

# Palotutkimuksen päivät 2021



**PALOTUTKIMUSRAADIN JÄRJESTÄMÄT  
PALOTUTKIMUKSEN PÄIVÄT VIRTUAALITAPAHTUMANA 7.–9.9.2021**



## Pommiuhka

yllätti pelastajat ja poliisin

Pelastustieto  
- alan seuratuin media

## Pelastustieto

ETUSIVU PELASTUSTOIMI PELASTUSTOIMINTA BLOGIT YHTEYSTIEDOT ILMOITTAJALLE



KIRJAAJUU PALVELUUN  
Pelastustiedon tilaukset voitavat  
tulla kaikissa palvelun sisäisissä.

KIRJAAJUU PALVELUUN

TILAA PELASTUSTIETO

TILAA UUTISKIRJE

TILAA IRTONUMERO

UUSIN LEHTI

## Pelastustieto



04/2021 9.6.2021

LEHTIARKISTO

SUOSITUT

OPERAATIVINEN TOIMINTA  
Pelastustiedon tilaukset voitavat  
tulla kaikissa palvelun sisäisissä.

OPERAATIVINEN TOIMINTA  
Kalajoen maastopalo on  
rauhottamassa pain-  
massiivisen palo vai-  
kuttavalla keuhko-  
sairauksella ja  
sopimuspalokuntien

KALUSTO  
Pelastustiedon tilaukset voitavat  
tulla kaikissa palvelun sisäisissä.

VARAUTUMINEN  
Pelastustiedon tilaukset voitavat  
tulla kaikissa palvelun sisäisissä.



# Pelastustieto

PELASTUSTOIMEN, ENSIHOIDON JA VARAUTUMISEN MEDIA

## Toimintakyky

säilynyt, turmeusväsymystä ei tunneta



PAUKKULIIVI

COMBILANSSI

PALOKUNTANUORTEN KOULUTUS  
on aksomia ja rentoa yhdessäoloa

# Pelastustieto

Palo- ja pelastusalan  
ammattiasiaa vuodesta 1950.  
Vahva myös verkossa.

## Lukemisen arvoinen tarjous!

Nyt teillä on mahdollisuus  
tilata Pelastustieto-lehti  
**erikoishintaan**

# 40 €/vsk\*

\* sisältää printti- ja verkkolehden

Tilauksen voi tehdä kätevästi osoitteeseen  
tilaukset@pelastustieto.fi, numeroon (03) 4246 5358  
tai osoitteessa [www.pelastustieto.fi](http://www.pelastustieto.fi).

Tarjouksemme on voimassa 30.9.2021 asti.

\* Tarjous koskee vain uusia tilauksia.

Tilaus jatkuu normaalina kestotilauksena.

■ Pelastustoimen, ensihoidon ja varautumisen media

# Pelastustieto

■ Palotutkimuksen päivien erikoisnumero

■ Julkaisija: Palo- ja pelastustieto ry.

■ Päätoimittaja: Esa Aalto • [esa.aalto@pelastustieto.fi](mailto:esa.aalto@pelastustieto.fi)  
Ratamestarinkatu 11, 00520 Helsinki • puh. 050 5620 735  
[www.pelastustieto.fi](http://www.pelastustieto.fi)

■ Ulkoasu ja taitto: Kimmo Kaisto • Kirjapaino: PunaMusta  
Kannen kuva: Karoliina Meurman

■ ISSN 0031-0476, Aikakauslehtien liiton jäsen

## RAKENNUSTEN JA ASUMISEN PALOTURVALLISUUS

- 4..... Palovarointien ikääntyminen | [Karoliina Meurman](#)
- 8..... Liesipalojen kokonaiskuva ja liesiturvallisuutta vaarantavat tekijät | [Jukka Lepistö](#)
- 13..... Litiumioniakkupalojen sammuttaminen akkupalosammuttimilla | [Karoliina Meurman](#)
- 18..... Pelastuslaitoksen varautuminen sähköautopaloihin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa | [Joonatan Suosalo](#)

## PALOTURVALLISUUSOSAAMINEN JA ASEENTEET

- 23..... Toistuvan käytännön harjoittelun merkitys organisaation toimijoiden paloturvallisuusosaamisessa, tarkastelussa opettajankoulutus | [Matti Waitinen](#)
- 28..... Suomalaisen turvallisuusmielipiteet pelastustoimen alalta – empiirinen tarkastelu | [Markku Haranne](#)

## PELASTUSTOIMEN KEHITTÄMINEN

- 34..... Pelastusviranomaisen ilmoitusvelvollisuus poliisille – mitä, miksi, miten ja milloin | [Päivi Mäkelä](#)
- 38..... Pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuus | [Tarja Ojala](#)
- 43..... Tilannekuvan muodostaminen: näkökulmia SURE-hankkeesta tehdystä teknologiakokeiluista | [Sari Mäenpää](#)

## PALOTURVALLISUUS MERELLÄ

- 48..... LASH FIRE: Reitti ro-ro-alusten parempaan paloturvallisuuteen | [Tuula Hakkarainen](#)
- 52..... Miten hallita ro-ro-tilojen aukkoihin liittyviä paloriskejä? | [Alexandra Tissari](#)

## MATERIAALIEN PALOTURVALLISUUS JA TYÖTURVALLISUUS

- 57..... Muovien kiertotalouden ja kierrätysmuovien paloturvallisuus | [Nikhil Verma](#)
- 63..... Pelastajan työvälineet ja suojarusteet metsäpaloissa | [Juha Laitinen](#)

## MALLINNUKSEEN, SIMULOINTIIN JA RISKIENHALLINTAAN

- 68..... Liekin leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä | [Alexandra Tissari](#)
- 72..... Kartiokalorimetrikokeen mallitus FDS-ohjelmalla | [Timo Korhonen](#)
- 77..... Maastopalojen leviämismallit ja jalostettu metsävaratieto osana pelastustoimen tilannekuvan muodostamista | [Kalle Kiviranta](#)
- 82..... Ennakoivan analytiikan hyödyntäminen riskianalyysityössä: tekoälymallien soveltaminen rakennuspalojen ennustamiseen pääkaupunkiseudulla | [Laura Kuurne](#)

## MODELING, SIMULATION, AND RISK MANAGEMENT – ARTICLES IN ENGLISH

- 87..... Coupled CFD-FE simulations of fire intervention in large structures | [Rahul Kallada Janardhan](#)
- 94..... FDS-simulation of two-dimensional heat transfer and pyrolysis processes | [Morteza Gholami Haghighi Fard](#)
- 100..... Multi-physics modelling of stone wool fire resistance test | [Deepak Paudel](#)
- 105..... Measuring the spectral properties of polymers and using them for flammability predictions | [Farid Alinejad](#)
- 109..... Optimizing the spectral based fire-detection strategy with high-fidelity radiation spectra | [Hadi Bordbar](#)
- 113..... Thermal Characterization of Electric Cooktops, [Tarique Jhatial](#)

## MITTAAMINEN JA ARVIOINTI

- 118..... Hoivalaitosten poistumisturvallisuuden tietoperusteisen arviointimenettelyn kehittäminen ToPo hankkeessa | [Heidi Huuskonen](#)
- 124..... Vuokratalojen paloturvallisuusinvestointien kustannushyödyt | [Kari Telaranta](#)

# Palovaroittimien ikääntyminen

## TIIVISTELMÄ

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes toteutti vuosina 2017–2020 kaksi hanketta, joissa tutkittiin palovaroittimien ikääntymiseen liittyviä muutoksia. Testeissä testattiin käytössä olleiden iältään 0–34 vuotta vanhojen palovaroittimien savuherkkyyttä palovaroittimia koskevan standardin määrittelemiä testipaloja mukaillen. Lisäksi mitattiin palovaroittimien äänenvoimakkuuksia. Tukesin hankkeita tukemaan Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK testasi vuonna 2020 vanhoja käyttämättömiä palovaroittimia keinosavulla testikammiossa. Hankkeiden tulokset tukevat palovaroittimien uusimistarvetta viimeistään valmistajan määrittelemänä ajankohtana. Tulokset alleviivasivat myös kunnossapidon merkitystä. Palovaroittimen toimintakunnon säännöllinen varmistaminen testinappia painamalla sekä pariston uusiminen ovat palovaroittimen toiminnan varmistamisen kannalta erittäin tärkeitä toimenpiteitä.

## PALVAROITTIMIEN VAATIMUKSET

Palovaroittimien teknisten ominaisuuksien tulee täyttää standardin *SFS-EN 14604 Palovaroittimet* vaatimukset. Standardi määrittelee muun muassa savuherkkyyksivaatimukset, jotka määritellään neljällä eri materiaalilla tehdyllä testipalolla. Palovaroittimen äänenvoimakkuuden on oltava vähintään 85 dB(A) mitattuna kolmen metrin etäisyydeltä. Standardin mukaan palovaroittimeen on kiinnitettävä mm. tietoa valmistajan suosittelemasta uusimisajankohdasta. Yleisesti palovaroittimen suositeltu käyttöikä on 5–10 vuotta. Palovaroittimen vaatimustenmukaisuudesta vastaa valmistaja, maahantuojaja ja myyjä. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) valvoo uusien myynissä olevien palovaroittimien vaatimustenmukaisuutta.

## PALVAROITTIMIEN IKÄÄNTYMISEEN LIITTYVÄT SYYT

Palovaroittimien ja -ilmaisimien maahantuojilta saatujen tietojen

mukaan ikääntymisen oleellimmat syyt ovat palovaroittimen ilmaisukammion ja elektronisten komponenttien likaantuminen sekä komponenttien vanheneminen. Palovaroittimiin kertyy ajan myötä mm. pölyä, hyönteisiä, nikotiinia ja rasvaa, mikä voi johtaa varoittimen tyypistä riippuen liialliseen herkkyyteen, herkkyyden alenemiseen tai toimimattomuuteen. Turhat ja aiheettomat hälytykset voivat johtaa ajan myötä siihen, että käyttäjä todennäköisemmin poistaa palovaroittimen käytöstä.

Elektroniset komponentit eivät toimi ikuisesti. Komponenttien vanhenemiseen vaikuttaa likaantumisen lisäksi myös se, kuinka paljon piiriä kuormitetaan. Optisissa palovaroittimissa olevassa LED-lähettimessä/vastaanottimessa ajan myötä tapahtuvat muutokset voivat muuttaa ja häiritä savun havaitsemista.

Verkkovirtaan kytketyt palovaroittimet altistuvat sähkömagneettisille häiriöille, jotka pitkän ajan saatossa lisäävät tiettyjen komponenttien vanhenemista.

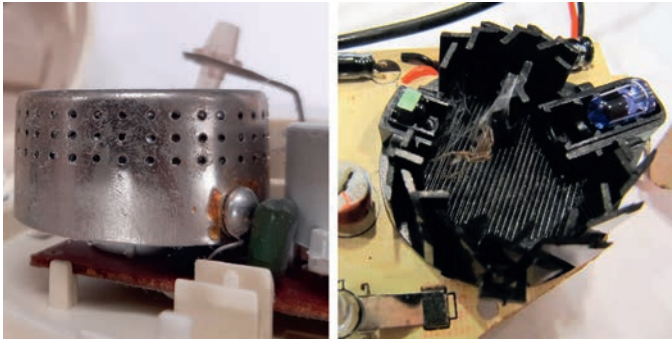
Palovaroittimien likaantumiseen vaikuttaa oleellisesti muun muassa olosuhteet, joissa palovaroitin on ollut. Yleisimmin suositeltua kymmenen vuoden uusimisväliä on pidetty perusteltuna uusimisvälinä ottaen huomioon kaikki palovaroittimen vanhenemiseen liittyvät seikat.

## SAVUHERKKYESTESTIT

### Savuherkkyytestit puulla ja polyuretaanilla

#### Testausjärjestelyt

Ikääntyneiden palovaroittimien savuherkkyyttä testattiin Pelastusopiston Paloteatterissa. Palovaroitinstandardi SFS-EN 14604 määrittelee neljä eri testipaloa, joissa poltettavasta materiaalista riippuen muodostuu vaaleaa tai tummaa savua. Standardin määrittelemät testipalot ovat kytevä puupalo, liekehtivät muovit (polyuretaani) -palo, hehkuva kytevä puuvillapalo sekä palava neste (n-heptaani) -palo. Ikääntymisselvitykseen valittiin puu- ja po-



Pölyä ionisoivassa palovaroittimessa ja hämähäkki optisen palovaroittimen ilmaisukammiossa.



Kytevät puukalikat liedellä.



Polyuretaanilevy juuri sytyttämisen jälkeen. Palovaroittimet näkyvät taustalla katossa.

lyuretaanipalo, koska ne edustavat sekä vaaleaa että tummaa savua ja koska asuinhuoneistoissa on todennäköisesti materiaaleja, jotka sisältävät puuta ja/tai muoviyhdisteitä. Koska ikääntymis selvitys -hanke ei ollut markkinavalvontahanke, savuherkkyyss testejä ei suoritettu standardin mukaisesti, vaan standardin vaatimuksia mukaillen. Hankkeiden loppuraportit löytyvät Tukesin internet-sivuilta.

Palovaroittimet testattiin kymmenen kappaleen erissä. Yhteensä kahdessa hankkeessa testattiin 157 palovaroitinta, joista 61 oli optisia ja 96 ionisoivia. Testatut palovaroittimet olivat iältään 0–34 vuotta. Molemmissa hankkeissa testeihin hankittiin myös yhteensä 12 kappaletta uusia palovaroittimia.



Testikammio ja tyyppillinen testitalanne



Kytevässä puupalossa mäntykalikat asetettiin liedien päälle ja levy käännettiin suurimmalle teholle. Levyn lämpötilaa mitattiin termoparilla. Puu alkoi kyteä ja savua näkyä, kun liedien lämpötila oli noin 150–160 °C. Mittaus lopetettiin, kun kaikki palovaroittimet olivat reagoineet savuun. Tila tuuletettiin ennen polyuretaanipaloa. Kaikkien testattujen palovaroittimien hälytys lakkasi, kun huonetilaa oli riittävästi puhdistunut savusta.

Polyuretaanipalossa polyuretaanilevy asetettiin hellan päällä olevalle alustalle. Levy sytytettiin polttimella kulmasta, ja palon annettiin kehittyä vapaasti. Mittaus lopetettiin, kun kaikki palovaroittimet olivat reagoineet savuun.

### Tulokset

Palovaroitinstandardin SFS-EN 14604 mukaisissa savuherkkyyss testeissä testattavien varoittimien tulee reagoida ennen kuin standardin määrittelemät testin loppuolosuhteet on saavutettu. Tulokseen vaikuttavat mm. savun tiheys, lämpötilan muutos ja aika. *Palovaroittimien ikääntymis selvitys* -hankkeessa ei tehty standardinmukaista arviota, vaan toimintaa arvioitiin hälytysajan ja iän suhteen.

Savunmuodostus riippui voimakkaasti poltettavasta materiaalista: Kytevässä puupalossa savunmuodostus oli hidasta ja savu myös levisi tilassa hitaasti. Polyuretaanipalossa savunmuodostus oli hyvin nopeaa ja savu levisi tilassa tasaisemmin ja nopeammin kuin puupalossa.

Molemmissa hankkeissa savuherkkyyss testien tulokset olivat samansuuntaiset: Kytevässä puupalossa reaktioajoissa oli suurta hajontaa molempien palovaroitintyyppien osalta, mikä on osittain selitettävissä hitaalla savunmuodostuksella ja epätasaisemmalla savun leviämällä. Sen sijaan polyuretaanipalossa optisten palovaroittimien reaktioajoissa oli paljon hajontaa, kun taas ionisoivat varoittimet vaikuttivat reagoivan polyuretaanipalossa tasalautaisesti. Reaktioajat hidastuivat hieman iän myötä, mikä voi olla selitettävissä likaantumisella.

### Savuherkkyyss testit testikammiossa

Vanhojen, myyntipakkauksissaan säilytettyjen, palovaroittimien toimintakuntoa testattiin SPEKissä vertaamalla niiden toimintaa standardinmukaisen paloilmalaitteen herkkyyteen.

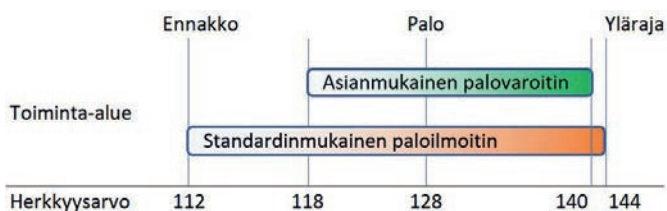
### Testausjärjestelyt

Ylemmän kammion kattoon sijoitetaan vierekkäin sekä testatta-

- va palovaroitin että herkkyyttä mittaava paloilmotimen ilmaisin. Tuuletin imee testisavua alempaan kammioon, josta se kulkeutuu rei'itetyn levyn läpi välitilaan ja siitä edelleen ylempään kammioon. Näin savun määrää pystytään lisäämään riittävän hitaasti ja se täyttää ylempään kammion tasaisesti. Paloilmotintestikeskukselta seurataan ilmaisimen herkkyytlukemaa, joka kasvaa savun määrän lisääntyessä ylempään kammiossa. Palovaroittimen hälyttäessä todetaan ilmaisimen herkkyytsarvo. Tämä on vakioitu ja toistettavissa oleva prosessi.

Asianmukaisesti toimiva palovaroitin hälyttää herkkyytsarvojen ollessa välillä 118–140. Palovaroittimen toimintakriteereiksi asetetut lukemat perustuvat testeissä käytettävän paloilmotimen jatkuvasti keräämään mittaustietoon eli herkkyytsarvoihin. Tämä paloilmotinstandardin mukainen laite antaa ennakoilmoituksen arvolla 112 ja paloilmotituksen arvolla 128. Keskuksen ilmoittamisen herkkyytsarvojen yläraja on 144. Näitä arvoja on sovellettu palovaroittimien toiminnan arviointiin alla olevan kuvan mukaisesti.

### Herkkyytsarvot



Testeissä käytettävä paloilmotintestikeskus on Autronica BS100. Asetetut mittaus- ja kynnyksisarvot on ilmoitettu laitevalmistajan toimitamissa laitteiston käyttöohjeissa.

Ennen vanhojen varoitinten testausta tehtiin vertailumittaukset kahdella uudella ionisaation perustuvalla Kidde i9040EU varoittimella. Näiden herkkyytsarvoiksi mitattiin 132.

### Tulokset

Ionisaatioon perustuvia palovaroittimia testattiin yhteensä viisikymmentä kappaletta. Vanhin oli vuodelta 1984, mutta koska osassa varoittimia ei ollut selkeitä merkintöjä, jäi niiden ikä selvittämättä. Valmistusvuosi löytyi hieman yli puolesta (27 kpl) varoittimesta. Suurin osa näistä varoittimista oli vuosilta 1994–1999.

Herkkyyksien tulokset on esitetty taulukossa 1. Vain viisi varoitinta läpäisi testin saaden hyväksyttävät herkkyytsarvot. Nämä on merkitty vihreällä värillä. Kaksitoista, keltaisella värillä merkittyä, varoitinta toimi normaalia herkemmin. Jopa pelkkä puhallus aiheutti yhdessä varoittimessa hälytyksen. Lopuilla kolmellakymmenelläkolmella herkkyytsarvo oli yli 144. Nämä on merkitty punaisella.

Lähes kaikki varoitimet lopettivat hälyttämisen sen alkuhetkestä 2–3 minuutin kuluttua. Näin tapahtui, vaikka testikammio oli täynnä savua. Ilmiön selitystä haettiin aluksi testistandardista. Se kuitenkin määrittelee äänenvoimakkuustestin toisen mittauksen suoritettavaksi 300 sekunnin (5 min) kohdalla. Kyse ei siis voinut olla siitä, että aikoinaan laitevalmistajat olisivat ”optimoineet” varoittimiensa toiminnan täyttämään ajallisesti vain standardin äänitestin vaatimukset.

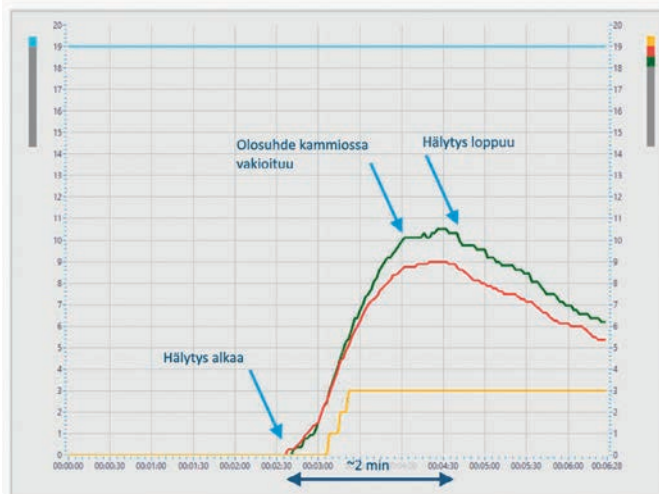
Vuoden 1992 paloilmotinjärjestelmiä käsittelevä tekninen suunnitteluohje tarjoaa yhden mahdollisen selityksen havaitulle ilmiölle. Siinä todetaan, että jos savua muodostuu hitaasti, on mahdollista, että ioni-ilmaisimien hälytys ei vaaka ”sopeutu” muutokseen. Tätä tulkintaa tukee Siemens Sinteso -paloilmotintestikeskus.

Merkki	OK 118-140	
	Testi 1	Testi 2
BRK	76	76
BRK	76	80
Joel Pause	76	72
Joel SOLO	88	92
BRK RACWIE	92	88
Dicon 300	92	92
IST MC121	92	92
Pohjola	104	96
Eyston	112	114
BRK 83REC	112	112
Turva 9-V	116	108
Eyston	128	116
Power	128	124
miniMAN 0905	128	124
Eyston	132	136
Eram SS700	132	128
Essi ss-750	136	132
Lieska SS770	140	144
Joel SA-900	144	144
Marelco	144	144
Joel Solo	144	144
FA9 (Pohjola)	144	144
FinAlert	144	144
Joel	144	144
Dicon Micro	144	144
FinAlert FA240	144	144

Merkki	OK 118-140	
	Testi 1	Testi 2
Warmax	144	144
Warmax	144	140
icas IIR	144	144
ICAS Standard	144	144
Joel Solo	144	132
Marelco	144	144
Novel DS101	144	144
Novel DS101	144	144
Eltech EE4701	144	144
Eltech EE4701	144	144
Novel DS101	144	144
Datatrak DT-950	144	144
ICAS Standard	144	144
Novel DS101	144	144
Firex Model C	144	144
ICAS Standard	144	144
Ales NB-2338	144	144
Ales NB-2338	144	144
Novel DS101	144	144
Ales NB-2318	144	144
Ales NB-2318	144	144
Ales NB-2318	144	144
Smoke Guard	144	144
City alarm	144	144

Herkkyyksimittauksen tulokset.

## SIEMENS



Savupitoisuuden muutos ja palovaroittimen toiminta testikammiossa.

tolla tuotetut graafiset kuvaajat testikammion savupitoisuuksista testien aikana. Kuvassa näkyy kuinka savupitoisuuden ylittäessä tietyn raja-arvon, alkaa palovaroitin hälyttämään. Kun vihreän viivan kuvaama savupitoisuus kammiossa nousee ensin hitaasti ja sitten vakiintuu lopettaa palovaroitin toimintansa. Ilmaisimien sopeutunut muuttuneisiin olosuhteisiin.

Tukesin ikääntyneiden palovaroittimien toimintaa selvittävässä hankkeissa ei ole koettu vastaavaa ilmiötä. Selityksenä voi olla se, että testit tehtiin Pelastusopiston Paloteatterissa, jossa testitilan mitat olivat 7,8 × 5,4 × 2,5 m (leveys × pituus × korkeus). Tilassa palovaroittimet asetettiin kattoon siten, että niiden etäisyys testipalosta oli noin kolme metriä. Olosuhteet ovat olleet toisenlaiset, koska savu on ollut lämmintä ja se on liikkunut tilassa virtausten mukana. Lisäksi Pelastusopistolla tehdyissä testeissä savunmuo-

dostus on jatkunut tilan tuuletukseen asti. Palovaroitinien havaitsemaa olosuhteiden vakioitumista ei ole päässyt tapahtumaan vastaavalla tavalla kuin pienessä testikammiossa.

## ÄÄNENVOIMAKKUUSTESTIT

### Testausjärjestelyt

Hankkeessa äänenvoimakkuustestejä ei tehty palovaroinstandardin SFS-EN 14604 määrittelemillä tavoilla ja olosuhteissa. Tuloksia ei siis voi verrata standardin vaatimuksiin. Erityisesti huoneita, jossa mittaukset tehtiin, poikkesi standardin vaatimuksesta, vaikka tilasta pyrittiin tekemään mahdollisimman kaiuton ääntä heijastamattomilla materiaaleilla.

Testit tehtiin Tukesin varastotiloissa. Taustamelu oli alle 35 dB, eli standardin vaatimus ympäristön melutasosta täyttyi. Palovaroitimissa käytettiin 9 V:n paristoja, joiden jännite oli paristoteserillä mitattuna hyvä ennen jokaista äänenvoimakkuusmittausta.

Palovaroin asetettiin vasten levyä, jonka etäisyys mikrofonista oli kolme metriä. Äänihälytys aktivoitiin painamalla testinapista 15–20 sekunnin ajan samalla liu'uttaen palovarointia hitaasti 10 cm:n matkan ylhäältä alas. Liu'uttaminen tehtiin, jotta tilan pinoista johtuvat mahdolliset heijastukset ja niiden summautumisen aiheuttamat äänenvoimakkuuden vaihtelut saataisiin mitattua kaikille varoitimille samalla lailla. Testattujen palovaroitinien keskikohta oli 1,2 metriä lattian yläpuolella. Lattialla oli vaimennusta. Äänenvoimakkuuden dB-arvot mitattiin kalibroidulla desibelimitarilla. A-painotettu äänenvoimakkuus mitattiin käyttäen nopeaa (fast) mittaustapaa. Mittari ilmoitti kunkin mittausjakson korkeimman arvon, joka kirjattiin ylös.

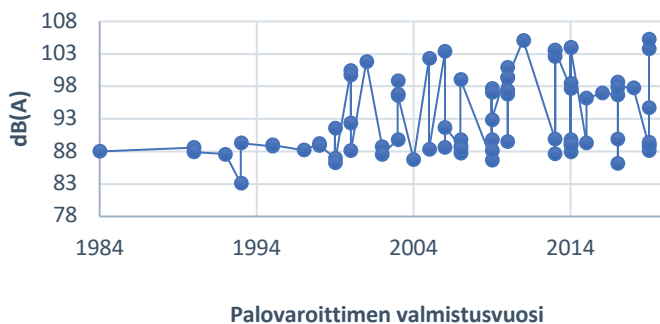
### Tulokset

Osa palovaroitimista oli jo ennen Tukesille toimittamista rikki, ettei mittauksia voitu lainkaan suorittaa. Kol-



Rikkoontunut  
pietsoelementti

## Äänenvoimakkuusmittaukset



Äänenvoimakkuusmittausten tulokset. Tiedoista on jätetty pois kaksi alinta tulosta.

messä palovaroitimessa oli testinappi rikki. Lisäksi joissain sumneri ei toiminut lainkaan tai hälytys jäi päälle, vaikka testinapista painaminen lopetettiin. Yhden toimimattoman palovaroitin syyksi paljastui rikkiönyt pietsoelementti. Kyseinen palovaroin oli valmistettu vuonna 2009. Toimimattomia tai jollain tavalla rikkiöntyneitä palovaroitinlajeja oli yhteensä 13 kappaletta.

Mittauksia tehtäessä oli selvästi havaittavissa, että dB-arvot heittelivät mittausjakson aikana, mikä saattoi johtua huoneen heijastuksista. Suurin osa dB-arvoista oli välillä 86–105 dB(A).

Kahden palovaroitin osalta ääni oli jo korvakuulollakin arviotuna huomattavasti alempi, ja tällöin mitatut arvot olivat 51 ja 75 dB(A). Molemmat varoitimet oli valmistettu vuonna 2005. Toinen varoitin oli varustettu 10 vuoden paristolla, ja sen jännite oli alentunut siten, että varoin antoi vikavaroitusta jännitteen alenemisesta. Mittaustulos saatiin yhteensä 81 palovaroitimesta.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Kytevässä puupalossa hitaan savunmuodostuksen ja savun epätasaisen leviämisen vuoksi tulokset heittelivät molemmilla palovarointityypeillä. Ionisoivilla palovaroitimilla oli havaittavissa savuherkkyydessä hienoista hidastumista iän myötä. Ionisoivat palovaroitimet reagoivat iästä huolimatta hieman nopeammin kuin optiset palovaroitimet. Polyuretaanipalossa ionisoivat reagoivat selvästi tasaisemmin ja keskimäärin nopeammin kuin optiset palovaroitimet. Reaktioaikojen hajonta oli ionisoivilla pienempi kuin optisilla. Samat havainnot tehtiin myös ensimmäisessä hankkeessa. Tukesin hankkeiden tulosten perusteella palovaroitinien ionisoivaa ilmaisutekniikkaa voidaan pitää paremmin iän tuomia muutoksia kestäväenä ja savuun reagoimista tasaisempaan.

Vain kymmenen prosenttia testikammiossa testatuista palovaroitimista, jotka eivät ole altistuneet merkittävästi ympäristökäytölle, toimi tarkoituksenmukaisella tavalla, kun palovaroin oli valmistettu ennen vuotta 2000. Testausten perusteella voidaan todeta, että palovaroitinien toimintavarmuus heikkenee iän myötä, vaikka ne säilytettäisiin käyttämättöminä. Palovaroitinien kymmenen vuoden vaihtoväliä voidaan pitää perusteltuna, ellei valmistaja ole määritellyt tuotteelleen lyhyempää käyttöikää. Vaihtoväli tulisi laskea palovaroitin valmistusajankohdasta.

Äänenvoimakkuusmittausten testijärjestelyistä johtuvien mittauseräpäätöksiä ei voi vetää tarkkoja johtopäätöksiä. Selkeää trendiä äänenvoimakkuuden alenemiseen iän funktiona ei löydetty. Huomattavaa kuitenkin on, että korkeita yli 100 dB(A):n arvoja ei mitattu lainkaan palovaroitimille, jotka olivat yli 20 vuotta vanhoja. Yli 20 vuotta vanhojen otanta oli kuitenkin pieni (alle 10 kpl).

Äänenvoimakkuusmittausten tulokset korostavat palovaroitinien säännöllisen kunnossapidon merkitystä, koska äänenvoimakkuuden osalta täysin toimimattomat ja huonoimmat palovaroitimet olivat selvästi havaittavissa testinappia painamalla ja täten myös havaittavissa, mikäli palovaroin testataan suosituksen mukaan vähintään kerran kuukaudessa (testinapista painamalla). Tutkimusten mukaan suurin osa aikuisista herää 75 dB(A):n äänen, joten hankkeessa havaitut matalimmat dB-arvot eivät riittäisi herättämään aikuista.

Tilastojen valossa suurin syy palovaroitinien toimimattomuuteen tulipaloissa on ihmisen toiminta, eli palovarointia ei ole, palovaroitimesta puuttuu paristo tai paristo ei toimi. Palovaroitinien toimintakunnon säännöllinen varmistaminen testinappia painamalla sekä pariston uusiminen ovat palovaroitinien toiminnan varmistamisen kannalta erittäin tärkeitä toimenpiteitä.

# Liesipalojen kokonaiskuva ja liesiturvallisuutta vaarantavat tekijät

## TIIVISTELMÄ

Valvomaton ruoan valmistus, lieden epätyypillinen käyttö ja liesiturvallisuutta parantavien laitteiden ja ratkaisujen puute aiheuttavat ennalta ehkäistävissä olevan riskin. Riskin vaikutus asumisturvallisuuteen korostuu talouksissa, joissa on ikääntyneitä ja toimintakyvyltään heikentyneitä asukkaita. Liesionnettomuuksia ei aina ilmoiteta hätäkeskukseen, jos koetaan, että noki- ja savuvahingot ovat itse puhdistettavissa. Näin ollen viralliset tilastot eivät kuvaa liesipalojen todellista vuosittaista määrää. Tutkimuksen tavoitteena on luoda kokonaiskuva liesiturvallisuutta vaarantavista tekijöistä, kuten erehdyksistä, unohduksista ja vaaratilanteen aiheuttaneista materiaaleista ja liesityypeistä. Kokonaiskuva muodostetaan käyttämällä PRONTO-tietoja vuosilta 2016–2020, Onnettomuustutkintakeskuksen raportteja vuosilta 1998–2020 sekä mediaseurannan tiedoilla. Kuvaa täydennetään kyselytutkimuksen tuloksilla. Kyselyssä selvitettiin liesiin liittyviä läheltä piti -tilanteita, itse sammutettuja ja pelastuslaitokselle ilmoitettuja paloja. Liesipalojen aiheuttajat, ensimmäisenä syttyneet materiaalit ja liesityypit olivat aineistoissa yhteneväiset. Keskeisinä syttymisyinä tulivat esille lieden päällä säilytetyt ylimääräiset tavarat sekä valvomaton ruoanlaitto. Vaaratilanteita sattui pääsääntöisesti valurauta- ja keraamisilla liesillä. Tapauksissa liesiturvalaitteiden käyttö oli erittäin vähäistä.

## JOHDANTO

Liesipalot ovat merkittävässä roolissa rakennuspalojen ja rakennuspalovaarojen aiheuttajina. Liesipalolla tarkoitetaan liedestä joko välittömästi tai välillisesti syttyvää tahatonta paloa, joka aiheuttaa savua ja voi johtaa liekkeihin ja myös laajempaan tulipaloon. Vuosittain ruuanlaitosta johtuvia palohälytyksiä tehdään noin tuhat [1; 2] ja liesipalot aiheuttavat merkittäviä taloudellisia vahinkoja, vammautumisia ja henkilömenetyksiä [3, s. 33–34]. Lisäksi liesipaloissa menehtyneiden määrä Suomessa on korkea verrattuna muihin Pohjoismaihin [4].

Lieden käytössä paloturvallisuus on pääsääntöisesti käyttäjän vastuulla ja valtaosassa tapauksia liesipalojen taustalla on käyttäjän virheellinen toiminta, valvomaton ruoan valmistus ja lieden epätyypillinen käyttö [3, 29; 5; 6]. Lieden päällä ja sen ympärillä säilytettävä syttyvä materiaali on myös yleinen vaaratilanteen aiheuttaja [5].

Liesiturvallisuuslaitteiden tärkeys liesipalojen ehkäisyssä on laajalti tunnustettu. Esimerkiksi ruotsalaisen tutkimuksen mukaan liesivahti voisi vähentää 75 prosenttia liesipalojen määrästä ja estää niihin liittyviä palokuolemia ja vammautumisia [7, s. 12, 15].

Kotimainen liesiturvallisuutta käsittelevä tutkimus osoittaa, että liesiturvatekniikan käyttö liesipalojen ehkäisemiseksi on vielä alihyödynnetty mahdollisuus [8]. Paloturvallisuuden osalta sosiaali- ja terveysministeriön koti- ja vapaa-ajan tapaturmien ehkäisyn ohjelman yhtenä keskeisenä tavoitteena on kehittää liesiturvallisuutta. Sitä pyritään parantamaan esimerkiksi turvallisten liesien ja liesiturvatekniikan avulla [9, s. 81–82, 85].

Keittiön vaaratilanteet koskevat kaikkia väestöryhmiä, mutta alentunut toimintakyky altistaa liesionnettomuuksille, heikentää reagoimismahdollisuutta ja alentaa poistumisturvallisuutta [10]. Liesiturvallisuuslaitteiden hyöty korostuu erityisesti kotona asuvilla, toimintakyvyltään heikentyneillä henkilöillä, mutta tiedon ja rahoituksen puute rajoittaa liesiturvallisuuslaitteiden saatavuutta [8; 11, s. 108]. Liesiturvallisuuden toteutumista ja laitteiden vaikutusta on myös haastavaa mitata, sillä liesiturvatekniikan käyttöä kotiloissa on vaikea seurata. Pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisyn toimintaohjelman yhtenä vaikuttavuustavoitteena on alentaa toimintarajoitteisten henkilöiden palokuolemien määrää [12]. Vaikka palokuolemat ovat viime vuosina olleet laskussa [13; 2, s. 28]), iäkkäiden määrä on kasvanut, jolloin toimintakyvyltään heikentyneiden ihmisten määrän voidaan ennakoida myös kasvavan. Tilastokeskuksen laskelmien mukaan yli 65-vuotiaiden henkilöiden osuus väestöstä kasvaa noin 13 prosenttia seuraavien 50 vuoden aikana [14].



Koti- ja vapaa-ajan tapaturmien ehkäisyn ohjelman [9] sekä pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisyn toimintaohjelman [15] toteutumisen seurannassa ja mittarina käytetään muun muassa pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustietokanta PRONTO:n, pelastuslaitosten ja onnettomuustutkinnan tietoja. Inhimillisten erehdysten aiheuttamia liesionnettomuuksia ei kuitenkaan aina välttämättä ilmoiteta hätäkeskukseen, joten on ilmeistä, että ruuanlaitosta syttyneiden palojen määrä ei kuvaa liesipalojen todellista vuosittaista määrää, palojen syttymismekanismien eikä liesityyppien jakaumaa. Liesipalojen vahingot ovat usein merkittävät, mutta on ilmeistä, että niiden riskit eivät ole riittävän näkyviä mediassa. Vähäinen mediahuomio heikentää niiden tunnistamista ja huomioon ottamista kansalaisten arjessa.

Liesiturvallisuuden tutkimustiedon lisäämiseksi Aalto-yliopisto [16], Pelastusopisto, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) ja Suomen Pelastusalan Keskusjärjestön (SPEK) käynnisti yhteishankkeena *Liesipalojen syttyminen, vaikutukset ja ehkäisy* -hankkeen. Tämä artikkeli kuvaa hankkeen työpaketin 1 havaintoja ja löydöksiä. Artikkelin tavoitteena on luoda kokonaiskuvaa liesiturvallisuutta vaarantavista tekijöistä, kuten erehdyksistä, unohduksista ja vaaratilanteen aiheuttaneista materiaaleista. Tutkimuksen avulla voidaan tunnistaa liesipaloihin johtavia riskitekijöitä ja lisätä tietoa arjen turvallisuuden kehittämiseksi.

## AINEISTOT JA MENETELMÄT

Tutkimuksessa on käytetty neljän tyyppisiä aineistoja: Pelastustoimen resurssi ja onnettomuustilasto PRONTO:n tietoja, Onnettomuustutkintakeskuksen rakennuspaloja koskevia tutkintaselostuksia, kyselytutkimuksen vastauksia ja mediaseurannan poimintoja. Käytetyt menetelmät on kuvattu kunkin aineiston yhteydessä.

### PRONTO-aineistot

Pelastustoimen PRONTO-tietokannasta kerättiin tietoja onnettomuuksista, joissa palo sai syttymisenergiansa sähköliedestä. Tarkoituksena oli, että kerätty tieto sisälsi tietoa vain liesipalo-onnettomuuksista. PRONTO-tietokantaan tehtiin jokaiselta vuodelta (2016–2020) kaksi poimintaa valmiin mallin mukaan. Tiedot kerättiin onnettomuuksista, joiden ensisijainen tyyppi oli joko rakennuspalo tai rakennuspalovaara. Tiedot poimittiin erikseen onnettomuustyypeittäin. Poiminnan jälkeen tiedot siirrettiin la-

**"Liesipalojen vahingot ovat usein merkittävät, mutta on ilmeistä, että niiden riskit eivät ole riittävän näkyviä mediassa. Vähäinen mediahuomio heikentää niiden tunnistamista ja huomioon ottamista kansalaisten arjessa."**

jittelua varten Excel-taulukkoon, jossa tiedot lajiteltiin useassa eri vaiheessa sarakkeiden tietojen perusteella.

Jokaisen lajittelun jälkeen voitiin osa onnettomuuksista poistaa, koska ne osoittautuvat muuksi kuin liesipaloiksi. Sarakkeiden tietoihin perustuvan lajittelun jälkeen jäljellä jäivät ne onnettomuudet, joissa energialähteenä oli sähkö ja/tai laitteena liesi. Näiden lisäksi mukana oli vielä iso määrä onnettomuuksia, joissa energialähdettä ja/tai laitetta ei ollut merkitty ollenkaan. Viimeksi mainittujen tapausten kohdalla tarkastettiin, mitä oli kirjattu sarakkeeseen "Kuvaus onnettomuustilanteen kehittymisestä". Jos edellä mainitun sarakkeen kirjauksesta tuli selvästi esille, että kyseessä oli liesipalo, niin onnettomuuden energialähteeksi lisättiin sähkö ja laitteeksi liesi tai uuni. Aineistossa liesipalojen kokonaismäärä vuosina 2016–2020 oli 3692, eli keskimäärin 738 liesipaloa vuodessa.

### Onnettomuustutkintakeskuksen tutkintaselostukset

Liesipalotutkimusta varten käytiin järjestelmällisesti läpi kaikki Onnettomuustutkintakeskuksen (OTKES) verkkosivulta löytyvät Muut onnettomuudet aihealueittain, Palot ja räjähdykset -luokan tutkintaselostukset. Aineisto analysoitiin joulu–tammikuussa 2020–2021. Analyysiajankohtana luettelossa oli yhteensä 35 tutkintaselostusta. Näistä 15 käsitteli asuinrakennusten paloja. Näistä neljässä tuli esiin asunnoissa syttyneitä liesipaloja. Kahdessa tutkintaselostuksessa [17; 18] oli tutkinnan ensisijaisena kohteena yksittäinen rakennuspalo, jossa palo oli lähtenyt asunnon liedestä. Kahdessa tutkintaselostuksessa [19; 20] oli arvioitu useita rakennuspaloja ja näiden palojen joukossa oli mukana kuusi lieden käyttöön liittyvää paloa.

Näiden lisäksi on yksittäisessä tutkinnassa mainittu kaksi liesipaloa sairaalaympäristössä. Tutkinnan yhteydessä oli palojen lisäksi tullut tietoon useita kuumen lieden aiheuttamia vaaratilanteita. [21] Yhteensä OTKESin aineistosta saatiin käyttöön kymmenen liesipalon tapaustiedot.

### Kyselytutkimus

Kyselytutkimuksella kerättiin tietoa liesipaloista ja niiden syttymismekanismeista, mukaan lukien vaara- ja läheltä piti -tilanteet ja itse sammutetut liesipalot, joista ei ole hätäkeskukseen soitetu. Vastaajia pyydettiin raportoimaan sekä omia kokemuksia että vaaratilanteita, joita on tapahtunut läheisille tai tullut vastaan esimerkiksi järjestö- tai hoivatyön tai muun työn kautta. Kysely koostui 24 kohdasta, jossa kysytään tarkentavia kysymyksiä palon syttymiseen vaikuttavista tekijöistä ja vaaratilanteen tai onnettomuuden seurauksista. Kysely oli avoinna 15.12.2020–15.1.2021, jona aikana kyselyyn vastasi 66 henkilöä. Alhaisen vastaajamäärän vuoksi kysely toistettiin 18.1.2021–13.4.2021, jona aikana kyselyyn vastasi 35 henkilöä. Koko aineisto sisälsi 101 vastausta. Aineisto analysoitiin huhtikuussa 2021. Aineisto analysoitiin käyttämällä suoria jakajia ja kuvaajia, sekä ristiintaulukointia.

### Mediaseuranta

Liesipalotutkimusta varten aineistoa kerättiin päivittäisessä mediaseurannassa esiin tulleista tulipaloja koskeneista uutisista. Mediaseuranta käsittää arkipäivisin, maanantaista perjantaihin yhteistyökumppanin [22] toimittaman uutisluettelon, joka perustuu uutisista useilla paloturvallisuutta käsittelevillä hakusanoilla tehtyyn seulontaan. Osumia haetaan sekä tiedotusvälineiden internet-sivuilta että sosiaalisesta mediasta. Liesipalojen mediaseuranta tehtiin 1.7.2020–31.12.2020 välisenä aikana (puoli vuotta). Tänä aikana mediaseurantaan tuli yhteensä 35 liesipaloihin viittaavaa osumaa. Näistä neljä oli liesituulettimen paloja, kaksi uunipaloa, yksi puulämmitteisen lieden ja yksi mikroalouunin käytöstä syt-

- ▶ tynyt palo, joten aineistosta saatiin 27 varsinaista liesipalotapausta. Määrä vastaisi 54 liesipaloa vuodessa.

## TULOKSET

### Liesipalojen määrä Suomessa

Pelastustoimen taskutilaston mukaan ruuanlaitosta syntyviä paloja tilastoidaan lähes tuhat vuodessa. Niiden määrässä on havaittavissa selkeä myönteinen kehitys (kuva 1).

Kyselytutkimuksen perusteella merkittävä osa liesipaloista tai vaaratilanteista ei päädy pelastuslaitoksen tietoon eikä PRONTO-tietoihin, sillä 75 prosenttia kyselyssä raportoiduista tapauksista ei ilmoitettu hätäkeskukseen. Näin ollen liesipalojen ja liesipalovaarojen todellinen vuosittainen luku on huomattavasti tilastoitua korkeampi.

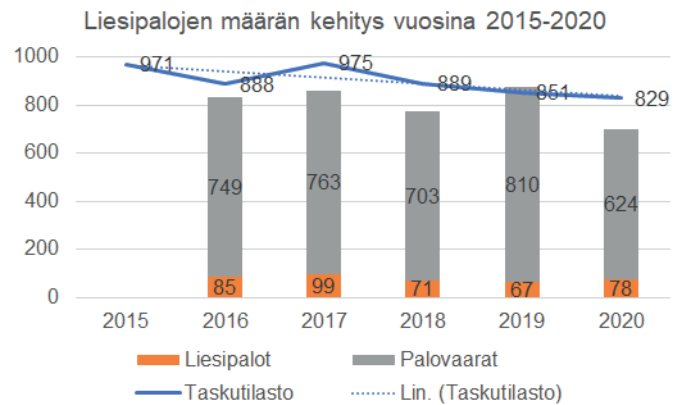
### LIESIPALOJEN AIHEUTTAJAT

PRONTO-aineistoissa 34 prosenttia liesipalojen aiheuttamista rakennuspaloista sai alkunsa ruoasta tai rasvasta, jolloin kyseessä on ollut joko valvomaton ruoanlaitto, unohtaminen tai vahinko ruoanlaiton yhteydessä. 39 prosenttia rakennuspaloista syntyi liedien päällä tai sen vieressä olleiden ylimääräisten tavaroiden syttymisen seurauksena ja 27 prosentissa tapauksista syttynyttä materiaalia ei joko tunnustettu tai kirjattu ylös. Rakennuspaloissa ruoanlaittilanteesta lähtöisin olevat palot olivat yleisimpiä (52 %). Tosin jakaumassa tulee ottaa huomioon, että rakennuspaloissa liesipalon aiheuttaneet tekijät ovat helpommin tutkittavissa, rakennuspaloissa ne voivat olla mahdottomia todentaa.

Onnettomuustutkimuskeskuksen erillisinä tutkimista asuntopaloista oli syttymissyynä liedien tahaton päälle kytkeytyminen liedien ääressä istumisen ja tupakoinnin seurauksena, sekä ruoanlaiton seurauksena kuumen lieden päällä tai lähellä olleen palavan materiaalin, sähkölaitteen, muoviasiain tai muun palavan materiaalin syttyminen [18, s. 14; 17, s. 11]. Molemmissa tapauksissa palo levisi liedeltä asuntoon, ja palot johtivat vakaviin henkilövahinkoihin sekä merkittäviin aineellisiin vahinkoihin. Myös muissa tapauksissa oli liedellä tai sen läheisyydessä ylimääräistä tavaraa, joka kuumentui ja syttyi palamaan. Sairaalaympäristössä syttyneissä liesipaloissa oli kyse liedien tahattomasta päälle kytkeytymisestä liedien ohi kulkemisen yhteydessä. Tilanteissa syttymisen aiheutti lieden päällä tai lähellä ollut palava materiaali [21, s. 52, 54].

Kyselytutkimuksen vastauksissa nousi esille useita tapauksia, joissa väärä levy on laitettu epähuomiossa päälle ja lieden päällä, tai sen vieressä, on ollut ylimääräistä tavaraa. Myös ruoanlaiton yhteydessä lieden vierellä olleita tavaroita on syttynyt palamaan. Muutamissa tapauksissa lemmikki on aiheuttanut vaaratilanteen kytkemällä lieden päälle asukkaan ollessa pois kotoa. Useissa tapauksissa ruoanlaiton aikana on poistettu keittiöstä ja unohtettu liedellä paistuvat ruuat. Osa unohtamisen aiheuttamista tapauksista sattui, kun käytössä on ollut keraaminen tai valurautaliesi ja keittiöstä on poistettu siksi aikaa kun liesi kuumenee. Poistumisen seurauksena asukas on joko unohtanut ruoanlaiton tai jättänyt väärän levyn päälle ja havahtunut savuun, kun väärän levyn päällä säilytetyt tavarat ovat alkaneet käryä. Kyselytutkimuksen havainnot ovat yhteneväiset mediaseurannassa tehtyjen havaintojen kanssa.

Kaikista kyselyyn vastanneista yli puolella (53 %) oli käytössä perinteinen valurautaliesi, neljänneksellä (25 %) keraaminen liesi ja lopuilla induktioliesi tai kaasuliesi, kun onnettomuus tapahtui. Myös Onnettomuustutkimuskeskuksen tutkimissa paloissa liesipaloille tyypillistä oli valurautalieden käyttö, pääsääntöisesti ilman



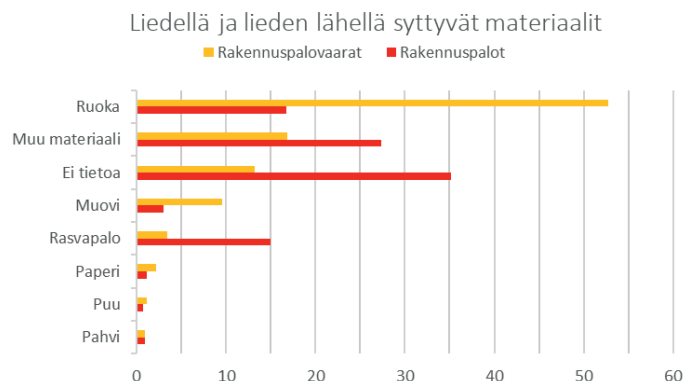
Kuva 1. Liesipalojen määrän kehitys vuosina 2015–2020. Ruoanlaitosta syntyneet palot Pelastusopiston Taskutilaston mukaan [1; 2], sekä erillisessä PRONTO-haussa kerätyt sähkölieden käytön yhteydessä todetut liesipalot ja liesipalovaarat.

erillistä liesiturvatekniikkaa. Kyselytutkimuksessa suurimmalla osalla (89 %) ei ollut käytössä liesiturvatekniikkaa.

### MIKÄ SYTTYY?

PRONTO:n aineistojen perusteella, ruoka aiheuttaa suurimman osan rakennuspaloista, kun taas rakennuspaloiksi yltäneissä onnettomuuksissa ruoka on tietyvästi toiseksi yleisin aiheuttaja (kuva 2). Yli neljäsosassa (27 %) liesipalojen aiheuttamisessa rakennuspaloissa syttynyttä materiaalia ei ole joko mainittu tai pystytty todentamaan. Rasvapalot ovat lähes yhtä usein rakennuspalojen aiheuttajina kuin ruoka, kun taas rakennuspaloissa muoviasiain ja -rasiat aiheuttavat useammin vaaratilanteen kuin rasva. Rasvapalot tarkoittavat tässä yhteydessä paloja, jotka ovat lähtöisin rasvan käytöstä uppopaistamisessa. Tulosten perusteella rasvan aiheuttamat vaaratilanteet johtavat useammin rakennuspaloon, rakennuspaloissa rasva syttynään materiaalina on suhteessa muihin materiaaleihin vähäinen. Toiseksi yleisin syttävä materiaali, joka johtaa rakennuspaloon on ”muu materiaali”, joista yleisimpiä ovat kahvinkeitin, patalappu, patakinnas ja yhdistelmä sekalaisia tavaroita.

Kyselytutkimuksessa talouspaperirulla on ollut yleisimmin syttävä materiaali liesipalotilanteessa (8 kpl). Useissa tapauksista paperi on saatu sammutettua nopeasti ja tilanne ei ole johtanut laajempaan paloon, eikä siitä ole ilmoitettu hätäkeskukseen. Toisek-



Kuva 2. Liesipaloissa ensimmäisenä syttynyt materiaali PRONTO-tietojen perusteella vuosina 2016–2020.

si yleisin oli ruoka (5 kpl) ja muoviasia (4 kpl). Tekstiileistä lieden käyttäjän syttyminen tuli esiin vain Onnettomuustutkimuskeskuksen aineistossa: Kahdessa tapauksessa palokuoleman syynä oli asukkaan päällä olleiden vaatteiden syttyminen heidän kosketuttuaan kuumaa liettä. Toisessa tapauksessa oli kyseessä kaasuliesi, toisessa sähköliesi. [20, s. 50; 19, s. 93–96].

Puolen vuoden mediaseurannassa ensimmäisenä syttyneitä materiaaleja olivat kattilassa tai paistinpannalla ollut rasva (9 kpl), ruoka (3 kpl), liedellä palavaa materiaalia, kuten muoviasia, muovia tai solumuovia (3 kpl), tekstiilituote (1 kpl), muuta palavaa materiaalia (4 kpl) tai esimerkiksi reppu (1 kpl). Syttynyttä materiaalia ei ole uutisissa mainittu järjestelmällisesti, vaan maininnat ovat sattumanvaraisia. Tapausten joukossa oli myös yksittäisiä paloja, joissa kuuma levy kuumensi liettä ja edelleen viereisiä kaapistoja aiheuttaen syttymän.

## TOIMINTAKYVYN VAIKUTUS LIESIONNETTOMUUKSIIN

Kyselytutkimuksessa 42 prosenttia onnettomuuksista sattui henkilöille, jolla oli jokin toimintakykyyn vaikuttava tekijä, kuten iän, muistisairaudesta, vamman, päihde- tai mielenterveysongelman aiheuttama toimintakyvyn lasku. Tapahtumien kuvausten perusteella tuetun asumisen yksiköissä on tavanomaista, että ruoan valmistuksessa sattuu sekä läheltä piti tilanteita että onnettomuuksia.

*”Asumispalveluyksikössä useita läheltä piti tilanteita. Tavallisin on, kun asukas päihtyneenä nukahtaa tai unohtaa tekevänsä ruokaa. Makkaroita lämmitetään levyllä muovipakkauksessaan, perunoita keitetään niin kauan, että hiiltyvät kattilaan, kanaa kypsytetään uunissa hiiltymiseen asti tai unohtetaan laittaa levyllä yhtään mitään. Yleensä lieden päällä on runsaasti muoviasioita, pakkausmuovia, mainoksia, kuivuneita ruuan tähteitä ja muuta säliää. Onneksi palovaroitimet ovat toimineet.”*

Kyselyn vastausten perusteella vahinkoja sattui useammin tilanteissa, joissa liesi oli päällä tarkoituksella tai se oli kytketty päälle vahingossa (kuva 3). Toimintakyvyltään heikentyneillä henkilöillä vahinko sattui toimintakykyisiä useammin tilanteissa, jossa liesi oli tarkoituksella päällä tai liesi oli unohtunut päälle. Toimintakykyisillä tilanteita, joissa liesi oli kytketty päälle vahingossa tai liedessä oli tekninen vika sattui useammin verrattuna toimintarajoitteisiin.

**Liesityypeistä perinteinen valurautaliesi oli huomattavasti yleisempi tapauksissa, joissa asukkaalla oli jokin toimintarajoittava tekijä.** 75 prosentilla toimintarajoitteisista oli käytössä valurautaliesi, kun toimintakykyisillä vastaava osuus oli vain 38 prosenttia. Induktioliedet olivat myös yleisempiä toimintakykyisillä henkilöillä (11 %:n erotus toimintarajoitteisiin). Liesiturvatekniikka oli hieman yleisempää henkilöillä, joilla ei ollut toimintakykyä alentavia tekijöitä (5 %:n erotus). Tapahtumien seuraukse-

na liesi vaihdettiin turvallisempaan useammin talouksissa, joissa henkilöillä ei ollut toimintakykyä alentavia tekijöitä (10 %:n erotus). Toimintarajoitteisten henkilöiden kohdalla vastaava tapaus tai muu vaaratilanne on toistunut tapahtuman jälkeen useammin verrattaessa toimintakykyisiin (11 %:n erotus).

## YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Havainnot liesipalojen aiheuttajista ja ensimmäisenä syttyneistä materiaaleista olivat yhtenevät kaikissa käytetyissä aineistoissa. Valvomaton ruoanlaitto ja ylimääräinen tavara liedellä ja sen lähistöllä korostuivat. Havainnot ovat myös yhtenevät aiemman tutkimuksen kanssa, jossa on havaittu, että kolmasosa liesipaloista johtuu liesien päällä tai sen lähellä on säilytetyistä syttymisalttiista tavaroista [5]. Valvomaton ruoanlaitto on myös havaittu olevan keskeinen vaaran aiheuttaja ja sen on todettu aiheuttavan jopa kaksi kolmasosaa liesipaloista [5]. Valvomattoman ruoanlaiton aiheuttamat liesipalot ovat myös tutkitusti tuhoisampia seurausiltaan [6].

Tutkimukseen käytetyissä aineistoissa liesipalossa ollut liesityyppi oli pääsääntöisesti perinteinen valurautaliesi tai keraaminen liesi, jotka ovat myös aiemmassa tutkimuksessa olleet yhdistävänä tekijänä liesipaloissa [5]. Valurautaliesi on tyypillinen erityisesti vuokra-asunnoissa. Vuokra-asuntojen turvallisuutta käsittelevässä tutkimuksessa todettiin, että lähes kaikissa ARA-vuokra-asunnoissa oli käytössä valurautaliesi. Liesiturvatekniikkaa näissä ei pääsääntöisesti ollut käytössä. [23]

Onnettomuustutkimuskeskuksen aineistoissa liesipalojen yhtenä toistuvana riskitekijänä oli asukkaan heikentynyt toimintakyky. Koska osa liesipaloista kytkeytyy asukkaan toimintakyvyn heikentymiseen, tulisi liesiturvallisuus varmistaa teknisesti, ei pelkästään käyttäjän huolellisuutta painottamalla. Lieteen tulisi sisältyä sellaisia teknisiä ratkaisuja, että käyttäjän toimintakyvyn heikentyminen tai erheet eivät voisi johtaa henkilövahinkoihin. Teknisten ratkaisujen tulisi estää palot. Lisäksi pitää kiinnittää huolta turvatekniikan kunnossapitoon, jotta mahdolliset vikaantumiset saadaan estettyä tai korjattua mahdollisimman nopeasti.

Aineistoissa yhteneväisesti suurimmassa osassa vaaratilanteista ei ole ollut käytössä liesiturvatekniikkaa. Myös aiemmassa tutkimuksessa on havaittu, ettei liesiturvatekniikan käyttö ole riittävällä tasolla [8]. Sosioekonomisesti heikommassa asemassa olevilla henkilöillä ei välttämättä ole varaa sijoittaa liesiturvatekniikkaan, kuten turvalieteen tai liesivahtiin [8]. Kuitenkin erityisesti toimintarajoitteisten henkilöiden talouksissa liesiturvatekniikan hankinta on kustannus-hyötyanalyysin perusteella kannattavaa [23].

Pelastusopiston tutkimuksen mukaan kahdella kolmesta palokuolleista henkilöistä toimintakyky oli alentunut päihteiden käy-



Kuva 3. Kyselytutkimuksessa kartoitetun vaara- ja läheltä piti tilanteiden lähtöasetelma (n=101).

► tön seurauksena [24]. Avun tarpeen tunnistaminen ja tilanteeseen puuttuminen on tärkeää, varsinkin jos henkilölle, jolla on toimintakykyä alentavia tekijöitä sattuu vaara- ja läheltä piti -tilanteita. Jos tilanteeseen puututaan ajoissa, voidaan säästyä mitavilta omaisuus ja henkilövahingoilta. Kyselytutkimuksessa yksi huolta herättävä yhdistävä tekijä oli, että vaaratilanteiden jälkeen ei liesiturvallisuutta parannettu, ja samankaltaiset tilanteet toistuivat uudestaan. Jos asukas ei ole itse kykenevä huolehtimaan liesiturvallisuudesta, tulisi asunnon omistajan vastuulla olla liesilaitteistojen soveltuvuuden arviointi huoneiston käyttötarkoitukseen. Jos asunnon omistaja ei ole siihen kykenevä, tulisi asukkaasta tehdä huoli-ilmoitus.

Toialta tulisi kiinnittää huomio tiedottamiseen. Merkittävää osaa liesipalovaaroista ei ilmoiteta hätäkeskukseen, eivätkä ne siten näy tilastoissa, mutta myös uutisoitujen liesipalojen ja -palovaarojen määrä on selvästi alempi kuin tilastoitujen. Vaikka uutisoinnin niukkuuden taustalla voi olla asukkaan terveydentilaan tai yksityisyyteen liittyviä tekijöitä, liesipaloista tulisi uutisoida. Ongelman paitsioon jääminen on ilmiön laajuuden tunnistamisen este, mutta myös merkittävä onnettomuuksista oppimisen este.

## KIITOKSET

Tutkimus on tehty osana *Liesipalojen syttyminen, vaikutukset ja ehkäisy* -hanketta, joka on Palosuojelurahaston rahoittama. Haluamme kiittää hankkeen työryhmää Aalto-yliopistolta, Pelastusopistolta, Turvallisuus- ja kemikaalivirastolta sekä Suomen Pelastusalan Keskusjärjestöltä. Kiitos kaikille kyselyyn vastanneille ja PRONTO-tietoja täyttäneille pelastustoimen henkilökunnalle.

## LÄHDELUETTELO

1. Ketola, J. & Kokki, E. (2019). Pelastustoimen taskutilasto 2009–2013. Pelastusopisto, Kuopio. [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_D/D1\\_2014.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D1_2014.pdf) [1.12.2020.]
2. Ketola, J. & Kokki, E. (2019). Pelastustoimen taskutilasto 2014–2018. Pelastusopisto, Kuopio. [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_D/D1\\_2019.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D1_2019.pdf) [1.12.2020.]
3. Nurmi, V.-P. & Nenonen, A. & Sjöholm, K. (2005). Sähköpalot Suomessa. Tukes-julkaisu 2/2005. Turvatekniikan keskus, Helsinki.
4. NFS (2021). Fatal fires by cause of fire 2010–2019. Nordic Fire Statistic -verkkosivu.
5. Kouki, T. (2019). Asuinrakennuspalot ja keittiöpalot. Pelastuslaitosten palontutinnan vuosina 2016–2018 suorittamien valtakunnallisten teematutkimusten yhteinen loppuraportti. Palontutkinta 2020 -työryhmä. Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto.
6. Hu ym. 2021 Hu, Y., Chen, J., Wang, Z., Lee, K. Y., Bundy, M. F., Hamins, A. P., & Fernandez, M. G. (2021). The Character of Residential Cooktop Fires. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
7. Runefors, M. & Frantzich, H. (2017, 12, 15). Nyttöanalys av spisvakt och portabelt sprinklersystem vid bostadsbränder. Rapport 3210. Lund University, Department of Fire Safety Engineering.
8. Ojala, T. (2021). Turvatekniikka ja liesipalojen ehkäisy. Pelastus- ja turvallisuustutkimuksen vuosikirja 2021. Pelastusopisto.
9. Korpilahti, U. & Koivula, R. & Doupi, P. & Jakoaho, V. & Lillsunde, P. (2020). Turvallisuutta kaiken ikää – Koti- ja vapaa-ajan tapaturmien ehkäisyn tavoiteohjelma vuosille 2021–2030. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön julkaisuja 2020:33. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162537>

10. Ojala, T. (2017). Iäkkäiden ja muistisairaiden arjen turvallisuus. OTE – Osallistava Turvallisuus Erityisryhmille. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö. [https://issuu.com/spek\\_ry/docs/spek\\_tutki\\_18](https://issuu.com/spek_ry/docs/spek_tutki_18) [5.5.2021]

11. Månsson, I. & Hurnasti, T. & Topo, P. (2008). Apuvälineet ja dementia Pohjoismaissa: Muistia ja muita kognitiivisia toimintoja tukevat apuvälineet dementoituvan ihmisen arjessa: haastattelututkimus Suomesta, Islannista, Norjasta, Ruotsista ja Tanskasta. Stakes. <https://www.julkari.fi/handle/10024/75229> [5.5.2021]

12. Lepistö, J. & Heliskoski, J. (2019). Turvallinen ja onnettomuuksista vapaa arki: Pelastustoimen toimintaohjelma onnettomuuksien ehkäisemiseksi. Sisäministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161956>

13. Kokki, E. (2014). Palokuolemat vähentyneet. Tutkimusraportti 2/2014. Pelastusopisto, Kuopio. [https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2016/12/52749\\_B2\\_2014.pdf](https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2016/12/52749_B2_2014.pdf)

14. Tilastokeskus (2019). Väestöennuste. [https://www.stat.fi/til/vaenn/2019/vaenn\\_2019-09-30\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/vaenn/2019/vaenn_2019-09-30_tie_001_fi.html) [5.5.2021]

15. Joentakanen, J. & Lepistö, J. & Heliskoski, J. (2019). Pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisyn toimintaohjelman laadintahankkeen hankeraportti. Sisäministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161959>. [5.5.2021.]

16. Aalto-yliopisto (2020). Liesipalojen syttyminen, vaikutukset ja ehkäisy. Lue hankkeesta lisää: <https://www.spek.fi/liesiturvallisuus>

17. Onnettomuustutkintakeskus (2014). Puisen pienkerrostalon palo Turussa 4.11.2014. Tutkintaselostus Y2014-03. Onnettomuustutkintakeskus. [https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2014/DIQmXVdxn/Y2014-03\\_Turku.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2014/DIQmXVdxn/Y2014-03_Turku.pdf)

18. Onnettomuustutkintakeskus (2016). Kahden lapsen kuolemaan johtanut rivitalopalo Raahessa 13.9.2016. Tutkintaselostus Y2016-03. Onnettomuustutkintakeskus. [https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2016/YXWTDThLb/Y2016-03\\_Raahe.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2016/YXWTDThLb/Y2016-03_Raahe.pdf)

19. Onnettomuustutkintakeskus (2001). Seitsemäntoista tulipaloa tai palonalkua vanhusten palvelutaloissa ja vastaavissa 1.12.1999-28.2.2000. Tutkintaselostus A 2/1999Y. Onnettomuustutkintakeskus. [https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/1999/a21999y\\_tutkintaselostus\\_1/a21999y\\_tutkintaselostus\\_1.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/1999/a21999y_tutkintaselostus_1/a21999y_tutkintaselostus_1.pdf)

20. Onnettomuustutkintakeskus (2003). Asumiskäytössä olleen koulurakennuksen palo Jyväskylän maalaiskunnassa ja viisi muuta paloa 20.4.–20.5.2003. Tutkintaselostus D1/2003/Y. Onnettomuustutkintakeskus. [https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/d12003y\\_tutkintaselostus/d12003y\\_tutkintaselostus.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/d12003y_tutkintaselostus/d12003y_tutkintaselostus.pdf)

21. Onnettomuustutkintakeskus (2007). Tulipalo Pitkäniemen sairaalassa Nokialla 25.1.2007 ja katsaus eräisiin muihin hoito- ja huoltolaitospaloihin. Tutkintaselostus B1/2007Y. [https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2007/b12007y\\_tutkintaselostus/b12007y\\_tutkintaselostus.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2007/b12007y_tutkintaselostus/b12007y_tutkintaselostus.pdf)

22. Mediaseuranta 1.7.2020–31.12.2020. Meltwater / Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö.

23. Laine, T., Telaranta, K., Lehto, L., Leino, I. & Pouta, J. (2021). Vuokratalojen turvallisuuden parantaminen teknisillä ratkaisuin – Vaihtoehtojen kustannushyödyt. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö ja Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA.

24. Kokki, Esa & Jäntti, Jarkko (2009). Vakavia henkilövahinkoja aiheuttaneet tulipalot 2007–2008. Pelastusopisto. B-sarja: Tutkimusraportti 2/2009. [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_B/B2\\_2009.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B2_2009.pdf)

# Litiumioniakkupalon sammuttaminen akkupalosammuttimilla

## TIIVISTELMÄ

Tukesin ja Pelastusopiston hankkeessa vertailtiin sekä erilaisten sammutusmenetelmien tehokkuutta litiumioniakkupalon sammuttamiseen että eri menetelmien aiheuttamia päästöjä. Samalla arvioitiin sammutusmenetelmien aiheuttamia käyttöturvallisuusriskejä ja käyttökelpoisuutta alkusammutuksessa. Sammutusmenetelminä käytettiin kolmea erimerkkistä akkupaloon markkinoitavaa käsisammutinta sekä vaahtosammutinta, vesiruiskua ja vesiupotusta. Mikään testissä ollut sammutin tai vesiruiskusammutus ei pystynyt sammuttamaan akkupaloa välittömästi. Sammutusteholtaan parhaimmaksi osoittautui upotusmenetelmä. Myös päästöt olivat pienimmät upotusmenetelmää käytettäessä. Mitä nopeammin upotus tehtiin kennojen syttymisen jälkeen, sitä vähemmän päästöjä syntyi. Upotusmenetelmän käyttö palavan akun sammuttamiseen voi kuitenkin olla vaarallista erityisesti suojautumattomalle sammuttajalle.

## HANKKEEN TAUSTA JA TAVOITTEET

Litiumioniakkujen määrä kulutuselektronikassa, kulkuneuvojen energialähteenä ja teollisuudessa lisääntyy koko ajan. Akkuteollisuudella on ollut suuri tarve kehittää pienikokoisia ja keveitä akkuja, joiden energiatiheys on suuri. Akkujen energiatheyden lisääntyminen on saavutettu kehittämällä uusia akkukemioita, jotka voivat olla entistä herkempiä termiselle karkaamiselle.

Akkujen määrän sekä iän kasvaessa myös tulipaloriskit kasvavat. Litiumioniakkujen palokäyttäytyminen poikkeaa merkittävästi normaalista palotapahtumasta; akku sisältää tai tuottaa kaikki paloon tarvittavat elementit (lämpö, happi, palava materiaali). Litiumioniakkupaloa ei voi sammuttaa esim. tukahduttamalla, vaan palo sammutetaan jäähdyttämällä. Litiumioniakkupalot ovat sammutustyön kannalta haasteellisia. Akkujen kotelointi estää sammutteen jäähdyttävän ja sammuttavan vaikutuksen pääsyn kennojen väliin. Palossa syntyy kuumia heitteitä, joten palo leviää usein ympäristöön. Litiumioniakkupaloa voi myös syttyä uudelleen pitkänkin ajan päästä erityisesti isommissa akkupaketeissa.

Suomen markkinoilla on litiumioniakkupalojen sammuttamiseen tarkoitettuja tuotteita, jotka on luokiteltu myös käsisammuttimiksi. Vaikka em. käsisammuttimilla on standardin SFS-EN 3-7 mukaiset teholuokitukset, teholuokista ei voi päätellä sammuttimien sammutuskykyä litiumioniakkupaloon. Litiumioniakkupalolle ei ole olemassa teholuokkaa (testipalaa), jonka perusteella tuotteiden sammutustehoa voitaisiin arvioida. Valmistajan/maahan-tuojan tulee määrittellä, minkälaisien ja minkä kokoisten akkujen sammuttamiseen sammutin soveltuu. Valmistajan pitää myös voida osoittaa, mihin ilmoitettu sammutusteho perustuu (esimerkiksi testausdokumentit). Sammutustehon arvioiminen ja testimenetelmän kehittäminen on haastavaa, koska akkukemioita, akkura-kenteita ja akkuja käytäviä laitteita on monenlaisia.

Litiumioniakkupalossa syntyy terveydelle vaarallisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi fluorivetyä. Sammutusvedet voivat aiheuttaa riskejä ympäristölle valuessaan pohjavesiin tai upotettaessa palavia akkuja luonnonvesiin.

Hankkeessa haluttiin mm. saada tietoa litiumioniakkupalosammuttimien tehosta verrattuna vaahtosammuttimeen ja veteen sekä vahvistaa kuluttajien ymmärrystä akkupaloista, tuottaa tietoa kansalaisviestintänä ja lisätä ymmärrystä palotapahtuman kokonaisuudesta. Lisäksi haluttiin mitata ilmaan ja upotusveteen sammutuksen yhteydessä vapautuvia päästöjä.

## SAMMUTUSTESTIT

### Testeissä käytetyt sammuttimet ja sammutusmenetelmät



Sammutustesteissä käytettiin kolmea litiumioniakkupaloon markkinoitavaa käsisammutin-

Kuva 1. Testeissä käytetyt litiumioniakkupaloon tarkoitetut käsisammuttimet

- ▶ ta: Presto LB6, Total WD 9 F-500 ja Housegard AVD-palosammutin 6 l LITHEX6 (kuva 1).

Presto LB6 on EN 3-7 mukainen kuuden litran käsisammutin, jonka teholuokka on 27A. Tuotteen letkuun on kiinnitetty jäykkä varsiosa, joka on taivutettu päästään. Valmistajan ilmoituksen mukaan sammutteen pintajännitys on alhainen ja se purkautuu alhaisella paineella ja pieninä pisaroina, mikä edesauttaa sammutteen tunkeutumista palavaan materiaaliin ja akuston tehokasta jäädyttämistä. Total WD 9 F-500 on EN 3-7 mukainen yhdeksän litran käsisammutin, jonka teholuokka on 27A. Sammutte on koostumukseltaan veden kaltaista. Maahantuojan ilmoituksen mukaan sammutusaineena on vesi, johon on lisätty F-500 -ainetta, joka mm. vähentää pintajännitystä. Sammutteen kerrotaan jäädyttävän tehokkaasti. Housegard AVD-palosammutin 6 l LITHEX6 on EN 3-7 mukainen kuuden litran käsisammutin, jonka teholuokka on 13A. Sammutte on vesipohjaista harmaata nestettä, joka on koostumukseltaan vettä ”paksumpaa” eli viskositeitiltaan suurempaa kuin vesi. Valmistajan ilmoituksen mukaan sammutte mm. jäädyttää palavaa materiaali luomalla kuumuutta eristävän kerroksen. AVD-sammutte sisältää vermikuliittia (*Aqueous Vermiculite Dispersion*). Lisäksi testeissä käytettiin sammutusmenetelminä myös kennojen upottamista tislattuun akkuveteen, vesiruis-kusammutinta ja 6 litran Gloria -vaahtosammutinta, jonka teholuokka on 43A 183B.

### Sammutustestien järjestelyt

Sammutustestit toteutettiin Pelastusopiston harjoitusalueella. Testeissä käytettiin täyteen ladattuja 18650-sylinterikennoja (kuva 2). Toimittajalta pyydettiin nikkeli-mangaani-kobolttioksidi ( $\text{Li-NiMnCoO}_2$ )-kennoja. Kussakin testissä oli kymmenen kennoa, joiden laskennallinen teho oli 9,62 Wh/kenno. Sammutustestit tehtiin metallisen ritilän päällä upotustestiä lukuun ottamatta. Ritilä oli asetettu huovan alle ja ritilää ympäröi seinät. Yhdeltä sivulta seinä oli hieman korkeammalla, jotta sammuttaja pystyi operoimaan sammutinta. Upotustestissä kennot olivat metallisen levyn päällä, josta ne kipattiin vesiämpäriin ritilän alapuolelle. Ennen sammutustestejä tehtiin yksi vapaa poltto.

Terminen karkaaminen saatiin aikaan lämmittämällä kennoja juotoskynällä. Ensimmäisissä kolmessa sammutustestissä kennot upotettiin seitsemään litraan ionivaihdettua akkuvettä. Neljännessä testissä sammutus tehtiin vesiruis-kulla. Näissä kaikissa testeissä käytettiin vain yhtä juotoskynää. Tällöin kennot oli kiinnitetty nipuksi juotoskynän ympärille siten, että viisi kennoa oli kosketuksissa juotoskynään. Testien jälkeen todettiin, että loput viisi kennoa eivät todennäköisesti reagoi lainkaan, joten testausjärjestelyä muutettiin.

Lopuissa testeissä toisesta vesisammutuksesta lähtien käytettiin kahta juotoskynää, ja kennot oli kiinnitetty tiiviisti juotoskynien ympärille teipillä sekä metallisilla nippusiteillä siten, että kaikki kennot lämpenivät yhtä aikaa. Lämmitykseen käytettiin 80:n tai 100 W:n juotoskynää. Kennot asetettiin muovisen rasiaan sisään ja rasia suljettiin teipillä. Pohjaan tehtiin reiät juotoskyniä varten. Koko paketti asetettiin metallisen ritilän päälle ja kiinnitettiin ritilään nippusiteillä.

Sammutus aloitettiin 25 sekunnin päästä siitä, kun kennoista purkautuvat kaasut olivat ensimmäisen kerran syttyneet palamaan. Akkujen upotuskokeissa ja ensimmäisessä vesisammutuksessa akku upotettiin 10 sekunnin sisällä kaasujen syttymisestä. Sammutte pyrittiin kohdistamaan muovirasiaan muodostuneisiin reikiin. Kennojen jännitteet mitattiin, kun kaikki kennot olivat jäähtyneet. Näin arvioitiin, kuinka monta kennoa palossa oli tuhoutunut. Normaalisti poikkeava jännite tulkittiin tuhoutuneeksi, mutta ehjiä kennoja ei laskettu tuhoutuneisiin.



Kuva 2. Testiasetelma ilman muovikoteloa. Sylinterien keskellä näkyvät juotoskynien päät.

Termisen karkaamisen reaktio ei aina edennyt identtisesti (kahdella juotoskynällä lämmitettäessä), vaikka testausasetelma pidettiin samanlaisena. Esimerkiksi Preston kolmannessa testissä reaktio oli heikompi ja poikkesi keskimääräisestä. Heikomman reaktion jäljiltä jäi enemmän ehjiä kennoja.

### PÄÄSTÖMITTAUKSET

#### Testin toteutus

Testi aloitettiin polttamalla yksi akkukennosto vapaasti testiasetelmassa. Seuraavaksi tehtiin kolme akkukennoston upotustestiä. Seuraavaksi siirryttiin käsisammuttimiin ja ensin sammutettiin vedellä, toiseksi Preston, kolmanneksi Housegardin ja neljänneksi Totalin litiumioniakkupalosammuttimella. Viidenneksi sammutus tehtiin perinteisellä 6 litran Glorian AB-vaahtosammuttimella ja lopuksi tehtiin upotuskoe. Näiden lisäksi tehtiin vielä kolme lisäupotustestiä samanlaisella testausasetelmalla, mutta vain upotusveden perfluoroalkyyliyhdisteet analysoitiin.

#### Ilmanäytteet

Ilmanäytteet kerättiin isokineettisesti impregnoituille lasikuitusuodattimille keräysnopeudella kaksi litraa minuutissa. Näytteet



Kuva 3. Mittausjärjestelyt.

kerättiin testaustilan poistoilmakanavasta. Ilmanäytteistä analysoitiin fluori- ja kloorivetyhappopitoisuudet ionikromatografisesti Työterveyslaitoksella Helsingissä. Näiden lisäksi kerättiin vesiputuksista ilmanäytteet selluloosaesteriasetaatti-suodattimille ja niistä analysoitiin perfluoratut alkylyyhdisteet, jotka analysoitiin nestekromatografi-massaspektrometrilla Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksella Kuopiossa. Näytteistä tutkittiin yhdeksän perfluoro-alkylyliksyylisulfaattia ja neljä perfluoroalkylylisulfaattia. Sammutustesteissä seurattiin myös palavien kaasujen ja hiilimonoksidin pitoisuusvaihteluita poistoilmakanavassa suoraanosoitavalla X-am 5000 -monikaasumittarilla (Dräger).

## Uputusvesinäytteet

Uputustesteissä upotusvedestä määritettiin fluoridipitoisuus ionikromatografisesti ja lisäksi analysoitiin veden nikkeli-, mangaani- ja kobolttipitoisuudet massaspektrometrisesti plasmakäyttämällä Työterveyslaitoksella Helsingissä. Näiden lisäksi upotusvesistä analysoitiin perfluoratut alkylyyhdisteet nestekromatografi-massaspektrometrilla Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksella Kuopiossa.

## TESTIEN TULOKSET

### Sammutustestit

Sammutustesteissä arvioitiin sammuttamisen onnistumista silmä määrällisesti sekä jälkikäteen ehjäksi jääneiden kennojen määrän perusteella. Kenno todettiin tuhoutuneeksi, jos se oli silmin nähden palanut tai siinä oli jännitettä vähemmän kuin 1 voltti. Sammutustesteissä arvioitiin myös sammutustyön turvallisuutta akun sammutuksen aikaisen palokäyttämisen perusteella sekä kokemukseräisesti.

Veteen upotus tehtiin kippaamalla kennopaketti vesiämpäriin, kun lämmityksessä käytetty juotoskynä oli poistettu kennopaketin keskeltä. Uputus oli tässä tapauksessa hyvin tehokas tapa sammuttaa ja palo sammui välittömästi kennopaketin uppoamisen jälkeen. Uputuksen ollessa tällaisessa koeasetelmassa varsin nopea toimenpide, nähtiin se ainoaksi kohtuullisen turvalliseksi tavaksi suojaamattoman maallikon yrittää alkusammutusta. Uputuksen tapahtuessa varsin nopeasti voi sen tehdä henkeä pidättäen, jolloin savukaasuille ei altistu hengitysteitse. Luonnollisesti vesihauteen tulee olla valmiiksi saatavilla.

Vesisuihkulla sammutettaessa kennoja jäähdytettiin pyrkien saamaan vettä kuoreen syntyneen reiän kautta. Kastelupistoolin suihkukulmaa pystyttiin säätämään ja pyrittiin saamaan se sellaiseksi, että vesi menisi akun kuoren sisään. Tällöin sammuttaja joutuu menemään verraten lähelle akkua. Vesisuihkulla akkua joutuu jäähdyttämään siinä määrin pitkän aikaa, että ilman hengityksensuojainta sammuttaja väkisin altistuu savulle hengitysteitse. Sammuttamisen aikana kennoja rikkoutui ja niistä syntyi heitteitä, joten kovin läheltä sammuttaminen on selkeä turvallisuusriski ilman suojavarustusta.

Litiumioniakkupaloon tarkoitettujen käsiammuttimien sekä vaahtosammuttimen osalta tulokset olivat kaikilla samansuuntaiset. Sammuttamisen aikana kennoja rikkoutui ja niistä syntyi heitteitä, joten kovin läheltä sammuttaminen on selkeä turvallisuusriski ilman suojavarustusta. Sammuttimen purkautuminen tyhjäksi on siinä määrin pitkä aika, että ilman hengityksensuojainta sammuttaja väkisin altistuu savulle hengitysteitse.

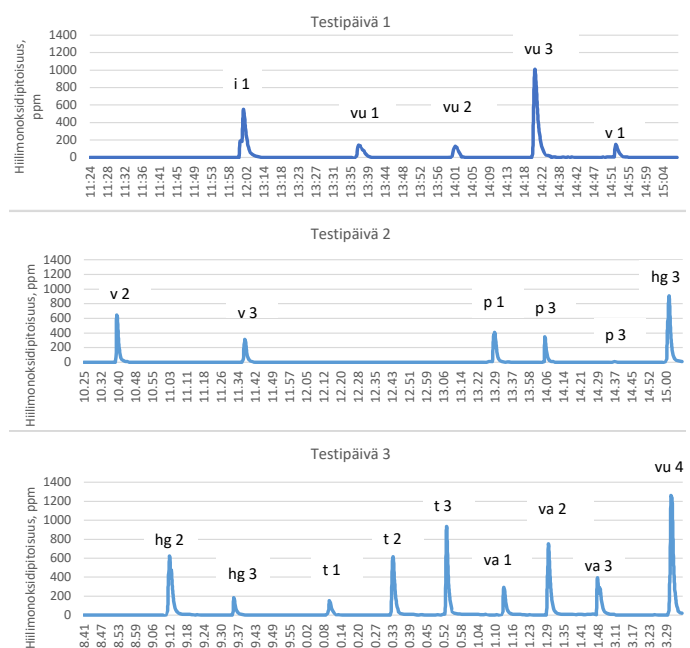
Preston sammuttimen eduksi havaittiin jäykkä varsiosa, jonka avulla sammuttaminen voitiin tehdä kauempaa. Muihin käsiammuttimiin verrattuna pidempi etäisyys akusta ei sekään ollut riittävä, jotta sammuttaminen ilman suojavarustusta olisi tuntunut tur-

valliselta. Muissa sammuttimissa oli tavallinen käsiammuttimen letku, ja sammuttajan on pidettävä kiinni letkun päästä. Tällöin sammuttajan käsi on alttiina akusta purkautuville palaville kaasusuihkuille, kun letkun pää on tuotava varsin lähelle akkua, jotta sammutteen saa tehokkaasti akun mahdollisiin aukkokohtiin.

## Päästömittaukset

Ensimmäiset kolme vesiputosta (vu) tehtiin kymmenen sekunnin sisällä kennoston syttymisestä, minkä johdosta kennoston palamis aika oli lyhyempi ja se mahdollisesti vaikutti menetelmän päästöihin vähentävästi. Vastaava koe tehtiin pidemmällä palamisajalla (vu4) ja silloin hiilimonoksidin (kuva 4) ja palavien kaasujen pitoisuudet olivat selvästi suuremmat. Näin ollen mitä nopeammin palava akku saatiin upotettua veteen, sitä paremmin sen palossa syntyviä päästöjä ilmaan voitiin leikata. Lyhyemmän kennojen palamisajan johdosta upotusmenetelmän päästöjä ei voitu suoraan verrata muiden menetelmien päästöihin (kuva 5). Lähes yhtä vähäisillä fluorivetyhappopäästöillä selvisi myös Gloria -vaahtosammutin (va), jonka testiasetelma oli suoraan verrannollinen kaikkiin muihin menetelmiin paitsi upotukseen (kuva 5). Seuraavaksi vähiten päästöjä aiheuttivat litiumioniakkupaloihin suunnitellut sammuttimet Total (t), Housegard (hg) ja Presto (p). Suurimmat päästöt aiheutti vesirisku (v). Mitatut keskimääräiset fluorivetyhappopitoisuudet mittausten aikana olivat alle fluorivetyhapon haitalliseksi tunnetun 15 minuutin raja-arvon (2,5 mg/m<sup>3</sup>) [1]. Myös pahimman päästön avulla laskettu teoreettinen keskimääräinen fluorivetyhappopitoisuus 25 m<sup>3</sup>:n huonetilassa, mikäli se jakaantuisi sinne tasaisesti, pysyisi alle 15 minuutin haitalliseksi tunnettujen raja-arvojen, testeissä käytetyillä akkukennoilla.

Hiilimonoksidimittauksissa ylitettiin hetkellisesti sen IDHL-arvo (1200 ppm) eli heti terveydelle vaarallinen pitoisuus neljännessä upotusmittauksessa (vu) (kuva 4) [2]. Suurin mitattu päästö aiheuttaisi 25 m<sup>3</sup>:n huoneeseen lähes hiilimonoksidin viidentoista minuutin haitalliseksi tunnetun pitoisuustason, 75 ppm [1]. Mittaukset viittasivat vahvasti myös siihen, että jos palopaikalla esiintyy runsaasti hiilimonoksidia, myös palavien kaasujen (hiilivedyt) olemassaolo on todennäköisempää.



Kuva 4. Hiilimonoksidipitoisuuden vaihtelut kolmen testipäivän aikana.

► Testien keskimääräinen hetkellinen palavien kaasujen prosenttiosuus propaanin alemmasta syttymisrajasta (22000 ppm) oli  $2,2 \pm 2,7$  %. Suurin hetkellinen prosenttiosuus 7 % (eli 1540 ppm) mitattiin upotettaessa akut veteen 25 sekuntia syttymisen jälkeen (vu4). Jos mitattu hetkellinen pitoisuus on alle 10 % alemmasta aineen syttymisrajasta, niin tulos ei aiheuta toimenpiteitä operatiivisessa toiminnassa TOKEVA-ohjeistuksen mukaan. Kyseisen sammutustilanteen suurin mitattu propaanipäästö oli  $1530 \text{ cm}^3$ . Jos kyseinen päästö tapahtuisi kuvitellussa  $25 \text{ m}^3$ :n huoneessa ja päästö leviäisi sinne tasaisesti, niin huoneeseen syntyisi keskimäärin 61 ppm propaanipitoisuus ollen 0,3 % propaanin alemmasta syttymisrajasta.

Perfluorattujen alkylyyhdisteiden pitoisuus ilmassa ei ylittänyt analyysimenetelmän määrittämissä upotustestien aikana. Perfluoro-oktaanihapon ja sen sulfonaatin ilmapitoisuudet olivat upotustesteissä (vu1–vu3) alle 40 – alle  $54 \text{ ng/m}^3$ , ollen pienempiä kuin USA:ssa käytössä oleva ITSL-raja-arvo  $70 \text{ ng/m}^3$  24 tunnille painotettuna kyseisille kemikaaleille (Initial Threshold Screening Level) [3].

### Päästöt upotusveteen

Upotusveden fluoridipitoisuus nousi palaneiden kennojen määrän noustessa ja poikkeavan jäteveden raja-arvon se ylitti neljän palaneen kennon jälkeen.

Suurimmat metallipitoisuudet mitattiin upotusnesteestä, jonka pH oli 6,5. Sen nikkelpitoisuus oli  $880 \text{ } \mu\text{g/l}$ , joka ylittää poikkeavalle jätevedelle annetun raja-arvon  $500 \text{ } \mu\text{g/l}$  [5]. Suurin mangaanipitoisuus oli  $1200 \text{ } \mu\text{g/l}$ , joka oli juomaveden suositusarvoon  $50 \text{ } \mu\text{g/l}$  verrattuna 24-kertainen [6]. Suurin kobolttipitoisuus oli  $360 \text{ } \mu\text{g/l}$ , joka on rengaskaivoista mitattuun keskimääräiseen pitoisuuteen ( $0,77 \text{ } \mu\text{g/l}$ ) verrattuna 470-kertainen [4]. Kaikkien metallien pitoisuus upotusvedessä väheni merkittävästi upotusveden pH:n noustessa yli 7,5. Todennäköisesti metallit saostuivat ja eivät enää näkyneet veteen liukenevassa osuudessa, joka vain analysoitiin.

Perfluorattujen alkylyyhdisteiden pitoisuudet upotusvedessä olivat alle analyysimenetelmän ensimmäisissä upotustesteissä. Lisäupotuksissa palaneiden kennojen määrä oli kussakin testissä yksi. Tällöin lämmitykseen käytettiin ainoastaan yhtä juotoskynää. Erona ensimmäiseen testiin oli, että kennojen annettiin palaa 25 sekuntia ennen upottamista. Lisäksi upotusvedestä analysoitiin suurempi tilavuus, jolloin analyysiin saatiin lisää herkkyttä. Parempi määrittämissä mahdollisti tarkemman analyysin, jolloin vesistä löytyi perfluoro-oktaanisulfonaattia, perfluoro-oktaanihappoa, perfluoroheksaanihappoa, perfluoroheptaanihappoa, perfluorodekaanihappoa ja perfluorononaanihappoa. Mitatut pitoisuudet kaikissa upotusvesinäytteissä ylittivät perfluoro-oktaanisulfonaatille annetun ympäristönormipitoisuuden (EQS) 0,00013

$\text{ng/ml}$  merivedessä. Makealle vedelle annettua normipitoisuutta 0,00065  $\text{ng/ml}$  näytteiden pitoisuudet eivät ylittäneet. Perfluoratut alkylyyhdisteet ovat ympäristössä hyvin pysyviä ja niiden käyttöä (perfluoro-oktaanihappo ja perfluoro-oktaanisulfonaatti) esimerkiksi sammutusvaahdoissa on luovuttu. Näin ollen on selvää, että sammutusvedet on pyrittävä keräämään talteen suuremmisissa akkupaloissa (polkupyörän akuista ylöspäin tai vastaavan kokoluokan akuissa) mahdollisimman hyvin, ja niiden käsittely tulee tapahtua poikkeavana jätevetenä.

## JOHTOPÄÄTÖKSET HANKKEEN TULOKSISTA

### Sammutusteho

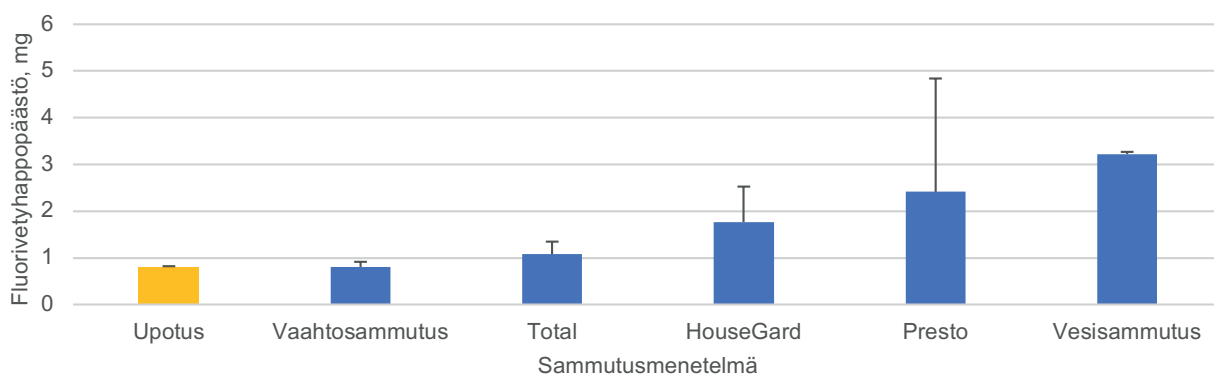
Visuaalisesti tarkasteltuna upotusmenetelmä oli sammutusteholtaan paras ja nopein. Mitä nopeammin syttynyt kennosto saadaan veteen syttymisen jälkeen, sitä vähemmän päästöjä syntyy. Mikään testissä ollut sammutin ei pystynyt pysäyttämään termistä karkaamista eli sammuttamaan akkupalaa välittömästi. Visuaalisesti tarkasteltuna sammutusvaikutus oli huonoin vesiruiskulla sammutettaessa. Suurempia akkupaketteja sammutettaessa vettä (sammutetta) on kuitenkin yleensä saatavilla enemmän kuin käsisammuttimissa, joissa sammutetta on tyypillisesti 6 tai 9 litraa.

Raportissa kuvattua testimenetelmää voidaan pitää termisen karkaamisen pysäyttämisen osalta haastavana, koska ensimmäisiä testejä lukuun ottamatta kaikkia kennoja lämmitettiin yhtäaikaaisesti. On siis mahdollista, että mikään sammutusaine ei olisi voinut pysäyttää reaktiota. Lisäksi testit tehtiin ainoastaan yhdellä akkutyypillä (sylinterikenno) ja akkukemialla. Tarkempi sammutustehon vertaileva arviointi vaatisi erilaisten litiumioniakkujen käyttöä testeissä. Tarkkojen sammutustehovaatimusten puuttuessa sammuttimien markkinoinnissa ja merkinnöissä annettavien totuudenmukaisten tietojen ja käyttöohjeiden tärkeys korostuu.

### Päästöt ilmaan

Mitä nopeammin palava akku upotettiin veteen, sitä nopeammin sen palossa syntyviä päästöjä pystyttiin leikkaamaan. Lähes yhtä vähäisiin fluorivetyhappopäästöihin päästiin myös sammutettaessa Gloria-vaahdosammuttimella. Seuraavaksi vähiten päästöjä tuottivat litiumioniakkupaloihin suunnitellut sammuttimet. Eniten päästöjä tuotti vesiruiskulla sammuttaminen. Pahimman mitatun päästön avulla arvioitu keskimääräinen fluorivetyhappopitoisuus oli alle fluorivedyn 15 minuutin haitalliseksi tunnetun pitoisuuden, jos syntynyt päästö jakautuisi tasaisesti  $25 \text{ m}^3$ :n huonetilaan.

Hiilimonoksidimittauksissa ylitettiin hetkellisesti heti terveydelle vaarallinen raja-arvo ja suurimman mitatun päästön perusteella arvioitu keskimääräinen pitoisuus olisi lähes hiilimonoksi-



Kuva 5. Keskimääräinen fluorivetyhappopäästö ja sen keskijajonta (n=3) eri sammutusmenetelmissä.



