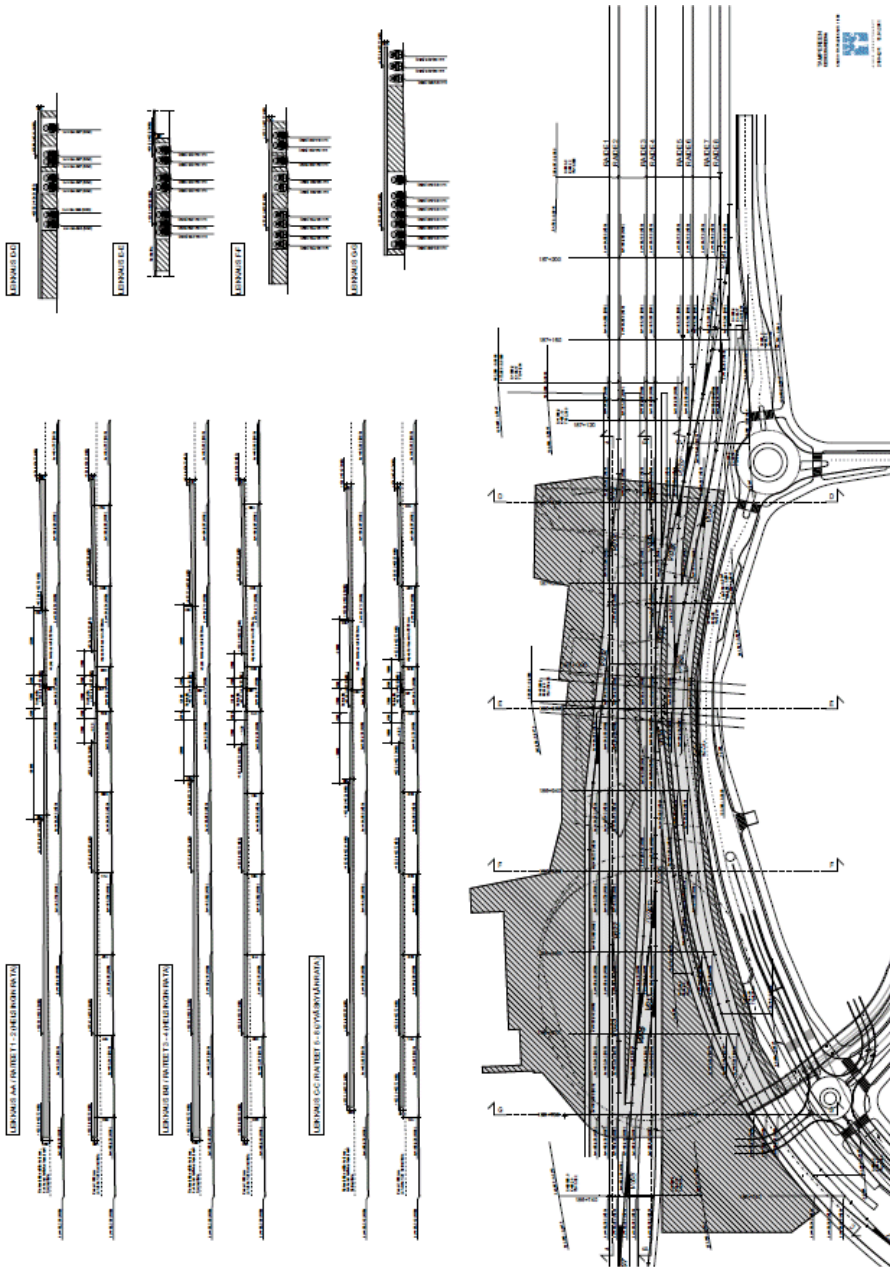
## Liite 4: Monte Carlo -simuloinnit, tapaus 2: Toimintavalmiusajat laajennetaan jakaumiksi













## Liite 5: Keskimääräisen toimintavalmiusajan muuntaminen jakaumaksi

Seuraavassa esimerkissä (ks. julkaisun lähdeviite [7]) kuvataan, miten Pelastuslaitoksen yksikkökohtainen keskimääräinen toimintavalmiusaika voidaan muuntaa jakaumaksi.

Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastoon (PRONTO) perustuvien kolmen suuren kaupungin (Helsinki, Turku, Tampere) toimintavalmiusajan analysointien (ks. julkaisun lähdeviite [19]) perusteella määritetään toimintavalmiusajan  $\Delta t_{TV}$  jakauma. Kun hyvin lyhyet (alle 2,5 min) ja hyvin pitkät (yli 25 min) toimintavalmiusajat jätetään analyysin ulkopuolelle, havaitaan, että toimintavalmiusaikaa voidaan kuvata 3-parametrisella gammajakaumalla, jonka tiheysfunktio on seuraava:

$$f(x) = \frac{(x - x_{\min})^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x - x_{\min}}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha}}, x \in [0, \infty], \beta > 0 \quad (1)$$

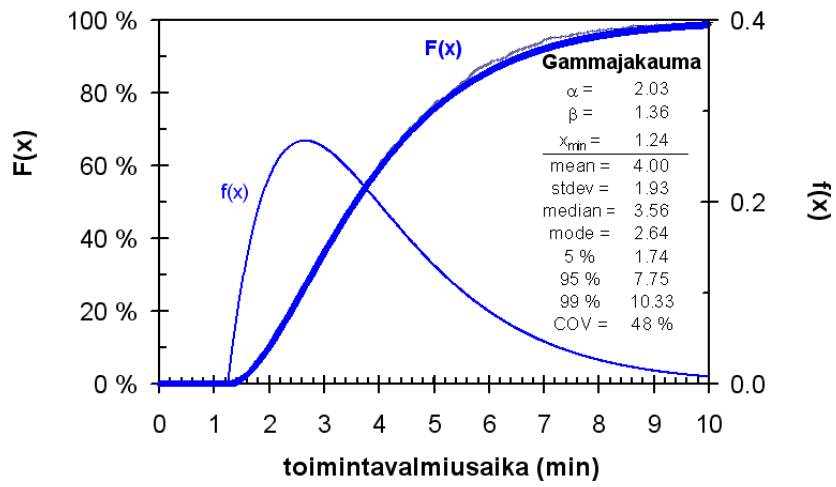
Jakauman parametrit ovat:  $\alpha=2,32$ ,  $\beta=2,05$  min ja  $x_{\min}= 2$  min. Jakauman tunnusluvut ovat: odotusarvo  $\mu_{TV} = 6,8$  min ja keskihajonta = 3,13 min.

Em. jakauma muunnetaan normitettuun muotoon määrittelemällä tekijä  $\theta_{TV} = \Delta t_{TV}/\mu_{TV}$  eli toimintavalmiusaika normitettuna sen odotusarvolla. Tämän jakauman parametrit ovat  $\alpha=2,82$ ,  $\beta=0,27$  min ja  $x_{\min}= 0,24$  min. Jakauman tunnusluvut ovat: keskiarvo  $\mu_{TV} = 1$  ja keskihajonta = 0,45.

Yksikkökohtainen keskimääräinen toimintavalmiusaika  $\Delta t_{TV,mean}$  muunnetaan jakaumaksi  $\Delta t_{FB}$  seuraavasti:

$$\Delta t_{FB} = \theta_{TV} \otimes \Delta t_{TV,mean} \quad (2)$$

missä symboli  $\otimes$  tarkoittaa jakaumaksi muuntamista. Oheisessa kuvassa esitetään jakauman muoto tilanteessa  $\Delta t_{TV,mean} = 4$  min (ks. julkaisun lähdeviite [7]):