## ”Litiumioniakkupalossa syntyy terveydelle vaarallisia yhdisteitä, kuten fluorivetyä. Sammutusvedet voivat aiheuttaa riskejä ympäristölle.”

din viidentoista minuutin haitalliseksi tunnetun pitoisuuden (75 ppm) tasolla, jos syntynyt päästö jakaantuisi tasaisesti 25 m<sup>3</sup>:n huoneeseen.

Mittaukset viittasivat vahvasti myös siihen, että jos palopaikalla esiintyy runsaasti hiilimonoksia myös palavien kaasujen (hiilivedyt) olemassaolo on todennäköisempää. Suurin hetkellinen prosenttiosuus 7 % mitattiin upotettaessa akut veteen 25 sekuntia syttymisen jälkeen. Jos mitattu hetkellinen pitoisuus on alle 10 % alemmasta aineen syttymisrajasta, niin tulos ei aiheuta toimenpiteitä operatiivisessa toiminnassa TOKEVA-ohjeistuksen mukaan.

Perfluorattujen alkyyliryhmien pitoisuus ilmassa ei ylittänyt analyysimenetelmän määrittämistä rajoja upotustestien aikana.

### Päästöt upotusveteen

Upotusveden fluoridipitoisuus nousi palaneiden kennojen määrän noustessa ja poikkeavalle jätevedelle annettu fluoridiraja-arvo olisi ylittynyt noin neljän palaneen kennon jälkeen. Suurin mitattu nikkelpitoisuus upotusvedessä ylitti poikkeavan jäteveden raja-arvon. Lisäksi mangaanin ja koboltin pitoisuudet upotusvedessä olivat 24–470-kertaisia juomaveden laatuvaatimuksiin verrattuna. Upotusvedestä löytyi myös perfluoro-oktaanisulfonaattia, perfluoro-oktaanihappoa, perfluorohexaanihappoa, perfluoroheptaanihappoa, perfluorodekaanihappoa ja perfluorononaanihappoa. Näin ollen on selvää, että sammutusvedet on pyrittävä keräämään talteen suuremmissa akkupaloissa (polkupyörän akuista ylöspäin tai vastaavan kokoluokan akuissa) mahdollisimman hyvin, ja niiden käsittely tulee tapahtua poikkeavana jätevetenä.

### Alkusamuttajan turvallisuus

Varautumisella on tärkeä rooli myös akkupalojen ehkäisyssä. Akkujen lataamista tulee välttää tilassa, jossa on syttyviä materiaaleja aivan akun läheisyydessä. Akkuja ei saa jättää lataukseen ilman valvontaa, ellei niitä voida ladata paloturvallisessa tilassa. Jos akut ovat saaneet ulkoisia kolhuja tai alkaneet jo turvota, on ne syytä uusia. Vioittuneet akut sijoitetaan paikkaan, jossa ne eivät aiheuta syttyessään tulipaloa. Jos akut kuumentuvat voimakkaasti ladattaessa, ne kannattaa vaihtaa hyvissä ajoin uusiin. Jos akkupalo syttyy, palon vakavuus riippuu akun koosta. Akkupalossa tapahtuva reaktio katkaistaan jäähdyttämällä. Jäähdytysvaikutus tulee saada kennojen väliin. Pienimpien akkujen (esimerkiksi matkapuhelinten akkujen) akkupalotapahtuma on lyhyt. Tällöin sammutinta tarvitaan akun sytyttämien muiden materiaalien sammuttamiseen, johon yleensä riittää normaali vaahtosammutin. Tilan tuulettaminen palamisessa syntyneistä ärsyttävistä kemikaaleista on tärkeää.

Jos palon aiheuttaa esimerkiksi akkutorakoneen akku tai sitä suurempi akku, on palotapahtuma pidempiaikaisempi ja yleensä aggressiivisempi. Palo tuottaa huonetilaan selvästi enemmän myrkyllisiä kaasuja, kuumia heitteitä ja palavien kaasujen leiskahduksia kuin esimerkiksi pienemmät puhelimen akut. Isompien akku-

jen sammuttaminen on erittäin vaikeaa hyvän suojakuoren vuoksi. Jotta jäähdyttävä vaikutus saataisiin kennojen väliin, sammutte tulee suihkuttaa hyvin läheltä kohteeseen. Toisaalta hyvä suojakuori ehkäisee akusta tulevia heitteitä suojaten osin sammuttajaa, mutta läheltä sammutettaessa alkusamuttaja voi altistua palavien kaasujen leiskahduksille ja palossa syntyville myrkyllisille kaasuille, joiden pitoisuudet voivat olla hetkellisesti korkeita. Akun koosta riippumatta savulle altistumista on vältettävä. Isomman akun palossa on aina soitettava hätänumeroon (112).

Testaajien mielestä ilman kunnollista henkilökohtaista suojausta akkutorakoneen akkujen kokoisten tai suurempien akkujen turvallista sammuttamista käsisammuttimella tai muulla vastaavalta etäisyydeltä tehtävällä sammutusmenetelmällä ei voida taata. Ensimmäistä kertaa akkupaloa sammuttavalle voi tulla yllätyksenä, että jäähdyttämällä on tärkeä rooli akkupaloissa, vaarallisia ärsyttäviä kemiallisia aineita vapautuu hengitysvyöhykkeelle, kuumia heitteitä saattaa lennähtää akun suojakuoren rikkoutuessa ja elektrolyytistä höyrystyvät kaasut saattavat leimahtaa aiheuttaen pistoliekin. Näin ollen sammutustilanteesta voi muodostua hyvin suuri turvallisuusriski huonosti suojautuneelle alkusamuttajalle.

### Testausasetelman kriittinen tarkastelu

Toistettavan testimenetelmän kehittäminen sammutustehokkuuden mittaamiseksi akkupaloissa on haasteellista. Jo pelkästään kennojen käyttäytyminen palon aikana on vaikeasti ennustettavaa, vaikka niiden lämmittäminen tehtiin täsmälleen samalla tavalla. Testissä käytetty akkukennojen kotelointi ei vastannut täysin kaupallisten akkujen rakennetta. Kennojen lämmittämiseen käytetyt juotoskynät aiheuttivat muovisen kotelon sulamisen puhki, jolloin kennojen palamisesta aiheutunut savu ja lämpö pääsivät purkautumaan kotelosta, mikä edesauttoi jäähtymistä. Myös sammuttamista ja jäähdyttämistä ajatellen koteloon syntyi isohko reikä, josta sammutusaine oli helppo kohdistaa suoraan kennoihin. Kaupallisten akkujen kotelointi sulaa tai rikkoutuu hitaammin, mikä vaikeuttaa sammuttamista.

### Kiitokset

Hankkeessa olivat mukana Pelastusopisto, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes sekä Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. Tutkimusryhmä kiittää ulkopuolisesta rahoituksesta Palosuojelun edistämisiätiötä ja SPEKiä.

### Lähteet

1. Sosiaali- ja terveysministeriö 2020. HTP-arvot 2020, Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki 2020.
2. NIOSH 2016. Immediately dangerous to life or health (IDLH) values. <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>
3. Michigan State 2018. Michigan taking action on PFAS. NACAA 2018 Fall Membership Meeting, October 15–16, 2018, Cleveland, OH. [http://www.4cleanair.org/sites/default/files/Documents/Fall\\_2018\\_Dolehanty.pdf](http://www.4cleanair.org/sites/default/files/Documents/Fall_2018_Dolehanty.pdf)
4. Lahermo P, Tarvainen T, Hatakka t, Backman B, Juntunen R, Kortelainen N, Lakomaa T, Nikkarinen M, Vesterbacka, Väisänen U ja Suomela P. Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999. Espoo 2002.
5. Oulun Vesi 2020. Viemäriin johdettavien jätevesien laatu. <https://www.ouluvesi.fi/documents/399509/17677332/Viem%C3%A4riin+johdettavien+j%C3%A4tevesien+raja-arvot/a9c-d306e-f126-4f42-b972-d4e27d1bb4da>
6. STM 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista, 1352/2015 <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20151352>

# Pelastuslaitoksen varautuminen sähköautopaloihin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa

## TIIVISTELMÄ

Sähköautojen määrä sekä niiden latausinfra kasvavat Suomessa kovaa vauhtia. Autokannan ollessa uutta, sähköautoille tapahtuneet tulipalot ovat vielä harvinaisia. Maailmalla tapahtuneiden tulipalojen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että sähköautojen palot ovat pelastustoimelle haastavia ja pitkäkestoisia tilanteita. Yksiselitteisten toimintaohjeiden puuttuessa sähköautopalot maanalaisissa pysäköintilaitoksissa aiheuttavat merkittävän haasteen pelastuslaitosten onnettomuuksien ehkäisyssä. Tämä artikkeli vastaa kolmeen keskeiseen tutkimuskysymykseen: Mitkä ovat huomioitavat tekijät sähköautopalon turvallisessa sammuttamisessa maanalaisessa pysäköintilaitoksessa? Mitkä ovat pelastustoiminnan johtajan huomioitavat seikat? Mitä tulee huomioida sähköautojen latauspisteiden asentamisessa kyseisessä ympäristössä? Työn teoreettisessa viitekehyksessä perehdyttiin sähköautojen akkupaloihin. Lisäksi työssä käsiteltiin sammutus- ja pelastustoiminnassa huomioitavia keskeisiä seikkoja näissä tilanteissa. Teoreettisen viitekehyksen ja Euroopan eri pelastuslaitoksille suunnatun kyselyn perusteella laadittiin kaksi ohjetta pelastuslaitosten käyttöön. Tämä artikkeli kuvaa ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyön tuloksia.

## TAUSTAA

Valtioneuvoston selonteossa kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030 on asetettu yhdeksi keskeiseksi tavoitteeksi fossiilisten öljypohjaisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla ja vähäpäästöisillä vaihtoehtoilla. Tavoitteena on, että Suomessa olisi vuonna 2030 vähintään 250 000 sähkökäyttöistä autoa. [1, s. 58–59]

Keväällä 2019 Lahdessa paloi autoliikkeen pihassa sähköauto. Autoa sammutettiin perinteisin menetelmin vedellä. Palon sammuttamisen jälkeen auto syttyi kuitenkin vielä kaksi kertaa uudelleen. Uudelleensyttymisen aiheutti se, että sähköauton akussa oli käynnistynyt termiseksi karkaamiseksi kutsuttu eksoterminen

reaktio. Edellä mainitun mukaisesti on selvää, että sähköautojen palot ovat pelastustoimelle poikkeuksellisia tilanteita. Lahden tapauksessa tilannetta helpotti se, että tulipalo tapahtui ulkoilmassa, autoliikkeen pihassa. Näin ollen tulipalon seurannaisvaikutukset jäivät verrattain pieniksi. Tapauksen jälkeen pelastusalailla nousi kuitenkin vilkas keskustelu siitä, että mitkä ovat toimintamallit, jos jotain vastaavaa tapahtuu esimerkiksi maanalaisessa pysäköintilaitoksessa. [2]

Modernien sähköautojen energialähteenä toimii pääsääntöisesti litiumioniakut. Niiden etuina verrattuna muihin akkuteknologioihin ovat pitkä käyttöikä, suuri energian varastointikyky ja korkea tehokkuus suhteessa akkujen kokoon [3]. Sähköautopaloista puhuttaessa on tärkeä tunnistaa, että sähköauton tulipalossa suurin riski ja eroavaisuus ”perinteiseen” autopaloon on tulipalo, joka on päässyt vaurioittamaan sähköauton akustoa (litiumioniakkuja). Uudelleen syttyminen, nopea ja pitkäkestoinen palotapahduma, korkeat lämpötilat sekä sammuttamisen vaikeus ovat tekijöitä, jotka tekevät sähköauton akkupalosta erityisen haastavan pelastustoimelle. [4, s. 1–2]

Litiumioniakku on yleistermi eri akuille. Litiumioniakkuja on useita eri tyyppisiä, jotka eroavat toisistaan käytetyn akkukemian eli käytettyjen raaka-aineiden osalta. Yhteistä kaikille on kuitenkin se, että varaus siirtyy akun anodin ja katodin välillä litiumionina. Yleistäen voidaan sanoa, että käytetty kemia vaikuttaa myös akun turvallisuuteen. Turvallisuus kulkee usein hinnan kanssa käsi kädessä – mitä halvempi akku on, sen halvempia komponentteja sen valmistuksessa on jouduttu käyttämään. [5]

## SÄHKÖAUTOJEN LITUMIONIAKKUPALOT

Sähköautokanta Suomessa on toistaiseksi verrattain uutta. Tämän vuoksi autot ovat pääsääntöisesti hyväkuntoisia ja säännöllisesti huollettuja. Onkin vaikeaa arvioida sähkökäyttöisten autojen paloriskiä ja sen todennäköisyyttä. Tämänhetkisen tietämyksen pe-

rusteella voidaan kuitenkin todeta, että mitään selvää merkkiä siitä, että sähköautot syttyisivät helpommin palamaan kuin polttomoottorikäyttöiset, ei ole. On siis väärin olettaa, että sähköautoilla olisi suurempi riski palaa kuin polttomoottorikäyttöisillä autoilla. Selvää kuitenkin on, että riski on erilainen. [6]

Sähkökäyttöisten ajoneuvojen määrän kasvaessa myös niiden tuomat uudenlaiset riskit kasvavat. Ruotsalaisen valtio-omistaisen tutkimuskeskuksen RISE:n projektipäällikön Ola Willstrandin mukaan ei kuitenkaan ole selvää todistusaineistoa siitä, että sähköautoilla olisi korkeampi syttymisriski kuin tavanomaisilla polttomoottorikäyttöisillä autoilla. Willstrandin mukaan riski saattaa olla jopa pienempi. Autopalot monesti aiheutuvat palavan nesteiden vuodosta, jonka jokin kuuma pinta sytyttää. Sähköautoissa tällaisia palavia nesteitä ei ole, joten tämä pienentää syttymisriskiä. [6]

Erinäisten palo- ja polttokokeiden perusteella on selvää, että mahdollinen sähköautopalo on pelastustoimen silmin huomattavasti haasteellisempi onnettomuustyyppi kuin polttomoottorikäyttöisen auton palo. Yhdysvalloissa vuonna 2013 tehdyissä polttokokeissa huomattiin, että yhden poltetun sähköauton akku syttyi uudelleen palamaan 22 tuntia sammuttamisen jälkeen. [7, s. 185]

Litiumioniakkupalon syttymissyynä on joko lämpötilan tai jännitteen liiallinen kasvaminen yhdessä akkukennossa. Tämän seurauksena yksittäinen akkukenno voi vapauttaa syttymiskelpoista kaasua, joka aiheuttaa tulipalon tai jopa räjähdysen. Kun lämpö tai jännitteen turvalliset rajat ylitetään, akussa syntyy oikosulku. Tämän seurauksena litiumioniakkuun syntyy olosuhteet, jossa on palavaa materiaalia, hapettajia ja lämpöä tuottava kemiallinen reaktio. [3, s. 30]

Kun lämpöä tuottava kemiallinen reaktio tuottaa enemmän lämpöä kuin sitä ehtii vapautumaan, litiumioniakussa käynnistyy niin kutsuttu termien karkaaminen (vaihtoehtoisesti lämpökarkaaminen tai lämpöryntäys, thermal runaway). Termisen karkaamisen aiheuttaa ketju kemiallisia reaktioita akun sisällä, joiden myötä akun sisälämpötila kasvaa. [3, s. 30]

Termisen karkaamisen käynnistymiseen vaadittava lämpötila riippuu käytetystä akkukemiasta. Käytännössä kuitenkin kaikissa litiumioniakuissa on itsessään kaikki palamiseen tarvittavat elementit. Metallinen litium reagoi voimakkaasti palavan ilman kosteuden kanssa, ja alumiinioksidi voi palaa hyvin kuumasti (jopa 2000 °C). Metallioksidien sisältämä happi osallistuu paloon metallien pelkistyessä. Litiumioniakkujen riskejä termiselle karkaamiselle ja syttymiselle lisää se, että niissä käytetyt elektrolyytit ovat palavia aineita toisin kuin esim. liijyakuissa käytetyt elektrolyytit. [5, s. 9]

Termien karkaaminen voi koskettaa pelkästään yksittäistä akun kennoa. Kemiallisen reaktion edetessä kuitenkin syttyneen kennon tuottama lämpö voi sytyttää viereisiä kennoja tuleen. Tästä aiheutuu litiumioniakun ”noidankehä”. Litiumioniakun palon erityisen haastavaksi tekee se, että vaikka näkyvä liekipalo saataisiin sammutettua, niin kuumasta akusta tulevat höyrystyneet elektrolyytikaasut voivat syttyä uudestaan päästessään hapen kanssa kosketuksiin. [3, s. 9]

Litiumioniakussa termisen karkaamisen aiheuttamat lämpövaikutukset ovat riippuvaisia akun latausasteesta; mitä suurempi on latausaste, sitä matalampi on termisen karkaamisen käynnistymislämpötila. Termisen karkaamisen käynnistymisherkyyden vaikuttaa myös akun käyttöhistoria ja sen kuormitus. [8, s. 6] Lähtökohtaisesti tavalliset sähköautojen litiumioniakustot eivät ole erityisen herkkiä itsesyttymiselle. Ongelma kuitenkin syntyy silloin kun akustoihin kohdistuu ulkoista lämpöä, mekaanista iskua tai niitä kohtaan kohdistetaan tavanomaisesta poikkeavaa kuormitusta. [9, s. 7]

Keskeiset paloriskit litiumioniakuissa liittyvät ulkoihin tai sisä-

siin oikosulkuihin, korkeisiin tai mataliin lämpötiloihin, sekä ylijalautumiseen. Nämä mekanismit voivat aiheuttaa eksotermissen (lämpöä tuottavan) reaktion akustossa. Kun lämpötilat nousevat riittävästi tai kun syttymislähde on olemassa, joka sytyttää akuston vapauttavat kaasut – kaikki palamiseen tarvittavat elementit täyttyvät. [3, s. 32]

Sähköautojen palotestejä on tehty maailmalla yksittäisiä, erilaisilla testiparametreilla. Ongelmana testien yleistettävyydessä on ollut se, että testit ovat tehty erilaisilla ajoneuvoilla, erilaisissa olosuhteissa ja polttotavat ovat vaihdelleet. Näin ollen luotettavaa ja yksiselitteistä vastausta sähköautojen palotehoon on mahdotonta antaa. Yleistettävänä havaintona polttotesteissä on kuitenkin havaittu, että latausasteella on selkeä merkitys palotehoon (suurempi latausaste = suurempi paloteho). Toisaalta taas testit osoittavat, että latausasteen korrelaatio lämmön kokonaisvapautumisasteeseen on pienempi kuin palotehoon. [10 s. 209]

Monikansallinen tutkimusryhmä julkaisi 2020 vuoden alussa tutkielman, jossa oltiin perehdytty laajalti sähköautojen litiumioniakkupaloihin. Tutkimusryhmän laskelmien perusteella he totesivat, että olemassa olevan tiedon perusteella sähköautojen palot ovat paloteholtaan verrattavissa polttomoottorikäyttöisten autojen palotehoon. Keskeisinä eroina kuitenkin havaittiin, että sähköauton palo saattaa tuottaa myrkyllisiä kaasuja enemmän kuin polttomoottorikäyttöisen auton palo. Lisäksi akun uudelleensyttymisriskin vuoksi sähköautopalon sammuttaminen on tavanomaista autopaloa haasteellisempaa. [9, s. 30]

Keskeisin ja vaarallisin termisessä karkaamisessa vapautuva myrkyllinen aine on vetyfluoridi (HF, fluorivety). Fluorivedyn pitoisuudet ilmassa aiheuttavat silmien ja hengitysteiden ärsytystä. Suuret pitoisuudet (yli 5 ppm, 4mg/m<sup>3</sup>) fluorivetyhöyryjä voivat aiheuttaa hengitysteiden syöpymisvammoja, keuhkopöhöä ja sydämen rytmihäiriöitä. Fluorivetyhappo imeytyy ihon läpi nopeasti syvälle kudoksiin ja saattaa aiheuttaa jopa kuoleman. [11]

Fluorivedyn pitoisuus on eri polttokokeissa vaihdellut, kun on verrattu sähköauton ja polttomoottorikäyttöisen auton palo- ja savukaasuja. Fluorivetyjä kuitenkin muodostuu käyttövoimatyyppistä riippumatta autopalossa. Eräissä polttokokeissa arvioitiin, että sähköauton palossa muodostuu noin kaksinkertainen määrä fluorivetyjä kuin polttomoottorikäyttöisen auton palossa [9, s. 13]. On kuitenkin huomionarvoista, että pitoisuudet ovat hyvin riippuvaisia tilan koosta ja ilmanvaihdosta. Pienessä, huonosti tuuletuvassa tilassa pitoisuudet ovat suuria. On myös havaittu, että litiumioniakkupalossa sammutusveden päästessä akkuihin, fluorivedyn vapautuminen nopeutuu. [3, s. 45]

## LITUMIONIAKKUPALON SAMMUTTAMINEN

Sähköauton akkupalolle on olemassa muutamia tyyppillisiä piirteitä, joista tulipalon laadun voi arvioida. Seuraavat merkit saattavat johtua litiumioniakkupalosta: Lämpötilan nousu akustossa, vaikka ulospäin näkyvä liekipalo on sammutettu, suhahtavat tai paukahtavat äänet (syntyvät akkukennon sisällä olevien kaasujen purkautuessa, kun kennon rakenne pettää paineen noustessa), kaasujen vapautumisesta seuraava valkoinen savu, kipinöiden purkautuminen, tulipalosta aiheutuvat heitteet, akun turpoaminen [7, s. 186; 10, s. 214]. Karkeasti jaoteltuna sähköautojen palot voidaan jakaa kahteen skenaarioon: Palo muualla kuin akustossa (tavanomainen autopalon sammutustaktiikka) tai palo akustossa (sähköautopalon sammutustaktiikka).

Litiumioniakkupalossa on tärkeä ymmärtää oikeanlainen sammutustaktiikka ja niiden perusteet. Litiumakkuja on periaatteellisesti kahta eri tyyppiä – ladattavia akkuja ja ei ladattavia paristoja. Litiumparistoissa anodimateriaali on litium-metallia, joten ve-

► si ei ole soveltuva sammute. Vaihtoehtoina tällaisessa palossa voivat olla esimerkiksi D-luokan sammute tai vaikkapa hiekka. Sähköautoissa käytettäviin ladattaviin litiumakkuihin vesi on todettu tehokkaimmaksi sammutteeksi. [12, s. 163]

Palamiseen tarvitaan palavaa ainetta, happea ja sopiva lämpötila. Sähköauton akustossa saattaa olla satoja tai jopa tuhansia akkukennoja, jotka voivat termisessä karkaamisessa osallistua palotapahtumaan. Näin ollen palavan aineen poistaminen ei yleensä ole vaihtoehto sammutustaktisesti. Palotapahtumassa (metallien pelkistyessä) myös happea vapautuu, joten sen poistaminen ei käytännössä ole mahdollista. Näin ollen ainoaksi sammutusvaihtoehdoksi jää lämpötilan lasku siten, että termisen karkaamisen aiheuttama ketjureaktio päättyy.

Palotapahtuma käynnistyy yleensä yksittäisestä akkukennosta, josta se siirtyy lämpötilan noustessa seuraavaan. Riippuen käytetystä akkukemiasta, terminen karkaaminen akkukennossa saattaa käynnistyä jo 80 asteessa. Termisen karkaamisen käynnistyttyä yksittäisen akkukennon pintalämpötila saattaa nousta yli 500 asteeseen. Näin ollen selvää on, että jäähdytykseen tarvittava vesimäärä on suuri. Mikäli lämpötilaa ei saada laskettua riittävästi, terminen karkaaminen jatkuu ja lämpötila jatkaa kohoamistaan. [12, s. 170]

Yhdysvalloissa tehtiin vuoden 2013 aikana hybridi- ja sähköauton akkujen polttokokeita autopalosimulaattorissa. Polttokokeissa havaittiin, että liekkipalon sammuttaminen ei pysäyttänyt termistä karkaamista, sillä kaikissa kokeissa akut syttyivät uudelleen ”ensimmäisen sammutuksen” jälkeen. Ennen uudelleensyttymistä kuului suhahduksia ja paukahduksia, joita seurasi valkoisen höyryn purkautuminen. Tämä jatkui niin kauan, kunnes akkupaketin lämpötila saatiin laskettua niin alas, ettei termistä karkaamista enää päässyt tapahtumaan. Akkukotelon pinnan jäähdyttämisen havaittiin olevan nopeampi sammutuskeino kuin suoran vesisuihkun suuntaaminen palokohteeseen ja vesi havaittiin hyväksi sammutusaineeksi sen jäähdytysvaikutuksen vuoksi. Yhdessä polttokokeessa akku syttyi 22 tuntia ensimmäisen sammutuksen jälkeen. [7, s. 186–189]



Kuva 1. Kuva Yhdysvalloissa tehdystä polttokokeesta [7, s. 104].

## SAMMUTUS- JA PELASTUSTOIMINTA SÄHKÖAUTALOISSA MAANALAISSISSA PYSÄKÖINTILAITOIKSISSA

On selvää, että litiumioniakun palaessa autopalon sammuttaminen eroaa merkittävästi perinteisen autopalon sammuttamisesta. Tämän vuoksi on tärkeää, että pelastustoimi on varautunut näihin poikkeuksellisiin tulipaloihin oikeanlaisilla taktiikoilla, koulutuksella ja kalustolla. Litiumioniakun palaessa on olemassa tiettyjä

**"Palamiseen tarvitaan palavaa ainetta, happea ja sopiva lämpötila. Sähköauton akustossa saattaa olla satoja tai jopa tuhansia akkukennoja, jotka voivat termisessä karkaamisessa osallistua palotapahtumaan."**

yleispäteviä ilmiöitä. Palon sammuttamisen haasteista keskeisimpinä voidaan nostaa esille seuraavat [4, s. 2]:

- Nopea ja pitkäkestoinen palotapahtuma
- Korkea lämpötila
- Suuri vedenkulutus
- Akuston sammuttamisen/jäähdyttämisen vaikeus, hyvän koteloinnin ansiosta

Sähköautojen akkupalo aiheuttaa suuren paineen pelastustoiminnan johtajalle, koska riskit ovat tavanomaista suuremmat niin sivilisille kuin myös pelastushenkilöstölle. Maanalaisissa tiloissa sähköautojen akkupalon haastavuus korostuu. Mikäli termistä karkaamista ei saada pysähtymään, niin tulipalo litiumioniakustossa voi syttyä uudelleen jopa useita tunteja ensimmäisen sammutusyrityksen jälkeen. Tämän vuoksi onkin keskeistä, että palanut auto saataisiin siirrettyä pois maanalaisista tiloista. Haasteena on oikeanlaisen kaluston ja henkilöstön löytäminen tähän operaatioon.

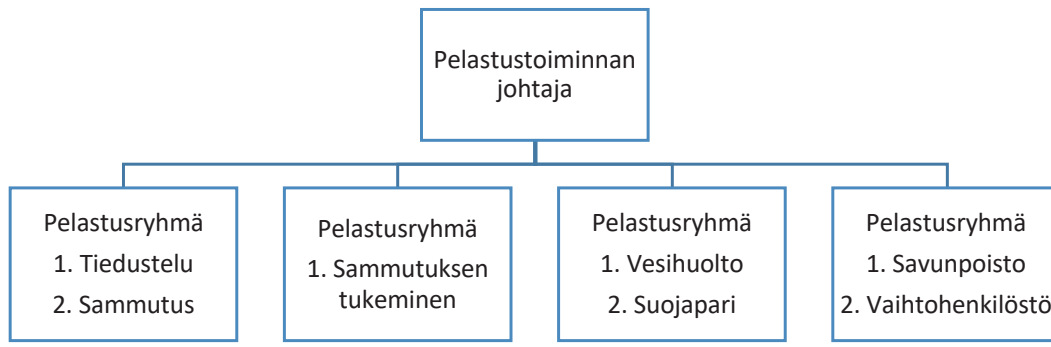
Pelastuslaitosten tehtäviä, vastuita ja velvollisuuksia määritellään pelastuslaissa (379/2011). Pelastuslain tavoitteena on parantaa ihmisten turvallisuutta ja vähentää onnettomuuksia. Lain tavoitteena on myös, että onnettomuuden uhatessa tai tapahduttua ihmiset pelastetaan, tärkeät toiminnot turvataan ja onnettomuuden seurauksia rajoitetaan tehokkaasti niin, että ihmisille, omaisuudelle ja ympäristölle aiheutuvat haitat jäävät mahdollisimman vähäisiksi. [13, § 1]

Erilaisissa onnettomuustilanteissa toimivien pelastusmuodostelmien koot vaihtelevat eri tehtävien vaativuuden mukaan. Jos tarkastellaan sähköautopaloa maanalaisessa pysäköintilaitoksessa, niin tarvittava pelastustoiminnan muodostelma on vähintään pelastusjoukkue, joka koostuu johtajasta ja vähintään kahdesta ja yleensä enintään viidestä pelastusryhmästä. Mahdollista toimintajaotusta ja pelastustoiminnan etenemistä voidaan hahmotella Ranskassa tehdystä ohjeistuksesta, jossa on kuvattu sähköautopalon sammuttamisen eteneminen [15, s. 55–67].

Kuvassa 2. on esimerkki miltä pelastusjoukkueen toimintajaoitus voisi näyttää sähköautopaloissa maanalaisessa pysäköintilaitoksessa. Esimerkistä on huomioitava, että siinä olevat tehtäväkokonaisuudet koskevat tilanteen alkuvaihetta. Palon edetessä tulee muita tehtäviä pelastustoiminnan johtajan hoidettavaksi, joita voi olla esimerkiksi paineilmahuollon järjestäminen ja palaneen sähköauton hinaus erikseen määriteltyyn turvalliseen paikkaan.

## TULOKSET JA YHTEENVETO

Sähköautojen litiumioniakuista liikkuu paljon harhakäsityksiä. Eri tutkimusten mukaan ei ole esimerkiksi syytä olettaa, että sähköauton palotehot ja palokuormat poikkeaisivat merkittävästi polt-



Kuva 2. Esimerkki pelastusjoukkueen toimintajaoituksesta mukailien ranskalaisten ohjeistusta sähköautopaloon.

tomootorikäyttöisestä autosta. Tämänhetkisen tiedon perusteella myöskään sähköautoilla tai niiden litiumioniakuilla ei vaikuttaisi olevan tavanomaista suurempaa syttymisriskiä.

Sähköautojen määrä on kasvanut viime vuosina tasaisesti Suomessa. Sähköautopaloihin ei kuitenkaan olla vielä laajemmin varauduttu pelastuslaitoksissa koulutuksen, kaluston eikä ohjeistusten muodossa. Opinnäytetyössä suoritettiin laadullinen kyselytutkimus Euroopan eri kaupunkien pelastuslaitoksiin. Kyselyn vastausten perusteella voidaan todeta, että sama trendi näyttää olevan pääsääntöisesti muuallakin Euroopassa. Pelastuslaitosten tulisi jatkossa pyrkiä etupainoisesti seuraamaan yhteiskunnan ja tekniikan kehitystä ja muutoksia. Nyt jo esimerkiksi sähköautojen latauspisteitä, aurinkopaneeleita ja vaikkapa litiumioniakkuvarastoja on sijoitettu mitä erilaisimpiin kiinteistöihin ympäri Suomea ja monesti ilman paikallisten pelastusviranomaisten ohjausta ja neuvontaa.

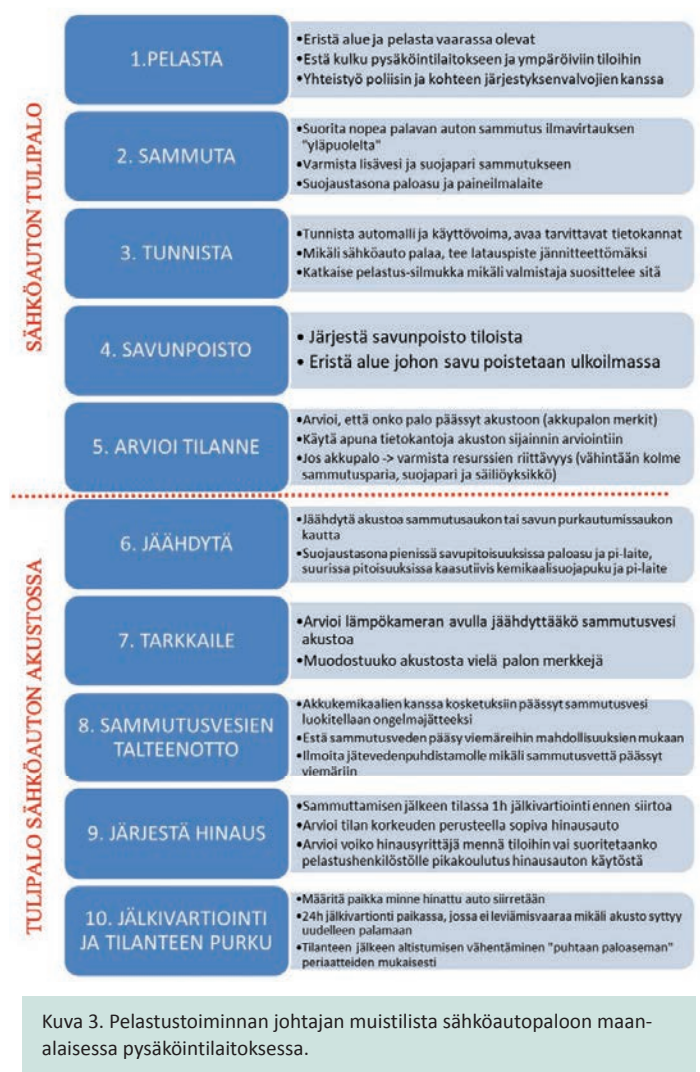
Turvallisen ympäristön ja rakennuskannan kehittymisen näkökulmasta olisikin tärkeää, että pelastuslaitokset tekisivät jatkuvaa toimintaympäristön analyysiä, jossa seurattaisiin esimerkiksi uusien teknologioiden ja energiamuotojen kehitystä ja niiden tuomia riskejä. Tämän pohjalta tulisi miettiä laajasti henkilöstön osaamista eri tehtävissä ja järjestää tarvittavaa koulutusta ja kalustoa tämän analyysin pohjalta.

Opinnäytetyössä nousi selkeästi esille, että sähköautopalot maanalaisissa pysäköintilaitoksissa ovat pelastuslaitosten päivittäisönnettömyyksistä poikkeavia tilanteita. Tilanteet vaativat uudenlaisia toimintamalleja, mahdollisesti tavanomaisesta autopalosta poikkeavia suojavarusteita ja ne saattavat sitoa resursseja hyvin pitkäkestoisesti. Näissä tilanteissa on tärkeää, että pelastushenkilöstöllä on tiedossa riittävällä tasolla litiumioniakkupalojen oikeanlaiset sammutusmenetelmät ja niiden aiheuttamat riskit. Ilman näitä tietoja sammutus- ja pelastustoimintaa ei voida suorittaa riittävän tehokkaasti ja turvallisesti.

Tutkimustiedon perusteella pelastustoiminnan näkökulmasta keskeiset haasteet tämänkaltaisissa tilanteissa liittyvät litiumioniakkupalojen kemiallisiin altisteisiin ja uudelleensyttymisriskiin. Myös kokemukset Euroopasta vahvistivat tätä käsitystä. Nämä tekijät onkin pyrittävä huomioimaan opinnäytetyön liitteinä olevissa ohjeissa.

Opinnäytetyössä nostettiin esille kehittämiskohteita, jotka ovat pääsääntöisesti suunnattu pelastuslaitoksille. Näihin kuuluvat toimintamallien suunnittelu, koulutuksen järjestäminen henkilöstölle, harjoittelu, kalustohankinnat ja paloturvallisuusvaatimusten luominen ja yhtenäistäminen.

Suuremmassa kuvassa kaikkien uusiutuvien ja kehittyvien energiamuotojen tuomat riskit tulisi huomioida vähintään pelastuslaitosten ohjeistuksen tasolla. Sähköautojen lisäksi esimerkiksi suuremmat litiumioniakkuvarastot tai aurinkosähkövoimalat aiheut-



Kuva 3. Pelastustoiminnan johtajan muistilista sähköautopaloon maanalaisessa pysäköintilaitoksessa.

tavat poikkeuksellisia työturvallisuusriskejä pelastushenkilöstölle, jos niiden sijoittelussa ei ole huomioitu operatiivisen pelastustoiminnan edellytyksiä.

Vaatimusten yhtenäistämisen näkökulmasta paras ratkaisu olisi, että näihin uusiin riskeihin olisi laadittu valtakunnalliset määräykset tai ohjeet. Näiden laatiminen voisi tapahtua esimerkiksi ministeriöiden tai pelastuslaitosten kumppanuusverkoston kautta. Samalla tulisi arvioida myös esimerkiksi autosuojia koskevien paloturvallisuusmääräysten ajantasaisuutta. Etenkin viime vuosina kaikkien autojen palokuormat ja koot ovat kasvaneet, joten esimerkiksi palokuormaluokat paloturvallisuusasetuksessa eivät enää vastaa todellisuutta.

- Opinnäytetyön laadinnassa nousi lisäksi esille useita mahdollisia eri jatkotutkimusaiheita sähköautopalojen sammutus- ja pelastustoimintaan liittyen. Aiheet koskevat palaneen sähköauton hinausta, vaihtoehtoisia sammutusmenetelmiä, sammutusjätevesien talteenottoa ja käsittelyä sekä erilaisten suojarusteiden oikeaoppista käyttöä. Opinnäytetyön tuloksina laadittiin pelastustoimen käyttöön käyttöön kaksi eri ohjetta: ohje sähköautopalosta maanalaisessa pysäköintilaitoksessa ja paloturvallisuusohje sähköautojen latauspisteiden sijoittamisesta maanalaiseen pysäköintilaitokseen. Lisäksi opinnäytetyössä laadittiin muistilista pelastustoiminnan johtajalle sähköautopaloihin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa. Ohjeet ja muistilista ovat luettavissa opinnäytetyöstä [16].

## LÄHDELUETTELO

1. Työ- ja elinkeinoministeriö. (2017). Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö.
2. Pelastustieto. (2019). Sähköauto syttyi kolmesti – akkupalo on arvaamaton ja vaikea sammuttaa. Haettu 25.11.2019 osoitteesta <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/sahkoauto-syttyi-kolmesti-akkupalo-on-arvaamaton-ja-vaikeasammuttaa/#66453c57>
3. Amon, F.; Bisschop, R.; Rosengren, M. & Willstrand, O. (2019). Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. Borås: RISE Research Institutes of Sweden AB.
4. Gong, J.; Luo, W.; Zhou, Z. & Zhu, S. (2017). Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817362689>
5. Bröckl, M.; Kontiokari, V.; Pitkämäki, A.; Päälylsaho, M. & Raivio, T. (2017). Selvitys Li-akkujen turvallisuustekijöistä. Helsinki: Gaia Consulting.

6. Willstrand, O. (2020). A lower risk of fire with electric cars?. Haettu 5.3.2020 osoitteesta <https://www.ri.se/en/our-stories/lower-risk-fire-electric-cars>

7. Blum, A.; Bress, T.; Cotts, B. & Long Jr., R. (2013). Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results. Quincy: The Fire Protection Research Foundation.

8. Välisalo, T. (2019). Firefighting in Case of Li-Ion Battery Fire in Underground Conditions: Literature Study. Tampere: VTT Oy.

9. Bisschop, R.; Huang, X.; Niu, H. & Sun, P. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. Haettu 11.3.2020 osoitteesta <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>

10. Andersson, P.; Bengt-Erik, M. & Larsson, F. (2014). Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles, Proceedings from 3rd International Conference on Fires in Vehicles – FIVE 2014. Borås: SP Technical Research Institute of Sweden.

11. Työterveyslaitos. (2017). OVA-ohje: Fluorivety ja fluorivetyhappo. Helsinki: Työterveyslaitos.

12. Hassinen, M. (2019). Litiumioniakustojen palot ja sammutusmenetelmät, Pelastus- ja turvallisuustutkimuksen vuosikirja 2019, artikkelikokoelma. Kuopio: Pelastusopisto.

13. Pelastuslaki 379/2011.

14. Sisäasiainministeriö. (2012). Pelastustoimen toimintavalmiuden suunnitteluohje. Helsinki: Sisäasiainministeriö.

15. Cardou, S.; Delaunay, S.; Deparis, J.; Gentilleau, M.; Gransagne, A. & Pelletier, D. (2018). Guide opérationnel départemental de référence – Interventions d'urgence sur les véhicules. Vienne: Sapeurs-Pompiers de la Vienne.

16. Suosalo, J. (2020). Pelastuslaitoksen varautuminen sähköautopaloihin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa. Ylemmän ammattikorkeakoulututkimuksen opinnäytetyö. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu.



SPEKin tutkimustoiminnassa korostuvat **yhteiskunnan tarpeet ja tiivis yhteistyö** eri sidosryhmien ja tutkimuslaitosten kanssa.

### Uusimpia tutkimuksiamme

- Vuokratilojen turvallisuuden parantaminen teknisin ratkaisuin
- Toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden asumisturvallisuus
- Palovaroittimien ikääntyminen – iän vaikutus pakkauksissa säilytettyjen vanhojen palovaroittimien toimintaan
- Uusien teknologioiden sovellus- ja käyttömahdollisuudet paloturvallisuudessa



# Toistuvan käytännön harjoittelun merkitys organisaation toimijoiden paloturvallisuusosaamisessa – tarkastelussa opettajankoulutus

## TIIVISTELMÄ

Artikkeli tarkastelee opettajaopiskelijoiden ja opettajankouluttajien paloturvallisuusosaamiseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa organisaation jäsenen paloturvallisuusosaamista tarkastellaan taitojen ja riskiperusteisen toiminnan avulla. Tarkastelun keskiössä on harjoittelun merkitys paloturvallisuusosaamisen tasoa arvioitaessa. Tutkimus pohjautuu OPETURVA II -hankkeen laajempaan tutkimusaineistoon, josta tässä raportoidaan turvallisuusharjoitteluun liittyvä osuus. Tutkimuksen tulosten perusteella käytännöllisen harjoittelun merkitys on paloturvallisuuden osaamisen kehittämisessä ratkaisevan tärkeässä roolissa. Tilastollisesti erittäin merkitsevästi voitiin todeta, että osallistuminen käytännölliseen paloturvallisuusopetukseen viimeisen vuoden aikana lisäsi paloturvallisuusosaamisen tasoa sitä enemmän, mitä useampaan harjoitukseen vastaaja oli osallistunut.

## JOHDANTO

Paloturvallisuus on tärkeä osa organisaation turvallisuuskulttuuria, sillä useimmat tulipalot saavat alkunsa ihmisiin liittyvistä tekijöistä (Pelastustoimen taskutilasto 2014–2018). Jotta paloja ja niiden aiheuttamia vahinkoja voidaan ehkäistä, tulee organisaation jäsenten ymmärtää tulipalojen syitä. Voidakseen ylläpitää paloturvallisuutta organisaatiossa tulee henkilökunnalla ja muilla toimijoilla olla kykyä hallita paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä. Oppilaitoksissa henkilökunta on opettamisen ammattilaisia, mutta heidän paloturvallisuustietämyksensä taso on vaihtelevaa. He ovat harvoin turvallisuuden asiantuntijoita, vaikka rehtoreilla, opettajilla ja oppilaitoksen muulla henkilökunnalla on monenlaisia turvallisuuteen liittyviä velvollisuuksia ja vastuita (Somerkoski, Kärki & Lindfors 2019a; Waitinen 2011).

Tässä artikkelissa esitettävä tutkimus on osa laajempaa OPETURVA II -hankkeen tutkimuskokonaisuutta (OPETURVA II, 2020), joissa opettajankoulutusorganisaatioiden, opettajankou-

luttajien ja opettajaopiskelijoiden paloturvallisuusosaamista kartoitettiin puolella Suomen opettajankoulutuslaitoksia. Opettajankoulutuslaitokset muodostavat suurimman organisaation yliopistojen kasvatustieteen tiedekuntien sisällä. Opiskelijoita yhdessä organisaatiossa voi olla useista sadoista muutamaa tuhanteen. Henkilökunnan määrä vaihtelee noin 50:stä pariin sataan. Kyse on siis isoista organisaatioista, joissa liikkuu paljon ihmisiä vaihtelevilla aikatauluilla, sillä yliopistot eivät noudata toiminnassaan virkistyä aikaa. Opettajankoulutuslaitokset edustavat oppilaitoksia siinä mielessä, että organisaation jäsenet ovat pääosin opiskelijoita ja siten noviiseja, sekä opettajankouluttajia, jotka ovat asiantuntijoita omalla alallaan (ks. Lindfors & Somerkoski, 2018). Pääsääntöisesti kukaan ei kuitenkaan ole asiantuntija paloturvallisuuden alalla. Toisaalta erilaisilla organisaatioilla on käytettävissä useita käytännöllisiä oppaita turvallisuusharjoitusten järjestämiseen (esim. Waitinen & Linjala, 2016, Waitinen 2017a, Waitinen 2017b).

Paloturvallisuus on geneeristä osaamista, jota kaikki kansalaiset tarvitsevat. On huomattava, että opettajankouluttajat ja opettajaopiskelijat ovat tässä muiden organisaatioiden jäseniä keskeisemmässä asemassa paloturvallisuusosaamisen levittämisen ja kehittämisen suhteen. Suomessa syttyy vuosittain kouluissa noin sata tulipaloa tai palonalkua (Somerkoski & Ketola 2010). Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastojen mukaan vuosina 2013–2017 Suomessa raportoitiin opetusrakennuksissa 530 tulipalotilannetta eli keskimäärin kaksi paloa tai palovaaraa viikossa (PRONTO). Näin paloturvallisuusosaamiselle on käyttöä opettajan työn arkipäivän käytännöissä sekä proaktiivisena riskiperustaisena toimintana että reaktiivisena toimintana mahdollisessa tulipalotilanteessa. Valmistuvat opettajat vievät opettajankoulutuksessa mahdollisesti omaksumansa paloturvallisuuden tuleviin työpaikkoihinsa ympäri Suomea. Tässä mielessä opettajaopiskelijoiden ja opettajankouluttajien paloturvallisuusosaamisen tarkastelu on erittäin

- ▶ tärkeää. Tässä tutkimuksessa organisaation jäsenen paloturvallisuusosaamista tarkastellaan taitojen ja riskiperusteisen toiminnan avulla. Tarkastelun keskiössä on harjoittelun merkitys paloturvallisuusosaamisen tasoa arvioitaessa.

## OPETTAJAN TURVALLISUUSOSAAMINEN – TAUSTAA JA TEORIAA

Pelastuslain (1 §, 28.12.2018/1353) mukaan pelastustoimen tavoite on ehkäistä onnettomuuksia ennakolta. Ihmisen osuus tässä ennalta ehkäisvässä toiminnassa on keskeinen ja siksi pelastustoitakin pyrkii vaikuttamaan ihmisten käyttäytymiseen onnettomuuksia ehkäisevästi. Pelastusalan onnettomuuksien ehkäisyssä ja siihen liittyvissä tutkimuksissa on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota toiminnan tehokkuuteen ja vaikuttavuuteen (Harinen 2020, Kokki 2017, Sisäministeriö 2016, 2019).

Onnettomuuksien ehkäisyn eräänä keinona toimii turvallisuusviestintä. Turvallisuusviestinnällä tarkoitetaan onnettomuuksien ja niiden vaikutusten vähentämiseen pyrkivää viestintää. Pelastustoimen turvallisuusviestinnän strategiassa (Sisäministeriö 2012) turvallisuusviestintä koostuu turvallisuusneuvonnasta, turvallisuus-koulutuksesta ja turvallisuusvalistuksesta. Tässä turvallisuuskoulutus sisältää tietyille kohderymille tarkoitettujen luennot, oppitunnit tai opetustuokioiden sekä harjoitukset. Onnettomuuksien ehkäisyä tavoitellaan myös Pelastuslaissa (Pelastuslaki 27§, 28.12.2018/1353). Valitettavasti onnettomuuksien ehkäisyyn käytetään usein keinoja, jotka ovat osoittautuneet jopa tehottomiksi. Jo 20 vuotta sitten on esitetty, että käytetyt keinot ovat näennäisiä, eikä niitä tarkastella kriittisesti (Hale, 2000, 400). On mahdollista, että turvallisuuskoulutusta järjestetään usein vain siksi, että koulutuksen järjestäminen tuntuu loogiselta. On epäselvää, lisääkö kohdentamattomalle joukolle kerran vuodessa pidettävä yleisluontoinen ja laaja-alainen turvallisuusluento lopultakaan turvallisuutta siten, että koulutettava osaisi ehkäistä onnettomuuksia tai toimia tarkoituksenmukaisesti hätätilanteessa. Tällaisessa tapauksessa koulutusta järjestämällä turvallisuudesta huolehditaan mekaanisesti ja sääntöperustaisesti. Näin voidaan osoittaa yhteiskunnalle, että organisaatio tai koulutuksen järjestäjä on tehnyt oman vähimmäis- osuutensa asiassa.

Muuttuvassa toimintaympäristössä turvallisuusviestintään tulisi löytää uusia avauksia ja tunnistaa erilaisille kohderyhmille sopivat parhaat ja tulokselliset toimintamallit. Yhtenä vaihtoehtona voisi olla, että irrallisten koulutustilaisuuksien sijasta pelastustoimi ja esimerkiksi opetustoimi pyrkisivät monimuotoiseen kumppanuusmalliin. Tutut toimijat ja vakiintuneet suhteet osapuolien välillä helpottavat yhteistyötä (OPETURVA II; Waitinen 2011). Tällaisia voisivat Waitisen (2017a) mukaan olla esimerkiksi kouluilla järjestetyt vuosittain toistuvat turvallisuusluennot, turvallisuuskävelyt sekä alkusammutus- ja poistumisharjoitukset.

Turvallisuuteen liittyvää tutkimusta on tehty ja julkaistu vuosien mittaan Suomessa lisääntyvässä määrin (esim. Vornanen 2000; Niemelä 2000; Somerkoski 2013; Lindfors ym. 2017; Somerkoski & Kurki 2019; Telaranta 2019). Toisaalta suomalaisten oppilaitosten turvallisuuskulttuuria tai -kasvatusta on tutkittu vielä verrattain vähän (vrt. Lindfors 2012; Lindfors ym. 2016, 2017; Waitinen 2012). Eräissä viimeisimmistä tutkimuksista on tarkasteltu muun muassa perusopetuksen turvallisuuskasvatuksen tavoitteita eri asiakirjoissa (Puolitaival & Lindfors 2019), koulujen ulkopuolisten asiantuntijoiden roolia turvallisuuskasvatuksessa (Somerkoski, Kärki & Lindfors 2019) sekä perusopetuksen oppilaiden turvallisuusosaamista (Lindfors ym. 2017; Somerkoski ym. 2019). Erilaisissa kehittämissuunnitelmissa on tehty selvityksiä ja annettu suosituksia turvallisuuskasvatuksen kehittämiseen (Harinen 2020, Harinen 2018; 2019a–c; Oliva ym. 2019, Lindfors ym. 2020).

Yleisellä tasolla turvallisuusviestinnän ja turvallisuuskasvatuksen tavoitteita on linjattu Pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisyn toimintaohjelmassa (Sisäministeriö 2019).

Pelastusalalla on hyvin tiedostettu, että mitattavat ja konkreettiset tavoitteet turvallisuusviestinnälle ja mahdollisuudet toiminnan vaikuttavuuden arvioimiseen puuttuvat vielä alalta (esim. Harinen 2020; Koivisto ym. 2015; Rekola 2019; Sisäministeriö 2018). Pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisyn ansiokkaassa toimintaohjelmassakaan (Sisäministeriö 2019) ei ole käsitelty ja tarjottu selkeitä vaikuttavuuden arviointiin soveltuvia mittareita. Pelkät aiemmin käytetyt prosenttiluvut tai koulutuksiin osallistuneiden lukumäärät eivät kuvaa toiminnan vaikuttavuutta halutulla tavalla.

Lähinnä Rekola (2019) on käsitellyt turvallisuusviestinnän vaikuttavuuden arviointia pohjautuen muun muassa Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitran soveltamaan iooi-menetelmään (Aistrich 2014).

Waitisen mukaan (2011) oppilaitoksen turvallisuuskulttuuri on kehittynyt, kun organisaatio on kehittynyt vaarojen ja perustehtävän vaatimusten ymmärryksiä; käytännössä hyvin toimiva turvallisuusjohtaminen; kehittynyt ymmärrys turvallisuuden systematisoinnista luonteesta; käytännön teoilla osoitettu turvallisuuden arvostus ja turvallisuustyön osallistava ja yhteisöllinen luonne. Vastaavasti Waitinen toteaa, että heikon turvallisuuskulttuurin kouluissa näyttäisi olevan yleistä, että vaaroista ja riskeistä puhutaan ja ollaan kiinnostuneita vasta läheltä piti -tilanteessa tai kun joku ikävä on jo tapahtunut. Turvallisuutta ei koulussa johdeta systemaattisesti eikä turvallisuuden ylläpitämiseen liity selkeää ohjeistusta. Asioiden annetaan lähinnä vain tapahtua, minkä jälkeen toiminta on luonteeltaan reaktiivista. Turvallisuutta ei arvosteta näkyvästi, ja koulu ei hyödynnä turvallisuustyössään turvallisuusvastaavan resursseja. Turvallisuusvastaava ja muukin turvallisuusorganisaatio on luonteeltaan lähinnä nimellinen. Turvallisuustyö ei ole luonteeltaan osallistavaa ja yhteisöllisyyttä korostavaa eikä verkottunutta.

Waitinen (2011, 206) on kuvannut kehittyvää turvallisuuskulttuuria mallilla, jossa kuvataan turvallisuuskulttuurin keskeisiä elementtejä. Mallissa turvallisuuskoulutukset ja -harjoitukset sekä arjen turvallisuuskeskustelut ovat organisaation muun turvallisuustyön mahdollistava välttämätön edellytys. Turvallisuusjohtamisen kautta organisaatiossa kehittyy ymmärrys turvallisuuden systematisoinnista. Yhteistyön, osaamisen ja muutosten hallinnan kautta edetään henkilöstöä osallistamaan turvallisuustyöhön. Samalla vahvistetaan turvallisuuden arvostusta. Viime kädessä tämä yhteinen turvallisuuden arvostus ja organisaation yhteisöllisyys kannattelevat turvallisuuskulttuuria.

Turvallisuuskulttuuria tarkastellaan siis varsin usein lähinnä organisatorisesta näkökulmasta. Organisatoristen ulottuvuuden lisäksi turvallisuuskulttuuriin kuuluu väistämättä myös psykologinen taso. Turvallisuuskulttuurin psykologiset ulottuvuudet voidaan tiivistää viideksi keskeiseksi ulottuvuudeksi: turvallisuusmotivaatio, ymmärrys oman työn ja organisaation vaaroista, vaaramekanismeista sekä mahdollisista onnettomuuksista, ymmärrys organisaation turvallisuudesta ja organisaatiosta, vastuun organisaation turvallisuudesta sekä työn hallinta (Reiman ym., 2008). Eräs hyvä turvallisuuskulttuurin kriteeri on se, että turvallisuus motivoi ihmisiä. Turvallisuuden on oltava selkeästi tunnistettava, toimintaa ohjaava arvo organisaatiossa. Oppilaitosten turvallisuuteen liittyy vahvana turvallisuutta tuovana tekijänä myös henkinen turvallisuus, jonka tilasta kertoo koko oppilaitoksen ilmapiiri, sekä koettu yhteisöllisyys. Turvallisuuskulttuuri oppilaitoksessa syntyy siitä, että asiat tehdään lainsäädännön edellyttämällä tavalla, turvallisuutta johdetaan ja turvallisuuden eteen tehty työ on johdonmukaista ja systemaattista. Opiskelijalle tämä työ



näky siinä, että hän havaitsee jokapäiväisessä toiminnassaan erilaisia turvallisuuteen liittämään välineitä, toimintatapoja ja asioita (Kaski, Wallin ja Eskola 2017).

Organisaation turvallisuuskulttuurin tasoa voidaankin jossain määrin arvioida sen kautta, minkälaisen arvon turvallisuusorganisaatioissa saa. Kehittyneellä turvallisuuskulttuurin tasolla turvallisuus ymmärretään tärkeäksi tavoitteeksi, joka on edellytyksenä organisaation muiden tavoitteiden saavuttamiselle. Ideaalitilanteessa turvallisuus on organisaatioissa aito arvo, jonka tavoittelemiseen jo itsessään motivoi ja ohjaa ihmisten toimintaa. (Reiman ym. 2008).

Paloturvallisuus on tärkeä osa organisaation turvallisuuskulttuuria, sillä useimmat tulipalot saavat alkunsa ihmisiin liittyvistä tekijöistä (Sroka 2019; Hagen & Witloks 2014). Jotta paloja ja niiden aiheuttamia vahinkoja voidaan ehkäistä, organisaation jäsenten tulee ymmärtää tulipalojen syitä. Terveiden ja hyvinvoinninlaitos (2014) määrittelee henkilöstön turvallisuusosaamista seuraavasti: ”Kokonaisvaltaisen turvallisuuden edistäminen ja varmistaminen opiskeluyhteisössä edellyttää osaamista, ei vain koulun johdolta vaan myös muilta henkilöstöön kuuluvilta. Henkilöstöllä tulisi olla osaamista tapaturmien ehkäisyyn ja varautumiseen liittyen sekä myös tietoa siitä, miten onnettomuus- ja hätätilanteissa toimitaan...” Puolitaipaleen ja Lindforsin mukaan (2019) opettajilta edellytetään pedagogisten valmiuksien lisäksi arjessa myös turvallisuusosaamista, joka määritellään yleisellä tasolla toimintakyvyksi – asenteiden, tietojen, taitojen sekä tahdon kokonaisuudeksi, jolla ennakoidaan vaaroja ja riskejä sekä kohdataan että jälkikohdetaan turvallisuuspoikkeamia. Opettajien peruskoulutuksen hajanainen turvallisuusopetus ei kuitenkaan Lindforsin ja Somerkosken (2016) mukaan tarjoa työn vaatimusten kannalta riittävää turvallisuuspedagogista osaamista. Kokeelliset asetelmat ja onnettomuustutkinta ovat osoittaneet, että hyvin koulutetut henkilöt saavat muut rakennuksessa olevat toimimaan tarkoituksenmukaisesti hätätilanteessa (Hagen & Witloks 2014). Voidakseen ylläpitää paloturvallisuutta oppilaitoksissa opettajilla ja rehtoreilla tulee olla kykyä hallita paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä. Opettajankoulutusyksiköissä toteutetun omatoimisen varautumisen arvioinnin perusteella olisi kiinnitettävä erityistä huomiota omavalvontaan ja opiskelijoiden sekä henkilökunnan turvallisuuskoulutukseen (Lindfors ym. 2020). Uusimmassa tutkimuksessa Leino ja Lindfors (2021) toteavat, että opettajien koulutushenkilöstön ja opiskelijoiden on osallistuttava aktiivisesti organisaationsa turvallisuuden edistämiseen ja ylläpitämiseen. Voidaan olettaa, että paloturvallisuusosaaminen siirtyy valmistuvien opettajien

mukana heidän työpaikoilleen erilaisiin oppilaitoksiin ja organisaatioihin. Näissä oppilaitoksissa työntekijät voivat osaltaan edistää organisaation turvallisuuskulttuuria ja kouluyhteisönsä yleistä hyvinvointia opettajaopinnoissaan saamansa turvallisuuskäsitteiden pohjalta. Tämän vuoksi onkin tärkeää ymmärtää yleisesti opettajaopiskelijoiden ja opettajankouluttajien paloturvallisuusosaamisen liittyä tekijöitä ja kehittämistarpeita.

## TUTKIMUSKYSYMYKSET

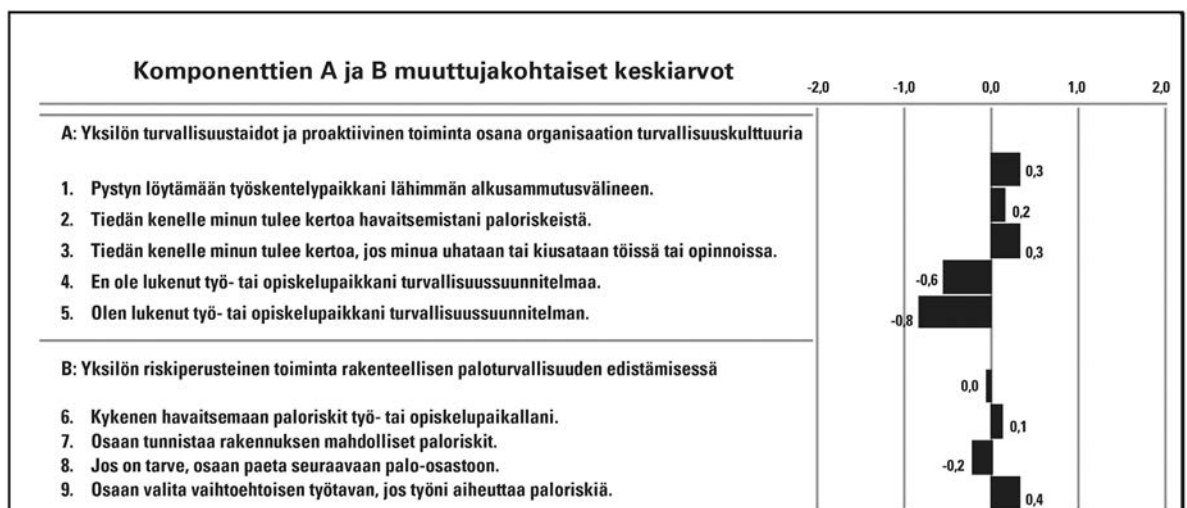
Tällä tutkimus vastaa kahteen tutkimuskysymykseen. Ensimmäinen kohdistuu vastaajien arvioon oman paloturvallisuusosaamisensa tasosta ja toinen paloturvallisuuden käytännöllisen harjoittelun merkityksestä. Kysymykseen ”Mikä käsitys organisaation jäsenillä on omasta paloturvallisuusosaamisestaan?” vastataan tarkastelemalla yhdeksää muuttujaa kahden pääkomponentin avulla (Taulukko 1). Toiseen tutkimuskysymykseen ”Onko toistuvalla paloturvallisuusosaamisen käytännön harjoittelulla vaikutusta organisaation jäsenten turvallisuusosaamiseen?” vastataan tarkastelemalla harjoittelun määrää suhteessa komponenttien keskiarvoiseen paloturvallisuusosaamiseen (Taulukko 2).

## TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusta varten kerättiin tietoa viiden opettajankoulutuskampanuksen opiskelijoilta ja opettajankouluttajilta lukuvuoden 2019–2020 aikana, siis viidestä eri organisaatiosta. Määrällisesti tämä edustaa puolta Suomen opettajankoulutusta antavista organisaatioista. Kyselyyn vastasi 820 opettajankoulutuslaitoksen organisaatioon kuuluvaa henkilöä, joista 696 oli opettajaopiskelijaa ja loput henkilökuntaa. Vastaajista naisia oli 624 ja miehiä 193. Tiedonkeruu toteutettiin Webropol-kyselyllä. Kysymyksessä on OPE TURVA II -hankkeen laajempi tutkimusaineisto, josta tässä raportoidaan turvallisuusharjoitteluun liittyvä osuus. Opeturva II -hankkeen tehtävänä oli kehittää opettajankoulutuslaitosten henkilökunnan ja opettajaopiskelijoiden paloturvallisuusosaamista. Kyselyn avulla tunnistettiin opettajaopiskelijoiden ja opettajankoulutuksen paloturvallisuusosaamista. Kaikissa tutkimuksessa mukana olevissa opettajankoulutusyksiköissä oli osana OPE TURVA II -hankkeen toimintoja järjestetty sekä henkilökunnalle että opiskelijoille mahdollisuus osallistua alkusammutusharjoitukseen ja osassa organisaatioita tarjottiin mahdollisuus osallistua turvakävelyyn. Tutkimuksessa ei kerätty tietoa poistumisharjoitusten järjestämisestä tutkimuksessa mukana olevissa organisaatioissa.

Harjoittelun vaikutusta henkilön turvallisuusosaamiseen tutkittiin yhdeksän muuttujan avulla (Taulukko 1), joita vastaajat ar-

TAULUKKO 1. Yksilön turvallisuustaidot, proaktiivinen ja riskiperusteinen toiminta osana organisaation turvallisuuskulttuuria ja rakenteellisen paloturvallisuuden edistämistä.



- voivat likert-asteikolla: täysin eri mieltä, eri mieltä, ei samaa eikä eri mieltä, jokseenkin samaa mieltä ja täysin samaa mieltä. Lisäksi vastaaja saattoi valita vaihtoehdon en osaa vastata/en ymmärrä kysymystä. Ei samaa eikä eri mieltä -vaihtoehto kuvaa neutraalia suhtautumista (0-kohta. Taulukko 1).

Kaikkia aineiston 26 muuttujaa tarkasteltiin pääkomponenttianalyysin avulla (KMO ja Bartlettin testi = 0,805). Tutkittavat muuttujat (PCA yli 0,40) ryhmittäytyivät tässä analyysissä kahdeksi komponentiksi, jotka nimettiin A: yksilön turvallisuustaidot ja proaktiivinen toiminta osana organisaation turvallisuuskulttuuria ja B: yksilön riskiperusteinen toiminta rakenteellisen paloturvallisuuden edistämiseksi (Taulukko 1).

## TULOKSET

Yksilön turvallisuustaitoja ja proaktiivista toimintaa osana organisaation turvallisuuskulttuuria tarkasteltaessa (komponentti A) muuttujien keskiarvo vaihteli -0,8:n ja 0,3:n välillä vaihteluvälillä ollessa välillä -2,0 ja 2,0. Kaikkiaan organisaation jäsenet eivät pitäneet turvallisuustaitojaan ja proaktiivista toimintaansa erityisen hyväntasoisena (Taulukko 1). Keskiarvoisesti pääosalla vastaajista oli positiivinen käsitys siitä, että he kykenevät löytämään opiskelu- tai työpaikastaan alkusammutusvälineet. Samoin vastaajilla oli positiivinen käsitys siitä, että he tiesivät, kenelle turvallisuuspoikkeamista raportoidaan. Kuitenkin vain osa vastaajista oli lukeutunut organisaationsa turvallisuussuunnitelman. Komponenttia keskiarvoisesti tarkastellen 39 prosentilla vastaajista oli kokonaisuutena positiivinen käsitys omista turvallisuustaidoistaan ja proaktiivisesta toiminnastaan, kun 55 prosentilla se oli negatiivinen. Negatiivisesti vastanneet eivät siis arvioineet omia turvallisuustaitojaan ja proaktiivista toimintaansa riittäväksi tarkasteltujen muuttujien suhteen.

Yksilön riskiperusteista toimintaa rakenteellisen paloturvallisuuden edistämiseksi tarkasteltaessa (komponentti B) muuttujien keskiarvo vaihteli -0,2:n ja 0,4:n välillä. Muuttujat 'osaan tunnistaa paloriskejä työ- tai opiskelupaikallani' ja 'osaan tunnistaa paloriskejä rakennuksessa', olivat neutraalilla tasolla. Vastaajat totesivat osaavansa jossain määrin löytää paloturvallisen työskentelytavan huomattavasti työskentelyn aiheuttavan palovaaraa. Kysyttäessä vastaajan osaamista paeta tulipalon sattuessa seuraavaan palo-osastoon vastaukset jäivät negatiivisiksi. Komponenttia keskiarvoisesti tarkastellen 46 prosentilla vastaajista oli kokonaisuutena positiivinen käsitys omasta riskiperusteisesta toiminnastaan rakenteellisen paloturvallisuuden edistämiseksi. Vastaavasti 42 prosentilla käsitys oli negatiivinen. Ne koehenkilöt, joiden vastaukset jäivät negatiivisiksi eivät siis katsoneet osaavansa käyttäytyä riskiperusteisesti paloturvallisuuden suhteen.

Kysyttäessä, kuinka monta kertaa vastaaja oli osallistunut turvallisuuden käytännön harjoitteluun viimeisen vuoden aikana (Taulukko 2) vastaajan oli mahdollista valita vaihtoehdoista ei ollenkaan, kerran, kaksi kertaa, kolme kertaa tai neljä kertaa. Vertailtavat ryhmät muodostuivat turvallisuusharjoitteluun osallistumisen mukaan. Vastaajista 50 prosenttia (n=406) ei ollut osallistunut ollenkaan turvallisuusharjoitteluun vastausta edeltävän vuoden aikana. Kerran turvallisuutta oli harjoitellut 33 prosenttia (n=268) organisaatioiden jäsenistä. Kaksi kertaa oli osallistunut käytännön harjoitteluun 13 (n=106) prosenttia, kolme kertaa neljä prosenttia (n=30) ja neljä kertaa reilu yksi prosentti (n=10) opettajankoulutusorganisaatioiden jäsenistä.

Tämän jälkeen tarkasteltiin, oliko turvallisuusharjoituksiin osallistumisen määrän suhteen löydettävissä tilastollisesti merkitseviä eroja komponenttien A ja B osalta (Taulukko 2). Mikäli vastaaja oli ilmoittanut osallistuneensa turvallisuusharjoitteluun kerran tai ei ollenkaan, hän arvioi omat turvallisuustaitonsa ja pro-

## Turvallisuusharjoituksiin osallistuminen (Vuoden aikana)

Komponentit: vaihteluväli – 2,0 -2,0		A	B
Ei iainkaan	(n = 406)	-0,3	-0,1
Kerran	(n = 268)	-0,1	0,1
Kahdesti	(n = 106)	0,2	0,3
Kolme kertaa	(n = 30)	0,4	0,3
Neljä kertaa	(n = 10)	0,9	0,5
Kruskal-Wallis	H p	< .001	< .001

TAULUKKO 2. Organisaation jäsenten paloturvallisuusosaamisen erot turvallisuusharjoituksiin osallistumisen jälkeen.

aktiivisen toimintansa (komponentti A) negatiivisesti tarkastellun omaa riskiperusteista toimintaansa rakenteellisen paloturvallisuuden edistämiseksi (komponentti B). Jos vastaaja oli osallistunut turvallisuusharjoitteluun kaksi kertaa tai enemmän, hänen käsityksensä omasta turvallisuusosaamisestaan vahvistui molempien komponenttien osalta. Ryhmien välisiä eroja tarkasteltiin Kruskal-Wallis testin avulla. Mitä useammin vastaaja oli osallistunut viimeisen vuoden aikana käytännölliseen turvallisuusharjoitteluun, sitä positiivisemmin hän arvioi omia paloturvallisuusosaamistaan. Ryhmien väliset erot olivat osittain suuria, osittain keskimääräisiä (vaihteluväli 5–28 %). Erot olivat systemaattisia ja tilastollisesti erittäin merkitseviä (p < .001).

## JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin organisaation jäsenten paloturvallisuusosaamista opettajankoulutuksen kontekstissa. Aiemmin asiaa ovat tutkineet muun muassa Puolitaival ja Lindfors (2019), Lindfors ym. (2020) sekä Lindfors ja Somerkoski (2016). Waitinen (2011) on tutkinut helsinkiläisten kouluissa työskentelevien opettajien turvallisuusosaamista ja todennut siinä olevan paljon kehitettävää. Tähän tutkimukseen osallistui 820 vastaajaa (N=820). Joten aineistoa voidaan pitää opettajankoulutusorganisaatioiden osalta kohtuullisen laajana. Aineistoa tarkasteltiin yksilön turvallisuustaitojen, proaktiivisen ja riskiperusteisen toiminnan osalta osana organisaation turvallisuuskulttuuria ja rakenteellisen paloturvallisuuden edistämistä (Taulukko 1). Erityisenä tarkastelun kohteena oli käytännöllisen harjoittelun vaikutus yksilön paloturvallisuusosaamiseen.

Tutkimuksella on kaksi päätulosta. Ensinnäkin turvallisuusosaamisen komponenttien A ja B osalta 39 ja 46 prosenttia vastaajista arvioi omaa osaamistaan positiivisesti. Vastaavasti 55 ja 42 prosenttia vastaajista arvioi oman osaamisensa negatiivisesti eli heikoksi. Kokonaisuutena keskiarvoisesti tarkastellen opettajankouluttajien ja opettajaopiskelijoiden paloturvallisuusosaaminen ei ollut kuitenkaan näiltä osin mitenkään vahvaa (Taulukko 1), eikä se ole riittävää opetusalan ammattilaiselle tai ammattiin valmistuvalle. Tutkimus siis toteaa sen, mitä on aiemmin todettu työssä toimivien opettajien osalta (Waitinen 2011). Tutkimuksen tulosten perusteella käytännöllisen harjoittelun merkitys on sen sijaan paloturvallisuuden osaamisen kehittämisessä ratkaiseva (ks. Myös Hagen & Witloks 2014). Tilastollisesti erittäin merkitsevästi voitiin todeta, että osallistuminen käytännölliseen paloturvallisuusopetukseen viimeisen vuoden aikana lisäsi paloturvallisuusosaamisen tasoa sitä enemmän, mitä useampaan harjoitukseen vastaaja oli osallistunut (Taulukko 2).

Käytännöllisesti kaikki maamme kuusivuotiaat lapset osallistuvat esiopetukseen ja 7–16-vuotiaat perusopetukseen. Jo tässäkin

mielessä tulevien ja jo työssä olevien opettajien kattava paloturvallisuusosaaminen on tärkeää. Koulut tekevät yhteistyötä maamme 22 aluepelastuslaitoksen kanssa, mikä mahdollistaisi opettajien paloturvallisuusosaamisen kehittämisen yhdessä koulun ulkopuolisten asiantuntijoiden kanssa. Pelastuslaitoksille velvoite yhteistyön tekemiseen tulee osaltaan Pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisyn toimintaohjelmasta (Sisäministeriö 2019). Yhteistyöllä voidaan olettaa olevan suotuisaa vaikutusta myös oppilaiden saamaan paloturvallisuusopetukseen. Tulosten perusteella pelastuslaitosten tulisi tehdä tiivistä yhteistyötä kaikkien opettajakoulutusyksiköiden kanssa, jotta opettajaopiskelijoiden ja opettajankouluttajien paloturvallisuusosaamisen tasoa voitaisiin nostaa. Suositus ei ole uusi (Lindfors ym. 2020), mutta tämä tutkimus osoittaa kiistattomasti käytännön harjoittelun merkityksen.

Osana Opeturva II -hankkeen toimintaa järjestettiin mukana olleissa opettajankoulutuslaitoksissa käytännöllistä koulutusta esimerkiksi alkusammutusharjoituksin ja turvallisuuskävelyin. Hälyttävää on kuinkin se, että 820 vastaajasta puolet ei ollut osallistunut yhteenkään käytännölliseen harjoitukseen kyselyyn vastaamista edeltävän vuoden aikana. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että joissakin mukana olleissa yksiköissä ei ollut järjestetty yhtään poistumisharjoitusta kuluneen vuoden aikana tai ainakaan huolehdittu, että jokainen olisi niihin osallistunut. Kokonaisuutena siis puolet kyselyyn vastanneista ei ollut osallistunut yhteenkään harjoitukseen ja 33 prosenttia oli osallistunut yhteen harjoitukseen. Siten 83 prosenttia vastaajista oli osallistunut alle kahteen harjoitukseen viimeksi kuluneen vuoden aikana. Kuitenkin Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto on suosittanut jo lähes kymmenen vuotta sitten, vuonna 2012, että oppilaitoksissa tulisi järjestää vähintään kaksi poistumis- tai sisällesuojautumisharjoitusta vuositain. Pitäisikö tämä suositus ulottaa myös opettajankoulutuslaitoksiin (ks. myös Lindfors ym., 2020; Leino & Lindfors 2021)? Joka tapauksessa on mahdotonta hyväksyä, että tulevien opettajien paloturvallisuusosaaminen on heikkoa.

Tutkimustuloksen luotettavuutta arvioitaessa katse kääntyy vastaajiin ja siihen, kuinka todenmukaisesti tai keskittyneesti he vastasivat kyselyyn. Voidaan arvioida, että alle viidesosa kaikista kyselylinkin saaneista vastasi kyselyyn. Tämä tuottaa kyselytutkimukselle kohtuullisen vastausprosentin. On kuitenkin todennäköistä, että vastaajat ovat pitäneet paloturvallisuutta tärkeänä, koska ovat päättäneet osallistua vapaaehtoiseen tutkimukseen. Siten tutkimustulos saattaa piirtää paloturvallisuusosaamisesta paremman kuvan kuin se todellisuudessa onkaan. Muuttujan 'osaan paeta tulipalon sattuessa seuraavaan palo-osastoon' vastaukset jäivät negatiiviseksi (Taulukko 1). Tämä merkitsee mahdollisesti sitä, että vastaajat eivät ole ymmärtäneet palo-osaston käsitettä ja edelleen, että keskeiset paloturvallisuuden peruskäsitteet olivat suurelta osalta vastaajista vieraita.

Tutkimustulosten yleistettävyyttä arvioitaessa tulee ottaa huomioon, että puolet Suomen opettajankoulutusyksiköistä osallistui tutkimukseen. Pääosa vastaajista oli kuitenkin kahden opettajankoulutusyksikön opiskelijoita ja henkilökuntaa. Nämä organisaatiot olivat erittäin aktiivisia OPETURVA II -hankkeen partnereita. Kohtuullisen korkea vastaajamäärä (N=820) mahdollistaa tuloksen yleistämisen opettajankoulutuksen kontekstiin. Tulosten perusteella jää kuitenkin epäselväksi, onko tulos todellisuutta parempi ja paloturvallisuusosaaminen opettajankoulutuksen kontekstissa nyt esitettyä heikompa. Voidaan myös arvioida, voitaisiinko tulosta yleistää muihin Suomen organisaatioihin. Tuskin paloturvallisuusosaaminen on muissakaan organisaatioissa kovin hyvällä tasolla, jos se ei ole sitä opettajankoulutuksessa, jonka tehtävänä on tarjota opettajille osaamista tulevaisuuden taitojen opettamiseen perusopetuksessa. Yleistettävyyttä arvioitaessa on huomatta-

va, että käytännöllisen harjoittelun merkitys turvallisuusosaamisen tason parantajana osana turvallisuuskulttuuria (esim. Reiman 2008; Waitinen, 2011) oli tilastollisesti erittäin merkitsevä. Tämän tutkimustuloksen voi arvioida olevan suoraan yleistettävissä kaikkiin organisaatioihin. Asian varmistamiseksi tarvitaan kuitenkin jatkotutkimusta muissa organisaatioissa. Lisäksi tarvitaan tutkimusta, jossa paloturvallisuuden osa-alueisiin keskityään useampien muuttujien ja pääkomponenttien avulla.

Tutkimustulosten sovellettavuutta voidaan tarkastella myös pelastusalalla julkaistujen organisaatioiden turvallisuusystyötä ohjeistavien turvallisuusoppaiden kautta. Waitinen ja Linjala ovat Suomen Palopäällystöliiton julkaisemassa Poistumisturvallisuusoppaassa (Waitinen & Linjala, 2016, 29) tuoneet esiin vuosikellomallin osana organisaatioiden turvallisuusohjeistusten kokonaisuutta ja turvallisuuskulttuurin kehittämistä. Vuosikellomalli pohjautuu vahvasti behavioristiseen oppimiskäsitykseen. Tähän oppimiskäsitykseen kuuluu ajatus siitä, että opetettava asia jaetaan pienempiin osatekijöihinsä, jolloin oppiminen etenee asia kerrallaan yksinkertaisista asioista monimutkaisiin (Tynjälä 2002).

Waitisen ja Linjalan (2016) mukaan ajoittamalla erilaiset turvallisuusohjeistukset sopivasti limittäin poistumisharjoitusten kanssa organisaatio kohentaa vastustuskykyään erilaisten häiriö- ja vaaratilanteiden varalta. Vuosikellomallissa turvallisuusperhehditys uusille opettajille ja oppilaille on syytä ajoittaa heti työvuoden alkuun. Turvallisuuskävelyt ovat toiminnallinen tapa toteuttaa turvallisuuskoulutusta (Lindfors ja ym 2021). Waitinen on esitellyt turvallisuuskävelyn toteuttamista menetelmänä tarkemmin Suomen Palopäällystöliiton julkaisemassa Turvallisuuskävelyoppaassa (Waitinen, 2017b). Myös Lindfors, Hilander, Lahtivirta ja Somerkoski (Lindfors ym. 2021) totesivat pedagogisessa kontekstissa toteutettavan turvallisuuskävelyn olevan oppimisympäristön turvallisuuskulttuuria kehittävä ja toiminnallinen turvallisuuskasvatuksen menetelmä. Tarkoituksenmukaisen turvallisuuskävelyn ensisijainen tarkoitus on tutustuttaa osallistujat oppimisympäristöön ja sen turvallisuuskulttuuriin. Turvallisuuskävely antaa osallistujille myös valmiuksia erilaisissa vaara- ja hätätilanteissa toimimiseen ja avun hälyttämiseen.

Esitetyssä vuosikellossa esiin nostetut työpisteen turvallisuustasokartoitukset kannattaa tehdä yhdessä esimiehen tai organisaation turvallisuusvastaavan kanssa. Poistumisharjoittelun Waitinen ja Linjala (2016) ovat jakaneet neljään eri vaiheeseen I–IV. Näistä vaiheet I ja II tähtäävät poistumisharjoitteluun liittyvien turvallisuustietojen kartuttamiseen ennen vaiheiden III ja IV kokonaisuusharjoituksia. Harjoituksista kertyneiden havaintojen ja kokemusten pohjalta Waitinen ja Linjala (2016) näkevät tärkeänä toteuttaa myös organisaation turvallisuusohjeiden ja poistumissuunnitelmien päivityksen. Päivitys tulisi tehdä vähintään kerran vuodessa ja ohjeiden tulisi olla saatavilla ja näkyvillä ilmoitustauluilla tai mobiililla alustalla. Muut turvallisuusohjeistukset kuten ensiapukoulutukset ja alkusammutuskoulutukset sekä erilaisten uhkien varalta toteutettavat sisälle suojautumisen harjoittelut istuvat myös mainiosti vuosikellomalliin. Säännöllisesti toistuvat turvallisuusaiheiset opetustuki- ja harjoitukset pyrkivät tässä mallissa tuomaan turvallisuusystyön automaattiseksi osaksi arjen koulutyötä.

## LÄHDELUETTELO

Lähdeluettelo saatavissa: [https://drive.google.com/file/d/1pjtVWzyiBF7qqy\\_Ykagx5cJGD3B5hcT/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1pjtVWzyiBF7qqy_Ykagx5cJGD3B5hcT/view?usp=sharing) [27.5.2021]

Lue QR-koodi kännykällä.



# Suomalaisten turvallisuusmielipiteet pelastustoimen alalta – empiirinen tarkastelu

## Tiivistelmä

Osana tutkimushanketta *Turvallisuuskulttuurit yhteiskunnan muutoksessa* hankittiin Suomen aikuisväestön turvallisuusajattelua luotaava kyselyaineisto, joka on toisaalta poikkileikkaus näkemyksistä vuonna 2019 ja toisaalta perusta mahdolliselle pitkittäisanalyysille muun, uuden aineiston kanssa. Erityistavoitteena on hahmottaa turvallisuusmielipiteitä ja turvallisuuskäyttäytymistä yhteydessä ihmisten taustaan, elämäkokemuksiin ja väliintulevana muuttujana maailmankuvan rationaalisuuteen, luottamukseen ja riskinottoon.

Tutkimuselosteessa kuvataan aineiston perustietoja, ei juurikaan kausaalisuhteita. Havaintoja nyt ovat: vahva luottamus omaan arkiturvallisuuteen, pelastustoimeen, hätäkeskuksiin ja poliisiin sekä palovaroittimiin ja väestönsuojiiin, halukkuus turvallisuuskoulutukseen, toisaalta merkittävän vähemmistön ”fatalismi” turvallisuustoimissa ja onnettomuuksien ehkäisyssä.

## TURVALLISUUSAJATELUN ANALYYSIA – TUTKIMUSAINEISTON ESITTELY

### Turvallisuuskulttuurien olemus

Turvallisuus on määrittely tilaksi, jossa uhat ja riskit ovat hallittavissa, tai tunteeksi siitä, että ne ovat hallinnassa [1]. Tässä määritelmässä nähdään turvallisuudesta sekä objektiivinen että subjektiivinen puoli. Timo Airaksisen mukaan turvallisuus on tila, jossa ei ole olemassa vaaraa [2], jolloin turvallisuus on vaaran läsnäolon negaatio. Airaksinen esittää, että turvallisuudessa on erotettavissa objektiivinen ja subjektiivinen samalla tavoin kuin uhassa, jonka objektiivinen muoto on tilastollinen arvio tai muu pätevä toteaminen vahingon mahdollisuudesta ja subjektiivinen mikä tahansa asia, jota ihminen tai ihmisryhmä pelkää [3]. Lahikaisen mukaan turvallisuus on noussut identiteetin ja elämisen keskiöön jälkiodernissa yhteiskunnassa, jossa koetaan kaaosta, vaihtoehtojen runsautta ja järjestyksen puutetta. Vaikka elämässä pyritään kaaoksen hallintaan ja eroon turvattomuudesta, se ei aina ole mahdollista.

Turvattomuuden tunne voi olla seurausta omasta riittämättömyyden tunteesta ja ulkoisesta paineesta. Turvattomuus kuuluu elämään, ja sen selvittämiseen on vain osaratkaisuja. [4]

Tutkimuksessa *Turvallisuuskulttuurit yhteiskunnan muutoksessa* hahmotetaan muuttuvan arvomaailman yhteyttä ihmisten turvallisuuskäsityksiin: odotuksiin, pelkoihin, tietoihin ja omiin kykyihin hallita uhkatilanteet. Väliin tuleviksi ja selittäviksi muutujiksi oletetaan yksilön voimavarat kohdata yhteiskunnan muutos sekä maailmankuvan rationaalisuus.

Turvallisuuskulttuuri määritellään tässä tutkimuksessa aikaan ja yhteiskunnalliseen tilanteeseen sidonnaisesti uskomuksien ja toimintamallien kokonaisuudeksi, jossa on pysyvyyttä (perinteet ja kulttuurin arvot erityisesti hitaasti muuttuvissa yhteiskunnissa) ja muutosta (teknologia, tiedonvälitys ja koulutus erityisesti nopeasti muuttuvissa yhteiskunnissa). Turvallisuuden tavoittelu on pyrkimystä hyvään ja ennustettavaan elämään.

### Kyselytutkimuksen aineisto

Tutkimuksen ”Turvallisuuskulttuurit yhteiskunnan muutoksessa” aineisto kuvaa suomalaisten turvallisuusnäkemyksiä (arvoja, mielipiteitä ja käyttäytymisvalmiuksia). Aineiston keräsi Taloustutkimus Oy kyselynä heinä–elokuussa 2019. Palosuojelurahasto on rahoittanut pääosan aineiston hankinnasta ja Väestönsuojien rakentamisyhdistys ry väestönsuojia koskevia kysymyksiä. Kirjoittaja on suunnitellut tutkimuksen ja aineiston analyysin. Aineistosta on julkaistu osaraportti [5].

Kyselyaineiston 1020 vastaajaa edustavat tilastollisesti 15–79-vuotiaita suomalaisia (lukuun ottamatta Ahvenanmaan maakuntaa). Otoksen vastaajien sukupuolijakauma oli 50/50 %. Alle 25-vuotiaita oli 9 %, 25–34-vuotiaita 22 %, 35–49-vuotiaita 23 %, 50–64-vuotiaita 25 % ja 65–79-vuotiaita 20 %. Perusasteen koulutettuja oli 11 %, keskiasteen 52 ja korkea-asteen 37 %. Tuloksien virhemarginaali on ±3 prosenttiyksikköä 95 prosentin luotettavuustasolla.

Kysymyksiä oli noin sata taustatiedot mukaan luettuina. Laajimpia aihealueita olivat elämän turvallisuus ja onnellisuus, rationaalisuus ja riskinotto, pelon kohteet, turvallisuustoimien tarpeellisuus, luottamus yhteiskunnan toimijoihin, voimavarojen käyttö turvallisuuden hyväksi, onnettomuuskokemukset, turvakoulutus ja väestönsuojien merkitys.

### Arvio oman elämän turvallisuudesta ja onnellisuudesta

Abraham Maslowin teoriasta johdettu suppea itsearviointi on tutkimuksessa yksi ”selittävä tekijä” turvallisuuskäytöksille. Maslowin mukaan tarpeet toteutuvat hierarkkisesti ylempien tarpeiden edellyttäessä alempien tarpeiden tyydyttymistä, esimerkiksi: nälkäinen ei voisi täysin toteuttaa itseilmaisuaan [6].

Arkipäivän turvallisuuden arvio on luottavampi kuin muissa asioissa: samanlaisessa tai paremmassa asemassa kuin ”tuntemansa ihmiset” kokee olevansa 97 %. Vain 3 % pitää asemaansa jonkin verran huonompana, eikä kukaan paljon huonompana.

### Rationaalisuus ja riskinotto

Tutkimuksen hypoteeseja on yhteys rationaalisuuden ja turvallisuuskäytöksien tai -asenteiden välillä.

Turvallisuusaiheissa lähes joka kolmas (30 %) uskoo, että onnettomuutta on vaikea estää, ”jos se on tullakseen”. Täysin eri mieltä asiasta on joka viides (19 %). Vanhimmissa vastaajaryhmissä täysin eri mieltä asiasta on paljon useampi kuin nuoremmasta joukosta.

Lähes kaksi viidestä (38 %) on ainakin jokseenkin samaa mieltä sen väitteen kanssa, että on vaikea elää ottamatta välillä suuria riskejä. Täysin eri mieltä tästä on 14 %. Vanhin vastaajaryhmä nuorempia enemmän täysin eri mieltä tämän väittämän kanssa.

Ajatuksen, että elämä on nykyisin liian turvallisuuskeskeistä, hyväksyy ainakin jossain määrin joka neljäs (25 %). Täysin eri mieltä tästä on 18 % kaikista, miehistä 13 % ja naisista 22 %. Ja väittämän ”Ihmisiä holhotaan liikaa turvallisuusasioissa säädöksillä ja

	Parempi	Huonompi	Keskiarvo
<b>Taloustilanne (perustarve)</b>	30	29	2,98
<b>Arkipäivän turvallisuus</b>	28	3	3,28*
<b>Ihmisuhteet</b>	22	28	2,94**
<b>Hyväksyntä ja arvostus</b>	18	20	2,97
<b>Elämän kiinnostavuus</b>	30	21	3,11
<b>Onnellisuus (ei Maslow)</b>	31	18	3,18

Taulukko 1: Turvallisuus ja onnellisuus verrattuna muihin. Kaikki vastaajat (yhdistetty luokat paljon ja jonkin verran), prosenttiosuus muihin verrattuna. Keskiarvossa 5: paljon parempi, 1: paljon huonompi. \*korkein arvo, \*\*matalin arvo.

viranomaismääräyksillä” hyväksyy ainakin jossain määrin kaksi viidestä (39 %), ja täysin eri mieltä on 22 %.

Joka viides (21 %) hyväksyy täysin tai jokseenkin väittämän, että Suomessa olisi kymmenen vuoden kuluttua turvallisempaa kuin nyt. Lähes yhtä suuri osa (17 %) on täysin eri mieltä tämän näkemyksen kanssa. Naisten ja miesten välillä ei ole nähtävissä eroja. Maanpuolustustiedotuksen suunnittelukunnan aikasarjatutkimuksien lähes vastaavassa kysymyksessä (viiden vuoden aikaulottuvuus) naisten huoli tulevaisuudesta on useimmiten selvästi suurempi kuin miesten, vaikkakin vuoden 2020 tutkimuksessa erot ovat lievästi toisen suuntaisia [7].

### Asioiden tarpeellisuus turvallisuudelle

Vastaajilta pyydettiin arvio 14 kohteesta: ”Kuinka tarpeellisia tai tarpeettomia seuraavat asiat mielestäsi ovat turvallisuudelle?” Arvioituidut asiat eivät ole täysin vertailukelpoisia.

Tarpeellisuusarviot ovat myönteisimmillään henkilöauton turvaväissä ja palovaroitimessa, joissa myös ”välttämätön” -arvioita on enemmän. Seuraavaksi eniten tarpeellisuusarvioita on ve-

Taulukko 2: Rationaalisuus- ja turvallisuusväittämät: auktoriteettien epäily, fatalismi, riskinotto. Prosenttiosuus vastaajista, luokat ”jokseenkin samaa mieltä” ja ”täysin samaa mieltä” yhdistettynä.

Väittäjä	Kaikki	Naiset	Miehet	Ikä 25–34v	Ikä 65–79v
<i>Tiedemiehet, asiantuntijat eivät usein tiedä enempää kuin tavalliset ihmiset.</i>	18	38	35	41	38
<i>Tieteellinen maailmankuva on hyvän elämän perusta.</i>	70	7	3	3	6
<i>Ilmastomuutoksesta puhutaan liikaa.</i>	41	45	23	33	36
<i>Ei ole täysin varmaa, että ihminen on käynyt Kuussa.</i>	13	59	60	45	65
<i>Rokotteiden turvallisuutta on syytä epäillä.</i>	17	53	44	40	67
<i>Tupakanpolton vaarallisuutta liioitellaan.</i>	9	73	65	61	74
<i>Kaikki tuntuu olevan sattumaa.</i>	22	32	35	27	29
<i>Sattuma ja onni ovat ratkaisevia elämässä.</i>	42	15	16	13	27
<i>Uskon vahvasti kohtaloon.</i>	21	29	37	32	30
<i>Uskon ihmistä suurempaan voimaan.</i>	40	25	34	31	20
<i>Lotto on hyvä mahdollisuus rikastua.</i>	12	56	62	58	60
<i>Horoskoopit kertovat usein totuuden.</i>	4	85	85	74	90
<i>Jos onnettomuus on tullakseen, sitä on vaikea estää.</i>	30	18	20	16	27
<i>Elämä on nykyisin liian turvallisuuskeskeistä.</i>	25	22	13	15	18
<i>Ihmisiä holhotaan liikaa turvallisuusasioissa.</i>	39	21	22	17	23
<i>On vaikea elää ottamatta välillä suuriakin riskejä.</i>	38	14	13	7	20
<i>Elämä Suomessa on 10 v:n kuluttua turvallisempaa kuin nyt.</i>	21	17	17	20	15

- *neen pelastusliiveistä, nuohouksesta, liikenteen nopeusrajoituksista ja kotivakuutuksesta*, jotka saavat samalla tavoin runsaasti ”välttämätön”-arvioita.

Oman tasonsa muodostavat *ensiaputaidot tavallisille kansalaisille, palotarkastus, pyöräilykypärä ja alkusammutuskoulutus tavallisille kansalaisille*, joissa ”välttämätön”-arvion esittää suunnitteen joka kolmas (paitsi alkusammutuskoulutuksessa). Seuraavina ovat *väestönsuojat, linja-auton turvavyöt ja kodin pelastussuunnitelma*, joista väestönsuojaa pitää välttämättömänä lähes joka kolmas, linja-auton turvavyötä lähes joka neljäs ja pelastussuunnitelmaa joka kahdeksas.

Vähiten suosiota saavat *peltipoliisit*, jotka jakavat mielipiteitä. Niitä pitää välttämättöminä 13 % ja yhtä suuri osuus täysin turhina. Lähes kolmannes arvioi peltipoliisit *joko ei kovin tarpeelliseksi tai täysin turhiksi*, kun muissa asioissa tällainen torjuva arvio on enintään 15 prosentilla vastaajista.

## Luottamus yhteiskunnan turvallisuus- ja muihin toimijoihin

Vastaajat arvioivat luottamustaan 12:een ”suomalaisen yhteiskunnan turvallisuustoimijaan” vaihtoehdoin ”*luotan täysin*”, ”*luotan jossain määrin*”, ”*en luota lainkaan*” ja ”*en osaa sanoa*”. Taulukossa 4 esitetään vastauksien prosenttijakauma keskiarvon järjestyksessä.

Luotetuimmaksi nousevat turvallisuusviranomaiset. Pelastustoimen (muodossa ”palokunnat ja muu pelastustoimi”) saama luottamus on korkein 99 %; täyden luottamuksen antaa useampi kuin kolme neljästä, eikä kukaan ilmaise epäluottamusta. Hätäkeskukseen luottaa 97 %, runsaasti yli puolet täysin, ja vain joka sadas ei luota lainkaan. Poliisiin luottaa 94 %, yli puolet (53 %) luottaa täysin; vain yksi kahdestakymmenestä ei katso luottavansa lainkaan poliisiin. Puolustusvoimiin luottaa 93 %, 45 % täysin ja 48 %; harvempi kuin yksi kahdestakymmenestä ei luota lainkaan. Turval-

	Välttämätön	Tarpeellinen	Melko tarpeellinen	Ei kovin tarpeellinen	Täysin turha	Ei osaa sanoa
Henkilöauton turvavyöt	82	15	2	0	0	1
Palovaroitin	76	20	4	0	0	1
Veneen pelastusliivit	58	34	6	1	0	1
Nuohous	48	34	10	2	0	6
Liikenteen nopeusrajoitukset	50	32	10	5	1	2
Kotivakuutus	47	34	14	3	1	1
Ensiaputaitojen opetus	29	51	17	1	0	1
Palotarkastus	30	43	18	4	0	3
Pyöräilykypärä	34	39	17	9	1	1
Alkusammutuskoulutus	19	55	20	4	0	2
Väestönsuojat	28	34	22	12	2	3
Linja-auton turvavyöt	23	38	24	12	1	2
Kodin pelastussuunnitelma	13	40	28	14	1	4
Liikenteen valvontakamerat	13	32	23	17	13	2

Taulukko 3: Asioiden tärkeys turvallisuudelle (taulukossa asetettiin ”tarpeellisuus”-järjestyksessä), prosenttiosuus vastaajista.

Arvioitu kohde	Luottaa täysin	Luottaa jossain määrin	Ei luota lainkaan	Ei osaa sanoa
Palokunnat ja muu pelastustoimi	77	22	0	1
Hätäkeskukset	57	40	1	1
Poliisi	53	41	5	1
Puolustusvoimat	45	48	4	3
Lääkärit	34	63	3	1
Tasavallan presidentti	43	48	7	2
Tavallinen suomalainen	10	80	6	4
Oikeuslaitos	25	61	13	1
Media	4	68	24	4
Euroopan unioni	6	60	26	8
Eduskunta	6	60	28	6
Uskonnon sanoma	8	22	56	14

Taulukko 4: Luottamus yhteiskunnan toimijoihin. Prosenttiosuus vastaajista.

Kohde	Kaikki	Naiset	Miehet	15–34 v	35–49 v	50–64 v	65–79 v	Korkeasteen koulutus
Palokunnat/pelastus	77	76	78	73	80	82	76	76
Hätäkeskukset	57	58	56	53	58	59	58	60
Poliisi	53	55	52	47	48	56	60	51
Puolustusvoimat	45	39	50	33	42	46	58	45
Lääkärit	34	29	38	33	27	33	40	36

Taulukko 5: Luottamus turvallisuusviranomaisiin ja joihinkin muihin toimijoihin vastaajaryhmittäin, prosenttiosuus ”täysin luottavia” vastanneista.

Asia	Kaikki	Naiset	Miehet	15–34 v	35–49 v	50–64 v	65–79 v	Korkea-asteen koulutus
Liikenneonnettomuus	15/15	17/8	12/22	16/18	12/15	14/14	14/12	14/16
Lentäminen	7/57	10/48	4/67	7/64	7/56	7/52	7/55	5/59
Rikollisuus	17/18	17/13	16/23	15/24	13/12	18/15	23/16	11/22
Tulipalo	7/17	9/15	5/19	9/16	7/23	7/18	7/15	4/20
Sota	4/50	4/43	3/57	5/48	3/56	2/54	6/43	3/51
Terrorismi	15/31	14/26	17/36	17/34	12/36	14/30	17/23	9/39
Ilmastonmuutos	27/32	37/19	17/44	26/37	23/33	23/32	33/24	35/21

Taulukko 6: Pelko vastaajan itsensä tai läheisten vuoksi, prosenttiosuus ”usein /ei lainkaan” vastanneista.

lisuusviranomaisten jälkeen luotetuimmat esitetyistä toimijoista ovat lääkärit sekä tasavallan presidentti, johon luottaa 91 % suomalaisista, 43 % täysin. Kaikki nämä saavat suomalaisten täyden luottamuksen paljon useammin kuin ”tavallinen suomalainen”, johon luottaa täysin vain joka kymmenes tavallinen suomalainen.

Naisten ja miesten erot ”täydessä luottamuksessa” ovat pieniä pelastustoimen ja hätäkeskuksien kohdalla. Naiset luottavat enemmän kuin miehet poliisiin ja oikeuslaitokseen; luottamus lääkäreihin ja puolustusvoimiin on toisen suuntainen. Ikäryhmittäin erot pelastustoimeen ja hätäkeskuksiin ovat pieniä, luottamus on korkein keskimmaisilla ikäryhmillä. Luottamus poliisiin, puolustusvoimiin, oikeuslaitokseen ja lääkäreihin pääsääntöisesti nousee ikäryhmittäin.

### Pelon kohteet

Vastaajille esitettiin kysymys: *Pelkäätkö seuraavia asioita omalla tai läheistesesi kohdalla?* Vaihtoehdot seitsemässä kohteessa olivat: *usein, joskus ja en lainkaan.*

Kaikkien vastaajien keskuudessa *usein* pelkoa aiheuttaa ilmastonmuutos, tavallisimmin *ei lainkaan* lentäminen ja sota. Naiset ilmoittavat useammin pelontunnetta kuin miehet (osittain poikkeuksena terrorismi). Naisten suurin pelonaihe oli ilmastonmuutos. Ikäryhmien erot eivät ole suuria, eivätkä ne ole samansuuntaisia eri asioissa. Sodassa ja rikollisuudessa vanhin vastaajaryhmä ilmaisee enemmän pelkoa kuin muut. Korkea-asteen koulutuksen saaneet ovat muita enemmän peloissaan ilmastonmuutoksesta ja vähemmän peloissaan terrorismista.

### Onnettomuuskokemukset

Kysyttiin, onko jokin tai useampi neljästä asiasta joskus vaikuttanut vastaajan elämään: liikenneonnettomuus, tulipalo, muu onnettomuus ja rikos. 57 % ilmoitti, ettei mikään näistä ollut vaikuttanut; tässä ei ollut eroa sukupuolen mukaan, mutta ikäryhmissä 25–34-vuotiailla oli muita selvästi useammin sellainen arvio, ettei mitään tällaista tapahtumaa ollut koettu.

Neljästä kohteena olleesta tapahtumasta liikenneonnettomuus oli yleisin vakava kokemus, joka neljännen kohtaama. Rikoksen koki vaikuttaneen elämäänsä joka kuudes vastaaja. Tulipalo oli vaikuttanut vakavasti joka neljäntoista vastaajan elämään.

### Palvaroitinmielipiteet

Kuten eri turvallisuusjärjestelyjä koskevassa kysymyksessä havaitaan, palvaroitin on ainakin sanallisesti erittäin arvostettu: sitä pitää välttämättömänä 76 %, tarpeellisena 20 % ja melko tarpeellisena 4 % vastaajista. Esitettiin viisi väittämää, joiden suhteen oli mahdollista olla täysin tai jokseenkin samaa mieltä tai jokseenkin tai täysin eri mieltä.

Yleisimmän tason (ei erityisesti palvaroitinta koskeva) väittämä *En yleensä välitä mieltä tulipalon tai muun onnettomuuden*

*mahdollisuutta* saa tuloksen, jonka mukaan 30 % on joko jokseenkin tai täysin samaa mieltä, ja toisaalta 23 % on täysin eri mieltä väittämän kanssa. Siis lähes kolmannes vastaajista arvioi, ettei yleensä välitä mieltä tulipalon tai muun onnettomuuden mahdollisuutta, mutta kaikkiaan kaksi kolmesta arvioi mieltävänsä niitä (joko jokseenkin tai täysin sitä mieltä). Naisista täysin eri mieltä on 27 %, miehistä 18 %, useammat naiset siis tekevät ”riskinarviointia”. Korkeamman iän myötä erimielisyys väittämän kanssa kasvaa: vanhemmat vastaajat katsovat useammin mieltävänsä tulipalon tai muun onnettomuuden vaaraa kuin nuoremmat.

Väittämässä *Luotan täysin palvaroitintimen toimintaan* noin neljä viidestä ilmaisee luottamusta; joka viides on täysin samaa mieltä. Täysin eri mieltä on vain muutama prosentti vastaajista. Luottamus ei vaihtele sukupuolen mukaan, ja iän mukaankin erot ovat pienehköjä: korkeamman iän myötä ”täysi luottamus” lisääntyy jonkin verran.

Palvaroitinta pitää turhana (*Palvaroitin on aika turha vempale*) vain yksi prosentti vastaajista (jokseenkin tai täysin samaa mieltä väitteen kanssa). Täysin eri mieltä turhuudesta on 90 % naisista ja 84 % miehistä.

Palvaroitinta pitää hankalana (*Palvaroitin on hankala, koska se voi alkaa pitää ääntä turhaan*) vajaa kymmenesosa vastaajista (1 % täysin samaa ja 8 % jokseenkin samaa mieltä väittämän kanssa). Sukupuolen tai iän mukaan ei ole havaittavissa selkeitä eroja; palvaroitinta ei missään näistä vastaajaryhmissä pidetä hankalana kuin noin kymmenesosan joukossa.

Vaativin väittäjä koskee arviota omasta toiminnasta kohdatessa palvaroitintimen puute (*Jos vuokraamassani lomamökissä ei olisi palvaroitinta, todennäköisesti vaatisin korjausta asiaan*). Rungas kolmannes (36 %) on ”täysin samaa mieltä” siitä, että vaatisi korjausta asiaan, naisista 41 % ja miehistä 31 %. Lähes kolmasosa melko varmasti vaatisi korjausta (”jokseenkin samaa mieltä” väittämän kanssa). Noin viidesosa vastaajista ilmeisesti antaisi asian olla sillä, sillä väittämän kanssa jokseenkin eri mieltä on 16 % ja täysin eri mieltä 5 %. Naisista passiivisia olisi 15 % ja miehistä 27 %. Vanhemmissa ikäryhmissä varmuus puuttumisesta tilanteeseen olisi yleisempää: täysin samaa mieltä väittämästä on alle 35-vuotiaista 25 %, 35–49-vuotiaista 33 %, 50–64-vuotiaista 45 % ja yli 64-vuotiaista 49 %. Kun yhdistetään mielipiteet *täysin ja jokseenkin samaa mieltä*, vanhin ikäryhmä on yhä selvästi aktiivisin puuttumaan tilanteeseen, mutta muiden erot supistuvat.

Palvaroitintimeen siis yleisesti luotetaan, mutta kuitenkin ainakin joissain määrin luotettavuutta epäileviä on lähes viidesosa. Silti juuri kukaan (vain yksi sadasta) ei pidä palvaroitinta turhana. Palvaroitin arvioidaan hieman useammin hankalaksi kuin turhaksi; joka kymmenes hyväksyy ainakin jossain määrin väitteen hankaluudesta. Palvaroitintimen puutteeseen majoitustilassaan arvioi puuttuvansa varmasti yli kolmasosa, jokseenkin varmasti lähes kolmasosa, mutta joka viides ei puuttuisi tilanteeseen.

## ► Turvakoulutukseen osallistuminen

Viiden vuoden aikana vain puolet kaikista vastaajista, niin naisista kuin miehistä, on ollut mukana missään näistä koulutuksista. Kun 50 % ei ole osallistunut mihinkään ja kun koulutuksessa on ollut 95 %, osallistuneista keskimäärin lähes jokainen olisi ollut kahdessa koulutukseen, mutta todellisuudessa kumuloituminen joillekin aktiiveille voi olla korkeampaa.

Joka viides (19 %) ei haluaisi osallistua mihinkään tällaiseen koulutukseen. Usea vastaaja olisi kiinnostunut monenlaisesta koulutuksesta, kun koulutuksien yhteenlaskettu osallistumishalukkuus on 170 %. Jostain koulutuksesta kiinnostuneet ovat keskimäärin halukkaita useampaan kuin kahteen koulutuskohteeseen. Naisten kiinnostus lähes kaikkeen koulutukseen on suurempi; heidän kumulatiivinen osallistumishalukkuutensa on 183 % ja miesten 156 %. Naisten osallistumishalukkuus on erityisen suuri kotitalon turvakoulutuksessa (36 %, miesten 21 %). Työpaikan turvakoulutuksessa eroa ei ole, mihin voi vaikuttaa asema työelämässä.

Viiden vuoden aikana kolmasosa oli osallistunut ensiapukoulutukseen ja lähes yhtä moni työpaikan turvakoulutukseen. Runsas neljäsosa oli ollut alkusammutuskoulutuksessa. Kotitalon turvakoulutuksessa oli ollut prosentti ja väestönsuojelukoulutuksessa kaksi prosenttia vastaajista. Naisten ja miesten erot ovat vähäiset muussa kuin alkusammutuskoulutuksessa, jossa miehistä oli ollut 30 % ja naisista 24 %.

Halukkuus osallistua johonkin koulutukseen on viiden vuoden osallistumista pienempi ainoastaan työpaikan turvakoulutuksessa (osallistuminen 31 %, halukkuus nyt 19 %), mikä voi liittyä elämänvaiheeseen, työelämässä olemiseen. Muissa kohteissa halukkuus on selvästi toteutunutta osallistumista suurempi: alkusammutuksessa osallistuminen on 27 % ja halukkuus 45 %, ensiapukurssissa osallistuminen on 34 % ja halukkuus 58 % sekä vielä suuremmin eroin kotitalon turvakoulutuksessa, jossa osallistuminen on 2 % ja halukkuus 29 %, ja vielä voimakkaammin väestönsuojelukoulutuksessa, jossa osallistuminen on 1 % ja halukkuus 37 %. Kaikissa koulutuksissa työpaikan turvakoulutusta lukuun ottamatta kuilu ilmaistun osallistumishalukkuuden ja saadun koulutuksen välillä on erityisen suuri naisilla, kaikkein suurin väestönsuojelukoulutuksessa: 1 % toteutunutta vastaan 40 % ilmaistua halukkuutta.

## Mielipiteitä väestönsuojista ja rakentamisvaatimuksista

Väestönsuojelunäkemyksiä on esitelty eri raportissa [8], ja tässä kerrataan muutama havainto.

Kysymyksissä väestönsuojan tarpeellisuudesta samaa aihetta on lähestytty eri kulmista, ja tulokset ovat yhteneviä: 69 % pitää lähellä olevaa suojaa tärkeänä omalle turvallisuudelleen, 85 % yleisesti tarpeellisena, 68 % suomalaisten turvallisuutta lisäävänä ja 80 % tarpeellisena suojaamaan väestöä poikkeusoloissa.

## "Palovaroittimeen siis yleisesti luotetaan, mutta kuitenkin ainakin joissain määrin luotettavuutta epäileviä on lähes viidesosa. Silti juuri kukaan ei pidä palovaroitinta turhana."

Väestönsuojista esitettiin täsmennettyjä muita väittämiä:

"Minulla ei ole tarpeeksi tietoa väestönsuojista." Väittämään yhtyy kaikista vastaajista lähes kaksi kolmasosaa (täysin samaa mieltä 24 % ja jokseenkin samaa mieltä 40 %), sen kanssa eri mieltä on 33 % (jokseenkin 22 % ja täysin 11 %). Naisista tiedonpuuteväittämän kanssa oli samaa mieltä 75 % (31 % täysin samaa mieltä), miehistä 52 % (16 % täysin samaa mieltä).

"Väestönsuojista ja väestönsuojelusta puhutaan julkisuudessa liian vähän." 78 % vastaajista (naisista 82 %, miehistä 73 %) on tätä mieltä (34 % täysin samaa mieltä), 11 % eri mieltä.

"Väestönsuoja lisää asumiskustannuksia liikaa." Väittämään yhtyy 20 % (6 % täysin ja 14 % jokseenkin). Eri mieltä on 49 % (19 % täysin, 30 % jokseenkin), ja 31 % ei osaa ottaa asiaan kantaa. Naisista väittämän kanssa on samaa mieltä 13 %, miehistä 27 %, eri mieltä vastaavasti 47 % ja 51 %. Naisista ei osaa ottaa kantaa 40 %, miehistä 22 %. Pääkaupunkiseudun neljän kaupungin asukkaat vastustavat muita enemmän väitettä liiallisista kustannuksista, 56 %.

"Nykyiset väestönsuojat on pidettävä hyvässä kunnossa." Yhdeksän kymmenestä, 89 %, on väittämän kanssa samaa mieltä (43 % täysin ja 46 % jokseenkin). Eri mieltä on 6 %, miehistä 7 % ja naisista 3 %. Naisista ei osaa ottaa kantaa 8 %, miehistä 4 %.

Tutkimuksessa esitettiin sama kysymys, jota SPEK on käyttänyt: "Pitäisikö väestönsuojien rakentamisesta luopua?" Joka kymmenes vastaaja katsoo, että väestönsuojien rakentamisesta voitaisiin luopua, kolme viidestä on eri mieltä ja joka kolmas ei osaa ottaa kantaa asiaan. Täten kantaa ottavista 14 % olisi valmis lopettamaan rakentamisen ja 86 % ei olisi. Naisista ja miehistä suunnitteen yhtä suuri osa vastustaa ajatusta, mutta miehistä on enemmän sen hyväksyviä ja naisissa paljon kantaa ottamattomia. Perustulos on sama kuin SPEKin haastattelututkimuksessa vuonna 2015 [9]. Kummassakin tutkimuksessa 86 % kantansa ilmaisesta vastusti suojarakentamisen lopettamista.

Kysyttiin myös, olisiko oikein asuntorakentamiskustannuksien säästämiseksi vähentää joitakin vaatimuksia; joista tarjottiin neljä "mahdollista säästökohdetta".

Koulutustyyppi	On osallistunut			Haluaisi osallistua (vaikka uudelleen)		
	Kaikki	Naiset	Miehet	Kaikki	Naiset	Miehet
Alkusammutuskoulutus	2	24	30	45	48	41
Ensiapukurssi	34	34	34	58	64	53
Työpaikkani turvakoulutus	31	30	32	19	19	18
Kotitaloni turvakoulutus	2	3	2	29	36	21
Väestönsuojelukoulutus	1	1	2	37	40	34
Ei mihinkään näistä	50	50	51	19	15	22

Taulukko 7: Turvakoulutukseen osallistuminen ja osallistumishalu. Vastaajille esitettiin kysymykset toteutuneesta osallistumisesta turvallisuus- ja koulutukseen ja halukkuudesta osallistua sellaiseen: Oletko viimeisten viiden vuoden aikana osallistunut joihinkin seuraavista? Onko näissä sellaisia, joihin kuitenkin haluaisit osallistua, vaikka uudelleen? Prosenttiosuus vastaajista.



Taulukko 8: Asuntorakentamisen säästökohdeet, prosenttiosuus vastaajista.

Säästökohde	Samaa mieltä		Eri mieltä		En osaa sanoa
	Täysin	Melko	Täysin	Melko	
Autopaikkavaatimukset	14	19	28	30	9
Paloturvallisuusvaatimukset	3	1	75	19	2
Väestönsuojavaatimukset	8	16	27	39	11
Esteettömyysvaatimukset	8	17	36	31	7

Säästöajatuksen hyväksyy (on täysin tai melko samaa mieltä) noin kolmasosa autopaikkojen osalta, neljäsosa esteettömyyden ja väestönsuojien kohdalla ja 4 % paloturvallisuudessa. Säästämistä vastustaa (on täysin tai melko eri mieltä) 60 % autopaikkojen kohdalla, kaksi kolmesta väestönsuojien ja esteettömyyden kohdalla ja 94 % paloturvallisuudessa.

Väestönsuojien rakentamisvaatimuksista miehet olisivat naisia alttiimpia tinkimään, miehistä *melko* tai *täysin samaa mieltä* 30 %, naisista 18 %, vastaavasti miehistä ajatuksen kanssa on *melko* tai *täysin eri mieltä* (siis ei hyväksy tinkimistä) 64 %, naisista 66 %. Naisista 15 % ei osaa sanoa mielipidettään asiasta, miehistä 6 %. Siis kaksi kolmasosaa suomalaisista ei hyväksy väestönsuojien rakentamisvaatimuksista tinkimistä, yksi neljäsosa hyväksyisi ja kymmenesosalla ei ole mielipidettä asiasta. Nuorempi väestö vastustaa voimakkaammin suojarakentamisesta tinkimistä.

### Päätelmiä

Esitelty aineisto on sellaisenaan kuvaus suomalaisten turvallisuusajattelusta yhtenä ajankohtana. Se ei vielä anna kattavaa yleiskuvaa eikä pääosin myöskään tietoa ajallisesta muutoksesta. Parempi hyödyntäminen edellyttää jatkokäsittelyä siten, että tulokset yhdistetään teoreettisiin lähtökohtiin ja muuhun empiiriseen aineistoon, vaikka nyt käytetyillä tiedoilla on myös kuvailevaa itseisarvoa. Aineistoa voidaan tarkastella perusteellisemmin käyttämällä muuttujien ristiintaulukointia, yhdistettyjä muuttujia ja moni-

muuttujamenetelmiä. Osa tuloksista antaa perusteita toistaa tutkimuksen kysymyksiä ajallisen vertailun saamiseksi.

### LÄHDELUETTELO

1. Kokonaisturvallisuuden sanasto. Sanastokeskus TSK ry. Helsinki 2017. ISBN 978-952-9794-36-2 (PDF). s. 16.
2. Airaksinen, Timo: Yksilöturvallisuutta etsimässä. SPEK. Helsinki 2012. ISBN 978-951-79471-4. s. 81.
3. Airaksinen, emt., s. 112–113.
4. Lahikainen, Anja-Riitta teoksessa Niemelä, Pauli – Lahikainen: Inhimillinen turvallisuus. Tallinna 2000. ISBN 951-768-064-3. s. 61–62, 69–70.
5. Laurikainen, Heikki, ja Markku Haranne: Kansalaisten käsityksiä väestönsuojelusta. SPEK puheenvuoroja 9. Helsinki 2020.
6. Maslow, Abraham: Motivation and Personality. New York 1987. ISBN-13: 978-006-041987-5.
7. Suomalaisten mielipiteitä ulko- ja turvallisuuspolitiikasta. Maanpuolustustiedotuksen suunnittelukunta. Tiedotteita ja katsauksia. Joulukuu 2020. Helsinki 2020. ISBN PDF: 978-951-663-101-4. s. 29–30, 76.
8. Laurikainen ja Haranne, emt.
9. Laurikainen, Heikki: Arjen ja asumisen turvallisuus. Puhe- linhaastattelututkimus omatoimisesta varautumisesta. SPEK tutkii 12. Tampere 2015.

**SPEKin oppaat vapaasti kaikkien saataville.**

Käy lukemassa jo julkaistuja oppaita osoitteessa:

[www.spek.fi/oppaat](http://www.spek.fi/oppaat)

**SPEK** Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö

[www.spek.fi](http://www.spek.fi)

# Pelastusviranomaisen ilmoitusvelvollisuus poliisille – mitä, miksi, miten ja milloin

## Tiivistelmä

Artikkelissa tarkastellaan pelastuslain (379/2011) 41 §:ssä säädettyä ilmoitusvelvollisuutta pelastusviranomaiselta poliisille. Säädös velvoittaa pelastusviranomaisen ilmoittamaan poliisille tahalliseksi tai tuottamukselliseksi arvioimansa palot, samoin kuin syttymissyyltään epäselviksi jääneet palot. Myös epäillyt pelastusrikkomukset (106 §) tulee ilmoittaa poliisille, joka on pelastusrikkomukset tutkiva – muttei niitä valvova – viranomainen.

Lainsäädäntöön vuonna 1999 tulleen veloitteen toteutumisessa on ollut paljonkin toivomisen varaa. Pelastusopiston *Pelastuslaitosten ilmoitusmenettelyjen ja yhteistyöryhmien kehittämishankkeessa* (2019 –2020) yhteiskehitettiin pilotin pohjalta vakioitu kirjallinen ilmoitusmenettely, mikä on käytössä 18 pelastuslaitoksella. Artikkelissa käydään tiiviisti läpi hankkeen syitä, perusteluja ja seurauksia.

## Johdannoksi

Pelastuslain (379/2011, PeL) 1 §:ssä lain tavoitteeksi asetetaan ihmisten turvallisuuden parantaminen ja onnettomuuksien vähentäminen. Lain soveltamisalaa koskevassa 2 §:ssä on listattu viisi kohtaa, joista ensimmäiseksi on nostettu ihmisten, yritysten sekä muiden yhteisöjen ja oikeushenkilöiden velvollisuus ehkäistä tulipaloja ja muita onnettomuuksia.

Näihin tavoitteisiin pääsemiseksi on monia eri tapoja ja strategioita. Tuttuja niistä meille ovat muun muassa rakenteelliseen paloturvallisuuteen liittyvät määräykset ja valvonta, palotarkastukset ja turvallisuusviestintä. Sen sijaan seuraamuksilla epätoivottuun käyttäytymiseen puuttuminen ei paloturvallisuuden puolella ole ollut yhtä vahvasti keinovalikoimassa kuin esimerkiksi liikenneturvallisuutta edistettäessä. Liikenteessä meille on selvää, että todettuihin normirikkomuksiin puututaan. Tällä sanktoriskilla pyritään vaikuttamaan kaikkien liikennekäyttäytymiseen, ja näin se vaikuttaa myös onnettomuuksia ennaltaehkäisevästi.

Miten tämä onnettomuuksien ehkäisyn yksi keino sitten saadaan käyttöön pelastustoimessa? Pelastusopiston toteuttamassa

ja Palosuojelurahaston rahoittamassa *Pelastuslaitosten ilmoitusmenettelyjen ja yhteistyöryhmien kehittämishankkeessa* urakoitiin asian kimpussa niin pelastus- kuin poliisilaitoksilla. Seuraava esitys perustuu hankkeen kokemuksiin ja sen loppuraporttiin [1].

## Mitä pelastusviranomaisen pitää ilmoittaa poliisille?

PeL 41 §:n 4 mom. säädetään seuraavasti:

*Jos on aihetta epäillä, että tulipalo tai muu onnettomuus on aiheutettu tahallisesti tai tuottamuksellisesti, pelastusviranomaisen on ilmoitettava asiasta poliisille. Poliisille on ilmoitettava myös palontutkinnan yhteydessä havaituista palo- ja henkilöturvallisuusrikkomuksista.*

Ilmoitusmenettelyhankkeessa keskityttiin parantamaan juuri paloihin liittyvää ilmoittamista. Muiden onnettomuuksien kohdalla olisi tarvittu määrittelyapua, jota ei kuitenkaan saatu. Koska hanke tai sen toteuttamiseen aktiivisesti osallistunut Poliisihallitus ei tätä määrittelyä voinut tehdä, tämän asian korjaaminen ja tarkentaminen jäi tulevaisuuden varaan.

Pelastusviranomaisen ilmoitusvelvollisuuden aiemmassa toteutamisessa on nähtävissä erityisesti kolme ongelmakohtaa. Ensimmäinen niistä liittyy siihen, että lainsäädännössä ei ole riittävän selkeästi tuotu esiin sitä, että myös syttymissyyltään epäselviksi jääneet tapaukset tulee ilmoittaa poliisille. Tahalliseksi ja tuottamukselliseksi arvioitujen palojen ilmoitusperuste on luettavissa suoraan laista, sen sijaan syttymissyyltään epäselvien palojen ilmoitusperuste on kirjattu vain hallituksen esitykseen [2, s. 58]. Käytännössä tämä on johtanut siihen, että kyseinen ilmoitusperuste on huonosti tunnettu ja tunnistettu. Sama koskee työnjakoa pelastusrikkomuksissa: pelastusviranomainen arvioi, onko teko PeL 106 §:ssä listatun mukainen, ja jos sitä ei ole pidettävä vähäisenä, asian käsittely siirtyy poliisille.

Toinen ongelmakohta on liittynyt siihen, että ilmoittamisessa ei ole mielletty sen kategorisuutta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että myös pienet palotapaukset tulee ilmoittaa. Seuraavassa alalu-

vussa käy ilmi, miksi tämä on perusteltua. Lainsäädännössä ei ole asetettu harkintavapautta tai muutakaan kynnystä ilmoittamiselle. Runsaasti keskustelua on käyty ja epäilyksiä esitetty siitä, onko poliisilla resursseja tutkia pelastustoimen ilmoittamia tapauksia. Tämä keskustelu on varsin tarpeellista: poliisiin tulee mm. alue- ja ilmiöseurannan tarpeisiin saada tietoa myös sellaisista tapauksista, joihin ei yksittäisinä tapahtumina kiinnitetä erityistä tutkimuksellista huomiota. Ylipäättään yhden viranomaisen resurssit eivät vaikuta toisen viranomaisen lakiin kirjattuun ilmoitusvelvollisuuteen. Hiukan kärjekkäästi ilmaisten pelastuslain noudattamisen ei pitäisi olla arvontilaisuus, jossa puntaroidaan esimerkiksi toisen viranomaisen resursseja ja kiinnostusta, tai ilmoitettavan tapauksen myöhempiä käsittelyvaiheita.

Kolmas ongelma on liittynyt puuttuneeseen menettelytapaan. Vakioitunutta menettelytapaa puuttuessa ilmoittamista on hoidettu suullisena keikkapaikkailmoittamisena. Erityisesti viime vuosina viranomaistoiminnassa on painokkaasti nostettu esiin kansalaisten oikeudellisen yhdenvertaisuuden näkökulma. Tämä edellyttää viranomaisilta yhtenäisiä, seurattavia ja myöhemmän todennettavuuden turvaavia dokumentoituja menettelytapoja. Huomatavaa on, että samat menettelytavat ovat takaamassa myös viranomaisen omaa oikeusturvaa.

Kaikkiin näihin ongelmakohtiin olisi ollut ajankohtaista vaikuttaa jo lain säätämisen ja käyttöönottoaiheissa. Lainsäädännön implementointi voidaan karkeasti suomentaa lainsäädännön kentälle saattamiseksi. Kiistaton ja runsasta tutkimusnäyttöä saanut johtopäätös on, että hyvä implementointi on tuloksellisen sääntelyn avaintekijä. Tyypillisiä implementaation osatekijöitä ovat ”*neuvonta, ohjaus, valvonta, tarkastukset, informaatio, neuvottelut ja yksittäisiä tapauksia koskevat lain soveltamisratkaisut*” [3, s. 18]. Implementaatiotoimien heikkous yhdistettynä valvonnan puutteeseen on johtanut siihen, että PeL 41 § -ilmoitusvelvollisuus on ensimmäiset kaksi vuosikymmentään toteutunut kirjavasti, mikä on kansalaisten yhdenvertaisen kohtelun ja rikosvastuun johdonmukaisen toteuttamisen näkökulmasta erittäin ongelmallista. Lisäksi lainsäädännön jälkiarvioinnin puuttuminen on johtanut siihen, että lain vaikuttavuudesta ja soveltamisongelmista ei ole tultu tietoisiksi, jolloin korjausliikkeiden tarvettakaan ei ole tunnustettu.

Olemme nyt todenneet, että PeL 41 § -ilmoitusvelvollisuus koskee pelastusviranomaisen tahalliseksi ja tuottamukselliseksi arvioimia paloja, sekä epäiltyjä pelastusrikkomuksia. Ilmoittaa tulee myös palot, joissa syttymisessä on jäänyt epäselväksi: nämä palot voivat olla luonteeltaan tahallisia tai tuottamuksellisia. Mitään ilmoituskynnystä tai muuta harkintavaraa ei ole, eli tapauksen suuruusluokalla ei ole merkitystä ilmoittamisen kannalta. Yhtenäinen menettelytapa kuuluu eritoten sellaiseen viranomaistoimintaan, mistä seuraa kansalaisille oikeusvaikutuksia. Edelleen on kuitenkin tarvetta tarkentaa, miksi ilmoitukset tulee tehdä.

### Miksi pelastusviranomaisen tulee tehdä PeL 41 §/106 § -ilmoitukset poliisille?

Yksi hyvä vastaus alaluvun otsikossa esitettyyn kysymykseen on lain noudattaminen. Kuten edeltä kävi ilmi, tässä tapauksessa asia tuntuu kaipaavan vielä lisäperusteluja.

Tulipaloille ominaista on ennustamattomuus: pienestä alkupalosta voi kehittyä suuri onnettomuus. Siksi tulen koolle ei pitäisi antaa merkitystä esimerkiksi huolellisuusvelvoitteen noudattamista arvioitaessa [4, s. 23–24]. Entä sitten epämääräiset palot esimerkiksi tolpparoksissa? Niissä ei välttämättä ole suurempaa leviämisvaaraa eikä niistä voi varmuudella sanoa, ovatko niissä syttyneet palot tahallisen tai tuottamuksellisen toiminnan seurausta, vaiko vahinkoja. Miksi nämä pitäisi ilmoittaa?

Kuten edellä totesin, mitään suurempaa tutkintatyötä nämä ei-

vät poliisissa yksittäisinä tapahtumina aiheuta. Poliisin tietoon nämä on kuitenkin syytä saattaa: Poliisiasiain tietojärjestelmään kirjattuna ne ovat osana alue- ja ilmiöseuranta. Poliisin kuva rikostilanteesta vääristyy, jos tieto viranomaisten välillä ei kulje.

Jos epämääräiset palot runsaslukuistuvat ja niissä on yhdistäviä piirteitä, ne herättävät epäilyn sarjasta ja näin myös sarjoittamisen tarpeesta. Geoprofiloinnissa puolestaan ratkaisemattomien rikosten teonpiirteistä ja maantieteellisestä sijoittumisesta vedetään johtopäätöksiä tekijän asuinpaikasta. Mielenkiintoista kyllä, eri rikostyyppijä verrattaessa nimenomaan tahallisesti sytytettyissä paloissa etäisyys tekijän kodin ja rikospaikan välillä on erityisen lyhyt. [Sarjoittamisesta ja geoprofiloinnista yleisesti 1, s. 50–51; sarjoittamisesta 5. ja 6., geoprofiloinnista 5., 7., 8. ja 9.] Lisäksi on hyvä huomioida, että pienimmät palot ovat usein lasten ja nuorten tulenkäytön seurausta. Niihin on aiheellista päästä kiinni ennen kohteiden suurenemista, ja sekä vahinkojen että vahingonkorvausten kasvamista.

Seuraamukset ovat lainsäädännössämme siksi, että niillä pyritään vaikuttamaan käyttäytymiseen. Seuraamuksilla annetaan signaali epätoivotusta käyttäytymisestä. Jos seuraamusuhka on soveltamatta jäänyt kuollut kirjain, sen potentiaali onnettomuuksien ennaltaehkäisyssä menetetään.

### Miten pelastusviranomaisen ilmoitus poliisille on perustelluinta tehdä?

Ilmoitusmenettelyä koskevassa keskustelussa on lukuisia kertoja viitattu siihen, ettei PeL 41 §:ssä sanota, että ilmoitus tulisi tehdä kirjallisesti.

Suomen kaltaisessa oikeusvaltiossa viranomaistoiminnan luonteeseen kuuluu se, että toimenpiteet ovat myöhemmin todennettavissa, ja viranomaiset asioivat keskenään kirjallisesti. Esimerkiksi yksipuolinen ja valitettavasti myös epäluotettavaksi osoittautunut kirjaus PeL 41 § -ilmoituksen tekemisestä PRONTOon ei tätä kriteeriä täytä.

Hyvän hallinnon periaatteiden lainsäädännöllisenä lähtökohtana on hallintolaki (434/2003, HL). Sen 19 §:ssä käy ilmi, että asian vireille panemisessa pääsääntönä on kirjallinen muoto. Jos asian vireillepanossa on tällainen vaatimus, on perusteltua ajatella, että myös PeL 41 §:n mukainen ilmoitus on tehtävä kirjallisesti.

Itsestään selvää on, että viranomaisten käytössä olevien järjestelmien tulisi tukea ilmoittamista. Valitettavasti suoraan PRONTOsta ei voida toimittaa ilmoituksia poliisille tietoturvallisella tavalla, eikä tämä ole toistaiseksi näköpiirissäkään. Tiedonkulun ongelmat eivät liity pelkästään PRONTOon vanhentuneisuuteen; poliisinkaan käytössä olevat tai lähivuosina käyttöön tulevat järjestelmät eivät tiedonvaihtoa riittävästi tue. Salattuna sähköpostina lähetettävän ilmoituslomakkeen täyttämiseen ja eteenpäin toimittamiseen ei kuitenkaan paljoa aikaa mene, varsinkaan rutiinin karttuessa.

Kuten todettua, ilmoittamisen kirjallinen muoto on herättänyt paljon vastaväitteitä ja vastarintaa. Kysymyksen voisi kuitenkin asettaa toisin päin: miksi PeL 41 § -ilmoitusta, tai PeL 106 §:ssä säädeltyjen pelastusrikkomusten ilmoittamista, ei tehtäisi kirjallisesti? Kun PRONTOon onnettomuusseloste on kuitenkin täytettävä, miksi poliisille ei annettaisi mahdollisimman hyviä lähtötietoja, joita tehtäväpaikalla on suusanallisesti vaikeaa – usein tarkemmin sanottuna mahdotonta – välittää? Näin PRONTOon täyttämisen vaiva tulee hyödynnettyä mahdollisimman hyvin, ja pelastusviranomaisen voi tarvittaessa myöhemmin oman oikeutuvansa tueksi esittää ilmoituksen täsmällisen sisällön ja ilmoittamisen ajankohdan. Samalla annetaan signaali epätoivotuun toimintaan puuttumisesta, ja pelastusviranomaisen myötävaikuttaa PeL 41 §/106 § -ilmoituksella onnettomuuksien ennaltaehkäisyyn. ►

## ► Milloin pelastusviranomaisen tulee ilmoitus poliisille toimittaa?

Selvää on, että kirjallinen ilmoitus on syytä toimittaa mahdollisimman pian, jotta poliisin tutkinnalliset edellytykset säilyvät silloin, kun tapaus edellyttää aktiivisia tutkintatoimia. Yhdeksi vaihtoehdoksi esitetty koonti-ilmoitus, jossa ilmoitukset lähetetään esimerkiksi kuukauden välein, eivät näitä edellytyksiä turvaa millään tapaa. Tätä kuvaa poliisisanonta *menetty aika on kadotettu totuus*. Koonti-ilmoituksen voi katsoa täyttävän lain kirjaimen muodollisesti, mutta lain tavoitetta se ei täytä. Mahdollisimman pian kunkin ilmoitusvelvollisuuden täyttävän tapahtuman jälkeen lähetetty, hyvin täytetty Pell 41 §/106 § -ilmoitus sen sijaan alustaa asian käsittelyä laadukkaasti ja joutuisasti.

Erillisen Pell 41 §/106 § -ilmoituksen sijaan on esitetty myös poliisin sähköisen rikosilmoituksen käyttöä. Tähän vaihtoehtoon ei sisälly muita kuin huonoja puolia – tässä vain muutamia mainitakseni:

- ilmoituksen tekemisen kankeus: raskas henkilötunnistautuminen ja huonosti tähän yhteyteen istuvat kysymykset ja täyttökohdat

- sähköinen rikosilmoitus on tarkoitettu erityisesti kansalaisten poliisille tekemiin ilmoituksiin, ei viranomaisten väliseen tiedonvaihtoon.

- soveltumattomuus kaikkiin ilmoitusvelvollisuuden täyttäviin tapauksiin: sähköinen rikosilmoitus on tarkoitettu vähäisten rikosten ilmoittamiseen, jotka eivät vaadi poliisilta välittömiä toimenpiteitä

- em. syystä sähköisesti tehtyjen ilmoitusten jääminen muun ilmoitusmassan joukkoon: vaikka ilmoitus tehtäisiin viipymättä, tutkijan pöydälle se päättyy yleensä viikkojen viiveellä. Esimerkiksi Lounais-Suomen poliisilaitokselle osoitetut, vakioidun ilmoitusmenettelyn mukaiset ja salattuna sähköpostina lähetettävät Pell 41 §/106 § -ilmoitukset otetaan vastaan osoitteeseen, jota seuraavat eri tutkintaryhmien palojen tutkintaan erikoistuneet jäsenet. Näin ilmoitukset menevät suoraan palojen tutkintaan perehtyneille tutkijoille ”puhtaana käteen” ilman ylimääräistä viivettä.

Suurin ongelma sähköisen rikosilmoituksen käytössä tässä yhteydessä on kuitenkin se, että se erittäin ongelmallisella tavalla samaistaa Pell 41 §/106 § -ilmoittamisen rikosilmoituksen tekemiseen. Tästä nimenomaan ei ole kysymys: pelastusviranomaisen täyttää oman ammatillisen arviointinsa mukaisen ilmoitusvelvollisuuden, ei esitä rikosepäilyjä.

Kirjallinen ilmoittaminen ei luonnollisestikaan tarkoita sitä, että suullinen kanssakäyminen olisi jotenkin epätoivottua, vielä vähemmän kiellettyä. Usein esimerkiksi tutkinnan käynnistävät alkutiedot välitetään jo paikan päällä, mutta ilmoitus tehdään todennettavalla ja alkutietoja täydentävällä tavalla kirjallisesti. Tämä vastaa myös muiden viranomaisten käytäntöä ollessaan yhteydessä poliisiin: tutkintaa mahdollisesti vaativista tapauksista saatetaan keskustella vaikkapa puhelimitse, mutta suullinen ilmoitus täydennetään kirjallisella.

### Kirjallisen ilmoitusmenettelyn tähänastisia tuloksia

Tässä yhteydessä Pell 41 §/106 § -ilmoitusmenettelyn vaikutavuutta tarkastellaan pelastusrikkomusten määrällisen kehittymisen näkökulmasta. Pelastusrikkomuksen historiasta ja soveltamisesta saatiin merkittävä tiedonlisäys Maarit Salosen ilmoitusmenettelyhankkeen yhteydessä tekemästä opinnäytetyöstä [10, ks. myös 11].

Pelastusrikkomus on paloihin liittyvistä nimikkeistä lievin, ja voidaan toki ajatella, että vaikuttavuutta tulisi tarkastella eneminkin vakavien nimikkeiden valossa. Muiden nimikkeiden tarkastelu yksityiskohtaisesti ja luotettavasti edellyttäisi kuitenkin

oman työhönsä tutkimustyönsä sekä Poliisihallituksen tutkimusluvan Poliisiasiain tietojärjestelmän tietojen saamiseksi. Tämä johtuu siitä, että muissa nimikkeissä (varomaton käsittely, yleisvaaran tuottamus, vaaran aiheuttaminen, vahingonteko, törkeä vahingonteko, eri tuhotyörikosten nimikkeet) on myös muita kuin polttamalla tehtyjä tekemuotoja, ja hakuehtojen puutteellisuuden vuoksi tapausmassassa olisi käytävä systemaattisesti manuaalisesti läpi. Kuitenkin sekä varomatonta käsittelyä että yleisvaaran tuottamusta koskevat ja hankkeen loppuraporttia varten haetut tiedot osoittivat selvää nousua myös näitä nimikkeitä koskevien tapaus-ten kirjaamisessa [1, s. 65–67].

Voidaan myös ajatella toisinpäin: nimenomaan pelastusrikkomukset muodostavat hyvän indikaattorin. Ensinnäkin: jos ilmoitusmenettelyä kuvattaisiin tapaukset poliisin tietoon saattavana verkkona, pelastusrikkomukset pitävään verkkoon jäävät myös vakavammat tekemuodot. Toiseksi tässä seuraamuksessa lähtötilanteen voi arvioida olleen huonoin: soveltamiskäytännöstä ei ole ollut riittävästi tietoa pelastustoimissa, ja nimikkeenä pelastusrikkomus on poliisissa ollut ennestään hyvin vieras. Näin on mm. siksi, että pelastuslaki on poliisille lähtökohtaisesti vierasta erityislainsäädäntöä, jota valvoo toinen viranomainen, tässä tapauksessa pelastusviranomainen.

Poliisilaitos	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Helsinki	3	2	10	8	4	14	16
Itä-Uusimaa	3	0	3	1	4	5	2
Kaakkois-Suomi	1	1	3	2	4	11	10
Länsi-Uusimaa	2	1	2	2	2	4	3
Häme	9	1	2	2	2	11	35
Sisä-Suomi	10	2	5	5	9	24	95
Pohjanmaa	4	3	2	4	8	9	49
Lounais-Suomi	6	6	14	13	15	17	154
Itä-Suomi	4	4	0	3	2	5	14
Oulu	2	3	4	3	4	6	21
Lappi	1	0	1	2	2	2	11
<b>Yhteensä</b>	<b>45</b>	<b>23</b>	<b>46</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>108</b>	<b>410</b>

Taulukko 1. Pelastusrikkomus-nimikkeellä kirjatut ilmoitukset poliisilaitoksittain 2014–2020.

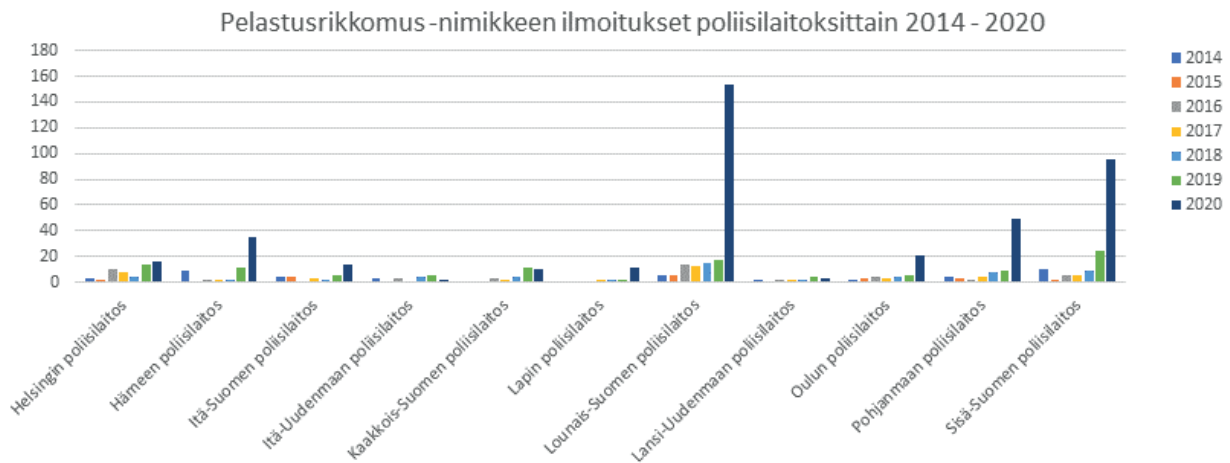
Pylväsdiagrammiksi puettuna samat lukemat seuraavalla sivulla kuvassa 1.

Ilmoitusmenettelyn käyttöönotto, koulutukset ja harjaantuminen vaativat aikaa – muutos ylipäätään ottaa aikansa. Lounais-Suomen poliisilaitoksen suurta lukemaa suurelta osin selittää Varsinais-Suomen pelastuslaitoksella keväällä 2018 käyttöönotettu ilmoitusmenettelyn pilotti, minkä vuoksi menettelystä on ehtinyt jo muodostua rutiinia niin pelastus- kuin poliisilaitoksellakin. Satakunnan pelastuslaitoksen otettua ilmoitusmenettelyn käyttöön ilmoitusten määrä Lounais-Suomen poliisilaitoksella on noussut entisestään.

### Lopuksi

Tätä kirjoittaessani on loppuillaan lausuntoaika pelastuslain uudistamisen esiselvityshankkeen arviointimuistioista. Pelastustoimintajaoksen muistiossa Pell 41 §:ää käsiteltäessä kiinnitetään huomiota tarpeeseen saada viranomaisten väliseen ilmoitusmenettelyyn yhtenäinen ja yhdenvertainen käytäntö koko maahan [12, s. 23].

Tämä on erittäin toivottava ja perusteltu kehityssuunta, ja nyt tuohon yhtenäistämiseen on hyvät edellytykset. Ilmoitusmenette-



Kuva 1. Pelastusrikkomus-nimikkeellä kirjatut ilmoitukset poliisilaitoksittain 2014–2020 pylväsdiagrammina.

lyn toimivuus on koeponnistettu, sen edelleen kehittämiseksi on hyviä lähtökohdat, ja järjestelmäkehitykselle on selvät tavoitteet sekä eksplikoitavat tarpeet. Viranomaisyhteistyössä poliisin kanssa on päästy useita askeleita eteenpäin, tästä erityisenä esimerkkinä poliisin taktisen tutkinnan roolin ja näkyvyyden lisääntyminen pelastus- ja poliisilaitosten yhteistyössä palojen tutkintaan liittyen.

Ilmoitusmenettelyn tehokkaan toteuttamisen edellyttämän koulutuksen kanssa on niin ikään tehty paljon töitä, ensimmäisenä askeleena tuottamuksellisuuden arviointia palvelevien mallinnosten tekeminen [4], ja sen jälkeen niiden vieminen sekä tutkinto- ja täydennyskoulutukseen kuin pelastuslaitoksilla pidettyihin koulutuksiinkin. – Ylipäätään on tärkeää huomata, että mitä yhdenmukaisempia pelastuslaitosten käytännöt ovat, sitä osaavampaa työvoimaa pelastuslaitoksille koulutuksen kautta saadaan. Kirjavien käytäntöjen oloissa opetus jää pakosta yleispiirteisemmälle tasolle.

Kaikella tällä useammallakin saralla tehdyllä työllä on otettu askeleita eteenpäin pelastustoimen päätavoitteessa: onnettomuuksien ennaltaehkäisyssä.

## Kiitokset

Kiitän lämpimästi kaikkia *Pelastuslaitosten ilmoitusmenettelyjen ja yhteistyöryhmien kehittämishankkeen* yhteyshenkilöitä pelastus- ja poliisilaitoksilla. Työ on välistä ollut epäkiitollista, mutta olette siitä huolimatta vieneet sitkeästi asiaa eteenpäin. Kiitän myös Antti Leppilähtea, joka Poliisihallituksen edustajana oli mainio toteutajakumppani hankkeessa.

Kiitän kaikkia hanketta ja sen tavoitteita tukeneita. Kiitän Palosuojelurahastoa hankkeen päärahoituksesta, ja Varsinais-Suomen pelastuslaitosta työtilasta ja hyvästä työ- ja kehittämisilmapiiristä. Pelastusopiston rehtoria Mervi Parviaista ja esimiehiäni hankkeen aikana, tutkimusjohtajia Esa Kokkia ja Jarno Ruususta kiitän tuesta ja kannustuksesta. Pelastusopiston TKI-yksikön jäsenille osoitan kiitokseni hyvästä työtoveruudesta.

## LÄHTEET

1. Mäkelä, P. Pelastuslaitosten ilmoitusmenettelyjen ja yhteistyöryhmien kehittämishanke – Loppuraportti. Pelastusopiston julkaisu, B-sarja: Tutkimusraportit, 2021. ISBN 978-952-7217-42-9. Saatavissa osoitteessa [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_B/B1\\_2021.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B1_2021.pdf)

2. HE 257/2010 vp Hallituksen esitys eduskunnalle pelastuslaiksi ja laiksi meripelastuslain 23 §:n muuttamisesta.

3. Lainvalmistelun laatu ja kehittämistarpeet. Valtiontalouden tarkastusviraston selvitykset 3/2013. Saatavissa osoitteessa <https://www.vtv.fi/app/uploads/2018/09/10113509/lainvalmistelun-laatu-ja-kehittamistarpeet-2013.pdf>

4. Lehtimäki, M. & Mäkelä, P. Tuottamukselliset tulipalot ja niitä koskevat ilmoitusmenettelyt. Pelastusopiston julkaisu, B-sarja: Tutkimusraportit, 2018. ISBN 978-952-7217-15-3. Saatavissa osoitteessa [http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja\\_B/B3\\_2018.pdf](http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B3_2018.pdf)

5. Santtila, P. Offender Profiling. Teoksessa Granhagen, P.A. (ed.) Forensic Psychology in Context. Nordic and International Approaches. Cullompton: Routledge, 2010. ISBN 9781843928270.

6. Santtila, P. & Fritzon, K. & Tamelander, A.L. Linking Arson Incidents on the Basis of Crime Scene Behavior. Journal of Police and Criminal Psychology, 2004. Vol. 19, 1–16.

7. Fritzon, K. An Examination Of The Relationship Between Distance Travelled And Motivational Aspects Of Fire-Setting Behaviour. Journal of Environmental Psychology 2001. Vol. 21, 45–60.

8. Santtila, P. & Häkkänen, H. & Fritzon, K. Inferring the characteristics of an arsonist from crime scene actions: a case study in offender profiling. International Journal of Police Science and Management, 2003. Vol. 5, 1–15.

9. Laukkanen, M. Geographic Profiling. Using home to crime distances and crime features to predict offender home location. Åbo Akademi University 2007. ISBN 978-952-92-3091-4.

10. Salonen, M. Pelastusrikkomuksen perusteet: Pelastusrikkomuksen vähäinen käyttö ja sen syyt. Pelastusalan päällystutkiminnon opinnäytetyö (AMK), 2020. Saatavissa osoitteessa [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/346022/Salonen\\_Maarit.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/346022/Salonen_Maarit.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

11. Salonen, M. & Mäkelä, P. Puolikuollutta pelastusrikkomusta elvyttämässä. Blogiteksti Pelastusopiston internet-sivulla, 2021. Saatavissa osoitteessa <https://www.pelastusopisto.fi/puolikuollutta-pelastusrikkomusta-elvyttamassa/#1f7e56c4>

12. Pelastuslain uudistamisen esiselvityshanke. Pelastustoimintajaos: Arviomuistio. 2021. Saatavissa osoitteessa [https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/5de5a36b-d3df-452e-b8a7-d3a947de4f95/5d67059d-8b7b-44ab-a8b6-e74313a7dabc/LAU-SUNTOPYYNTO\\_20210408074124.PDF](https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/5de5a36b-d3df-452e-b8a7-d3a947de4f95/5d67059d-8b7b-44ab-a8b6-e74313a7dabc/LAU-SUNTOPYYNTO_20210408074124.PDF)

# Pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuus

## TIIVISTELMÄ

Pelastuslain uudistuksessa vuonna 2011 sisällytettiin lain 42 §:ään kaikille viranomaisille ilmoitusvelvollisuus havaitusta tai muulla tavoin tietoon saadusta ilmeisestä palovaarasta tai onnettomuusriskistä. Ilmoitusvelvollisuus on tärkeä turvallisuustyökalu toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden asumisen turvallisuuden varmistamisessa. Ilmoittamiseen on olemassa valmis ilmoituslomake. Ilmoituksen tekeminen edellyttää siitä huolimatta ilmoittajalta ilmoitusosaamista. Artikkelin tavoitteena on syventää ilmoitusvelvollisuutta, osaamista, velvollisuuden toteutumista sekä vaikuttavuutta koskevaa tietoa. Aineistoina käytetään neljän aiemmin raportoidun tutkimuksen tietoja, sekä pelastuslaitoksilta toukokuussa 2021 kyselyllä kerättyjä seurantatietoja. Tulosten mukaan ilmoitusvelvollisuutta käytetään kasvavassa määrin, ja siitä koulutusta saaneet henkilöt ovat aktiivisempia ilmoittajia kuin kouluttamattomat. Ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuus syntyy pelastuslaitosten ja eri toimijatahojen yhteistyönä tekemillä tapauskohtaisilla toimenpiteillä. Toisaalta interventioissa on ongelmia. Pelastuslaitokset edistävät ilmoitusvelvollisuustietoisuutta, mutta lainkohdan järjestelmälliseen käyttämiseen tarvitaan edelleen pelastustoimen, sosiaali- ja terveystoimen, poliisin sekä muiden toimijoiden yhteistyötä ja koulutusta.

## JOHDANTO JA ARTIKKELIN TAVOITE

Pelastuslain uudistuksen yhteydessä vuonna 2011 säädettiin uusi ilmoitusvelvollisuus: Jos viranomaiset havaitsevat tai saavat tietää rakennuksessa, asunnossa tai muussa kohteessa ilmeisestä palonvaarasta tai muusta onnettomuusriskistä, heidän tulee ilmoittaa asiasta alueen pelastusviranomaiselle. Ilmoitusvelvollisuus koskee myös kuntaa ja palveluntarjoajia sekä niiden palveluksessa olevaa henkilöstöä. Ilmoitus on tehtävä salassapitosäädösten sitä estämättä. [1]

Hallituksen esityksessä pelastuslaista korostui huoli toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden asumisen turvallisuudesta erityisesti palvelu- ja tukiasumisessa [2]. Perusteluissa viitataan

rakennuspaloon, jossa menehtyi useita sosiaalitoimen asiakkaita. Tapauksesta laaditussa Onnettomuustutkintakeskuksen tutkimustaselostuksessa [3] on todettu tiedonvälityksen ongelmat viranomaisten välillä ja edellytetty järjestelyä, jossa tiedonkulku varmistettaisiin:

*”Sisäasiainministeriön tulisi yhdessä sosiaali- ja terveystoimen kanssa luoda järjestelyt, jotka mahdollistavat eri viranomaisien järjestelmiin kertyvän tiedon sekä havaintojen välittämisen asiasta vastaavalle viranomaiselle siten, että tieto tallentuu ja velvoittaa toimivaltaisen viranomaisen reagoimaan tarvittavalla tavalla.”* [3, s. 57].

Suositus edellyttää, että tieto tallentuu ja johtaa asianmukaisiin toimenpiteisiin. Tiedon tallentaminen on tärkeä asioiden todennettavuuden varmistamiseksi. Asianmukaiset toimenpiteet ovat puolestaan tärkeitä puuttumisen vaikuttavuuden varmistamiseksi.

Pelastuslakiin kirjatun ilmoitusvelvollisuuden turvallisuusvaikutus perustuu siihen, että asumisturvallisuuden vaarat tulevat viranomaisten tietoon ja vaaroihin puututaan. Toteutuakseen lainkohta edellyttää viranomaisilta vaarojen tunnistamisen taitoa, ilmoitusosaamista, toimivaa järjestelmää ilmoitusten välittämiseksi sekä asianmukaista vastetta kunkin ilmoituksen taustalla olevien ongelmien korjaamiseksi. Tähän tarvitaan osaamista.

Miten sitten ilmoitusvelvollisuus on toteutunut ja mikä on sen vaikuttavuus? Velvollisuuden toteutumista tai hankkeiden vaikuttavuutta ilmoitusvelvollisuuden edistäjänä on arvioitu alustuksessa Itä-Suomen yliopiston järjestämällä Vaikuttavuuden päivillä [4]. Lisäksi ilmoitusten määrää on arvioitu pelastuslain uudistamisen yhteydessä [5, s. 23]. Muilta osin ilmoitusvelvollisuuden toteutumista tai -velvollisuutta edistäneiden hankkeiden tai koulutusten vaikuttavuutta ei ole juurikaan arvioitu. Arvioinnin jatkamiselle ja tiedon syventämiselle on kuitenkin tilaus. Arviointi on paikallaan, koska ilmoitusvelvollisuuden sisällyttämisestä pelastuslakiin on kulunut 10 vuotta, mutta myös pelastuslain uudistuksen [6] vuoksi.

**Artikkelin tavoitteena on arvioida pelastuslain 42 §:n ilmoitusvelvollisuuden jalkautumista, ja syventää sen vaikuttavuut-**

ta koskevaa tietoa pelastustoimen ja sosiaali- ja terveystoimen rajapinnassa. Tarkoituksena on edistää rakentavaa keskustelua aiheesta ja edistää toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden asumisen turvallisuutta ja paloturvallisuutta.

## VAIKUTTAVUUS JA ILMOITUSVELVOLLISUUDEN VAIKUTTAVUUS

Kirjallisuudessa vaikuttavuudelle on useita määritelmiä: Vaikutavuuden arvioinnissa arvioidaan tavoitteiden ja tuotosten välistä yhteyttä. Vaikuttavuus voi olla päämäärään pyrkimistä ja tavoitteiden saavuttamista. Vaikuttavuutta voidaan tarkastella kustannusvaikuttavuuden näkökulmasta. Vaikuttavuuden arvioinnissa seurataan, mitä tai minkälainen muutos on saatu aikaan toiminnalla. Koulutuksen vaikuttavuutta voidaan mitata arvioimalla, miten opittua asiaa on sovellettu käytäntöön ja miten koulutus vastaa tarpeita. Vaikuttavuus voi olla yksilön ja yhteiskunnan tarpeiden tyydyttämistä. [7, 8, 9, 10]

Ilmoitusvelvollisuuden tavoitteena on arjen ja asumisen turvallisuuden edistäminen. Sosiaali- ja terveydenhuollon kontekstissa tämä tarkoittaa asiakas- ja potilasturvallisuuden edistämistä. Taustalla olevana tyydyttävänä tarpeena on turvallisuuden tarve. Vaarojen ja riskien arviointitaitoa sekä ilmoitusosaamista voidaan lisätä turvallisuuskoulutuksella. Koulutusta on järjestetty viranomaistoimijoille ja heidän palveluksessaan olevalle henkilöstölle. Ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuutta voitaneen arvioida ilmoitusten määrällä. Toisaalta vaikuttavuuden arviointiin tulee sisältyä ilmoittamista seuraavien toimenpiteiden määrällinen ja turvallisuusvaikutuksen laadullinen arviointi.

Pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuutta voitaisiin edellä olevan perusteella arvioida seuraavilla mittareilla:

- eri viranomaistoimijoiden tietoisuus laista ja ilmoitusvelvollisuudesta
- ilmoitusvelvollisuutta koskevan koulutuksen, ohjauksen tai opastuksen yleisyys
- tehtyjen ilmoitusten määrä sekä
- mahdollinen turvallisuusmuutos, eli todellinen turvallisuutta edistävä kehitys.

## AINEISTO JA MENETELMÄT

Pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuuden arvioinnissa aineistona käytettiin kirjallisuutta, sosiaali- ja terveystoimen tutkimustuloksia sekä pelastuslaitoksille tehtyä kyselyä. Tutkimuksessa hyödynnettiin Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksella vuosina 2012–2016 tehdyn Sosiaali- ja terveydenhuollon paloturvallisuuteen liittyvät käytännöt ja pelastuslaki (STEP)-hankkeen tutkimusraporteista saatavissa olevia tietoja [11, 12, 13]. Aineiston perusteella saatiin vaikuttavuusarviointiin toiminnanharjoittajien näkökulma. Toisena aineistona käytettiin Suomen lähi- ja perushoitajaliitto SuPerin jäsenkunnalle vuonna 2019 tehdyn kyselyn aineistoja ja kyselystä tehtyä aiempaa julkaisua [14]. Ilmoitusvelvollisuuden jalkautumisen mittareina käytettiin lähihoitajien ilmoitusvelvollisuudesta saamaa koulutusta, opastusta tai ohjeistusta, sekä tehtyjä ilmoituksia. Aineiston perusteella saatiin käytännön työtä tekevien lähihoitajien näkökulma. Lisäksi ilmoitusvelvollisuuden toteutumista mitattiin pelastuslaitoksille toukokuussa 2021 tehdyn kyselyn perusteella. Kyselyyn vastasi yhteensä 14 henkilöä 13:lta pelastuslaitosten alueelta. Kyselyn perusteella saatiin tietoa ilmoitusmäärien kehityksestä. Lisäksi pelastuslaitoksille tehdyn kyselyn perusteella saatiin tietoa siitä, minkälaisiin toimenpiteisiin ja minkälaisiin muutoksiin ilmoit-

tukset ovat johtaneet. Näin saatiin toiminnanharjoittajien, käytännön työtä tekevien lähihoitajien sekä pelastuslaitoksen, näkökulmat vaikuttavuuteen.

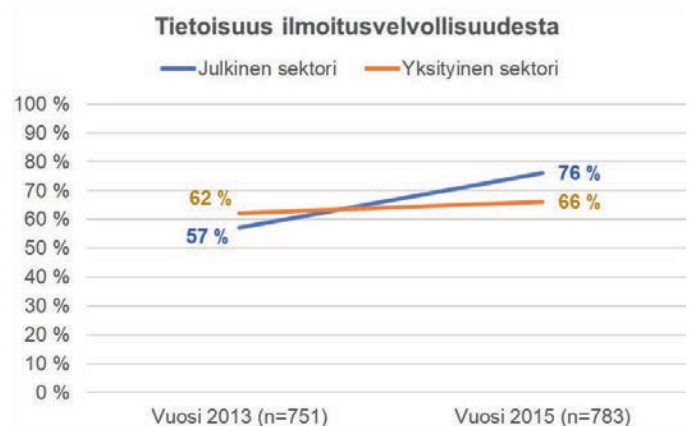
Artikkeli sisältää ilmiötä kuvaavan laadullisen ja kvantitatiivisen arvioinnin. SuPerin kyselyn aineistosta on tehty lisäksi ristiintaulukoimalla eri vastaajaryhmiä ja asiakasryhmiä vertailevat analyysit, joissa on käytetty Khi:n neliön testiä. Testi sopii hyvin luokitellun aineiston arviointiin. Koska kyselyn vastaajamäärä oli 3430, määrä on riittävä tilastolliseen testaamiseen. Tilastollinen merkitsevyys on ilmoitettu p-arvoilla  $p < 0,001$ , ero on tilastollisesti erittäin merkitsevä,  $p < 0,01$ , tilastollisesti merkitsevä ja  $p < 0,05$ , jolloin ero on tilastollisesti melkein merkitsevä, eikä tulos ole kohtuullisen suurella varmuudella satunnaisvaihtelusta johtuva.

## NÄKÖKULMIA ILMOITUSVELVOLLISUUDEN VAIKUTTAVUUTEEN

### Toiminnanharjoittajien tietoisuus pelastuslain mukaisesta ilmoitusvelvollisuudesta

Sosiaali- ja terveydenhuollon toiminnanharjoittajien tietoisuutta pelastuslain 42 §:n mukaisesta ilmoitusvelvollisuudesta on tutkittu Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksella, Palosuojelurahaston rahoittamassa Sosiaali- ja terveydenhuollon paloturvallisuus ja pelastuslaki (STEP) -hankkeessa. Hankkeessa tehtiin kolme kyselytutkimusta, joissa kaikissa ilmoitusvelvollisuuden tunnettuutta kysyttiin kysymyksellä: **Oletteko tietoinen pelastuslain sisältämästä ilmoitusvelvollisuudesta pelastuslaitokselle asukasturvallisuuden suhteen?**

Ensimmäinen kysely tehtiin Helsingin kaupungin alueella toimineille toiminnanharjoittajille vuonna 2012. Kyselyyn vastasi yhteensä 94 toiminnanharjoittajan edustajaa. Näistä 59 prosenttia ilmoitti olevansa tietoinen ilmoitusvelvollisuudesta. [11, s. 29] Muualle Suomeen tehtiin erillinen kysely vuonna 2013 ja kysely toistettiin samansuuntaisena koko Suomessa vuonna 2015. Vuonna 2013 kyselyyn vastasi 751 toiminnanharjoittajaa, joista 59 prosenttia ilmoitti olevansa tietoinen ilmoitusvelvollisuudesta [12, s. 20]. Tietoisuus oli siis samalla tasolla kuin se oli Helsingin alueella edellisvuonna. Vuonna 2015 tehdystä kyselystä (n=783) ilmoitusvelvollisuudesta ilmoitti olevansa tietoinen yhteensä 72 prosenttia vastaajista [13, s. 35]. Kehitys oli ollut myönteinen, joskin epätasainen: Kaikkien vastaajien tietoisuus asiasta oli aiempaa yleisempää, mutta tietoisuus oli kehittynyt erityisesti julkisen sektorin toimipaikoilla. Yksityisen sektorin toimipaikoilla tietoisuuden kehitys oli ollut selkeästi niukempi. (Kuva 1.)



Kuva 1. Sosiaali- ja terveydenhuollon toiminnanharjoittajien tietoisuus pelastuslain mukaisesta ilmoitusvelvollisuudesta vuosina 2013 ja 2015. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, STEP-hanke [12, s. 20; 13, s. 35].

## ► Ilmoitusvelvollisuus lähihoitajien kokemana

Vuonna 2019 Suomen lähi- ja perushoitajaliitto SuPerin jäsenkunnalle tehdyssä kyselyssä (n=3430) kysyttiin yhtäältä vastaajien saamaa ilmoitusvelvollisuuskoulutusta toisaalta heidän tekemiään ilmoituksia pelastuslain 42 §:n perusteella [14]. Koulutusta kysyttiin kysymyksellä: **Olen saanut koulutusta, opastuksen tai perehdytyksen pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoituksen tekemiseen.** Vastausvaihtoehtoina oli: kyllä, ei, en osaa sanoa, ei koske työtäni. Kyselyn perusteella pelastuslain mukaisesta ilmoitusvelvollisuudesta oli opastusta, koulutusta tai perehdytyksen saanut neljäsosa (25 %) vastaajista [14, s. 124]. Noin neljä prosenttia ilmoitti, ettei asia koske heidän työtään.

Aineistosta artikkelia varten tehdyn vertailun perusteella ilmoitusvelvollisuutta koskeneen koulutuksen saaneiden vastaajien osuudessa ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa yksityisen ja julkisen sektorin työntekijöiden välillä. Koulutuksen saannissa ei ole myöskään tilastollisesti merkitsevää eroa hoivamuotojen perusteella. Hoivamuotoina kyselyssä on käytetty kuutta luokkaa: kotihoito, tuettu asuminen, palveluasuminen, tehostettu palveluasuminen, laitoshoido ja muut palvelut. Asiakkaiden osalta vertailussa on käytetty viittä asiakasryhmää: vanhustyö, vammaistyö, mielenterveys- ja päihdetyö (yhdistetty), muistisairaat asiakkaat, useita asiakasryhmiä ja muu työ. Näistä ilmoitusvelvollisuudesta koulutusta on parhaiten saanut muistisairaiden ja vammaisten asiakkaiden kanssa työskentelevät vastaajat (28 %) ja vähiten useiden asiakasryhmien (20 %) ja muiden asiakkaiden (21 %) kanssa töitä tekevät vastaajat. Ero ei ole kuitenkaan tilastollisesti merkitsevää.

Ilmoitusten tekemistä käytännössä kysyttiin väittämällä: **Olen tehnyt pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoituksen.** Kyselyn kaikista vastaajista 2,9 prosenttia oli tehnyt pelastuslain mukaisen ilmoituksen. Lähes kymmenesosa (7,7 %) ilmoitti, ettei ilmoittaminen kuulu heidän työhönsä. Lisäksi 1,5 prosenttia vastasi, että ei saa tehdä ilmoitusta. [14, s. 127]

Artikkelia varten tehdyn vertailun perusteella ilmoittamisessa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja hoivamuodon tai asiakas-kunnan perusteella. Sen sijaan ilmoittaminen kytkeytyi huoleen asiakkaasta. Mitä enemmän huolta kannettiin asiakkaasta, sitä todennäköisemmin tehtiin ilmoitus. Korkein ilmoittajien osuus (5,1 %) oli vastaajilla, jotka ilmoittivat olevansa jatkuvasti huolissaan asiakkaistaan.

Jos ilmoittamista arvioidaan suuralueittain, on ilmoittaminen Etelä-Suomessa (4,6 %) ja Helsingin ja Uudenmaan alueella (4,0 %) tavanomaisempaa kuin Länsi-Suomessa (2,3 %) tai Pohjois- ja Itä-Suomessa (1,7 %). Ero on tilastollisesti erittäin merkitsevää (p<0,001).

Lisäksi koulutuksen ja ilmoittamisen välillä havaittiin selkeä positiivinen yhteys: Ilmoitusvelvollisuudesta koulutusta saaneista vastaajista 7,6 prosenttia vastasi tehneensä ilmoituksen. Ei koulutusta saaneista vastaajista ilmoituksen oli tehnyt vain 1,4 prosenttia. Ero koulutuksen saaneiden ja ei koulutusta saaneiden välillä oli erittäin merkitsevää (p<0,001).

## Konkretia, pelastuslaitosten vastaanottamat ilmoitukset

Pelastuslaitoksille toukokuussa 2021 tehtyyn kyselyyn saatiin 14 vastausta 13:lta pelastuslaitosten alueelta (59 % pelastuslaitoksista). Vastaukset saatiin Etelä-Karjalan, Etelä-Pohjanmaan, Helsingin, Itä-Uudenmaan, Jokilaaksojen, Keski-Suomen, Keski-Uudenmaan, Länsi-Uudenmaan, Oulu-Koillismaan, Pirkanmaan, Pohjois-Savon ja Varsinais-Suomen pelastuslaitoksilta.

Vastausten mukaan vuosina 2012–2020 on näille pelastuslaitoksille tehty yhteensä 4659 pelastuslain 42 §:n mukaista vaarailmoitusta. Vuosien 2019 ja 2020 osalta pelastuslaitosten raportoidut määrät perustuvat ensisijaisesti seurantaan, sitä aiempien vuo-

sien osalta ensisijaisesti arvioon tai tiedot puuttuivat vastauksista. Vuonna 2020 ilmoituksia oli kyselyyn vastanneille pelastuslaitoksille tullut yhteensä 1503, vuonna 2019 yhteensä 1066 ja vuonna 2018 yhteensä 797 ilmoitusta, kun niitä vuonna 2018 oli koko maassa saatu noin 800 [5, s. 23]. Ilmoitusten määrä näyttäisi siis kasvaneen noin kaksinkertaiseksi vuodesta 2018. Ilmoitusmääräisen kehityksen pelastuslaitoksittain on esitetty kuvassa 2.

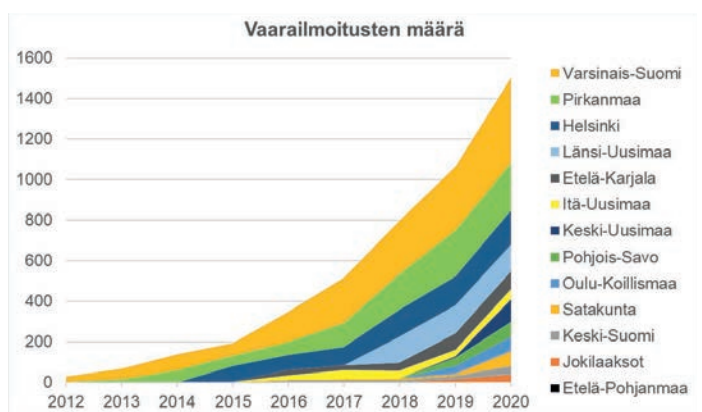
Ilmoitusten kokonaismäärä vaihtelee alueittain Etelä-Pohjanmaan neljästä ilmoituksesta Varsinais-Suomen 1581 ilmoitukseen. Vuonna 2020 ilmoitusten määrä vaihteli Etelä-Pohjanmaan kolmesta ilmoituksesta, Varsinais-Suomen 420 ilmoitukseen. Ilmoitusten määrän kehitys on ollut lähes jokaisella alueella kasvava.

Yksittäisten pelastuslaitosten alueilla oli vuosina 2019 ja 2020 kaikki ilmoitukset saatu Pelastuslaitokset.fi-verkkosivuilla olevan lomakkeen [15] kautta. Osalla pelastuslaitoksista ilmoituksista on tullut lomakkeella noin 90 prosenttia. Osa alueista ei ole tilastoinut tai seurannut ilmoitusten saantitapaa. Lomakkeen ohella pelastuslaitokset ovat saaneet ilmoituksia sähköpostitse ja puhelimitse, mutta myös kirjeitse, suoraan henkilökohtaisesti tehdyllä ilmoituksella, sekä pelastustoimen omana sisäisenä ilmoituksena tai ensihoidon kautta. Muilla tavoin tulleiden ilmoitusten osuus vaihtelee pelastuslaitoksittain nollassa ilmoituksesta jopa kolmasosaan kaikista ilmoituksista.

## Ilmoitusta seuranneet toimenpiteet

Ilmoitukset ovat johtaneet vähintään pelastustoimen omiin toimenpiteisiin, kuten tilanteen arviointiin tai palotarkastukseen. Pelastustoimen ja sosiaalitoimen yhteistyössä tehtyihin arviointeihin johti neljä viidesosaa ilmoitetuista tapauksista. Kotihoidon kanssa on tehty yhteistyötä kahdessa kolmasosassa ilmoitettuja vaaratilanteita. Ilmoitusten joukossa on vastaajien mukaan ollut yksittäisiä asiattomia tai tarpeettomia ilmoituksia.

Kyselyn perusteella ilmoitukset ovat pääsääntöisesti johtaneet yhteistyöhön sosiaalitoimen, kotihoidon, vanhussosiaalitoimen ja muiden toimijoiden kanssa. Muina yhteistyökumppaneina ovat olleet tilannekohtaisesti muun muassa kunnan terveystarkastaja, ympäristötarkastaja, eläinlääkäri, poliisi, kohteessa asuvan henkilön omaiset – mikäli heitä on – tai edunvalvoja, jos edunvalvoja on nimetty. Lisäksi yhteistyöhön on voitu ottaa mukaan tilanteen mukaisesti asumisneuvoja, isännöitsijä, mutta myös taloyhtiön hallitus. Omakotiasumisen ongelmien yhteydessä on oltu yhteydessä myös rakennusvalvontaan. Näiden ohella pelastuslaitokset ovat tehneet tarvittaessa yhteistyötä kolmannen ja neljännen sektorin kanssa. Yhteistyökumppanina on tilanteen mukaan



Kuva 2. Pelastuslain 42 §:n mukaisten vaarailmoitusten määrä vuodessa pelastuslaitoksittain vuosina 2012–2020 (Pelastuslaitoksille toukokuussa 2021 tehdyn kyselyn aineisto, n=13).



## "Koulutuksella on selkeä vaikutus ilmoitusvelvollisuuden toteutumiseen ja ilmoittamisella on vaikutusta vaaratilanteiden korjaamiseen moniammatillisen yhteistyön kautta."

ollut Suomen Punainen Risti, Pelastusarmeija, Sininauhasäätiö ja muun muassa Fingerroosin säätiö.

Yhteistyö on vaihdellut tarpeen mukaan. Yhteistyön osana on tehty yhteisiä tarkastuksia ilmoituksen kohteeseen. Yhteistyössä on ollut kyse eri viranomaistoimijoiden osaamisen yhdistämisestä ja parhaan toimijatahon etsimisestä asukkaan ongelman ratkaisemiseksi. Muiden toimijoiden kanssa tehty yhteistyö on myös vaihdellut. Yhteistyön osana on ollut myös lahjoituksista, kuten palovaroitinten lahjoittamista.

Näiden ohella pelastuslaitokset ovat tehneet alueellista ennakkoivaa yhteistyötä, hankeyhteistyötä, kouluttaneet ja tuottaneet erilaisia koulutusmateriaaleja, mukaan lukien videomateriaaleja turvallisuuskoulutustarkoituksiin. Osa pelastuslaitoksista on kouluttanut ja tukenut kotihoidon työntekijöitä ja muita sosiaali- ja terveydenhuollon työntekijöitä. Koulutusta on kohdistettu niin pelastuslaitoksille, sosiaali- ja terveystoimen henkilöstölle kuin muille toimijoille, kolmannen sektorin edustajille, yhdistyksille, mutta myös poliisille.

Vastausten perusteella ilmoitukseen johtaneet tilanteet vaihtelevat merkittävästi. Varsinaisina toimenpiteinä on tilannekohtaisesti voinut olla asukkaan tuki, mutta myös taloudellinen tuki. Tapaukset ovat voineet johtaa asunnon raivaussivoukseen palokuorman vähentämiseksi, tai asukkaan siirtoon kotona asumisesta hänen terveydentilaansa ja elämäntilannettaan paremmin vastaavaan hoivapaikkaan. Ilmoitus on voinut johtaa kotihoidon palveluiden tai siivouspalvelun järjestämiseen tai esimerkiksi tuholaiistorjuntaan. Joissakin tapauksissa tilanne on voinut johtaa asukkaan häättöön. Yksittäisissä tapauksissa ilmoitus ei ole edellyttänyt toimenpiteitä. Näissä asukas on ehtinyt ilmoituksen jälkeen esimerkiksi muuttaa. Toisaalta joissakin tilanteissa prosessi on voinut pitkittyä ja asukas on ehtinyt menehtyä ennen ongelman ratkaisua.

### Ilmoituslomakkeen toimivuus ja kehitystarve

Vaarailmoitusten tavanomaisin työkalu on ollut ilmoituslomakkeen käyttö. Toisaalta ilmoituslomakkeen käytössä ja tiedon välittymisessä on todettu ongelmia. Vastausten perusteella lomaketulisi edelleen kehittää.

Esimerkiksi ensihoito olisi yksi potentiaalinen ilmoittaja vaaratilanteista. Kun nykyinen ilmoituslomake ei tietosuojasyistä sisällä kohteen tai kohdehenkilön tietoja eikä ensihoidon henkilöstö saa kirjata asiakkaan tietoja, ei ilmoituslomake ole toimiva. Kun lomakkeeseen kirjataan vain ilmoittajan tiedot, ja vaaran tyyppi, ei ensihoitaja voi aina muistaa jälkikäteen asiakastietoja tai kohteen tilannetta. Lisäksi viranomaistaustaisten henkilöiden tavoittaminen työpöydästä voi olla haastavaa muun muassa työvuorojen vaihtumisen vuoksi. Vastauksissa onkin esitetty lomakkeen kehittämistä tietoturvalle, jotta asiakkaan tai kohteen tiedot voitaisiin kirjata suoraan lomakkeelle ja lähettää salattuna viesti-

nä pelastuslaitokselle. Tämä nopeuttaisi prosessia ja vähentäisi esiselvittelyyn kuluvaa aikaa. Toisaalta lomaketta kannattaisi samalla kehittää siten, että se tukisi tilastotietojen keräämistä.

### Ilmoittaminen, hankkeet ja muut viranomaistoimijat

Jos ilmoitusmääriä peilataan erilaisiin sosiaali- ja terveydenhuollon ja pelastustoimen toimenpiteisiin ja turvallisuushankkeisiin, voidaan todeta, että kyselyyn vastanneista ja korkeat ilmoitusmäärät omaavista pelastuslaitoksista ainakin Varsinais-Suomessa, Pirkanmaalla ja Etelä-Karjalassa on ollut sosiaali- ja terveydenhuollon henkilöstön paloturvallisuusosaamista ja ilmoitusvelvollisuutta tukevia hankkeita [16, s. 13; katso myös 17]. Helsingissä pelastuslaitoksen edustaja on sijoitettu sosiaalitoimen yksikköön. Kaikissa tapauksissa tavoitteena on tukea sosiaalitoimen henkilöstön turvallisuusosaamista ja asukasturvallisuutta.

Pelastuslain 42 §:n mukaista ilmoitusvelvollisuutta on arvioitu myös poliisin toiminnan näkökulmasta. Poliisiammattikorkeakoululla tehdyssä opinnäytetyössä todetaan, että poliisilla ei ole vielä riittävästi tietoa ilmoitusvelvollisuudesta ja poliisille tarjottavaa koulutusta tulisi kehittää [17]. Pelastuslaitoksille tehdyn kyselyn perusteella kehittämistyö on jo käynnistynyt.

### POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmoitusvelvollisuuden tunnettavuudessa ja käytännön toteutumisessa näkyy selkeä myönteinen kehitys. Koulutuksella on selkeä vaikutus ilmoitusvelvollisuuden toteutumiseen ja ilmoittamisella on vaikutusta vaaratilanteiden korjaamiseen moniammatillisen yhteistyön kautta. Näin lainsäädännön vaikutukset konkretisoituvat vaaratilanteisiin puuttumisena.

Toisaalta tulokset osoittavat lainsäädännön vaikuttavuuden esteitä. Vaikka noin kolme neljäsosaa sosiaali- ja terveydenhuollon toiminnanharjoittajista ilmoitti jo vuonna 2015 tuntevansa pelastuslain mukaisen ilmoitusvelvollisuuden, tietoisuus ei ole välittänyt lähihoitajien koulutukseen. Vain noin yksi neljäsosa lähihoitajista kertoi saaneensa asiasta koulutusta, opastusta tai ohjausta. Osuus kuvaa vuoden 2019 tilannetta, eli neljä vuotta toiminnanharjoittajille tehdyn kyselyn jälkeen.

Kun koulutusta saaneet henkilöt ilmoittavat vaaroista muita useammin, on koulutuksen ja ilmoittamisen välillä havaittavissa selkeä positiivinen yhteys. Samalla koulutuksen puute näyttäisi olevan selkeä ilmoitusvelvollisuuden toteutumisen ja vaikuttavuuden este. Toisaalta ilmoittamista koskevien kieltojen vaikutus tulisi arvioida. Kielto on vastoin pelastuslain mukaista velvollisuutta ja sen merkitys asiakasturvallisuuden näkökulmasta tulisi tutkia.

Tietoisuus ilmoitusvelvollisuudesta perustuu sosiaali- ja terveydenhuollon toiminnanharjoittajien osalta vuosien 2012, 2013 ja 2015 kyselyihin. Tulokset osoittavat selkeän myönteisen kehityksen. Toisaalta tulokset osoittavat selkeän eron julkisen ja yksityisen sektorin tietoisuuden kehityksessä. Eron syy ja mahdollinen pysyvyys tulisi selvittää. Valitettavasti kyselyä ei ole uudistettu vuoden 2015 jälkeen, joten tilanteen kehittymistä ja kehityksen eron korjaamista ei voida toiminnanharjoittajien osalta todeta.

Kun pelastustoimeen saatiin yhtenäinen ilmoituslomake, ilmoitusmäärät ovat kasvaneet. Lainkohdan implementointi on kuitenkin ollut hidasta, eikä kaikilla sosiaali- ja terveydenhuollon, ei myöskään muilla viranomaistoimijoilla, ole vielä vuonna 2019 ollut tietoa ilmoitusvelvollisuudesta. Tämän vuoksi sen vaikuttavuus jää edelleen puutteelliseksi ja tilanteen korjaamiseksi tarvitaan toimenpiteitä. Ilmoitusvelvollisuuden määrätietoisien jalkauttamisen jatkaminen on välttämätöntä kaikissa palvelutyypeissä – myös säännöllisten sosiaalipalvelujen ulkopuolelle jäävien toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden osalta. ▶

► Ilmoitusmäärät osoittavat, että lainsäädäntö on tullut tarpeeseen. Myös ilmoitusvelvollisuuden käyttöalue on ollut laaja: vaikka hallituksen esityksen taustalla oli huoli toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden turvallisuudesta erityisesti palvelu- ja tukiasumisessa, ilmoitusvelvollisuus on osoittautunut olevan käyttökelpoinen myös kotona asumisen ja kotihoidon asiakkaiden turvallisuuden varmistamisessa. Käytännössä merkittävä osa ilmoituksista oli pelastuslaitosten edustajien vastausten perusteella kohdistunut kotihoidon asiakkaiden asumisen turvallisuuden vaarantaviin tekijöihin.

Tutkimus laajentaa tietoa pelastuslain mukaisesta ilmoitusvelvollisuudesta ja sen toteutumisesta käytännössä. Kuvaa tulisi kuitenkin edelleen täydentää. Nyt noin puolet pelastuslaitoksista vastasi kyselyyn. Kysely on tarkoituksenmukaista toistaa, jotta tiedot saadaan täydennettyä kaikkien pelastuslaitosten osalta ja vaikutavuutta päästään arvioimaan koko maan kattavalla aineistolla.

Artikkelin aineisto antaa tietoa kolmesta näkökulmasta, mutta neljäs ja tärkein näkökulma jää valitettavasti puuttumaan. Ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuus ilmoituksen kohteen, eli asiakasnäkökulmasta tulisi tutkia esimerkiksi haastattelututkimuksella, jossa informantteina olisivat toimenpiteiden kohteeksi joutuneet henkilöt. Vaihtoehtoisesti puuttumistilanteissa voitaisiin kerätä asiakaspalautteita, jota käytettäisiin vaikuttavuuden arviointiin ja toiminnan kehittämiseen. Mahdollinen tutkimus edellyttää luonnollisesti eettistä ennakoarviointia.

Toimintakyvyltään heikentyneiden, kuten iäkkäiden henkilöiden arjen ja asumisen turvallisuudessa on ongelmia, joihin tulee puuttua. On tarkoituksenmukaista, että toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden arjen ja asumisen turvallisuus pystytään varmistamaan hyvissä ajoin, ennen merkittävien vaaratilanteiden tai onnettomuuksien syntymistä. Jos vaaratilanteita kuitenkin syntyy, turvallisuus tulee pystyä varmistamaan viimeistään ilmoitusvelvollisuuden ja sen tuottaman yhteistyön ja toimenpiteiden kautta.

## KIITOKSET

Kiitän kaikkia artikkelin tuottamisessa yhteistyötä tehneitä ja tekstejä kommentoineita kollegoita sekä yhteistyökumppaneita aiempien aineistojen osalta. Erityinen kiitos ilmoitusvelvollisuutta koskeneeseen kyselyyn vastanneille pelastuslaitosten edustajille tiedon keräämiseen ja tuottamiseen osallistumisesta. Tutkimus on tehty osana Palosuojelurahaston yleisavustuksella tapahtuvaa paloturvallisuuden asiantuntijatyötä. Rahoittajalle lämpimät kiitokset.

## LÄHDELUETTELO

1. Pelastuslaki 379/2011. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2011/20110379>.
2. HE 257/2010. Hallituksen esitys Eduskunnalle pelastuslaiksi ja laiksi meripelastuslain 23 §:n muuttamisesta.
3. Onnettomuustutkintakeskus. Tulipalo tukiasumiseen käytetyssä pientalossa Espoossa 27.3.2008. Tutkintaselostus B1/2008Y.
4. Ojala, T. (2020). Hankkeiden vaikuttavuus sosiaali- ja terveydenhuollossa – Case pelastuslain mukainen ilmoitusvelvollisuus. Alustus. Vaikuttavuuden tutkimuksen päivät 6.–7.10.2020.
5. Sisäministeriö (2021). Pelastuslain uudistamisen esiselvityshanke – Jaosto 2: Onnettomuuksien ehkäisy ja valvonta. Muis-tio 30.3.2021.
6. Sisäministeriö. Pelastuslain uudistamisen esiselvityshanke. <https://intermin.fi/hankkeet/hankesivu?tunnus=SM050:00/2019> [11.5.2021].
7. Mäki-Opas, T., Vaarama, M., Valkonen, T., Leinonen, J., Sy-

## "Ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuus ilmoituksen kohteen, eli asiakasnäkökulmasta tulisi tutkia esimerkiksi haastattelututkimuksella."

väjärvi, A. & muu PROMEQ-konsortio. Työkalupakki vaikuttavaan hyvinvoinnin ja terveyden edistämiseen – Sosiaalinen laatu, elämänlaatu, vaikuttavuusindikaattorit, hyvät käytännöt, osallistavat työmenetelmät ja kypsyysanalyysi. <https://sites.uef.fi/vai-kuttavuuden-talo/julkaisut/>.

8. Kuntaliitto. Vaikuttavuus. <https://www.kuntaliitto.fi/talous/tuloksellisuus/vaikuttavuus>.

9. Heliskoski, J., Humala, H., Kopola, R., Tonteri, A. & Tyköyläinen, S. (2018). Vaikuttavuuden askelmerkit. Työkaluja ja esimerkkejä palveluntuottajille. Sitra 2018. <https://media.sitra.fi/2018/03/27105443/vaikuttavuuden-askelmerkit.pdf>.

10. Poliitiikkatoimien vaikuttavuusarvioinnin kehittäminen – Kuinka parantaa tiedonkäyttöä poliittisessa päätöksenteossa. Valtioneuvoston kanslian raporttisarja 6/2009.

11. Lounamaa, A. (2012). STEP-hankkeen tausta ja pilottikysely Helsingissä. Alustus. Pelastustoimen ajankohtaisseminaari. Jyväskylä 22.10.2012. <https://thl.fi/fi/tutkimus-ja-kehittaminen/tutkimukset-ja-hankkeet/step-hanke/julkaisut>.

12. Lounamaa, A., Råback, M., Grönfors, M., Impinen, A., Martikainen, N. & Lillsunde, P. (2013). Paloturvallisuuteen liittyvät käytännöt ja pelastuslaki laitos-, asumis- ja kotipalveluja tarjoavissa yksiköissä. Turvallisuuskysely 2013 -perusraportti. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://thl.fi/fi/tutkimus-ja-kehittaminen/tutkimukset-ja-hankkeet/step-hanke/julkaisut>. [10.5.2020]

13. Ojala, T., Koskinen, H., Grönfors, M., Somerkoski, B., Martikainen, N. & Lounamaa, A. (2016). Sosiaali- ja terveydenhuollon paloturvallisuuteen liittyvät käytännöt laitoshoidossa, tuetussa asumisessa ja kotiin annettavissa palveluissa 2015: Valtakunnallisen kyselytutkimuksen tulokset. Työpäpaperi 37/2016. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://www.julkari.fi/handle/10024/131380>. [10.5.2021]

14. Ojala, T. (2020). Toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden asumisturvallisuus, hoivahenkilöstön työturvallisuus ja turvallisuuskoulutus lähihoitajien kokemana. Suomen Pelastusalan keskusjärjestö. [https://issuu.com/spek\\_ry/docs/spek\\_puheenvuoroja\\_10?fr=sZjY4NjMyNjUxODg](https://issuu.com/spek_ry/docs/spek_puheenvuoroja_10?fr=sZjY4NjMyNjUxODg).

15. Pelastuslaitokset. Ilmoitus ilmeisestä palovaarasta tai muusta onnettomuusriskistä. Ilmoituslomake. <https://apps.pelastuslaitokset.fi/vaarailmoitus/>

16. Pelastuslaitokset (2018). Ikäihmisten kotona asumisen turvallisuus. Loppuraportti. [https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2020-11/Liite\\_9\\_3\\_IKAT-työryhmän%20loppuraportti.pdf](https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2020-11/Liite_9_3_IKAT-työryhmän%20loppuraportti.pdf)

17. Ojala, T. (2021). Turvatekniikka ja liesipalojen ehkäisy. Teoksessa Alisa Puustinen (toim.) Pelastus- ja turvallisuustutkimuksen vuosikirja 2021. Pelastusopisto. Pelastusopiston julkaisu D-sarja: Muut 2/2021, 8–27.

18. Nyman, H. (2019). Pelastuslain 42 §:n mukainen ilmoitusvelvollisuus. Toteutuminen ja kokemukset Pirkanmaan kenttäryhmissä. Poliisiammattikorkeakoulu.

# Tilannekuvan muodostaminen: näkökulmia SURE-hankkeessa tehdyistä teknologiakokeiluista

## TIIVISTELMÄ

Turvallisuusviranomaisten päätöksenteon ja toiminnan pitää olla nopeaa ja tehokasta. Eri toimijoiden on myös kyettävä yhteistyöhön haastavissa tilanteissa ja ympäristöissä. Päätöksenteko ja toiminnan johtaminen edellyttävät tiedon reaaliaikaisuutta, riittävyyttä, luotettavuutta ja oikeellisuutta, jotta tilannekuva pystytään muodostamaan. Usein viranomaisilla on myös yhteisiä tehtäviä, joihin liittyy lisäksi vapaaehtoistoimijoita ja siviilejä. Tämä tuo oman haasteensa tilannekuvan muodostamiseen ja ylläpitämiseen. Turvallisuusviranomaisten toiminnan tehostamisen kannalta vapaaehtoistoimijat ja siviilit voivat olla potentiaalinen tiedonlähde ja tilannekuvan rikastuttaja. Tässä artikkelissa tarkastellaan Tampereen kaupungin vetämässä SURE (Smart Urban Security and Event Resilience) hankkeessa tehtyjä teknologiakokeiluja ja käytetyn teknologian merkitystä tilannekuvan muodostamiseen, rikastamiseen ja eri toimijoiden välisen kommunikaation kehittämiseen. Saatujen havaintojen perusteella voidaan todeta, että viranomaisten, vapaaehtoistoimijoiden ja siviilien yhteistoimintaa on mahdollista tukea ja kehittää edelleen sijaintitietoja sekä kuva- ja videotiedostoja hyödyntävien yhteiskäyttöisten tilannekuvateknologioiden avulla. Tämä puolestaan antaa hyvät lähtökohdat hankkeessa myöhemmin toteutettavia ja laajempia moniviranomaisharjoituksia ajatellen.