Nimeke	<b>Pelastustoimen vasteen simulointi suurpalossa SIREENI-projektin tulokset</b>
Tekijä(t)	Simo Hostikka, Terhi Kling, Jukka Vaari, Tuomo Rinne & Johannes Ketola
Tiivistelmä	<p>SIREENI-projektissa kehitettiin uusia menetelmiä pelastustoiminnan ajallisen keston ja tehokkuuden arviointiin suurpalotilanteessa. Pelastustoiminnan ajallista kehitystä simuloitiin stokastisella operaatioaikamallilla, jossa kunkin toimijan tehtäviä mallinnetaan viiveillä sekä virheistä tai poikkeuksellisista olosuhteista johtuvilla lisäviiveillä. Malli ottaa huomioon eri toimijoiden väliset riippuvuudet, ja sen avulla voidaan simuloida koko pelastustoimintaan liittyvän toimijaverkoston yhteistoimintaa. Mallin parametreja, viiveitä, lisäviiveitä sekä lisäviiveiden toteutumisen todennäköisyyksiä käsitellään satunnaismuuttujina, joiden jakaumat määritetään kokeellisesti tai asiantuntija-arvioiden avulla. Simuloinnin tuloksena saadaan pelastustoimen resurssien kertymä ajan funktiona.</p> <p>Numeeristen palosimulointien avulla määritettiin vesitykkien tuottama jäähdytysteho vesitykkien määrän ja käyttötavan funktiona. Ensin määritettiin palavan kohteen läheisyydessä oleviin pintoihin kohdistuva lämpörasitus simuloimalla paloa ilman jäähdytystä. Vesitykin suihkulle luotiin virtauslaskentamalli ja mallin avulla simuloitiin lämpörasituksen muutosta erilaisilla vesitykkien lukumäärän ja suuntauksen yhdistelmillä. Lisäksi simuloitiin kiinteän sammutusjärjestelmän tuottamaa jäähdytysvaikutusta kahdella erilaisella suutintyyppillä ja erilaisilla vesi-vuon arvoilla.</p> <p>Tulokset osoittavat, että monimutkaisen toimijaverkoston suorittaman pelastustoiminnan määrällinen arviointi on erittäin vaikeaa, ellei mahdollista ottaa huomioon eri toimenpiteisiin ja vaiheisiin liittyvät epävarmuudet. Mallinnuksen hyödyt syntyvät kahdessa vaiheessa: Alkuvaiheessa määritellään toimijat, heidän roolinsa ja keskinäiset riippuvuudet. Tämä prosessi vähentää toimintaan liittyvää hämmennystä ja väärinkäsityksiä sekä auttaa toimijoita tunnistamaan omaan ja yhteistoimintaan liittyviä kehityskohteita. Simuloinnin tuloksena saatava hyöty taas liittyy pelastustoimen vaikuttavuuden mittaamiseen ja resursointiin sekä sovelluskohteen riskien arviointiin. Yhdistämällä operaatioajan ja jäähdytystehon simulointitulokset pystyttiin tuottamaan jäähdytystehon ajallinen kertymäfunktio sekä todennäköisyysjakaumat tietyn jäähdytystehon saavuttamiseen kuluvalle ajalle. Nämä ovat olennaisen tärkeitä tuloksia, kun halutaan arvioida pelastustoimen vaikuttavuutta suurpaloissa.</p> <p>Sovellusesimerkinä tarkasteltiin Tampereen rautatieaseman eteläpuolisen rata-alueen päälle rakennettavan kannen alapuolista säiliövaunupaloa. Esimerkkiin liittyvät yksityiskohdat valittiin siten, että ne palvelisivat mahdollisimman hyvin simulointimenetelmien kehitystä ja testausta.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7895-5 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> ) ISSN 2242-122X (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )
Julkaisu-aika	Marraskuu 2012
Kieli	Suomi
Sivumäärä	77 s. + liitt. 13 s.
Projektin nimi	SIREENI
Toimeksiantajat	Palosuojelurahasto, sisäasiainministeriö, Liikennevirasto, VTT, Pelastusopisto
Avainsanat	response time, emergency service, simulation, water cannon, FDS, Monte Carlo
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, Puh. 020 722 111

## Pelastustoimen vasteen simulointi suurpalossa SIREENI-projektin tulokset

SIREENI-projektissa kehitettiin uusia menetelmiä pelastustoiminnan ajallisen keston ja tehokkuuden arviointiin suurpalotilanteessa. Pelastustoiminnan ajallista kehitystä simuloitiin stokastisella operaatioaikamallilla, jossa kunkin toimijan tehtäviä mallinnetaan viiveillä sekä virheistä tai poikkeuksellisista olosuhteista johtuvilla lisäviiveillä. Malli ottaa huomioon eri toimijoiden väliset riippuvuudet, ja sen avulla voidaan simuloida koko pelastustoimintaan liittyvän toimijaverkoston yhteistoimintaa.

Numeeristen palosimulointien avulla määritettiin vesitykkien tuottama jäähdysteho vesitykkien määrän ja käyttötavan funktiona. Yhdistämällä operaatioajan ja jäähdystehon simulointitulokset pystyttiin tuottamaan jäähdystehon ajallinen kertymäfunktio sekä todennäköisyysjakaumat tietyn jäähdystehon saavuttamiseen kuluvalle ajalle. Nämä ovat olennaisen tärkeitä tuloksia, kun halutaan arvioida pelastustoimen vaikuttavuutta suurpaloissa.