## JOHDANTO

Ihmiskunta on kohdannut kriisejä kautta vuosisatojen. On ollut luonnonkatastrofeja (esim. Intian valtameren maanjäristys vuonna 2004 ja sen aiheuttama tsunami), erilaisia pandemioita (Espanjantauti, COVID-19), maailmansodat ja terrorismin aiheuttamaa kaaosta (esim. WTC-iskut). Jos tarkastellaan edellä mainittuja tapahtumia ja kriisejä yleisemminkin, voidaan niistä löytää useita yhtymäkohtia. Kriisit aiheuttavat monenlaisia tuntemuksia, kuten pelkoa, epä tietoisuutta, ärtymystä, välinpitämättömyyttä tai paniikkia riippuen siitä, kuinka läheisesti tapahtunut asia kosket-

taa ihmistä. Ihmisellä on myös halu saada selville tapahtumaan johtaneet juurisyyt. Juurisyiden etsiminen ja analysointi sijoittuu yleensä tapahtuman jälkeiselle ajalle. Esimerkiksi liikenneonnettomuuksiin johtaneet syyt – sairauskohtaus, autoon tullut tekninen vika tai muu vastaava – selvitetään vasta, kun akuutein vaihe on ohi. Lisäksi oleellista on tilannekuvan muodostaminen eli ymmärrys siitä, mikä on kriisin tämänhetkinen tilanne, missä se on tapahtunut ja minkälaisia vahinkoja on syntynyt.

Tilannekuvan muodostaminen on keskeistä monella eri sektorilla, kuten kriisinhallinnassa ja pelastustoiminnassa [1]. Myös jokapäiväisessä elämässä tarvitaan tilannekuvan muodostamista, vaikkapa autolla ajaessa osana muuta liikennettä. Tilannekuvakäsitteen määrittely ei ole suoraviivaista, sillä kirjallisuudessa termit, kuten tilannekuva tai tilannearviointi, on käytetty laajalti ja niiden merkitys on kontekstiriippuvaista. Stanton ja muut [2] esittävät tilannekuvulle kolme kirjallisuudesta löytyvää määritelmää, joista yksi tunnetuin on Endsleyn [3] määritelmä: ”the perception of elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future”. Endsleyn [3] tilannekuvan määritelmä kattaa kolme tasoa:

1. Osatekijöiden havainnointi nykyisessä tilanteessa
2. Nykyisen tilanteen ymmärtäminen
3. Tulevan tilanteen ennakointi.

Esitettyjen tasojen ja annetun tilannekuvan määritelmän perusteella voidaan sanoa, että tilannekuva on tulos ympärillä tapahtuvan toiminnan ymmärtämisestä ja perusta päätöksenteolle [1]. Lisäksi tilannekuvan muodostamisella on keskeinen rooli ympäristöissä, joissa eri toimijoiden välisellä yhteistyöllä on suuri merkitys. Tällaisiin ympäristöihin kuuluu muun muassa pelastustoimi [1]. Jotta yhteistyötä voidaan tehdä ja luotettavaa tilannekuvaa muodostaa, tarvitaan tiedon jakamista eri toimijoiden kesken. Esimerkiksi pelastustilanteissa tai yleisesti ottaen kriisitilanteissa kes-

- keisiä toimijoita voivat olla paloviranomaiset, operaattorit, uhri(t), poliisi ja ensihoitohenkilöstö. Kaikkien näiden osapuolten välillä tulisi olla sujuvaa tiedonvälitystä.

Hätäilmoitusten osalta Suomen viranomaiset tekevät jo nykyisellään hyvin laajaa yhteistyötä myös teknologisesti. Kaikki hätäilmoitukset vastaanotetaan Hätäkeskuksessa ja ilmoituksia käsitellään yhteiskäyttöisellä ERICA-hätäkeskusjärjestelmällä. Tämän lisäksi viranomaiset käyttävät operatiivisessa toiminnassaan viranomaisverkko VIRVEN viestintäteknologioita. Toimintokriittisten järjestelmien laaja yhteiskäyttö luokin hyvän perustan yhteisen tilannekuvan muodostamiselle.

Teknologisesta näkökulmasta katsottuna olemme kulkeneet pitkän matkan aiempiin sukupolviin nähden. Nykyään lähtökohtaisesti oletetaan, että jokaisella ihmisellä on käytössä vähintään matkapuhelin, sähköposti tai jokin sosiaalisen median tili, joiden avulla pystytään välittämään tietoa nopeasti ja vaivattomasti ihmiseltä toiselle. Teknologinen kehitys näkyy myös tilannekuvan rakentamisessa, johon sosiaalista mediaakin on hyödynnetty enenevässä määrin (ks. esim. [4]). MacEachren ja muut [5] esittivät karttapohjaisen web-sovelluksen nimeltään SensePlace2, joka hyödyntää kriisiin/tapahtumaan liittyviä Twitter-viestejä ja näyttää tapahtumapaikan sijainnin kartalla käyttäjälle. Näin kehittyvästä tilanteesta saadaan parempi kokonaisnäkemys. Alustassa hyödynnettiin Twitter-viestejä, mutta sen käyttöä on mahdollista laajentaa muihinkin sosiaalisen median tietolähteisiin. Myös Karami ja muut [6] hyödynsivät Twitterin mahdollisuuksia kehittämällä konseptin nimeltään TwiSA (Twitter Situational Awareness), jossa hyödynnetään tekstinlouhintamenetelmiä (esim. sentimenttianalyysi) muodostamaan parempaa tilannekuvaa katastrofeihin varautumiseen, vastaamiseen ja niistä palautumiseen. Verma ja muut [7] puolestaan kehittivät menetelmän, jolla pystytään erottamaan ne Twitter-viestit, joilla on painoarvoa tilannekuvan rakentamisen suhteen massaevakuoinnin aikana. Tekijät keräsivät Twitter-viestiaineiston ja saavuttivat yli 80 prosentin tarkkuuden kehittämälleen koneoppimista hyödyntävällä menetelmällä. Esitetyt esimerkit kirjallisuudesta osoittavat jo yksinään, että sosiaalisella medialla ja siviileillä voi olla merkittävä vaikutus viranomaisten tilannekuvan muodostamiseen.

Teknologinen kehitys ei rajoitu ainoastaan sosiaalisen median kanavien hyödyntämiseen. Siviilien ja viranomaisten välisessä vuorovaikutuksessa on olemassa useita erilaisia näkökulmia ja tasoja. Tämän artikkelin ydinideana on tarkastella kevyitä ja helppokäyttöisiä teknologiaratkaisuja, joiden avulla pystytään tukemaan sekä viranomaisten välistä että viranomaisten ja ei-viranomaisten välistä informaation jakoa ja kommunikointia yhteisen tai jaetun tilannekuvan muodostamiseksi tai rikastamiseksi. Hankkeen koekieluissa keskityttiin teknologioihin, jotka tukevat yhteisen tilannekuvan muodostamista varsinaisten viranomaisjärjestelmien ulkopuolisilla tietolähteillä. Artikkelin peruskysymystä käsittelemme meneillään olevan SURE-hankkeen näkökulmasta.

## SURE-HANKE

Euroopan Unioni on nostanut turvallisuuden yhdeksi keskeiseksi teemaksi ja se heijastuu myös EU:n myöntämässä rahoituskanaavissa, kuten Horisontti 2020 -ohjelmassa. SURE (<https://www.uia-initiative.eu/en/uia-cities/tampere>) on EU:n UIA-rahoitettu projekti, jota vetää Tampereen kaupunki. Projektissa mukana olevat yhteistyötahot ovat Insta (Insta DefSec Oy, Insta Digital Oy ja Insta Response Oy), Tampereen yliopisto, Tampereen ammattikorkeakoulu, Business Tampere, Nokia Networks ja Securitas. SURE-projektilla on kolme päätavoitetta:

1. Parannetaan Tampereen asukkaiden ja turistien jokapäiväistä

turvallisuudentunnetta kehittämällä ja pilotoimalla älykkäitä kaupunkiturvallisuuden teknologiaratkaisuja.

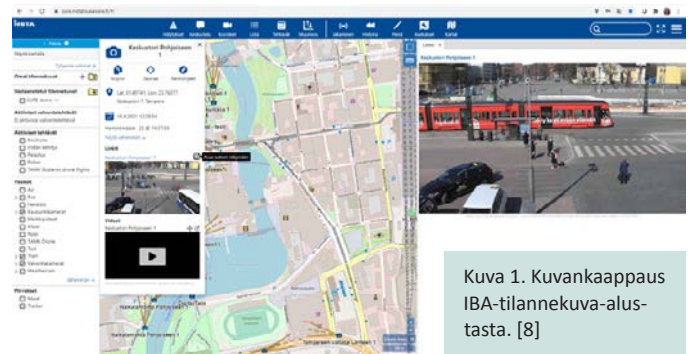
2. Lisätään valmiutta sujuvaan ja saumattomaan koordinointiin ja yhteistyöhön eri turvallisuustoimijoiden, ensihoidon ja tapahtumien järjestäjien välillä.

3. Luodaan paikallisille yrityksille mahdollisuuksia kehittää ja pilotoida innovaatioita, palveluja ja tuotteita kaupunkiturvallisuuteen liittyen.

Insta vastaa projektin tavoitteisiin monella tavalla. Insta rakentaa hankkeen teknisen selkärangan, jonka keskiössä on karttapohjainen tilannekuva-alusta Insta Blue Aware (IBA) (Kuva 1). Lisäksi Insta tarjoaa Insta Blue Tracker -sovelluksen (IBT) (Kuva 3), joka on erityisesti kenttäoperaatioihin tarkoitettu mobiilisovellus. Instan tuoteperheestä on SURE-hankkeessa käytettävissä myös Insta Blue Sky (IBS) (Kuva 4), joka on tarkoitettu DJI:n kaupallisia droneja lennätettäessä hyödynnettäväksi. IBA-tuoteperheen lisäksi Insta tekee väkimäärälaskentaan liittyvää analytiikkaa ja 3D-mallinnusta ja -visualisointia, jotka kaikki omalla tavallaan lisäävät kokonaisturvallisuutta ja täydentävät tilannekuvaa.

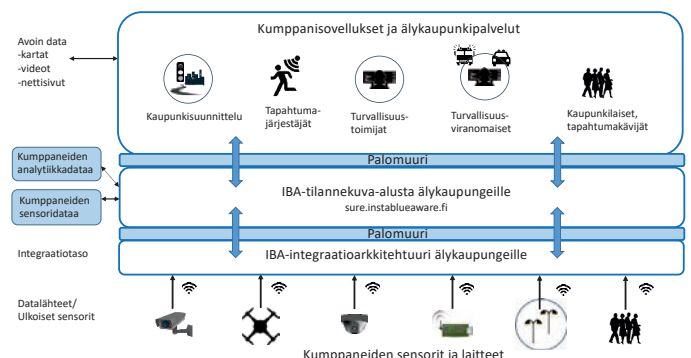
IBA on karttapohjainen tilannekuva-alusta, johon on mahdollista integroida eri toimijoiden sensoreita ja datalähteitä yksinkertaisesti. Datalähteet voivat olla myös avoimia datalähteitä, esimerkiksi paikallisliikenteeseen liittyen. IBAssa voidaan esittää ja jakaa tilannetietoa viranomaisten kesken ja se mahdollistaa myös vuorovaikutuksen siviilien ja vapaaehtoistoimijoiden suuntaan. IBAA voidaan käyttää sekä matkapuhelimella että työpöytäsovelluksena, mikä laajentaa IBAn hyödynnettävyyttä siviilien, viranomaisten ja vapaaehtoistoimijoiden parissa. Kuvassa 1 on esitetty kuvankaappaus IBA-tilannekuva-alustasta.

Kuva 2 havainnollistaa IBA-tilannekuva-alustan arkkitehtuuria. Arkkitehtuurin ensimmäinen kerros sisältää integroitavat datalähteet, joihin voi kuulua esimerkiksi dronet, valvontakamerat tai erilaiset sensorit. Valitut datalähteet integroidaan integraatio-

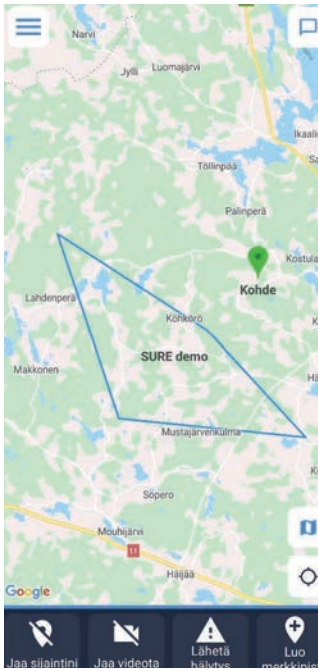


Kuva 1. Kuvankaappaus IBA-tilannekuva-alustasta. [8]

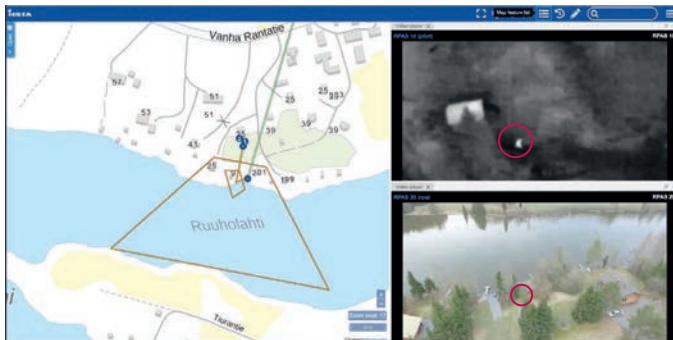
## IBA-arkkitehtuuri



Kuva 2. IBA-tilannekuva-alustan arkkitehtuuri SURE-hankkeessa. [8]



Kuva 3. Kuvankaappaus IBT-mobiilisovelluksesta. [9]



Kuva 4. Alla kuvankaappaus IBS-sovelluksen näkymästä IBAssa. [10]

tassossa IBA-alustaan, jonka jälkeen kaupungin, viranomaisen tai muun tahon datalähteet ovat käytettävissä IBAssa. Datalähteistä saatavaa tietoa pystytään sitten visualisoimaan IBA-tilannekuvalustassa ja hyödyntämään muun muassa kaupunkisuunnittelussa, turvallisuustoimijoiden parissa ja yleisesti ottaen uusien palveluiden kehittämisessä.

Kuvat 3 ja 4 esittävät IBT- ja IBS-sovellusten toiminnallisuutta. IBT on mobiilisovellus, joka on suunniteltu tilannekuvan jakamiseen ja yhteistyöhön tiimin jäsenten välillä. Sen avulla on mahdollista jakaa kuvia, videoita ja sijaintidataa kentältä. Näin ollen käyttäjät, esimerkiksi pelastustyöntekijät, voivat tehdä yhteistyötä käyttämällä alustan tietoturvalista keskusteluominaisuutta ja nostamalla hälytyksiä tilannekeskukseen. IBT-sovellusta voidaan hyödyntää yhdessä IBA-tilannekuvalustan kanssa, jolloin kentällä toimivien henkilöiden yhteistyö kokonaistilannekuvan muodostavien henkilöiden kanssa on saumatonta. Insta Blue Sky (IBS) on sovellus, jonka avulla voidaan lennättää kaupallisia DJI droneja. IBS tukee suojattua reaaliaikaisen videon ja sijaintidatan lähettämistä IBA-alustaan. Yhdessä IBAn kanssa käyttäjä voi monitoroida reaaliaikaisia videosyötteitä, jokaisen dronen sijaintia sekä lentokorkeutta.

## TEKNOLOGIAKOKKEILUT JA TULOKSET

SURE-hankkeen aikana on toteutettu yhteensä kuusi teknologia-kokeilua pelastustoimijoiden (pelastuslaitos (PELA) ja/tai ensihoito (EH)) kanssa. Teknologia-kokeilujen tarkoituksena on ollut testata IBA- ja IBT-sovelluksia todellisissa tilanteissa ja kerätä palautetta, huomioita ja kokemuksia niihin liittyen, jotta sovellusten käytettävyyttä ja niihin liittyviä kehityskohteita ja -ideoi-

ta saadaan selville. Lisäksi tavoitteena oli selvittää, miten IBA- ja IBT-sovellukset auttoivat tilannekuvan muodostamisessa ja yhteistyössä. Hankkeessa toteutuneiden teknologiakokeilujen teemat olivat seuraavat:

1. Ensihoidon IBT-pilotti: koulujen päätöspäivä,
2. Ensihoidon IBA-testi 1: potilas junassa,
3. Ensihoidon IBA-testi 2: potilas bussissa,
4. Ensihoidon ja pelastuslaitoksen IBA-testi: yhteistyö rakennuspalossa,
5. Pelastuslaitos ja IBA: yhteistyö vapaaehtoistojen kanssa,
6. Pelastuslaitos ja ensihoito: viranomaisten yhteinen tehtävä ja tilannepäiväkirja

Ensimmäinen teknologiakokeilu kohdistui erityisesti ensihoidon tarpeisiin. Ensihoidon tapauksessa aika on kriittinen tekijä, sillä uhrien henki voi olla kiinni minuuteista. Tämän vuoksi ensihoidolla oli erityinen tarve saada kuvaa tapahtumapaikalta. Lisäksi kaikki visuaalinen materiaali (esim. kamerakuva, videokuva, karttatieto tai aluetieto) on eduksi tilannekuvan hahmottamiseksi. Ensihoidon tapauksessa lähtövalmius on yksi minuutti ja tämä asettaa selkeän haasteen työkalun käyttämiselle, sillä todellisessa tilanteessa ei ole aikaa uusien työkalujen opettelemiseen tai kokeiluun. Lähtökohtaisesti työkalujen ja ratkaisujen täytyy olla helppokäyttöisiä ja toimintavarmoja.

Teknologiakokeilussa IBA otettiin käyttöön ensihoidon tilannekeskuksessa koulujen päätöspäivänä toukokuussa 2020. IBAn geneerisyys integroitavien datalähteiden suhteen mahdollisti muun muassa visuaalisten sensoreiden integroinnin ja kuvan esittämisen tilannekeskuksessa reaaliaikaisesti ja luotettavasti. Lisäksi IBAn avulla oli mahdollista yhdistää kentän tapahtumat tilannekeskuksen yhteyteen, jolloin saavutettiin parempi lähtökohta päätöksenteon ja operatiivisen työn suhteen. Tilannekeskukseen asennetun IBAn rinnalle ensihoidon kuudelle kenttäyksikölle ladattiin älykännykkään IBT-seurantasovellus, jota käyttäen mahdollistettiin kuvan ja sijaintitiedon jakaminen kentältä tilannekeskukseen ja IBA-alustaan. Kuva- ja sijaintitiedon lisäksi IBT-sovellusta käyttäen kentällä työskentelevät henkilöt pystyivät nostamaan hälytyksen kentältä tai asettamaan merkkipisteitä, jotka osoittivat esimerkiksi maastossa oleviin potilaisiin ja nämä pisteet näytettiin myös IBAn karttapohjalla.

Ensimmäinen teknologiakokeilu oli tuloksellisesti varsin onnistunut. Sekä IBAn että IBT-sovelluksen testikäyttöä on jatkettu myös teknologiakokeilun jälkeen, mikä osoittaa ensihoidon selkeää kiinnostusta sovelluksia kohtaan. Sovellusten kehittämisen suhteen teknologiakokeilusta kerättiin myös palautetta henkilöiltä, jotka olivat käyttäneet sovelluksia teknologiakokeilun aikana. Palaute oli varsin positiivista ja mm. seuraavanlaisia huomioita annettiin IBA/IBT-sovelluksista:

1. ”Saimme välitettyä visuaalista tilannekuvaa johto- ja tilannekeskuksen päivystäjälle, joka aiemmin ei ole ollut mahdollista.”
2. ”Aina uudessa on omat haasteensa, mutta ehdottomasti haluan käyttää myös jatkossa.”
3. ”Kiitos kokeilusta, tällä on hyvä jatkaa eteenpäin”

Ensimmäisen teknologiakokeilun tapauksessa ensihoidon IBT-pilotissa rikastettiin viranomaisen tilannekuvaa (IBA) viranomaisen omien toimijoiden jakamalla visuaalisella näkymällä ja sijaintitiedolla kentältä. Työkaluna tässä käytettiin IBT-seurantasovellusta.

Toisessa teknologiakokeilussa ensihoidon kanssa tehtiin IBA-testi. Teknologia-kokeilun sisältö erosi ensimmäiseen verrattuna, sillä nyt tehdyn työn fokus kohdistui junaan ja erityisesti sen reaa-

► Ilaikaisen sijainnin määrittämiseen. IBAssa on mahdollista esittää junien sijainti reaaliaikaisesti ja tämä ominaisuus nousi keskeiseen rooliin pilotissa. Teknologiaokeilu liittyi tilanteeseen, jossa liikuvassa junassa oli apua tarvitseva potilas. Ensimmäiseksi Hätäkeskuslaitos (HÄKE) sai 112-ilmoituksen junasta. HÄKE välitti tehtävän ja tiedon junan numerosta ensihoidolle. Saatujen junan tietojen perusteella ensihoidossa tarkistettiin vielä junan reaaliaikainen sijainti kartalla IBAa käyttäen. Kun junan reaaliaikainen sijainti oli tiedossa, pystyi ensihoidon tilannekeskus osoittamaan nopeimmin tavoittavan ensihoitoyksikön ja junan pysäytysasema ilmoitettiin suoraan rataliikennekeskukselle.

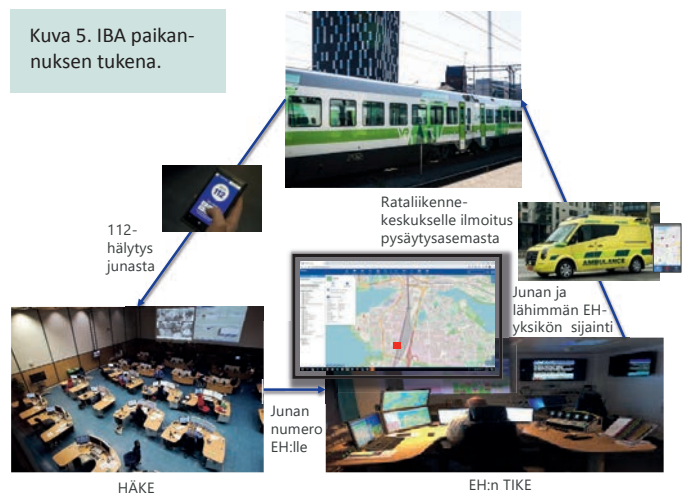
Teknologiaokeilusta saatiin tärkeää palautetta, joka osoitti myös IBAn sisältämien teknologisten ominaisuuksien tärkeyden. Kuvassa 5 on havainnollistettu IBAn hyödyntämistä paikannuksen tukena kokeilussa. Ilman junien reaaliaikaisen sijainnin esittämistä tilannekuva-alustalla, potilas ei olisi saanut apua tarvittavalla tarkkuudella, jonka myös saatu palaute osoittaa. Näin ollen IBASTA oli selkeää apua tilannekuvan muodostamisessa ja eri tahojen kommunikoinnin ja tiedon välityksen tehostamisessa.

*”Keikka meni hyvin ja potilas sai avun nopeasti, kun ilman kunnon tilannekuvaa olisi toimittu valistuneen arvailun perusteella.”*

Kolmannessa teknologiaokeilussa tilanne oli erilainen verrattuna kahteen edelliseen tapaukseen. Nyt tapahtumapaikkana oli bussi ja teknologiaokeilussa hyödynnettiin bussien reaaliaikaisen sijainnin saamista IBAn avulla. Tapahtuma lähti liikkeelle siitä, kun HÄKE välitti ensihoidolle ilmoituksen sairaskohtauksesta TKL:n bussissa. Ilmoituksessa oli kerrottu katuosoite, jonka HÄKE välitti ensihoidolle. Ensihoidon tilannekeskuksessa tarkastettiin vielä IBA-tilannekuva-alustasta bussien reaaliaikainen sijainti kartalla ja havaittiin, että ko. linjalla oleva bussi seisoo pysäkillä hieman eri paikassa HÄKE-ilmoituksen mukaiseen katuosoitteeseen nähden. Ensihoito luotti IBAn avulla saatuun informaatioon ja ajoi tunnistetulle pysäkillä. Lopputuloksena oli, että potilas saatiin ajoissa hoitoon.

Tässä teknologiaokeilussa yhteistyötä ja tilannekuvaa rikastettiin bussin sijaintitiedolla ja visuaalisella näkymällä hyödyntäen IBA-tilannekuva-alustaa. Teknologisessa mielessä tapauksen tärkeä anti oli tiedon tarkentaminen tilannekuva-alustan avulla, jolloin säästettiin ehkä vakaviltakin seurauksilta. Teknologian avulla pystytään varmistamaan saatu tieto ja näin ollen välittämään oikeata tietoa muille toimijoille ja tehostamaan ja tarkentamaan operatiivista toimintaa.

Neljäs teknologiaokeilu liittyi ensihoidon ja pelastuksen yhteistyöhön ja oli luonteeltaan alustavan tilannekuvan rakentamista. Tilanne lähti liikkeelle siitä, että rakennuspalo osui ensihoidon kenttäjohtajan työmatkan varrelle ja kenttäjohtaja oli siten palopaikalla ennen pelastuslaitosta. Ensihoidon kenttäjohtaja jakoi tapahtumapaikalta matkapuhelimellaan IBT:n avulla videota, jota



tehtävälle saapumassa ollut pelastuslaitos seurasi lähestyessään. Videolähetyksen avulla pelastuslaitos sai jo ennakkoon kuvan siitä, mitä palopaikalla tapahtui ja pystyi valmistautumaan tilanteeseen. Teknologiaokeilun selkeä tulos oli, että IBT-sovellus on sopiva ennakoivan tilannekuvan muodostamiseen. Ensimmäiset kolme teknologiaokeilua liittyivät keskeisesti ensihoidon tarpeisiin ja neljäs ensihoidon ja pelastuksen yhteistyöhön, mutta viidennessä teknologiaokeilussa on mahdollistettu pelastuslaitoksen tarpeiden ja IBAn tarjoamien mahdollisuuksien yhteensovittamista. Yleisesti ottaen pelastuslaitoksilla on laajat sopimuspalokunnat ja yksinään Pirkanmaalla on yli tuhat vapaaehtoistoimijaa. SURE-hankkeen aikana Pirkanmaan PELAn sopimuspalokunnille on tarjottu IBT:n käyttöä ja täten mahdollistettu visuaalisen tilannekuvan jakaminen paikan päältä tilannekeskukseen. Tällä tavoin mahdollistetaan sopimuspalokuntien ja pelastuslaitosten yhteinen tilannetietoisuus.

Vapaaehtoisten rooli pelastustoiminnassa on merkittävä ja esimerkiksi maasto- tai vesistötehtävien yhteydessä he voivat olla kuvayhteydessä tilannekeskukseen paitsi IBT-mobiilisovelluksen myös ns. kansalaislinkin avulla. Kansalaislinkki on määrääjän voimassa oleva yhteys ei-viranomaistoimijan kännykän ja viranomaisen tilannekeskuksessa olevan IBA-tilannekuva-alustan välillä. Tilannekeskuksesta jaetun kansalaislinkin kautta henkilö voi jakaa tietoa kuvan muodossa ja jaettavan tiedon perusteella pelastusviranomaisen pystyy muodostamaan tilannekuvaa paikan päältä. Kansalaislinkin myötä mahdollistuu myös siviilitoimijoiden ja viranomaisten välinen matalan kynnyksen kommunikointi, sillä käyttö onnistuu vaivattomasti puhelimen avulla. Kuvassa 6 on esitetty kansalaislinkin toimintaa.

Viimeisin SURE-hankkeessa hahmoteltu teknologiaokeilu käsitti viranomaisten yhteisen tilannekuvan ja tilannepäiväkir-

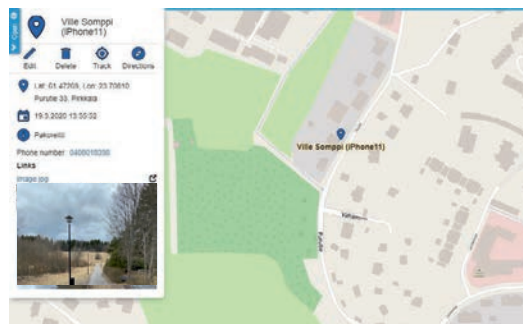
### #1 Linkki loppukäyttäjälle



### #2 Kuvan ottaminen



### #3 Sijainti, lähin katuosoite ja kuva esitetään kartalla



Kuva 6. Kansalaislinkin käytön havainnollistaminen.

jan. Viranomaisilla tässä kohdin tarkoitetaan pelastuslaitosta ja ensihoitoa. IBA-tilannekuva-alustaan on mahdollista luoda niin sanottu oma tilannekuva ja määritellä tahot, jotka pääsevät sen näkemään. Esimerkiksi maasto- tai vesistöetsintätehtävissä (kadonneen/hukkuneen etsintä) tarvitaan useiden viranomaisten yhteistyötä ja IBAA käyttämällä eri viranomaiset näkevät karttapohjalla alueet, jotka on jo tutkittu. Tällä tavoin pystytään tehostamaan operatiivista toimintaa ja välttämään samojen alueiden läpikäyntiä, jolloin saavutetaan suurempi todennäköisyys etsintätehtävän onnistuneelle lopputulokselle. Omaan tilannekuvaan voidaan myös linkittää sijainnin jako kentältä joko IBT-sovelluksen tai kansalaislinkin avulla. Omaan tilannekuvaan liittyy myös osallistujien yhteinen, tehtäväkohtainen tilannepäiväkirja, joka rakentuu tehtävän edetessä ja jota on helppo käyttää myös kentältä.

## LOPPUPÄÄTELMÄT

Tilannekuvan muodostaminen ei ole yksiselitteistä ja siihen liittyy paitsi puhtaasti teknisiä asioita myös ihmisten ja organisaatioiden välistä vuorovaikutusta. Seppäsen ja muiden [11] mukaan vuorovaikutuksen keskiössä on kommunikaatio, jonka toimivuus ja sujuvuus vaikuttaa yhteisen tilannekuvan muodostumiseen. Kommunikointitapoja on monia, mutta oleellista on kommunikoinnin keskeinen sisältö, sen viesti. Kun tehdään yhteistyötä yhteisen tavoitteen eteen – kuten esimerkiksi kriisitilanteissa usean viranomaisen toimiessa – on oleellista, että toimijoilla on yhteinen ymmärrys tilanteesta.

Tässä artikkelissa tarkasteltiin turvallisuusviranomaisten välisen tiedonjaon sekä viranomaisten ja siviilien vuorovaikutuksen tukemista teknologian keinoin. Tavoitteena oli rikastaa yhteistä jaettava tilannekuva. Artikkelissa esitetyt teknologiakokeilut liittyvät meneillään olevaan SURE-hankkeeseen. Kokeiluihin osallistui Pirkanmaan alueen ensihoidon ja pelastuslaitoksen henkilöitä ja testattavana oli tilannekuva-alusta (IBA) sekä siihen liittyvä mobiilisovellus (IBT) ja toiminnallisuus nimeltään kansalaislinkki.

Teknologiakokeiluiden kautta on saatu tärkeitä palautetta testattavista sovelluksista ja tietämystä tilannekuvan muodostamiseen liittyen niin eri viranomaisten kuin viranomaisten ja ei-viranomaisten välillä. Teknologiaa hyödyntämällä pystyttiin lisäämään visualisuutta ja sijaintitietoja kentältä viranomaisten tilannekeskuksiin, mikä mahdollisti paremman päätöksenteon. Teknologia lisäksi tuki tilannekuvan muodostamista ja tehosti eri tahojen välistä kommunikointia ja tiedon välitystä.

Tilannekuvan muodostamisessa on hyvin tärkeitä, että välitettävä tieto on oikeellista. Teknologia mahdollistaa myös virheellisen tiedon korjaamisen oikeaksi, tiedon tarkentamisen ja sen välittämisen muille toimijoille, jotta operatiivinen toiminta saadaan optimoitua. Teknologiakokeilut osoittivat, että teknologian ja sovellusten avulla on mahdollista varautua ja valmistautua tehtävään paremmin, kun esimerkiksi tapahtumapaikalta pystytään lähettämään reaaliaikaista kuva- ja videomateriaalia operaatiokeskukseen.

Vapaaehtoisten ja siviilien hyödyntäminen tilannekuvan muodostamisessa ja viranomaistehtävissä on nykyään yhä tärkeämpää. Matalan käyttöönottokynnyksen teknologia mahdollistaa tämän ja lopputuloksena saadaan rikastettua tilannetietoa. Teknologiakokeiluissa tutkittiin teknologian vaikutusta viranomaisten yhteistyön tehostamisessa. Yhteistyön muotona voi olla esimerkiksi yhteinen etsintätehtävä, jolloin teknologian avulla pystytään tehokkaampaan työnjakoon ja toimintaan kentällä. Lisäksi teknologian avulla voidaan rakentaa omaa tilannekuva- ja tilannepäiväkirjaa.

Tässä artikkelissa ja SURE-hankkeessa tarkastellut sovelluskohdeet olivat viranomaisten itsensä tunnistamia ja omista lähtökoh-

distaan esiin nostamia. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että testattu teknologia toimi hyvin ja vastasi tarpeeseen. Erityisesti teknologian helppokäyttöisyys, visuaalisuus ja luotettavuus ovat avainasemassa sen laajemmalle käytölle. Huomioitava kuitenkin on, että teknologiat, jotka ovat web- tai mobiilipohjaisia, ovat riippuvaisia käytössä olevista verkkoyhteyksistä. Tämä saattaa aiheuttaa haasteita esimerkiksi syrjäseuduilla tapahtuvissa hälytystehtävissä.

Teknologiakokeiluja ja käytännön testejä jatketaan SURE-hankkeessa, joka päättyi elokuussa 2022. Jatkossa tehdään myös kaksi suurempaa moniviranomaisharjoitusta, joissa yhteisiä työkaluja ja toimintatapoja testataan. SUREn kaltaiset tutkimushankkeet mahdollistavat uusien näkökulmien muodostamisen yhteistyön ja vuorovaikutuksen kehittämisessä. Lisäksi olemassa olevaa ja kehitettävää teknologiaa pystytään testaamaan käytännön tilanteissa, jolloin käytettävien menetelmien heikkoudet ja vahvuudet pystytään arvioimaan.

## KIITOKSET

Kiitokset EU:n UIA-ohjelmalle SURE-hankkeen (Smart Urban Security and Event Resilience) rahoittamisesta. Lisäksi kiitokset hankekumppaneille ja sidosryhmille, erityisesti Pirkanmaan sairaanhoitopiirin ensihoidon ja Pirkanmaan pelastuslaitoksen henkilöstölle keskustelevalta ja innostuneesta suhtautumisesta hankkeeseen ja siihen liittyviin kokeiluihin. Ilman luottamuksellista keskusteluyhteyttä, avointa tiedonjakoa ja työskentelyä kohti yhteistä turvallisempaa yhteiskuntaa tämä hanke ei onnistuisi.

## LÄHDELUETTELO

1. Chehade, S., Matta, N., Pothin, J.-B. and Cogranne, R. Situation representation and awareness for rescue operations. Teoksessa: Zeno, F., González, J.J. and Canós, J.H. (eds.). Proceedings of the 16th ISCRAM Conference, Valencia, May 2019, s. 213–226. ISBN 0-904933-75-X
2. Stanton, N.A., Chambers, P.R.G., Piggott, J. Situational awareness and safety. *Safety Science*, 2001, Vol. 39, nro 3, s. 189–204.
3. Endsley, M.R. Design and evaluation for situation awareness enhancement. Teoksessa: Proceedings of the 32nd Human Factors Society, 1988, s. 97–101.
4. Lindsay, B.R. Social media and disasters: Current uses, future options, and policy considerations. Congressional Research Service, 2011, s. 1–10.
5. MacEachren, A.M., Jaiswai, A., Robinson, A.C., Pezanowski, S., Savelyev, A., Mitra, P., Zhang, X. and Blanford, J. SensePlace2: GeoTwitter analytics support for situational awareness. Teoksessa: Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Visual Analytics, Science and Technology, Providence, October 2011, pages 10.
6. Karami, A., Shah, V., Vaezi, R., and Bansal, A. Twitter speaks: A case of national disaster situational awareness. *Journal of Information Science*, 2020, Vol. 46, nro. 3, s. 313–324.
7. Verma, S., Vieweg, S., Corvey, W.J., Palen, L., Martin, J.H., Palmer, M., Schram, A., and Anderson, K.M. Natural language processing to the rescue? Extracting “situational awareness” tweets during mass emergency. Teoksessa: Proceedings of the Fifth International AAAI Conference on Weblogs and Social Media, Vol. 5, nro. 1, 2011, s. 386–392.
8. Insta Group. Insta Blue Aware. 2021.
9. Insta Group, Insta Blue Tracker. 2021.
10. Insta Group. Insta Blue Sky. 2021.
11. Seppänen, H., Mäkelä, J., Luukkala, P. and Virrantaus, K. Developing shared situational awareness for emergency management. *Safety Science*, 2013, Vol. 55, s. 1–9.

# Lash fire – reitti ro-ro-alusten parempaan paloturvallisuuteen

## TIIVISTELMÄ

Ro-ro-alusten tulipalojen suuri määrä viime vuosina on tuonut esiin tarpeen parantaa palontorjuntaa ja tulipalojen hallintaa, koska näillä tulipaloilla on vakavia seurauksia aluksen miehistölle ja matkustajille sekä laivalle ja sen rahdille. Euroopan unionin rahoittamassa LASH FIRE -tutkimushankkeessa kehitetään uusia toimintatapoja ja teknisiä innovaatioita, jotka parantavat ro-ro-alusten paloturvallisuutta ja vastaavat nykyisiin ja tuleviin paloturvallisuushaasteisiin. Tässä artikkelissa esitellään LASH FIRE -projektin tavoitteita ja työsuunnitelmaa keskittyen VTT:n päätehtävinä oleviin aihepiireihin, joita ovat palon havaitsemisen simulointi eri ilmaisinteknologioilla sekä lämmön ja savun kulkeutumisen simulointi ro-ro-tilojen aukkojen kautta alueille, jotka ovat kriittisiä poistumisturvallisuuden kannalta.

## JOHDANTO

Ro-ro-alukset ovat tärkeä osa maailmanlaajuisista liikenne- ja kuljetusjärjestelmästä. Ro-ro-aluksella tapahtuvalla tulipalolla voi olla vakavia seurauksia aluksen miehistölle ja matkustajille sekä laivalle ja sen rahdille. Ro-ro-alusten tulipalojen suuri määrä viime vuosina on tuonut esiin tarpeen parantaa palontorjuntaa ja tulipalojen hallintaa.

Euroopan unionin rahoittamassa ”Legislative Assessment for Safety Hazards of Fire and Innovations in Ro-ro ship Environment” (LASH FIRE) -tutkimushankkeessa kehitetään uusia toimintatapoja ja teknisiä innovaatioita, jotka parantavat ro-ro-alusten paloturvallisuutta ja vastaavat nykyisiin ja tuleviin paloturvallisuushaasteisiin. Projektin tavoitteet ja tekninen sisältö perustuvat Euroopan meriturvallisuusviraston (EMSA) kokoaman asiantuntijaryhmän toteamiin kriittisiin paloturvallisuuskysymyksiin, Kansainvälisessä merenkulkujärjestössä (IMO) käynnissä olevaan säädösuudistukseen ja ro-ro-aluksia liikennöivien laivanvarustamojen kokemukseen. Projektin tulosten odotetaan alentavan ro-ro-alusten syttymistäajuutta 35 prosentilla ja tulipalojen kuolonuhrien määrää 45 prosentilla.

Tässä artikkelissa esitellään LASH FIRE -projektin tavoitteita ja työsuunnitelmaa keskittyen VTT:n päätehtävinä oleviin aihepiireihin. VTT:n vastuulla ovat palon havaitsemisen simulointi eri ilmaisinteknologioilla sekä lämmön ja savun kulkeutumisen simulointi ro-ro-tilojen aukkojen kautta alueille, jotka ovat kriittisiä poistumisturvallisuuden kannalta.

## PROJEKTIN TOTEUTUS

LASH FIRE -projekti alkoi syyskuussa 2019 ja se kestää neljä vuotta. Hankkeen koordinaattori on ruotsalainen RISE Research Institutes of Sweden. Projektikonsortio koostuu 26 organisaatiosta 13 EU-jäsenmaasta. Mukana on laivanvarustamoja, merenkulkualan teollisuusyrityksiä, tutkimuslaitoksia, yliopistoja, luokitustilaitoksia, toimialajärjestöjä ja viestintäasiantuntijoita. Suomesta projektiin osallistuvat Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja Marioff Corporation Oy. Tutkimus- ja kehitystyötä seuraa kaksi neuvoa-antavaa toimikuntaa (engl. advisory group): pääosin lippuvaltioiden edustajista koostuva Maritime Authorities Advisory Group (MAAG) ja keskeisistä ro-ro-alusten operaattoreista koostuva Maritime Operators Advisory Group (MOAG).

**”Ro-ro-alusten tulipalojen suuri määrä viime vuosina on tuonut esiin tarpeen parantaa palontorjuntaa ja tulipalojen hallintaa.”**



Euroopan komissio rahoittaa LASH FIRE -projektia 12,2 miljoonalla eurolla Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelman kautta.

## Työpaketit ja tavoitteet

Projektin työpaketit (WP, engl. work package) ovat seuraavat:

- WP01: Taloudellinen ja hallinnollinen projektinjohto
- WP02: Tekninen projektinjohto ja laadunvarmistus
- WP03: Yhteistyö ja viestintä
- WP04: Muodollinen turvallisuusarviointi
- WP05: Laivaintegraatio
- WP06: Tehokkaat manuaalitoiminnot
- WP07: Luontaisesti turvallinen suunnittelu
- WP08: Syttymisen estäminen
- WP09: Palon havaitseminen
- WP10: Sammutus
- WP11: Palon leviämisen estäminen
- WP12: Eettiset vaatimukset

Työpakettien väliset yhteydet ja niiden liittyminen projektin erityistavoitteisiin esitetään kuvassa 1.

LASH FIRE -projektin yleisenä päätavoitteena on kehittää menekkulun paloturvallisuusratkaisuja innovatiivisilla teknologioilla, toiminnoilla ja sovelluksilla, todentaa näiden ratkaisujen tehokkuus ja käytettävyys toimintaympäristöissään ja edistää säädöskehitystä kustannus-hyötyanalyysillä ja kansainvälisellä yhteistyöllä. Tämä toteutetaan kuvassa 1 esitetyn projektirakenteen avulla, jossa eri osa-alueet eli projektikerrokset on kytketty määriteltyihin erityistavoitteisiin:

- Erityistavoite 1 (WP06–WP11): ro-ro-alusten itsenäisen palontorjunnan vahvistaminen
- Erityistavoite 2 (WP05): laivaintegraation arviointi ja todentaminen
- Erityistavoite 3 (WP04): kustannus-hyötyanalyysin teknisen perustan tuottaminen
- Erityistavoite 4 (WP03): säädöskehitys ja maailmanlaajuinen yhteistyö

LASH FIRE -projektikonsepti on suunniteltu korostaen konsortion osapuolten erilaisia osaamisia, rooleja ja vastuualueita tavoitteiden saavuttamiseksi. Tiivis yhteistyö projektikerrosten sisällä ja myös niiden välillä on keskeinen edellytys onnistumiselle.

Kuvan 1 alin kerros koostuu kehitys- ja todentamistyöpaketeista (WP06–WP11), joissa kehitetään toiminnallisia ja teknisiä ratkaisuja. Nämä työpaketit vastaavat myös ratkaisujen toimivuuden todentamisesta yhteistyössä laivaintegraatio- ja arviointikerroksen (WP05) kanssa. Nämä kerrokset tuottavat tietoa säädösarviointikerrokselle (WP04), joka tuottaa säädöskehitysehdotuksia yhdessä yhteistyö- ja viestintäkerroksen kanssa (WP03). Projektinjohtokerros koostuu taloudellisesta ja hallinnollisesta projektinjohtoksesta (WP01) sekä teknisestä projektinjohtoksesta ja laadunvarmistuksesta (WP02).

## Tarkasteltavat alustyyppit ja ro-ro-tilat

Ro-ro-alus on yleisnimitys laivoille, joiden lastaus tapahtuu aluksen sivusta, perästä tai keulasta rullaten (ts. lasti liikkuu pyörien päällä), eikä niiden lastauksessa tarvita nosturia. LASH FIRE -projektissa tarkastellaan eri ro-ro-alustyyppiä, joita ovat ro-ro-matkustajalaiva, ro-ro-rahtilaiva ja ajoneuvojen kuljetusalus. SOLAS-määritelmän mukaan matkustajalaiva on alus, joka kuljettaa useampaa kuin 12 matkustajaa [2, SOLAS I/2(f)]. Ro-ro-matkustajalaiva tarkoittaa matkustajalaivaa, jossa on ro-ro-tiloja tai erityiskategorian tiloja [2, SOLAS II-2/3.42]. Näistä aluksista käy-

Projektinjohto	WP01: Taloudellinen ja hallinnollinen projektinjohto				Et4: Säädöskehitys ja maailmanlaajuinen yhteistyö
	WP02: Tekninen projektinjohto ja laadunvarmistus				
Yhteistyö ja viestintä	WP03: Yhteistyö: ulkoinen seuranta, yhteistyö, neuvonantavat toimikunnat WP03: Viestintä: Säädöskehityksen tuki, neuvonantavat toimikunnat, tiedonvälitys				
Säädösarviointi	WP04: Muodollinen turvallisuusarviointi: ro-ro-alusten paloriskimalli, seurausten simulointi, kustannus-hyöty- ja riskinalentamisarviointi, ohjeistusten ja suositusten kehittäminen				Et3: Kustannus-hyötyanalyysin teknisen perustan tuottaminen
Laivaintegraatio ja arviointi	WP05: Laivaintegraatio: ro-ro-alustyyppiä edustavien laivojen valinta, laivaintegraation ehdot ja arviointi, kustannusten arviointi, laivalla tapahtuvan todentamisen helpottaminen				Et2: laivaintegraation arviointi ja todentaminen
Kehitys ja todentaminen (toiminnallinen)	WP06: Tehokkaat manuaalitoiminnot: manuaalinen suojaus, palovartiointi, ensivaste, sammutustyö				Et1: ro-ro-alusten itsenäisen palontorjunnan vahvistaminen
	WP07: Luontaisesti turvallinen suunnittelu: komentosillan hälytyspaneeli, sammutuksen aktivointi, johtaminen				
Kehitys ja todentaminen (tekninen)	WP05: Laivaintegraation arviointi ja laivalla tapahtuva todentaminen				
	WP08: Syttymisen estäminen	WP09: Palon havaitseminen	WP10: Sammutus	WP11: Palon leviämisen estäminen	

Kuva 1. LASH FIRE -projektin työpaketit, niiden väliset yhteydet ja liittyminen tavoitteisiin. Et = erityistavoite.

tään lyhennettä ro-pax. Rahtilaiva on mikä tahansa laiva, joka ei ole matkustajalaiva [2, SOLAS I/2(g)]. Ro-ro-rahtilaiva tarkoittaa rahtilaivaa, jossa on ro-ro-tiloja tai erityiskategorian tiloja [2, SOLAS II-2/3.42]. Ajoneuvojen kuljetusaluksella tarkoitetaan rahtilaivaa, joka kuljettaa rahtia vain ro-ro-tiloissa tai ajoneuvotiloissa ja joka on suunniteltu miehittämättömien, ilman rahtia olevien moottoriajoneuvojen kuljettamiseen [2, SOLAS II-2/3.56], [3].

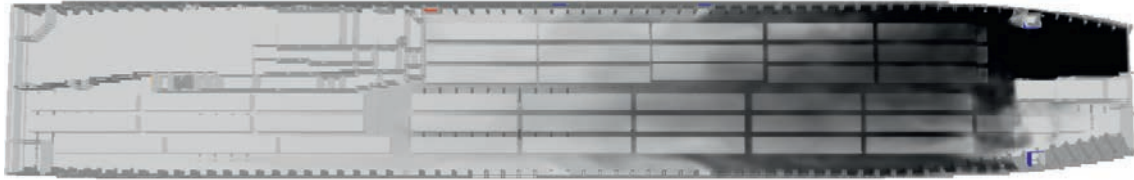
Kutakin ro-ro-alustyyppiä on LASH FIRE -projektissa valittu edustamaan olemassa oleva laiva, jonka geometriaa ja paloturvallisuusjärjestelyjä käytetään muun muassa simulaatioiden perustietoina. Nämä laivat ovat ro-ro-matkustajalaiva Stena Flavia, ro-ro-rahtilaiva Magnolia Seaways ja ajoneuvojen kuljetusalus Torrens.

Ro-ro-aluksilla voi olla avoimia ja suljettuja ro-ro-tiloja sekä sääkansia. Avoimet ro-ro-tilat ovat lastitiloja, joiden molemmat päädyt ovat avonaisia, tai vaihtoehtoisesti avoinna on toinen päädyistä sekä vähintään kymmenen prosenttia tilan sivujen pinta-alasta. Suljetut ro-ro-tilat ovat lastitiloja, jotka eivät ole avoimia ro-ro-tiloja eivätkä sääkansia. Sääkannet ovat täysin alttiina sääolosuhteille yläpuolelta ja vähintään kahdelta sivulta. LASH FIRE -projektissa tutkitaan ro-ro-tilatyyppiä ottaen huomioon tarkastelun tarkoituksenmukaisuus ja käytännön rajoitteet. Esimerkiksi palon havaitsemisen simulointi keskittyy avoimiin ja suljettuihin ro-ro-tiloihin muttei huomioi sääkansia.

## PALON HAVAITSEMINEN

WP9-työpakettien tavoitteena on nopea ja luotettava palon havaitseminen, paikantaminen ja varmentaminen eri tyyppisissä ro-ro-tiloissa tarkastelemalla uusia ja edistyneitä teknologioita. VTT:n tehtävänä tässä työssä on suorittaa savun ja lämmön kulkeutumisen simulaatioita, joilla määritetään palon havaitsemisaika eri teknologioilla ja erilaisissa ilmanvaihtotilanteissa. Paloilmamaisimia sijoitetaan simulaatioissa avoimiin ja suljettuihin ro-ro-tiloihin sekä suljettujen ro-ro-tilojen ilmanvaihtoputkiin. Simuloinnit tuottavat myös suosituksia paloilmajärjestelmien suuren mittakaavan testaukseen ja validointiin eri paloskenaarioissa.

Simuloinnit suoritetaan Fire Dynamics Simulator (FDS) -ohjelmalla [4]. Simuloitavat tilat ovat Stena Flavian avoin ro-ro-tila



Kuva 2. Savun kulkeutumista suljetun ro-ro-tilan simulaatiossa, jossa palo sijaitsee paapuurin puolella lähellä keulaa.

la kannella 4 ja suljettu ro-ro-tila kannella 3. Tarkasteltavat palon havaitsemisteknologiat ja havaitsemisaikojen arviointitavat ovat seuraavat:

- lämpöilmaisin: FDS-ohjelman malli
- savuilmaisin: FDS-ohjelman malli
- CO- eli hiilimonoksidi-ilmaisin: simuloitu CO-pitoisuus
- lineaarinen lämpöilmaisin: simuloitu kaasun lämpötila
- liekkien videohavainnointi: simuloitu paloteho tilavuusyksikköä kohti
- savun videohavainnointi: simuloitu optinen tiheys
- lämpösäteilyyn perustuva liekki-ilmaisin: simuloitu säteilyvuon tiheys
- lämpökamerailmaisoin: simuloidut kaasun- ja pintalämpötilat

Ilmaisimet sijoitetaan simuloinneissa siten kuin ne Stena Flavian ro-ro-tiloissa sijaitsevat tai LASH FIRE -konsortioista saadun ohjeistuksen mukaisesti. Mitoituspalona käytetään pääosin t<sup>2</sup>-paloikäyrää. Palon sijainti valitaan siten, että havainnoinnin ennakoitua tapahtuvan suhteellisen nopeasti ("helppo" tapaus) tai viivästyneesti ("vaikea" tapaus). Noen- ja CO-tuotolle käytetään kahta eri arvoa (matala ja korkea), jotta saadaan näkyviin eri havaitsemisteknologioiden erot erilaisissa palotilanteissa. Avoimen ro-ro-tilan simulointeihin on tuulen nopeudeksi valittu 7,5 m/s tai 3,75 m/s ja tuulen suunnaksi vastatuuli, myötätuuli tai paapuurin puoleinen tuuli.

Tätä artikkelia kirjoitettaessa simuloinnit ja tulosten analysointi ovat vielä kesken. Kuva 2 havainnollistaa käynnissä olevia simuloitteja esimerkinomaisesti.

## PALON LEVIÄMISEN ESTÄMINEN

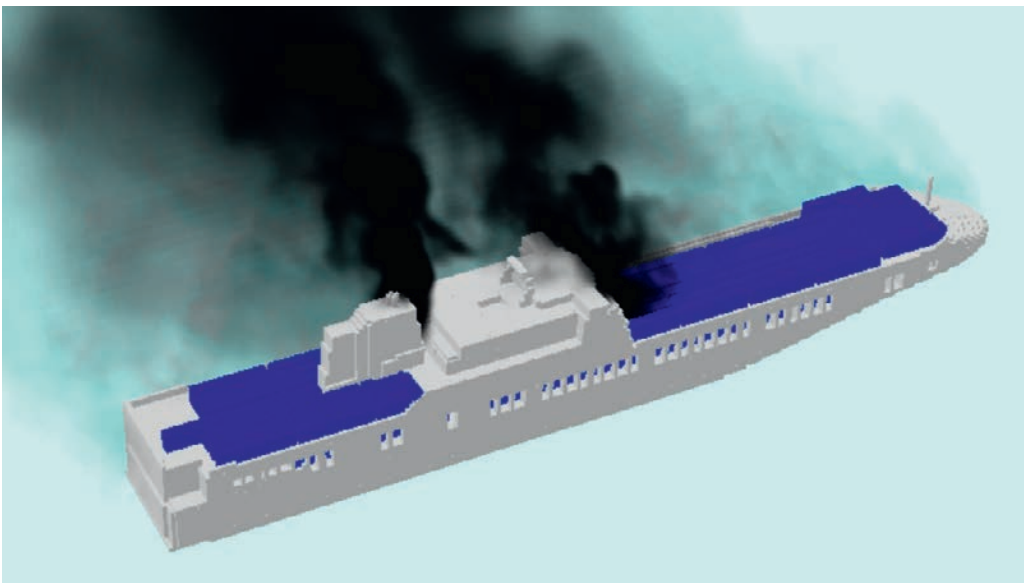
Palon leviämisen estämiseen liittyvän WP11-työpakettin tavoitteena on eliminoida merkittävät heikkoudet palon leviämisen rajoittami-

ssa ottaen huomioon savu, liekki ja kuumuus. WP11-työpaketissa VTT on tehnyt ro-ro-tilojen aukkojen kautta tapahtuvan palon ja savun leviämisen simuloitteja. Työssä tarkasteltiin poistumisturvallisuuden kannalta kriittisten alueiden kuten poistumisasemien ja pelastusvälineiden sijaintipaikkojen turvallisuutta. Simuloinnit suoritettiin Fire Dynamics Simulator (FDS) -ohjelmalla [4]. Kuva 3 havainnollistaa tehtyjä simuloitteja esimerkinomaisesti. Tulosten perusteella määriteltiin turvallisuusohjeita laivasuunnitteluun ottaen huomioon sekä ihmisille että pelastusvälineiden materiaaleille kriittiset olosuhteet. Ohjeet koskevat ro-ro-tilojen aukkojen turvaetäisyyksiä ja järjestelyjä lähialueiden ja kriittisten alueiden suhteen.

Simulointitulosten pohjalta määritettiin mahdollisia riskienhallintatoimenpiteitä. Turvaetäisyydet ro-ro-tilojen aukkojen ja kriittisten alueiden välillä havaittiin tehokkaaksi tavaksi varmistaa kriittisten alueiden turvallisuus. Uusissa aluksissa turvaetäisyydet voidaan ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Jo olemassa olevissa aluksissa ne voidaan toteuttaa joko sulkemalla osa aukoista tai varustamalla aukot tulipalotilanteessa aktivoituvilla suljinlaitteilla. Tämän lisäksi laivan kurssin muutoksilla on mahdollista suunnata savu pois kriittisiltä alueilta tulipalotilanteessa edellyttäen, että laiva on ohjailtavissa eikä kurssimuutos vaaranna turvallista poistumista kovassa merenkäynnissä.

Simulointituloksia ja ehdotettuja riskienhallintatoimenpiteitä voidaan hyödyntää kehitettäessä ro-ro-tilojen aukkojen suunnitteluohjeistusta. Tulokset täydentävät aiheesta aiemmin tehtyä tutkimusta [5] ja siten tukevat päätöksentekoa. Työn tuloksia ja niihin perustuvaa ohjeistusta voidaan hyödyntää suunniteltaessa uusia aiempaa paloturvallisempia ro-ro-aluksia, parannettaessa olemassa olevien alusten paloturvallisuutta ja uudistettaessa Kansainvälisen merenkulkujärjestön säädöksiä.

VTT:n tekemää tutkimusta liittyen palon ja savun leviämiseen ro-ro-tilojen aukkojen kautta käsitellään tarkemmin toisessa Palotutkimuksen päivien 2021 artikkelissa [6].



Kuva 3. Savun kulkeutumista laivan ulkopuolelle simulaatiossa, jossa palo sijaitsee avoimessa ro-ro-tilassa ja palon aikana valitsee tuuli tyyrpuurin puolelta.

## YHTEENVETO

Ro-ro-alusten tulipalojen suuri määrä viime vuosina on tuonut esiin tarpeen parantaa palontorjuntaa ja tulipalojen hallintaa, koska näillä tulipaloilla on vakavia seurauksia aluksen miehistölle ja matkustajille sekä laivalle ja sen rahdille. Euroopan unionin rahoittamassa LASH FIRE -tutkimushankkeessa kehitetään uusia toimintatapoja ja teknisiä innovaatioita, jotka parantavat ro-ro-alusten paloturvallisuutta ja vastaavat nykyisiin ja tuleviin paloturvallisuushaasteisiin. Projektin tulosten odotetaan alentavan ro-ro-alusten syttymistäajuutta 35 prosentilla ja tulipalojen kuolonuhrien määrää 45 prosentilla.

Palon havaitsemiseen liittyvän työpaketin tavoitteena on nopea ja luotettava palon havaitseminen, paikantaminen ja varmentaminen eri tyyppisissä ro-ro-tiloissa tarkastelemalla uusia ja edistyneitä teknologioita. VTT suorittaa savun ja lämmön kulkeutumisen simulaatioita, joilla määritetään palon havaitsemisaika eri teknologioilla ja erilaisissa ilmanvaihtotilanteissa. Simuloinnit tuottavat myös suosituksia paloilmajärjestelmien suuren mittakaavan testaukseen ja validointiin eri paloskenaarioissa.

Palon leviämisen estämiseen liittyvän työpaketin tavoitteena on eliminoida merkittävät heikkoudet palon leviämisen rajoittamisesta ottaen huomioon savu, liekit ja kuumuus. VTT on tehnyt ro-ro-tilojen aukkojen kautta tapahtuvan palon ja savun leviämisen simulointeja. Työssä tarkasteltiin poistumisturvallisuuden kannalta kriittisten alueiden kuten poistumisasemien ja pelastusvälineiden sijaintipaikkojen turvallisuutta. Turvaetäisyydet ro-ro-tilojen aukkojen ja kriittisten alueiden välillä havaittiin tehokkaaksi riskienhallintatoimenpiteeksi varmistaa kriittisten alueiden turvallisuus. On todettu, että muuttamalla laivan kurssia savu voidaan suunnata pois kriittisiltä alueilta. Tämä edellyttää, että laivaa pystytään ohjaamaan ja turvallinen poistuminen ei vaaranna kovassa merenkäynnissä kurssimuutoksen seurauksena. Työn tuloksia ja niihin perustuvaa ohjeistusta voidaan hyödyntää suunniteltaessa uusia aiempaa paloturvallisempia ro-ro-aluksia, parannettaessa olemassa olevien alusten paloturvallisuutta ja uudistettaessa Kansainvälisen merenkulkujärjestön säädöksinä.

## KIITOKSET

Tämä projekti on saanut rahoitusta Euroopan unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta perustuen rahoitus-sopimukseen nro 814975.

## LÄHDELUETTELO

1. <http://www.lashfire.eu>
2. SOLAS – International Convention for the Safety of Life at Sea, Consolidated Edition, as amended. International Maritime Organization, 2014.
3. Unified interpretations of SOLAS Chapter II-2, MSC.1/Circ.1555. International Maritime Organization, 2016.
4. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R. & Vanella, M. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2020. 120 s. + liitt. 49 s. (NIST Special Publication 1018-1).
5. Leroux, J., Mindykowski, P., Evgren, F., Gustin, L., Faivre, J., Frösing, M., Lottkär, J., Ukaj, K. & Vicard, B. FIRESAFE II, Containment and Evacuation (Final report). 2018. 139 s. + liitt. 42 s.
6. Tissari, A., Verma, N., Korhonen, T., Kling, T. & Hakkarainen, T. Miten hallita ro-ro-tilojen aukkoihin liittyviä paloriskejä? Palotutkimuksen päivät 2021.

**Pelastustieto**  
- alan seuratuin media

ETUOSI PELASTUSTIETO PELASTUSTIETOIMTA BLOGIT YHTEYSTIEDOT S. MOTTIALLI

**KIRJAUDU PALVELUUN**  
Pelastustietoon tilatut voivat lukea kaikki palvelun sisältöä.

KIRJAUDU PALVELUUN  
TILAA PELASTUSTIETO  
TILAA UUTISKIRJE  
TILAA ITÄNUMERO

**UUSIN LEHTI**  
**Pelastustieto**  
Sammusa-lehti

**LEHTIARKISTO**

**SUOSITUT**

**UUTISKIRJE**  
Pääjät-Häme aloittaa sopimuspalokuntalaisten rekrytointikampanjan - "Parhaimmillaan elämäntaitainen harrastus"

**UUTISKIRJE**  
Kalajoen maastopalo on rauhoittumassa päät - maastorin palo vai liikkelle koko maan pelastuslaitokset ja sopimuspalokunnat

**UUTISKIRJE**  
Pelastuskeskustön puhelimilla vaaditaan paljon - Länsi-Uudellamaalla ollaan tyytyväisiä uusien erikoismatkapuhelimitin

**UUTISKIRJE**  
Pelastusajoneuvot saavat polttoainetta poikkeusolosuhteissa

**UUTISKIRJE**  
Sopimuspalokuntien tuentamaton tulevaisuus - kuinka välttää toiminnan sammuminen?

**Blogit**

Ahtinatut, pelastettua, pottias ja uhri  
Oeko viestintämme varustanut kahaikin?

**Tiedä, mistä alalla puhutaan!**  
- pelastustieto.fi -

# Miten hallita ro-ro-tilojen aukkoihin liittyviä paloriskejä?

## Tiivistelmä

Tulipalot ro-ro-alusten avoimissa ro-ro-tiloissa on tunnistettu merkittäväksi riskitekijäksi. Tulipalossa muodostuva lämpö ja savu voivat levitä ro-ro-tilan aukkojen kautta kriittisille alueille kuten poistumisasemille ja pelastusvälineiden sijaintipaikolle, mikä vaarantaa turvallisen poistumisen alukselta. VTT on tutkinut ro-ro-tilojen aukkojen paloturvallisuuskysymyksiä ja niihin liittyviä turvallisuusjärjestelyjä eurooppalaisessa LASH FIRE -projektissa. Tutkimuksessa tehtiin FDS-ohjelmistoa käyttäen ro-ro-tilojen palosimulointeja, joissa tarkasteltiin lämmön ja savun leviämistä kriittisille alueille ro-ro-tilan sivu- ja päätyaukkojen kautta. Simulointitulosten avulla tarkasteltiin mahdollisia riskienhallintatoimenpiteitä, joilla voidaan huomioida paloturvallisuuskäytännöt ro-ro-tilan aukkojen suunnittelussa. Turvaetäisyydet ro-ro-tilan aukkojen ja kriittisten alueiden välillä havaittiin tehokkaaksi keinoksi poistumisturvallisuuden varmistamiseksi. Havaittiin myös, että laivan kurssin muutoksilla voidaan ohjata savua pois kriittisiltä alueilta.

## JOHDANTO

Pyörien päällä liikkuvan lastin kuljettamiseen tarkoitettujen ro-ro-alusten paloturvallisuuden on havaittu heikentyneen 2000-luvulla [1], minkä johdosta Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on ottanut turvallisuustason parantamisen asialistalleen. Euroopan unionin rahoittaman LASH FIRE -projektin tavoitteena on lisätä tietoa ro-ro-alusten paloturvallisuudesta, tukea merenkulkualan päätöksentekoa sekä kehittää uusia paloturvallisuusratkaisuja.

Yksi ro-ro-aluksille tyypillinen merkittävä riskitekijä on tulipalo aluksen avoimessa ro-ro-tilassa. Avoimet ro-ro-tilat ovat lastitiloja, joiden molemmat päädyt ovat avonaisia, tai vaihtoehtoisesti avoinna on toinen päädyistä sekä vähintään 10 prosenttia tilan sivujen pinta-alasta. Alusten operoinnin näkökulmasta avoimet ro-ro-tilat ovat hyvin tärkeitä, sillä esimerkiksi vaarallisia aineita ei saa kuljettaa suljetuissa ro-ro-tiloissa. Avoimessa ro-ro-tilassa syttyvässä tulipalossa muodostuva lämpö ja savu voivat kuitenkin

levitä aukkojen kautta kriittisille alueille kuten poistumisasemille ja pelastusvälineiden sijaintipaikolle, mikä vaarantaa turvallisen poistumisen alukselta. Esimerkiksi Norman Atlantic -aluksella vuonna 2014 tapahtuneessa onnettomuudessa tyyrpuurin puolella sijainneet pelastusveneet tuhoutuivat käyttökelvottomiksi avoimesta ro-ro-tilasta tulleiden liekkien johdosta [2].

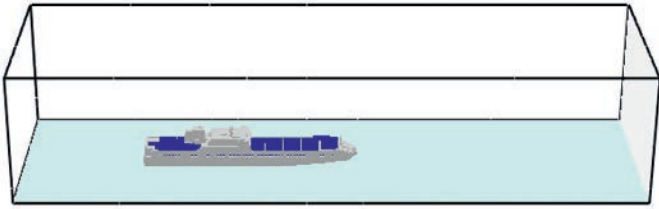
Tässä työssä tutkittiin lämmön ja savun kulkeutumista avoimen ro-ro-tilan aukoista kriittisiin pidetyille alueille erilaisissa tuuliolosuhteissa laskennallisen virtausmekaniikan (Computational Fluid Dynamics, CFD) keinoin. Työn tarkoituksena oli arvioida aukkojen muodostamaa paloriskiä sekä mahdollisten riskienhallintatoimenpiteiden vaikutusta. Tarkastelun pohjana käytettiin todellisten laivojen geometrioita sekä turvallisuusjärjestelyitä.

## MENETELMÄT

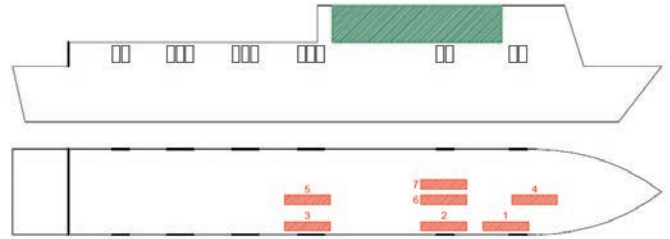
### Numeerinen menetelmä

Työssä käytettiin erityisesti tulipalojen simuloimiseen kehitettyä laskennallisen virtausmekaniikan ohjelmaa Fire Dynamics Simulator (FDS) [3]. Virtauksia mallinnetaan ohjelmassa Navier-Stokes -yhtälöiden avulla. FDS hyödyntää suurten pyörteiden menetelmää (Large Eddy Simulation, LES) virtauksen turbulenssin mallintamiseen, ja se soveltuu käytettäväksi tapauksiin joissa virtauksen Machin luku on alhainen.

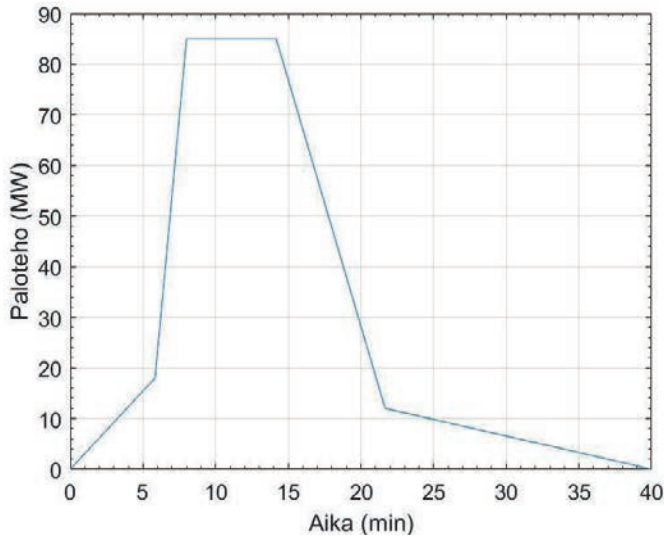
Simulaatioissa, joissa tuulen vaikutus savun ja lämmön kulkeutumiseen otettiin huomioon, tuuli määritettiin sisäänvirtausreunaehtona sopivalle laskenta-alueen sivulle. Laskenta-alueen koko määriteltiin riittävän suureksi, jotta reunaehdot eivät vaikuttaneet haitallisesti simuloituihin virtauksiin. Sopiva laskenta-alue määriteltiin erikseen jokaiselle simuloitulle tapaukselle. Simulaatioissa käytettiin kahta erilaista laivageometriaa. Esimerkki laskenta-alueesta sekä simuloinneissa käytetystä toisesta laivageometriasista on esitetty kuvassa 1. Ennen palon syttymistä simulaatiota ajettiin riittävän kauan, noin kolme minuuttia, jotta laivaa ympäröivät tuuliolosuhteet ehtivät kehittymään. Tuulen nopeutena käy-



Kuva 1. Esimerkki laskenta-alueesta sekä simuloineissa käytetystä toisesta laivageometriasta.



Kuva 3. Yksinkertaistettu kuvaus Stena Flavian sivuprofiilista sekä avoimesta ro-ro-tilasta. Aukkojen sijainnit avoimen ro-ro-tilan sivuilla on esitetty tummennettuna, tutkitut palojen sijainnit tunnistenumeron kanssa punaisella ja turvallisuuden kannalta kriittiset alueet vihreällä.



Kuva 2. Mitoituspalon paloteho. Mitoituspalo perustuu Cheong ym. [6] suorittaman polttokokeen tuloksiin.

tettiin pääosin 7,5 metriä sekunnissa, mikä vastaa Itämeren etelä- ja keskiosien pitkäaikaista vuotuista keskiarvoa [4], [5]. Olosuhteiden kehittymistä palon aikana tutkittiin 20 minuutin ajan.

### Mitoituspalo

FIRESAFE I -projektissa kerättyjen tilastojen mukaan [1] suurimman paloriskin ro-ro-tiloille muodostaa niissä kuljetettava lasti, erityisesti ajoneuvot sekä lämpösäädelyt kontit. Tässä tutkimuksessa käytettiin mitoituspaloa raskaan ajoneuvon paloa, sillä FIRESAFE I -projektin tilastojen mukaan ajoneuvopalot olivat hieinan todennäköisempiä kuin lämpösäädelyjen konttien palot.

Mitoituspalo muodostettiin käyttämällä Cheong ym. [6] suorittaman polttokokeen tuloksia. Kokeessa poltettiin raskasta ajoneuvoa esittävä koasetelma koneellisesti ilmastoidussa testitunnelissa, ja sammutusjärjestelmä aktivoitiin kokeessa kahdeksan minuuttia paloilmatisimen aktivoitumisen jälkeen. Koasetelman oli tarkoitus vastata tilannetta, jossa tulipalo havaitaan myöhään. [6] Mitoituspalo muodostettiin määrittelemällä yksinkertaistettu palotehokäyrä, jonka alle kokeelliset arvot jäävät. Muodostettu pa-

lotehokäyrä on esitetty kuvassa 2. Mitoituspalon oletettiin tuottavan nokea 0.025 g/g ja häkää 0.15 g/g [7]. Arvot perustuvat arvioihin päästöistä ajoneuvon palaessa tunnelissa.

### Hyväksymiskriteerit

Tarkastelussa käytettiin kahta erilaista hyväksymiskriteeriä riippuen siitä, tarkasteltiin palon aiheuttamaa uhkaa ihmisille vai paloa ympäröiville rakenteille ja materiaaleille. Tarkasteltaessa palon aiheuttamaa uhkaa ihmisille käytettiin hyväksymiskriteerinä Kansainvälisen merenkulkujärjestön Meriturvallisuuskomitean suosittelemia arvoja [8], jotka on esitetty taulukossa 1. Palon arvioitiin voivan vahingoittaa ympäröiviä palavasta materiaalista tehtyjä rakenteita ja muita kohteita lämpösäteilyn intensiteetin ylittäessä arvon 10 kW/m<sup>2</sup>. Arvio perustuu kriittisiin lämpösäteilyn intensiteetteihin, joiden tiedetään voivan johtaa tyypillisesti käytettävien materiaalien syttymiseen tai vaurioitumiseen [9].

### Tarkasteltavat tapaukset

Lämmön ja savun kulkeutumista kriittisinä pidetyille alueille tutkittiin yhteensä 13:ssa eri tapauksessa. Mitoituspalon paikkaa sekä tuulen suuntaa ja nopeutta vaihdeltiin. Tarkasteluiden pohjana käytettiin kahden eri todellisen laivan, Stena Flavian ja Magnolia Seawaysin, geometrioita sekä turvallisuusjärjestelyitä. Tutkitut avoimet ro-ro-tilat edustavat kahta erilaista mahdollista suunnitteluratkaisua. Stena Flavian avoin ro-ro-tila on auki vain perästä, minkä lisäksi tilan sivut on varustettu kiinteillä aukoilla. Magnolia Seawaysin avoin ro-ro-tila taas on auki molemmista päädyistä eikä tilan sivuilla ole lainkaan aukkoja. Avoimen ro-ro-tila, jossa vain toinen pääty olisi auki, mutta tilan sivuissa ei olisi kiinteitä aukkoja, ei ole mahdollinen.

### Palo ro-ro-tilassa, jonka toinen pääty on avoin

Yhdestä päästä avoimessa ro-ro-tilassa tapahtuvia tulipaloja tutkittiin hyödyntämällä todellisen ro-pax-aluksen Stena Flavian geometriaa sekä turvallisuusjärjestelyitä. Yksinkertaistettu kuvaus Stena Flavian sivuprofiilista sekä avoimesta ro-ro-tilasta on esitetty kuvassa 3. Aukkojen sijainnit avoimen ro-ro-tilan sivuilla on esitetty tummennettuna, tutkitut palojen sijainnit tunnistenu-

Suure	Raja-arvo
Kaasun lämpötila	< 60 °C
Lämpösäteilyn intensiteetti	< 2,5 kW/m <sup>2</sup>
Näkyvyys	> 10 m > 5 m alle 100 m <sup>2</sup> alueilla
Hään (CO) pitoisuus	< 1200 ppm (hetkellinen altistuminen) < 500 ppm (jatkuva altistuminen 20 minuutin ajan)

Taulukko 1. Hyväksymiskriteerit palon ihmisille aiheuttaman vaaran arvioimiseen [8].

- ▶ meron kanssa punaisella ja turvallisuuden kannalta kriittiset alueet vihreällä. Turvallisuuden kannalta kriittisinä pidetyillä alueilla on esimerkiksi pelastusveneitä ja -lautoja, kannelta laukaistava evakuoitijärjestelmä (Marine Evacuation System, MES) ja kokoontumisasema. Palojen sijainnit simulaatioissa on valittu niin, että ne muodostavat mahdollisimman suuren uhan turvallisuuden kannalta kriittisille alueille, mikäli palo- ja savukaasut leviävät ro-ro-tilan sivuaukkojen kautta laivan ulkopuolelle. Tarkasteltavaksi valitut tapaukset on esitelty taulukossa 2.

### Palo ro-ro-tilassa, jonka molemmat päädyt ovat auki

Molemmista päistä avoimessa ro-ro-tilassa tapahtuvia tulipaloja tutkittiin hyödyntämällä todellisen ro-ro-aluksen Magnolia Seawaysin geometriaa sekä turvallisuusjärjestelyitä. Yksinkertaistettu kuvaus Magnolia Seawaysin sivuprofilista sekä avoimesta ro-ro-tilasta on esitetty kuvassa 4. Aukkojen sijainnit avoimen ro-ro-tilan sivuilla on esitetty tummennettuna, tutkittu palon sijainti punaisella ja turvallisuuden kannalta kriittiset alueet vihreällä. Turvallisuuden kannalta kriittisinä pidetyillä alueilla on esimerkiksi pelastusveneitä ja -lautoja sekä kokoontumisasema. Tarkasteltavaksi valitut tapaukset on esitelty taulukossa 3.

### TULOKSET

Vaarantuvien alueiden vaakasuuntainen etäisyys kiinteistä aukoista määriteltiin pääosin lämpösäteilyn intensiteetin perusteella, sillä kyseisen suureen hyväksymiskriteerin havaittiin ylittyvän suurimmalla alueella. Lisäksi näkyvyyden havaittiin laskevan hyväksymiskriteerin alle eri alueilla hetkellisesti tuulen mukana kulkeutuvan savun johdosta. Nämä alueet saattoivat hetkellisesti olla suurempia kuin alueet joissa lämpösäteilyn intensiteetin hyväksymiskriteeri ylittyi, mutta tämän ei arvioitu vaarantavan poistumista enemmän kuin lämpösäteily, koska näkyvyyden heikkeneminen oli hetkellistä. Ehdotetuissa riskinhallintatoimepiteissä näkyvyyden heikkeneminen otettiin kuitenkin huomioon.

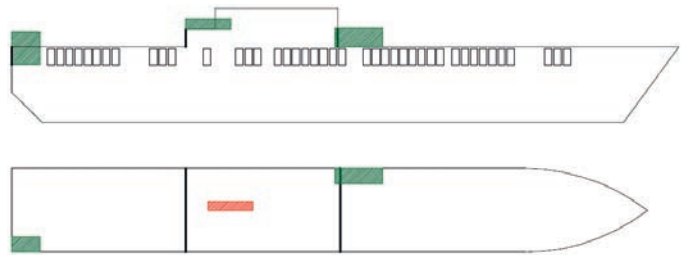
### Palo ro-ro-tilassa, jonka toinen pääty avoin

Turvallisuuden kannalta kriittisten alueiden havaittiin vaaraantuvan kiinteiden aukkojen läheisyydessä lähes kaikissa tutkituissa tapauksissa. Palo- ja savukaasut kulkeutuivat ro-ro-tilan sivuaukkojen kautta laivan ulkopuolelle sekä myös kriittisinä pidetyille alueille. Vaakasuuntaiset etäisyydet alueille joissa lämpösäteilyn intensiteetti pysyy hyväksymiskriteerin mukaisissa arvoissa palon aikana on esitetty taulukossa 4.

Palokaasujen ja savun leviämisen havainnollistamiseksi savupatsas laivan ulkopuolella eri simulaatioissa on esitetty kuvissa 5 ja 6. Kuvassa 5 on savupatsas laivan ulkopuolella kymmenen minuuttia palon syttymisen jälkeen tapauksessa 2, jossa palo sijaitsee keskilinjalla laivan etuosassa (sijainti 4), ja palon aikana vallitsee vastatuuli. Kuvassa 6 taas on esitetty vastaavasti savupatsas laivan ulkopuolella tapauksessa 5, jossa palo sijaitsee paapurin

Tapaus	Tuuli	Palon sijainti
1	Ei tuulta	2
2	Vastatuuli	4
3	Vastatuuli	2
4	Myötätuuli	5
5	Tyyrpuurin puolelta	7
6	Vastatuuli	1
7	Myötätuuli	3
8	Ei tuulta	6

Taulukko 2. Tarkastelut, joissa palo sijaitsee yhdestä päästä avoimessa ro-ro-tilassa.



Kuva 4. Yksinkertaistettu kuvaus Magnolia Seawaysin sivuprofilista sekä avoimesta ro-ro-tilasta. Aukkojen sijainnit avoimien ro-ro-tilojen sivuilla on esitetty tummennettuna, tutkittu palon sijainti punaisella ja turvallisuuden kannalta kriittiset alueet vihreällä.

Tapaus	Tuuli
9	Vastatuuli
10	Myötätuuli
11	Paapurin puolelta
12	Tyyrpuurin puolelta
13	Ei tuulta

Taulukko 3. Tarkastelut, joissa palo sijaitsee molemmista päistä avoimesta ro-ro-tilassa.

puolella keskilinjan läheisyydessä laivan etuosassa (sijainti 7), ja palon aikana vallitsee tuuli tyyrpuurin puolelta.

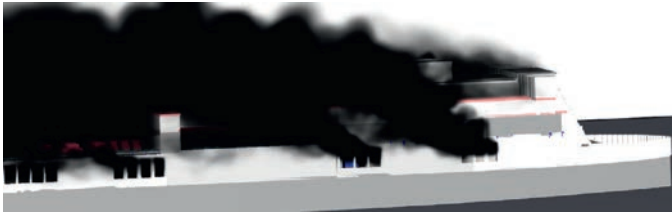
### Palo ro-ro-tilassa, jonka molemmat päädyt avoimia

Turvallisuuden kannalta kriittisten alueiden havaittiin vaaraantuvan kiinteiden aukkojen läheisyydessä kaikissa tutkituissa tapauksissa. Palo- ja savukaasut kulkeutuivat ro-ro-tilan päätyaukkojen kautta laivan ulkopuolelle sekä myös kriittisinä pidetyille alueille. Vaakasuuntaiset etäisyydet alueille joissa lämpösäteilyn intensiteetti pysyy hyväksymiskriteerin mukaisissa arvoissa palon aikana on esitetty taulukossa 5.

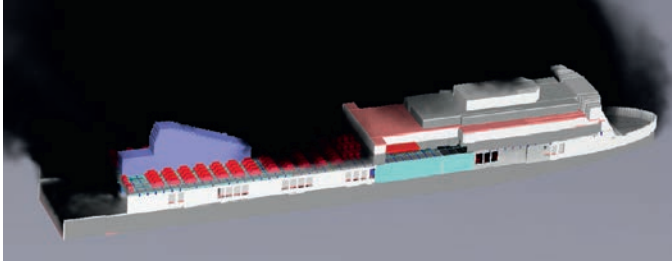
Palokaasujen ja savun leviämisen havainnollistamiseksi savupatsas laivan ulkopuolella eri simulaatioissa on esitetty kuvissa 7 ja 8. Kuvassa 7 on savupatsas laivan ulkopuolella 10 minuuttia pa-

Tapaus	Tuuli	Etäisyys < 2,5 kW/m <sup>2</sup> (m)	Etäisyys < 10 kW/m <sup>2</sup> (m)
1	Ei tuulta	1,1	0,3
2	Vastatuuli	7,5	1,5
3	Vastatuuli	6,4	0,6
4	Myötätuuli	3,4	0,4
5	Tyyrpuurin puolelta	-	-
6	Vastatuuli	3,3	-
7	Myötätuuli	3,3	-
8	Ei tuulta	2,1	0,5

Taulukko 4. Vaakasuuntaiset etäisyydet alueille joissa lämpösäteilyn intensiteetti pysyy hyväksymiskriteerin mukaisissa arvoissa palon aikana.



Kuva 5. Savupatsas laivan ulkopuolella 10 minuuttia palon syttymisen jälkeen tapauksessa 2, jossa palo sijaitsee yhdestä päädyistä avoimessa ro-ro-tilassa keskilinjalla laivan etuosassa (sijainti 4), ja palon aikana vallitsee vastatuuli.



Kuva 6. Savupatsas laivan ulkopuolella 10 minuuttia palon syttymisen jälkeen tapauksessa 5, jossa palo sijaitsee yhdestä päädyistä avoimessa ro-ro-tilassa paapuurin puolella keskilinjän läheisyydessä laivan etuosassa (sijainti 7), ja palon aikana vallitsee tuuli tyyrpuurin puolelta.



Kuva 7. Savupatsas laivan ulkopuolella 10 minuuttia palon syttymisen jälkeen tapauksessa 12, jossa palo sijaitsee molemmista päädyistä avoimessa ro-ro-tilassa, ja palon aikana vallitsee tuuli tyyrpuurin puolelta.



Kuva 8. Savupatsas laivan ulkopuolella 10 minuuttia palon syttymisen jälkeen tapauksessa 13, jossa palo sijaitsee molemmista päädyistä avoimessa ro-ro-tilassa, ja palon aikana ei tuule.

lon syttymisen jälkeen tapauksessa 12, jossa palon aikana vallitsee tuuli tyyrpuurin puolelta. Kuvassa 8 taas on savupatsas laivan ulkopuolella 10 minuuttia palon syttymisen jälkeen tapauksessa 13, jossa on oletettu että ei tuule.

## MAHDOLLISET RISKIENHALLINTATOIMENPITEET

Simulaatiotulosten perusteella nykyistä turvallisuustasoa voitaisiin parantaa käyttämällä turvaetäisyyksiä ro-ro-tilojen sivu- ja päätyaukkojen sekä turvallisuuden kannalta kriittisten alueiden välillä. Simulaatiotulosten perusteella ehdotetaan käytettäväksi taulukossa 6 esitettyjä etäisyyksiä. Simuloimalla määritettyihin etäisyyksiin on lisätty 50 prosentin turvamarginaali, joka vastaa käytetylle ohjelmalle määritettyä epävarmuutta [10].

Tutkimuksessa ei otettu kantaa siihen, miten turvaetäisyys kuu- luisi teknisesti toteuttaa ro-ro-alusten aukkojen sekä turvallisuus- kriittisten alueiden välille. Kaikkien ro-ro-tilojen sivu- ja pääty- aukkojen sulkemista lopullisesti ei ole pidetty kustannustehok-

kaana ratkaisuna [11], sillä aukot ovat tarpeellisia ro-ro-alusten taloudellisen operoinnin vuoksi. Sen lisäksi, että olemassa olevilla laivoilla osa aukoista voitaisiin sulkea lopullisesti, mahdollisena ratkaisuna nähtiin myös esimerkiksi aukkojen varustaminen tulipalotilanteessa aktivoituvilla sulkimilla. Päätyaukkojen kohdalla olisi mahdollista myös siirtää aukkoja jatkamalla kansirakenteita. Uusissa ro-ro-aluksissa tarvittavat turvaetäisyydet voidaan huomioida jo laivan suunnitteluvaiheessa.

Simulaatiotulosten perusteella savu voi kulkeutua laivan ulko- puolella kriittisiin pidetyille alueille, mikä voi tilanteesta riippu- en uhata turvallista poistumista laivalta. Savu- ja palokaasujen kulkeutumiseen tuulen mukana voidaan kuitenkin vastata lai- van kurssin muutoksella, mitä myös suositellaan mahdolliseksi riskienhallintatoimenpiteeksi, edellyttäen että laiva on ohjailta- vissa eikä kurssimuutos vaaranna turvallista poistumista kovas- sa merenkäynnissä.

Tapaus	Tuuli	Etäisyys < 2,5 kW/m <sup>2</sup> (m)	Etäisyys < 10 kW/m <sup>2</sup> (m)
9	Vastatuuli	26,6*	13,2*
10	Myötätuuli	14,2	3,8
11	Paapuurin puolelta	9,6	4,2
12	Tyyrpuurin puolelta	15,2	6,8
13	Ei tuulta	14,4	7,4

Taulukko 5. Vaakasuuntaiset etäisyydet alueille joissa lämpösäteilyn intensiteetti pysyy hyväksymiskriteerin mukaisissa arvoissa palon aikana. Tähdellä (\*) merkityt arvot ovat hetkellisiä, ja johtuvat tuulen mukana vaakasuuntaisesti kulkeutuvista palokaasuista.

Aukkotyyppi	Hyväksymiskriteeri 2,5 kW/m <sup>2</sup>	Hyväksymiskriteeri 10 kW/m <sup>2</sup>
Sivuaukko	12 m	3 m
Päätyaukko	20 m	9 m

Taulukko 6. Ehdotetut turvaetäisyydet ro-ro-tilojen sivu- ja päätyaukkojen sekä turvallisuuden kannalta kriittisten alueiden välille.

## ▶ JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa tehtiin FDS-ohjelmistoa käyttäen ro-ro-tilojen palosimulointeja, joissa tarkasteltiin lämmön ja savun leviämistä kriittisille alueille kahden erilaisen ro-ro-tilan sivu- ja päätyaukkojen kautta. Mitoituspalona käytettiin raskaan kuorma-auton tulipalaa. Simuloinneissa vaihdeltiin palon sijaintia sekä tuulen suuntaa ja nopeutta. Hyväksymiskriteerit määriteltiin erikseen henkilöturvallisuudelle ja materiaalien palonkestävyydelle.

Tulosten avulla tarkasteltiin mahdollisia riskienhallintatoimenpiteitä, joilla voidaan huomioida paloturvallisuuskohdat ro-ro-tilan aukkojen suunnittelussa. Turvaetäisyydet ro-ro-tilan aukkojen ja kriittisten alueiden välillä havaittiin tehokkaaksi keinoksi poistumisturvallisuuden varmistamiseksi. Työn tuloksena määriteltiin turvaetäisyydet erikseen sivu- ja päätyaukoille. On kuitenkin huomattava, että simulointitulokset ja niiden perusteella määritellyt turvaetäisyydet ovat riippuvaisia ympäristöolosuhteista ja laivan toimintakyvystä tehdyistä oletuksista.

Uusissa ro-ro-aluksissa tarvittavat turvaetäisyydet voidaan huomioida jo laivan suunnitteluvaiheessa. Olemassa olevissa laivoissa turvaetäisyydet voidaan toteuttaa sulkemalla pysyvästi osa aukoista tai varustamalla ne sulkimilla, jotka aktivoidaan tulipalotilanteessa. Tämän lisäksi laivan kurssin muutoksilla voidaan suunnata savu pois kriittisiltä alueilta edellyttäen, että laiva on ohjailtavissa eikä kurssimuutos vaaranna turvallista poistumista kovassa merenkäynnissä.

## KIITOKSET

Tämä projekti on saanut rahoitusta Euroopan unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta perustuen rahoitus-sopimukseen nro 814975.

## LÄHDELUETTELO

[1] Wikman, J., Evegren, F., Rahm, M., Leroux, J., Breuillard, A., Kjellberg, M., Gustin, L. & Efraimsson, F. Study investigating cost effective measures for reducing the risk from fires on ro-ro passenger ships (FIRESAFE). Lissabon: Euroopan meriturvallisuusvirasto, 2016. 136 s. + liitt. 10 s. (EMSA/OP/01/2016).

[2] 3<sup>rd</sup> Division Marine Investigations (DiGIFeMa). Fire on board of the ro-ro pax NORMAN ATLANTIC, Final report. Roo-

ma: Ministry of Infrastructure and Transport, Directorate-General for Rail and Marine Investigations, 2014. 164 s.

[3] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R. & Vanella, M. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2020. 120 s. + liitt. 49 s. (NIST Special Publication 1018-1).

[4] Zhang, W., Harff, J. & Schneider, R. Analysis of 50-year wind data of the southern Baltic Sea for modelling coastal morphological evolution – a case study from the Darss-Zingst Peninsula. Oceanologia, 2011. Vol. 53, s. 489-518. ISSN 0078-3234.

[5] Pena Diaz, A., Hahmann, A. N., Hasager, C. B., Bingöl, F., Karagali, I., Badger, J., Badger, M. & Clausen, N.-E. South Baltic Wind Atlas. Roskilde: Technical University of Denmark, National Laboratory for Sustainable Energy. 2011. 66 s. (Risø-R-1775(EN)). ISBN 978-87-550-3899-8.

[6] Cheong, M. K., Cheong, W. O., Leong, K. W., Lemaire, A. D. & Noordijk, L. M. Heat Re-lease Rate of Heavy Goods Vehicle Fire in Tunnels with Fixed Water Based Fire-Fighting System. Fire Technology, 2014. Vol. 50, s. 249-266.

[7] Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M. L., Meo, M. G. & Russo, P. Simulation of fire scenarios due to different vehicle types with and without traffic in a bi-directional road tunnel. Tunneling and Underground Space Technology, 2013. Vol. 37, s. 22-36. ISSN 0886-7798.

[8] MSC.1/Circ.1552. Amendments to the guidelines on alternative design and arrangements for fire safety (MSC/Circ.1002). Lontoo: Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO), 2016. 8 s.

[9] Hurley, M. J. Thermophysical Property Data. Teoksessa: Hurley, M. J., Gottuk, D., Hall Jr., J. R., Harada, K., Kuligowski, E., Puchovsky, M., Torero, J., Watts Jr., J. M. & Wiecezorek, C. (toim) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. New York: Springer, 2016. S. 3425-3475. ISBN 978-1-4939-2564-3.

[10] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R. & Vanella, M. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 3: Validation. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2020. 960 s. (NIST Special Publication 1018-3).

[11] Leroux, J., Evegren, F., Gustin, L., Ukaj, K. & Vicard, B. FIRESAFE II, Combined Assessment, Final Report. Lissabon: Euroopan meriturvallisuusvirasto, 2018. 59 s. + liitt. 14 s. (EMSA/OP/17/2017).



**Nuorten  
turvallisuusasenteiden  
kasvattamista  
Tietoja  
ja taitoja  
lisäämällä.**

**NOUHÄTÄ!**  
PELASTUSTAITOKAMPANJA

**KOULUJEN TURVALLISUUSKASVATUKSEN TUKENA**

[www.nouhata.fi](http://www.nouhata.fi)

8-luokkalaisten NouHätä!-kampanjan järjestävät pelastuslaitokset ja Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö yhteistyössä sisäministeriön, Opetushallituksen, Pelastusopiston, pelastusliittojen ja Suomen Palopäälystölaitoksen kanssa. Kampanjan rahoittaa Palosuojelurahasto.



# Muovien kiertotalouden ja kierrätysmuovin paloturvallisuus

## Tiivistelmä

Kierrätysmuovijalostamoiden ja jätekeskusten paloturvallisuutta ei ole Suomessa viime vuosina laajalti tutkittu, vaikka kierrätys on voimakkaasti lisääntynyt ja kierrätys- ja jäteasemiin liittyviä merkittäviä paloriskejä on tunnistettu. VTT:n tutkimusprojektissa on tehty kirjallisuuskatsaus muovien kierrätykseen liittyvistä paloturvallisuusriskeistä. Tutkimus tukee muovien kiertotalouden kehitystyötä ja siten edistää muovien käytön kestävästä kehitystä ja luonnonvarojen riittävyyttä.

## JOHDANTO

Muovien kierrätys on monivaiheinen prosessi, joka sisältää muovijätteen keräämisen, kuljetuksen, varastoinnin, lajittelun ja prosessoinnin kierrätetyksi muoviraaka-aineeksi ja uusien tuotteiden valmistamisen tästä raaka-aineesta. Suomessa ja muissa EU-maissa kierrätetään eniten pakkausmuovijätettä, ja seuraavaksi eniten maatalous- ja rakennusmuovijätettä. Kierrätettyä muovia käytetään pakkausissa, maataloudessa, maa- ja vesirakentamisessa, muussa rakentamisessa ja teollisuudessa sekä kulutustavaroissa [1]. Toistaiseksi myös suuret määrät muovijätettä päätyy poltettavaksi. Muovijätteen energian talteenottoa ei kuitenkaan katsota kierrätykseksi [2].

EU:n jätedirektiivi velvoittaa lisäämään merkittävästi yhdyskuntajätteiden ja erityisesti pakkausjätteiden kierrätystä ja Suomen jätelakia ollaankin uudistamassa [3]. Tavoitteena on, että yhdyskuntajätteen kierrätysaste nousee vuoteen 2035 mennessä 65 prosenttiin ja pakkausjätteen 70 prosenttiin. Vaikka Suomen kierrätys- ja jätekeskuksissa on havaittu merkittäviä paloriskejä [4], ei erityisesti muovien kierrätykseen liittyviä paloriskejä ole aiemmin tutkittu Suomessa. Kun otetaan huomioon muovien kiertotalouden nopea kehitys viime vuosina ja yhä kasvavat kierrätysmäärät, on tärkeää, että toimintaan liittyvät paloriskit tunnistetaan ja käsitellään asianmukaisesti.

## MUOVIJÄTTEEN KIERRÄTYS SUOMESSA

### Pakkausten tuottajavastuu ja sen toteutus

Pakkausten tuottajavastuu perustuu jätelakiin (646/2011) ja valtioneuvoston asetukseen pakkauksista ja pakkausjätteistä (518/2014), ja niitä sovelletaan kaikkiin tuotteiden pakkaajiin ja pakattujen tuotteiden maahantuojiin, joiden liikevaihto on vähintään miljoona euroa. Tuottaja voi täyttää velvoitensa joko liittymällä tuottajaorganisaatioon tai tekemällä hakemuksen Pirkanmaan ELY-keskuksen tuottajarekisteriin. Liittymällä tuottajaorganisaatioon tuottaja siirtää lain velvoitteet tuottajaorganisaatiolle, joka hoitaa vastaanottoverkostoa ja kierrätystä. Suomen Uusiomuovi Oy [5] on tuottajaorganisaatio, joka toteuttaa yli 2500 yrityksen tuottajavastuuta muovipakkausista. Suomen Uusiomuovi Oy:n sopimustermiinaalit, joita on yli 60, vastaanottavat yritysten omassa toiminnassa syntyvää kierrätettävää muovipakkausjätettä.

Suomen Pakkauskierrätys Oy (Rinki) [6] huolehtii, että pakkausten kierrätys on helppoa myös kuluttajille, jotka voivat viedä lajittelemansa pakkaukset Rinki-ekopisteisiin, joita on yli 1850 eri puolilla Suomea. Julkista jätehuoltoa edustaa Suomen Kiertovoima RY (KIVO) [7], jossa on mukana 33 yhdyskuntajätelaitosta. Kaatopaikoista on tullut nykyaikaisia jätteenkäsittelykeskuksia [8], joissa hyödyntämismenetelmiin kuuluvat materiaalin käyttö energian tuottamiseen, sen käyttö toissijaisena raaka-aineena tuotteiden valmistuksessa tai jätealueen rakentamisessa, myynti kuluttajille tai muu kierrätys. Suurin osa kuluttajilta kerätystä pakkausmuovista päätyy kierrätykseen Fortumin Riihimäen muovijalostamolle [9]. Siellä käsitellään paitsi kuluttajamuovipakkaukset myös teollisuusmuoveja. Suomalaisen muovin kierrätyksen erityispiirre on juomapakkausten panttipohjainen palautusjärjestelmä, jota ylläpitää Suomen Palautuspakkaus OY (PALPA) [10]. Pramia Plastic Oy [11] muuttaa käytetyt PET-pullot muoviksi, joka kelpaa jopa elintarvikepakkauksiin.

- Suomen kierrätys- ja käsittelykeskuksissa kierrätettävien materiaalien määristä tai markkinatilanteesta ei löydy systemaattisesti kerättyä julkista tietoa. Airikkalan [8] mukaan jätekeskusten alueilla varastoitavan jätteen määrä on suuri ja yhden jättekasan pinta-ala voi olla tuhansia neliömetrejä. Kuluttajien muovipakkausjätteiden keräysmäärä on kasvanut niin nopeasti, ettei kotimainen kierrätyskapasiteetti ole riittänyt, vaan osa muovipakkausjätteistä on jouduttu viemään ulkomaille kierrätystä varten [12]. Huomattava osa kaupallisista ja teollisista muovipakkausjätteistä on jo aiemmin viety Kiinaan kierrätettäväksi, mutta vuonna 2018 Kiina kielsi muovijätteiden tuonnin ulkomailta, ja on mahdollista, että muovit on sitemmin varastoitu paalattuna odottamaan vaihtoehtoja käsittelyä tai energian talteenottoa [13].

### Muovijäteprosessi

Kotitalousmuovipakkausten erilliskeräys alkoi Suomessa vuonna 2016, jolloin kaatopaikkakielto tuli voimaan. Keräysjärjestelmää ei ole tarkoitettu muulle kotitalouksissa syntyvälle muovijätteelle, esimerkiksi astioille tai leluille. Keräysjärjestelmä ei myöskään tue eri muovilaatujen erottelua toisistaan. Teollisuuden muovi-jäte on usein hyvälaatuista ja valmiiksi lajiteltua [2]. Rakentamiseen liittyvän muovijätteen hyödynnettävyyttä sen sijaan rajoittaa usein lajittelun puute, ja purkamiseen liittyvän muovijätteen kierrätykselle ikä saattaa olla ongelma: vuosikymmeniä sitten käytettyjä kemikaaleja ei ehkä enää sallita tai niille on asetettu käyttörajoituksia. Maatalouden muovijätteen hyödynnettävyyttä vähentää sen likaisuus.

Käsittelylaitoksessa muovit erotellaan eri jakeiksi koon, muodon, värin ja laadun perusteella. Muovien tyyppi ja puhtausvaatimukset vaikuttavat prosessiin, ja esimerkiksi yhden muovilaudun muovijäte, kuten maatalouden paalimuovi, voidaan visuaalisen laadunvalvonnan jälkeen ohjata suoraan pesuprosessiin [14].

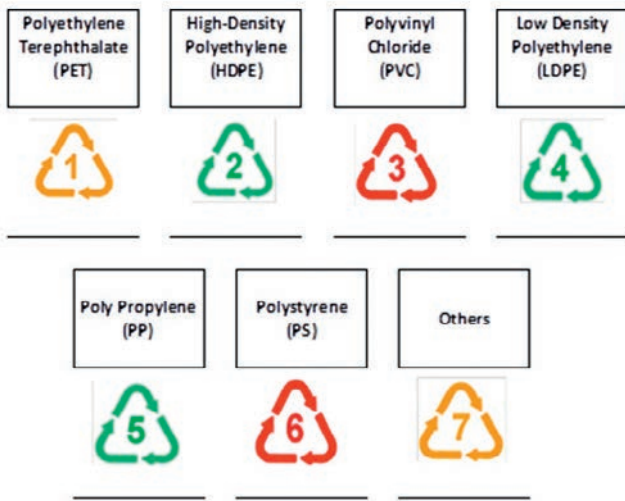
## "Muovit hajoavat termisesti eri tavoin, mikä vaikuttaa palon kehitykseen ja hajoamistuotteiden muodostumiseen."

Polttoon päätyvät materiaalit, joita ei voida tunnistaa tai erottaa, monikerrokiset tuotteet, mustat muovituotteet ja esimerkiksi maatalouden muovit, jotka sisältävät paljon orgaanista ainesta. Lajitteluprosessista muovijakeet siirretään kuljettimella suoraan varastohallissa olevaan paalaimen. Paalaamisen avulla pyritään muovijakeiden tehokkaaseen hallintaan sekä varastojen roskaantumisen ja likaantumisen minimointiin [2].

Muoviin jääneet epäpuhtaudet heikentävät kierrätetyn muovin ulkonäköä sekä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, ja siksi pesemisellä on merkittävä vaikutus kierrätetyn muovin laatuun [15]. Muovipaalit avataan ennen pesua ja suuremmat kappaleet murskataan pienemmiksi paloiksi. Murskattu muovifraktio pestään monivaiheisessa prosessissa. Samalla muovista poistetaan epäpuhtaudet, kuten maa, kivet, lasi, metalli, orgaaninen aines ja vieraat esineet. Erotus voidaan tehdä mekaanisesti tai manuaalisesti, ja esimerkiksi metallien poistamiseen käytetään magneetteja [16]. Pesty ja kuivattu muovi voidaan tarvittaessa käsitellä edelleen. Rakeet tai pelletit valmistetaan suulakepuristamalla, jolloin muovi kuumennetaan pehmeäksi ja puristetaan suuttimen lä-

<i>Muovityyppi</i>	<i>Käyttö (esimerkkejä)</i>	<i>Vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön</i>
Polyeteenitereftalaatti (PET)	Vesipullot, virvoitusjuomapullot, ruokaöljypullot	Myrkyllinen kemiallinen antimoni, joka voi aiheuttaa terveyshaittoja, kuten syöpää
Korkeatiheyksinen polyetyleni (HDPE)	Muovipöydät ja -tuolit, kannut, shampoopullot	Vapauttaa hiilidioksidia, hiilimonoksidia, typpioksidia, hiukkasia ja rikkioksidia
Polyvinyylilokloridi (PVC)	Suihkuverhot, putket, kuplamuovit, ruokapakkaukset	Vapauttaa klorideja, jotka sisältävät dioksiineja tai myrkyllistä kloorivetykaasua
Matalatiheyksinen polyetyleni (LDPE)	Muovikassit, puristettavat pullot	Liian suuri altistuminen säteilylle voi vapauttaa siitä metaania ja eteeniä
Polyproeeni (PP)	Jogurttipurkit, muovikupit, muoviköydet	UV-hajoaminen, erittäin herkkä happatumiselle
Polystyreeni (PS)	Kertakäyttöiset ruokailuvälineet, CD/DVD-kotelot, pukukorit	Vapauttaa kloorifluorihilivetyjä, hiilimonoksidia
Muut muovit	Tuttipullot, CD-levyt, lääkepakkaukset, biomuovit	Päästää myrkyllisiä kaasuja, jotka voivat aiheuttaa varhaisen murrosiän ja liikalihavuuden

Taulukko 1. Muovityypit, niiden käyttökohteet ja vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön [17].



Kuva 1. Muovityyppien symbolit ja värikoodit (vihreä=turvallinen käyttää, oranssi=käytettävä varoen, punainen=vältettävä käyttöä) [18].

pi haluttuun muotoon. Joissakin tapauksissa rakeet voidaan edelleen prosessoida muovijauheeksi.

## MUOVIJÄTE JA KIERRÄTYSMUOVI

### Muovityypit

Kemiallisen koostumuksen ja rakenteen perusteella muovityypit voidaan jaotella taulukossa 1 esitettyihin luokkiin. Taulukossa on kuvattu myös eri muovityyppien käyttökohteet sekä vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön. Muovityypit voidaan eritellä myös värikoodilla ja symboleilla kuvan 1 mukaisesti. Suomessa kaikki muovit soveltuvat kierrätykseen, lukuun ottamatta PVC:tä [5].

Muovit hajoavat termisesti eri tavoin, mikä vaikuttaa palon kehitykseen ja hajoamistuotteiden muodostumiseen [19]. Polyeteenitereftalaatin (PET) lämpöhajoaminen tuottaa kevyitä herkästi haihtuvia ja helposti syttyviä kaasuja, jotka ruokkivat liekkiä ja muodostavat rajoitetusti hiiltä. Korkea- ja matalatiheyksisen polyetyleenin (HDPE ja LDPE) lämpöhajoaminen tuottaa osittain hapettettuja tuotteita, kuten aldehydit ja ketonit sekä palamistuotteita, kuten hiilimonoksidi, hiilidioksidi, vesi jne.. Polyvinyylidikloridissa (PVC) on tyypillisesti pehmittimenä noin 30 % helposti syttyvää orgaanista nestettä. Kloori vapautuu vetykloridina (HCl) korkeassa lämpötilassa. Tavallinen täyteaine, kalsiumkarbonaatti, reagoi HCl:n kanssa ja tuottaa kalsiumkloridia sekä hiilidioksidipäästöjä. Palotilanteesta riippuen peräti 20 % kloorista voi olla orgaanisessa muodossa. PVC:llä on kuitenkin alhainen palamislämpö ja lämmöntuotto. Lämpöolosuhteista riippuen jäännökseksi muodostuu hiili- tai nokihiukkasia. Polypropeenin (PP) on herkkä jopa pienelle (alle 1 %) happipitoisuudelle, mikä voi aiheuttaa haihtuvien aineiden nopean vapautumisen, joka voi ruokkia tulta. Polystyreeni (PS) on luonteeltaan amorfista ja hajoaa termisesti yhdessä vaiheessa, mikä johtaa molekyylipainon nopeaan alenemiseen. Hapella on erittäin tärkeä rooli polystyreenin hajoamisessa, joka tuottaa bentsaldehydiä, bentsoehappoa, fenolia ja bentsyylialkoholia. Kuten edellä esitetystä nähdään, eri muovien palokäytätyminen voi olla hyvin erilaista.

### Epäpuhtaudet ja lisäaineet

Muoveista löytyy lisäaineita ja epäpuhtauksia riippuen muovityypistä, käyttökohteesta, valmistustavasta ja siitä, onko muovi valmistettu neitseellisestä materiaalista vai jätemuovista. Lisäaineet,

jotka on lisätty alkuperäiseen muovimateriaaliin, mutta joista ei ole hyötyä kierrätetyssä muovissa, voidaan myös nähdä epäpuhtauksina [20]. Lisäaineita käytetään erilaisiin tarkoituksiin, kuten polymerointinopeuden tai muovien mekaanisten ominaisuuksien muuttamiseen. Lisäaineita ovat esim. katalyytit, täyteaineet, pehmittimet, stabilointiaineet, väriaineet, voiteluaineet, palonsuoja-aineet jne. Katalyyteillä pyritään nopeaan ja täydelliseen polymerointiin; esimerkiksi Ziegler-Natta-katalyytit ovat yleisiä muun muassa polyeteenin ja polypropeenin valmistuksessa. Täyteaineet ovat inerttejä materiaaleja, jotka antavat muoville lujuutta, kovuutta ja muita ominaisuuksia; esimerkiksi kalsiumkarbonaatti, talkki, piidioksidi, savi ja alumiinioksiditrihydraatti ovat yleisesti käytettyjä täyteaineita. Pehmittimiä lisätään muovien plastiisuuden ja pehmeuden parantamiseksi; esim. kamferia, triasetiinia ja tributyylifosfaattia käytetään yleisesti pehmittiminä. Stabilisaattorit pidentävät muovien käyttöikää tukahduttamalla UV-valon, hapettumisen ja muiden ilmiöiden aiheuttaman hajoamisen; esim. trisfosfiitti on laajalti käytetty stabilointiaine. Muoveihin lisätään myös väriaineita ja pigmenttejä; esimerkiksi sinkkioksidi on yleisesti käytetty väriaine. Voiteluaineita levitetään muottien pinnalle, jotta muovituotteet eivät tartu muotteihin; esimerkiksi grafiitti, parafiini ja vaha ovat yleisesti käytettyjä voiteluaineita. Palonsuoja-aineita lisätään palon leviämismekanismien, kuten H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, ym. poistamiseksi; esimerkiksi bromattuja (BRF) ja muita orgaanisia halogeeniyhdisteitä käytetään yleisesti palonsuoja-aineina. Lisää esimerkkejä erityyppisistä lisäaineista löytyy lähteessä [21] olevasta taulukosta. Huomionarvoista on, että koska eri lisäaineilla on erilaiset kemialliset koostumukset, ne muuttavat eri tavoin muovin palamistapaa ja sen paloon liittyviä ominaisuuksia.

Epäpuhtauksien vaikutuksesta muovien palo-ominaisuuksiin löytyy hyvin vähän tietoa. Muutamassa julkaisussa käsitellään kahden hyvin yleisesti käytettyä muovia, PE:tä ja PP:tä. Sekalaista muovijätettä lajiteltaessa ei useinkaan ole mahdollista saada kaikkia epäpuhtauksia poistettua, joten esim. kiviä, erilaista muovityyppiä tai -laatua, kumia, hiekkaa, paperia sekä maalien ja päällysteiden jäännöksiä voi jäädä tarkasteltavaan muovihartsiin [20]. Tyypillisesti kierrätettyä muovia pidetään muoviseoksena, koska usein on mahdotonta kokonaan erottaa yhtä muovityyppiä toisesta kierrätysprosessin aikana muiden ei-muovisten epäpuhtauksien lisäksi. Esimerkiksi erä hollantilaista kierrätettyä PE:tä koostui 91 % PE:stä, 8 % PP:stä, 0,4 % mustista muoveista, 0,3 % PVC:stä, 0,2 % PS:stä, 0,2 % PET:stä ja 0,1 % paperista [22]. Kaksi pääpolymeeriä (esimerkiksi PE PP:ssä tai PP PE:ssä epäpuhtautena) voi muodostaa sekoittumattoman seoksen. Tyypillisesti seosmorfologia määräytyy polymeerin pitoisuuden, kahden polymeerin sekoittuvuuden ja yhteensopivuuden sekä prosessimuuttujien, kuten lämpötilan ja leikkausvoimien, perusteella, jotka puolestaan määräävät toisen sekoittumattoman polymeerin leviämisen pääpolymeerin matriisiin. Tämä seosmorfologia puolestaan määrittää materiaalin ominaisuudet, joista jotkut liittyvät voimakkaasti kierrätettyjen muovien molekyyliarkkitehtuuriin. Se voi myös vaikuttaa sulamiseen liittyviin ominaisuuksiin ja viskositeettiin, joilla voi olla merkitystä palon leviämisessä sulamisen yhteydessä, sekä muihin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten vetolujuus, iskunkestävyys jne. [22, 23]. Edellä esitetystä voidaan päätellä, että myös epäpuhtaudet voivat muuttaa muovin palamistapaa ja palo-ominaisuuksia.

### Palo-ominaisuudet

Kierrätettävien muovien palo-ominaisuuksien arviointi on haastavaa, koska kerätyt muovit voivat käsittää vain yhtä muovityyppiä tai useita muovityyppejä, jotka voivat olla joko neitsytmuovia tai kierrätettyä muovia. Yhden tyyppisestä muovista koostuvan massan voidaan olettaa olevan melko homogeenista, jolloin sille voi

- ▶ daan kokeellisesti määritellä keskimääräinen paloteho. Useimmiten kierrätettävä muovi koostuu kuitenkin useista muovityypeistä, jolloin sen keskimääräisiin palo-ominaisuuksiin vaikuttaa kemiallisen koostumuksen lisäksi myös yksittäisten muovien massaprosentti. Erilaisten muovityyppien kulutus voi vaihdella alueellisesti riippuen mm. kuluttajien sosioekonomisesta asemasta, mikä vaikuttaa kierrätykseen kerättyjen yksittäisten muovien massaprosentteihin. Kierrätysyritysten keräämät tiedot eri muovityyppien määristä olisivat hyvä lähtökohta arvioitaessa yksittäisten muovien keskimääräistä massaprosenttia eri alueilla. Jos tällaisia tietoja ei ole saatavilla, pitäisi ottaa riittävä määrä näytteitä, jotka edustavat riittävä määrä erilaisia muovijäteseoksia, jotka sitten voitaisiin testata niiden palo-ominaisuuksien määrittämiseksi. Näitä arvioituja palo-ominaisuuksia voitaisiin sitten käyttää paloturvallisuuden jatkok tutkimuksiin. Palo-ominaisuuksien huomioon ottamiseksi ainakin syttyvyys, liekinleviämisenopeus, lämmön- ja savuntuotto, sammutettavuus, ja sammutusvesien myrkyllisyys olisi arvioitava kunkin muovityypin tai muoviseoksen osalta (Kuva 2) [19]. Em. tietojen heikko saatavuus tulisi ottaa huomioon tulevaisuuden tutkimustyötä suunniteltaessa. Seuraavassa kappaleessa on yhteenveto asioista, jotka tulisi vähintään määrittää jätemuovipaloon liittyvien paloturvallisuusriskien huomioon ottamiseksi.

## MUOVIN KIERRÄTYKSEN PALOTURVALLISUUSRISKIT

### Jätepalot ja palontorjunta

Skandinaviassa on raportoitu monia jätepaloja [24, 25]. Vuonna 2014 Norjassa syttyi tulipalo kasassa sähkö- ja elektroniikkaromua, ja sammutus kesti 36 tuntia. Vuonna 2016 Ruotsissa pieni jätessäiliön tulipalo levisi läheiseen jätäkasaan noin 4000 m<sup>2</sup>:n alueelle, jolloin sammuttamiseen tarvittiin noin 200 palomiestä, 7000 tonnia hiekkaa ja 1000 tonnia kipsiä. Vuonna 2005 Tanskassa paalaamaton jätepolttoaine syttyi ja tuli levisi paalien varastointialueelle. Vesi ei tunkeutunut paaleihin ja puolen tunnin kuluttua palomiehet luovuttivat, koska lämpötila nousi niin korkeaksi, että vesi höyrystyi, mikä teki tehokkaan sammutustoiminnan mahdottomaksi. Lopulta tulen peittämiseen käytettiin hiekkaa. Vuonna 2020 Suomessa (Tampereella) paloi epäpuhdasta metalliromua sisältänyt rakennusjätäkasa [26], josta vapautui myrkyllisiä savukaasuja. Paikalle hälytettiin noin kymmenen palontorjuntayksikköä ja palanutta kasaa vartioitiin useita päiviä. Ympäröivältä alueelta evakuoitiin noin 350 ihmistä. Vuonna 2015 Isossa-Britanniasa (Hanbury) jätteet syttyivät muovien kierrätyslaitoksessa [27], ja paikallisia kehoitettiin sulkemaan ovet ja ikkunat, koska savu haisi voimakkaasti muoville. Vuonna 2013 Intiassa Brahmapuramin kiinteiden jätteiden käsittelylaitoksessa tapahtui muovijäte-

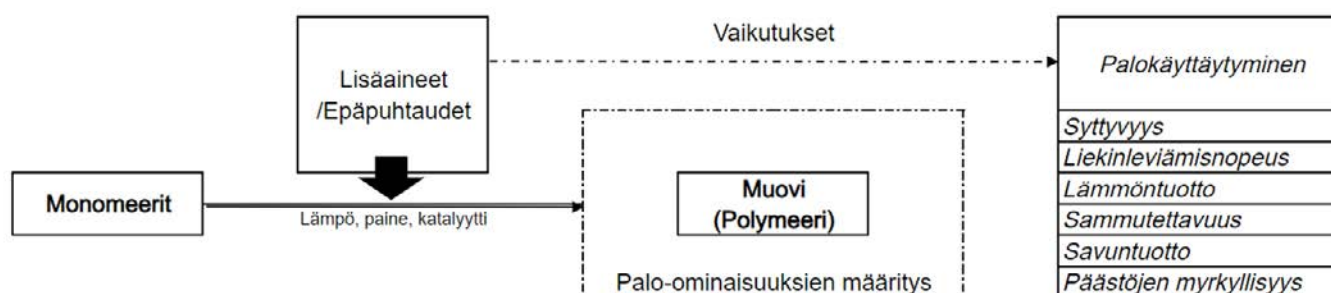
**"Palontorjuntaan tarvitaan suuria sammutusresursseja pitkäksi aikaa, palotuotteet ovat myrkyllisiä ja savu heikentää voimakkaasti näkyvyyttä."**

palo [28], jonka sammuttamiseen ja vartiointiin osallistui 30 palomiestä. Palontorjunnan kerrottiin olleen vaikeaa, koska paksu savu häikäisi näkyvyyttä ja tapahtui uudelleensyttyminen. Vuonna 2017 muovin kierrätyslaitos UK:ssa (Blackburn) syttyi tuleen [29]. Ihmiset evakuoitiin ja ovet ja ikkunat kehoitettiin pitämään kiinni. Savun katsottiin olevan luonteeltaan myrkyllistä ja syövyttävää, ja valunut vesi saattoi saastuttaa vesimuodostumia.

Edellä kuvatun perusteella jätepaloja on yleensä vaikea hallita, koska ne ovat erittäin suuria, tuottavat paljon lämpöä ja savua ja sammutusvettä on vaikea saada tunkeutumaan tulipesäkkeeseen. Palontorjuntaan tarvitaan suuria sammutusresursseja pitkäksi aikaa, palotuotteet ovat myrkyllisiä ja savu heikentää voimakkaasti näkyvyyttä. Uudelleen syttyminen on myös tyypillistä, jolloin palontorjunta on aloitettava uudelleen. Toisinaan ympäröivän alueen ihmisiä joudutaan evakuoimaan ympäristöön leviävien savukaasujen vuoksi. Lisäksi sammutusvesi voi saastuttaa vesimuodostumia. Ottaen huomioon jätepalojen hallintaan liittyvät suuret haasteet, tulisi niiden torjunnan suunnitteluun ja sopivan lähestymistavan valintaan kiinnittää erityistä huomiota. Taulukossa 2 esitetään Norjan, Ruotsin ja Suomen jätepaloja koskevia tietoja vuosilta 2016–2018 [24, 25, 30]. Voidaan todeta, että jätepalojen torjunnan vaikeuden vuoksi 38 tulipalotapahtumaa, joihin liittyy yli 15 m<sup>3</sup> materiaalia, on Suomessa huomattava määrä tapahtumia vuodessa.

### Palon luonne ja haasteet

Yleensä jätékasan paloilmiot luokitellaan ”sisältä-ulos” ja ”ulkoasisään” -palomiseksi, koska lämpötilan kehitys tapausten välillä on hyvin erilainen. Kun palo alkaa sisältä (itsestään lämpenevä, litiumakku), sen kehittyminen ja näkyminen vie aikaa, palo ehtii kehittyä pahaksi, palopesäketä on vaikea löytää ja siihen on vai-



Kuva 2. Muovin keskeisten palo-ominaisuuksien arviointi (viitteen [27] mukaan).

Lähde	Norja	Ruotsi	Suomi	Huomiot
[32]	141 hälytystä jätekeskuksista vuosina 2016–18			
[32]		Noin 60 raportoitua paloa vuodessa jätekeskuksissa vuosina 2016–18		
[33]		Ruotsin pelastuslaitos raportoi vuodessa 70–80 kaatopaikkapaloa, joiden koko on 500–2000 m <sup>2</sup>		
[38]			390 paloa vuonna 2017	Jäte- tai kierrätysmateriaalia <b>alle</b> 15 m <sup>3</sup> .
			38 paloa vuonna 2017	Jäte- tai kierrätysmateriaalia <b>yli</b> 15 m <sup>3</sup> .

Taulukko 2. Jätepalotiedot (Norja, Ruotsi ja Suomi).

kea saada vettä, mikä vaikeuttaa sammuttamista. Tilanne on toinen, kun palo alkaa ulkopinnalta, ja hiiltymisen voi estää palon jatkumisen. Palopesäkkeet on tällaisessa tulipalossa helppo paikallistaa verrattuna sisältä-ulos-paloon. Muutamissa kokeissa on havaittu, että muovipalo tuottaa hyvin korkeita lämpötiloja. WISH-foorumien raportissa [31] kuvatuissa kokeissa muovikasan palo aiheutti yli 1200 °C:n lämpötilan, kun muiden jätekasojen paloissa lämpötila jäi 950 °C:een. Muovipalon korkea lämpötila on mainittu myös muissa lähteissä [32, 33]. Korkea lämpötila voi aiheuttaa haihtuvien yhdisteiden hajoamisen, jolloin syntyy tiheää mustaa savua. Johtuen erittäin korkeista lämpötiloista ja tiheän savun päästöistä muovijätepalon torjunnan voidaan todeta olevan vielä vaikeampaa kuin muiden jätteiden palon, ja muovijätteen paloa voidaan pitää suurena paloriskinä [32].

Muovijätepaloon liittyvät riskit tulisi ottaa huomioon esim. rajoittamalla muovijätevarastojen kokoa ja pitämällä ne erillään toisistaan, mikä rajoittaisi palon leviämistä varastosta toiseen. Palon leviäminen voi tapahtua joko säteilylämmön vaikutuksesta tai sulan muovin virtauksen välityksellä. Sprinklereiden sammutustehokkuus on kyseenalaista, koska veden pääsy palopesäkkeeseen on epävarmaa, mutta ne voivat kuitenkin jäähdyttää viereisiä varastoja ja vähentää niiden syttymisen mahdollisuutta. Saastuneen veden valuminen ympäristöön tulisi estää. Tiheän ja myrkyllisen savun muodostumisen mahdollisuus aiheuttaa haasteita sekä sisä- että ulko-varastointiin. Sisätiloissa on oltava asianmukainen savun- ja lämmönhallintajärjestelmä, jotta turvallinen evakuointi ja palontorjunta ovat mahdollisia. Ulkona tuuliolosuhteet voivat vaikeuttaa palontorjuntaa ja edellyttää ihmisten evakuoinnin lähialueelta. Kaikki edellä mainitut huolenaiheet tulee palotutkimuksessa ottaa huomioon, ja ainakin seuraavat asiat olisi tehtävä, määritettävä tai tutkittava:

- Arvio muovijätteen lämpöarvosta (MJ/kg)
- Arvio palamisnopeudesta (kg/s)
- Syttymisen ja liekin leviämisen riski
- Palamistuotteet: CO, noki, muut myrkylliset päästöt
- Muut termisen ominaisuudet: lämmönjohtavuus, ominaislämpö, tiheys jne.
- Tärkeimpänä: Paloteho eli lämmönvapautumisnopeus ajan suhteen

Tavoitteesta riippuen testejä voitaisiin tehdä pienessä tai keski-suudessa mittakaavassa. Tällä perusteella voitaisiin tehdä palosimulointeja jätemuovivarastojen erilaisten järjestelyjen ja tulipalon vaikutusten tutkimiseksi sisä- tai ulkotiloissa tuulen vaikutukset huomioiden.

## YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kierrätettävien muovien palo-ominaisuuksien arviointi on haastavaa, koska kerätyt muovit voivat käsittää monia muovityyppejä, jotka hajoavat termisesti eri tavoin, mikä vaikuttaa palon kehitykseen ja hajoamistuotteiden muodostumiseen. Lisäksi muoveista löytyy lisäaineita ja epäpuhtauksia, jotka myös vaikuttavat em. ominaisuuksiin. Kuitenkin olisi tärkeää kiinnittää erityistä huomiota jätemuovivarastojen suunnitteluun ja niihin liittyvien paloriskien ehkäisyyn, sekä sammutusmenetelmien suunnitteluun ja kehittämiseen. Muovijätteen paloa voidaan pitää suurena paloriskinä.

## LÄHDELUETTELO

1. Eskelinen, H., Haavisto, T., Salmenperä, H. & Dahlbo, H. Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet. CLIC Innovation OY. Raportti nro D4.1-3. Helsinki 2016. 58 s. ISBN 978-952-5947-90-8.
2. Salminen, J., Turunen, T. & Fjäder, P. Muistio kansallisten EoW-menettelyiden mahdollisuuksista mekaanisen muovinkierrätyksen edistämiseksi. Ympäristöministeriö, 12.6.2020. 17 s.
3. Ympäristöministeriö. Jätelain uudistus etenee – erilliskeräyksen laajeneminen vauhdittaa kiertotaloutta. Ympäristöministeriön tiedote 30.11.2020. 1 s.
4. Rinne, T., Hykkylä, H., Tillander, K., Jantti, J., Väisänen, T., Yli-Pirilä, P., Nuutinen, I. & Ruuskanen, J. Jätekeskusten paloturvallisuus – Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2457. 125 s. + liitt. 39 s. ISBN 978-951-38-7250-2.
5. Suomen Uusiomuovi Oy. <http://www.uusiomuovi.fi/> [Luettu 16.2.2021]
6. Suomen Pakkauskierrätys RINKI Oy. <https://rinkiin.fi/> [Luettu 22.2.2021]
7. Suomen Kiertovoima RY. <https://kivo.fi/> [Luettu 22.2.2021] ▶

- 8. Airikkala, M. Development of Fire Safety in Landfill Sites, Case Jätekuukko Ltd. (Jätekeskusten paloturvallisuus – Case Jätekuukko Oy), SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES. 2019.
9. Fortum. <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/fortum-recyclingwaste/riihimaanen-laitosalue> [Luettu 22.2.2021]
10. Suomen palautuspakkaus OY. <https://www.palpa.fi/> [Luettu 22.2.2021]
11. Pramia Plastic Oy. <https://www.pramiaplastic.fi/> [Luettu 16.2.2021]
12. Uusiouutiset. Muovipakkausjätettä joudutaan viemään ulkomaille kierrätettäväksi. 1.3.2020. <https://www.uusiouutiset.fi/muovipakkausjätettä-joudutaan-viemaan-ulkomaille-kierratettäväksi/> [Luettu 23.4.2021]
13. Laine-Ylijoki, J., zu Castell-Rüdenhausen, M., Kaartinen, T., Kärki, J., Pellikka, T., Punkkinen, H., Saastamoinen, H., Wahlström, M. & Pohjakallio, M. Selvitys eräiden jätteiden ja rejektien käsittelykapasiteetin sekä muutaman jäteperäisen materiaalin markkinan tilanteesta Suomessa, Ympäristöministeriön raportteja 21/2018. ISBN: 978-952-11-4812-5 (PDF)
14. Merta, E., Mroueh, U-M., Meinander, M., Punkkinen, H., Vähä-Nissi, M., & Kortet, S. (2012). Muovipakkausten kierrätyksen edistäminen Suomessa. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-01728-12 [http://www.tem.fi/files/32830/11\\_2012\\_muovipakkauksen\\_kierrätyksen\\_edistaminen\\_suomessa.pdf](http://www.tem.fi/files/32830/11_2012_muovipakkauksen_kierrätyksen_edistaminen_suomessa.pdf)
15. Mancini, S. D., Schwartzman, J. A. S., Nogueira, A. R., Kago-hara, D. A. & Za-nin, M. Additional steps in mechanical recycling of PET. *Journal of Cleaner Production* 18: 92–100. 2010.
16. Harper, C. *Handbook of Plastics Technologies: The complete guide to properties and performance*, New York 2006, McGraw-Hill. ISBN: 9780071460682.
17. Nxumalo, S. M., Mabaso, S. D., Mamba, S. F. & Singwane, S. S. Plastic waste management practices in the rural areas of Eswatini, Elsevier, *Social Sciences & Humanities Open* 2, 2020.
18. Foster, S. WRAP. Domestic Mixed Plastics Packaging Waste Options. Final Project Report. June 2008. ISBN: 1-84405-396-2.
19. Witkowski A., Stec A. & Hull T. A. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Thermal Decomposition of Polymeric Materials*, 5th Ed., Springer, 2016, pp. 167–254.
20. Stenmarck, A., Belleza, E. L., Fråne, A., Busch, N., Larsen, A. & Wahlström, M. Hazardous substances in plastics – ways to increase recycling, IVL Swedish Environmental Research Institute, Report number C 233, 2017.
21. Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnella, P. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling, Elsevier, *Journal of Hazardous Materials* 344, 2018, pp. 179–199.
22. Chacon, F. A., Brouwer, M. T., Thoden van Velzen, E. U. & Smeding, I. W. A first assessment of the impact of impurities in PP and PE recycled plastics, Wageningen University & Research: Wageningen Food & Biobased Research, Public Report 2030, 2020.
23. Thoden van Velzen, E. U., Chu, S., C F. A., Brouwer, M. T. & Molenveld, K. The impact of impurities on the mechanical properties of recycled polyethylene, Wiley, *Packaging Technology and Science*, 2020, DOI: 10.1002/pts.2551.
24. Mikalsen, R. F., Lönnermark, A., Glansberg, K., McNamee, M. & Storesund, K. Fires in waste facilities: Challenges and solutions from a Scandinavian perspective, *Fire Safety Journal*, Volume 120, 2021.
25. Stenis, J. & Hogland W. Fire in waste-fuel stores: risk management and estimation of real cost, Springer, *Mater Cycles Waste Manag* 13, 2011, pp. 247–258
26. [https://yle.fi/uutiset/osasto/news/tampere\\_evacuates\\_350\\_residents\\_over\\_hazardous\\_waste\\_fire/11345970](https://yle.fi/uutiset/osasto/news/tampere_evacuates_350_residents_over_hazardous_waste_fire/11345970) [Luettu 12.01.2021]
27. <https://www.bbc.com/news/uk-england-stoke-staffordshire-38878262> [Luettu 12.01.2021]
28. <https://www.thehindu.com/news/cities/Kochi/plastic-waste-catches-fire-at-brahmapuram/article4419738.ece> [Luettu 12.01.2021]
29. <https://news.sky.com/story/fire-at-recycling-plant-in-blackburn-engulfs-100-tons-of-plastic-10999166> [Luettu 12.01.2021]
30. Ketola, J. & Kokki, E. Finnish Rescue Services' Pocket Statistics 2013–2017, Emergency Services College Publication, D-series: Other 3, 2018.
31. Waste Industry Safety And Health Forum (WISH) Report: Reducing Fire Risk at Waste Management Sites, 2017.
32. Fire safety in waste facilities, Fire and Rescue NSW, Community Safety Directorate, Fire Safety Branch, D17/81582, 2020.
33. LANDFILL FIRES THEIR MAGNITUDE, CHARACTERISTICS, AND MITIGATION, Federal Emergency Management Agency, United States, Fire Administration National Fire Data Center, TriData Corporation, FA-225, 2002.



# Pelastajan työvälineet ja suojarusteet metsäpaloissa

## Tiivistelmä

Hanke koostui kolmesta tutkimusosioista, joista ensimmäisessä sammuttajien lämpökuormitusta mitattiin laboratorio-olosuhteissa heidän käyttäessään palopukua (EN 469) ja kolmea erilaista metsäpalopukua (EN 15614). Toisessa osiossa keskityttiin heidän hengitystiealtistumiseen simuloiden metsäpalon sammutusta metsänkulotuksissa. Kolmanteen tutkimusosuuteen sammuttajat varustettiin parannetulla suojauskella, jota verrattiin perinteiseen suojautumiseen. Heidän lämpökuormitusta mitattiin syvälämpötilan, ihon lämpötilan, hikoilun ja sykevaihdelun avulla. Sammuttajien hengitystie-, iho- ja kokonaisaltistumista mitattiin työhygieenisiin mittausten menetelmin. Palopuku osoittautui lämpökuormittavimmaksi osoittaen sammuttajilla korkeampia syvä- ja iholämpötiloja sekä korkeampaa sydämen sykintänopeutta kuin metsäpalopukua. Lisäksi hikoilu oli merkittävästi korkeampaa. Sammuttajien hengitysvyöhykkeeltä mitatut akroleiini-, formaldehydi- ja hiilimonoksidipitoisuudet sekä hengittävän pölyn pitoisuus, osoittivat merkittävää altistumista. Parannettu suojaustaso metsäpaloradalla vähensi sammuttajien lämpökuormittavuutta, ihoaltistumista jalkojen osalta 90 prosenttia ja rinnan sekä selän osalta 70 prosenttia verrattuna perinteiseen suojaustasoon. Lisäksi sammuttajien kokonaisaltistumisessa oli merkittävä ero parannetun suojauksen eduksi.

## TAUSTA

Metsäpalot ovat luonteeltaan pitkäkestoisia, jolloin työmenetelmien ja sammuttajien suojarusteiden kehittäminen ovat ensiarvoisen tärkeitä sammuttajien altistumisen ja heidän työn kuormittavuuden vähentämisessä. Metsä- ja maastopalojen sammuttaminen on edelleen fyysisiä töitä, eikä niiden luonne ole juurikaan muuttunut viimeisten vuosikymmenten aikana. Myöskään varusteissa ei ole havaittu kehittymistä, sillä pelastustoimella käytössä olevat hengityksensuojaimet, paineilmalaitteet, on kehitetty huoneistopalojen näkökulmasta ja ne sopivat huonosti maasto-

paloihin. Näin ollen esimerkiksi hengityksensuojaimia käytetään hyvin vähän maastopaloissa [1]. Kun maastopalot lisääntyvät turvallisuudessa, myös pelastushenkilöstön altistuminen lisääntyy. Sammuttajat altistuvat sammutustöissä hapenkuljetusta estävälle yhdisteille [2], ärsyttävälle kaasulle [3], ja pitkäaikaisvaikutuksia aiheuttaville aineille, kuten syöpäsairauden vaaraa aiheuttavat aineet [4–5]. Aineiden vaikutuksista sammuttajien terveyteen on saatu viitteitä pohjoismaisessa syöpätutkimuksessa, joissa heillä todettiin vähintään kaksinkertainen eturauhassyövän, keuhkojen adenokarsinooman ja asbestin aiheuttaman keuhkopussisyövän ilmaantuvuus muuhun väestöön verrattuna [6]. Epäpuhtaudet kulkeutuvat palomiesten elimistöön hengitysteiden, ihon ja ruuansulatuselimistön kautta [7–8]. Etenkin metsäpaloissa altistuminen kaikkien altistumisreittien kautta on todellisuutta ja lisäksi metsäpalojen pitkät sammutusajat ja haasteet sammuttajien huollon järjestämiselle, entisestään lisäävät altistumista [2 ja 9–10]. Hankkeemme kärkenä oli löytää tarkoituksenmukaisimmat suojarusteet metsäpaloissa syntyviä epäpuhtauksia ja lämpökuormaa vastaan. Tavoitteenamme oli myös löytää palopuku, joka suojaa ihoaltistumiselta, mutta on kuitenkin niin hengittävä, että sammuttaja ei uuvu lämpökuorman alla.

## AINEISTO

**Ensimmäisessä tutkimusosassa** verrattiin kolmen metsäpalopuvun (S-Gard Ranger 2.0, Texport Wildland ja Rosenbauer THK D) ja Vikingin palopuvun lämpökuormittavuutta laboratorioissa. Testiradan kuormittavuus säädettiin toistojen avulla kullekin testihenkilölle metsäpalon sammuttamista vastaavalle tasolle. Kokeeseen osallistui neljän testihenkilön ryhmä, jotka testasivat neljän eri puvun lämpökuormittavuutta neljänä eri päivänä. Neljän testattavan palopuvun testausjärjestys suunniteltiin siten, että kutakin testattiin yhtä monta kertaa ensimmäisenä, toisena, kolmantena ja neljäntenä testipäivänä. Testihenkilöiden muu varustus oli ►

▶ pitkähihainen ja -lahkeinen tekninen alusasu, kevyt kypärä, työkalineet ja varsikengät. Testin kesto oli 60 minuuttia ja yhteensä testejä oli 16 kappaletta.

**Toisessa tutkimusvaiheessa** tutkittiin erityisesti hengitystiealtistumista metsänhoidollisissa kulutuksissa Pieksämäellä ja Kuhmossa simuloiden metsäpalon sammutusta. Kokeeseen osallistui neljän sammuttajan ryhmä, jotka testasivat kolmea metsäpalopukua ja yhtä palopukua neljänä eri päivänä. Neljän testattavan puun testausjärjestys harmonisoitiin samalla tavalla kuin laboratoriotesteissä. Erona laboratoriotesteihin oli, että palopukua käyttäneellä sammuttajalla oli lyhyt alusasu sekä t-paita ja hän ei käyttänyt lainkaan palotakkia. Lisäksi sammuttajat käyttivät puhallinvusteista hengityksensuojainta, joka oli varustettu A2B2E2K2-P3-yhdistelmäsuodattimella. Testin kesto oli 240 minuuttia ja yhteensä testejä kertyi 16 kappaletta.

**Kolmannessa tutkimusvaiheessa** mitattiin parannetulla suojauksella ja perinteisellä tavalla suojautuneen sammuttajan altistumista Pelastusopiston harjoitusalueelle rakennetulla metsäpaloradalla. Siirtovarvikko radalle tuotiin Suomussalmelta. Mukana oli kahdeksan sammuttajaa, jotka tekivät pareina sammutustyötä. Ensimmäisessä testissä toinen sammutusparista käytti parannettua suojausta, joka sisälsi metsäpalopuvun, pitkähihaisen ja lahkeisen teknisen alusasan, puhallinvusteisen hengityksensuojaimen varustettuna silmät suojaavalla maskilla ja yhdistelmäsuodattimella. Lisäksi heillä oli liian korkeista hiilimonoksidipitoisuuksista varoitava ilmaisin. Toinen parista käytti perinteistä suojausta, joka sisälsi palopuvun ja lyhyet alusvaatteet. Muut suojavarusteet olivat tutkimusosion yksi mukaisia. Toisessa testissä osat vaihtuivat. Testin kesto oli 120 minuuttia ja yhteensä testejä kertyi 16 kappaletta.

## MENETELMÄT

**Tutkimuksen ensimmäisessä** vaiheessa koehenkilöiden lämpötasapainoa ja kuumakuormittumista arvioitiin mittaamalla sammuttajien iholämpötilaa viidellä lämpötila-anturilla (Temperature/humidity logger DS1923, Thermochron iButton) lavasta, rintakehästä, olkavarresta, reidestä ja pohkeesta [11]. Lisäksi elimistön syvälämpötilaa mitattiin nielaistavalla lämpötilakapselilla (e-Celsius, BodyCap), joka lähetti lämpötila-arvot kehon lähellä pidettävään tiedonkeräysyksikköön (eViewer, BodyCap) [12]. Sydämen sykettä mitattiin sykemittarilla (Vantage M, Polar). Hikoilun määrää sekä vaatekukseen kerääntyneen kosteuden ja kehosta haihtuneen kosteuden määrää arvioitiin punnitsemalla koehenkilö ja hänen varusteet ennen altistusta ja heti altistuksen jälkeen. Lisäksi nautitun juoman määrä testin aikana kirjattiin [13–15]. Koehenkilön rinnasta mitattiin vaatekerrosten välistä suhteellista kosteutta pienillä tiedonkeräysyksiköillä (DS1923, Thermochron iButton). Ympäristön lämpöolosuhteet mitattiin lämpötilalaitteella (QUESTemp° 36, Quest® Technologies), joka mittasi märkä-, kuiva- (=ilman) ja säteilylämpötilaa, ja laski myös WBGT-indeksiin. Lisäksi sammuttajilta kysyttiin arvio lämpötuntemuksesta testin aikana.

**Tutkimuksen toisessa vaiheessa** sammuttajien potentiaalista hengitystiealtistumista mitattiin haihtuville orgaanisille yhdisteille 3520-diffuusiokeräimellä (3M), jotka analysoitiin kaasukromatografisesti [16]. Aldehydeille altistumista mitattiin UMEX-100-diffuusiokeräimellä (SKC), jotka analysoitiin nestekromatografisesti. Hengitystiealtistumista hiukkasmaisille ja kaasumaisille PAH-yhdisteille mitattiin aktiivisella keräyksellä ja näytteet analysoitiin kaasukromatografisesti massaselektiivisellä detektorilla [17]. Sammuttajien altistumista hengittävälle pölylle, sen sisältäville alkuaineille ja cesium 137:lle mitattiin IOM-keräimen avulla. Hengittävä pöly analysoitiin gravimetrisesti, alkuaineet ICP-tekniikalla ja cesium 137 gammaspektrometrisellä mittauksella.

Hiilimonoksidille altistumista mitattiin sammuttajien hengitysvyöhykkeeltä testin aikana suoraan osoittavalla hiilimonoksidimittarilla PAC 6500 (Dräger).

Sammuttajien ihoaltistumista mitattiin ihokeräimillä heidän rinnasta, selästä, reidestä ja säärestä ja niskasta [8]. Näytteistä analysoitiin polysykliset aromaattiset hiilivedyt GC-MS -tekniikalla.

Sammuttajien kokonaisaltistumista PAH-yhdisteille arvioitiin virtsan 2-naftolin ja 1-pyrenolin avulla, jotka analysoitiin HPLC/FLD-tekniikalla [17]. Virtsanäytteitä kerättiin ennen altistumista, heti altistumisen jälkeen ja kuusi tuntia altistumisen päättymisestä [8]. Bentseenille altistumista mitattiin virtsan S-fenyylimerkaptuurihapon avulla heti altistumisen jälkeen ja näytteet analysoitiin nestekromatografisesti [18]. Kokonaisaltistumista hiilimonoksidille mitattiin verestä ja uloshengitysilma- välttömästi altistumisen päättymisen jälkeen. Uloshengitysilman mittaukset tehtiin hiilimonoksidimittarilla PAC 6500 (Dräger), johon oli liitetty Drägerin toimittama uloshengitysmittauskenno ja puhallusputki [19]. Putkeen puhallettiin 30 sekuntia. Tämän lisäksi sammuttajien häkähemoglobiinipitoisuus mitattiin tunnin sisällä altistumisen päättymisestä ja verinäyte analysoitiin spektrofotometrisesti [20]. Lämpökuormitusta mitattiin myös samalla tavalla kuten tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessakin.

**Kolmannessa tutkimusvaiheessa** mitattiin kahdeksan parannetulla ja kahdeksan perinteisellä tavalla suojautuneen sammuttajan altistumista Pelastusopiston harjoitusalueelle rakennetulla metsäpaloradalla. Altistumis- ja lämpökuormitusmittaukset tehtiin samalla tavalla kuten tutkimuksen toisessa osuudessa.

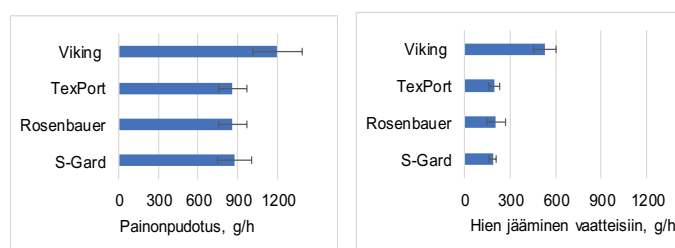
## TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

### Lämpökuormittuminen

**Tutkimusosiossa yksi** laboratoriossa ilman lämpötila radan varrella oli 21–23 °C ja suhteellinen kosteus oli noin 15 %. Koehenkilön hikoilun kokonaismäärää arvioitiin hänen painon alenemasta, joka oli noin 800–1200 grammaa tunnissa. Keskimääräinen painonpudotus ja kosteuden kertyminen vaatteisiin oli suurinta Vikingin palopukua käytettäessä (kuva 1). Kosteuden kertyminen sitä käytettäessä oli noin kaksin- tai kolminkertainen metsäpalopukuihin verrattuna.

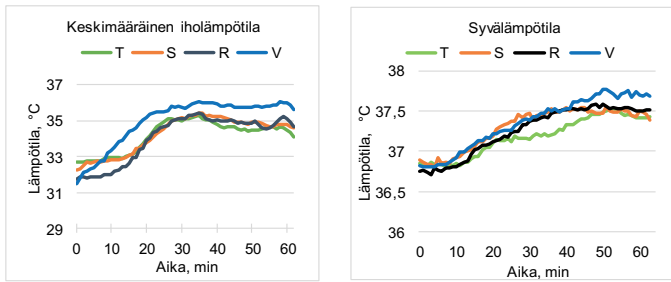
Paikallisista iholämpötiloista laskettu keskimääräinen iholämpötila nousi 30 minuutin testin jälkeen 35 °C:een metsäpalopuvuissa ja 36 °C:een palopuvussa (kuva 2). Metsäpalopukujen välillä ei ollut eroa. Elimistön syvälämpötila saavutti 37,5° C:een noin 35 minuutissa metsäpalopuvuissa (kuva 2) ja syvälämpötila nousi palopuvussa noin 0,25 °C korkeammalle kuin metsäpalopuvuissa. Koettu lämpötuntemus tehtävien aikana oli korkein palopuvussa ja matalin Texportin metsäpalopuvulla.

Suhteellinen kosteus vaatekerrosten välissä lisääntyi tehtäväradan suorituksen aikana. Texportin metsäpalopuvussa aluspaita

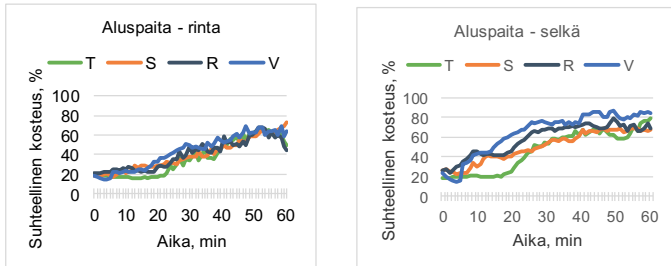


Kuva 1. Koehenkilöiden keskimääräinen hikoilu ja vaatteisiin sitoutunut kosteus (grammaa tunnissa), T = Texport, S = S-GARD, R = Rosenbauer ja V = Viking palopuvut tutkimusosiossa yksi.

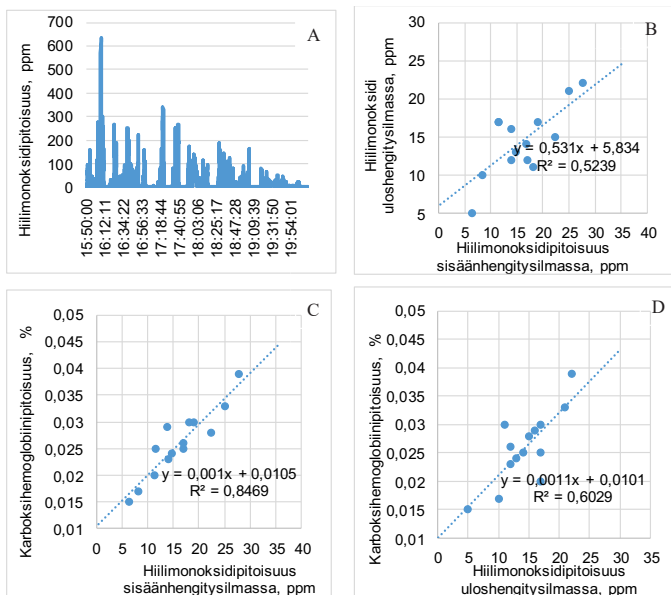




Kuva 2. Koehenkilöiden keskimääräinen ihon lämpötila ja syvälämpötila erilaisilla palopuvuilla tutkimusosiossa yksi, T = Texport, S = S-GARD, R = Rosenbauer ja V = Viking



Kuva 3. Suhteellisen kosteuden lisääntyminen vaatekerrosten välissä tehtäväradan suorittamisen aikana rinnassa ja selässä tutkimusosiossa yksi.



Kuva 4. Screenshotit tutkimusosiossa 2. Screenshotit hiilimonoksidipitoisuus hengitysvyöhykkeellä (A), uloshengitysilman vastaavuus keskimääräiseen hengitystiealtistumiseen (B), veren karboksihemoglobiinipitoisuuden vastaavuus keskimääräiseen hengitystiealtistumiseen (C) ja karboksihemoglobiinipitoisuuden vastaavuus uloshengitysilman hiilimonoksidipitoisuuteen (D) tutkimusosiossa 2.

selän puolella pysyi noin 25 minuuttia kuivana (suhteellinen kosteus < 40 %), sen sijaan Vikingin palopuku, S-Gardin ja Rosenbauerin metsäpalopuvut saavuttivat 40 %:n kosteuden noin 8–11 minuutissa (kuva 3).

Keskimääräiset sydämen syketaajuudet olivat tutkimusosio yhden aikana korkeimpia kaikilla koehenkilöillä käytettäessä Vikingin palopukua verrattuna metsäpalopukuihin.

**Tutkimusosiossa kaksi** lämpökuormitusten vertailu erilaisilla palopuvuilla oli erittäin vaikeaa vaihtelevien testausolosuhteiden takia.

**Tutkimusosiossa kolme** hyvin kontrolloidulla metsäpaloradalla saimme samansuuntaisia tuloksia kuin tutkimusosiossa 1. Keskimääräinen hikoilu metsäpalopuvuilla oli 500–650 grammaa tunnissa ja palopuvulla mitattiin lievästi korkeampi määrä, vaikka sammuttajilla oli lyhyet alusvaatteet. Hikoilusta vaateetukseen tiivistyi eniten kosteutta palopuvulla työskennellessä, 200 grammaa tunnissa. Metsäpalopuvuilla määrä oli alle 80 grammaa tunnissa. Myös vaatekerroksen sisällä ollut suhteellinen kosteus oli pienempi metsäpalopuvuilla, kuin palopuvulla.

### Hengitystiealtistuminen metsänhoidollisissa kulotuksissa

**Tutkimusosiossa kaksi** mitattiin sammuttajien kemiallista altistumista metsänhoidollisissa kulotuksissa. Heidän keskimääräinen hengitystiealtistuminen hiilimonoksidille metsäpalosammutustehävien aikana oli 16 ppm, joka on 80 % hiilimonoksidin kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnetusta pitoisuudesta 20 ppm [21]. Kuvassa 4 on esitetty yhden sammuttajan altistumisen vaihtelu testijakson aikana (kuva 4A). Hiilimonoksidille on annettu myös viidentoista minuutin raja-arvo 75 ppm, jonka saa ylittää vain kerran tunnissa. Ylityksiä testin aikana tuli paljon enemmän. Nämä tulokset osoittivat sammuttajien merkittävää altistumista hiilimonoksidille metsäpaloissa. Kuvassa 4B on esitetty sammuttajien heti altistumisen jälkeen mitattu uloshengitysilman hiilimonoksidipitoisuus, jota on verrattu heidän keskimääräiseen hengitystiealtistumiseen testin aikana. Tulokset osoittivat kohtuullista vastaavuutta,  $R^2=0,5239$ . Edellä mainittuja tuloksia verrattiin myös verestä mitattuihin karboksihemoglobiinipitoisuuksiin (4C ja 4D). Vertailu osoitti erinomaisesta vastaavuutta keskimääräisiin hengitystiealtistumismittauksiin  $R^2=0,8469$  ja kohtuullista vastaavuutta uloshengitysilman tuloksiin  $R^2=0,6029$ . Kaikki mitatut karboksihemoglobiinipitoisuudet olivat yli altistumattoman väestön viiterajan (0,015 %) ja korkeimmat tulokset olivat lähellä hiilimonoksidin toimenpiderajaa (0,040 %), osoittaen myös merkittävää altistumista hiilimonoksidille.

Sammuttajat altistuivat sammuttamisen aikana myös hengitysväylälle pölylle. Suurimmat hengittävän pölyn pitoisuudet mitattiin Pieksämäellä metsänhoidollisissa kulotuksissa, jossa pitoisuudet olivat 1,7-, testiradalla 0,94- ja Kuhmassa saaren kulotuksessa 0,74-kertaisia hengittävän pölyn kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnettuun pitoisuuteen nähden, osoittaen merkittävää altistumista (kuva 5A) [21].

Hengittävästä pölystä määritettiin 36 erilaista alkuainetta ja työhygieenisesti tärkein niistä oli hermostomyrkyllinen mangaani, jonka hengittävän pölyn pitoisuus oli 10 % sen kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnetusta pitoisuudesta [21]. Hengittävästä pölystä mitattiin myös radioaktiivisuutta (Cesium 137), joka on peräisin Tshernobylin ydinlaskeumasta. Säteilyturvakeskukseen mukaan kulotettavasta alueista suurimman laskeuman oli saanut Pieksämäki (taso 5) seuraavaksi Kuhmo (taso 2) ja kolmanneksi Suomussalmi (taso 1). Suurimmat radioaktiivisuudet sammuttajien hengitysvyöhykkeeltä mitattiin Peksämäeltä, jossa ne olivat 11000–18000-kertaisia Itä-Suomen normaaleihin taustapitoisuuksiin nähden. Korkeimmat pitoisuudet olivat kuitenkin vain 0,002 % Cesium 137:n radioaktiivisuuden toimenpidearvosta, joten terveydellistä vaaraa kulotus ei aiheutanut [22]. Kulotus kuitenkin nosti taustan radioaktiivisuutta merkittävästi.

Metsäpaloissa ärsyttävistä yhdisteistä tärkeimmät aldehydit olivat mahdollisesti syöpävaaraa aiheuttava akroleiini ja syöpävaarallinen formaldehydi. Niiden keskimääräiset pitoisuudet olivat 92 % ja 83 % niiden kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnetuista pitoisuuksista [21]. Aldehydien yhteenlaskettu ärsytysvaikutus oli 1,8-kertainen niiden haitalliseksi tunnettuun yhteispitoisuuteen verrattuna (kuva 5 B) [21].

▶ Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus oli suurimmillaan 50 % niiden hyvälle teollisuusilmalle annetusta yhteispitoisuusraja-arvosta 3000 µg/m<sup>3</sup>. Syöpävaarallisen bentseenin keskimääräinen pitoisuus oli 2,1 % sen kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnetusta pitoisuudesta [21].

Tutkimusosiossa kolme verrattiin parannettua suojaustehokkuutta perinteiseen tapaan suojautua ja mitattiin sammuttajien iho- ja kokonaisaltistumista. Ihoaltistuminen oli merkittävintä jaloissa, joiden altistumista parannettu suojaus vähensi 90 %. Rinna- ja selästä löydettiin PAH-yhdisteitä vähemmän ja parannettu suojaus pudotti altistumista 70 % (kuva 6 A ja B). Niskasta löytyi hieman vähemmän altistumista kuin yläkehosta.

Sammuttajien kokonaisaltistumista PAH-yhdisteille ja bentseenille mitattiin virtsanäytteistä. Virtsaasta mitattiin 1-pyrenolia ja S-fenyylimerkaptuurihappoa, jotka kuvaavat altistumista pyreeneille (PAH-yhdisteitä) ja bentseenille. Näiden molempien pitoisuudet olivat alle altistumattoman väestön, osoittaen vähäistä altistumista. Sen sijaan naftaleenin aineenvaihduntatuote 2-naftoli osoitti selvästi altistumista tapahtuneen. Heti altistumisen jälkeen mitatut pitoisuudet olivat perinteisellä suojauksella 190 % ja parannetulla suojauksella 110 % altistumattoman väestön raja-arvosta. Näin ollen parannettu suojaus laski altistumistasoa merkittävästi (kuva 6 C).

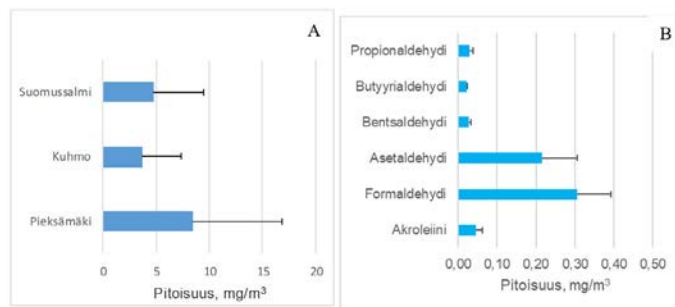
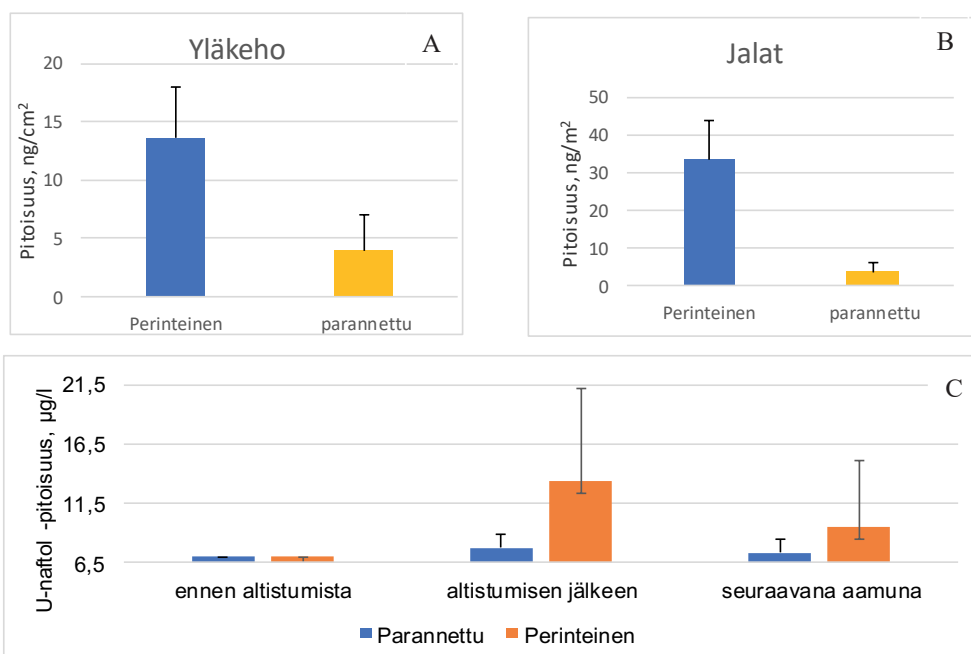
## SUOSITUKSET

Suosittelomme metsäpalopukua (EN 15614), pitkälahkeista ja -hihaista teknistä alusasua, kevyttä pelastuskypärää (EN 16471, EN 16473), työkasineita ja sammutussaappaita (EN 15090) metsäpalojen sammutukseen. Lisäksi suosittelemme puhallinavusteista hengityksensuojainta, jossa on silmät suojaava maski ja yhdistelmäsuodatin A2B2E2K2-P3. Hiilimonoksidivaaran tunnistamiseksi suosittelemme lisäksi hiilimonoksidi-ilmaisinta. Erityistä huomiota on kiinnitettävä pelastajien riittävään huoltoon ja peseytymismahdollisuuksiin. Lisäksi sammuttajien toimintakyvyn ja sijainnin reaaliaikaista seuranta on tärkeää tehdä puhelimitse tai käytettävissä olevien paikantimien avulla.

## KIITOKSET

Tutkimusryhmä kiittää eduskuntaa ja Palosuojelurahastoa hankkeen rahoituksesta.

Kuva 6. Sammuttajien iho- (A ja B) ja kokonaisaltistuminen (C) käytettäessä perinteistä ja parannettua suojausta tutkimusosiossa 3.



Kuva 5. Sammuttajien keskimääräinen altistuminen hengittyvälle pölylle (A) ja aldehydeille (B) tutkimusosiossa kaksi.

## LÄHDELUETTELO

- Holm S. 2015. Opinnäytetyö: Maastopaloissa käytettävä kalusto. Palopäällystön koulutusohjelma Savonia Ammattikorkeakoulu Tekniikka, Kuopio 10.5.2015.
- Domitrovich J., Broyles GA., Ottmar RD., Reinhardt TE, Naheer LP, Kleinman MT, Navarro KM, Mackay CE, Adetona O. 2017. Wildland fire smoke health effects on wildland firefighters and the public. Final Report JFSP Project ID:13-1-02.14, June 2017. <https://wildfiretoday.com/documents/FirefighterSmokeHealthRisk.pdf>
- Bolstad-Johnson, D.M., Burgess, J.L., Grutchfield, C.D., Storment, S., Gerkin, R., Wilson, J.R. 2000. Characterization of firefighters exposures during fire overhaul. American Industrial Hygiene Association Journal 61 (5), 636–641.
- IARC. 2010. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol. Painting, Firefighting, and Shiftwork. Firefighting 98, 397–451.
- Reinhardt, T., and Ottmar R. 2004. Baseline Measurements of Smoke Exposure Among Wildland Firefighters. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 1: 593–606 ISSN: 1545-9624 print / 1545-9632 online DOI: 10.1080/15459620490490101
- Pukkala, E., Martinsen, J., Weiderpass E., Kjaerheim, K., Lynge, E., Tryggvadottir, L., Sparén, P., Demers, P. 2014. Cancer incidence among firefighters: 45 years of follow-up in five Nordic countries. Occup Environ Med. 71(6):398–404. doi: 10.1136/occup-2013-101803.

7. Fent, KW., Eisenberg, J., Snawder, J., Sammons, D., Pleil, JD., Stiegel, MA., Mueller, C., Horn, GP., Dalton, J. 2014. Systemic exposure to PAHs and benzene in firefighters suppressing controlled structure fires. *Ann Occup Hyg.* 58(7):830–45. doi:10.1093/annhyg/meu036.

8. Laitinen J, Lindholm H, Aatamila M, Hyttinen S, Karisola P. 2016. Vähentääkö Skellefteå-malli palomiesten altistumista operatiivisessa toiminnassa. Raportti Palosuojelurahastolle ja Työsuojelurahastolle. Tietoa Työstä -sarja, Työterveyslaitos Helsinki. ISBN 978-952-261-644-9 (pdf), ISBN 978-952-261-645-6. <https://www.tsr.fi/valmiit-hankkeet/hanke?h=113080#materials>

9. Swedish Civil Contingencies Agency. 2015. Healthy firefighters-the Skellefteå Model improves the work environment. June 2015, ISBN:978-91-7383-570-1.

10. Instituut Fysieke Veiligheid 2018. Exposure to smoke. An overview report of the studies to the exposure routes, contamination and cleaning of the turn-out gear and the skin barrier function. Report to Brandweer Nederland from the Instituut Fysieke Veiligheid, Zoetermeer. <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20180821-IFV-Exposure-to-smoke.pdf>

11. van Marken Lichtenbelt WD1, Daanen HA, Wouters L, Fronczek R, Raymann RJ, Severens NM, Van Someren EJ. 2006. Evaluation of wireless determination of skin temperature using iButtons. *Physiol Behav.* Jul 30;88(4–5):489–97.

12. Towey C, Easton C, Simpson R, Pedlar C. Conventional and novel body temperature measurement during rest and exercise induced hyperthermia. 2017. *J Therm Biol.* Jan;63:124–130. doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.11.010.

13. Borg G. 1998. Borg's perceived exertion and pain scales, Human Kinetics, Champaign IL, USA.

14. ISO 9886. 2004. Evaluation of thermal strain by physiological measurements. International Organization for Standardization.

15. ISO 10551. 1995. Ergonomics of the thermal environment. Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. International Organization for Standardization.

16. ISO16000-6. 2004. Standard Indoor air – Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID.

17. Laitinen, J., Mäkelä, M., Mikkola, J., Huttu, I. 2010. Fire-fighting trainers' exposure carcinogenic agents in smoke diving simulators. *Toxicology Letters* 192, 61–65.

18. Mendes M, Silveira J, Andre L. 2017. An efficient analytical method for determination of S-phenylmercapturic acid in urine by HPLC fluorimetric detector to assessing benzene exposure. *Journal of Chromatography B.* Vol 1063:136–140.

19. Burgess JL, Brodtkin CA, Daniell WE, Pappas GP, Keifer MC, Stover BD, Edland SD, Barnhart S. 1999. Longitudinal decline in measured firefighter single-breath diffusing capacity of carbon monoxide values. A respiratory surveillance dilemma. *Am J Respir Crit Care Med.* 159:119–24.

20. Touger M., Birnbaum A., Wang J., Chou K., Pearson D., Bijur P. 2010. Performance of the RAD-57 Pulse Co-Oximometer Compared with Standard Laboratory Carboxyhemoglobin measurements. *Annals of Emergency Medicine.* 56(4):382–388.

21. Sosiaali- ja terveysministeriö. 2020. HTP-arvot 2020. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki 2020.

22. STUK, Suojelutoimet säteilyvaaratilanteessa, Ohje VAL1/1.9.2020, 2020. ISBN 978-952-309-472-7 (pdf). Säteilyturvakeskus, Helsinki.

# Pelastustieto

1/2021 PELASTUSTOIMEN, ENSIHOIDON JA VARAUTUMISEN MEDIA



**TULITÖISTÄ**  
syttyy liikaa tulipaloja

**MUONITUSKÄRRY**  
pelastaa pitkällä keikalla

**NYT YHTEISELLÄ VIESTINNÄLLÄ**  
pelastusalan ääni paremmin kuuluviin!

# Tilaa itsellesi tai lahjaksi

pelastustieto.fi/  
tilaa-lehti

# Liekin leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä

## Tiivistelmä

Kaapelit muodostavat merkittäviä palokuormia erilaisissa kohteissa, kuten ydinvoimaloissa, ja kaapelin tyypistä riippuen ne voivat levittää paloa hyvinkin voimakkaasti. Tässä tutkimuksessa perehdyttiin viimeaikaisiin tutkimustuloksiin kirjallisuuskatsauksen avulla sekä tutkittiin liekin leviämisen mallintamista virtauslaskennan keinoin. Termoplastisten PVC-pohjaisten kaapelien kokeellisesti määritetyissä liekin leviämisenopeuksissa oli jopa lähes kymmenkertaisia eroja toisiaan muistuttavien koeasetelmien välillä. Simuloinneissa liekin leviämistä tarkasteltiin yksittäisten hyllyjen syttymisaikojen sekä liekin leviämisenopeuksien kautta, ja simuloituja tuloksia verrattiin polttokokeista saatuihin arvoihin. Sekä tässä että muissa uusissa tutkimuksissa on saatu lupaavia tuloksia pyrolyysimalleihin perustuvilla laskentamenetelmillä, jotka vaativat lähtöarvoikseen vain pienmittakaavakokeiden tuloksia. Menetelmien kehittyessä laskennallista virtausmekaniikkaa voitaisiin mahdollisesti käyttää palon kehittymisen mallintamisen ympäristötekijät ja tapauskohtaiset yksityiskohdat huomioiden.

## JOHDANTO

Kaapelit muodostavat merkittäviä palokuormia erilaisissa kohteissa, kuten ydinvoimaloissa, ja kaapelin tyypistä riippuen ne voivat levittää paloa hyvinkin voimakkaasti. Tutkimustulokset kaapelien palokäyttäytymisestä täysmittakaavan polttokokeissa ovat merkittävästi lisääntyneet 2010- ja 2020-luvuilla. Kokeissa on havaittu, että liekin leviämisenopeuteen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä vaikuttavat esimerkiksi kaapelityyppi, kaapelien asettelutapa hyllyissä sekä ympäristöolosuhteet.

Termoplastisten polyvinyylikloridikaapelien (PVC-kaapeli) kokeellisesti määritetyissä liekin leviämisenopeuksissa on havaittavissa jopa kymmenkertaisia eroja toisiaan muistuttavien koeasetelmien välillä. McGrattanin ym. [1] toteuttamassa CHRISTIFIRE-projektissa tehtyjen kokeiden perusteella liekin keskimääräi-

seksi leviämisenopeudeksi termoplastisissa kaapeleissa määritettiin noin 0,74 millimetriä sekunnissa, kun taas Zavaletan ym. [2] PRISME 2 -projektin polttokokeiden analyysin perusteella liekin leviämisenopeus PVC-kaapeleissa oli alimmillaankin 2,7 ja enimmillään jopa 7,1 millimetriä sekunnissa. Analysoidut CHRISTIFIRE-projektin koeasetelmat koostuivat kolmesta neljään vaakasuuntaisesta tikashyllystä, kun taas PRISME 2 -projektin koeasetelmissa hyllyjä oli viisi. Lisäksi PRISME 2 -projektin koeasetelmassa hyllyt oli asetettu väliaikaista seinärakennelmaa vasten, kun taas CHRISTIFIRE-projektin koeasetelmissa hyllyjen lähetyillä ei ollut rakenteita. [1, 2]

Myös kaapelien asettelulla on vaikutuksensa palon kehittymiseen kaapelihyllyissä. Edellä mainituissa CHRISTIFIRE- ja PRISME 2 -projektien polttokokeissa kaapelit oli aseteltu hyllyihin väljästi, jolloin kuumat palokaasut pääsivät vapaasti nousemaan kaapeleiden lävitse. Asettelutavan vaikutusta ovat tutkineet esimerkiksi Siemon ym. [3] ja Huang ym. [4]. Heidän tulostensa perusteella on todettavissa, että mikäli kaapelit asetellaankin hyllyihin tiukasti, alimman hyllyn yläpuolella olevien hyllyjen syttyminen hidastuu. [3, 4]

Näiden lisäksi ympäristöolosuhteiden vaikutusta vaakasuuntaisten kaapelihyllyjen palamiseen on tutkittu. PRISME 2 -projektissa suoritettiin samoille kaapelihyllyasetelmille polttokokeita sekä avoimessa hallissa että koneellisesti ilmastoiduissa suljetussa huoneistossa. Koetuloksista on havaittavissa, että PVC-kaapelien palo saattaa aluksi kehittyä suljetussa huoneistoissa jopa nopeammin kuin avoimessa hallissa, vaikka enimmäispalotehot jäävätkin suljetuissa huoneistossa pienemmäksi hapenpuutteen takia. [5]

Kirjallisuustutkimuksen havaintojen pohjalta voidaan korostaa sitä, kuinka tärkeää on ymmärtää ympäristötekijöiden vaikutus palon käyttäytymiseen sekä ottaa ne huomioon palosta aiheutuvien riskien arvioimisessa. Koska polttokokeita voidaan tehdä vain rajatulle määrälle erilaisia koeasetelmia, erilaiset menetelmät

koetulosten hyödyntämiseksi testiolosuhteiden ulkopuolella ovat tärkeitä. Laskennallinen virtausmekaniikka (Computational Fluid Dynamics, CFD) on osoittautunut hyväksi menetelmäksi tarkastella sekä ympäristötekijöiden vaikutusta palon kehittymiseen että palon vaikutusta ympäristöönsä.

CHRISTIFIRE-projektissa ehdotettu niin kutsuttu FLASH-CAT -menetelmä [1] on otettu laajasti käyttöön vaaka-suuntaisten kaapelipalojen mallintamiseen. FLASH-CAT -menetelmässä oletetaan eri hyllyillä olevien kaapelien syttyvän ensin V-kuviossa ennalta määriteltynä ajanhetkinä, jonka jälkeen liekit etenevät hyllyissä tasaisella nopeudella. Menetelmän oletusparametrit on jaettu erikseen termoplastisista ja termoseteistä materiaaleista tehdyille kaapeleille. Zavaleta ym. [2] osoittivat että oletusparametrejä käyttämällä alkuperäinen menetelmä ei kykene ennustamaan palon kehitystä PRISME 2 -projektin polttokokeissa. He esittivät kuitenkin menetelmästä muunnellun version, joka pystyi mallintamaan palotehokäyrän kehittymisen yhdessä koetulosten perusteella määriteltujen parametrien kanssa [2]. FLASH-CAT -menetelmästä on esitetty myös useita muita muunneltuja versioita, esimerkiksi Bascou ym. [6] CFD-mallin ja Plumecocq ym. [7] kaksivyöhykemallin kanssa.

Kaapelihyllyjen palamista on mallinnettu myös käyttämällä pienmittakaavan koetuloksia. Beji ja Merci [8] käyttivät palon kehittymisen mallintamiseen kartiokalorimetrikokeen tuloksia niin, että CFD-mallissa materiaalin saavutettua sille tyypillisen syttymislämpötilan se paloi vastaavasti kuin näyte kartiokalorimetrikokeessa. Saadakseen simulointitulokset vastaamaan paremmin koetulosta, he kokeilivat myös materiaalin palokäyttäytymisen muuttamista mallissa [8]. Hehnen ym. [9] mallinsivat vaaka-suuntaisten kaapelihyllyjen palamista käyttäen kartiokalorimetrikokeen perusteella tehtyjä pyrolyysimalleja CFD-mallissa. Lisäksi he käyttivät kartiokalorimetrikoetulosta suoraan materiaalin palokäyttäytymisenä sekä FLASH-CAT -menetelmää [9].

Tässä tutkimuksessa liekin leviämistä vaaka-suuntaisessa kaapelihyllyssä tutkittiin laskennallisen virtausmekaniikan keinoin. Liekin leviämistä tarkasteltiin simuloinneissa yksittäisten hyllyjen syt-

tymisaikojen sekä liekin leviämisenopeuksien kautta, ja simuloituja tuloksia verrattiin polttokokeista saatuihin arvoihin. Tarkoituksena on tutkia, millä tarkkuudella liekin leviämistä voidaan mallintaa ilman että apuna käytetään täysmittakaavan polttokokeiden tuloksia. Suurin osa julkaistuista mallinnustavoista vaatii mallin kalibroimisen polttokoeatulosten avulla, mikä rajoittaa menetelmien käytettävyyttä tilanteissa, joissa polttokokeita ei ole tehty, ja joissa toisaalta simulaatiotuloksista olisi suurin hyöty.

## KAAPELIPALOSIMULOINNIT

### Tarkasteltu tapaus ja laskentamalli

Tutkimuksessa simuloitiin liekin leviämistä vaaka-suuntaisissa kaapelihyllyissä laskennallisen virtausmekaniikan ohjelman Fire Dynamics Simulator (FDS) avulla [10]. Virtauksia mallinnetaan ohjelmassa Navier-Stokes -yhtälöiden avulla. FDS hyödyntää suurten pyörteiden menetelmää (Large Eddy Simulation, LES) virtauksen turbulenssin mallintamiseen, ja se soveltuu käytettäväksi tapauksiin, joissa virtauksen Machin luku on alhainen. Ohjelman teoria on dokumentoitu kattavasti viitteessä [10].

Tutkimuksessa valittiin tarkasteltavaksi PRISME 2 -projektissa toteutettu polttokoe, jota projektissa kutsutaan nimellä CFSS-4. Kokeessa poltettiin viiden vaaka-suuntaisen kaapelihyllyn asetelma, jossa hyllyt olivat päällekkäin 30 senttimetrin etäisyydellä toisistaan. Hyllyt oli aseteltu väliaikaista seinärakennelmaa vasten, ja jokaisessa hyllyssä oli 44 PVC-kaapelia. Hyllyjen pituus oli 2,4 metriä ja leveys 0,45 metriä. Alin hylly sytytettiin keskeltä käyttäen propaanipoltinta, jonka teho oli 80 kW. [2, 5]

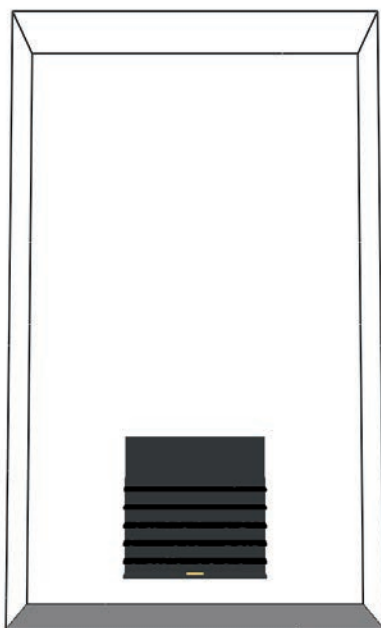
Kaapelihyllygeometria mallinnettiin FDS-ohjelmassa käyttäen 5 senttimetrin hilakokoa, mutta muualla kuin kaapelihyllyjen välittömässä läheisyydessä käytettiin 10 senttimetrin hilakokoa. Laskentahilan kopit olivat muodoltaan kuutioita. Laskenta-alueen leveys oli 2,4 metriä, pituus 6 metriä ja korkeus 10 metriä. Kaapelihyllyjen alle mallinnettiin betonilattia käyttäen materiaaliominaisuuksille tyypillisiä kirjallisuusarvoja. Simulaatioissa käytetty simulaatiogeometria ja laskenta-alue on esitetty kuvassa 1.

Kaapelihyllygeometrian luomiseen käytettiin VTT:llä kehitettyä stokastista menetelmää, jonka avulla voidaan mallintaa kaapelien satunnainen asettelu hyllyyn väljästi. Lopputuloksena saadaan arvio siitä, kuinka monta aukkoa tulee mallintaa muuten yhtenäiseen tasomaiseen geometriaan, jotta kaasujen virtaus kaapelien lävitse saadaan mallinnettua mahdollisimman tarkasti valitulla hilakoolla. CFSS-4 -kokeessa jokaiseen 0,45 metriä leveään hyllyyn oli aseteltu 44 PVC-kaapelia, joiden nimellinen halkaisija oli 14,5 millimetriä [5]. VTT:n menetelmää käyttämällä saadaan arvio, että 18,4 prosenttia hyllygeometrian pinta-alasta tulisi mallintaa aukkoina, mikä 5 senttimetrin hilakoolla vastaa 79 aukkoa. Aukkojen paikat geometriassa luodaan satunnaisesti jokaiselle hyllylle erikseen.

Käytetyllä hilakoolla kaapeleiden kokonaispinta-ala on merkittävästi pienempi kuin todellisuudessa, minkä takia paloon osallistuvaa pinta-alaa kasvatettiin parametrisesti. Esimerkiksi Kallada Janardhan ja Hostikka [11] ovat käyttäneet vastaavaa lähestymistapaa mallintaessaan puutapulin palamista.

### Kaapelin rakenne ja pyrolyysimallit

Koska CFSS-4 -polttokokeessa käytetystä PVC-kaapelista ei ole tarjolla kattavasti tietoa, tutkimuksessa hyödynnettiin Mangsin ja Hostikan [12] julkaisemia tuloksia MCMK 0.6/1kV -nimisestä PVC-kaapelista. Kaapelin nimellinen halkaisija on 13 millimetriä, ja sen painosta 36 prosenttia on metallia, 37 prosenttia vaippamateriaalia, 12 prosenttia eristemateriaalia ja 15 prosenttia täyteainetta. Tietojen perusteella kaapelit mallinnettiin tasomaiseksi



Kuva 1. Simulaatiogeometria ja käytetty laskenta-alue.

► yksinkertaistettuna siten että materiaalissa on kolme eri kerrosta kupariytimen päällä: päällimmäisenä vaippa, sitten täyteainetta ja viimeiseksi eristettä. Kerrosten paksuudet valittiin siten, että palokuorman määrä saatiin vastaamaan CFSS-4 -polttokoea. [12]

Pyrolyysimallin muodostamisessa hyödynnettiin Mangsin ja Hostikan [12] julkaisemia koetuloksia, jotka oli saatu termogravimetrisestä analyysistä (TGA) sekä käyttäen mikroskaalan polttokalorimetriä (MCC) ja kartiokalorimetriä. Pyrolyysimalleja tehtiin kaksi erilaista: yhdessä oletettiin saman materiaalin eri komponenttien reaktioiden olevan rinnakkaisia ja toisessa peräkkäisiä. Muuten mallit muodostettiin samalla tavalla. Ensin TGA- ja MCC-kokeiden tulosten perusteella määriteltiin jokaiselle palavalle materiaalille (vaippa, eriste, täyteaine) reaktiopolut.

Reaktiopolkujen määrittelyn ja reaktiokomponenttien nimeämisen jälkeen jokaiselle reaktiolle määriteltiin erikseen kineettiset parametrit. Käytännössä tämä tehtiin luomalla FDS-ohjelmaan malli TGA-kokeesta, ja eri kineettisillä parametreilla saatuja tuloksia verrattiin koetuloksiin. Kineettiset parametrit optimoitiin PyroPython-ohjelmalla [13]. Kuvassa 2 on esitetty massan muutos lämpötilan funktiona termogravimetrisessä analyysissä ja kokeessa sekä molemmilla eri malleilla saadut simulaatituloset.

Kineettisten parametrien optimoimisen jälkeen loput puuttuvat parametrit optimoitiin vertailemalla kartiokalorimetrikokeen sekä kokeen FDS-mallin tuloksia. Kartiokalorimetrikokeen tuloksia hyödyntämällä optimoitiin materiaalien lämmönjohtavuudet, ominaislämpökapasiteetit sekä reaktio- ja palamislämmöt. Kuvassa 3 on esitetty koekappaleen paloteho pinta-alayksikköä kohti sekä kartiokalorimetrikokeessa että eri pyrolyysimalleilla tehdyissä simulaatioissa.

## TULOKSET

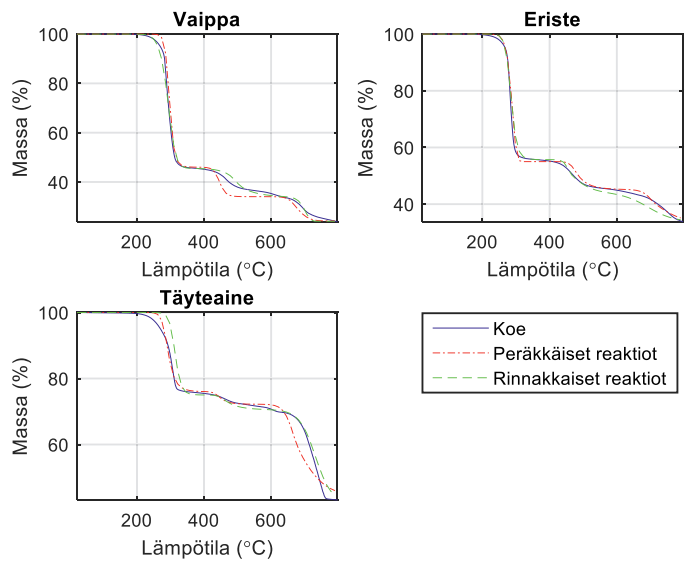
Palon kehittymistä kaapelihyllyissä simuloitiin noin 50 minuutin ajan, joka oli palon kesto polttokokeessa. Simulaatioissa palo kesti kuitenkin alle 15 minuuttia, eli pitkän hiipumisvaiheen sijaan palo hiipui hyvin nopeasti enimmäispalotehon saavuttamisen jälkeen.

Kuvassa 4 on esitetty simuloitu liekkien leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä kolme minuuttia palon syttymisen jälkeen. Kuva on simulaatiosta, jossa pyrolyysimallissa on käytetty rinnakkaisia reaktioita materiaalikomponenteille. Kuvasta on havaittavissa selkeä syttyneiden alueiden muodostama V-kuvio, mikä vastaa todellista käyttäytymistä.

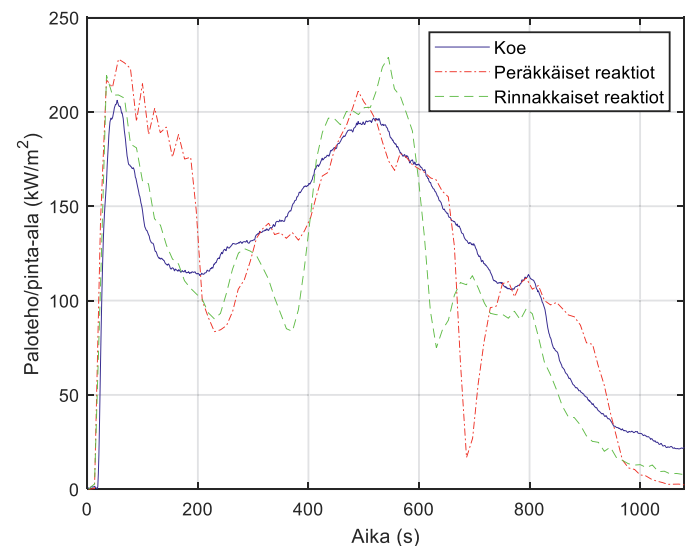
Enimmäispaloteho oli 3200 kW simulaatiossa, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli oletettu peräkkäisiksi, ja 3300 kW simulaatiossa, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli määritetty rinnakkaisiksi. Enimmäispalotehot saavutettiin 350:ssä ja 330 sekunnissa, vastaavasti. Polttokokeessa enimmäispaloteho oli 2600 kW, joka saavutettiin 390 sekuntia kokeen alkamisen jälkeen [2]. Simuloidut enimmäispalotehot olivat siis 23 ja 27 prosenttia suu-

remmat kuin koetulos. Koetulokseen verrattuna enimmäispaloteho saavutettiin simulaatioissa 40 ja 60 sekuntia liian aikaisin.

Simulaatioista määritellyt liekin leviämisenopeudet  $v_{l,i}$  sekä syttymisajat  $t_{s,i}$  eri hyllyille on esitetty taulukossa 1. Alinta hyllyä vastaa



Kuva 2. Massan muutos lämpötilan funktiona termogravimetrisessä analyysissä. Kuvassa on esitetty sekä koetulos että kahdella eri mallilla saadut simulaatituloset.



Kuva 3. Paloteho pinta-alayksikköä kohti sekä kartiokalorimetrikokeessa että kahdella eri pyrolyysimallilla tehdyissä simulaatioissa.

	$v_{l,1}$ (mm/s) / $t_{s,1}$ (s)	$v_{l,2}$ (mm/s) / $t_{s,2}$ (s)	$v_{l,3}$ (mm/s) / $t_{s,3}$ (s)	$v_{l,4}$ (mm/s) / $t_{s,4}$ (s)	$v_{l,5}$ (mm/s) / $t_{s,5}$ (s)
Polttokoe [2]	2,8 / 54	2,7 / 69	2,9 / 73	5,1 / 100	5,9 / 123
Pyrolyysimalli, peräkkäiset reaktiot	2,5 / 22	4,2 / 35	5,1 / 58	6,3 / 86	6,6 / 102
Pyrolyysimalli, rinnakkaiset reaktiot	2,7 / 16	4,3 / 29	5,1 / 48	6,0 / 70	6,6 / 93

Taulukko 1. Polttokokeelle määritetyt [2] sekä simuloidut liekin leviämisenopeudet  $v_{l,i}$  eri hyllyissä sekä hyllyjen syttymisajat  $t_{s,i}$ . Alinta hyllyä vastaa  $i = 1$ .

Kuva 4. Simuloitu liekkien leviäminen vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä kolme minuuttia palon syttymisen jälkeen. Kuva on simulaatiosta, jossa on käytetty rinnakkaisia reaktioita pyrolyysimallissa.



$i = 1$ . Vertailua varten taulukossa on myös esitetty polttokokeelle vastaavat arvot, jotka Zavaleta ym. [2] ovat määritelleet polttokokeesta otettujen videoiden perusteella. Kun käytettiin pyrolyysimallia, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli määritelty peräkkäisiksi, syttymisajat olivat 14–59 prosenttia lyhyemmät kuin polttokokeessa ja liekin leviämisenopeudet taas olivat 11–77 prosenttia suuremmat. Kun taas käytettiin pyrolyysimallia, jossa materiaalikomponenttien reaktiot oli määritelty rinnakkaisiksi, syttymisajat olivat 25–70 prosenttia lyhyemmät kuin polttokokeessa ja liekin leviämisenopeudet taas olivat 4–77 prosenttia suuremmat.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa perehdyttiin viimeaikaisiin tutkimustuloksiin liekin leviämisestä vaakasuuntaisissa kaapelihyllyissä, sillä 2010- ja 2020-luvuilla aihepiiristä on tehty paljon uutta sekä kokeellista että laskennallista tutkimusta. Toisiaan muistuttavissa koeasetelmissä on havaittu jopa kymmenkertaisia eroja kokeellisesti määritellyissä liekin leviämisenopeuksissa, eli ympäristökäyttäjien sekä koeasetelman yksityiskohtien vaikutus palon leviämisenopeuteen kaapelihyllyissä on merkittävä. Tämä on otettava huomioon, kun koetuloksia halutaan hyödyntää tapauksiin, jotka ovat koeolosuhdeiden ulkopuolella.

Vaakasuntaisten kaapelihyllyjen palamisen mallintamiseen on kehitetty useita menetelmiä, mutta suurin osa niistä vaatii lähtöarvoikseen tietoa palon käyttäytymisestä täysmittakaavassa, mikä heikentää niiden käytettävyyttä tapauksissa, jotka eroavat koeasetelmista. Sekä tässä että muissa uusissa tutkimuksissa on kuitenkin saatu lupaavia tuloksia pyrolyysimalleihin perustuvilla menetelmillä, jotka vaativat lähtöarvoikseen vain pienmittakaavakokeiden tuloksia. Menetelmien kehittyessä laskennallista virtausmekaniikkaa voitaisiin siis mahdollisesti käyttää palon kehittymisen mallintamisen ympäristökäyttäjät ja tapauskohtaiset yksityiskohdat huomioiden.

Tässä tutkimuksessa simuloitiin CFSS-4 -polttokoe PRISME 2 -projektista käyttäen laskennallista virtausmekaniikkaa. Väljästi aseteltujen kaapelihyllyjen simulaatio geometria määriteltiin stokastisesti, jotta palokaasujen kulkeutuminen kaapelien läpi saataisiin kuvattua mahdollisimman tarkasti. Hyllyjen syttyminen tapahtuikin simulaatioissa laadullisesti arvioiden oikein. Simuloidut syttymisajat olivat 11–77 prosenttia lyhyemmät kuin polttokokeessa havaitut ajat, ja simuloidut liekin leviämisenopeudet taas olivat 4–77 prosenttia suuremmat kuin polttokokeessa. Simulaatiot suoritettiin käyttäen kahta eri pyrolyysimallia, joiden välillä oli ero siinä, määriteltiin eri materiaalien komponenttien reaktiot rinnakkaisiksi vai peräkkäisiksi. Keskimäärin mallien välinen ero

oli 12 %-yksikköä, kun simuloituja syttymisaikoja verrattiin koetulokseen, ja 3 %-yksikköä, kun simuloituja liekin leviämisenopeuksia verrattiin koetulokseen.

Tutkimuksessa käytetyt pyrolyysimallit muodostettiin käyttämällä pienmittakaavakokeiden tuloksia eri kaapelista kuin mitä täysmittakaavan polttokokeissa oli käytetty. Oikeaa kaapelia vastaavia tuloksia käyttämällä tuloksia voitaisiin mahdollisesti parantaa. Tulevaisuudessa menetelmää tulisi myös käyttää eri koeasetelmien ja kaapelityyppien mallintamiseen, jotta sen käytettävyyttä ja luotettavuutta voitaisiin arvioida kokonaisvaltaisemmin.

## LÄHDELUETTELO

[1] McGrattan, K., Lock, A., Marsh, N., Nyden, M., Bareham, S., Price, M., Morgan, A., Galaska, M. & Schenck, K. Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE), Phase 1: Horizontal Trays. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012. 176 s. + liitt. 5 s. (NUREG/CR-7010, Vol. 1).

[2] Zavaleta, P., Hanouz, R. & Beji, T. Improved Assessment of Fire Spread over Horizontal Cable Trays Supported by Video Fire Analysis. *Fire Technology*, 2019. Vol. 55, nro. 1, s. 233–255.

[3] Siemon, M., Riese, O., Forell, B., Krönung, D. & Klein-Heßling, W. Experimental and numerical analysis of the influence of cable tray arrangements on the resulting mass loss rate and fire spreading. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 497–513.

[4] Huang, X., Zhu, H., Peng, L., Zheng, Z., Zeng, W., Bi, K., Cheng, C. & Chow, W. Burning behavior of cable tray located on a wall with different cable arrangements. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 1, s. 64–73.

[5] Zavaleta, P., Suard, S. & Audouin, L. Cable tray fire tests with halogenated electric cables in a confined and mechanically ventilated facility. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 543–560.

[6] Bascou, S., Zavaleta, P. & Babik, F. Cable tray FIRE tests simulations in open atmosphere and in confined and mechanically ventilated compartments with the CALIF3S/ISIS CFD software. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 448–465.

[7] Plumecocq, W., Audouin, L. & Zavaleta, P. Horizontal cable tray fire in a well-confined and mechanically ventilated enclosure using a two-zone model. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 530–542.

[8] Beji, T. & Merci, B. Numerical simulations of a full-scale cable tray fire using small-scale test data. *Fire and Materials*, 2019. Vol. 43, nro. 5, s. 486–496.

[9] Hehnen, T., Arnold, L. & La Mendola, S. Numerical Fire Spread Simulation Based on Material Pyrolysis—An Application to the CHRISTIFIRE Phase 1 Horizontal Cable Tray Tests. *Fire*, 2020. Vol. 3, nro. 3.

[10] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R. & Vanella, M. *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2020. 120 s. + liitt. 49 s. (NIST Special Publication 1018-1).

[11] Kallada Janardhan, R. & Hostikka, S. Predictive Computational Fluid Dynamics Simulation of Fire Spread on Wood Cribs. *Fire Technology*, 2019. Vol. 55, nro. 6, s. 2245–2268.

[12] Mangs, J. & Hostikka, S. Experimental characterization of the MCMK cable for fire safety assessment. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2013. 36 s. + liitt. 5 s. (VTT Research Report VTT-R-06873-12).

[13] Sikanen, T. PyroPython. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2019. Saatavilla: <https://github.com/PyroId/PyroPython>

# Kartiokalorimetrikokeen mallitus FDS-ohjelmalla

## Tiivistelmä

Rakentamisessa ja rakennustuoteteollisuudessa otetaan nykyään yhä enemmän huomioon ilmastonmuutos ja sen torjunta. Yksi tarkastelukohde on rakennuksissa käytetyt materiaalit ja niiden hiilijalanjälki. Tätä hiilijalanjälkeä voidaan pienentää muun muassa käyttämällä enemmän puuta ja erilaisia biopohjaisia polymeerejä. Rakennus- ja kuljetusvälinealoihin liittyvien huomattavien paloriskien vuoksi käytettävien materiaalien palo-ominaisuuksia on säädelty monin eri tavoin. Usein materiaaleilta vaaditaan tietyn testimenetelmän läpäisyä. Materiaalien kehitysprojekteissa joudutaan testaamaan eri vaihtoehtoja kattavasti, mikä hidastaa tuotekehitystä ja lisää sen kustannuksia. Mallintamisen hyödyntäminen materiaalien palokäyttäytymisen ennustamisessa niiden tuotekehitysvaiheessa tulee lisääntymään ja menetelmät kehittymään. Kartiokalorimetri on materiaalien palokäyttäytymisen tutkimuksessa usein käytetty testimenetelmä. Kartiokalorimetrikokeita voidaan mallittaa laskennalliseen virtausmekaniikkaan perustuvilla simulointiohjelmilla, kuten yleisesti käytössä olevalla Fire Dynamics Simulator (FDS) -ohjelmalla. Käytännössä kokeen simulointi riittävän tarkasti vaatii suurta laskentatehoa, sillä kokeessa esiintyvä liekki ja etenkin siitä tutkittavan näytteen pintaan tuleva lämpövuoto on mallitettava riittävän hyvin. Tämä tekee tavanmukaisesta mallitustavasta lähes käyttökelvottoman materiaalin optimoimisen tuotekehitysvaiheessa. Tässä työssä esitetään malli, joka on käyttökelpoinen, kun materiaalien käyttäytymistä kartiokalorimetrikokeessa pyritään ennustamaan FDS-ohjelmalla. Esitetty malli välttää kaasufaasissa tapahtuvan liekin simuloinnin kokonaan ja käyttää etukäteen taulukoituja liekistä näytteen pintaan tulevia lämpörasituksia. Malli on täten huomattavan nopea, mutta tuottaa kuitenkin varsin samanlaiset tulokset kuin laskennallisesti paljon raskaampi tavanmukainen malli. Esitetty malli vaikuttaa hyvin lupaavalta tavalla mallittamaan kartiokalorimetrikokeita uusien materiaalien tuotekehitysvaiheessa.

## JOHDANTO

Siirtymä kiertotalouteen on kiihdyttänyt uusien materiaalien kehitystä. Uusia materiaaleja kehitetään yhä kiihtyvällä tahdilla ja tämä luo uusia haasteita paloriskien arvioimiselle rakennetussa ympäristössä. Samaan aikaan mielenkiinto virtauslaskentaan perustuvan palosimuloinnin käyttämisestä ennustamaan palon leviämistä ja kasvua lisääntyy, sillä se voi olla mahdollinen vaihtoehto, kun täysimittaisten palotestien tekeminen ei ole käytännössä mahdollista johtuen niiden suuruudesta ja/tai hinnasta. Eritoten tuotekehitysprojektien alkuvaiheessa palon mallitus voi tarjota kustannustehokkaan vaihtoehdon ja nopeuttaa tuotteiden markkinoille tuloa [1].

Pyrolyysi eli aineen lämpöhajoaminen on ensisijainen prosessi, joka määrää aineen hajoamisen palon vaikutuksesta. Tämä tapahtumasarja sisältää kolme pääilmiötä: 1) lämmönsiirto sisältäen lämmönsiirron johtumalla, säteilemällä sekä kulkeutumalla, 2) massansiirto aineen hajoamisessa syntyvien pyrolyysituotteiden myötä, 3) termokinetiikka, joka säätelee termisen hajoamisprosessin ajallisen kulun [2]. Nämä prosessit ovat luonteeltaan monimutkaisia ja monenlaisia malleja niiden kuvaamiseksi on esitetty.

Rogaume [3] jaottee pyrolyysimallit neljään eri tyyppiin: Kokeelliset, termiset, polynomiset ja kattavat mallit. Kokeelliset mallit perustuvat pienen mittakaavan kokeiden analysointiin ja niiden laajentamiseen suurempaan mittakaavaan. Termisissä malleissa pyrolyysiä kuvataan lämmönsiirtonopeuksilla. Massanmuutosnopeus määrätään pyrolyysirintaman energiataseella ja kemiallista kinetiikkaa ei käsitellä. Polynomiset pyrolyysimallit sijaitsevat termisten ja kattavien mallien välimaastossa. Termiset parametrit ja entalpiat esitetään polynomien kertoimilla. Kattavat mallit kuvaavat yksityiskohtaisesti useita fysikaalisia ja kemiallisia prosesseja, joita esiintyy kiinteässä aineessa sitä lämmitettäessä. Kattavat mallit sisältävät kemiallisen kinetiikan, ja pyrolyysiä kuvataan reak-



tionopeuksilla, jotka lasketaan paikallisen lämpötilan perusteella.

Niin kutsuttujen semiempiiristen mallien lähestymistapa on näiden välissä; siinä käytetään yksinkertaistettuja kuvauksia lämmönsiirrolle ja kemiallisille reaktioille [4]. Virtauslaskennan yhteydessä käytettävät pyrolyysimallit ovat tyypillisesti semiempiirisiä malleja, ja ne sisältävät suuren joukon parametreja, jotka on määritettävä kokeellisiin tuloksiin perustuen. Usein tämä mallin parametrien kalibrointi perustuu termogravimetriseen analyysiin ja/tai pienen mittakaavan kokeisiin kuten kartiokalorimetri tai liekinleviämislaitte.

Pyrolyysimallien parametrien suora määrittäminen mittaamalla on vaikeaa johtuen niiden taustalla olevien fysikaalisten ja kemiallisten reaktioiden keskinäisistä riippuvuuksista [5, 6]. Varsin usein parhaiten kokeellisia tuloksia vastaavat tuntemattomien parametrien arvot valitaan käyttämällä käänteisiä ja optimointimenetelmiä [1, 2, 4–5, 7–12].

Kartiokalorimetri on usein käytetty testimenetelmä pyrolyysimallien parametrien määrittämiseen. Tässä laitteessa kartion muotoinen kuuma säteilijä muodostaa tasaisen säteilyrasituksen (usein vaakasuoraan) tasomaisen näytteen pintaan. Kartiosta tuleva säteily sekä näytteen syttymisen jälkeen pinnasta tuleva liekki määräävät muodostuvan nostepatsaan ominaisuudet [13]. Tämä prosessi voidaan muotoilla paikallisesti yksiuolotteiseksi ongelmaksi näytteen pintaan nähden kohtisuorassa suunnassa [1, 4] ja sitä voidaan mallittaa virtauslaskennan avulla, esim. FDS-ohjelmalla (Fire Dynamics Simulator [14]). Käytännössä kokeen simulointi riittävän tarkasti vaatii suurta laskentatehoa, sillä kokeessa esiintyvä liekki ja etenkin siitä tutkittavan näytteen pintaan tuleva lämpövuoto on mallitettava riittävän hyvin. Tämä tekee tavannukaisesta mallitustavasta lähes käyttökelvottoman materiaalien optimoimisessa tuotekehitysvaiheessa. Tässä työssä esitetään malli, joka nopeuttaa kartiokalorimetrikokeen mallitusta FDS-ohjelmalla. Esitetty malli on riittävän nopea (laskenta-aika minuutin suuruusluokkaa) ja sen tulokset eroavat vain vähän hyvin tiheällä laskentahilalla saaduista tuloksista.

## MALLIN LÄHESTYMISTAPA

Tässä työssä kartiokalorimetrikokeen kuvaamiseen käytetään Fire Dynamics Simulator (FDS) ohjelmaa. Se on virtauslaskentaan perustuva niin sanottu kenttämalliohjelma [15]. FDS-ohjelmassa pyrolyysi kuvataan käyttämällä vain välttämätöntä määrää efektiivisiä reaktioita, joilla pystytään mallittamaan tutkittavan näytteen pyrolyysiprosessin pääpiirteet [16]. Näiden reaktioiden lämpötilariippuvuutta kuvataan käyttämällä niin sanottua Arrheniuksen mallia [17]. Tarkka kuvaus FDS-ohjelman käyttämästä pyrolyy-

**"Esitetty malli vaikuttaa hyvin lupaavalta tavalta mallittaa kartiokalorimetrikokeita uusien materiaalien tuotekehitysvaiheessa."**

## "Kartiokalorimetri on usein käytetty testimenetelmä pyrolyysimallien parametrien määrittämiseen."

simallista löytyy ohjelman dokumentaatiosta [18]. Tyypillisesti käytettävän efektiivisen mallin reaktiokineettiset parametrit määritetään käyttämällä esimerkiksi termogravimetrasta analyysia. Tutkittavan näytteen kuvaamiseksi tarvitaan lisäksi aineen ja sen kiinteiden lämpöhajoamistuotteiden termisten parametrien arvot. Näitä voidaan arvioida käyttämällä vertailukohtana kartiokalorimetrin koetuloksia.

Tämän työn tarkoitus ei ollut mallittaa kartiokalorimetrikoeita täydellisesti FDS-ohjelmalla vaan tuottaa nopea approksimatiivinen laskennallinen malli, joka tuottaa kohtalaisia ja hyväksyttäviä tuloksia. Tyypillisessä sovelluksessa ongelmia ilmenee mallituksessa, kun tutkittavan aineen pinta syttyy kartiokalorimetrikokeessa. Tämä voitaisiin välttää tekemällä koe vähähappisessa ilmakehässä. Normaalisissa ilmakehässä tehdyssä kokeessa näytteen pinnan päälle muodostuu liekki, kun näyte syttyy. Tämän jälkeen näytteen pintaa lämmittää kartiomaisen säteilijän lisäksi liekki ja näytteen pinnan saama lämpörasitus ei enää ole tasainen kuten ainoastaan säteilijän lämmittäessä näytettä.

Ennen näytteen syttymistä voidaan pyrolyysiprosessia kuvata FDS-ohjelmalla helposti käyttämällä vain sen kiinteän aineen ratkaisijaa sopivalla ulkoisella reunaehdolla. Tällöin koko näytteen pintaa voidaan kuvata vain yhdellä laskenta-alkiolla, mikäli pinta on homogeeninen. Syttymisen jälkeen tämän mallin käyttö vaikeutuu. Usein käytetty tapa on lisätä tähän pinta-alkioon tulevan ulkoisen säteilyn määrää jollakin käyttäjän ennalta antamalla määrällä, esimerkiksi  $20 \text{ kW/m}^2$ . Tämän lähestymistavan ongelma on se, että liekestä pintaan tuleva lämpörasitus ei ole homogeeninen. Lisäksi tämä käyttäjän valitsema lisäsäteily liekestä on käytännössä asiantuntija-arvio, eli eri mallittaja voi valita eri arvon. Täten mallin antama parametrisointi näytteestä on mallittajasta riippuva, mikä ei ole tarkoituksenmukaista.

Toinen tapa olisi mallittaa liekki FDS-ohjelmassa käyttämällä laskentaverkkoa, joka on riittävän tarkka kuvaamaan liekin ja siitä näytteen pinnalle tulevan lämpövuonon. Tämän lähestymistavan ongelmana on tarvittava laskentateho, sillä syntyneen diffuusioliekin riittävän tarkka kuvaaminen vaatii millimetrin luokkaa olevan laskentaverkon tarkkuuden, jolloin yhden kartiokalorimetrikokeen mallittamiseen voi kuluja useita päiviä tietokoneaikaa, eikä mallin parametrien optimointia käytännössä voida tehdä. Laskenta-aika ei oleellisesti nopeudu, vaikka kartion säteilijää ei mallitettaisi eksplisiittisesti, vaan siitä tuleva säteilylämpövuoto pinnalle annettaisiin ohjelmassa lisäreunaehdona, jolloin jätetään huomioimatta liekin ja pyrolyysikaasujen aiheuttama säteilyn vaimennus kaasussa.

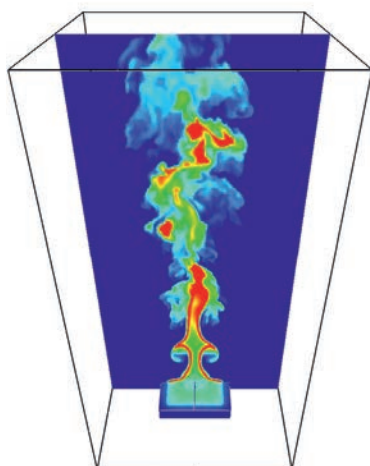
Tässä työssä esitetään nopea ja robusti menetelmä kartiokalorimetrikokeessa esiintyvistä liekestä takaisin näytteen pintaan tulevan lämpövuonon mallittamiseksi. Mallin käyttötarkoitus on auttaa FDS-ohjelman materiaali- ja pyrolyysimallien parametrien optimoinnissa/estimoinnissa. Tätä nopeaa mallia arvioidaan vertaamalla sen tuloksia vastaavan, mutta tarkemman FDS-mallin antamiin tuloksiin. Tarkassa mallissa säteilijää ei kuvata eksplisiittisesti, vaan siitä näytteen pinnalle tuleva säteilyvuoto annetaan lisä-

- reunaehtona. Referenssimallissa käytetään tarkkaa laskentaverkkoa (1 mm kuutiollinen hila), joka kykenee mallittamaan kokeessa esiintyvän diffuusioliekin.

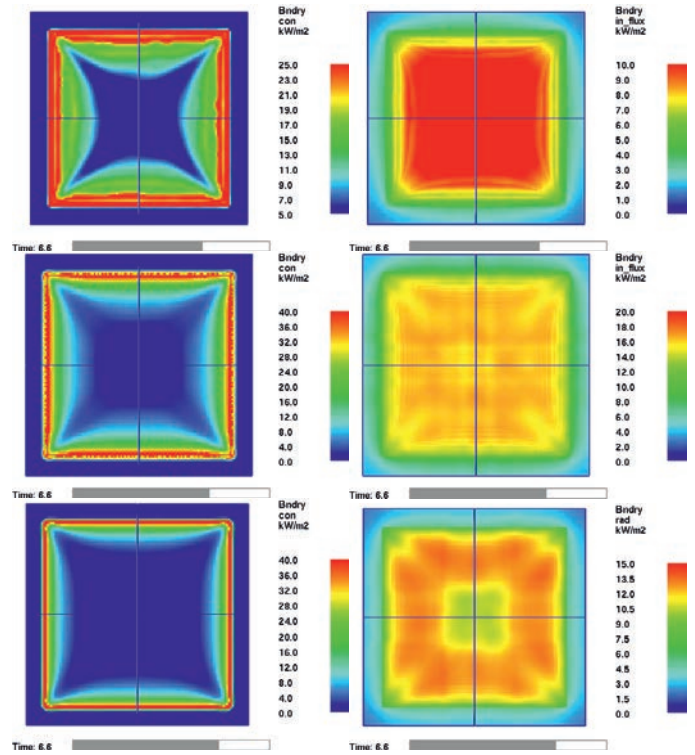
Valittu tarkka laskentaverkko on kompromissi laskentaan kuluvan ajan ja sen tarkkuuden välillä. Vielä tarkemman laskentaverkon käyttö olisi mahdollistanut FDS-ohjelman niin sanotun DNS-moodin (direct numerical simulation) käytön ilman niin sanottua LES-approksimaatiota (large eddy simulation). Se ei kuitenkaan olisi ollut tarkoituksenmukaista, sillä nyt esiteltävän nopean mallin käyttötarkoitus on tuottaa FDS-ohjelmaan materiaalimalleja, joita käytetään suuremman kokoluokan kokeiden mallitukseen ja/tai rakennuksien ja liikennevälineiden palojen mallittamiseen, joiden kokoluokassa vain FDS:n LES-moodi on käyttökelpoinen. Täten tässä on valittu käytettäväksi samat perusolelut kuin on käytössä testikoetta suurempien kohteiden mallituksessa. DNS-moodin käyttö olisi mahdollistanut kaasufaasin palamisreaktion tarkemman käsittelyn, mutta se ei ollut tämän työn tavoitteena.

Nopea FDS-malli kartiokalorimetrikokeelle pitää sisällään seuraavat vaiheet:

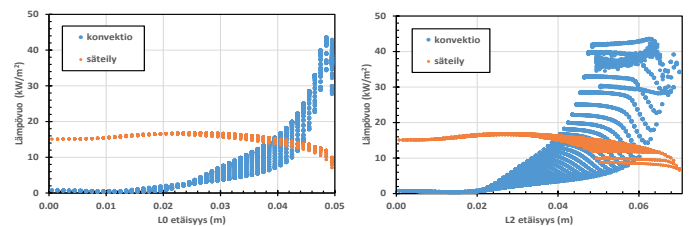
- Arvioi konvektiivinen ja säteilylämmönsiirto liekistä takaisin näytekappaleen pintaan käyttämällä kaasupoltinlaskujen tuloksia:
  - Laske tarkka FDS-lasku käyttämällä laskentaverkkoa, jonka jakoväli on korkeintaan millimetrin luokkaa, ja taulukoi liekin lämpövuot eri palotehoille. Tässä työssä laskettiin kaasupoltinliekin palotehoille 50–1000 kW/m<sup>2</sup>, noentuoton ollessa 0,05 ja polttimen pintalämpötilojen ollessa 300 °C ja 600 °C.
  - Taulukoi tarkoista FDS-laskuista saatavat pinnalle tulevat lämpövuot sekä palotehon että paikan suhteen.
- Tee nopea FDS-lasku kartiokalorimetrikokeelle, jossa ei malliteta kaasufaasia ollenkaan eli käytetään FDS-ohjelmaa laskemaan vain lämmön johtumista kiinteässä aineessa. Tämä vaihe sisältää:
  - Kuumasta kartiosäteilijästä tuleva säteilyvuo ja kaasufaasin liekistä tuleva lämpövuoto (taulukoitettu vaiheessa 1) annetaan reunaehtona FDS-ohjelman kiinteän aineen ratkaisijalle (ns. SOLID\_ONLY mallitus).
  - Annettua tulevaa lämpövuotoa säädetään näytteen pinta-alkion ja näytteestä tulevan liekin kokonaispalotehon mukaisesti. Esimerkiksi ennen näytteen syttymistä tuleva lämpövuoto on tasainen koko pinnalla eli kartiokalorimetrin säteilyteho. Pinnan syttymisen jälkeen tähän lisätään vaiheessa 1 laskettu paikasta ja liekin palotehosta riippuva lisälämpövuoto. Tämä voidaan lisätä automaattisesti laskun aikana käyttämällä sopivia FDS-ohjelman RAMP- ja DEVC-syötteitä.



Kuva 1. Kaasupoltinlaskuissa käytetty laskentaverkko.



Kuva 2. Konvektiivinen (vasemmalla) ja tuleva säteilylämpövuoto (oikealla) kolmelle eri kokoiselle kaasupolttimelle: 100 kW/m<sup>2</sup> (ylhäällä), 300 kW/m<sup>2</sup> (keskellä), 700 kW/m<sup>2</sup> (alhaalla). Huomaa, että 100 mm × 100 mm kokoinen näytteen ympärillä on 10 mm:n levyinen teräsreunus.



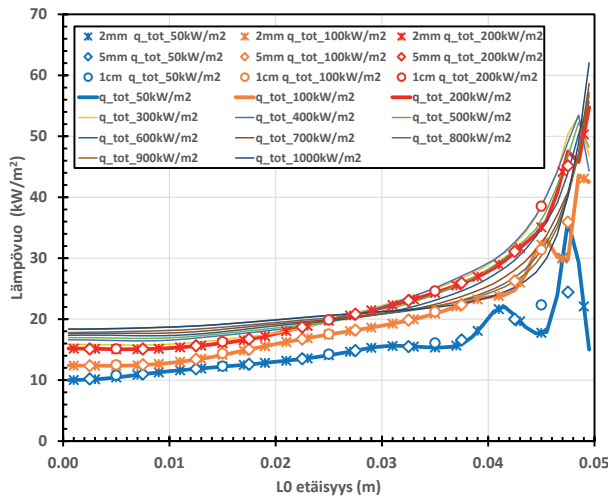
Kuva 3. Konvektiivinen ja tuleva säteilyvuo 300 kW/m<sup>2</sup> kaasupolttimesta, jonka pintalämpötila on 300 °C. Lämpövuoto on esitetty näytteen keskeltä mitatun etäisyyden funktiona käyttäen kahta tekstissä mainittua metriikkaa, Min(x,y) normi (L0) vasemmalla ja normaali euklidinen normi (L2) oikealla.

Vaihe 1 tehdään vain kerran, joten se voi olla laskennallisesti haastava. Vaihe 2 tehdään useasti materiaalimallin optimointiprosessin aikana ja sen on oltava hyvin nopea. Optimointiprosessissa kartiokalorimetrikokeetta voidaan mallittaa jopa tuhansia kertoja.

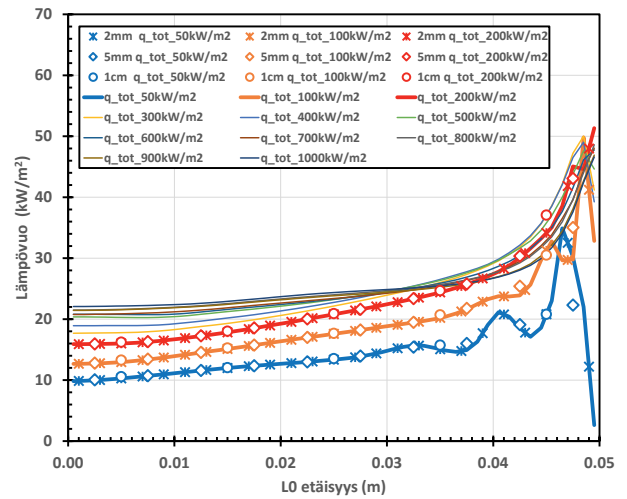
## TULOKSET

### Vaihe 1a

Käytetty simulointigeometria on esitetty kuvassa 1. Näytteen ja sen reunuksen kattaman 120 mm × 120 mm alan yläpuolella käytettiin 1 mm:n kuutiollista laskentaverkkoa aina 300 mm:n korkeudelle saakka. Näyte oli 20 mm laskenta-alueen alapinnan yläpuolella (eli näytteen päällä) 280 mm 1 mm:n kuutiollista laskentaverkkoa. Tämän yläpuolella ja näytteen ja sen reunuksen ulkopuolella



Kuva 4. Liekistä pintaan tuleva lämpövuoto kaasupoltinlaskuissa, joissa polttimen pintalämpötila on 300 °C. Sovitteita harvemmil- le (pinta)laskentaverkoille, joita voidaan käyttää nopeassa FDS-kartiokalorimetrimallissa, on myös esitetty.



Kuva 5. Liekistä pintaan tuleva lämpövuoto kaasupoltinlaskuissa, joissa polttimen pintalämpötila on 300 °C. Sovitteita harvemmil- le (pinta)laskentaverkoille, joita voidaan käyttää nopeassa FDS-kartiokalorimetrimallissa, on myös esitetty.

visuusuunnassa käytettiin 2 mm:n kuutiollista laskentaverkkoa. Koko laskenta-alueen koko oli tyypillisesti 300 mm × 300 mm × 500 mm, mutta korkeimmille (suurin paloteho) liekeille laskenta- aluetta jatkettiin aina 750 mm:n korkeuteen saakka. Työn aikana huomattiin kuitenkin, että tämä laskenta-alueen kasvattaminen korkeusuunnassa ei ollut tarpeellista, kun tarkasteltiin liekistä pintaan tulevaa lämpövuotoa. Suurimmilla palotehoilla (hulmuva- va) liekki ylittää 500 mm:n korkeudelle ja ylikin, mutta käytännös- sä 500 mm:n ja 750 mm:n korkeudelle jatkuvat laskentaverkot antoivat saman tuloksen pintaan tulevalle lämpövuolle. Tämä on odotettu tulos, sillä suurin osa lämpövuosta tulee liekin alaosasta.

Kuvassa 2 esitetään pintaan tuleva konvektiivinen ja säteilyläm- pövuoto kaasupoltinlaskuissa 100, 300 ja 700 kW/m<sup>2</sup> -kaasupoltti- mille, kun polttimen pinnan lämpötila on 300 °C. Esitetyt visu- aaliset tulokset edustavat hyvin kaikkia saatuja tuloksia kaasu- polttimille. Kuvasta nähdään, että saadut lämpövuot näyttäisivät

noudattavan neliösymmetriaa, joten tässä työssä päädyttiin käyt- tämään metriikkaa Min(x,y) taulukoimaan tulokset normaalim- man L2 metriikan (säteittäinen etäisyys) sijasta. Tämä näkyy sel- vemmin kuvasta 3, jossa on esitetty kuhunkin 1 mm:n kokoiseen pinta-alkioon tulevat lämpövuot käyttäen kumpaakin metriikkaa.

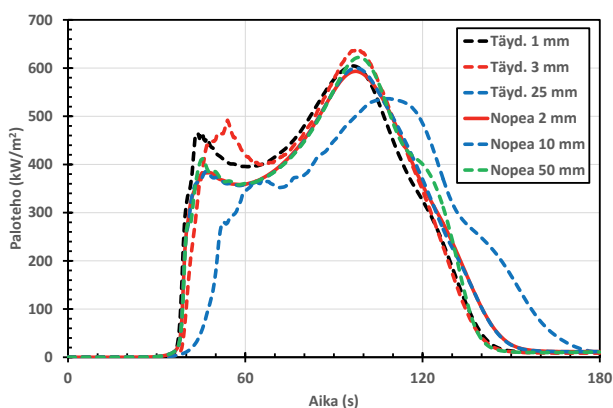
### Vaihe 1b

Kuvissa 4 ja 5 esitetään saadut liekistä tulevat lämpövuot näytteen pinnalle (konvektiivinen ja tuleva säteilylämpövuoto) kaasupolttimi- en lämpötiloille 300 °C ja 600 °C. Kullakin vaaka-akselilla olevan L0-normin mukaisella etäisyydellä esitetty arvo on keskiarvo täl- lä etäisyydellä olevien pinta-alkioiden arvoista. Kuvissa on esitet- ty myös sovitteet, joita voi käyttää suurempia pinta-alkioita käyt- tävissä nopeissa FDS-kartiokalorimetrimalleissa. Nämä sovitteet ovat oikeastaan vain pinta-alkioiden arvojen keskiarvoja sopivi- en L0-normin etäisyyksien yli. Sovitteista nähdään, että tämä kes- kiarvoistusprosessi ei ole kovin herkkä pinta-alkioiden laskenta- hilan tarkkuudelle, joten käytännöllinen arvo voidaan valita, kun menetelmää käytetään optimoimaan FDS-materiaalimallia saatu- jen kartiokalorimetrikokeiden tuloksien perusteella.

### Vaiheet 2a ja 2b

FDS-ohjelmaa käytetään tässä vaiheessa moodissa, jossa mallite- taan vain kiinteän aineen lämmönsiirtoa, eli kaasufaasia ei malli- teta ollenkaan, jolloin laskennasta tulee nopeaa. Tyypillisen kartiokalorimetrikokeen näytekappaleen symmetriasta johtuen vain neljäsosa näytteestä on tarpeen mallittaa eli esimerkiksi alue x, y ∈ [0 mm, 50 mm]. Laskenta-aikaa voidaan lyhentää tästäkin, sillä periaatteessa riittäisi, että mallittaa vain yhden pinta-alkion kul- takin metriikan Min(x,y) etäisyydeltä ja kertoo tulokset kyseisel- lä etäisyydellä olevien pinta-alkioiden määrällä. Tässä työssä tätä mahdollisuutta ei kuitenkaan hyödynnetty, koska FDS-syötteen te- ko olisi tällöin monimutkaisempaa ja virhealttiimpaa kuin näyt- teen neljänneksen mallituksessa.

Edellä esitettyä menetelmää kokeiltiin soveltamalla sitä hart- siin, jota VTT oli jo aikaisemmin tutkinut [19]. Kuvassa 6 esite- tään saadut tulokset tarkoille FDS-simulaatioille, joissa mallitet- tiin kaasufaasissa oleva liekki käyttämällä 1 mm:n ja 3 mm:n kuu- tiollisia laskentaverkkoja. Kuvassa on myös esitetty nopean FDS-



Kuva 6. Näytekappaleen paloteho pinta-alyksikköä kohden täydellisille FDS-malleille, joissa kaasufaasissa käytettiin 1 mm, 3 mm ja 25 mm kuu- tiollisia laskentaverkkoja sekä tulokset nyt esitetylle nopealle mallille käyt- täen 2, 10 ja 50 mm:n neliöllisiä laskentaverkkoja näytteen pinnalle.

- mallin tulokset kolmelle eri laskentaverkon tarkkuudelle (2:n, 10:n ja 50 mm:n neliölliset pinta-alkiot). Huomaa, että käytännössä 50 mm:n neliöllinen pinta-alkio tarkoittaa mallia, jossa koko näytettä kuvataan vain yhdellä alkiolla (symmetria). Kuvasta nähdään, että nyt esitetty nopea laskentamenetelmä ei riipu paljoakaan käytetystä laskentaverkon tarkkuudesta, jopa 10 mm:n laskentatarkkuus antaa riittävän hyvät tulokset ja tällöin laskennassa käytetään vain viiteen eri paikkaan normin  $\text{Min}(x,y)$  mukaisesti taulukoituja lämpövuon arvoja. Käytännössä tämä tarkoittaa, että optimoitaessa mallin parametreja riittää, että näytekappaleen FDS-mallissa käyttää vain viittä pinta-alkiota, mikä tekee laskennasta tosi tehokkaan ja mahdollistaa tehokkaan parametrien optimoinnin.

Kuvasta 6 nähdään, että nopean mallin tulos 50 mm:n laskentaverkolla, jossa koko näytettä kuvaa vain yksi pinta-alkio, ei ole kovin kaukana tarkemmilla malleilla saaduista tuloksista, joten käytännössä pintaan tulevan lämpövuon jakaminen tasaisesti näytteen pinnan yllä laskennassa antaa riittävän hyviä tuloksia. Tämä osin muistuttaa aiempaa käytäntöä, jossa mallittaja antoi omaan harkintaansa perustuen FDS-syötteeseen ylimääräisen lisän säteilylämpövuolle, kun näyte syttyi. Tosin tämä oli tyypillisesti vakio koko näytteen palamisen ajan eli ei riippunut liekin palotehosta, joka vaihtelee kokeen aikana.

## YHTEENVETO

Esitetty nopea malli kartiokalorimetrikokeen simuloimiseksi FDS-ohjelmassa käyttäen vain ohjelman kiinteän aineen ratkaisijaa antaa hyvin lupaavia tuloksia verrattaessa täydellisempään FDS-malliin, jossa mallitetaan myös kaasufaasi ja siten myös näytteestä tuleva liekki. Esitetty malli on huomattavan nopea ja soveltuu hyvin käytettävien materiaalmallien parametrien optimointiin. Koska esitetty malli perustuu tarkkoihin FDS-mallituksiin kaasupolttimista, ei sen käyttäjälle jää valittavaksi ylimääräisiä parametreja, jolloin tulos on mallittajasta riippumaton.

## LÄHDELUETTELO

1. Lautenberger, C., Rein, G. & Fernandez-Pello, C. The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. *Fire Safety Journal* 41, 2006, pp. 204–214.
2. Boyer, G. Fully coupled CFD simulation of the pyrolysis of non-charring polymers: A predictive approach. IAFSS 12th Symposium 2017, *Fire Safety Journal* 91, 2017, pp. 208–217.
3. Rogaume, T. Thermal decomposition and pyrolysis of solid fuels: Objectives, challenges and modelling. *Safety Journal* 106, 2019, pp. 177–188.
4. Ghorbani, Z., Webster, R., Lazaro, M. & Trouvre, A. Limitations in the predictive capability of pyrolysis models based on a calibrated semi-empirical approach. *Fire Safety Journal* 61, 2013, pp. 274–288.
5. Ding, Y., Swann, J.D., Sun, Q., Stoliarov, S.I. & Kraemer, R.H. Development of a pyrolysis model for glass fiber reinforced polyamide 66 blended with red phosphorus: Relationship between flammability behavior and material composition. *Composites Part B* 176, 2019, 107263.
6. Sun, Q., Ding, Y., Stoliarov, S.I., Sun, J., Fontaine, G. & Bourbigot, S. Development of a pyrolysis model for an intumescent flame retardant system: Poly(lactic acid) blended with melamine and ammonium polyphosphate. *Composites Part B* 194, 2020, 108055.
7. Lautenberger, C. & Fernandez-Pello, C. Generalized pyrolysis model for combustible solids. *Fire Safety Journal* 44, 2009, pp. 819–839.

**"Optimoitaessa mallin parametreja riittää, että näytekappaleen FDS-mallissa käyttää vain viittä pinta-alkiota, mikä tekee laskennasta tosi tehokkaan ja mahdollistaa tehokkaan parametrien optimoinnin."**

8. Matala A., Lautenberger C. & Hostikka S. Generalized direct method for pyrolysis kinetic parameter estimation and comparison to existing methods. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 30, 2012, pp. 339–356.

9. Xu, L., Jiang, Y. & Wang, L. Thermal decomposition of rape straw: Pyrolysis modeling and kinetic study via particle swarm optimization. *Energy Conversion and Management* 146, 2017, pp. 124–133.

10. Ding, Y., Stoliarov, S. I. & Kraemer, R. H. Pyrolysis model development for a polymeric material containing multiple flame retardants: Relationship between heat release rate and material composition. *Combustion and Flame* 202, 2019, pp.43–57.

11. Yuen, A. C. Y., Chen, T. B. Y., Wang, C., Wei, W., Kabir, I., Vargas, J. B. & Chan, Q. N. Utilising genetic algorithm to optimise pyrolysis kinetics for fire modelling and characterisation of chitosan/graphene oxide polyurethane composites. *Composites Part B* 182, 2020, 107619.

12. Agarwal, G., Chaos, M. & Wang, Y. Validation of pyrolysis model in transient heating scenarios and diverse spectral boundary conditions. *Fire Safety Journal* Volume 120, 2021, 103064.

13. Yuen, R. K. K., Yeoh, G. H., de Vahl Davis, G. & Leonardi, E. Modelling the pyrolysis of wet wood – II. Three-dimensional cone calorimeter simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 2007, pp. 4387–4399.

14. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R. & Vanel-la M. *Fire Dynamics Simulator, User's Guide*. 6th Ed., NIST Special Publication 1019, 2020.

15. McGrattan K. & Miles S. *Modeling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Teoksessa SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Ed., Springer, 2016, pp. 1034–1065.

16. Matala, A. *Methods and applications of pyrolysis modelling for polymeric materials*. VTT Science 44, 2013.

17. Rodriguez-Aragón L. J. & López-Fidalgo J. Optimal designs for the Arrhenius equation, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 77(1–2), 2005, pp. 131–138.

18. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R. & Vanel-la M. *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*. 6th Ed., NIST Special Publication 1018-1, 2020.

19. EU project FIBRESHIP Deliverable D2.4 (WP2): Report and database on the results of the fire performance experiments, 2018.

# Maastopalojen leviämismallit ja jalostettu metsävaratieto osana pelastustoimen tilannekuvan kehittämisen prosessia

## TIIVISTELMÄ

Ilmaston ennustettavuuden vaikeutuminen ja ääriolosuhteiden lisääntyminen vaikuttavat metsäpalojen riskien lisääntymiseen monilla alueilla maailmassa. Myös Suomessa tulee varautua ilmastonmuutoksen aiheuttamiin muutoksiin ja maastopalojen lisääntymiseen. Monissa maissa on pelastustoimen operatiiviseen käyttöön tutkimuksien tuloksina tuotettu maastopalojen leviämistä mallintavia ohjelmistoja. Leviämismallilla annetaan ennuste metsäpalon leviämisestä ottaen huomioon esimerkiksi metsävaratieto sekä reaaliaikaiset tuulimallit. MAST-hankkeessa (15.5.2020–31.12.2021) hyödynnetään eri maissa tehtyä metsäpalotutkimusta ja -kokemusta. Metsäpalon leviämismalli muunnettiin Suomen olosuhteisiin sopivaksi Metsäkeskuksen keräämän metsävaratiedon avulla, käyttäen pohjana kanadalaista Prometheus-leviämismallia. Metsäkeskus on kerännyt valituista koealoista (noin 900 kpl) puusto- ja aluskasvillisuustiedot, jotka on tulkittu ja yleistetty vastaamaan laserkeilausmenetelmä- eli Lidar-aineistoja. Arbonaut on tulkinnut metsävaratietoa yhteistyössä Metsäkeskuksen kanssa Prometheus-mallin soveltamista varten. Arbonaut ja Ilmatieteenlaitos puolestaan ovat integroineet reaaliaikaisen tuulimalliin Prometheus-malliin. Pelastusopistolla suoritettiin hankkeessa toteutettavat maastopalojen leviämismallin luokkahuonetestijaksot keväällä 2021. Ensimmäisessä vaiheessa leviämismallien toimivuutta testattiin Pelastusopistolla opetuksen simuloituissa johtamistilanteissa. Toisessa vaiheessa toimivuutta testataan Pohjois-Karjalan pelastuslaitoksen toteuttamissa kulotuksissa ja/tai maastotehtävissä. Testijaksoilla haetaan käyttäjäkokemusta ja palautetta siihen, kuinka leviämismalli integroidaan optimaalisella tavalla osaksi pelastustoimen operatiivista toimintaa, sekä millä tavoin mallista saadaan paras mahdollinen hyöty pelastustoimen johtamisessa. Testijaksojen tulokset ovat käytettävissä elo-syyskuussa 2021. Menetelmän tavoitteena on luoda tilannekeskuksiin

ja johtokeskuksiin tehokas työkalu resurssien ja toiminnan suunnittelun näkökulmasta. Lisäksi tehokkaalla ja oikealla tilannekuvan luomisella voidaan vähentää sammutustyöhön osallistuviin henkilöihin kohdistuvia riskejä (muun muassa altisteet) ja pienentää maastopaloista koituvia taloudellisia tappioita.

## TAUSTA JA TARVE YHTEISKEHITTÄMISELLE

Ilmastonmuutoksen myötä eri puolilla maailmaa on raportoitu maastopalojen aiheuttamista tuhoista. Laajoja metsäpaloja on tapahtunut esimerkiksi Venäjällä, Australiassa, Espanjassa, Yhdysvalloissa ja myös Pohjoismaissa muun muassa Ruotsissa. Suomessa metsäpalojen aiheuttamat tuhot eivät vielä ole lisääntyneet huomattavasti ja tilanne on pysynyt maastopalojen suhteen hyvänä. Maastopalojen määrä ja pinta-alat vaihtelevat vuosittain ja suurta merkittävää muutosta ei voida vielä raportoida [1]. Maastopaloista on raportoitu, huolimatta Suomen hyvästä tilanteesta, olevan yhteiskunnallisia haittavaikutuksia. Väestölle aiheutuu haitallisia terveysvaikutuksia, jotka kulkeutuvat hyvinkin kauas itse palopaikasta [2, 3]. Sammuttajat altistuvat terveydelle haitallisille altisteille maastopalojen tukahduttamisessa [4]. Tätä altistumista on tutkittu Pelastusopistolla käynnissä olevassa ”Pelastajien työvälineet ja suojaimet metsäpaloissa” -hankkeessa, joka päättyy 2021 vuoden lopussa. Ensimmäisiä tuloksia on julkaistu Pelastusalan ammattilainen -lehdessä [5]. Lisäksi maastopaloista aiheutuu taloudellisia vaikutuksia. Sammuttamisesta aiheutuu kuluja ja aineelliset vahingot palaneesta metsästä aiheuttavat tappiota metsänomistajille ja vakuutusyhtiöille [6].

Pelastustoimessa Suomessa ei toistaiseksi ole käytössä MAST-hankkeessa kehitettävän kaltaista käyttöliittymää metsäpalojen ennustettavuuteen. Tällä hetkellä hälytyksen jälkeen sammutus-

► toimet tehdään karttapohjaa ja olemassa olevia säätietoja soveltaen jokaisen tilannejohtajan toimesta.

Lisäksi, Suomessa maastopalojen ehkäisyyn ja torjuntaan liittyvät tausta-aineistot ja tiedot ovat toistaiseksi hajallaan eri viranomaisten hallussa. Tämä on ollut mahdollista, koska varsin onnekaasti metsäpalot eivät ole toistaiseksi olleet maassamme tuhoisia. Suomen pinta-alasta metsää on yli 75 prosenttia. Siihen nähden on huomionarvoista, että se massiivinen palokuorma, joka on pelastusviranomaisten edessä päivittäin, ei ole juurikaan ollut merkittävän kehittämistyön kohteena. Toisaalta metsäviranomaiset ja -tutkijat, jotka tavoitteellisesti ovat parantaneet tietoa metsävaroista, eivät juurikaan ole perehtyneet metsävarojen paloriskihin tai niiden yhteiskunnallisiin vaikutuksiin.

Metsäkeskus tuottaa tarkkaa kaukokartoitusperustaista tietoa yksityismetsien metsävaroista. Myös metsäyhtiöillä ja Metsähallituksella on hallussaan kaukokartoitusperustainen metsävaratieto hallinnoimistaan metsistä. Metsävarojen inventointi ja tiedon ylläpito on metsänarvioimistieteeseen ja muun muassa kasvu- ja tuotostutkimukseen perustuvaa asiantuntijatyötä ja erikoisosaamisen ala. Inventoinnin ja kestävä metsänhoidon edistämisen lisäksi Metsäkeskuksen tehtäviin kuuluu myös metsätuhojen torjunta. Metsätuhot aiheuttavat kasvutappioita ja pahimmillaan metsän puiden kuolemista pystyyn. Tämä voi tapahtua myös voimakkaan tuulen kaatamiin puihin iskeytyneiden hyönteisten levitessä elinvoimaiseen metsään.

Myrskytuulten iskiessä voidaankin karkeasti jaotellen todeta Metsäkeskusta kiinnostavan tuulen metsään kaatamat puut, jotta voidaan torjua hyönteisten aiheuttamia seuraustuhoja. Sähköyhtiöitä kiinnostavat sähkölinjoille kaatuvat puut ja pelastusviranomaisia teiden ja muun omaisuuden päälle kaatuvat puut. Toki yhteistyötä tehdään organisaatioiden välillä myrskyn iskiessä. Kun ajatellaan metsäpaloihin varautumista, voidaan karkeasti todeta, että Metsäkeskusta kiinnostaa sellaisten tuhojen torjunta, joka aiheuttaa puiden kuolemista. Ensisijaisesti puiden kuolemista huolehditaan metsätalouden tappioiden vähentämiseksi. Juurikaan ei ajatella kuolleen puuaineksen metsätaloriskiä. Jos nuo kuolleet – ja elävät – puut leimahtavat tuleen, asia siirtyykin pelastuslaitokselle, pois Metsäkeskuksen ”työpöydältä”.

Metsäpalovaroitukset tuottaa puolestaan Ilmatieteen laitos hyödyntäen meteorologian menetelmiä sekä esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) tietovarantoja. Metsäpalon kehittyminen itsessään on palofysiikkaa, johon vaikuttavat metsätyyppi, puusto, kuivuus, tuulet ja monet muut tilannekohtaiset seikat. Sammutustyö on operatiivista pelastustoimintaa, jossa keskitytään ihmisten ja omaisuuden suojaamiseen sekä palovahinkojen minimointiin. Jotta pelastustoimelle voidaan tuottaa ajantasaista tilannekuvaa pelastustoiminnan päätöksenteon tueksi, on tilannekuvan kannalta oleelliset tiedot saatava siirtymään eri tietojärjestelmistä yhteen helppokäyttöiseen muotoon.

**”Oleellista on saattaa asiantuntijoiden yhteistoiminnassa tuottama tietoa sellaiseen muotoon, jossa se on kokonaisuutena parhaiten palvelee metsäpalojen torjuntaa”.**

Palopäällikköä ei sammutustilanteessa niinkään kiinnosta kuumikon runkojen tukkipuuosuus, tai metsälain suojelemat monimuotoisuuskohteet, vaikka tieto itsessään olisi hyvinkin tarkkaa. Lähteet, ojat, lammet ja muut vesialtaat kiinnostavat sammutusveden varastona. Fyysikko puolestaan ei osaa sanoa, mitä muutujia pitäisi mitata maastossa, jotta voidaan lidaripistepilvestä tulkita ne metsäekosysteemin ominaisuudet, jotka tehokkaimmin lisäävät metsäpalon energiaa. Metsänhoitaja tai meteorologi ei osaa johtaa sammutusoperaatiota, mutta ei myöskään pelastaja tehdä tuulimallinnusta leviämismallinsa pohjaksi. Oleellista on saattaa eri asiantuntijoiden yhteistoiminnassa tuottama tieto sellaiseen muotoon, jotta se on datojen, tietojärjestelmien, simulaattorien ja käyttöliittymien kokonaisuutena parhaiten palvelemaan metsäpalojen torjuntaa. Tätä tavoitellaan MAST-hankkeen työryhmän yhteiskehittämisellä.

### **METSÄVARATIEDON KERÄÄMINEN SUOMESSA – MITEN PUUSTOTUNNUKSISTA TUOTETAAN PALOKUORMAA, POLTTOAINEMÄÄRIÄ, SYTTYMISHERKKYYKSIÄ TAI LATVAPALORISKIÄ?**

Suomessa on kerätty kansallinen metsävaratieto laserkeilaamalla vuodesta 2010 lähtien. Suurimman osan tästä tiedosta on kerännyt Suomen Metsäkeskus, joka jalostaa siitä tilakohtaiset ja jopa metsikkökuviokohtaiset puustotunnukset käyttäen hyväkseen alalla toimivia yksityisiä yrityksiä. Arbonaut on alusta lähtien ollut mukana laserkeilatun metsävaratiedon jalostamisessa ja kehittänyt prosessin, jolla puustotunnusten ohella voidaan tuottaa myös maastopalojen ennakointiin ja torjunnan ennakkosuunnitteluun tarvittavaa puusto- ja maastotietoa, kuten arvion kuvioittaiselle tai tarkemmallekin palavan aineksen määrälle ja pystysuuntaiselle palokatkolle aluskasvillisuuden ja latvuksen välissä.

Kaukokartoitusperusteisissa metsien inventoinnissa hyödynnetään laserkeilausta, ilmakuvausta ja maastokoealamittauksia. Lisäksi metsävaratietoa ajantasaistetaan seuraavilla menetelmillä:

- laskennallinen puustotietojen kasvatus,
- puustotietojen ja toimenpide-ehtotusten päivitys suunniteluilla tai toteutuneilla toimenpiteillä,
- uudistushakkuiden päivitys ilmakuvien tai satelliittikuvien avulla,
- metsävaratiedon päivitys tai korvaaminen metsäsuunnittelutiedolla,
- kiinteistörajamuutosten perusteella tehtävä kuviorajojen tarkennus tai kuvioden jako, sekä
- ympäristötuki- ja luonnonsojeluaineistojen perusteella tehtävä metsävaratiedon päivitys.

Ensimmäinen Suomen kattava kaukokartoitusinventointi valmistui 2020. Samana vuonna aloitettu toinen inventointikierron etenee kansallisen laserkeilaus- ja ilmakuvausohjelman mukaan, jota koordinoi Maanmittauslaitos. Laserkeilaus nopeutuu ja kestää kuusi vuotta, jolloin viimeiset inventointialueet valmistuvat 2026 pois lukien pohjoisin Lappi, jossa keilaussykli on 12 vuotta. Ilmakuvia otetaan puolet tiheämmin, eli samana vuonna kuin laserkeilaus ja toisen kerran keilauskierron puolivälissä.

Metsävaratiedon keruu perustuu lentokoneesta tehtävään laserkeilaukseen ja ilmakuvaukseen, referenssikoealojen mittaukseen sekä näiden aineistojen perusteella tehtävään puustotulkintaan. Laserkeilaus saadaan tehokkaasti tarkkaa ja kolmiulotteista tietoa puuston ja maaston rakenteesta. Laserkeilaus tehdään 1,5–2 kilometrin korkeudesta ja nykyisin käytettävä pistetiheys on viisi havaintopistettä neliometrillä. Lisäksi hyödynnetään ilmakuvia esimerkiksi puulajien tunnistamisessa. Ilmakuvat ote-

taan 7–8 kilometristä ja niiden maastotarkkuus on 40 cm. Yksittäinen kaukokartoitusalue on kokonaisaltaan noin 300 000 hehtaaria, josta metsää on yleensä yli puolet riippuen missä päin Suomea lennetään. Toisella inventointikierroksella kartoitetaan vuosittain noin 22 aluetta eri puolilta maata ja inventoitavia metsiä kertyy 3,5–4 miljoonaa hehtaaria. Metsäkeskuksen lakisäätien tehtävä ja pääpaino on yksityismetsissä, mutta perusinventointitietoa tuotetaan kattavasti kaikista metsistä.

Kaukokartoitusperusteinen metsävaratiedon keruu kestää noin vuoden. Ensimmäisenä keväänä ja kesänä tehdään laserkeilaus ja ilmakeilaus sekä mitataan maastokoealat erityyppisistä metsistä puustotulkinnan mallinnukseen. Yhdeltä inventointialueelta mitataan 700–800 säteeltään tavallisesti yhdeksän metrin ympyräkoelaa tai 150–200 laajempaa, noin 1000–2000 neliömetrin puukarttakoelaa, joilta on mitattu myös puiden sijainnit. Puukartoille voidaan generoida useita puustotulkinnan referenssikoelaloja, jotka rajataan puiden välistä. Eri koelatyyppejä voidaan myös yhdistellä esimerkiksi täydentämällä puukarttoja ympyräkoeloilta harvinaisemmista kohteista tai pienemmistä puustoista, joista puukarttoja ei kannata mitata. Syksyllä esikäsitellään puustotulkinnassa tarvittavat aineistot ja talvikaudella laaditaan tilastolliset laskentamallit, joiden toimivuus ja tulosten laatu varmistetaan vertaamalla maastossa mitattuun tietoon. Varsinaisen puustotulkinnan tekevät siihen erikoistuneet kaukokartoitusrytykset. Uutta metsävaratietoa julkaistaan yleensä inventoinnin toisena keväänä. Puustotulkinnan yhtenä inventointiyksikkönä on edelleen 16 × 16 metrin hilaruutu, joka vastaa pinta-alaltaan puustotulkinnan referenssikoelaa. Sijainniltaan vakio hila kattaa koko maan ja on omana tietotuotteenaan. Jatkossa uutena noin hilaruudun kokoisena inventointiyksikkönä käytetään latvusraajattua puuryhmää, jossa rajaukset menevät puiden välistä ja joita yhdistelemällä tuotetaan metsikkökuvioiden puustotiedot. Latvusraajattu yksikkö on laserpiirteiltään terävämpi, koska se sisältää samojen puiden rungot ja kokonaiset latvat, eivätkä ne leikkaudu kuten hilaruuduilla. Lisäksi kuvion rajoilla vältetään niin sanottua reunahilaongelmaa, jolloin hilaruutu on osin eri kuviolla.

Puustotulkinnan laskentamalleihin valittujen laser- ja ilmakeilaväpöirteiden avulla haetaan kullekin inventointiyksikölle sitä parhaiten vastaavat koelalat ja lasketaan niiden perusteella jokaiselle hilaruudulle tai latvusraajatuille puuryhmälle omat puustotiedot. Puustotunnukset lasketaan sekä kokonaispuustolle että puulajeittain, jossa erotetaan mänty, kuusi ja lehtipuu. Metsikkökuviokohtaiset tiedot yleistetään kullekin kuviolle osuvien inventointiyksikköiden puustotietojen summa- ja keskitunnuksina. Lisäksi kuviolle haetaan kasvupaikkatiedot olemassa olevista tiedoista sekä lasketaan vielä suositusten mukaiset metsänhoito- ja hakkuuehdotukset. Toisella inventointikierroksella yksityismaiden metsikkökuvioina hyödynnetään pääsääntöisesti aiempaa kuviointia, jota päivitetään muutosten tai mahdollisten virheiden osalta uudella laserkeilaus- ja ilmakeilaus-aineistolla. Tarvittaessa voidaan tehdä myös kokonaan uusi kuviointi [7].

## METSÄVARATIEDON JALOSTAMINEN OSANA KEHITTÄMISTYÖTÄ

Metsäpalojen kehitystä ennustavan Prometheus-mallin vaatimien lähtötietojen laatua lähdettiin kehittämään ajatuksella, että se saataisiin toimimaan paremmin suomalaisilla metsävaratiedon syötetiedoilla. Prometheus käyttää lähtökohtaisesti kanadalaisista metsäpaloluokitusta. Kanadalaisessa metsäpaloluokituksessa on 16 luokkaa, joista 4 on puutonta ja 12 puustoista. Tavoitteena oli, että hankkeessa pystytään koelalan puustotietojen ja valokuvien yhdistelmällä määrittelemään, mihin paloluokkaan koelala sijoittuu.

Prometheuksen käyttämä paloluokitus on tehty Kanadaan, ja Kanadassa metsien rakenne sekä ilmasto- ja maasto-olosuhteet poikkeavat melko runsaasti Suomen olosuhteista (ks. kuva 1). Prometheusta on testattu jo aiemmin Mellevä-hankkeessa syöttämällä siihen Metsäkeskuksen inventoinnin yhteydessä muodostamaa hilatietoa ja Ilmatieteenlaitoksen säätietoa. Nyt hilatiedon paloluokitusta lähdettiin kehittämään edelleen tarkemmaksi.

Pohja-aineistona hankkeessa käytettiin Suomen metsäkeskuksen kaukokartoitusinventointia varten mittaamaa maastokoealaineistoa. Aineistossa on yhdeksän metrin kiinteäsiteisiä maastokoealoja, joilta on mitattu lukupuista läpimitta, puuluokka, puulaji ja koepuista ikä sekä pituus. Lisäksi koelaloilta on määritetty maaperätiedot silmämääräisesti ja jokaisen koelalan sijainti on paikannettu noin 10 cm:n tarkkuuteen Trimble R2 GNSS -paikantimellä käyttäen jälkilaskentaa.

MAST-hankkeessa täydennettiin metsävaratiedon inventointiprosessin yhteydessä jo tehtyjä koelamittauksia mittaamalla lisätietona 198 koelalalta koelapuiden alimman elävän oksan etäisyys maasta. Koelamittaukset tehtiin syksyllä 2020 Outokummun inventointialueella siinä vaiheessa, kun metsävarainventoinnin koelalat oli saatu mitattua. Metsäinventoinnissa mitattiin noin 900 koelaa noin 200 000 hehtaarin inventointialueelta. Koelajien avulla muodostetaan inventointialueen metsiin puustotieto. Lisätiedot käytiin mittaamassa eri käynnillä jo valmiilta koelaloilta. Osasta Outokummun inventointialueen noin 900 koelaloista oli kuitenkin otettu ennakkoiden valokuvat inventoinnin yhteydessä osana MAST-hanketta, vaikka itse hanke ei ollut vielä lähtenyt käyntiin.

Alimman elävän oksan mittauksella pyritään tarkentamaan ennustetta metsäpalojen riskistä muuttua maastopalosta latvapaloksi. MAST-hankkeessa testataan, saadaanko laserkeilauksen hilatiedosta ennustettua jollakin mallilla alimman oksan keskimääräinen korkeus maanpinnasta. Koelalat seuloittiin noin 900 inventointikoelalan joukosta, niin että ne edustaisivat mahdollisimman hyvin eri kokoisia ja eri kehitysvaiheessa olevia männiköitä, kuusikoita ja lehtipuumetsiä. Koelaloilta otettiin lisäksi valokuvat neljään pääilmansuuntaan, että jokainen koelala saadaan varmasti luokiteltua oikeaan luokkaan metsäpaloluokituksessa ja saadaan näin mallia tarkennettua. Lisäkoelamittauksilla saatiin tarkka tieto koelalan puiden alimman oksan keskimääräisestä etäisyydestä maasta. Puita mitattiin 198 koelalalta yhteensä 2454 kpl. Osa koelaloista oli taimikkokoelaloja, joissa arvioitiin alimman elävän oksan korkeus maasta keskiarvona ympyräkoelaloilla.



Kuva 1. Kanadalainen paloluokka C-7: Keltamännikkö/Douglaskuusikko. Keltamäntyjä. [8, s.16]

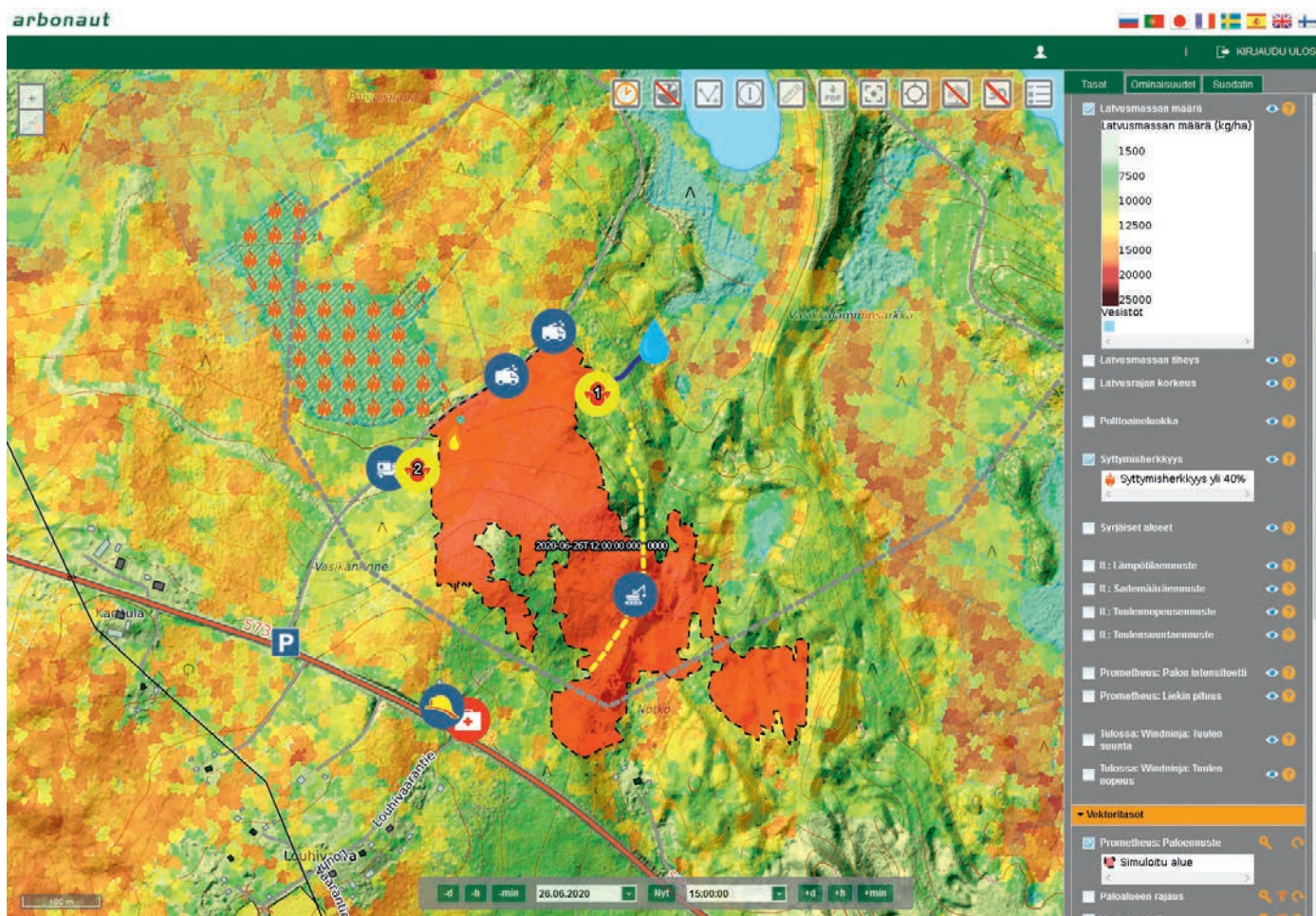
- Prometheuksessa on lisäksi neljä puutonta paloluokkaa. Tällaisia lisäkoealoja kuvattiin ja arvioitiin 27 kappaletta, tavoitteen ollessa vähintään 20 koealan arviointi. Nämä avoimen alueen koealat täytyi käsitellä uusina koealoina, sillä kaukokartoituksen koealojen mittauksessa ei oteta koealoja avoimista alueista. Koealajoukossa oli eri-ikäisiä aukkoja ja pieniä taimikoita 0–5 vuotta päätehakuusta.

Tietojen keräämistä varten siirrettiin ensin Outokummun inventoinnin koealaryväkset Metsäkeskuksen Aarni-järjestelmästä Exceliin ja seulottiin parhaiten soveltuvat ryväkset, jotta saataisiin tavoitemäärä eri pääpuulajeja sisältäviä koealoja tavoitekojakaumalla. Valitut koealat siirrettiin QGIS-järjestelmään, koska Metsäkeskuksen maasto-ohjelmassa on vain ne tietojensyöttökentät, jotka tarvitaan inventoinnin koealatoiminnassa. Niihin ei kuulu puun alin elävä oksa. Samoin Aarnissa on vain Metsäkeskuksen työssään tarvitsemat metsätietostandardin mukaiset tietokentät. Alin oksa ei sisälly niihin, eikä sille ole siis Aarnissakaan tietokentää. Lisäksi ei haluttu vaarantaa inventoinnin koealatietoja, jos uutta tietoa palautettaessa menetettäisiin inventoinnin koealatieta syystä tai toisesta. Vaihtoehtona oli kerätä tiedot paperille tai käyttää jotakin toista sovellusta. QFIELD-sovellukseen rakennettiin tarvittavat tietokentät koealan koepuiden alimman elävän oksan korkeuden tiedon keräämiseksi sekä myös puustottomien koealojen tietojen keräämiseksi sekä valokuvien linkittämisiksi koealoille. QFIELD asennettiin koealatieta keräävän henkilön käyttöön annettuun matkapuhelimeen ja koealat siirrettiin QFIELDiin QGISistä ja palautettiin tiedonkeruun jälkeen QGISiin. QFIELDin avulla myös suunnistaminen autolla lähelle maastokohteita ja maastokoalan paikantaminen onnistui hyvin.

## TUULIMALLIEN INTEGROINTI LEVIÄMISMALLEIHIN

Tuotetut maastopaloaineistot ja -mallit integroidaan edelleen Ilmatieteen laitoksen tuottamiin tuulimalleihin. Tuulimallien ja metsävaratiedon integraatiolla pyritään tuottamaan palotorjunnan henkilöstölle yksinkertainen käyttöliittymä päätelaitteille niin toimistoympäristöön kuin maastoonkin. Käyttöliittymän pilotointiin valittiin käytettäväksi Arbonaut Oy:n ProMS-palvelu, joka on monipuolinen pilvipohjainen paikkatietoalusta. Järjestelmää voi hyödyntää verkkoselaimen kautta tietokoneella sekä mobiilisovelluksen kautta puhelimella tai tabletilla. Hankkeen aikana Arbonaut on työskennellyt yhdessä Ilmatieteen laitoksen kanssa tarvittavan rajapinnan luomiseksi ProMS-palveluun. Rajapinnan avulla käyttäjä voi jatkossa demonstroida Prometheus-mallin maastopalon simulointia ProMS-palvelun kautta.

ProMS-palvelun kehitystyö voidaan jakaa kolmeen eri kokonaisuuteen: 1) Rajapintaintegroinnin toteuttaminen Ilmatieteen laitoksen Prometheus-mallinnuspalvelulle, 2) käyttöliittymätoteutus palosimulointipyyntöjen tekemiseksi ja 3) käyttöliittymätoteutus palosimulointitulosten näyttämiseksi karttakäyttöliittymässä. Ensimmäinen rajapintaintegraatioversio mallinnuspyyntöjen lähettämiseksi Ilmatieteen laitokselle on valmistunut maaliskuussa 2021. Palvelussa tehdyt palopistegeometriat lähetetään automaattisesti Ilmatieteen laitoksen mallinnusrajapinnalle sekä niiden tilannetta (valmiusaste) kysellään säännöllisesti. Rajapintaintegraatiota tullaan vielä mahdollisesti täydentämään jatkossa testauksen ja käyttäjäpalautteen perusteella (mahdolliset lähetettävät lisätiedot esimerkiksi mallinnuksen rajaamiseksi/käyttäjän tunnistamiseksi/jne.).



Kuva 2. ArbonautProMS -käyttöliittymän näkymä. (Kuva: Tuomo Puumalainen)



ProMS-palvelun käyttöliittymätoteutuksessa on edetty tekemällä testiympäristö, jolla voidaan luoda simulointipisteitä karttakäyttöliittymän avulla. Lisäksi järjestelmään on toteutettu ensimmäinen versio lisätyökaluille, joilla loppukäyttäjä voi määrittää helposti graafisella käyttöliittymällä halutun simulointiajan kohdan luoduille palopisteille (kalenteri/kellonaika). Palveluun on myös toteutettu ajanhallintatyökalujen ensimmäinen versio, joilla loppukäyttäjät voivat määrittää haluamansa ajan karttanäkymään. Valinnan jälkeen kaikki palvelussa näkyvät aikaulottuvuudesta riippuvat karttatasot päivitetään vastaamaan valittua tilannetta (palosimulaatio, muut ajasta riippuvat tasot kuten resursien paikat). (Ks. kuva 2.)

## KÄYTTÄJÄTESTAUS LEVIÄMISMALLIEN INTEGROINNIN JA KÄYTTÖLIITTYMÄN KEHITTÄMISESSÄ

Ensivaiheen käyttäjätestaus tehtiin maaliskuussa 2021 niin sanottuna luokkahuonetestauksena Pelastusopistolla. Kesällä 2021 käyttöliittymää testataan etäkäytössä maastopalotehtävissä sekä muissa vastaavissa tehtävissä, jossa käyttäjäliittymää voi testata maastossa. Tavoitteena on, että ryhmänjohtajat testaavat järjestelmää maastopalotilanteessa kentällä ja päällystö pelastuslaitoksen tilannekeskuksessa.

Luokkahuonetestien ensimmäiset kokeilut toteutettiin 22.3. ja 23.3.2021. Testiryhminä toimivat AMKA12- ja AMKN19-päällystöopiskelijakurssit. Testijaksot sisällytettiin Komppanian johtamisen -opintojakson harjoituspäiviin. Covid-19 -pandemias- ta johtuen luokkahuonetestit suoritettiin etänä Teams-ympäristössä. Opiskelijat toteuttivat käyttöliittymässä simulaatioita annetun maastopaloskenaari- on mukaisesti, opettajien ollessa valmiina avustamaan tehtävässä. Opiskelijat toimittivat testauksesta kirjallisen palautteen. Tavoitteena oli saada luokkahuonesimulaatiosta ensimmäiset käyttäjäarviot järjestelmän toimivuudesta sekä käyttömahdollisuuksista ja mahdollisista puutteista, niin teknisesti kuin sisällöllisestikin. Arbonaut työsti käyttöliittymää edelleen annetun palautteen perusteella. Toinen testaus käyttöliittymäl- le tehtiin Pelastusopistolla pelastustoiminnan johtamisen opetta- jien kanssa 19.5.2021.

Loppukeväästä tai alkukesästä 2021 käyttöliittymälle on suunniteltu kolme testijaks- oja yhteistyössä Pohjois-Karjalan pelastus- laitoksen kanssa osana kulutustöitä. Testit ovat luonnollisesti riip- puvia sekä säätilanteesta että Covid-19 -pandemian alueellisesta kehityksestä. Kaksi kulutuksesta on suunniteltu Outokum- mun maastoihin ja lisäksi Lieksassa on testaukseen tarjolla saari- ympäristö. Näiden testausten aikataulu ja toteutus suunnitellaan huhti-toukokuussa 2021. Käyttöliittymää tulisi päästä testaa- maan niin sanotussa todellisessa tilanteessa, jotta palon leviäminen maastossa saadaan mallinnettua. Kulutuksissa maastoa pol- tetaan vastatuuleen, mutta todellisessa maastopalotilanteessa pa- lo leviää luonnollisesti myötätuuleen. Tämän vuoksi kulutustes- taus itsessään ei anna mallinnuksen toimivuudesta realistista ku- vaa. Lieksan saariympäristössä tehtävä poltto mahdollistaisi idea- aliolosuhteissa palon luonnollisen leviämisen ja näin käyttöliit- tymän antaman mallinnuksen vertailun reaaliajassa aidon maas- topalon leviämiseen.

Pohjois-Karjalan pelastuslaitos on toteuttanut käyttäjäkoulutuk- sen pelastuslaitoksen testaajille. Pelastuslaitoksella testausta suo- ritetaan sekä toteutuneiden maastopalojen että simuloitujen pa- lojen kautta. Toteutuneiden maastopalojen osalta tarkastelemme leviämismallin ennustetta suhteessa todellisen palon laajuuteen. Lisäksi pyrimme testaamaan käyttöliittymää soveltuvin osin myös alkukesällä toteutettavien kulutusten yhteydessä.

## POHDINTA

On haaste sovittaa yhteen pelastustoiminnan johtamiseen ja met- säpaloja ennaltaehkäisevään metsänhoitoon soveltuva leviämismalli. Operatiivinen pelastustoiminnan johtaminen vaatii hyvin yksinkertaistettua käyttöliittymää ja tietoa, mitä lähemmäs var- sinaista toimintaa ja maasto-olosuhteita tullaan. Pelastustoimen johtamistasojen välillä tarve tiedolle ja sovelluksen eri ominai- suuksille voi poiketa keskenään. Johtokeskus, tilannekeskus tai pelastustoiminnan johtaja pystyy ja ehtii hyödyntämään enem- män tausta-aineistoa ja mallin tuomia ominaisuuksia kuin tilan- nepaikalla toimiva johtaja. Tilannepaikan johtajalle käytettävyy- den mobiilisovelluksena tai tabletilla on tärkeämpää.

Pelkästään pelastustoimen käyttöön tehtävä leviämismalli oli- si turhan suuritöinen ja kallis sen käyttömäärään ja hyödyntämi- seen nähden. Pelastusalan intressissä on toisaalta pitää ICT-kus- tannukset kurissa ja sitä kautta käytettävät johtamisjärjestelmät mahdollisimman vähäisinä. Leviämismallin saaminen osaksi ole- massa olevaa kenttäjohtajajärjestelmää on pelastustoimen etu, mut- ta samanaikaisesti haaste avoimelle yhteiskehittämiselle muiden toimialojen kanssa.

Yhteiskehittäminen on uudenlaista toimintatapaa pelastusalalla. Tehokas pelastustoimi edellyttää kuitenkin tulevaisuudessa vah- vempaa yhteistyötä ja kumppanuuksia eri alojen asiantuntijoiden kanssa. Tämän hankkeen kaltainen akateemisen tutkimustiedon ja pelastusalan käytännön tarpeiden yhteyden ja rajapinnan löytymi- nen on erinomainen esimerkki sekä kokemus tuleviin hankkeisiin.

## KIITOKSET

Kiitämme Palosuojelurahastoa MAST-hankkeen yhteiskehittämi- sen mahdollistavasta rahoituksesta.

## LÄHDELUETTELO

1. Ketola J. Hevonkuusessa palaa isosti – Tilastollinen selvitys ke- sän 2018 metsäpalojen leviämisestä. 2018. Pelastusopisto, Kuopio.
2. Kondo M.C., De Roos A.J., White L.S., Heilman W.E., Mockrin M.H., Gross-Davis C.A., ja Burstyn I. Meta-Analysis of Heterogeneity in the Effects of Wildfire Smoke Exposure on Res- piratory Health in North America. International journal of envi- ronmental research and public health, 2019. Vol 16, nro. 6, s. 960. doi:10.3390/ijerph16060960
3. Cascio W. E. Wildland fire smoke and human health. Science of The Total Environment, 2018. Vol. 624, s. 586–595.
4. Groot E, Caturay A, Khan Y, Copes R. A systematic review of the health impacts of occupational exposure to wildland fires. In- ternational Journal of Occupational Medicine and Environmen- tal Health, 2019. vol. 32, nro 2, s. 121–140.
5. SPAL2021. Metsäpalopuku antaa palomiehelle paremman suojan. Pelastusalan ammattilainen verkkojulkaisu 2021. [https:// pelastusalan.ammattilainen.fi/metsapalopuku-antaa-palomiehel- le-paremmen-suojan/](https://pelastusalan.ammattilainen.fi/metsapalopuku-antaa-palomiehel- le-paremmen-suojan/)
6. Kosenius A.K., Tulla T., Horne P., Vanha-Majamaa I. ja Kerke- lä L. Metsäpalojen torjunnan talous ja ekosysteemipalvelut – Kus- tannusanalyysi Pohjois-Karjalasta. PTT työpapereita 165. 2014. Pellervon taloustutkimus PTT, Helsinki.
7. Metsävaratiedon laatuseloste <https://www.metsakeskus.fi/si- tes/default/files/document/metsavaratiedon-laatuseloste.pdf>
8. de Groot, W.J. 1993. Examples of Fuel Types in the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) system. Forestry Canada, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Viitattu 20.5.2021. <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/11038.pdf>

# Ennakoivan analytiikan hyödyntäminen riskianalyysityössä: tekoälymallien soveltaminen rakennuspalojen ennustamiseen pääkaupunkiseudulla

## TIIVISTELMÄ

Ennakoivan analytiikan käyttö rakennuspalojen ennakoimisessa pelastusalla on uusi, mutta kansainvälisesti kasvava ilmiö. Pelastusallalla ennakoiva analytiikka on saamassa lisää huomiota myös Suomessa ja sillä on potentiaalia korvata perinteiset regressioanalyysimenetelmät. Paikkatieto ja big-data antavat pelastustoimelle uusia mahdollisuuksia ennakoita, missä erilaisia onnettomuuksia todennäköisesti tapahtuu, minkälaiset seuraukset olisivat todennäköisiä ja miten resursseja tulisi kohdentaa. Artikkelissa esiteltävässä tapaustutkimuksessa on kokeiltu erilaisia tekoälyä hyödyntäviä algoritmeja rakennuspalojen mallintamiseen pääkaupunkiseudulla. Kokeiluun käytettiin PRONTO:n onnettomuustietoja, Helsinki Region Infoshare -osoitetietoja ja Helsingin seudun ympäristöpalveluiden väestötietorudukkoa. Alustavien tulosten perusteella mallinnuksessa suoriutui parhaiten satunnaismetsäalgoritmi, joka pystyi ennakoimaan rakennuspaloja 91 prosentin tarkkuudella käytettyjen selittäjätekijöiden perusteella. Tutkimuksessa testattujen menetelmien avulla voidaan ennakoita onnettomuuksia aiempaa riskiperusteisemmin. Analytiikan teho perustuu kuitenkin tiedon määrään, joten siitä saatava hyöty on riippuvainen tiedon saatavuudesta.

## JOHDANTO

Viime vuosina ulkomailla on rakennuspalojen ennustamiseen käytettyjä tekoälyalgoritmeja testattu tapauskohtaisesti esimerkiksi USA:ssa, Kiinassa, Etelä-Koreassa ja Britanniassa. USA:ssa on myös otettu käyttöön erinäisiä tekoälyä hyödyntäviä laskennallisia työkaluja, kuten Firebird, Firecast ja Firecare. Kokeiluissa käytettyjen algoritmien suorituskykyä pystytään testaamaan ennustamalla harjoitusdatalla jo tapahtuneita onnettomuuksia. Testien perusteella algoritmit ovat pystyneet ennustamaan rakennuspaloja 60–90 prosentin tarkkuudella. Testeissä on mallinnettu asuin-

rakennusten ja liiketilojen paloriskiä sekä kohdekohtaisesti, että riskuruutujen ja korttelien tarkkuudella. Parhaiten suoriutuneisiin algoritmeihin kuuluvat muun muassa tukivektorikone, satunnaismetsä, neuroverkot ja erilaiset aggregointialgoritmit, kuten Adaptive Boosting ja Gradient Boosting. (Taulukko 1.)

Tällä hetkellä Suomessa käytössä oleva pelastustoimen riskianalyysi perustuu regressiomalliin, jossa muuttujina ovat ruudun asukasluku, kerrosala sekä niiden yhteisvaikutus [7, s.113]. Rakennuspalomallin riskuruudut ovat tarkkuudeltaan  $1 \times 1$  km ja se pystyy selittämään 50 prosenttia rakennuspalomäärien vaihtelusta. Regressiomallin ennustukset ovat tarkempia alueilla, joilla sattuu vähän rakennuspaloja verrattuna alueisiin, joilla niitä sattuu useammin. Rakennuspalojen syntyyn vaikuttavat kuitenkin monet erilaiset tekijät, jotka liittyvät sekä rakennettuun ympäristöön että kiinteistöissä asuviin ja niitä käyttäviin ihmisiin. Aiemmassa tutkimuksessa on havaittu, että sosioekonomiset tekijät, kuten asukkaan ikä, sukupuoli, perhe, tulot, koulutus ja synnyinmaa vaikuttavat olennaisesti rakennusten tulipalorisktiin [8].

Aiemmissa rakennuspaloriskejä mallintavissa tutkimuksissa selittäjätekijöinä on käytetty tietoa rakennuksista, onnettomuuksista ja sosioekonomista tietoa väestöstä [1–6]. Liiketilojen mallinnuksissa on myös käytetty liiketoimintaan liittyviä tekijöitä [5]. Selittäjätekijöiden tyypeissä ja niiden painoarvoissa mallinnuksessa on tutkimusalueiden välillä vaihtelua, mutta yleisesti mallinnuksia varten on testattu minimissään 12 [2] ja enimmillään useita tuhansia tekijöitä [9]. Mallien avulla pystytään tunnistamaan rakennuspaloja keskeisesti selittävät tekijät, mutta tekijöiden tunnistamiseen tulee testata kaikki mahdolliset ilmiöön välittömästi ja välillisesti vaikuttavat tekijät. Algoritmipohjainen lähestyminen mahdollistaa eri tekijöiden välisten yhteyksien tunnistamisen, mutta mallin tarkkuus on riippuvainen tiedon saatavuudesta.

Yhteiskunnassa on tällä hetkellä menossa merkittäviä tietojär-

## TAPAUSTUTKIMUKSET

Tutkimus	Lyhyt kuvaus	Käytetyt mallit (mallien tarkkuus AUC arvon mukaan)
<b>USA, Atlanta 2016</b> [1]	8223 liikehuoneistoa ja 58 selittäjätekijää. Hyödyntää Firebird -viitekehystä. Rakennuskohtainen riskiarvio.	SM (76–82 %), TVK (76–81 %)
<b>USA, Los Angeles 2017</b> [2] <i>*ei vertaisarvioitu tutkimus</i>	120 000 asuinrakennusta ja liiketilaa, 12 selittäjätekijää. Rakennuskohtainen riskiarvio.	SM (81 %), GBT (79 %)
<b>USA, Pennsylvania 2018</b> [3]	20 636 liiketilaa ja 350 korttelia, 226 selittäjätekijää. Rakennuskohtainen riskiarvio.	LR (53 %), AB (63–72 %), SM (70–74 %), XGB (73–75 %)
<b>Etelä-Korea, Seoul 2018</b> [4]	7000 rakennusta, 33 selittäjätekijää. Riskiarvio korttelin tarkkuudella.	NV (61–96 %), PM (62–64 %), TVK (63–68 %), NB (62–63 %)
<b>Englanti, Lancaster 2019</b> [5]	54 680 liiketilaa, 69 selittäjätekijää. Rakennuskohtainen riskiarvio.	AB (88–91 %), XGB (89–93 %), SM (82–99 %), MP (78–88 %)
<b>Kiina, Zhengzhou 2019</b> [6]	18 rakennustyyppikategoriaa, riskiarvio mallinnettu 1x1km ruutujen tarkkuudella.	LASSO (45 %), ES (63 %), LR (66 %), LR-P (57 %), TVK (56 %), TVK -P (63 %), GRU-LR (67 %), GRU-ES (67 %), DeepST (74 %), NeuroFire(76 %)

Taulukko 1. Kooste tapaustutkimuksista, joissa on testattu paikkatietoa hyödyntäviä rakennuspaloriskiä mallintavia algoritmeja. SM = satunnaismetsä, TVK = tukivektorikone, GBT= gradient boosting tree, LR = logistinen regressio, AB = adaptive boosting, XGB = extreme gradient boosting, NV = neuroverkot, PM= päätöspuumallit, NB= naive bayesian, MP = monikerroksinen perseptroniverkko, LASSO = lasso-regressio-menetelmä, ES = ehdolliset satunnaiskentät, LR-P = muokattu versio logistisesta regressiosta, TVK-P = muokattu versio tukivektorikoneesta, GRU-ES = ehdolliset satunnaiskentät, joita on tehostettu aidatuilla toistuvilla yksiköillä, GRU-LR = logistinen regressio malli, jota on tehostettu aidatuilla toistuvilla yksiköillä, DeepST = deep spatio-temporal residual networks.

jestelmien kehittämishankkeita, kuten ympäristöministeriön rakennetun ympäristön tietojärjestelmä [10] ja sisäministeriön onnettomuuksien ehkäisyn (OE) tietojärjestelmä [11]. OE-järjestelmä on pelastustoimen valvontasovellustietojärjestelmä, johon kerätään pelastuslaitoksia hyödyttävää tietoa valtakunnallisesti. Uusi tietojärjestelmä mahdollistaa esimerkiksi riskipohjaisemman valvontatoiminnan suunnittelun [12]. Tietojärjestelmien suunnittelu ja niiden välisten rajapintojen kehittämisen kannalta on tärkeää selvittää, mitkä tiedot ovat keskeisiä pelastustoimen riskianalyysin tekemiseksi tulevaisuudessa. Tässä vaiheessa tietojärjestelmien suunnitteluun voidaan vielä vaikuttaa ja siihen liittyvät päätökset voidaan ottaa huomioon muun muassa pelastustoimen tiedonsaantioikeuksia koskevan lainsäädännön valmistelussa.

Tässä artikkelissa esiteltävä tapaustutkimus on tehty osana SPEKin ennakoivan analytiikan tutkimushanketta [13]. Hankkeen tavoitteena on tuottaa analyysimenetelmiä, joilla pelastustoimen palveluita voidaan kohdentaa aiempaa riskiperusteisemmin. Käytännön kokeilujen avulla pystytään tunnistamaan tekijöitä ja aineistoja, joilla on keskeinen hyöty onnettomuuksien ennakoimisessa kansallisesti ja jotka tulee huomioida uusissa pelastustoimen tietojärjestelmissä. Hankkeessa testataan ulkomailla hyväksi todettuja algoritmeja valtakunnallisilla aineistoilla. Mallinnuksia varten haetaan aineistoja usealta eri tiedonkerääjätaholta. Haetuissa aineistoissa on tietoja 165 eri tekijästä, jotka saattavat vaikuttaa rakennuspaloihin joko välillisesti tai välittömästi. Tietopyyntöjen käsittelyaikana kokeiltiin eri algoritmeja rakennuspalojen ennustamiseen pääkaupunkiseudulla. Kokeiluun käytettiin Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO:n onnettomuustietoja ja netistä avoimesti saatavia aineistoja.

### AINEISTOT JA MENETELMÄT

Tapaustutkimuksessa käytettyihin aineistoihin kuuluvat Pelastustoimen resurssi ja onnettomuustilasto PRONTO:n tiedot, Helsinki Region Infosharen (HRI) osoitetiedot ja Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) pääkaupunkiseudun väestötietoruuduko. Kokeilun alueeksi valittiin pääkaupunkiseutu, koska alueelle löytyi tarpeeksi tarkat rakennuskohtaiset koordinaatit sekä väestötietoa avoimista tietolähteistä. Kokeiluun käytettiin aineistoja vuosilta 2013–2019, koska väestötietoruudukossa sitä vanhemmat tiedot on kirjattu isomassa resoluutiassa kuin näin vuosina.

#### PRONTO-aineistot

Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTOsta haettiin sekä rakennuspalot että rakennuspalovaarat vuosilta 2013–2019. Alueeksi rajattiin Helsinki, Espoo, Vantaa ja Kauniainen. Onnettomuustyyppin, vuoden ja tapahtumakunnan lisäksi muutettiin sisältyi pohjoiskoordinaatit, itäkoordinaatit ja osoite. Rajattu aineisto sisältää 5384 rakennuspaloa ja rakennuspalovaa-  
raa. (Kuva 1.)

#### HRI-osoitetiedot

Helsinki Region Infoshare (HRI) on avoimen datan sivusto, joka sisältää pääkaupunkiseudun kaupunkien julkisia tietovarantoja. HRI:n sivulta ladattiin Pääkaupunkiseudun osoiteluettelo [14], johon on kerätty tietoja Helsingin, Espoon, Vantaan ja Kauniainen kaupunkien kiinteistöistä ja kaavayksiköiden osotteista. Aineisto on julkaistu 2013 ja sitä päivitetään jatkuvasti. Aineisto ladattiin CSV muodossa. Aineiston muuttujista suodatettiin: ka-

- ▶ tunimi, osoitenumero, osoitenumero2, osoitekirjain, n (pohjoiskoordinaatit), e (itäkoordinaatit), ja kaupunki. Aineisto sisältää 139 338 osoitetta. (Kuva 2.)

### HSY pääkaupunkiseudun väestötietoruudukko

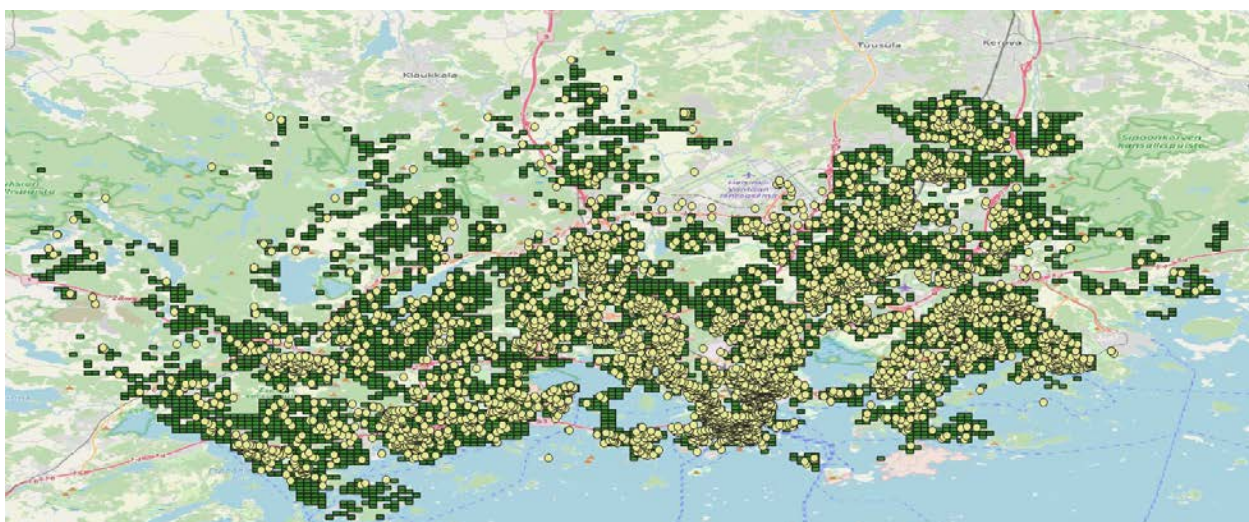
Pääkaupunkiseudun väestötietoruudukko on Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) ylläpitämä paikkatietoaineisto [15]. Aineiston muuttajat ilmaistaan ruuduittain, joiden koko on 250 × 250 metriä vuodesta 2013 alkaen. Sitä vanhemmat tiedostot on ilmaistu 500 × 500 metrin tarkkuudella. Muuttujiin sisältyy ruudun sisällä olevien rakennusten vakinaisten asukkaiden määrä, asumisväljyys (huoneistoala jaettuna asukasluvumäärällä) ja ikä, joka ilmaisee asukkaiden ikäjakauman, yhdeksään ikäluokkaan jaettuna. Ikäluokat ovat 0–9 vuotta, 10–19 v, 20–29 v, 30–39 v, 40–49 v, 50–59 v, 60–69 v, 70–79 v ja 80 vuotta täyttäneet ja vanhemmat. Aineistot ladattiin Shapefile-tiedostomuodossa vuosilta 2013–2019. (Kuva 1.)

### Osoitetietojen ja koordinaattien standardisointi

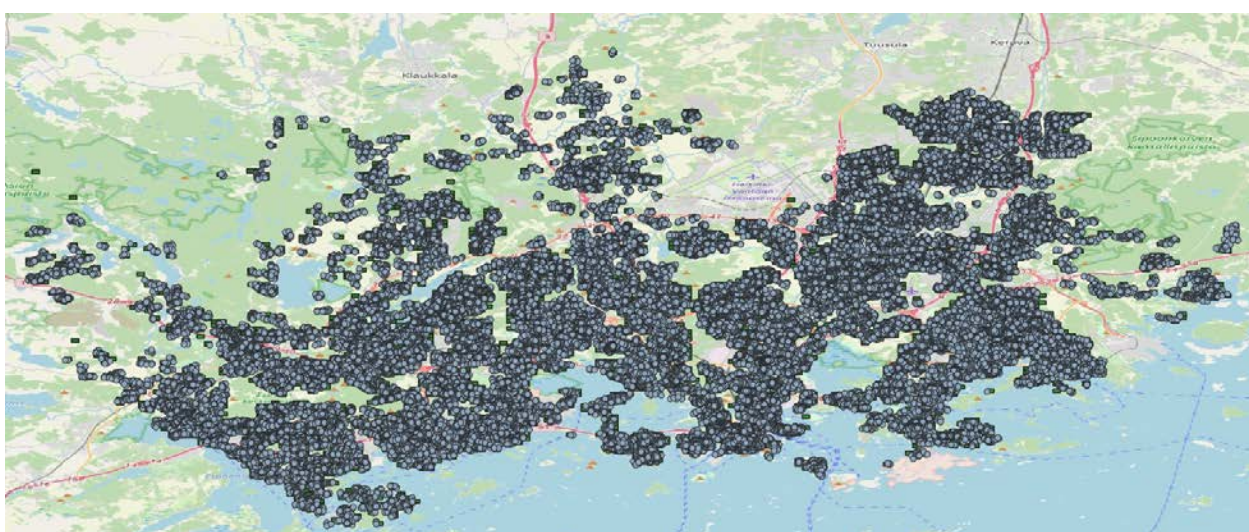
PRONTO-aineistoissa koordinaatit on merkitty 7-numeroisilla

luvuilla KKK3-koordinaatiston mukaisesti. HRI:n osoitetiedoston pohjoiskoordinaatit (n) on merkitty 7 numeron tarkkuudella ja itäkoordinaatit (e) 8 numeron tarkkuudella. Sekä osoitetietojen että väestötietoruudun koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25 (EPSG:3879). PRONTO-aineistossa koordinaatteja ei ole kirjattu standardisoidulla tavalla, esimerkiksi joissain tapauksissa samalle huoneistolle kirjatut koordinaatit eivät olleet identtisiä. Koska HRI:n koordinaatit vastaavat kaupunkien paikkatietopalvelusivustojen koordinaatteja, PRONTO:n rakennuspalojen ja palo-vaarojen koordinaatit korjattiin vastaamaan osoitetietoaineiston koordinaatteja.

Ainoa yhdistävä tekijä PRONTO:n ja HRI:n aineistoissa on osoite, mutta se on kirjattu eri muodossa aineistojen välillä. Molempien aineistojen osoitetiedot standardisoitiin koordinaattien linkittämistä varten. Linkitys tehtiin kaupunkikohtaisesti, koska eri kaupungeissa on samoja osoitteita. Kaikille PRONTO-tiedostossa oleville osoitteille ei löytynyt paria osoitetiedostosta. Tämä johtui osittain siitä, että PRONTO:n osoitetietoihin oli myös kirjattu muita tietoja kuin osoitetietoja. Vaikka molemmissa lähteissä on myös huoneistokohtaisia osoitteita, rakennuskohtai-



Kuva 1. Keltaiset pisteet kuvaavat pääkaupunkiseudulla tapahtuneita rakennuspaloja ja rakennuspalovaaroja vuosina 2013–2019. Taustalla oleva vihreä ruudukko on HSY:n väestötietoruudukko. Pohjakartta: OpenStreetMap®, lisenssi: Open Data Commons Open Database License (ODbL), OpenStreetMap Foundation (OSMF).



Kuva 2. HRI pääkaupunkiseudun osoitetiedot visualisoituna. Pohjakartta: OpenStreetMap®, lisenssi: Open Data Commons Open Database License (ODbL), OpenStreetMap Foundation (OSMF).

sia pareja löytyi enemmän (4905), joten niitä käytettiin aineiston tarkkuutena.

## Väestötietojen yhdistäminen rakennus- ja onnettomuustietoihin

HSY:n väestötietoruudun ikäluokissa on ilmoitettu ikäluokkaan kuuluvien asukkaiden määrä. Aineistojen analyysiä varten ikäluokkien asukasmäärät muutettiin asukkaiden osuudeksi asukasmäärästä. Ruudut, joissa asuu alle sata asukasta poistettiin, koska niihin ei ollut kirjattu ikätietoja tietosuojasyistä. Selittäjätekijöiden keskenäistä korrelaatiota tutkittiin, koska korrelaatio saattaa vaikuttaa mallinnuksen virhemarginaaliin [16]. Sitä varten käytettiin R-ohjelmistokielen Hmisc-laajennuspaketin [17] *rcorr*-argumenttia, joka luo korrelaatiomatriisin, jossa on sekä tutkittavien tekijöiden korrelaatiokerroin että niiden tilastollinen merkittävyys (p-arvo). Selittäjätekijöiden kesken ei löytynyt merkittäviä korrelaatioita.

Aineistojen analyysiä varten väestötiedot yhdistettiin osoitetietoihin koordinaattien perusteella. PRONTO-aineistoihin muututtajat haettiin vuosi kerrallaan niin, että väestötietoruudun (VTR) vuosi vastasi rakennuspalon tai palovaaran tapahtumavuotta. Muihin osoitteisiin väestötiedot haettiin vuoden 2019 VTR-tiedostosta. Yhteensä 101908 rakennusta sekä 3173 rakennuspaloa tai palovaaraa osui VTR-ruudukkoon. Lopuksi aineistot yhdistettiin ja luotiin ylimääräinen sarake osoittamaan aiemmin tapahtuneita onnettomuuksia. Sarakkeessa kohteiden, joissa on tapahtunut rakennuspallo tai rakennuspalovaara vastasi numeroa 1 ja loput kohteet numeroa 0.

## Käytetyt mallit ja mallien koulutus

Testejä varten valittiin kaksi rakennuspalojen ennustamisessa yleisimmin käytettyä algoritmia, satunnaismetsä ja tukivektorikone, sekä yleistettyihin lineaarisiin malleihin kuuluva logistinen regressio. Satunnaismetsä on päätöspuumalli, mikä on joukko-oppimista soveltava metodi, jossa yksinkertaisena algoritmikomponenttina on päätöksentekopuu [18]. Päätöksentekopuita on useita ja ne luokittelevat aineiston muuttujien avulla, oksien haaroissa olevien kysymysten perusteella. Tukivektorikone on lineaarinen luokintamalli, mikä yksinkertaistettuna jakaa datan eri luokkiin ja tekee päätelmiä niiden etäisyyksistä marginaalitasoihin [19]. Välitarkkojen etäisyyksiä rajoittavia tekijöitä kutsutaan tukivektoreiksi, jotka määrittävät lopullisen luokittelun. Logistinen regressio mallintaa vastemuuttujan ja selittävien muuttujien suhdetta arvioimalla todennäköisyydet logit-funktion avulla [20].

Mallinnuksissa käytettiin RStudiota, joka on tilastollisen laskennan ohjelmisto, jossa hyödynnetään R-ohjelmointikieltä. Satunnaismetsä kokeilussa malli koulutettiin *caTools*-laajennuspaketin [21] ohjelmistokoodilla. Ennustuksessa käytettiin *random forest*-laajennuspakettia [22] ja mallin suorituskyvyn arviointiin käytettiin *ROCR*-laajennuspakettia [23]. Tukivektorikonekokeiluissa hyödynnettiin sekä *Caret* [24] että *kernlab* [25]-laajennuspaketteja. Logistinen regressiomalli koulutettiin ja arvioitiin *dis-mo* [26]-laajennuspaketin ohjelmistokoodilla. Ennustukseen käytettiin *stats*-laajennuspakettia [27]. Mallien luotettavuuden arvioimiseksi käytettiin 10-kertaista ristivalidointimenetelmää, jossa 80 prosenttia aineistosta käytettiin mallin koulutukseen ja 20 prosenttia mallin testaamiseen.

## TULOKSET

### Mallien suorituskyky

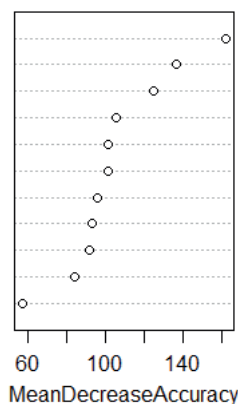
Mallien suorituskykyä arvioitiin käyttämällä ROC-käyrän AUC-arvoa. ROC-käyrässä tutkitaan mallin oikea- ja väärä-positiivi-

suusasteiden arvoja [28]. Käyrän alle jäävää pinta-alaa kutsutaan AUC:ksi ja se kuvaa luokittelijan tarkkuutta asteikolla 0.5–1. Mitä korkeampi arvo, sitä tarkempi ennustus. Lisäksi, satunnaismetsä-algoritmin arvioinnissa otettiin huomioon OOB error -arvo. OOB (out-of-bag) -error laskee päätöspuiden ennustusvirheitä käyttämällä bootstrap-aggregaatiota [29]. Parhaiten malleista suoriutui satunnaismetsäalgoritmi, jonka AUC arvo oli 0,91. Toiseksi parhaiten suoriutui tukivektorikone ja kolmanneksi logistinen regressiomalli. (Taulukko 2)

Malli	AUC	OOB
Satunnaismetsä	0,91	1,9 %
Tukivektorikone	0,82	-
Logistinen regressio	0,79	-

Taulukko 2. Mallien suorituskyvyn arviointi.

Ikä 70-79v  
Ikä 10-19v  
Ikä 20-29v  
Ikä 60-69v  
Asukasväljyys  
Ikä yli 80v  
Ikä 40-49v  
Ikä 30-39v  
Ikä 50-59v  
Asukasmäärä



Kuva 3. Selittäjätekijöiden painoarvo mallinnuksessa satunnaismetsäalgoritmia käyttämällä.

## Selittäjätekijöiden painoarvo mallissa

Selittäjätekijöiden painoarvoa arvioitiin kuvaamalla muuttujien keskimääräistä laskutarkkuutta (Mean Decrease Accuracy). MDA tutkii miten paljon tarkkuutta malli menettää, jos yksittäisen muuttujan ottaa pois selittäjätekijöiden joukosta. Tulosten perusteella ikäluokat 70–79 v, 10–19 v ja 20–29 vuotta olivat merkittävimpiä muuttujia. Vähintään painoarvoa oli asukasmäärällä. (Kuva 3)

## YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulosten perusteella rakennuspalonennustuksissa satunnaismetsäalgoritmi soveltuu parhaiten saatavilla olevan tietokokonaisuuden analysoimiseen. Tässä tapaustutkimuksessa mallinnetut riskiarvot ovat rakennuskohtaisia, mutta ennustuksien todellinen maantieteellinen tarkkuus on 250 × 250 metriä. Tätä tarkempia paikkatietoanalyysiin soveltuvia muuttujia ei ollut saatavilla avoimista tietolähteistä. Kokeillut menetelmät tarjoavat kuitenkin tarkempia ennustuksia kuin parhaillaan pelastustoimissa käytössä oleva riskianalysimalli.

Tutkittaessa eri selittäjätekijöiden painoarvoa malleissa, ikäluokalla 70–79 vuotta oli suurin vaikutus rakennuspalojen esiintyvyyttä kuvaavaan riskiarvioon. Tulee kuitenkin muistaa, että malli tekee ennusteet vain annettujen selittäjätekijöiden perusteella, eli sen luotettavuus todellisuudessa riippuu siitä, miten hyvin valitut tekijät kuvaavat tutkittua ilmiötä. Mallinnuksia varten tulisi testata useita eri selittäjätekijöitä, joista voidaan valita keskeisimmät laajempaa riskianalysia varten.

- Mallien tuloksia tulkitessa tulee myös ottaa huomioon, että kyseessä on rakennuspalojen määrän suhteen pieni otos. Pienien aineistojen mallintamisessa on suurempi ylisovittumisen riski. Ylisovittuminen tarkoittaa sitä, että algoritmi kehittää sellaisen luokittelijan, joka sopii täydellisesti käytettyyn opetusjoukkoon ja opettelee ulkoa opetusalkioiden suhteen kohdemuuttujaan. [30]

Parhailtaan käynnissä olevan SPEKin ennakoivan analytiikan tutkimushankkeen tavoitteena on saada rakennuskohtaisia muuttuja-aineistoja, jotta riskiarvot pystytään määrittämään rakennuksien tarkkuudella. Rakennuskohtaisia riskiarvioita voitaisiin hyödyntää esimerkiksi valvontakäyntien priorisoimisessa ja pelastustoimen toimintavalmiuden suunnittelussa. Aiempia vastaavallaisia tutkimuksia yhdistää tiedon saamisen haastavuus, mikä on tuottanut haasteita myös tässä hankkeessa.

## KIITOKSET

Tutkimus on tehty osana SPEKin ennakoivan analytiikan tutkimushanketta, joka on Palosuojelurahaston rahoittama. Kiitos rahoittajalle ja artikkeleita kommentoineille kollegoille. Kiitos Helsinki Region Infosharelle ja Helsingin seudun ympäristöpalveluille avointen aineistojen tarjoamisesta ja ylläpidosta.

## LÄHDELUETTELO

1. Madaio, M., Chen, S.T., Haimson, O.L., Zhang, W., Cheng, X., Hinds-Aldrich, M., Chau, D.H. and Dilkina, B., 2016, August. Firebird: Predicting fire risk and prioritizing fire inspections in Atlanta. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 185–194).
2. Jonathan Jay, 2017. How we predicted building fires in Baton Rouge, LA – working version. Urban Analytics Blog (2017). <https://scholar.harvard.edu/jonjay/blog/how-we-predicted-building-fires-baton-rouge-la-working-version> [15.5.2021]
3. Singh Walia, B., Hu, Q., Chen, J., Chen, F., Lee, J., Kuo, N., Narang, P., Batts, J., Arnold, G. and Madaio, M., 2018. A dynamic pipeline for spatio-temporal fire risk prediction. In Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (pp. 764–773)
4. Seong-gwan Hong & Seung-ryul Jeong, 2018. Development and Comparison of Data Mining-based Prediction Models of Building Fire probability. Internet Information Society, 19(6), pp.101–112.
5. Dang, T. T., Cheng, Y., Mann, J., Hawick, K., & Li, Q., 2019. Fire Risk Prediction Using Multi-Source Data: A case study in Humberside area. In 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC) (pp. 1–6). IEEE.
6. Wang, Q., Zhang, J., Guo, B., Hao, Z., Zhou, Y., Sun, J., Yu, Z. and Zheng, Y., 2019. CityGuard: Citywide Fire Risk Forecasting Using A Machine Learning Approach. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 3(4), pp.1–21.
7. Tillander, K., Matala, A., Hostikka, S., Tiittanen, P., Kokki, E., & Taskinen, O., 2010. Pelastustoimen riskianalysimallien kehittäminen. Espoo, VTT Tiedotteita, 2530, 117.
8. Nilson, F., & Bonander, C., 2020. Household fire protection practices in relation to sociodemographic characteristics: evidence from a Swedish national survey. Fire technology, 56(3), 1077–1098.
9. Apolitical – the global earning platform for government. New York City is saving lives by predicting where fires will break out. [https://apolitical.co/en/solution\\_article/new-york-city-saving-lives-predicting-fires-will-break](https://apolitical.co/en/solution_article/new-york-city-saving-lives-predicting-fires-will-break) [16.5.2021]

10. Ympäristöministeriö, 2021. Rakennetun ympäristön tietojärjestelmä. <https://ym.fi/ryhti> [16.5.2021]

11. Sisäministeriö, 2020. Alustava kilpailutettavan hankinnan kohteen kuvaus – Onnettomuuksien ehkäisyn tietojärjestelmä, Sisäministeriö, Pelastusosasto. <http://dynastyjulkaisu.pohjoiskarjala.net/siunsote/kokous/2021136-7-25738.PDF> [16.5.2021]

12. ePressi, Uudella valvontasovelluksella ehkäistään onnettomuuksia ja sujuvoitetaan palotarkastuksia. <https://www.epressi.com/tiedotteet/hallitus-ja-valtio/uudella-valvontasovelluksella-ehkaistaan-onnettomuuksia-ja-sujuvoitetaan-palotarkastuksia.html> [16.5.2021]

13. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö, 2020. Ennakoivan analytiikan tutkimushanke. Hankesuunnitelma. Lue lisää: SPEK ajankohtaiset uutiset <https://www.spek.fi/tekoalylla-voi-ennustaa-tulipaloja/> [16.5.2021]

14. Helsinki Region Infoshare (HRI), 2021. Pääkaupunkiseudun osoiteluettelo. Aineiston ylläpitäjä on Helsingin kaupunkiympäristön toimiala / Kaupunkimittauspalvelut ja alkuperäinen tekijä Helsingin, Espoon, Vantaan ja Kauniaisten mittausorganisaatiot. Aineisto on ladattu Helsinki Region Infoshare -palvelusta 26.11.2020 lisenssillä Creative Commons Attribution 4.0. <https://hri.fi/data/fi/dataset/seudullinen-osoiteluettelo> [16.5.2021]

15. Helsingin seudun ympäristöpalvelut, 2021. Pääkaupunkiseudun väestötietoruudukko. <https://www.hsy.fi/ymparistotieto/avoindata/avoin-data---sivut/paakaupunkiseudun-vaestotietoruudukko/> [16.5.2021]

16. Aliverti, E., Lum, K., Johndrow, J. E., & Dunson, D. B., 2018. Removing the influence of a group variable in high-dimensional predictive modelling. arXiv preprint arXiv:1810.08255.

17. Harrell Jr, F. E., & Harrell Jr, M. F. E., 2019. Package 'hmisc'. CRAN2018, 2019, 235–236.

18. Telivuo, Suvi, 2018. Satunnaismetsä-koneoppimismenetelmä, teoria ja soveltaminen. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto.

19. Noble, W. S., 2006. What is a support vector machine? Nature biotechnology, 24(12), 1565–1567.

20. Kleinbaum, D. G., Dietz, K., Gail, M., Klein, M., & Klein, M., 2002. Logistic regression. New York: Springer-Verlag.

21. Tuszynski, J., & Khachatryan, M. H., 2013. Package 'caTools'.

22. RColorBrewer, S., & Liaw, M. A., 2018. Package 'randomForest'. University of California, Berkeley: Berkeley, CA, USA.

23. Sing, T., Sander, O., Beerenwinkel, N., & Lengauer, T., 2007. The ROCR package. R Vignette.

24. Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, Z., Kenkel, B., R Core Team, Benesty, M., Lescarbeau, R., Ziem, A., Scrucca, L., Tang, Y., Candan, C., Hunt, Y., 2020. Package 'caret'. The R Journal, 223.

25. Karatzoglou, A., Smola, A., Hornik, K., & Karatzoglou, M. A., 2019. Package 'kernlab'. CRAN R Project.

26. Hijmans, R. J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., & Hijmans, M. R. J., 2017. Package 'dismo'. Circles, 9(1), 1–68.

27. R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

28. Provost F, Fawcett T., 1998. The case against accuracy estimation for comparing induction algorithms. Proc. 15th Intl. Conf. On Machine Learning, s. 445–453

29. Breiman, L., 1996. Out-of-bag estimation. Berkeley, California: Department of Statistics, University of California. <https://www.stat.berkeley.edu/pub/users/breiman/OOBestimation.pdf> [16.5.2021]

30. Lever, J., Krzywinski, M., & Altman, N., 2016. Points of significance: model selection and overfitting.

# Coupled CFD-FE simulations of fire intervention in large structures

## Abstract

Long span structures made of steel have become popular over the years in the construction industry due to the economic feasibility of this material. The open frame construction with suitable ventilation and high fire load leads to the possibility of travelling fires in these structures. This work investigates the feasibility of using coupled CFD-FE simulations to aid the planning of fire intervention tactics and the effectiveness of structural cooling approach during firefighting. The water sprays used for firefighting was characterized using bucket tests and validated using FDS. The cooling ability of the water sprays was studied by applying the water sprays to a fire exposed steel beam and the CFD-FE coupling was validated using these tests. The validated method was used to simulate the fire intervention of a travelling fire scenario in a warehouse with exposed steel trusses. Subsequently, stress analyses of the cooled and uncooled trusses were performed, and deformation behaviour was studied. The results show that the CFD-FE coupling provides a safe and reliable methodology for studying the influence of fire and the fire intervention tactics on structural elements.

## INTRODUCTION

Fire safety design attempts to reduce the possibility of fire occurrence whereas firefighting attempts to mitigate the consequences of a fire. Generally, in the event of a fire, firefighters have a wide range of possible techniques and procedures to deal with the fire. For cellulosic fires, water is the most effective extinguishing agent and is mostly applied manually using water sprays. The cooling ability of water is mainly due to its latent heat of vaporization. It requires around 2600 kJ of energy to evaporate a mole of water and this makes water an effective heat sink [1]. Though, the practical efficiency of a water spray depends on several factors such as the ability of the spray to penetrate the flames, the droplet sizes and the actual amount of water that effectively contributes to the extinguishment process. Grant et al. [1] and Rasbash [2] present a comprehensive review of several studies regarding the ex-

tinguishment of solid fires. Many of these studies have been conducted at experimental scales and report very small flow rates. Grant et al. report that practical rates of water required for extinction is usually one order of magnitude higher than the experimental values [1]. There have been very few large-scale experiments [3, 4] analysing the water requirements for large-scale realistic fires. Sårdqvist reports that there is a huge variation in the existing recommendations regarding the amount of water required for different firefighting operations [3].

During a firefighting operation, the incident commander must choose between two tactical options based on the fire severity and resource availability: 1. Offensive tactic or 2. Defensive tactic. An offensive tactic aims to extinguish the fire as quickly as possible by attacking the seat of the fire. A defensive tactic focuses on the containment of fire and rescue operations. The offensive approach is usually used when sufficient water resources are available at the fire location and defensive approach is used when sufficient resources are not available at the fire scene or when rescue operations are prioritised [5]. The choice of the appropriate tactic determines the success of the firefighting operation. In large open-frame structures with unprotected structural elements exposed to a travelling/spreading fire scenario, there is a significant risk of structural collapse. Attempting to enter the building can be risky for firefighter safety and this poses the question: Does structural cooling ensure that firefighters can safely enter a building?

The objective of this work is to investigate the feasibility of using numerical simulations for tactical planning of firefighting operations. The effectiveness of structural cooling as an alternative to the commonly used gas cooling and fuel cooling approaches is also investigated.

## NUMERICAL METHODS

For the fire simulations, the Large Eddy Simulation (LES) -based CFD code, Fire Dynamics Simulator (FDS versions 6.7.3 and 6.7.5) [6] is used for the fire simulations in this study. The default

- ▶ Very Large Eddy Simulation (VLES) mode was used to model the flow turbulence. The eddy viscosity was modelled using Deardoff turbulence model. The default radiation model of FDS was used and heat transfer within a solid is computed using the one-dimensional heat conduction equation. The convective term is computed using a combination of natural and forced convection correlations [6]. The water spray is modelled as individual lagrangian particles dispersed within a continuum gas phase medium. The momentum, heat and mass transport between the water particles and the gas/solid phase is handled through various coupled Eulerian equations [6].

The finite element analysis was performed in two stages, the first is thermal analysis and the second is stress analysis. The temperature results obtained from thermal analysis were used for the subsequent stress analysis. This type of simulation is termed as 'sequentially coupled thermal-stress analysis' [7]. FE models in the 3D domain were created and discretized in 'Abaqus' using DS4 shell elements for transient thermal analyses, and S4R shell elements for stress analyses. An explicit solver for stress analyses was used to capture the highly non-linear behaviour of the structures having non-linearity in both material and boundary conditions and, dynamic effects were kept under acceptable limits. The thermal properties of steel were adopted from EN 1991-1-2 [8]. Convection coefficient and the resultant emissivity were provided through FDS [6] calculations, along with the temperature boundary conditions, as explained below. For the material modelling, the temperature dependent stress-strain curves for steel defined in EN 1993-1-2 [9] were used.

A Fortran based unidirectional coupling tool called FDS2FEM [10] was used to generate an appropriate coupling between a fire model/curve and a FE model. The adiabatic surface temperatures were transferred to the Abaqus model as boundary conditions. The adiabatic surface temperature is used here instead of the steel surface temperatures as the 1D heat conduction solver employed in FDS would introduce additional uncertainties into the calculation. The boundary conditions are transferred using a procedure called nodeset to device mapping. The AST values in the fire simulation are obtained by placing several point measurements (devices) along the structure. These devices are then assigned to specific nodesets of the Abaqus model. The desired transfer quantity from these devices is transferred to the FE model along with a constant user specified convective heat transfer coefficient (known as film coefficient within the FE model). With this approach, the accuracy of the FE heat transfer calculation depends on the number of device measurements recorded in the fire model.

## EXPERIMENTAL DESCRIPTION - KUOPIO BURN TESTS

### Bucket tests

The bucket test experiments were conducted in a 24 m × 8.4 m × 5.2 m hall. Two typical firefighting water sprays were used for the

bucket test characterization: a narrow spray (1.0 m wide) with a long throw and a wide spray (3.0 m wide) with a short throw. The throw of the narrow spray was measured to be approximately 38 m and the wide spray was 17.5 m without accounting for the wind effects. The nozzle pressure was around 10 bar and the flow rate measured behind the nozzle was approximately 650 L/min and 1750 L/min for the narrow and wide sprays respectively. The water monitor and bucket arrangement pattern used in the buckets tests is shown in Figure 1. Each spray width was characterized using four buckets tests in which the bucket patterns were varied to resolve the spray as accurately as possible. The data from the four tests were combined to produce final water distribution pattern of the spray.

### Burn tests

The burn tests were carried out with two sprays widths in a 24 m × 8.4 m × 5.2 m hall. A 3.0 m long, S300 steel I-beam (IPE 200) was heated using a kerosene pool fire for 6 minutes and cooled using the 1.0 m or 3.0 m wide sprays. All doorways except the main entrance at the front of the hall were closed. The burn tests were carried out using 15 L of kerosene in a 1.0 m × 1.0 m × 0.5 m pan with a free height of 20 cm. The distance between the lower flange of the beam and the fuel surface was 1.6 m. The heating period (pre-burn time) of the beam before the water spray is applied was approximately 6.0 minutes in all the tests. The steel temperature measurements were made using eleven k-type thermocouples, arranged along the flanges and web of the beam but only three web thermocouples which were shielded from the water spray are used for the analysis reported here. The steel temperatures were also recorded using an infrared camera (FLIR A660c) during the tests to supplement the thermocouple measurements.

## VALIDATION: CFD AND FEM COOLING PREDICTIONS

The validation simulations of the bucket and burn tests were performed using Fire Dynamics Simulator version 6.7.3. The spray modelling was performed using the measured parameters of the experimental spray. In the experiments, buckets tests were performed for 1.0m and 3.0 m wide sprays but only the 1.0 m spray results are presented in this paper. The comparisons of the experimental and simulated results for the 1.0 m spray are shown in Figure 2.

The domain for the burn tests was modelled using seven parallel meshes with rectilinear grid elements. The region with the fire was modelled using a 10 cm mesh and the rest of the domain with a 20 cm mesh. The model of the experiment domain is shown in Figure 3 (left). The Test 2 and 4 of the burn tests are used for the validation study as the cooling in these tests begins during the steady heating phase of the beam. The fire was modelled based on the properties of kerosene ( $C_{10}H_{20}$ ) with a heat release rate per unit area of  $1300 \frac{kW}{m^2}$ . A time dependent function was used to



Figure 1: The TFT Blitzfire series water monitor used the tests (left) and the arrangement of the buckets for the 1.0 wide spray (middle) and 3.0 m wide spray (right).



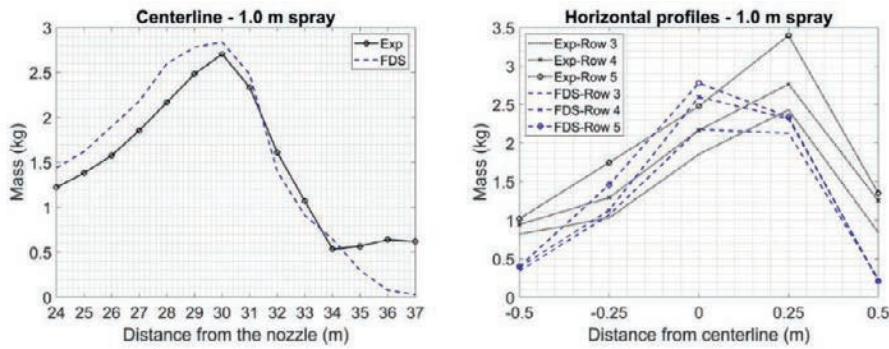
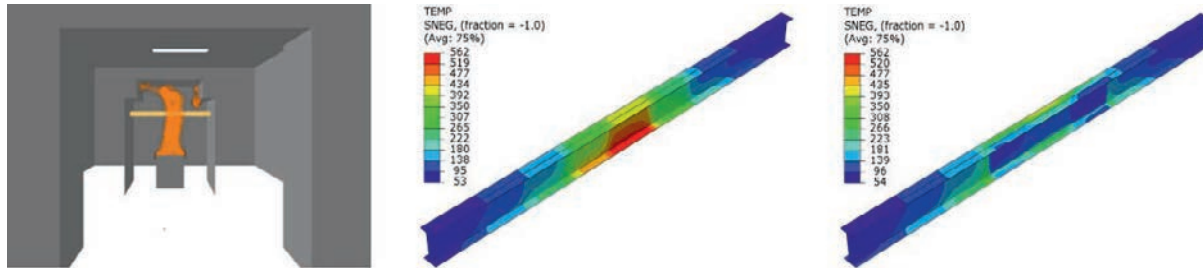


Figure 2: Comparison of the experimental and simulated values of accumulated water mass at different locations for the 1.0 m wide spray.

Figure 3: The FDS model of the experimental setup for the Kuopio burn experiments showing the substructure, fire, and the beam arrangement (left), temperature development in the FE model at the end of heating period (middle) and at the end of the cooling period (right)



control the behaviour of the heat release rate.

The FE model of the 3.0 m steel beam was mapped with the adiabatic surface temperature results from the fire simulation for the heating phase using the FDS2FEM coupling tool. The temperature contours on the steel beam obtained from FE thermal analysis as a result of heating and subsequent cooling can be seen in Figure 3 (middle and right). The FE results are compared with the test values in Figure 4. The FE results of TC3, TC6 and TC9 were underpredicted in the simulation by 5 %, 30 % and 50 %, respectively in the heating phase. In the cooling phase, TC3 and TC9 results were overpredicted by 2 % and 40 %, respectively, while TC6 results were underpredicted by 10 %.

## CASE STUDY: COUPLED CFD-FE SIMULATIONS

### Fire development

For the coupled fire-structure simulations, a warehouse structure design with exposed steel frames was provided by Ruukki Oy and this served as the basis of the simulation. The computational domain for the fire simulation was 38.0 m × 30.8 m × 9.6 m with a ventilation opening of 24.0 × 9.6 m. The fire load was assumed to be arranged as 4.2 m high vertical stacks with a spacing of 1.0 m between the stacks and the fire load density was assumed to be 1300  $\frac{kg}{m^2}$ . The initial fire was assumed to start at the closed end of the structure at the floor level. The simulation grid size was 20 cm, and the domain was decomposed into 44 meshes, assigned to a separate parallel process.

Without any fire intervention the temporal fire development in the structure can be described in three phases: 1. Growth phase 2. Rapid spread to the opening and burning at the opening and 3. Backward spread phase. The phases of the development in terms of oxygen concentrations and temperatures are shown in Figure 5.

### Fire suppression

A series of fire intervention simulations was carried out for the fire scenario described in the previous section. The simulation parameters that were varied are suppression time, number of monitors, residence time, sweep angle and the number of sweeps. In the scenario that is explored in this case, the narrow spray (1.0 m wide)

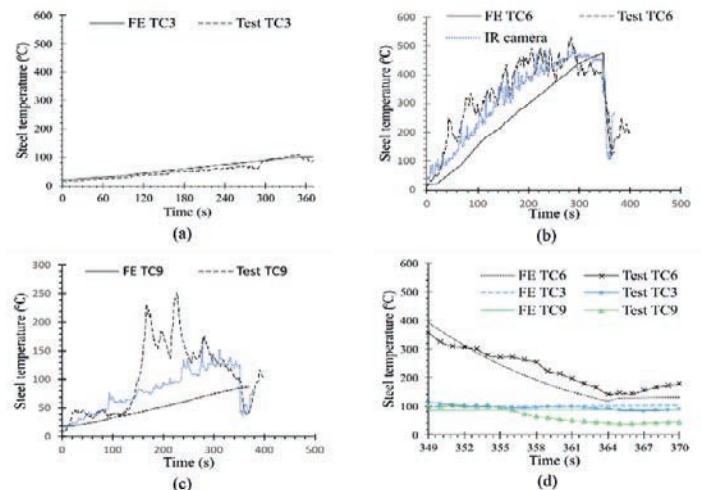


Figure 4: Temperature development at different locations of the steel beam with cooling using 1 m spray (a) Thermocouple 3 (b) Thermocouple 6 (c) Thermocouple 9 (d) Cooling phase (FE: finite element; TC: thermocouple).

parameters were used as the truss that is cooled is situated 33.5 m away from the nozzle at a height of 7.0 m. Figure 6 shows the setup for different number of sprays. The results are presented as the impact the sprays have on the heat release rate (HRR) of the fire.

In the first set of simulations, shown in Figure 7, we assume that the fire brigade starts the suppression at 900 s (15 min), which is the median fire service help delivery time in Finland. The fire at this point has engulfed multiple stacks of the fire load over an area of approximately 12 m<sup>2</sup>. The starting time of 900 s can be considered a critical value, as the transition from a localized fire to a spreading fire occurs around 1000 s. This gives the fire brigade about 1.5 minutes to prevent fire spreading. The suppression action was carried out for 180 seconds assuming only a limited water resource is available. The predicted heat release rates show that the efficiency of the suppression action is proportional to the number of sprays used i.e the amount of water used for suppression. ▶

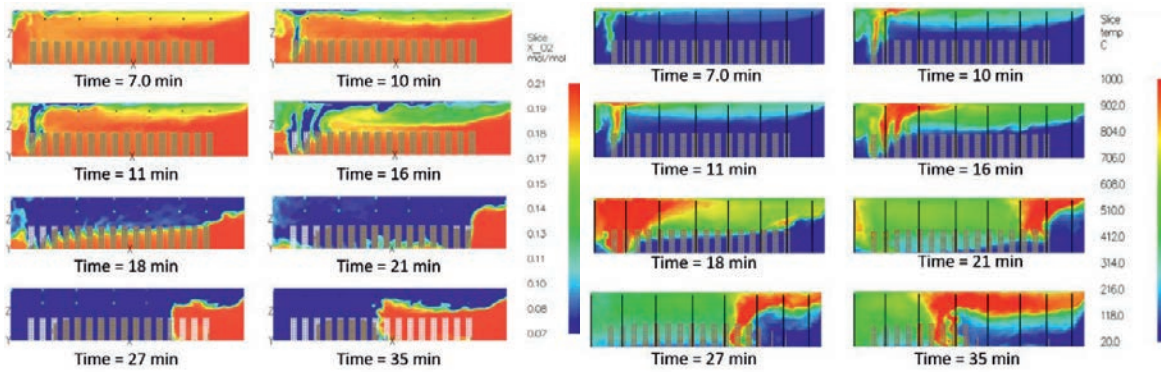


Figure 5: Predicted oxygen concentrations (left) and temperature (right) along the centre of the compartment at different times from scenario 1: fire path perpendicular to the trusses.

Figure 6: Illustration of the different spray scenarios, their arrangement and region of impact.

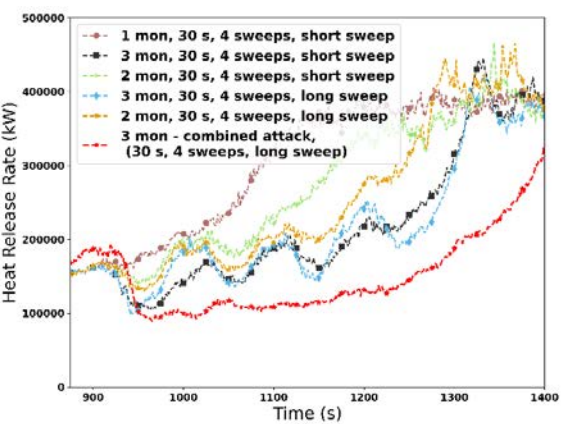
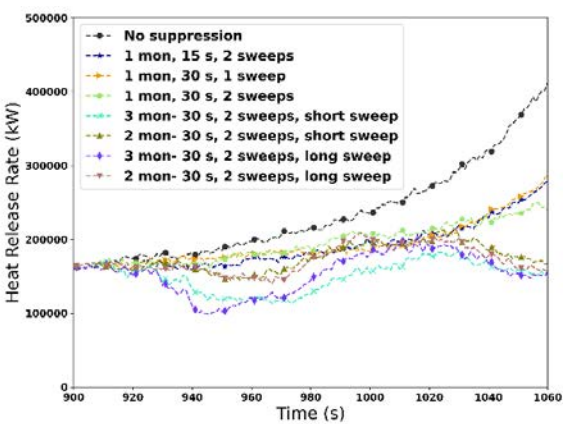
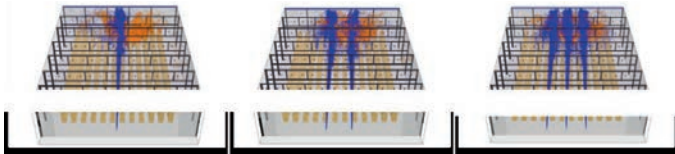


Figure 7: Comparison of the influence of suppression on the heat release rate curves for the different spray configurations for suppression duration of 180 seconds (left) and 360 seconds (right).

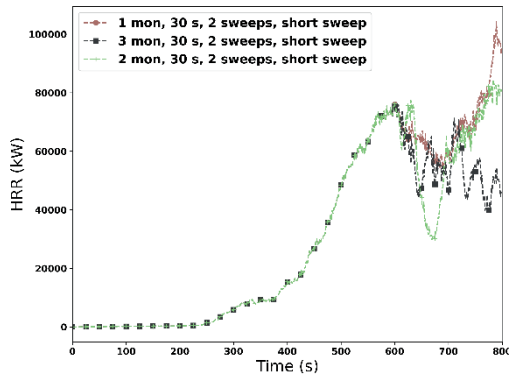
In the second set shown in Figure 7, the suppression duration was increased based on the study by Särdaqvist which reports that a minimum suppression period of 360 seconds was required for extinction [3]. To test the effect of the suppression duration, another set of simulations was performed with a suppression duration of 360 seconds. Additionally, the influence of a combined attack tactics is also simulated where two sprays cool the structure and one spray (spray in the middle) directly attacks the fire. The predicted results show that longer suppression duration decreases the HRR until the end of the suppression period after which it increases again. The combined suppression tactic produced more significant HRR reduction than the other configurations.

In the third set, another set of simulations were performed where the suppression started at 600 s (10 min) after the ignition. Three tests were selected from Table 1 (Sup-3, Sup-4 and Sup-5). The suppression duration was 180 seconds as it is assumed that if a fire truck arrives at 10 minutes it is likely to a truck with a smaller capacity. In this set of simulations, the base of the fire was attacked directly instead of attempting to cool the structures because at this point the gas temperatures around the structure is around 500 °C. The results in Figure 8 show that a direct attack for 180 s at 10 min from the ignition with only one or two monitors is not successful; HRR continues to increase after a short decay. With three monitors, there is longer period of suppression, but the fire still continues to spread.

**Structural analysis**

In this analysis, a 31 m long truss is exposed to fire for 900 s, then the centre of the truss is sprayed with three 1 m sprays for 360 s. The temperature development and deformation of the truss is an-

Figure 8: Comparison of the influence of suppression at 600 seconds on the heat release rate for the different spray configurations.



alysed, and comparison is made with the truss without fire-intervention. In Figure 9, the temperatures recorded at 11 locations of the bottom chord of the trusses are presented for the different times of the FE thermal analysis. In Figure 9 (a), the truss starts to heat at the mid-span from 600 s seconds onwards. The peak temperature of 950 °C is recorded at the mid-span at 900 s. The maximum difference of temperature between the mid-span and the ends of the truss is also observed at 900 s. The highest overall temperature of the whole span of the truss is observed at 1260 s, after which the temperature gradually comes down towards the end of simulation at 2100 s. In Figure 9 (b), The temperatures at the mid-span drop by approximately 750 °C after 360 s of cooling. In 60 s of post-suppression simulation, the mid-section temperature increases again by about 350 °C. The studies [11] showed that, when cooled from 900 °C to 20 °C, the steel retains about 50 % to 80 % strength. Therefore, the structural response after cooling stage will be interesting for the future studies.

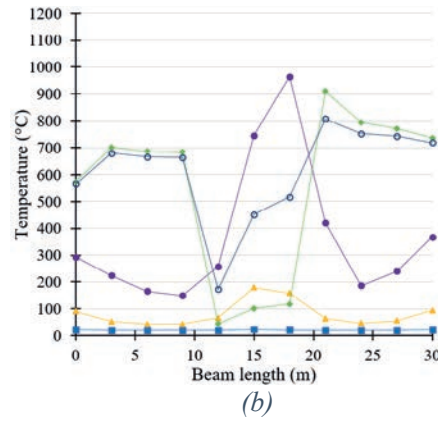
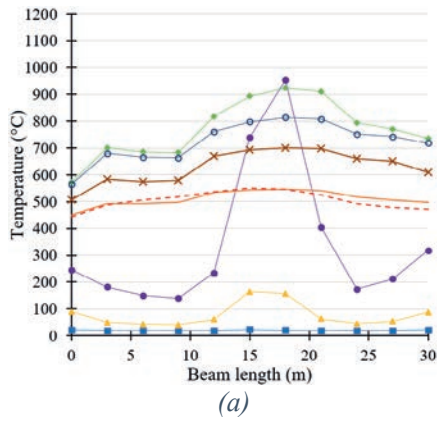


Figure 9: Steel temperature along the span of the truss for the different times of simulation for the bottom chord: (a) without suppression (b) with suppression.

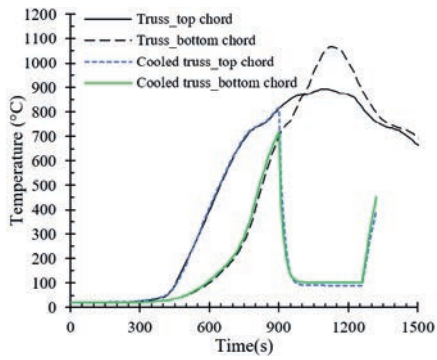


Figure 10: Temperature development at the mid-span of the studied truss without and with cooling.

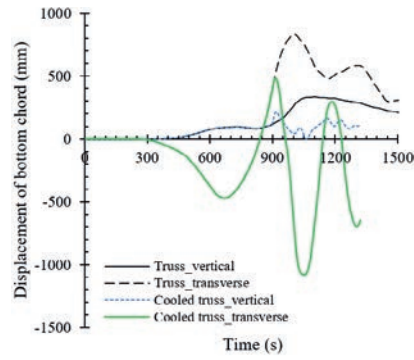


Figure 11: Lateral and vertical displacement at the mid-span of the truss' bottom chord without and with cooling.

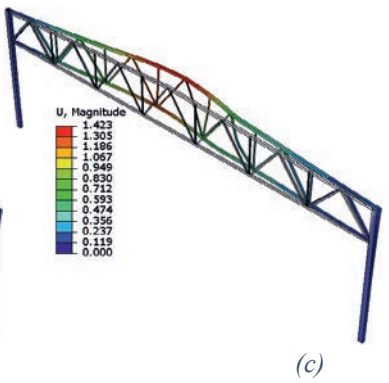
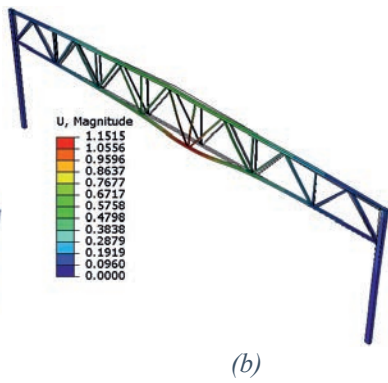
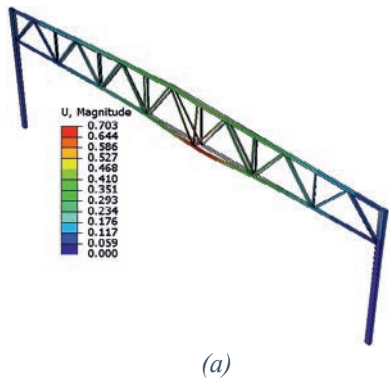


Figure 12: Deformed trusses superimposed on undeformed trusses with displacement (m) contours: Truss at 900 s (left), 1000 s (middle) and 1050 s (right).

In Figure 10, the temperature development at the mid-span of the trusses are presented for the top and the bottom chords. The temperature of the top chord increases faster than the bottom chord up to 1000 s, after which the bottom chord records higher temperature with a difference of 200 °C approximately. It is noteworthy that the higher temperature of the top chord is opposite to the scenario which would normally result from an analysis assuming a local fire plume. The effects of the vertical temperature distributions on the mechanical response need therefore further research. For the cooled truss, the temperature drops at 900 s with an equal gradient for the top and bottom chords and achieves a temperature just below 100 °C in 100 seconds. The maximum temperature reached at the mid-span for the cooled truss is 800 °C, which is approximately 300 °C lower than the truss without cooling. In Figure 11, the vertical and transverse displacements of the bottom chord of the studied truss at the mid-span are presented. The positive vertical displacements suggest that the trusses expanded outwards due to thermal bowing caused by the higher temperatures developed on the top chord. The vertical displacement of the uncooled truss continued to increase after 900 s while

the displacement of the cooled truss was reduced back to zero. In Figure 12, the deformed trusses are superimposed on the undeformed trusses at different times of the simulation to demonstrate the extent of the deformation. In Figure 12 (a), the truss experiences maximum transverse deformation at 900 s before the start of cooling. In Figure 12 (b), the un-cooled truss experiences maximum transverse deformation at the mid-span at 1050 s, and in Figure 12 (c), the cooled truss experiences maximum transverse deformation at 1050 s. At 1050 s, the front face of the truss at the mid-span at which the water is sprayed experiences cooling and the rear face of the truss is still hot. This results in the thermal bowing phenomenon which is apparent in Figure 12 (c). The relatively greater transverse displacement compared to the vertical displacement is caused by the out-of-plane buckling from the restrained thermal expansion. As mentioned previously, it is assumed that lateral restraints lost their functions at elevated temperatures. However, Figure 9 shows that the temperatures developed close to the ends of the truss can be lower than 400 °C before 900 s. The deformation results suggest that for the studied trusses, the cooling of the truss results in higher deformation in the trans-

▶ verse direction. Therefore, part of the restraints can still provide the support to the trusses. The effect of these restraints on the behaviour of the truss needs further studies.

## DISCUSSION

The results of the intervention studies show that although the suppression sprays were validated in terms of their capability to cool the steel surface they also had a considerable influence the fire spreading through fuel surface cooling and oxygen replacement. The cases with three sprays were the most effective in controlling the fire, decreasing the HRR values 20...30 % from the level before suppression. The reduction in HRR resulted in a subsequent reduction in the temperature field around the cooled region. The reductions were, however, temporary, as it only lasted until the suppression duration. Other parameters, such as the sweep angle and residence, had little influence on the HRR. From the perspective of cooling power, for a single spray delivering 650 L/min, the water mass flow is  $\dot{m}_f = 650 \frac{L}{min} = 650 \frac{kg}{min} = 10.8 \frac{kg}{s}$ . Considering the latent heat of evaporation for water,  $L_v^{H_2O} = 2300 \frac{kJ}{kg}$ , the total amount of heat that a single spray can absorb becomes  $\dot{W}_{H_2O} = 25000 kW$ . At 900 s, the fire HRR is  $\dot{Q}_{t=900s} = 165000 kW$ , and the ratio of fire size to maximum energy absorption rate is  $\frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{165000}{25000} = 6.6$ . With one water monitor, the fire heat release rate is 6.6 times higher than the energy abstraction rate ( $\dot{W}$ ). The water can ideally absorb about 15 % of the HRR, and this value becomes 45 % when three sprays are used. Under laboratory conditions, the 45 % level has been found to be sufficient for total extinction [3] but that is not the case here. Also, it was observed that the sprays tend to cool and displace hot gases close to the fire load as shown in Figure 13. This implies that using low flow rates of water might actually accelerate the fire spread instead of decreasing it. The combined fire attack tactic was more effective in reducing the HRR because more water was reaching the burning region in comparison to the other cases.

## CONCLUSION

The work attempts to understand the impact of fire intervention tactics on the fire dynamics and the response of exposed structural elements exposed to a travelling fire scenario in a large structure. The fire simulation results indicate that water application produces a clear effect on the fire spread and intensity. The results showed that using too small resources can lead to an acceleration of fire development, as the evaporation of the water spray enhances mass flow and turbulence inside the compartment. An important tactical lesson is to ensure that sufficient resources are avail-

able before attempting a direct extinguishment of such a strong fire. The cooling effect of the water sprays on the truss was much slower than in the beam experiments. The most effective control of the fire was observed when a combined suppression approach was used, with two sprays cooling the structure and one spray attacking the base of the fire.

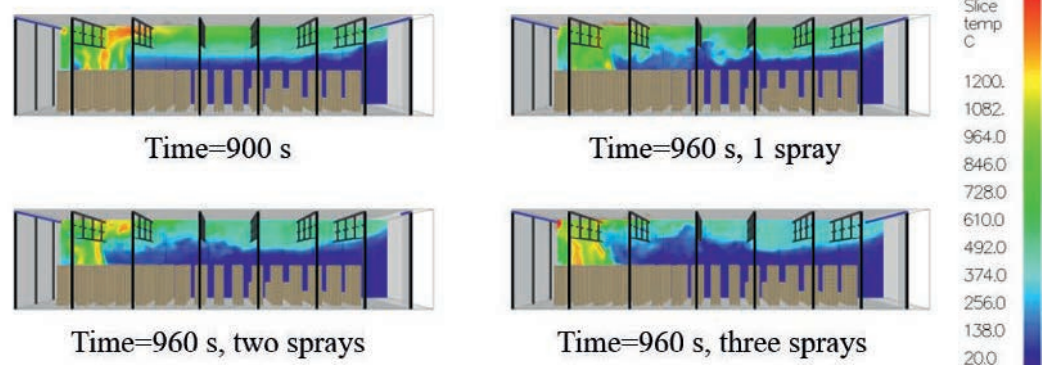
The result of the FE analysis shows that a minimum of 60 s of water application was required to reduce the steel temperature to about 100 °C. The stress analyses were performed using the temperature profiles of the uncooled and cooled truss. The relatively larger transverse displacements of the trusses suggest that out-of-plane restraints are critical in fire-safety design. The transverse displacements were magnified because of thermal bowing which in turn was a result of the cooling of the truss. The mid-span vertical displacement was reduced back to the undeformed state in the cooled truss due to the action of cooling while the uncooled truss experienced higher displacement. However, the vertical displacements of both the trusses were within the commonly used 'span/20' deformation limit.

Based on the results obtained from the investigated scenario, the structural cooling approach does produce significant reduction in temperatures in the cooled region but the sudden cooling of a very hot steel structure led to higher and more rapid deformations than what would have been normally observed.

## REFERENCES

- [1] G. Grant, J. Brenton and D. Drysdale, "Fire suppression by water sprays," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 26, pp. 79–130, 2000.
- [2] D. J. Rasbash, "The extinction of fire with plain water- A Review," in Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, 1986.
- [3] S. Särdaqvist and S. Svensson, "Fire tests in a large hall using manually applied high and low-pressure water sprays," Fire Science & Technology, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, 2001.
- [4] C. Weinschenk and R. Zevotek, "Exploratory Analysis of the Impact of Ventilation on Strip Mall Fires," UL Firefighter Safety Research Institute, Columbia, Maryland, USA., 2020.
- [5] S. Särdaqvist, An engineering approach to fire-fighting tactics, Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, Department of Fire Safety Engineering, 1996.
- [6] K. B. McGrattan, R. J. McDermott, C. G. Weinschenk and G. P. Forney, Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Sixth Edition, Special Publication (NIST SP), 2013.
- [7] S. G. P. A. S and M. E., "Numerical simulation and analysis of stainless steel frames at high temperature," Engineering Structures, vol. 227, 2021.

Figure 13: Gas temperature along the centre of the compartment when the suppression starts at 900 s and after 60 s of suppression with one, two and three water monitors.





# YRITYSTURVALLISUUS- FOORUMI 24.–26.11.2021

Suomen Palopäälystöliiton, Finnsecurityn, Suomen Pelastusalan Keskusjärjestön ja Suomen Paloinsinööriyhdistyksen järjestämä Yritysturvallisuusfoorumi risteillään seuraavan kerran **24.–26.11.2021 Silja Symphonyllä.**

Yritysturvallisuusfoorumi tuo tänäkin vuonna yhteen turvallisuusalan asiantuntijat ajankohtaisten aiheiden äärelle. Päivien teemoina ovat ennakointi ja kriisinkestävyys liiketoiminnan jatkuvuuden elinehtona sekä älykäs teknologia kiinteistöjen riskienhallinnassa.

Yritysturvallisuusfoorumeissa tapaavat kollegoitasi yritysturvallisuuden eri sektoreilta, kartutat tietojasi ja kasvatat ammatillista verkostosi.

Tule mukaan kasvavaan joukkoomme!

**Lue lisää ja ilmoittaudu:**  
[www.yritysturvallisuusfoorumi.fi](http://www.yritysturvallisuusfoorumi.fi)



SUOMEN PALOPÄÄLYSTÖLIITTO  
FINLANDS BRANDBEFÄLSFÖRBUND



Suomen Pelastusalan  
Keskusjärjestö  
**SPEK**



**FINNSEcurity**  
TURVALLISUUTTA, OMANALLA JA TIETOSUOJELLA



SUOMEN PALOINSINÖÖRIYHDISTYS ry  
BRANDINGENÖRSFÖRENINGEN I FINLAND

Hei  
Palotutkimuksen  
päivien osallistuja!

Koodilla  
**YTF2021**  
voit osallistua  
Yritysturvallisuus-  
foorumille  
jäsenhintaan!

[8] EN 1991-1-2, "Actions on structures- Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire," CEN, Brussels, 2002.

[9] EN 1993-1-2, "Design of steel structures – Part 1-2: general rules – Structural fire design," CEN, Brussels, 2005.

[10] A. Paajanen, T. Korhonen, M. Sippola, S. Hostikka, M. Malendowski and R. Gutkin, "FDS2FEM – A tool for coupling fire and structural analyses," in IABSE Workshop: Safety, Failures and Robustness of Large Structures, Helsinki, Finland, 2013.

[11] Z. Abebe, "Experimental study on mechanical properties of high strength steel S900MC at elevated temperatures and after a heating-cooling cycle," Aalto University, Espoo, 2019.

[12] D. J. Rashbash, "Theory in the evaluation of fire properties of combustible materials," in Proceedings of the Fifthe International Fire Protection Seminar, Karlsruhe, Germany, 1976.

[13] C. Beyler, "A unified model of fire suppression," Journal of Fire Protection Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 5–16, 1992.

[14] J. Zhu, W. Li, L. Da and G. Zhao, "Study on water jet trajectory model of fire monitor based on simulation and experiment," Fire Technology, vol. 55, p. 773–787, 2019.

[15] T. Miyashita, O. Sugawa, T. Imamura, K. Kamiya and Y. Kawaguchi, "Modeling and analysis of water discharge trajectory with large capacity monitor," Fire Safety Journal, vol. 63, pp. 1–8, 2014.

[16] H.-Y. Dai, M. Hasegawa, N. Kawabata, M. Sieke, S.-W. Chien and T.-S. Shen, "Applying large-scale PIV to water monitor discharge experiment," Fire Safety Journal, vol. 120, 2021.

[17] X. Liu, J. Wang, B. Li and W. Li, "Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor," The Journal of Engineering, vol. 120, pp. 150–154, 2019.

[18] X. Yuan, X. Zhu, C. Wang, L. Zhang and Y. Zhu, "Research on the Dynamic Behaviors of the Jet System of Adaptive Fire-Fighting Monitors," Processes, vol. 7, 2019.

[19] X. Yuan, X. Zhu, C. Wang and L. Zhu, "Nonlinear dynamics of adaptive gun head jet system of fire-fighting monitor," IEEE Access, vol. 8, pp. 75210–75222, 2020.

[20] A. Guha, R. M. Barron and R. Balachandar, "Numerical simulation of high-speed turbulent water jets in air," Journal of Hydraulic Research, vol. 48, no. 1, pp. 119–124, 2010.

[21] J. Sun, W. Li and M. He, "Analysis of fire water monitor jet reaction forces and their influences on the roll stabilities of urban firefighting vehicle," Fire Technology, vol. 55, p. 2547–2566, 2019.

[22] S. Särdaqvist and G. Holmstedt, "Water for Manual Fire Suppression," Environment and Behavior, vol. 11, no. 4, pp. 157–186, 2001.

# FDS-simulation of two-dimensional heat transfer and pyrolysis processes

## ABSTRACT

In this study, the degradation of cylindrical PMMA rods (diameter 20 mm) in a cone calorimeter is modeled by replicating the actual cross-section of the rods. The 2D heat transfer and pyrolysis algorithms of the Fire Dynamics Simulator (FDS) code are implemented to solve solid material degradation. Reaction kinetics were extracted from modeling TGA experiments of the PMMA sample under study. This novel framework allowed capturing time-resolved cross-sectional shrinkage upon a good agreement with experiments. Moreover, the method enabled the ability to extract more comprehensive thermodynamic information on the surface of rods such as heat fluxes and wall temperature distribution. The modeling procedure described in this work has the potential of further expansion to more complex cylindrical objects such as cables or thermal insulation materials, where charring, melting, and shrinkage processes are inherently multi-dimensional, and may determine the overall fire performance of the material or product.

## INTRODUCTION

Polymeric materials are used in a wide range of build environments, electronics, and engineering applications. Among the various types of these applications, wiring systems are typically insulated by polymeric components. Electrically induced fires are among the most reported causes of fire incidents in nuclear power plants (NPPs) and residential areas. Statistical analysis of the Advanced Incident Reporting System (AIRS) records on fire scenarios in Finnish NPPs during 1974–1997 has shown that cable failure has been 10 % of total ignition cases caused by electrical faults [1]. In addition, the ignition of cable insulation is responsible for about 17,600 annual home structure fire cases in the U.S. [2]. Therefore, a comprehensive study of polymeric fuels degra-

ding under these fire scenarios is crucial for gaining a thorough understanding about their fire behavior.

Coverage of cables and wires primarily consists of polymers in a cylindrical configuration. Modeling this configuration is remarkably challenging due to the complexities related to heat transfer and thermal decomposition. A cylindrical fuel is significantly prone to the intensified convective heat transfer in the vicinity of the flame in comparison to the flat fuels [3, 4]. On the other hand, conduction and radiation fields around a degrading cylindrical fuel change continuously due to shrinkage, melting, or swelling.

Traditionally, the degradation of thermoplastic materials applicable in cable manufacturing is modeled in a cone calorimetry scenario [5–9]. These modeling schemes utilize simplifying assumptions. Polymeric components of the cables, originally in a cylindrical shape, are mapped into a column of material with equivalent lumped thicknesses. Pyrolysis and heat conduction within the solid column is commonly solved by one-dimensional models. These methods have two principal shortcomings. Firstly, the 1D solution within a column of the condense-phase is not analogous with the cylindrical geometry and interior heat conduction within the material. Secondly, the surface convective response of the material to the live-fire could not be studied extensively due to the flat upper facade of the column. To address the latter modeling drawback, Hehnen et al. [10] projected thermoplastic components of a commercial cable into a cube that was in contact with the flow field from the top and side surfaces. This geometry provided them with better resolution of the gas phase flow field, increased accuracy of the flame, and more precise radiative heat flux calculations to the surface of the sample. However, their model is not consistent with the actual cylindrical geometry. Hence, it did not provide much information about the multi-dimensional heat transfer and shape-change happening in the cross-section of the sample.

To overcome the aforementioned deficiencies of the previous models, a state-of-the-art method to investigate the flammability of cylindrical polymers is proposed in this study. Polymethyl methacrylate (PMMA) is chosen as the nominal polymer for model validation and parametrization since it possesses well-characterized properties in the fire research community. The method follows a hierarchy commonly used in material flammability studies. First, a micro-scale test, namely thermogravimetric analysis (TGA), is performed and modeled to extract the reaction kinetics of the thermal decomposition. The burning performance of the PMMA cylinder is measured in a cone calorimeter. Finally, cone calorimetry tests are modeled by replicating the actual cross-section of the rod, where the solution within the condense-phase is carried by the 2D heat transfer and pyrolysis algorithms of the Fire Dynamics Simulator (FDS) [11]. The employed 2D formulation is a simplified version of recently developed 3D heat transfer and pyrolysis solvers in FDS [12], known as HT3D and PYRO3D routines, respectively. This novel cone model allows capturing time-resolved cross-sectional shrinkage of the sample, while enabling the ability to extract more comprehensive thermodynamic information on the surface of rods.

## EXPERIMENTAL METHODS

Cast black PMMA in the form of 500 mm-long cylindrical rods with a nominal diameter of 20 mm, manufactured by Aikolon, was purchased. The sample had a measured density of 1196.2 kg m<sup>-3</sup> in room temperature. To prepare material for TGA tests, a small section of the sample was cut by a circular saw, crushed into relatively smaller particles with a milling machine, and further powdered via a mortar until fine grains of the material were obtained. The samples for cone calorimetry experiments were cut from the original rods into pieces of 95 mm length with a circular sawing machine.

For performing TGA measurements, a Netzsch Simultaneous Thermal Analyzer (STA) 449 F3 Jupiter was utilized to characterize the reaction kinetics. The powdered sample was heated in an Aluminum Oxide crucible without a lid. This type of crucible is recommended by the device manufacturer for thermal analysis of polymers. An inert environment was established inside the furnace via continuously purging it with Nitrogen at a rate of 50 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. The sample underwent a heating program described as follows. Firstly, the material was heated to 315 K and preserved at this temperature for 20 minutes to obtain an equilibrium condition. Subsequently, a heating rate of 10 K min<sup>-1</sup> was applied, increasing the sample temperature until 873 K. A baseline test with empty sample and reference crucible was performed with the same heating program at the beginning of the tests as the correction data. The TGA tests were repeated five times to reduce experimental uncertainties. Each test was performed with samples weighing about 4–7 mg.

The flammability performance of the PMMA rods is examined with a cone calorimeter under a nominal radiative heat flux of 50 kW m<sup>-2</sup>. Two sets of experiments were performed, one with placing only a single PMMA rod in the middle of the sample holder, and another with placing five rods next to each other to fill up the 10 cm × 10 cm area of the holder. Each series of tests was repeated at least two times to reduce experimental uncertainties. The mass loss rate (MLR) and heat release rate (HRR) were recorded until all the material had burned away. Additionally, videos were recorded from the cross-sectional degradation of the samples using a FLIR thermal camera. Extracted images from these videos served as the reference for a qualitative comparison against model results for material shrinkage.

## NUMERICAL METHODS

### Thermogravimetric analysis algorithm

Thermal degradation in TGA involves conduction within a very small sample at a linear rate. To inversely model the reaction kinetics of the PMMA under study, a special feature of FDS designed for milligram-scale simulations was employed. Governing equations of this feature are explained in this section.

For a given material component  $\alpha$ , the time evolution of local density,  $\rho_{s,\alpha}$ , is solved by

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_s(0)} \right) = - \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta} + S_{\alpha} \quad (1)$$

where  $\rho_s(0)$  is the initial material density,  $N_{r,\alpha}$  is the number of reaction for material  $\alpha$ ,  $r_{\alpha\beta}$  is the rate of reaction  $\beta$ , and  $S_{\alpha}$  is the production rate of component  $\alpha$  due to the other components reactions. The reaction rate,  $r_{\alpha\beta}$ , is calculated based on Arrhenius function

$$r_{\alpha\beta} = A_{\alpha\beta} \left( \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_s(0)} \right)^{n_{s,\alpha\beta}} \exp \left( - \frac{E_{\alpha\beta}}{RT_s} \right) \quad (2)$$

where  $A_{\alpha\beta}$  is the pre-exponent factor,  $E_{\alpha\beta}$  is the activation energy, and  $n_{s,\alpha\beta}$  is the reaction order of the reaction  $\beta$  of the component  $\alpha$ .  $R$  and  $T_s$  are the universal gas constant and solid temperature, respectively. Further information of 1D pyrolysis mathematical implementation can be found in the FDS Tech Guide [13].

### 3D Heat Transfer algorithm (HT3D)

The solution of heat transfer within the solid material is governed by Equation (3). The right-hand side contains the divergence of the heat flux vector,  $\dot{q}''$ , and the volumetric heat source term,  $\dot{q}'''$ , of a solid cell.

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = -\nabla \cdot \dot{q}'' + \dot{q}''' \quad (3)$$

Considering the  $x$  direction as an example, the temperature of the cell interface  $i + \frac{1}{2}$  at time level  $n$  is calculated by

$$T_{s,i+\frac{1}{2}}^n = \frac{T_{s,i}^n + \left[ \frac{k_{s,i+1}}{k_{s,i}} \frac{\delta x_i}{\delta x_{i+1}} \right] T_{s,i+1}^n}{1 + \left[ \frac{k_{s,i+1}}{k_{s,i}} \frac{\delta x_i}{\delta x_{i+1}} \right]} \quad (4)$$

where  $k_s$  is the thermal conductivity, and  $\delta x$  denotes cell sizes in the  $x$  direction.

When material deforms,  $\delta x$  distances no longer remain constant. The distance between cell temperature points declines or inclines by shrinkage or swelling. In these situations, dimensions of the deforming solid cells (i.e.  $\delta \tilde{x}$ ,  $\delta \tilde{y}$ , and  $\delta \tilde{z}$ ) are tracked by the 3D pyrolysis solver explained in the following section. The intercell heat flux with material deformation is approximated by Equation (5) as an example of discretization in the  $x$  direction.

$$\dot{q}''_{x,i+\frac{1}{2}} \approx -k_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1} - T_{s,i}}{\frac{1}{2}(\delta \tilde{x}_i + \delta \tilde{x}_{i+1})} \quad (5)$$

- For details of discretization and boundary conditions, the reader is referred to the FDS Tech Guide [13].

### 3D Pyrolysis algorithm (PYRO3D)

Consider a solid comprised of a mixture of  $\alpha$  material components. Material density is defined as the division of the material mass,  $m_\alpha$  by the material volume,  $V_\alpha$ , i.e.  $\rho_\alpha \equiv m_\alpha/V_\alpha$ . The bulk density of the component  $\alpha$  of the solid  $s$  is defined as  $\rho_{s,\alpha} \equiv m_\alpha/V_s$ . Time evolution of the bulk density  $\rho_{s,\alpha}$  is computed by calling the 1D pyrolysis model of FDS. The 1D model solves a conservation equation for the bulk density, considering the rate of reaction and material production rate (Equation (1)).

The key feature of the 3D pyrolysis model is the technique used for handling material deformation. Since the solid mass is bound to the 3D computational grid, the mesh cells cannot vanish when a material burns away (contrary to the 1D model where the condense phase shrinks from the bottom up). On that account, the ratio ( $\phi_s$ ) between the solid volume and the local cell volume is continuously tracked by:

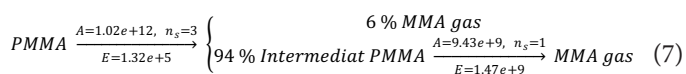
$$\phi_s \equiv \frac{V_s}{V_{\text{cell}}} = \frac{\sum_\alpha V_\alpha}{V_{\text{cell}}} = \sum_\alpha \frac{m_\alpha/\rho_\alpha}{m_\alpha/\rho_{s,\alpha}} = \sum_\alpha \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_\alpha} \quad (6)$$

The definition of  $V_s = \phi_s V_{\text{cell}}$  is translated into  $\delta\tilde{x}, \delta\tilde{y}, \delta\tilde{z} = \phi_s (\delta x, \delta y, \delta z)$  expressed with deformed solid dimensions ( $\delta\tilde{x}_i, i=1, 2, \text{ and } 3$  for  $x, y, \text{ and } z$  directions, respectively). It is assumed that the material deforms identically in all directions. New spacing used for calculation of heat fluxes is computed via  $\delta\tilde{x}_i = \phi_s^p \delta x_i$ , where the power  $p$  is equal to 1/2 for 2D simulations. Transport of the pyrolyzed gas is assumed to be instantaneous, meaning that the mass is ejected from the nearest solid wall cell. More details can be found in [13].

## NUMERICAL MODEL SETUP

### TGA model setup

A simple model for the degradation of PMMA in an inert ( $N_2$ ) atmosphere is adopted. The sample is placed at the bottom of the simulation domain, while other sides of the domain were assigned to have open boundary conditions. In TGA modeling, gas-phase heat and mass transfer were neglected. Therefore, domain dimensions and grid size do not alter the TGA model results. The sample was heated with the nominal heating rate until no unpyrolyzed material was left. Modeled two-step reaction path for the PMMA under study, and corresponding kinetic parameters are summarized in Equation (7). Units of  $A$  and  $E$  are  $s^{-1}$  and  $\text{kJ/mol}$ , respectively.



### Cone Calorimetry model setup

3D modeling of the full geometry of the tests is exceptionally demanding in terms of computational cost. To accelerate the simulations, a simplified geometry of a 2D plane passing through the middle of the chamber is modeled and shown in Figure 1. The geometry of the conical heater is built from small cuboid solid obstructions. The structure of the cable is generated by multiple small solid obstructions with rectangular  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  cross-sections. This model decision is based on the compensation between two key factors. Firstly, obstructions with a larger cross-section would not be able to generate a well-representative of the cylindrical structure. Diversely, although smaller obstructions can produ-

ce a more accurate cylinder, they increase the computational cost significantly. The 2D solution domain consists of a  $200 \times 297.5 \text{ mm}$  ( $x$  and  $z$ , respectively) area. The domain is divided into two regions in the vertical direction. The first 35 mm is meshed with cells having  $\Delta z=1 \text{ mm}$ , while the rest meshed with  $\Delta z = 1.875 \text{ mm}$  grids. Grid spacing in the  $x$  direction is 1 mm everywhere.

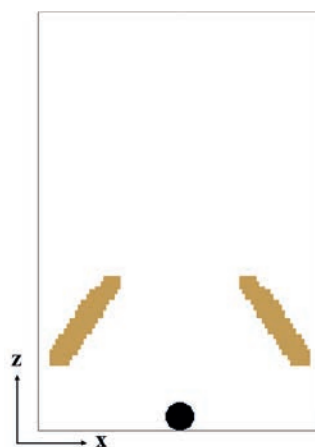


Figure 1. Model setup for cone calorimetry of a single PMMA rod.

All of the surrounding boundary conditions at  $x_{\min}, x_{\max}, z_{\min}$ , and  $z_{\max}$  are set to open airflow, except for a 100 mm-long surface under the rod which represents the backing wool in experiments. The backing layer thermal properties are  $\rho=128 \text{ kg/m}^3$ ,  $k_s = 0.1 \text{ W/(m.K)}$ , and  $c_s = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$ . In 2D simulations performed by FDS,  $y_{\min}$  and  $y_{\max}$  are automatically set to mirror boundary conditions. The physical interpretation of mirror boundary condition would be assuming infinitely long rod and radiation panels in the  $y$  direction. Although it is not a realistic assumption, several simulations carried by the authors showed that this approximation reduces computational cost severely, compared to a full 3D model. To improve the computational performance, the domain is split into 10 MPI processes. Since only 1 mm of the length of the rods is modeled in the  $y$  direction, the MLR and HRR simulation results are scaled via multiplying by the actual length of the samples, i.e. 95.

## RESULTS AND DISCUSSION

### TGA results

The TGA model used for the PMMA was consisting of two consecutive reactions. This assumption was made since the gradient of experimental TGA showed two steep degradations, one at about 490 K and another at about 630 K. Adjustment of reaction kinetics was performed manually (Equation (7)) to improve model accuracy. The result of the modeled TGA, presented in Figure 2, was found to be in good agreement with the experiments.

### Single rod Cone Calorimetry results

Estimation of the material thermal properties for the single PMMA rod was performed manually to capture the shape and trend of measured MLR and HRR curves. The emissivities of the initial PMMA and the Intermediate PMMA components were set to 0.95. The estimated specific heat, heat of reaction, and heat of combustion for both PMMA components were  $3 \text{ kJ/(kg.K)}$ ,  $833 \text{ kJ/kg}$ , and  $24400 \text{ kJ/kg}$ , respectively. The conductivity used for the initial component was  $0.13 \text{ W/(m.K)}$ , while that of the intermediate component was  $0.15 \text{ W/(m.K)}$ . Estimated thermal properties are in the range found in the literature for standard PMMA.

FDS fits for MLR and HRR are compared against the measurements in Figure 3. Although parameter estimation was performed manually, the model is able to predict a majority of impor-



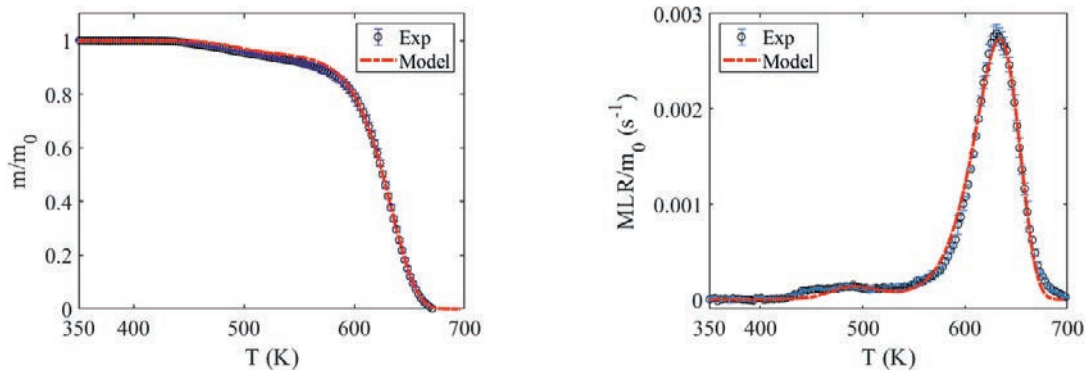


Figure 2. Experimental TGA result and modeled FDS fit: (left) TGA; (right) Gradient of TGA.

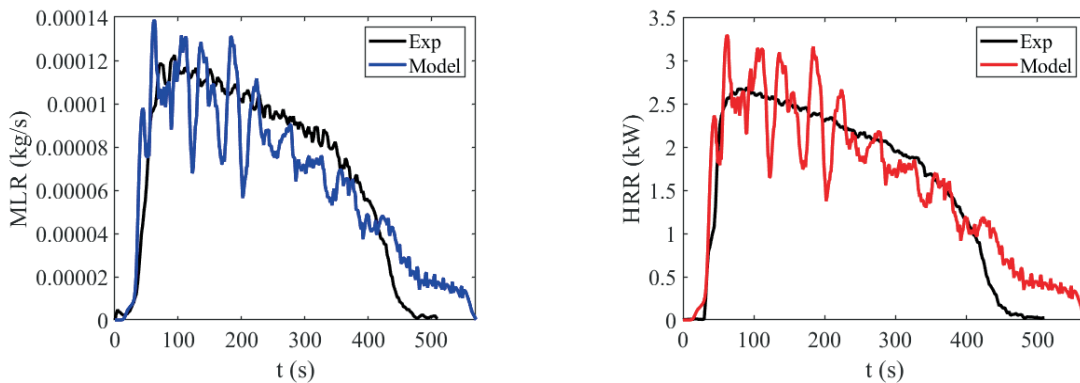


Figure 3. Comparison of FDS fit against the averaged measurements for a single rod cone calorimetry: (left) Mass loss rate; (right) Heat release rate.

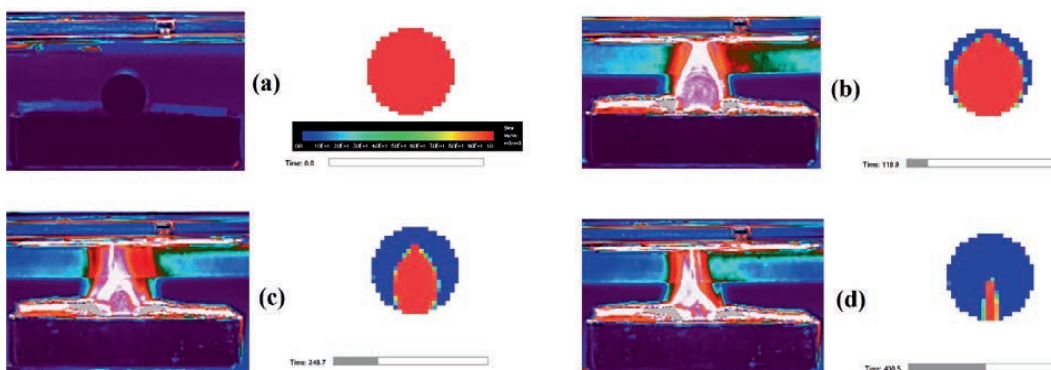


Figure 4. Qualitative comparison of experimental and numerical results of cross-sectional shrinkage in different times while a single PMMA rod degrades in the cone calorimeter. (Left images): snapshots from the IR camera. (Right images): slices of solid cell volume ratio from the FDS.

tant phenomena such as ignition time and overall trend. Oscillations seen in the model predictions are typical of problems concerning burning-away objects [12]. To reduce these oscillations, one has to further decrease grid spacing in the vicinity of the object. However, a drastic increase in computational time was observed in simulations with smaller than a millimeter cell size, which is beyond the scope of this study.

Visual inspection of measurements showed that the cross-sectional shrinkage is initially faster in the horizontal direction compared to the vertical direction. After a while, the pace of the vertical shrinkage increases. On the other hand, following the material deformation in the model is achieved by visualizing a slice that outputs the fraction of unburned solid material within each computational cell. Time-resolved solid cell volume ratio slices from the model are compared against snapshots of their corresponding measurement time in Figure 4. This comparison shows that qualitatively, there is a good agreement for the cross-sectional shrinkage between the model and experiments.

The development of radiation and flow fields in the vicinity of the rod directly affects the form of the shrinkage. On that account, radiative and convective heat fluxes, as well as wall temperature, on the surface of the rod were extracted. Due to symmetry, only

the data on the right-hand-side half of the cylinder is presented as polar diagrams in Figure 5 (Saw-toothed results are the effect of Lego-type geometry). Close inspection of the simulation revealed that no solid cell burns away until 45 seconds. Therefore, the comparison was performed for this time interval. The data were averaged over three 15-second periods for the sake of comparability. As time passes, the majority of radiative flux increment occurs at the top surface of the cylinder, namely between 45 and 90 degrees. Nevertheless, a substantial development in the convective flux takes place at angles between  $-30$  and  $45$ . The latter most probably accounts for the steep horizontal shrinkage at the first stages of cone calorimetry measurements. Moreover, the development of surface temperature is consistent with the combination of radiative and convective flux increments received at the aforementioned surface arcs.

### Five rods Cone Calorimetry results

The capability of the developed cone calorimetry model to predict other scenarios was tested for a condition where the sample holder in experiments was filled with five PMMA rods. Simulation conditions were the same as in previous, except for the number of cylindrical objects. Figure 6 shows that the model can predict the ra-

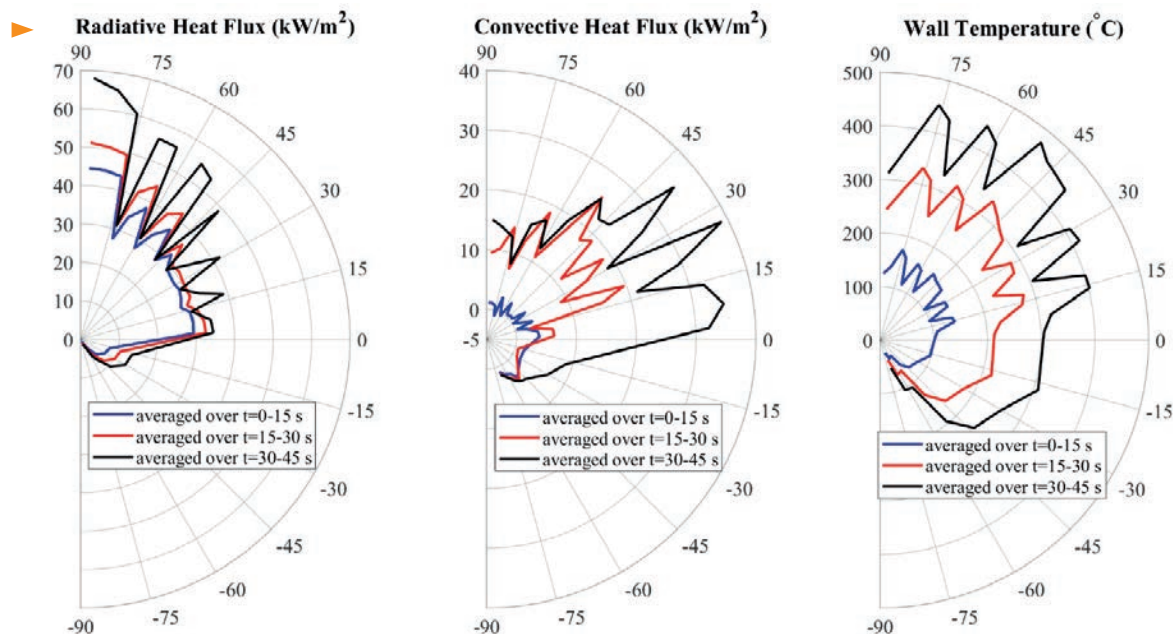


Figure 5. Averaged heat fluxes and temperature on the half surface of a single rod. Circumferential values show the polar angle on the surface of the cylinder, while vertical axes represent values for heat flux or temperature. Data is averaged over three equal 15-second time intervals.

te of material degradation in good agreement with measurements.

The pattern of cross-sectional decomposition of the model is compared against the snapshots captured with the thermal camera in Figure 7. Measurements showed that, initially, the two rods located at the most eastern and western sides of the sample holder vaporize completely, as in Figure 7(d). This can be explained by the intensified thermal fluxes due to the flame on the larger exposed surfaces of outer rods. This horizontal evaporation pattern continues from the sides toward the center of the pan. Such a similar behavior was observed in simulation.

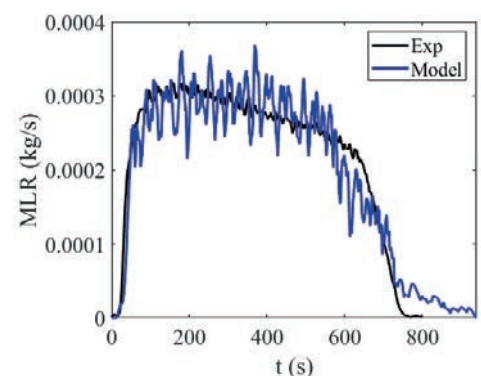
## CONCLUSION

A two-dimensional heat transfer and pyrolysis model was proposed for the degradation analysis of non-charring cylindrical objects in cone calorimetry scenario in this study. The utilized numerical method was based on the HT3D and PYRO3D routines of the Fire Dynamics Simulator. These routines endowed the modeler with new features, such as the capability to extract time-resolved material deformation and thermophysical variables on the surface of pyrolyzing objects. The proposed model was validated for a case where a single PMMA rod decomposes under  $50 \text{ kW/m}^2$  irradiation. Afterward, the ability of the model to predict the flammability of a scenario with five PMMA rods on the sample holder was tested. Reaction kinetics and thermal parameters were estimated from the TGA and cone calorimetry experiments, respectively. Additionally, the degradation pattern in the measurements was captured by an IR thermal camera.

In the case of a single rod decomposition, the model was able to reproduce the mass loss and heat release rate of the measurements with a good agreement. The IR camera recording revealed a fast horizontal degradation in the first stages of cone calorimetry, continued with an increase in the vertical vaporization at the final stages. The time-resolved solid-phase slices from the simulations presented a similar pattern. The quick horizontal decomposition at the beginning was shown to be most probably because of intensified convective heat flux on the side surfaces of the rod. The Performance of the model for predicting mass loss rate and cross-sectional deformation in the scenario of five PMMA rods was shown to be in line with the measurements.

Although the explained framework in this study was applied

Figure 6. Comparison of FDS MLR prediction against mean experimental data for the cone calorimetry of five PMMA rods.



to pure PMMA rods, it has the potential to be expanded to more complex cylindrical objects such as electrical wires, cables, cable trays, and thermal insulations. Material deformation of these products usually consists of multi-dimensional processes like charring, melting, and shrinkage, which significantly affect their fire performance.

## ACKNOWLEDGEMENT

The current research has been funded by the State Nuclear Waste Management Fund (VYR). The authors would like to acknowledge Aleksi Rinta-Paavola for help when conducting cone calorimeter experiments, and Rahul Kallada Janardhan for assisting with thermal imaging. This work made use of Aalto University Bioeconomy Facilities when performing TGA measurements.

## REFERENCES

- [1] O. Keski-Rahkonen and J. Mangs, "Electrical ignition sources in nuclear power plants: statistical, modelling and experimental studies," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 213, no. 2–3, pp. 209–221, 2002.
- [2] M. Ahrens, *Home structure fires*. National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division ..., 2013.
- [3] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] M. A. Delichatsios, R. A. Altenkirch, M. F. Bundy, S. Bhat-tacharjee, L. Tang, and K. Sacksteder, "Creeping flame spread along fuel cylinders in forced and natural flows and microgra-

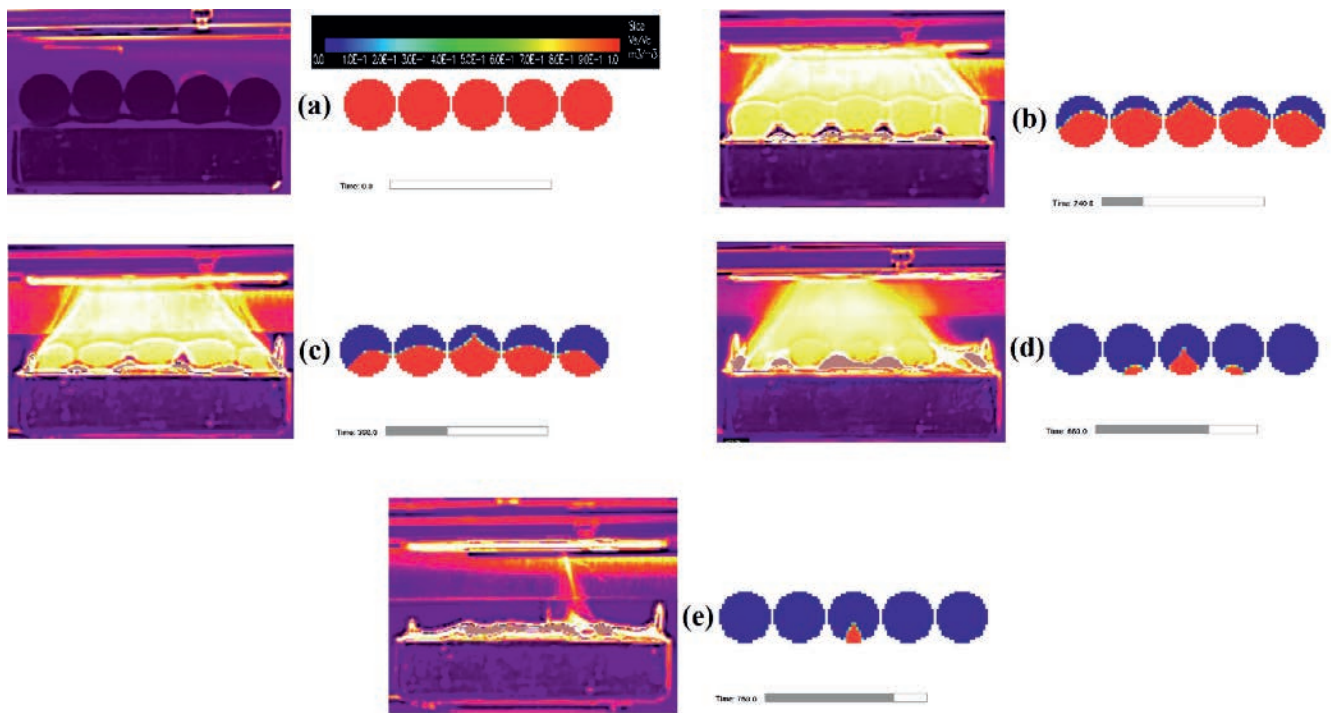


Figure 7. Qualitative comparison of experimental and numerical results of cross-sectional shrinkage in different times while five PMMA rods degrade in the cone calorimeter. (Left images): snapshots from the IR camera. (Right images): slices of solid cell volume ratio from FDS simulation.

vity,” Proc. Combust. Inst., vol. 28, no. 2, pp. 2835–2842, 2000.

[5] J. Li, J. Gong, and S. I. Stoliarov, “Gasification experiments for pyrolysis model parameterization and validation,” Int. J. Heat Mass Transf., vol. 77, pp. 738–744, 2014.

[6] J. Li, J. Gong, and S. I. Stoliarov, “Development of pyrolysis models for charring polymers,” Polym. Degrad. Stab., vol. 115, pp. 138–152, 2015.

[7] I. Vermesi, N. Roenner, P. Pironi, R. M. Hadden, and G. Rein, “Pyrolysis and ignition of a polymer by transient irradiation,” Combust. Flame, vol. 163, pp. 31–41, 2016.

[8] G. T. Linteris, R. E. Lyon, and S. I. Stoliarov, “Prediction of the gasification rate of thermoplastic polymers in fire-like environments,” Fire Saf. J., vol. 60, pp. 14–24, 2013.

[9] A. Matala and S. Hostikka, “Pyrolysis modelling of PVC cable materials,” Fire Saf. Sci., vol. 10, pp. 917–930, 2011.

[10] T. Hehnen, L. Arnold, and S. La Mendola, “Numerical Fire Spread Simulation Based on Material Pyrolysis – An Application to the CHRISTIFIRE Phase 1 Horizontal Cable Tray Tests,” Fire, vol. 3, no. 3, p. 33, 2020.

[11] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, “Fire dynamics simulator user’s guide,” NIST Spec. Publ., vol. 1019, no. 6, 2013.

[12] M. Bruns, R. McDermott, S. Benkorichi, and S. Hostikka, “Development of 3D Pyrolysis in FDS,” 2018.

[13] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, “Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model,” NIST Spec. Publ., vol. 1018, no. 1, p. 175, 2013.

This and previous  
publications of  
Palotutkimuksen päivät  
are available at [www.spek.fi/  
palotutkimuksenpaivat](http://www.spek.fi/palotutkimuksenpaivat)



**PALOTUTKIMUSRAATI -  
BRANDFORSKNINGSRÅDET RY**  
PALOALAN TUTKIMUKSEN KEHITTÄMISORGANISAATIO

# Multiphysics modelling of stone wool fire resistance test

## ABSTRACT

In fire resistance tests, stone wool's organic matter undergoes exothermic oxidative reactions similar to smoldering but sustained by external heat, causing mass transfer in the structure. The previous modelling attempts, lacking the mass transfer physics, fall short in predicting the temperature of high density and high organic content samples. To fill this gap in the fire engineering modelling capability, we include mass transfer in our calculation, and validate the model using experimental fire resistance data. The results show that the thermal effects of the oxidative degradation can be predicted by introducing the simplified diffusion processes. The oxygen transfer and exothermic reactions depend upon the amount of organic content. A gas flow barrier on the cold side (sandwich) can effectively reduce the peak temperature of the high organic content-stone wools.

## INTRODUCTION

Fire barriers are physical systems designed to delay the spreading of fire and smoke. In buildings, the examples of fire barrier are fire-rated doors and walls [1]. In industrial facilities, a fire barrier can also serve other purposes than the compartmentation. An example is the defense-in-depth concrete layers around a nuclear reactor for the prevention of the release of radioactive substance [2]. In other situations, a fire barrier can be a local protective layer between a likely fire source and the target to be protected [3].

Fire barrier safety codes are regulated based on the standard test carried out according to Annexe EN 1363-1 [4]. The design criteria are the insulation, integrity and load carrying capacity. In other words, the barrier should prevent ignition on the unexposed side, spreading of smoke/fire to another compartment and structural failure during the time of event [5]. The test procedure consists of measuring the cold-side temperature of the sample exposed to a combustion chamber depicting ISO 834 standard fire [6]. The thermal actions predicted from such test, however, may not always

correspond to the structural behavior in the real fire event [7, 8].

The concept of simulation-based methods existed in the past, and over the period of last few decades the computing resources and simulation tools for fire safety engineering evolved significantly [9, 10]. This supported in enabling the simulation-based approach as a reliable means of evaluating the fire barrier performance [11, 12]. In practice, however, the safety measures are still dominated by the test-based approach because of the limited number of peer-reviewed case studies [13]. The main challenges for the simulation are the three modes of heat transfer: conduction, convection and radiation, and the presence of reactive material that decomposes at high temperature and triggers mass transfer within the structure [14, 15, 1, 16]. Lee [17] investigated the effect of fiber orientation on the intra-fiber radiative heat transfer. Andersen and Dyrboel [18] predicted the radiative fluxes using Planck mean properties and compared them to the one obtained using spectral and flux-weighted properties. Veiseh and Hakkaki-Fard [19] estimated the thermal conductivity by numerically solving the steady-state radiative and conductive heat transfer and compared it to the experimentally measured values. Some studies included the effect of organic material degradation on the overall heat transfer and suggested that the accurate prediction of stone wool heating behavior would require the modelling of oxygen controlled decomposition reactions [20, 16, 1].

In this study we develop a multiphysics model capable of solving both heat and mass transfer such that the oxygen controlled degradation rate would be applicable for the accurate prediction of stone wool heating behavior. The models will be validated using the experimental data.

## THERMAL RESISTANCE TEST

The fire resistance test was carried out by Paroc Oy (now Owens Corning, Finland). Figure 1 shows the test set up, in which,

a sample of size  $60 \times 60$  cm having thickness  $l$  is separated from the combustion chamber using 1 mm thin metal sheet. The combustion chamber temperature,  $T_h$ , follows the ISO 834 standard fire curve, and the initial cold-side temperature is equal to that of ambient,  $T_\infty$ ,

$$T_h(t) = T_\infty + 345 \log_{10}(8t + 1). \quad (1)$$

Altogether, 30 tests were performed with varying wool density, thickness, and organic content. Table 1 lists the material and geometrical properties of the investigated stone wool types. The cold side surface temperatures were recorded using several K-type thermocouples. The right figure shows the installation of thermocouples. The installation complies with the European standard, EN 1363-1.

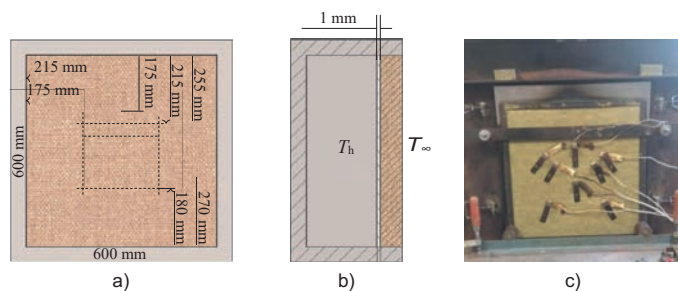


Figure 1: Test geometry for small scale fire resistance test, EN 1363-1. a) Sample size and thermocouple locations, b) Cross-section, c) Cold-side temperature measurements.

## MULTIPHYSICS MODEL

The stone wool with density  $\rho_w$  consists of fibers ( $\rho_f$ ), organic material ( $\rho_o$ ), products of the decomposed organic matter ( $\rho_p$ ), and air ( $\rho_a$ ),

$$\rho_w = \rho_f + \rho_o + \rho_a + \rho_p. \quad (2)$$

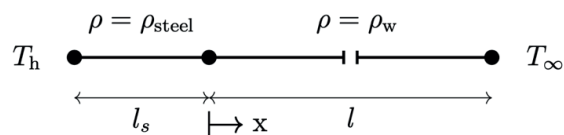
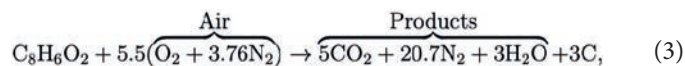


Figure 2: Multiphysics model computational set up.  $l_s$  and  $l$  are the steel plate and stone wool thicknesses, respectively. The gap in the stone wool indicates that the lengths are not in scale ( $l \gg l_s$ ).

The mass transfer in the stone wool domain triggers due to the decomposition of the organic matter [15]. As the information of the exact chemical composition and reaction steps are not available, we assume an approximate single step scheme consisting of two lumped gas species, air and products,



where, 1g of organic matter when reacts with 5.63g of air produces 6.45g gas products and 0.27g char.

Wool No.	Insulation thickness, $l$ (mm)	Wool density, $\rho_w$ ( $\text{kgm}^{-3}$ )	Loss On Ignition (LOI) (%)	Intact fibre(%)	Fibre mean thickness, $d_f$ ( $\mu\text{m}$ )	Fibre mean angle, $\theta$ ( $^\circ$ )	Extinction coefficient, $\beta$ ( $\text{m}^{-1}$ )
1	61.9	101.4	1.5	63.2	4.7	3.6	2866
2	62.4	100.5	1.3	61.8	5.1	14.8	2620
3	60	97.2	1.4	60.1	4.6	19.3	2492
4	63.2	95.3	1.2	59.2	4.4	41.7	1936
5	61.7	100.7	1.2	61.1	4.6	46.4	1921
6	60.5	100.2	1.1	57.5	4.9	17.2	2441
7	60	99.6	1.1	62	3.7	29.9	2598
8	61.8	90.2	1.3	66.5	3.3	6.5	2979
9	61.1	69.8	1.3	62.2	3.3	6.5	2156
10	61.7	79.3	1.5	61.4	3.4	6.5	2394
11	60.1	90.3	1.3	56.1	4	4.9	2389
12	60.1	90.3	1.4	61.5	3.9	4.2	2639
13	61.4	100	1.4	62	4.4	4.3	2836
14	60.3	100.9	1.5	61.3	3.7	5.1	2978
15	61	138.8	2.1	64.6	3.8	1.5	4274
16	41.2	107.2	1.3	63.7	3.8	3	3278
17	72.7	78.9	1.6	65.7	3.3	6.5	2566
18	61.3	141.2	1.9	59.7	3.4	1.3	4154
19	61.9	147.7	1.5	59	5.3	1.9	3739
20	52	38.3	0.7	62.2	4.7	0.8	1076
21	60.5	147.3	1.3	56.4	3.2	1.5	4184
22	75.7	66.3	6.9	61.5	4	2.4	1819
23	75.2	71.1	9	62	4.1	1.9	1908
24	76.2	51.4	9.8	64.7	4.4	1	1395
25	71.5	63.9	1.1	58.1	4.3	2.9	1719
26	72.8	75.1	1.2	57.5	4.6	2.9	1953
27	60.4	85	1.3	61.5	4	3.8	2469
28	75	68.5	4.7	61.1	4.3	1.1	1869
29	75.7	48.7	6.7	61.6	4	1.5	1341
30	75.3	48.2	4.8	63.1	4.5	3.95	1334

Table 1: Material and geometrical properties of the investigated stone wools.

- ▶ The mass transfer is assumed to be purely diffusive. The solved governing equations and their initial conditions are the continuity equation for organic mass, diffusion equation for the products mass, and the diffusion equation for the enthalpy in the slab.

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} = -\dot{\omega} \rho_w, \quad 0 \leq x \leq l, \quad \rho_{o,0} = \text{LOI} \cdot \rho_w, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) + \dot{\omega} \rho_w f, \quad 0 \leq x \leq l, \quad \rho_{p,0} = 0, \quad (5)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{\omega} \rho_w \Delta h, \quad -l_s \leq x \leq l, \quad T_0 = T_\infty. \quad (6)$$

The factor ( $f = 6.45$ ) is according to the decomposition scheme Eq. 3. The organic matter heat of combustion ( $\Delta h$ ) is 25 MJkg<sup>-1</sup>. The rate of the oxidation reaction,  $\dot{\omega}$ , is assumed to follow an Arrhenius form,

$$\dot{\omega} = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \left( \frac{\rho_o}{\rho_w} \right)^n X_{O_2}^{n_{O_2}}. \quad (7)$$

Here,  $X_{O_2}$  is the oxygen volume fraction calculated using the volume proportions of the air and products,

$$X_{O_2} = 0.21 X_a, \quad X_a = 1 - X_p, \quad X_p = \frac{\rho_p \rho_{a,s}}{\rho_{p,s}}, \quad (8)$$

where 0.21 is the oxygen volume fraction in air.

Regarding the boundary conditions, we assume that the gas diffusion is blocked on the hot-side, depends upon the surface diffusion coefficient ( $D_s$ ) on the cold side, and the radiative and convective heat fluxes affect on both sides.

The stone wool bulk properties depend on  $T$  or  $\rho_o$ , or both, and are calculated by assuming the medium between the fibers to be air. The bulk heat capacity is the weighted fraction of fiber, organic matter, and air.

The bulk thermal conductivity is according to Karamanos approach [20], in which, the equivalent expression includes conductive and radiative part. The conductive part includes the parallel and the perpendicular components that depend upon porosity ( $\varphi$ ). The radiative part is calculated using the refractive index value  $n = 1.2$ , Stephan-Boltzmann constant ( $\sigma$ ), and extinction coefficient ( $\beta$ ).

The heat transfer coefficient on the hot-side is  $h_1 = 18.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , and on the cold-side ( $h_2$ ), it is qualitatively close to the natural convection of a vertical wall. The gas diffusivity ( $D$ ) is calculated using Chapman and Enskog equation [21]. The gas diffusion coefficient on the cold-side ( $D_2$ ) is assumed to be 10<sup>-3</sup> order of  $h_2$ .

The chemical decomposition parameters ( $A$ ,  $E_a$ ,  $n$  and  $n_{O_2}$ ) are optimized by finding a minimum error in the cold-side temperatures. For this, a Monte-Carlo (MC) simulation was carried out using the sample range listed in Table 2. The search criterion is the mean square error, the sampling method is Latin Hypercube Sampling (LHS), and the sample size is 1000. The third column shows the optimized values.

Parameters	Distribution	Lower	Upper	Optimum	Unit
Frequency factor, $A$	Uniform	5.0E2	1.5E3	1.07E3	s <sup>-1</sup>
Activation energy, $E$	Uniform	5.0E4	1.5E5	9.30E4	Jmol <sup>-1</sup>
Reaction order, $n$	Uniform	0.4	1.0	0.7	-
Reaction order, $n_{O_2}$	Uniform	0.4	0.8	0.6	-

Table 2: The sample spaces and the optimum values for the chemical decomposition parameters.

The numerical implementation is using the Finite Element Method (FEM) and a custom Python script. The finite elements are linear and uniform of size 1 mm. The time discretization follows the explicit Euler method. The time step size is adaptive to the maximum temperature rise of 1 °C. The solver adopts a size between a millisecond to about a hundred seconds.

The numerical convergence was tested by comparing the results with reduced element size (0.5 mm). The maximum change in the cold-side temperature was less than 0.3 %. The predictions were also benchmarked using COMSOL Multiphysics. The maximum difference in temperature prediction was 3 %.

## RESULTS

### Validation

The fire resistance tests were simulated, and the cold-side temperatures were predicted. Figure 3 shows the scatter plots of the peak values and the temperatures at 30 and 60 minutes obtained from all the tests. The scatter values are aligned along the diagonal, and the models have similar performance for the prediction of the temperature at a specific time.

Figure 4 shows the scatter plots of the times at which the cold side temperature rises by 100, 140 and 180 °C. The times were determined from the time-temperature curves and the scatter values are aligned along the diagonal.

### Qualitative analysis

Using the multiphysics model, the field variables (temperature, organic mass %, and oxygen availability) were estimated along the thickness of the stone wools. The plots in Figure 5 show the profiles of these quantities for wools 7, 22 and 30, at times 10, 20 and 40 min. The temperature plots (first row) show how the cold side temperatures start to grow after 10 min. At 20 min, the cold side temperature gradients of the wools 7 and 22 become similar to the hot side gradients and exceed the hot side gradients for wool 30. Low-density-wools have a higher thermal conductivity at high temperatures than the high-density wool, and thus the exothermic heat is transferred easier.

The second row shows the organic matter mass concentration. The plots indicate that the oxidative degradation propagates from

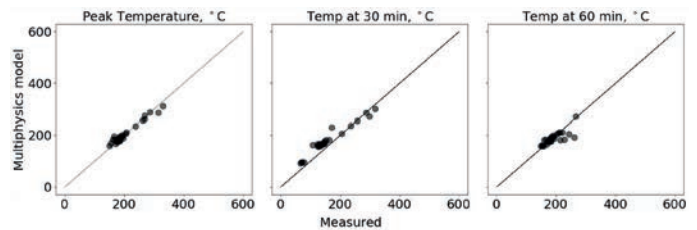


Figure 3: The scatter plots of the measured and predicted cold-side temperatures.

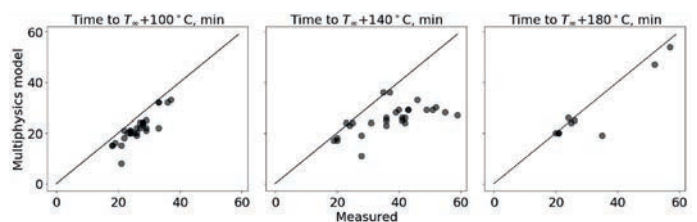


Figure 4: The scatter plots of the times at which the cold-side rises by 100, 140 and 180 °C.

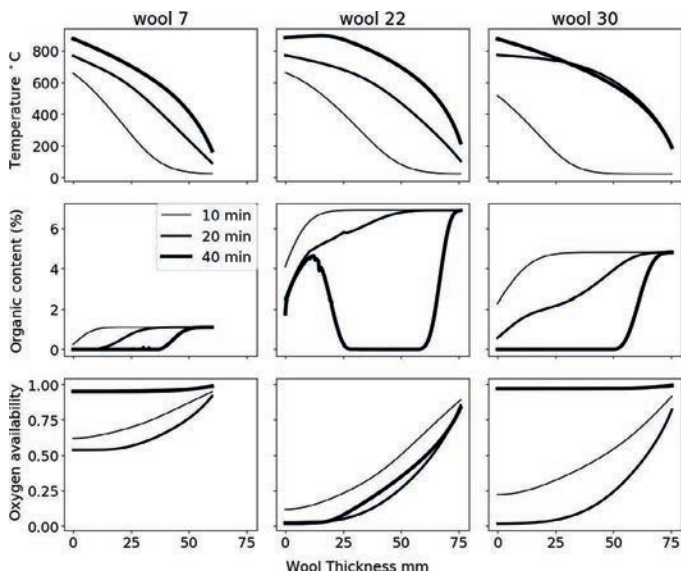


Figure 5: Temperatures, organic content mass %, and oxygen availability along with the thickness of wool 7, 22 and 30, and at 10, 20 and 40 minutes.

the hotter-side to the colder-side. For wool 22, some portion of the organic matter remains unreacted on the hotter side because there is no oxygen available (lower middle plot) for oxidative decomposition, due to the high generation of product gas (high organic content sample). For wools 7 and 30, the organic matter decomposition is uninterrupted. Some degree of oxygen limitation is observed in these wools as well (lower, left and right plot) but that does not last for long because the product gas generation is low (low organic content sample).

The third row shows the oxygen availability. The y-axis value 1 means that the porous media is fully air, and 0 means that the air

is not available. The plots indicate that for the wool 7 (left plot), the product gas never covers the entire porous region, i.e., the oxygen is always available. The time-wise change in the curves is most significant for wool 30 (middle and right plots). This means the faster air recovery for a wool with comparatively smaller organic mass %.

### Sensitivity to mass transfer

The cold-side temperatures were estimated for a different ratio of gas diffusion and heat transfer coefficient. The plots in Figure 6 show the results for  $D_2/h_2 = 2E-4, 6E-4, \dots, 1.8E-3$ , which indicate that the curve peak decreases with an increase in the gas diffusion, for wool 22 and 30. Thus, for the high organic content stone wool, the high fire resistivity (low-temperature peak) can be achieved by reducing the gas transfer.

The significance of the oxygen transfer on temperature histories was further confirmed by carrying out two additional experiments with stone wool containing 4.8 % organic matter. In the first test, the steel plate was placed only on the hot side, as before. In the second test, steel plates were placed on both sides. The measured and predicted cold side temperatures are shown in the left plot of Figure 7. The temperature peak is not observed for the wool with closed boundaries. In both cases, the predicted temperatures are mostly in good agreement with the measured temperatures. However, after the exothermic peak in the open-boundary case, the nearly steady-state temperature is slightly under-predicted by the model. The middle plot in Figure 7 shows the predicted organic content at the end of the tests. It indicates that for the open boundary wool, the decomposition occurs throughout the thickness, but reaches only up to ~ 20 mm for the closed one. This prediction resembles the decomposition zone seen in the photograph of the samples taken after dissecting them into half. The photograph shows also that the thickness of the open boundary -wool (left sample) has decreased more than that of the closed one (right sample).

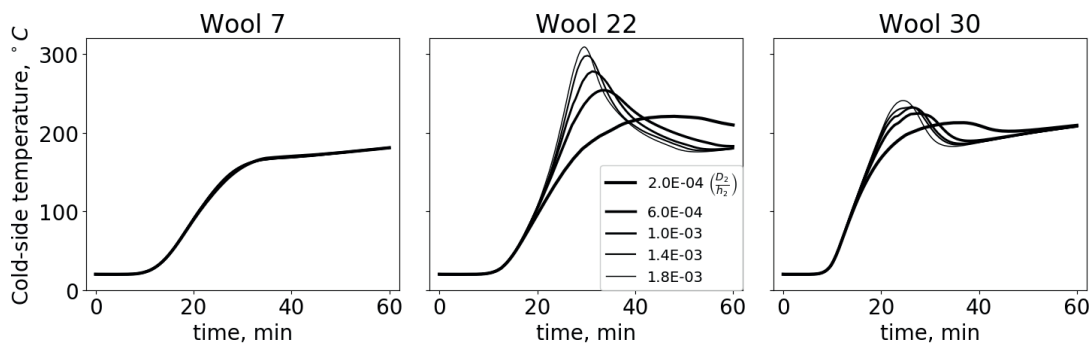


Figure 6: Cold-side temperature sensitivity to the ratio of gas diffusion and heat transfer coefficient,  $D_2/h_2$ .

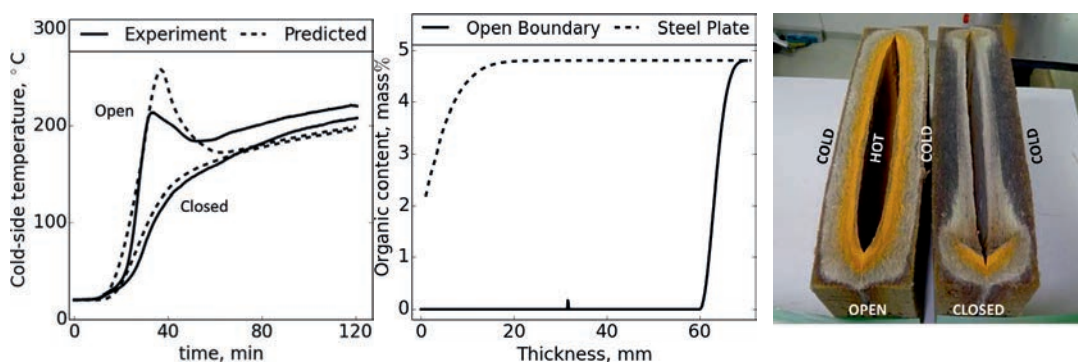


Figure 7: Sensitivity to open or closed boundary. Left: Cold-side temperatures. Middle: Organic mass % at the end of test. Right: Visual inspection of the decomposition zone at the end of test.

## ► CONCLUSION

In this study we presented a multiphysics approach of modeling stone wool heating. The capability of the models to predict the cold-side temperature of different stone wools was studied by validating against experimental data and by sensitivity analyses.

We find that the stone wool temperature depends upon the availability of oxygen. In the stone wools with high organic content, the oxygen entrainment, the oxidative degradation, and the exothermic release of heat are suspended due to the high rate of product gas production. The model predicts the expected response to variation in material composition and hot-side boundary conditions. Considering the use of unshielded and sandwich-type stone wool products in fire production, we observed that the peak cold-side temperature of the high organic content -stone wool could be effectively reduced by preventing the flow on the cold side. A thin layer of non-permeable material, thus, can be used to block oxygen transfer and to increase the fire resistivity of high organic content stone wools.

## REFERENCES

- [1] Andres, B., Livkiss, K., Hidalgo, J.P., van Hees, P., Bisby, L., Johansson, N. and Bhargava, A., 2018. Response of stone wool-insulated building barriers under severe heating exposures. *Journal of fire sciences*, 36(4), pp.315–341.
- [2] Yvon, P. and Carré, F., 2009. Structural materials challenges for advanced reactor systems. *Journal of Nuclear Materials*, 385(2), pp.217–222.
- [3] Schroll, R.C., 2016. *Industrial fire protection handbook*. CRC press. 252 p.
- [4] Buchanan, A.H. and Abu, A.K., 2017. *Structural design for fire safety*. John Wiley & Sons. 438 p.
- [5] Khoury, G.A., 2000. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), pp.429–447.
- [6] Pereira, D., Gago, A., Proença, J. and Morgado, T., 2016. Fire performance of sandwich wall assemblies. *Composites Part B: Engineering*, 93, pp.123–131.
- [7] Joyeux, D., 2002. Experimental investigation of fire door behaviour during a natural fire. *Fire safety journal*, 37(6), pp.605–614.
- [8] Wald, F., Chlouba, J., Uhlíř, A., Kallerova, P. and Štujberová, M., 2009. Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes. *Fire safety journal*, 44(1), pp.135–146.
- [9] Hadjisophocleous, G.V. and Bénichou, N., 2000. Development of performance-based codes, performance criteria and fire safety engineering methods. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 2(4), pp.127–142.
- [10] McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C. and Overholt, K., 2013. *Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model*. NIST special publication, 1018(1), 175 p.
- [11] Buchanan, A.H., 1999. Implementation of performance-based fire codes. *Fire Safety Journal*, 32(4), pp.377–383.
- [12] Alvarez, A., Meacham, B.J., Dembsey, N.A. and Thomas, J.R., 2013. Twenty years of performance-based fire protection design: challenges faced and a look ahead. *Journal of Fire Protection Engineering*, 23(4), pp.249–27
- [13] Van Coile, R., Hopkin, D. and Lange, D., 2019. Guest Editorial: Probabilistic Methods in Fire Safety Engineering. *Fire Technology* 55, pp.1107–1109
- [14] Daryabeigi, K., Cunnington, G.R. and Knutson, J.R., 2013. Heat transfer modeling for rigid high-temperature fibrous insulation. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 27(3), pp.414–421.
- [15] Krasnovskih, M.P., Maksimovich, N.G., Vaisman, Y.I. and Ketov, A.A., 2014. Thermal stability of mineral-wool heat-insulating materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 87(10), pp.1430–1434.
- [16] Livkiss, K., Andres, B., Bhargava, A. and van Hees, P., 2018. Characterization of stone wool properties for fire safety engineering calculations. *Journal of Fire Sciences*, 36(3), pp.202–223.
- [17] Lee, S.C., 1989. Effect of fiber orientation on thermal radiation in fibrous media. *International journal of heat and mass transfer*, 32(2), pp.311–319.
- [18] Andersen, F.M.B. and Dyrboel, S., 1998. Modelling radiative heat transfer in fibrous materials: The use of Planck mean properties compared to spectral and flux-weighted properties. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 60(4), pp.593–603.
- [19] Veisheh, S. and Hakkaki-Fard, A., 2009. Numerical modeling of combined radiation and conduction heat transfer in mineral wool insulations. *Heat Transfer Engineering*, 30(6), pp.477–486.
- [20] Karamanos, A., Papadopoulos, A. and Anastasellos, D., 2004. Heat transfer phenomena in fibrous insulating materials. In *Proceedings of WSEAS/IASME international conference on heat and mass transfer*. Corfu. Greece. pp.17–19.
- [21] Poling, B.E., Prausnitz, J.M. and O'Connell, J.P., 2001. *The properties of gases and liquids (Vol. 5)*. McGraw-hill, New York. 559p

# www.pelastustieto.fi

Pelastustieto myös Facebookissa, Instassa ja Twitterissä  
Pelastustieto is also on Facebook, IG and Twitter



# Measuring the spectral properties of polymers and using them for flammability predictions

## ABSTRACT

The in-depth radiation absorption is a key mechanism in predicting ignition time and fire spread. To accurate estimation of in-depth absorption for polymers, their absorption coefficient should be measured spectrally. In this research, the spectrum of absorption coefficient for black PMMA is determined using spectroscopy for wavelength range of 0.25 to 25  $\mu\text{m}$ . Due to spectral nature, mean absorption coefficient is changing with source temperature and thickness of the material. Hence, to increase the accuracy for pyrolysis simulations, different values of mean absorption coefficient should be applied. To show this in practice, a pyrolysis model is presented in this study that applies the variable mean absorption coefficient to predict ignition time for black PMMA. Using genetic algorithm for estimation of thermal conductivity and specific heat capacity, the model can predict ignition time for various heat fluxes with considered uncertainty.

## INTRODUCTION

Thermal radiation plays an important role in starting, evolution, and spreading of fires. Therefore, its modeling has a substantial effect on the accuracy of results of overall CFD models used for studying fires. The pyrolysis of polymers depends on how radiation transfers into the very first layer of material which is determined by the absorption coefficient. The absorption coefficients vary with wavelengths. Including all the absorption lines of the radiation spectrum in radiation calculations is computationally expensive and infeasible and therefore during the last few decades some simplifying methods were presented to affordably account for spectral changes of absorption coefficients. To solve this issue, Alinejad et al. [1] developed full spectrum correlated-k model to model the thermal radiation penetration within the condensed materials that decreases the computational time substantially with keeping the accuracy at a reasonable level.

Another important factor in modeling the thermal radiation in fire simulations is the surface effect. Difference in refractive index of polymers and environment causes the reflection and refraction of the thermal radiation at the interface. Neglecting the surface roughness of polymers, reflectivity is given by Fresnel relations and to bring the refraction effect into account, Alinejad et al. [2] presented the ordinate weighting method that gives the distribution of the radiative heat flux and heat source within the materials more accurately. To implement the ordinate weighting method into the pyrolysis models, refractive index of polymers needs to be determined. Measuring the whole spectrum of the refractive index for polymers is not a straightforward task, but thanks to the past studies, it is known that refractive index indirectly can be calculated from absorption coefficient. To apply the developed radiation methods into pyrolysis models, absorption coefficient spectrum should be known, and it has rarely been measured for different polymers. In this research, measurements are done for black poly (methyl methacrylate) (PMMA) that can be extended to other polymeric materials.

Due to some characteristic such as non-charring thermal decomposition, absence of melt flow and swelling, black PMMA is usually applied as a standard material in fire research to validate the different pyrolysis models. In-depth radiation absorption is a key mechanism in prediction of ignition time for black PMMA especially at high heat fluxes (i.e. higher than 70 kW/m<sup>2</sup>) [3]. Despite the important role of absorption coefficient in the fire simulations, different values for this parameter have been applied in the literature [4, 5] that makes the accurate measuring of absorption coefficient necessary.

Although, many research works have been done on black PMMA to characterize its properties and behaviour during thermal degradation [6, 7], spectrum of absorption coefficient for black PMMA has not been reported in literature until now. Some mean

- ▶ values for absorption coefficient (or broadband absorption coefficient) of black PMMA have been reported based on the measurements of broadband transmissivity ( $\tau_{tot}$ ) through the sample using infrared lamps and cone heaters [8, 9].

Reported mean absorption coefficient for black PMMA has been measured in a specific source temperature. Due to the spectral nature of the absorption coefficient for most of the materials, variation of the mean absorption coefficient with changing the temperature of the heater is expected. Moreover, the mean absorption coefficient of black PMMA does not follow the Beer-Lambert law [9]. Hence, besides the source temperature, thickness is another parameter that affects the mean absorption coefficient. To get rid of the source temperature and thickness effects, in current research, spectral absorption coefficient of black PMMA is measured using spectroscopic measurements. Then, variation of the mean absorption coefficient with source temperature and sample thickness is investigated. Calculated data for absorption coefficient as a function of source temperature and sample thickness provides decent absorption coefficient values that can be applied within the pyrolysis models. To show this in practice, some simulations are done in this research to estimate the ignition time for various heat fluxes.

## METHODS

### Sample preparation

A black, cast PMMA sample manufactured by Evonic with trade-name of ACRYLITE® cast black 9H01 GT was used in this research. Thickness of the raw sample was 6 mm and to measure the transmissivity of this sample by spectrometer, four different thicknesses of  $33\pm 3$ ,  $50\pm 3$ ,  $65\pm 3$ , and  $73\pm 3$   $\mu\text{m}$  were prepared using the grinding process and doing polishing. A schematic view of the raw material and prepared samples attached on the sample holder is given in Figure 1.

### Measurement devices

For the wavelength region of 0.25 to 2.5  $\mu\text{m}$ , transmissivity of the ultrathin PMMA samples is measured using the Cary 5000 UV-Vis-NIR spectrometer from Agilent Technologies with the resolution of 1 nm. For the wavelength region of 2.5 to 25  $\mu\text{m}$ , transmissivity was measured using the Nicolet™ iS50 FTIR spectrometer with the resolution between 2.5 to 500 nm for different wavelengths.

### Calculating of absorption coefficient

In spectrometers light beam is sent in nearly normal direction with respect to the surface of the sample that results in a smallest possible reflectivity at the interface. Radiative transfer equation for the sample neglecting the medium emission and scattering is written as:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -\kappa_\lambda I_\lambda \quad (1)$$

where  $I_\lambda$ ,  $s$ ,  $\lambda$ , and  $\kappa_\lambda$  are radiation intensity, direction vector, wavelength, and absorption coefficient, respectively. For the normal irradiation in spectrometer, Eq. (1) gives the following equation:

$$\ln(\tau_\lambda) = -\kappa_\lambda L \quad (2)$$

where  $\tau_\lambda = I_{\lambda,L}/I_{\lambda,0}$  is the transmissivity of the sample and  $I_{\lambda,0}$  and  $I_{\lambda,L}$  are the radiation intensity at front and rear surfaces of the sample, respectively. One of the measurable quantities in spectroscopy is

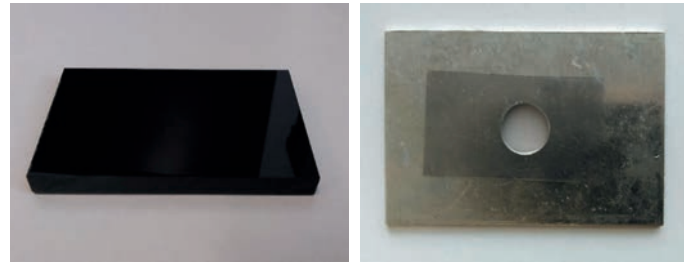


Figure 1. A photograph of raw material (left) and prepared sample attached on the sample holder (right).

spectral transmissivity. Hence, using the measured transmissivity for different thicknesses of the sample and using the linear regression, absorption coefficient is calculated using Eq. (2) for different wavelengths.

### The mean absorption coefficient

The mean absorption coefficient ( $\bar{\kappa}$ ) of black PMMA does not follow the Beer-Lambert law and varies with the source temperature due to the spectral nature of the absorption coefficient. Therefore, in present research, a set of data for the mean absorption coefficient is suggested as a function of thickness and source temperature. To do so, total transmissivity ( $\tau_{tot}$ ) is calculated using Eq. (3), then Eq. (4) gives the value of the mean absorption coefficient:

$$\tau_{tot} = \frac{1}{I_b(T)} \int_0^\infty I_{b\lambda}(T) \exp(-\kappa_\lambda L) d\lambda \quad (3)$$

$$\bar{\kappa} = -\frac{1}{L} \ln(\tau_{tot}) \quad (4)$$

where  $I_{b\lambda}(T)$  and  $I_b(T)$  are spectral and total blackbody intensities at temperature  $T$  and  $L$  shows the sample thickness.

### Prediction of time to ignition

To apply the suggested absorption coefficient values with Eqs. (3) and (4), a pyrolysis method similar to the applied method in Fire Dynamics Simulator (FDS) is used in this paper to predict the ignition time of black PMMA for various external heat fluxes. The considered geometry in current research for black PMMA in cone calorimeter experiment has been shown in Figure 2.

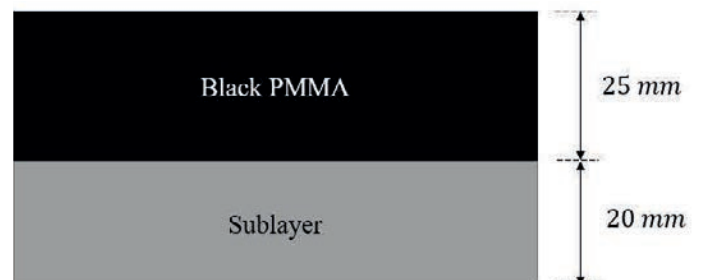


Figure 2. Arrangement of black PMMA and sublayer with their thicknesses in cone calorimeter experiment.

For the kinetic part of pyrolysis model, following reaction scheme is considered:



To calculate the radiative heat source within the sample, a gray method is applied using the obtained mean values from Eqs. (3) and (4).

## RESULTS

Measurements with UV-Vis-NIR spectrometer were done for all of the prepared samples but only for two thicknesses (i.e. 50 and 73  $\mu\text{m}$ ) high quality results were captured as shown in Figure 3. According to the measured transmissivity, sample is opaque for the wavelengths less than 0.24  $\mu\text{m}$  for the applied thicknesses.

Results of transmissivity measurements for three different sample thicknesses using FTIR spectrometer are given in Figure 4. For reaching to these thicknesses, different measurements were performed using samples with thicknesses between 100 and 200  $\mu\text{m}$ . These samples were opaque for wider spectral ranges of Mid-Infrared region that made the preparing of the thinner samples inevitable. Even with prepared ultrathin samples, some small parts of the spectrum cannot be captured due to the opacity of the samples. The brittleness of black PMMA and the limitation of the

needed devices made the thinner thicknesses impractical to reach.

Transmissivity for the wavelength region of 5.72 to 5.85  $\mu\text{m}$  and 8.30 to 8.85  $\mu\text{m}$  could not be captured due the opacity of the samples for these ranges as shown in Figure 4. Using the data of Figure 3 and Figure 4 and applying the Eq. (2), calculated absorption coefficient is given in Figure 5. To complete the spectrum in the range of 0.25 to 25  $\mu\text{m}$ , an extrapolation was used for the opaque regions.

The mean absorption coefficient with respect to the thickness of the sample is given in Figure 6 for different source temperatures. Results show that the mean absorption coefficient has a nonlinear behaviour with sample thickness. Therefore, applying the variation of the mean absorption coefficient with thickness is recommended for pyrolysis simulations of black PMMA.

Using the mean absorption coefficient within the pyrolysis model, ignition time for various radiative heat fluxes is estimated. Comparison of the simulation results using different absorption coefficients and experimental results of ignition time for black PMMA has been done in Figure 7. Considering  $\pm 2$  s uncertainty for ignition time [10], error bars are depicted for the experimental results of cone calorimeter.

The estimated ignition times using reported mean absorption coefficients in current research and by Jiang et al. [8] are close together. However, the new presented mean absorption coefficient is more consistent with physics as it takes the effects of source temperature and sample thickness into account. Considering this fact, with applying these data for different heater arrangements

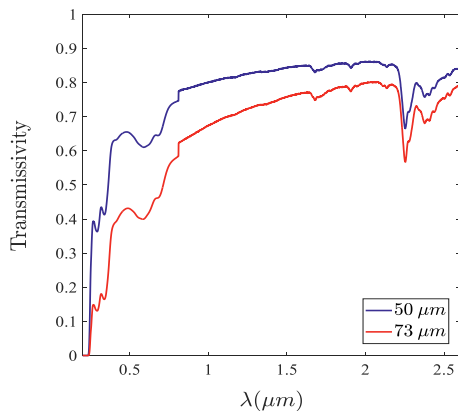


Figure 3. Measured transmissivity of black PMMA samples in UV-Vis range.

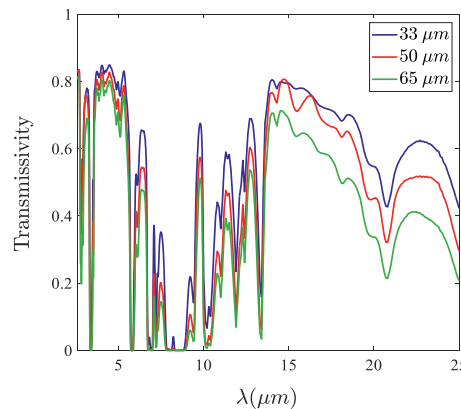


Figure 4. Measured transmissivity of black PMMA samples in FTIR range

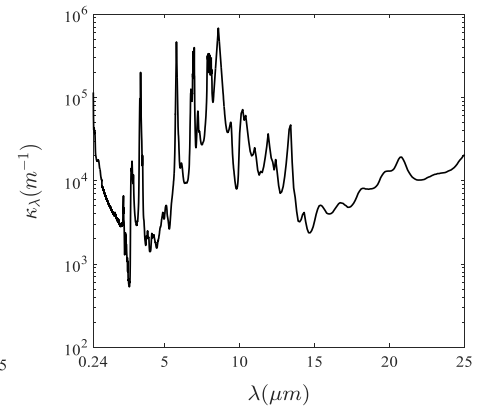


Figure 5. Extracted absorption coefficient for black PMMA.

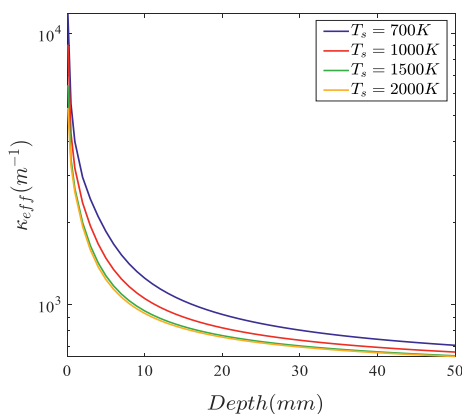


Figure 6. The mean absorption coefficient with respect to sample thickness at different source temperatures.

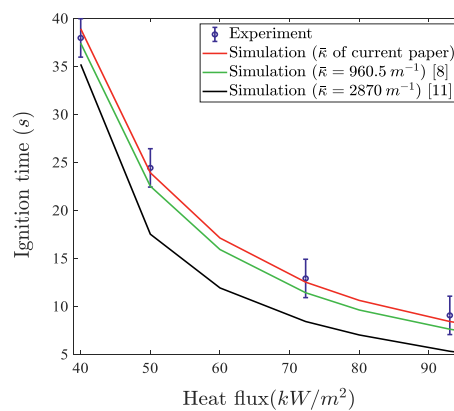


Figure 7. Comparison of measured and estimated ignition time of black PMMA for different heat fluxes.

- (e.g. real fire or fire propagation apparatus tests), higher accuracy is expected compared to the reported data in literature. Doing comparative analysis for total burning period and different heater arrangements using the applied mean absorption coefficients in Figure 7 is the idea of future research.

## CONCLUSIONS

Ignition time is an important flammability factor of the materials. To estimate this parameter for polymers, in-depth absorption of thermal radiation should be done accurately. The mean absorption coefficient is a key parameter in determining the in-depth absorption that depends on the sample thickness and source temperature. In this study, spectral absorption coefficient of black PMMA was determined using spectroscopy for the wavelength region of 0.25 to 25  $\mu\text{m}$ . Using the total transmissivity, mean value of absorption coefficient was calculated as a function of sample thickness and source temperature. To show the application of these parameters in practice, a pyrolysis model was used to estimate the ignition time with applying mean absorption coefficients. Simulation results captured the experimental data of ignition time with considered uncertainty. To determine the effect of presented mean absorption coefficients with more detail, some simulations should be done for different heater arrangements and total burning period of the sample.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors greatly acknowledge the support of Academy of Finland under grant no. 314487 and the Finish Fire Protection Fund (PSR).

## REFERENCES

1. F. Alinejad, H. Bordbar and S. Hostikka, "Development of full spectrum correlated k-model for spectral radiation penetration within liquid fuels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 158, p. 119990, 2020.
2. F. Alinejad, H. Bordbar and S. Hostikka, "The ordinate weighting method for solving radiative heat transfer through a Fresnel interface," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, p. 107685, 2021.
3. N. Bal and G. Rein, "Numerical investigation of the ignition delay time of a translucent solid at high radiant heat fluxes," *Combustion and Flame*, vol. 158, p. 1109–1116, 2011.
4. I. T. Leventon, J. Li and S. I. Stoliarov, "A flame spread simulation based on a comprehensive solid pyrolysis model coupled with a detailed empirical flame structure representation," *Combustion and Flame*, vol. 162, p. 3884–3895, 2015.
5. J. Gong, J. Li, C. Li, L. Shi, X. Wang, S. Wang, J. Jiang and Z. Wang, "Analytical prediction of heat transfer and ignition time of solids exposed to time-dependent thermal radiation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 130, p. 227–239, 2018.
6. T. Steinhaus, "Evaluation of the thermophysical properties of poly (methylmethacrylate): a reference material for the development of a flammability test for micro-gravity environments," 1999.
7. R. E. Lyon and J. G. Quintiere, "Criteria for piloted ignition of combustible solids," *Combustion and Flame*, vol. 151, p. 551–559, 2007.
8. F. Jiang, J. L. de Ris and M. M. Khan, "Absorption of thermal energy in PMMA by in-depth radiation," *Fire Safety Journal*, vol. 44, p. 106–112, 2009.
9. G. Linteris, M. Zammarano, B. Wilthan and L. Hanssen, "Absorption and reflection of infrared radiation by polymers in fire-like environments," *Fire and materials*, vol. 36, p. 537–553, 2012.
10. P. A. Beaulieu and N. A. Dembsey, "Flammability characteristics at applied heat flux levels up to 200 kW/m<sup>2</sup>," *Fire and Materials: An International Journal*, vol. 32, p. 61–86, 2008.
11. G. J. Fiola, D. M. Chaudhari and S. I. Stoliarov, "Comparison of pyrolysis properties of extruded and cast Poly (methyl methacrylate)," *Fire Safety Journal*, vol. 120, p. 103083, 2021.



# 27.11-3.12.2021

Vuoden 2021 teemana:

## Ikäihmisten paloturvallisuus

[www.paloturvallisuusviikko.fi](http://www.paloturvallisuusviikko.fi)



# Optimizing the spectral based fire detection strategy with high-fidelity radiation spectra

## Abstract

Accurate detection of an unwanted fire in its early stage is crucial in mitigating fire and preventing damages. The detection strategy must also avoid false alarms and the associated disruptions in workplaces. Thermal radiation -based detection is the fastest detection method, and commonly used in e.g. petroleum industry. The main challenge is to distinguish the radiation spectra of fires from those of other sources, e.g. hot objects or solar spectrum. The principles of radiation-based detection have been known for long, but open data and worked-out feasibility studies are rare. In this work, comparing the experimentally measured high resolution spectra of several fires with the numerically obtained line-by-line spectra of hot black body emitters, we present an optimized fire detection strategy and propose its implementation using gradient heat flux sensors with three optical filters with optimal cutoff limits.

## Introduction

While there are several conventional ways for detecting fire such as detecting smoke or heat, modern fire detecting technology includes sensors detecting combustion or hot gases before or precisely when combustion starts. Intelligent multi-sensors are designed to detect and process heat, smoke, and carbon monoxide utilizing intelligent algorithms to distinguish between fire and false alarms [1]. The industry finds that false alarms and sensitive detectors are a challenge due to the cost of emergency services and the decreasing credibility of buildings where false alarms repeat themselves.

Thermal radiation has a crucial role in heat transfer of fire and its spreading. Besides its undoubtedly important role in evolving fire, it has a unique spectral feature that can be implemented for intelligent detection of fires. The main challenge of the radiation-based detection is to distinguish the radiation spectra of fires from

those of other sources, e.g. hot objects or solar spectrum. The use of the spectral characteristics, such as water vapor and carbon dioxide emission bands, has been mentioned even in textbooks, but the efficiency of the infrared spectrum-based detection strategy has not evaluated in open literature. The present work provides a detailed data analysis and a novel paradigm for detecting fire by designing new advanced micro-composite bandpass filters and combining them with the gradient heat flux sensor chips.

## Fire radiation Spectra

Heat in the form of radiation is transferred via electromagnetic waves with a certain range of wavelength (i.e. 0.1–100  $\mu\text{m}$ ). Recent improvements in computational power can pave the way for more accurate modeling of wild and unwanted fires which consequently can lead to more effective methods of mitigating and extinguishing fires. Fire contains multiphysics complex highly coupled phenomena such as combustion, hydrodynamics, and heat transfer. While computational fluid dynamics (CFD) provides a great opportunity to simulate fire and predict its evolution, it usually suffers from oversimplification of physics, limited computational resources, and lack of trustable data for setting CFD models. Radiation heat transfer is among the most challenging physical phenomena to solve because the radiative transfer equation has directional and spectral dependency in addition to its spatial dependency. It makes the accurate solution of thermal radiation more difficult and costly. It forced most of the fire simulation toward extremely simplifying assumptions such as gray medium. The development of high-fidelity models for the spectral dependency of combustion products is well progressed in the last few decades. The global models such as FSCK [2] or WSGG [3] models, however, aim at accurate prediction of total (i.e. spectrally integrated) radiative heat loss and radiative heat flux, while to obtain

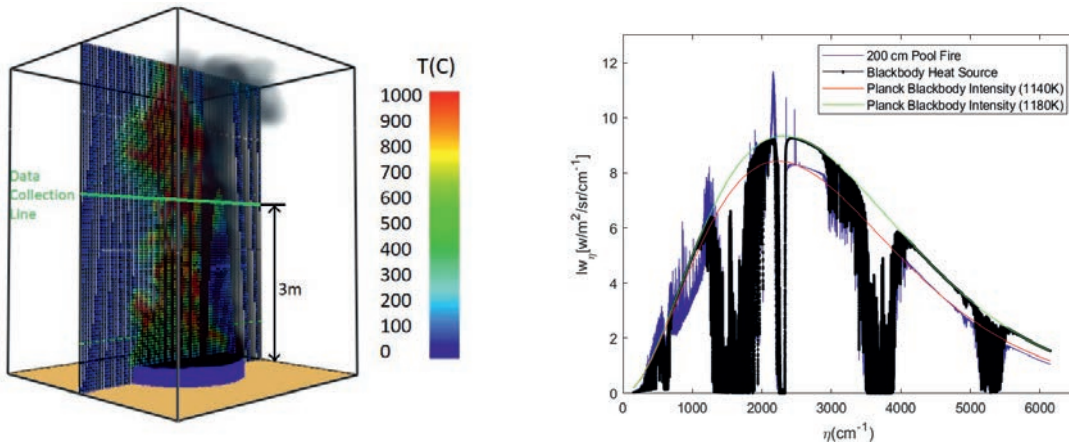


Fig. 1: (a) An illustration of the FDS model used in our previous article in Palotutkimuspäivät 2019 [5], (b) Radiative intensity profile coming from a blackbody hot object compared with the one coming from large pool fire.

detailed information of fire spectra, the radiative transfer equation needs to be solved for very fine spectral resolution representing millions of monochromic electromagnetic waves.

In our previous paper in Palotutkimuspäivät 2019 [4, 5], we reported the results of numerical research aiming at obtaining line-by-line radiation spectra of large-scale pool fires. Building a CFD model in FDS, we obtained the detailed temporal profiles of gas compositions, soot concentration, and temperature along a line of sight of a sensor in large pool fires. We then solved spectral radiative heat transfer along the line of sight of a sensor by using the high-resolution absorption spectra of combustion gases and soot by line-by-line calculations. Figure 1 shows a typical spectral intensity profile obtained for large Heptane and Kerosene pool fires.

Comparing spectra of fire with that of a hot blackbody emitter, one may notice a unique emission peak at  $\sim 2000\text{--}2200\text{ cm}^{-1}$ . It is due to strong emission of hot  $\text{CO}_2$  in fire. Moreover, the strong absorption of cold atmospheric  $\text{CO}_2$  between a fire and a sensor causes a large absorption at  $\sim 2200\text{--}2400\text{ cm}^{-1}$ . This unique behavior is due to the change of strength and location of the absorption band of  $\text{CO}_2$  with temperature [5]. While our numerical results provide high fidelity information about how fire radiation intensity changes with wavenumber, they are for large pool fires that represent the most difficult fire scenario for spectral detections as they contain high load of soot and therefore their spectral behavior is almost gray making them difficult to be differentiated from the radiation of hot objects. Nonetheless, large fires are

naturally easy to detect by other means. Moreover, fire detection has to be done in the beginning stages of fire when it is relatively small. Hence, for this research, we used the experimentally measured spectra of Kerosene pool fires of various sizes of 30, 70, and 100 cm. They are measured by fine FTIR spectrometry at a distance of several meters from the fires. Details of the measurements are discussed in [6]. The measured spectra for three different sizes are shown in Fig. 2.

To avoid false alarms, the ideal detector should differentiate between the radiative intensity spectrum of fire and that of hot objects. We numerically obtained the radiative spectra of some hot blackbody emitters. We solved radiation transfer along the line of sight of a sensor facing the hot objects at 23 m distance. The high-resolution line-by-line absorption spectra of  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , and  $\text{CO}$  have been obtained from HITEMP 2010 spectral database [7]. The details of line-by-line calculations have been discussed in [3, 5]. Figure 3 shows some of the calculated spectra of hot objects.

### Gradient heat flux sensor

The main objective of this study is to develop a novel paradigm for detecting the unique spectral characteristics of fire radiation by measuring radiative heat flux. The optical bandpass filters, with the cutting wavenumbers which will be calculated in the next section, should be combined with heat flux sensors that measure total heat flux. In this regard, gradient heat flux sensors (GHFS) have been considered to measure heat flux. The function of the GHFSs

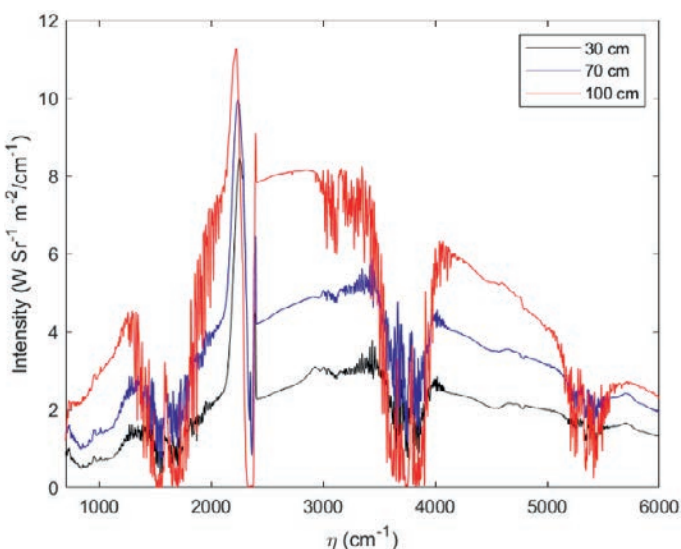


Fig. 2: The experimental radiative spectral intensity reported in [7] for Kerosene pool fires.

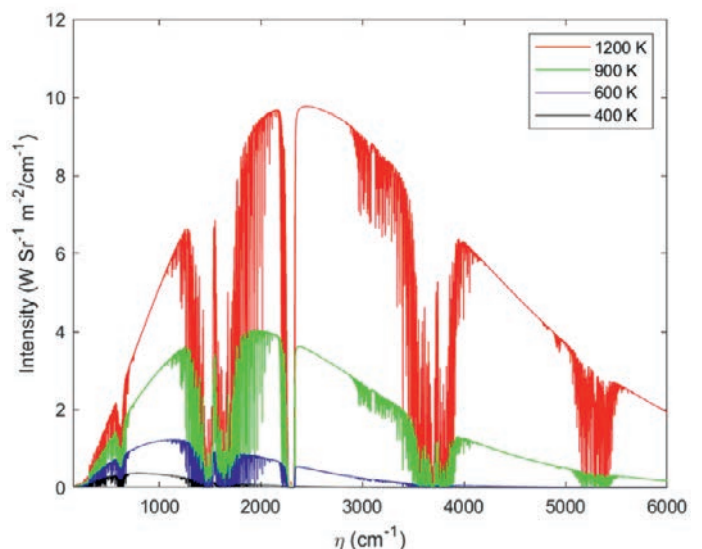
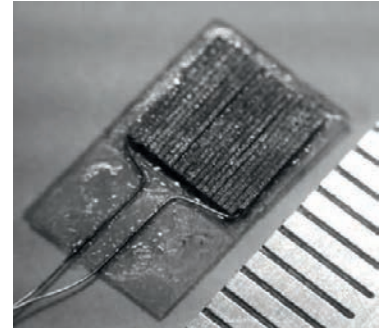
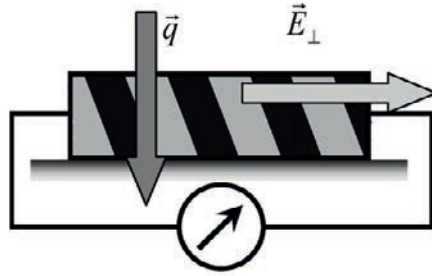


Fig. 3: The numerically calculated radiative intensity spectra reaching a sensor from blackbody emitters of various temperatures at 23 m distance.

Fig. 4: A schematic of the transverse Seebeck effect (right) used in GHFS (left) for heat flux measurement (reproduction from [8]).



relies on the transverse Seebeck effect as shown in Fig. 4a, where the thermo-electromotive force (thermo-EMF) is proportional to the temperature gradient in the direction normal to the applied heat flux vector. Sensors are constructed as a 0.5 mm thick plate with an area of  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  or more (Fig. 4b). They can be implemented without external cooling or electrical power and can be installed on the surface where the heat flux should be measured. GHFSs are made from anisotropic materials and have high sensitivity (up to 20 mV/W), high thermal resistance up to 1600 °C and very small response time ( $\sim 10 \text{ ns}$ ). Gradient heat flux sensors (GHFS) allow measuring heat flux per unit area practically without inertia because of their ultrashort response time constant of  $10^{-8}$  to  $10^{-9}$  seconds [8].

### Detection strategy

Comparing radiation intensity profiles of fire typically shown in Fig. 2 with those of hot objects (Fig. 3), one may notice the hot peak of  $\text{CO}_2$  at  $\sim 2200 \text{ cm}^{-1}$  to be the main feature differentiating fire spectra from those of hot emitters. Hence, we need to design a sensor to detect this peak. Using the GHFS sensors, we need to have several optical bandpass filters to measure the radiative heat flux passing through this part of the spectrum.

Fig. 5 schematically shows the fire detection strategy proposed in this work. Having ideal optical filters with transmissivity changing from zero to one at a distinct spectral location, one can measure the ratio of net radiative heat flux of two neighboring wide bands reaching the GHFS sensors located underneath the filters. The two neighboring wide bands are schematically shown in Fig. 6 and their widths are assumed equal as:

$$\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1 = \eta_3 - \eta_2 \quad (1)$$

The ratio of radiative heat flux of two neighboring wide bands is defined as:

$$\xi(\eta_2, \Delta\eta) = \frac{\int_{\eta_2}^{\eta_2 + \Delta\eta} I_\eta d\eta}{\int_{\eta_2 - \Delta\eta}^{\eta_2} I_\eta d\eta} \quad (2)$$

Calculating these ratios for two cases of fire and hot object ( $\xi_{fire}(\eta_2, \Delta\eta)$  and  $\xi_{BB}(\eta_2, \Delta\eta)$ ) we can differentiate fire from hot object if

$$\delta\xi(\eta_2, \Delta\eta) = \xi_{fire}(\eta_2, \Delta\eta) - \xi_{BB}(\eta_2, \Delta\eta) > \epsilon \quad (3)$$

$\epsilon$  is the detection threshold. Larger  $\epsilon$  means better chance and accuracy of fire detection.

### Optimizing the detection strategy

To find the best detection plan for the proposed strategy, we need to obtain the optimal combination of  $\eta_2$  and  $\Delta\eta$  to maximize  $\epsilon$ . The objective function to be maximized is defined as:

$$\begin{aligned} \overline{\delta\xi}(\eta_2, \Delta\eta) &= \overline{\xi}_{fire}(\eta_2, \Delta\eta) - \overline{\xi}_{BB}(\eta_2, \Delta\eta) \\ &= \frac{\sum_{1 \rightarrow n_{fire}} \xi_{fire}(\eta_2, \Delta\eta)}{n_{fire}} - \frac{\sum_{1 \rightarrow n_{BB}} \xi_{BB}(\eta_2, \Delta\eta)}{n_{BB}} \end{aligned} \quad (4)$$

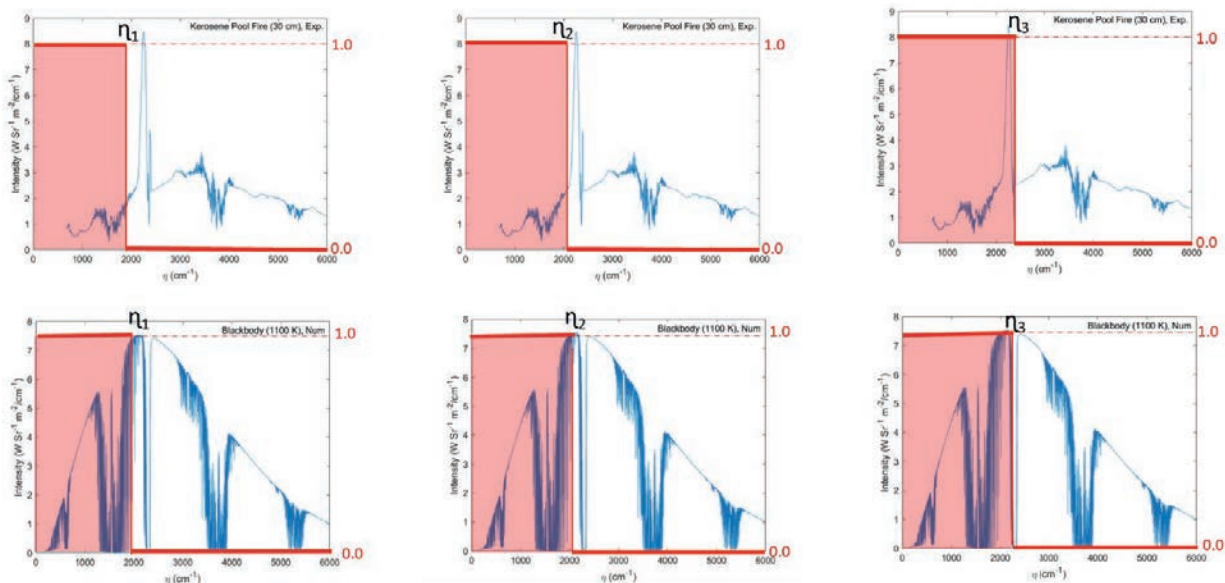


Fig. 5: Using ideal bandpass filters to detect the emission peak of hot  $\text{CO}_2$  at  $\sim 2000\text{--}2200 \text{ cm}^{-1}$ .

- Using the experimentally measured fire spectra of three Kerosene pool fires [6] shown in Fig. 2 and the numerically calculated the radiative spectra of hot black body for nine evenly spaced temperatures between 400–1200 K (Fig. 3), we searched to find the optimal combination of  $\eta_2$  and  $\Delta\eta$  in the following ranges of  $\eta_2$  and  $\Delta\eta$ :

$$2050 \text{ cm}^{-1} < \eta_2 < 2150 \text{ cm}^{-1} \text{ with a step of } 1 \text{ cm}^{-1}$$

$$30 \text{ cm}^{-1} < \Delta\eta < 200 \text{ cm}^{-1} \text{ with a step of } 1 \text{ cm}^{-1}$$

All together, we calculated  $\overline{\delta\xi}(\eta_2, \Delta\eta)$  for 17271 different combinations and found out that  $\overline{\delta\xi}(\eta_2, \Delta\eta)$  is maximum with  $\eta_2=2149 \text{ cm}^{-1}$  and  $\Delta\eta=161 \text{ cm}^{-1}$ . With these two values, the calculated ratio of the radiative heat flux of two neighboring wide bands ( $\xi$ ) for various fires and black bodies are listed in Table 1.

Pool fires of various size (D)	D (cm)			70			100		
	$\xi$								
		30	50	60	70	800	900	1000	1100
Black body at various temperature (T)	$T(K)$	400	500	600	700	800	900	1000	1100
	$\xi$	0.4	0.44	0.47	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53

Table 1: Values of  $\xi$  for the optimized combination of  $\eta_2$  and  $\Delta\eta$ .

As seen in Table 1, the values of  $\xi$  with the obtained optimal combination of  $\eta_2$  and  $\Delta\eta$  are around 0.5 for the spectra of black body emitters while they are always larger than one for the fire spectra. Fig. 7 shows the fire and black body spectra around the obtained optimal wide bands. It means that by using the GHFS sensors together with three optical filters with cut off limits at  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ , and  $\eta_3$ , we can get a signal from our designed detector for  $\xi$  based on which we can detect fire.

### Conclusion and remarks

Analyzing the experimentally obtained radiation spectra of three different pool fires and the numerically obtained radiation spectra of blackbody emitters at various temperature, the emission peak of hot  $\text{CO}_2$  at  $\sim 2000\text{--}2200 \text{ cm}^{-1}$  has been found to be the main and unique feature of fire spectra which can be used for detection purposes. The rest of the spectra are mainly affected by strong absorption of ambient air which is the case for both hot object and fire. Accordingly, an innovative paradigma is presented for detecting fire by sensing the unique feature of radiation intensity spectra. It is based on implementing super fast and sensitive gradient heat flux sensors together with three optical filters aiming at calculating radiative heat flux passing through two neighboring spectral wide bands around the strong emission peak of  $\text{CO}_2$  at  $\sim 2000\text{--}2200 \text{ cm}^{-1}$ .

A detecting signal design is presented based on using three cutoff optical filters and obtaining the ratio of net radiative heat flux of the two neighboring wide bands. We performed an optimization to find the optimal locations of cutoff limits of the filters that produce the most strong detecting signal. The optimal location of bands have been found. With the obtained optimal filter design, the values of detecting signal were found to be around 0.5 for hot black body emitter while it was much larger than one for fires.

### Acknowledgements

The authors greatly acknowledge the support of Academy of Finland under grant no. 314487 and the Finish Fire Protection Fund (PSR).

### LIST OF REFERENCES

- O. El Asri, "Fire detecting technology, past, current, and future," BSc. Thesis., Aalto University, 2020.
- F. Alinejad, H. Bordbar and S. Hostikka, "Development of full spectrum correlated k-model for spectral radiation penetration within liquid fuels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 158, p. 119990, 2020.
- H. Bordbar, F. R. Coelho, G. C. Fraga, F. H. R. França and S. Hostikka, "Pressure-dependent weighted-sum-of-gray-gases models for heterogeneous  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  mixtures at sub- and super-atmospheric pressure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 173, p. 121207, 2021.
- H. Bordbar and S. Hostikka, "Characterization of Thermal Spectral Radiation of Fires for Detection Purposes," in Palotutkimuspäivät, Helsinki, 2019.
- H. Bordbar, S. Hostikka, P. Boulet and G. Parent, "Numerically resolved line by line radiation spectrum of large kerosene pool fires," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 254, p. 107229, 2020.
- G. Parent, G. Erez, A. Collin, M. Suzanne, A. Thiry-Muller, M. Weber, E. Faure and P. Boulet, "Spectral radiation emitted by kerosene pool fires," *Fire Safety Journal*, vol. 108, p. 102847, 2019.
- L. S. Rothman, I. E. Gordon, R. J. Barber, H. Dothe, R. R. Gamache, A. Goldman, V. I. Perevalov, S. A. Tashkun and J. Tennyson, "HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 111, pp. 2139–2150, 2010.
- A. V. Mityakov, S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. A. Snarskii, M. I. Zhenirovsky and J. J. Pyrhönen, "Gradient heat flux sensors for high temperature environments," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 176, pp. 1–9, 2012.

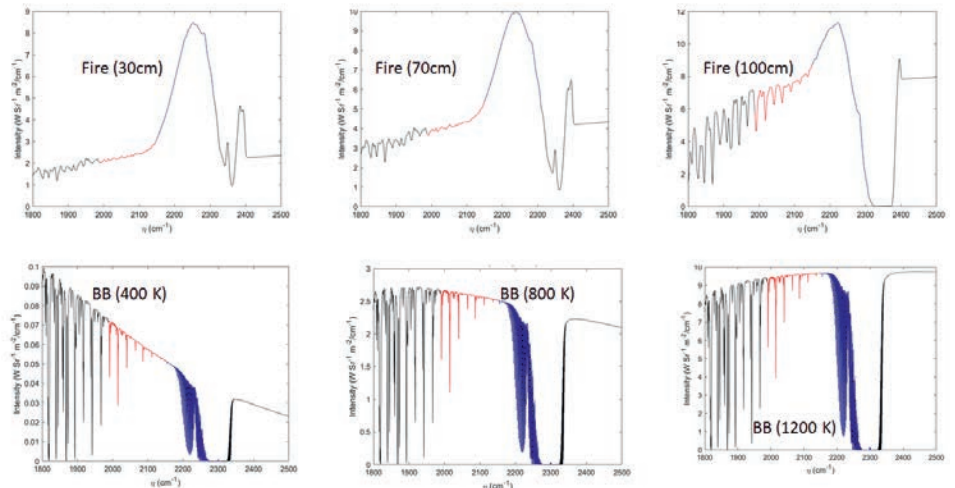


Fig. 7: The fire spectra vs black body spectra around the optimal two wide bands (blue and red).



# Thermal characterization of electric cooktops

## Abstract

Ignition risks associated with cooktops have increased despite the advancement in the cooktop technology. In this work, we try to improve our understanding of cooktop ignitions and the effects of the cooktop type on the ignition risk. A series of experiments were conducted to characterize several types of electric cooktop in terms of their capacity to cause ignitions. Three types of electric cooktops were tested including an electric coil cooktop with cast iron plate, ceramic glass cooktop and an induction cooktop. The electric power and temperature of the heating element of cooktops were measured at different settings using power analyzer, thermocouples, and infrared camera. Furthermore, the thermal responses of cooking pans of different materials are analyzed on heating elements of all three cooktop types. This preliminary study will be helpful to evaluate the competency of different types of electric cooktops in terms of igniting a variety of common kitchen items.

## Introduction

Cooktops are integral part of kitchens and they have been used for ages in homes and industrial kitchens. By 19th century, both gas and electric stoves were introduced separately [1]. However, the use of gas cooktops remained popular as compared to electric cooktops in many countries because of grid irregularities. The induction cooktops were invented in 20th century, but they did not get public attention that time [2]. Now a days, all three cooktop technologies are widely used around the world.

With increased use of cooktops, the potential risks for ignitions have also increased. According to National Fire Protection Agency (NFPA), during 2014–2018, the leading cause for reported home fire and injuries was attributed to cooking and the second potential cause for fatal incidents by home fire [3]. An average of 172,900 home structure fires were caused by cooking in US. As a result of these fires, an average of 550 people died, and 4820 people injured annually. Despite the improvements in cooktop technology, the number of fire incidents have also increased. Cooktops remained the leading cause for kitchen fires with 61 percent. They accounted for 87 percent of deaths, and 78 percent of injuries. Ac-

ording to report by NFPA, the households with electric cooktops have higher risk of catching cooking fire [4].

Induction cooktops are becoming increasingly popular, and thanks to the absence of heated surface or flame, they are assumed to be safer than the conventional heating elements [5]. As compared to traditional cooktops, induction cooktops are energy efficient and possess safety enhancements, such as the reduced risk of burn injuries, and the absence of power output after removal of cookware from hob. However, the possibility of ignition cannot be excluded for the cooktop itself, cookware, and fuel such as cooking oil used for cooking [5].

Despite the modern cooktop technologies, there is a huge gap in the knowledge concerning the factors leading to cooktop fire. For instance, the development of stove guard technologies has led to the development of stove guard standard EN50615, which focuses solely on oil fires. How easily and in which do other materials ignite? And even before that, how does the cooktop temperature develop over time, and how quickly can they ignite typical materials that may serve as the first ignition source? The fires caused by cooktops cannot be completely avoided, but with significant research there can be potential decrease in kitchen fires incidents associated with cooktops.

Considering the fire hazard, the ignition temperature for different cooking oils and solid substances are gathered in Table 1.

Substance	Ignition Temperature (°C)
Canola oil [6]	355 to 367
Soyabean oil [6]	367
Corn oil [6]	362 to 382
Polymethyl methacrylate (PMMA) [7]	380
Polypropylene [8]	388
Cardboard [9]	427
Paper towel [10]	233

Table 1. Ignition temperatures of different substances.

## Experimental setup

Figure 1 shows the experimental setup. Three cooktop types were analyzed in terms of their surface temperatures: electric coil cooktop with cast iron plate, ceramic glass cooktop, and induction cooktop. Experiments were done with different power settings of the heating element.

Cooktops and frying pans specifications are shown in Table 2. An aluminum pan was provided with an iron inserted in its base to work with an induction cooktop.

Power analyzer (Keysight, DAQ970a) was used to measure the consumed power during each test. A systematic arrangement of four K-type thermocouples was used to measure the surface temperature of different cooktops and frying pans (Figure 2). Thermocouple T1 was placed beside the heating element surface, whereas thermocouples T2, T3, and T4 were placed directly against the heating element surface of each cooktop type. Light-weight concrete blocks of few cm<sup>3</sup> in size were used to ensure good contact between the thermocouple and the surface. In addition, each test was recorded by a thermal imaging camera to obtain the spatial temperature distribution.

With frying pans, thermocouple T1 remained at the same position and the other three thermocouples (T2, T3, T4) were placed against frying pan at different locations, as shown in Figure 3.

## Experimental procedure

For each cooktop type, the heating element with highest power output was used for experiments. The surface temperature measurement tests were conducted only with electric coil and ceramic glass cooktop. The different acronyms used for the types of cooktop include electric coil (EC), ceramic glass (CG), and Induction (IC).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Heating element temperature and power

The first results in Figure 4 show temperatures and power consumption with the medium setting of power, i.e. (3/6) for the electric coil and (5/9) for the ceramic cooktop. These two cooktops



Figure 1. Experimental Setup.

show opposite trend with respect to power: in the electric coil cooktop, the power decreases steadily from 360 to 325 W during the first 20 minutes, and then remains steady for the rest of the experiment. In ceramic glass cooktop, power switches on and off, with peak power of 2300 W and cycle duration of few seconds. The time averaged power of the ceramic glass cooktop was 400 W.

The surface temperatures measured from the two cooktops follow similar patterns. During the first 20 minutes, temperature increases continuously, reaching steady value in 40 min for the EC cooktop and 30 min for the CG cooktop. Ceramic glass cooktop shows relatively more fluctuation in temperature due to its power behavior.

When an electric coil cooktop is at maximum power settings, then power abruptly increases to 2300 W and starts decreasing gradually to 2000 W during first 6 minutes (see Figure 5A). After 6 minutes, the power is cut off to capacity of 855 W for rest of the time. When power is maximum during first 6 minutes, temperature rises significantly, but as power is declined to 855 W, there is slight decrease in temperature for 10 minutes and then it remains constant for rest of time.

Cooktop Type	Model No.	Nominal Electric Power (W)	Pan Material	Weight (g)	Diameter (cm)
Electric coil	Rosenlew RKL5100	1000-2000	Cast iron	1660	28
Ceramic glass	Rosenlew RHRN642X	1200-2200	Carbon steel	1330	28
Induction	Electrolux HOI620S	1200-2800	Aluminum	850	28

Table 2. Cooktops and frying pans specifications.

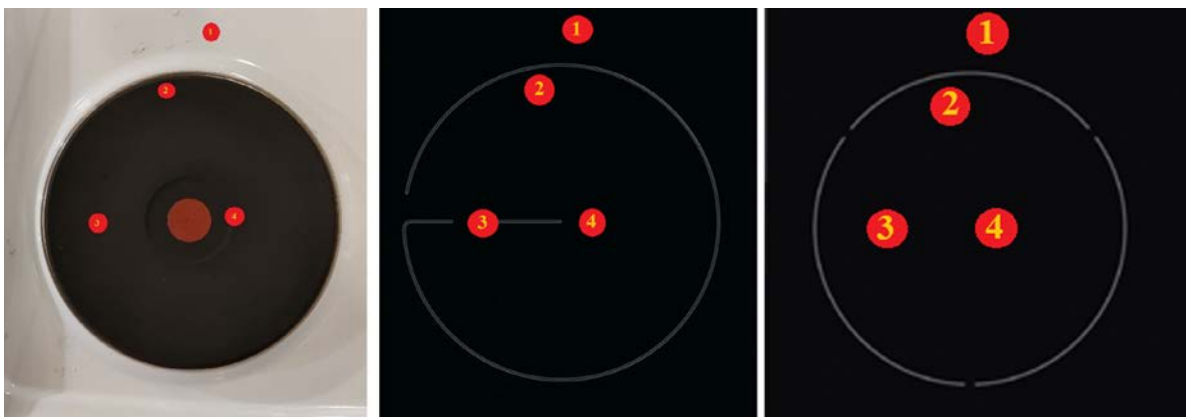


Figure 2. Thermocouples positioning in electric coil, ceramic glass, and induction cooktop.

Figure 3. Thermocouples positioning in cast iron, carbon steel and aluminum pan.

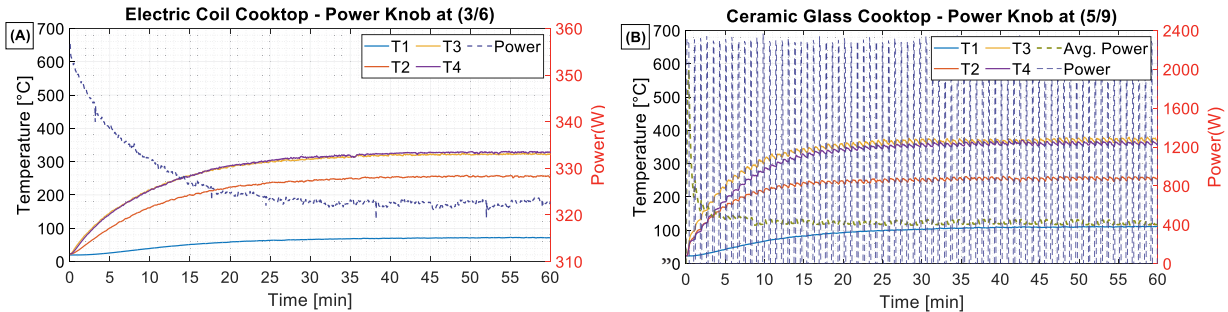
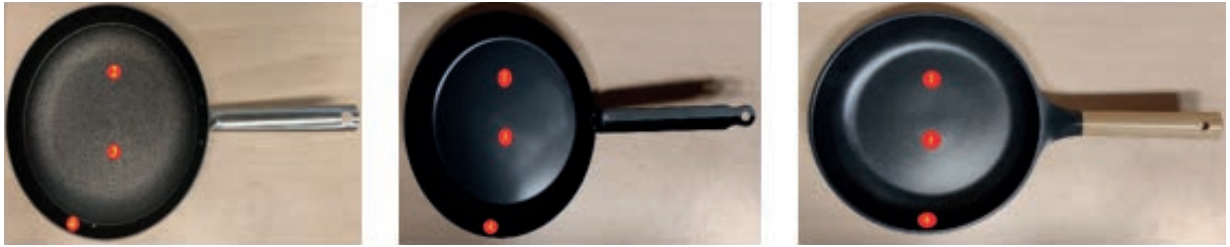


Figure 4. Temperature rise and power in electric coil (A) and ceramic glass (B) cooktops at medium power setting.

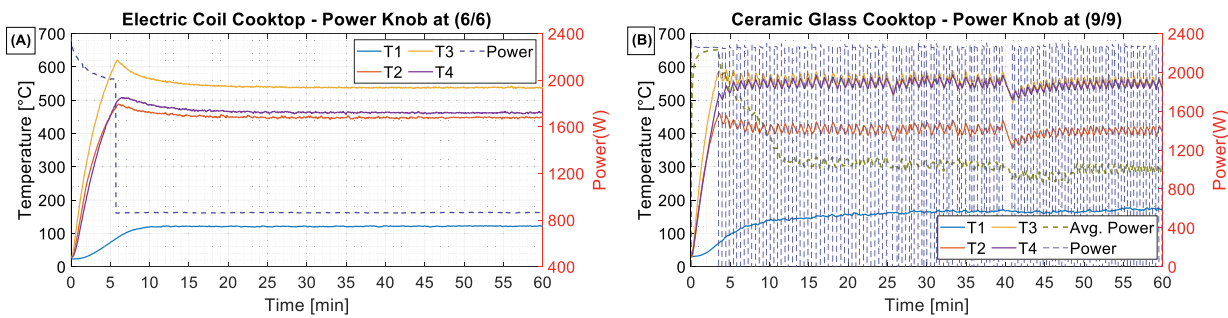


Figure 5. Temperature rise and power consumption in electric coil (A) and ceramic glass (B) cooktops at full power setting.

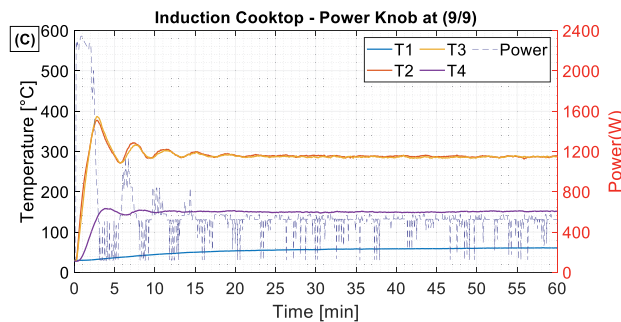
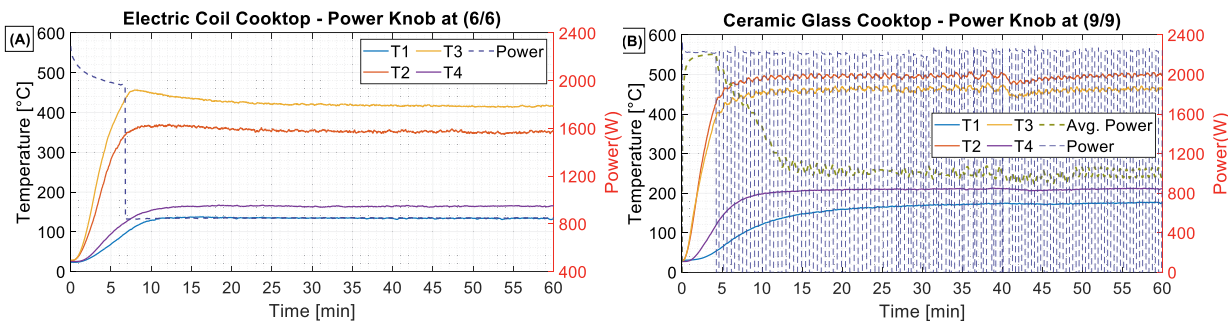


Figure 7. Temperature rise and power consumption in cast iron pan with electric coil (A), ceramic glass (B) and induction cooktop (C).

Figure 5B shows that by turning the ceramic glass on maximum power (9/9), the power remains at maximum value (2300 W) for four minutes, and then repeat the cyclic behavior with time averaged power of 1000 W. During the first four minutes, temperature increases rapidly then remains more or less constant with few tens of degrees fluctuation.

### Cast iron pan

When cast iron pan is placed over electric coil and ceramic glass cooktop (see Figure 7 A & B), behavior of power follows similar

pattern as it was without any pans in both cooktops. However, an operation principle of induction cooktop is dependent on the type of pan material used. By turning knob to (9/9), power jumps to peak value of 2300 W and after 2 minutes goes down to 150 W and then repeats the cycle between 150 to 1200 W range for 15 minutes (see Figure 7 C). Afterwards, the pattern followed by power is similar between 150 to 500 W range.

The temperature rise in cast iron pan with both electric and ceramic glass cooktop follows the similar pattern as it was without placing pan except temperature values are lower. On the

► induction cooktop, temperature rise is dependent on power behavior.

### Carbon steel pan

By placing carbon steel pan on both electric coil and ceramic glass cooktops, power followed the similar pattern regardless of pan material. The temperature rise depicts similar trend with minor differences in both cooktops.

When induction cooktop is turned to full power (9/9) and carbon steel pan is placed over it, for the first 5 minutes, power pattern is like cast iron pan. Afterwards, the power fluctuates between range of 150 W to 500 W. Following the power, temperature also reaches to its maximum value during first 2 minutes and then drops and remains steady state through the remaining operational time.

### Aluminum pan

When Aluminum pan was placed on both electric coil and ceramic glass, the power followed the similar pattern regardless of pan material. Also, the rise of temperature was in similar manner except its values were lower compared to cast iron and carbon steel pans.

Compared to other pans, the power pattern of aluminum pan is different in induction cooktop. The maximum power of 1400 W is attained for first 10 minutes and then it drops to 150 W and then the similar pattern of power is followed rest of time between range of 550 to 800 W. Also, temperature rises according to power behavior. As compared to other cooktops, more temperature is achieved for first 10 minutes in aluminum pan with induction cooktop.

### Maximum temperature in cooktops and pans

Figure 8 shows that electric coil heating element attains maximum temperature of 320 °C and 620 °C with medium (3/6) and full (6/6) power, respectively. In ceramic glass, the maximum temperature with medium (5/9) and full (9/9) power is 380 °C and 580 °C, respectively. Cast iron and carbon steel pans reached to their maximum temperature of 510 °C and 480 °C in ceramic glass cooktop. However, aluminum pan attains its maximum temperature of 390 °C with induction cooktop followed by ceramic glass and electric coil cooktop.

The minimum time required by each cooktop and pan material to reach the maximum temperature is shown in table 3. Note that the average ignition temperatures for different oils and polymer are 374 °C and 390 °C respectively, which are lower than the maximum temperature for most of the cooktops and frying pans.

### Cooling time in electric coil and ceramic glass cooktop

The cooling behavior of the electric coil and ceramic glass cook-

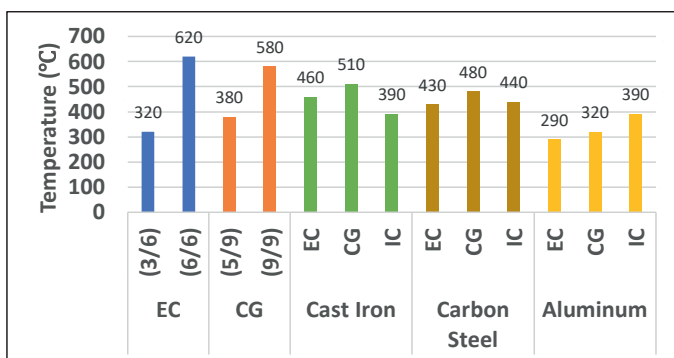


Figure 8. Maximum temperature achieved in cooktops and frying pans.

Cooktop Type	Pan Material	Time (min)	Maximum Temperature (°C)
EC	-	6	620
CG	-	4	580
EC	Cast iron	8	460
CG		8	510
IC		3	390
EC	Carbon steel	8	480
CG		8	480
IC		3	440
EC	Aluminum	10	290
CG		10	320
IC		10	390

Table 3. Time required by each cooktop and pan material to reach maximum temperature.

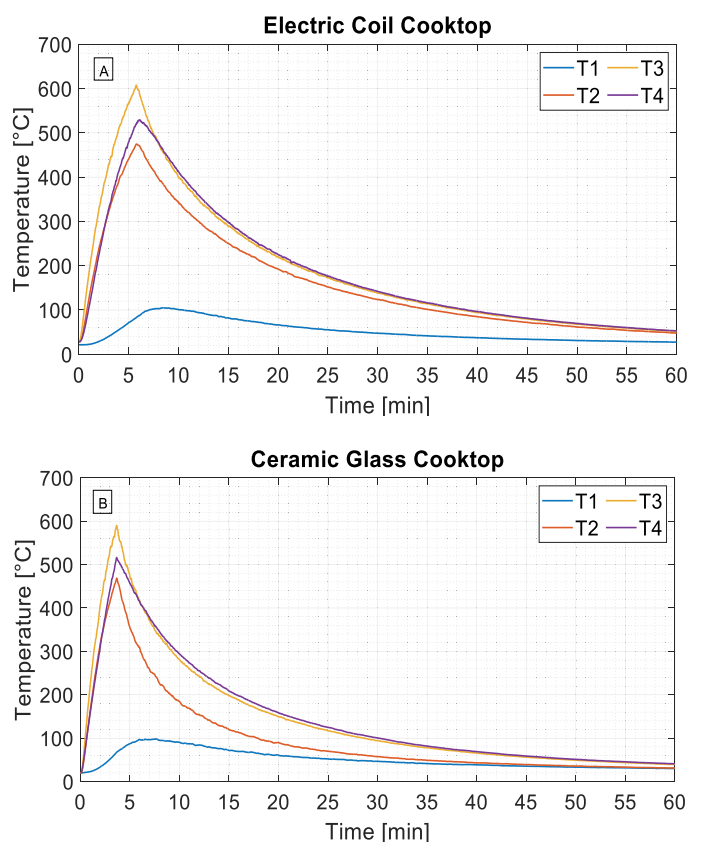


Figure 9. Cooling of the electric coil (A) and ceramic glass (B) cooktops.

tops was measured by turning the cooktops to maximum power and turning off the power when the peak temperature was reached. The results are shown in Figure 9. Due to its massive structure and higher heat capacity, the electric coil cooktop cools down at slower rate. After 30 minutes, the temperature of the ceramic glass has reached 100 °C, whereas in electric coil it is around 150 °C.

### CONCLUSION

In current study, we performed a systematic thermal analysis of three different electric cooktops. Moreover, three different frying pans of different materials were also thermally analyzed. The-

# TUTUSTU CFPA-E SUOSITUKSIIN: [cfpa-e.eu/cfpa-e-guidelines/](https://cfpa-e.eu/cfpa-e-guidelines/)

**Euroopan palontorjuntaliittojen yhteisjärjestö CFPA Europe** (The Confederation of Fire Protection Associations Europe) yhdistää kansallisia palontorjunta- ja paloturvallisuusjärjestöjä 23 Euroopan maassa. CFPA Europe on perustettu vuonna 1974. Sen tavoitteena on jakaa turvallisuustietoutta ja -koulutusta ihmishenkien säästämiseksi sekä omaisuus- ja yritysvahinkojen estämiseksi. Tavoitteiden saavuttamiseksi järjestön toiminta on jaettu neljään eri osa-alueeseen:

• **suositukset** • **koulutus** • **tutkimus** • **tiedottaminen.**

CFPA Europe laatii ja hyväksyy erilaisia turvallisuussuosituksia. Suositukset kuvastavat järjestön jäsenmaiden kehittämiä parhaita käytäntöjä.

CFPA-E:n tapahtumiin, toimintaan ja julkaistuun materiaaliin pääset tutustumaan järjestön nettisivuilta:

**[cfpa-e.eu](https://cfpa-e.eu)**



se results can be used for evaluating the fire ignition potential in kitchens.

The results showed that the surface temperature of electric coil and ceramic glass is hot enough with both medium and full power that it can easily ignite different substances such as cooking oils and solid materials. Also, trend remained similar with different pan materials. In all three cooktops, within first few minutes, cast iron, carbon steel, and aluminum pans can easily reach to the temperature at which different cooking oils and solid substances can be ignited. Our preliminary results are helpful for comparing the candidacy of different types of electric cooktops and pan materials from ignition perspective. Further studies are needed to choose the optimal pan material.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was funded by the Finnish Fire Protection Fund (Palosuojelurahasto) under the "Liesipalojen syttyminen, vaikutukset ja ehkäisy" -project.

## REFERENCES

[1] M. E. Snodgrass, Encyclopedia of Kitchen History. Routledge, 2004.

[2] "Induction Cooking: History and How is Working" <https://www.magneticcooky.com/how-is-working-and-history/> (accessed May 10, 2021).

[3] M. Ahrens, Home cooking fires. National Fire Protection Association, 2018.

[4] M. Ahrens, "Home Cooking Fires," Natl. Fire Prot. Assoc. Quincy, MA, 2019.

[5] W. A. KK and N. K. Fong, "Experimental study of induction cooker fire hazard," *Procedia Eng.*, vol. 52, pp. 13–22, 2013.

[6] J. B. Dinaburg and D. T. Gottuk, "Development of standardized cooking fires for evaluation of prevention technologies: phase one data analysis," Quincy, MA Natl. Fire Prot. Assoc., 2013.

[7] J. Torero, "Flaming ignition of solid fuels," in *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer, 2016, pp. 633–661.

[8] Pg, "POLYPROPYLENE Material Safety Data Sheet." Accessed: May 12, 2021. [Online]. Available: [www.acplasticsinc.com](http://www.acplasticsinc.com).

[9] "Corrugated board – Transport Informations Service." [https://www.tis-gdv.de/tis\\_e/ware/papier/wellpapp/wellpapp-htm/](https://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/papier/wellpapp/wellpapp-htm/) (accessed May 12, 2021).

[10] "Can You Put Paper Towels In The Oven?" <https://kitchengen.com/can-you-put-paper-towels-in-the-oven/> (accessed May 12, 2021).

# Hoivalaitosten poistumisturvallisuuden tietoperusteisen arviointimenettelyn kehittäminen ToPo-hankkeessa

## TIIVISTELMÄ

Poistumisturvallisuus on keskeinen osa laadukasta hoivapalveluympäristöstä, jota koskevaa tietoperusteista arviointimenettelyä on kehitetty ToPo- eli toiminnallinen poistumisturvallisuus hoivapalvelukohteissa -hankkeessa. Tuotettu arviointimenettely perustuu kolmesta arviointitasosta eli 1. hoivapalvelutuottajasta, 2. hoidettavasta asukkaasta ja 3. kiinteistöstä peräisin oleviin keskeisiin tietosisältöihin. Tietosisältöjen määrittely, kokoaminen ja yhteensovitus laskennalliseen arviointimenettelyyn muodostivat hankkeen menetelmällisen keskiön. Laskennallisen arviointimenettelyn lisäksi hankkeessa rakentuivat poistumisturvallisuusarviointin prosessimainen kuvaus (päättelypuu) pelastusviranomaiskäyttöön sekä jäsentynyt näkemys rakennusten 3D-tietomallien ja hoivapalvelutoimijan RAI-tietojen soveltuvuudesta poistumisturvallisuusarviointin tietojen muodostuksessa. Rakentuneiden tulosten yhteisvaikutuksena kyetään arvioimaan ja sen pohjalta kehittämään systemaattisesti ja laaja-alaisesti hoivapalveluympäristöjen toiminnallisen poistumisturvallisuuden tilaa ja sen hallinnan osaamista.

## JOHDANTO

Poistumisturvallisuus on keskeinen osa laadukasta hoivapalveluympäristöstä, jonka osalta hoivapalveluiden tuottajan, rakennuksesta vastaavan ja pelastusturvallisuutta arvioivan pelastusviranomaisen tulee kyetä yhdessä arvioimaan mahdollisimman luotettavasti, kuinka poistumisturvallisuuteen vaikuttavat tekijät kyetään ennakoimaan tulipalojen ja muiden vaaratilanteiden ennaltaehkäisyssä, niihin varautumisessa sekä poistumisjärjestelyissä. Poistumisturvallisuuden varmistamisessa ja kokonaisvaltaisessa kehittämisessä keskeisessä asemassa on oleelliseen tietoon perustuva arviointi sekä sen kautta rakentava osaamisen hallinta.

ToPo- eli Toiminnallinen poistumisturvallisuus hoivapalvelukohteissa -hankkeessa on rakentunut tietoperusteinen, yhden-

mukainen ja kansallisen tason käyttöön soveltuva arviointimenettely hoivapalvelukohteiden toiminnallisen poistumisturvallisuuden arvioimiseen. Arviointimenettely perustuu kolmesta tarkastelutasosta eli 1. hoivapalvelutuottajasta, 2. hoidettavasta asukkaasta ja 3. kiinteistöstä rakentuvista tiedoista, joita arvioidaan tarkastelutasoittain ja kokonaisuutena suhteessa hoivalaitosten toiminnallisen poistumisturvallisuuden kattavaan ja systemaattiseen arvioimiseen. Hanke on Palosuojelurahaston rahoittama ja se on toteutunut Etelä-Karjalan ja Kymenlaakson pelastuslaitosten, Etelä-Karjalan sosiaali- ja terveydenhoitopiirin (Eksote), Kymenlaakson sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen (Kymsote) sekä Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto (LUT-yliopisto) ja LAB-ammattikorkeakoulun monialaisena yhteistyönä.

Hankkeessa kehitettävän arviointimenettelyn tavoitteena on luoda edellytyksiä sille, että hoidettavat henkilöt, henkilöstö sekä muut mahdolliset rakennusta käyttävät voivat poistua turvallisesti tulipalossa tai muussa vaaratilanteesta itsenäisesti tai avustettuina. Kehittämisen keskeiset tiedot koskevat erityisesti a. rakennuksia ja näiden toiminnallisuutta rakennusten digitaalisten tietomallien perusteella, b. hoivapalvelujen tuottamisen keskeisiä informaatioisisältöjä sekä näihin perustuvia, yhdenmukaistettuja arviointitoimenpiteitä ja c. hoidettavien asukkaiden osalta soveltaen toimintakykyisyyttä määrittävää, kriittistä informaatioisisältöä. Tietosisällön määrittelyssä on huomioitu potilaan toimintakykyisyyttä arvioiva RAI-arviointimenettely ja siihen perustuva EVAC-arviointityökalu [1]. Kehitettävä arviointimenettely tuottaa tarkennettua ja spesifistä tietosisältöä poistumisturvallisuuden arviointiin, ja muodostaa yhdessä nykymuotoisen arviointimenettelyn kanssa kattavan ja kehittyvän toiminnallisen poistumisturvallisuuden arviointikyvyn. Hanke vastaa myös osaltaan pelastustoimen menettelyiden tieto-ohjattavuuden sekä yhdenmukaistamisen strategiaan tarpeisiin.

## TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa hyödynnettiin eri tutkimusmenetelmiä, joiden kautta tuotettiin vastauksia tutkimuksen pääkysymykseen eli ”Mikä tieto on oleellista poistumisturvallisuuden arvioinnissa?” Tietoa muodostettiin systemaattisesti kolmelta tasolta eli 1. rakennusta, 2. hoivalaitostojen ja 3. hoidettavia asukkaita koskien.

Rakennusta koskevan tiedon tuottamisen kohdalla fokusoiduttiin rakennusten tietomallien hyödyntämiseen poistumisturvallisuutta koskevan tiedon kokoamisessa ja analysoinnissa. Työpajatyöskentelyjen ja kirjallisuusselvityksen avulla määriteltiin tarvittavat rakennusta koskevat ominaisuustiedot, jotka vaikuttavat poistumisturvallisuuteen. Projektin valitut kolme hoivapalvelupilottikohteista aiemmin tuotetut kolmiulotteiset arkkitehti- ja inventointimallit ja piirustukset sekä rakennuksia koskevat poistumisturvallisuuteen vaikuttavat ominaisuustiedot. Tuotetuista malleista tuotettiin edelleen IFC-standardin mukaiset tietomallit ja arvioitiin niiden hyödyntämistä poistumisturvallisuuden arvioinnissa IFC-mallien tarkasteluun sopivilla ohjelmatyökaluilla.

Hoidettavia asukkaita koskevan tiedon tuottamisessa painotettiin RAI- eli Resident Assessment Instrument -potilastietojärjestelmässä olevan keskeisen tiedon tunnistamiseen ja poimintaan. RAI on laajasti Suomessa sovellettu standardoitu välineistö asiakkaan palvelutarpeen arviointiin ja palvelusuunnitelman laatimiseen [2]. Asiakkaan RAI-arvioinnissa selvitetään mm. arjessa suoriutumista, psyykkistä ja kognitiivista vointia, sosiaalista toimintakykyä ja hyvinvointia, terveydentilaa, ravitsemusta ja kipua. Kutakin mitattavaa tekijää edustaa RAI-järjestelmässä (tarkemmin RAI-HC ja RAI-LTC) yksilöity koodi, esim. H2b (siirtyminen tasolta toiselle).

Suomessa on käytössä useita RAI-välineitä, joista ikääntyneiden asumispalveluissa Eksotessa on käytössä RAI-LTC (Long Term Care), ja Kymssotessa RAI-HC (Home Care). RAI:n laatumoduulia hyödynnettiin poistumisturvallisuuteen liittyvässä tiedonhaussa. Poistumisturvallisuuden osalta oleellisia osa-alueita ovat asukkaan kognitio, liikkuminen sisätiloissa ja käytettävät apuvälineet, joita kuvaavat RAI-mittarit sisällytettiin arviointitiedon tuottamiseen. Kognitiomittari CPS\_6:n kautta saadaan viitteitä asukkaan mahdollisesta muistihäiriöstä tai muista kognitiivisen toimintakyvyn häiriöistä. IADL\_6-mittari kertoo oletetusta arki-suoriutumisesta aterioiden valmistamisessa, kotitaloustöissä ja puhelimen käytössä. Päivittäisten toimintojen mittari ADL-H\_6 kuvaa asukkaan suoriutumista muun muassa wc-käynneistä, liikkumisesta sekä henkilökohtaisen hygienian hoitamisesta.

Mittareiden lisäksi poimintaan sisällytettiin kuuloon, näkökykyyn, asukkaan liikkumisen apuvälineisiin ja portaissa kulkemiseen liittyviä kysymyksiä. Diagnooseista huomioitiin hemiplegia sekä lääkitystiedoista psykelääkkeiden käyttö. RAI HC- ja RAI LTC -tiedoissa oli muutamia eroavaisuuksia, jotka huomioitiin tietojen poiminnassa.

Pelastusviranomaiset keskittyivät hankkeessa poistumisturvallisuuden kuvaamiseen niin sanottuna päättelyprosessina, jossa tunnistettiin hoivalaitosten toiminnallisen poistumisturvallisuusarvioinnin prosessin päävaiheet ja näiden kulku päättelyyn tarvittavan tiedon ja sen perusteella tehtävien ratkaisujen tulokulmasta. Päättelyprosessin tuottamisessa hyödynnettiin työpajatyöskentelyä, ja siihen osallistuivat Etelä-Karjalan ja Kymenlaakson pelastuslaitosten sekä pelastuslaitosten kumppanuusverkoston asiantuntijat.

Laskennallisen arviointimallin tuottamiseksi toiminnallista poistumisturvallisuutta eri näkökulmista avaavat tietosisällöt analysoitiin ja muotoiltiin kriteeristöiksi laskennallisen arviointimalliin. Arviointimallin muotoilussa sovellettiin niin sanottua

AHP-menetelmää (analytic hierarchy process), joka on soveltuva työkalu monimutkaisten, erityyppisistä tekijöistä (määrällisesti mitattavat sekä laadulliset tekijät) koostuvien ongelmien ja päätöksentekotilanteiden mallintamiseen [3]. Arviointimallin tietosisältöä ideoitiin, kategorisoitiin ja jäsennettiin monitoimijaisissa työpajoissa, joihin osallistettiin kutakin arviointiperustetta edustavia osajia. Analyysiprosessista vastasi LUT-yliopisto. Pelastusviranomaisen tulkitseminen muodostunutta tietoa ja arviointirakennetta suhteessa Pelastuslain 379/2011 ja tähän liittyvien säädösten vaatimuksiin laadukkaan poistumisturvallisuuden ja sen arvioinnin toteutumiseksi.

## TULOKSET

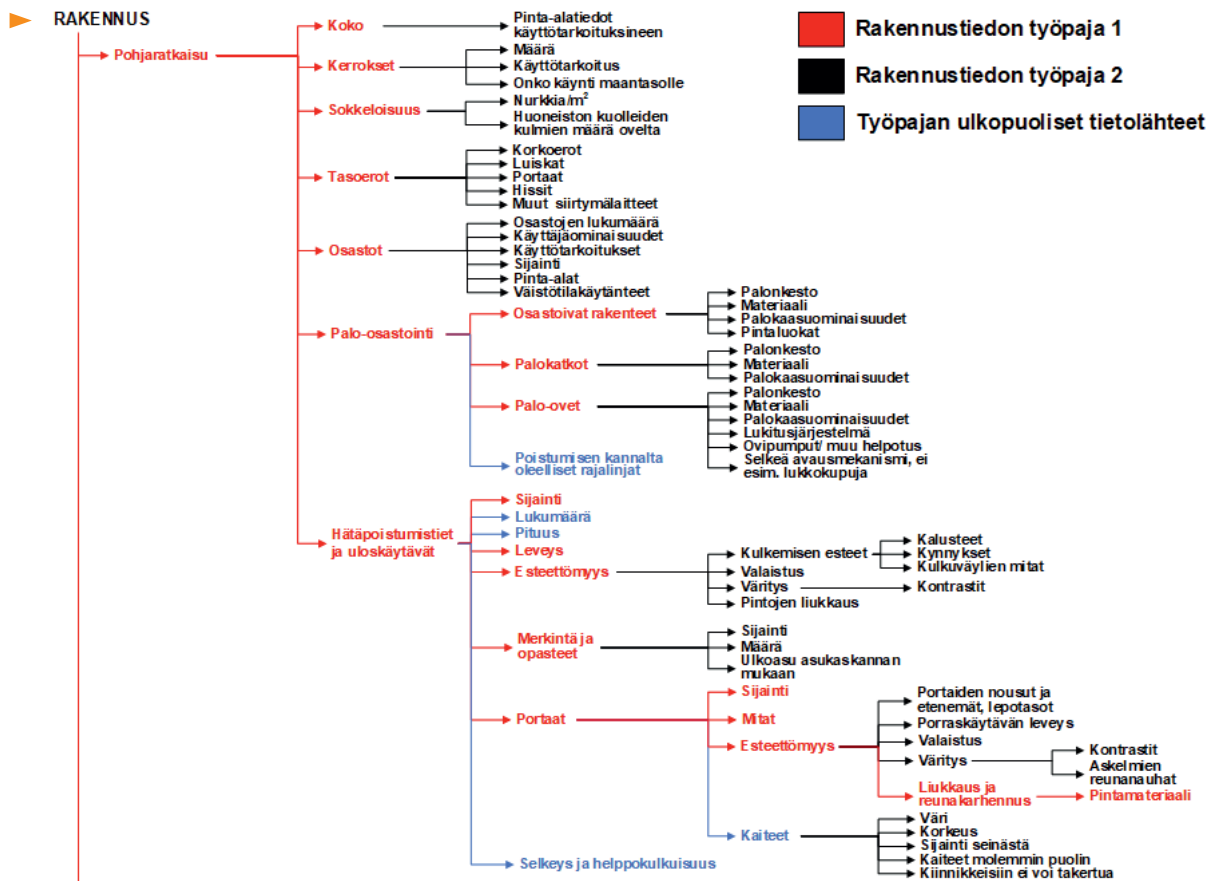
### Rakennuksen tietomallien hyödyntäminen poistumisturvallisuustekijöiden tunnistamisessa

Työpajoissa kootut rakennuksen poistumisturvallisuuteen vaikuttavat tekijät jäsennettiin hierarkkiseksi rakenteeksi, jonka pääryhmiksi määriteltiin rakennus, varusteet ja kalusteet sekä muut -ryhmä. Rakennus-pääryhmän alaryhmiksi määriteltiin rakennuksen pohjaratkaisu, tilat, ovet, pelastussuunnitelma, opastetaulut ja kiintokalusteet. Varusteet ja kalusteet-ryhmän alaryhmät ovat irtokalusteet, sekä alkusammutuskalusto. Ryhmään muut sisältyvät rakennuksen paloluokka ja suojaustaso.

Kuvassa 1 on esitetty rakennuksen pohjaratkaisu-alaryhmän muodostama osuus. Luotu puumainen hierarkkinen rakenne oli merkittävä lähtökohta sekä pilottikohteiden mallinnuksessa että arviointimallin määrittelyssä kiinteistöjen osalta.

Laadittujen pilottikohteiden arkkitehtitietomallien laadinta osoitti, että jo olemassa olevien rakennusten mallinnus on työlästä. Tuotettujen IFC-mallien [4] laatuun poistumisturvallisuuden näkökulmasta vaikuttaa myös käytössä oleva suunnittelumallinsohjelma, jolla malli tuotetaan. Varsinaisten poistumisteiden tuottaminen omiksi ominaisuustietoa sisältäviksi malliobjekteiksi oli haastava toimenpide. Tuotetut mallit osoittautuivat erittäin hyödyllisiksi poistumisturvallisuuden arvioinnissa, vaikka kaikkia hierarkiamallin mukaisia tietoja arkkitehtimalleihin ei saatu. Merkittävin poisjäänyt kokonaisuus oli talotekniikkaan liittyvät tiedot, koska niiden sisällyttäminen arkkitehtimalliin ei käytännössä onnistu kattavasti. Tärkeä osa mallien hyödyntämisessä on niiden visuaalisuus arvioitaessa esimerkiksi rakennuksen sokkeloisuutta ja poistumisteiden merkintöjä. Kuvassa 2 on esitetty näkymä yhdestä pilottikohteen arkkitehtimallista. Poistumisteiden sijainti sekä palo-osastot mallinnettiin tilaryhmämalleina.

Mallien tarkasteluun valittiin kaksi eri ohjelmataratkaisua, joiden peruskäyttö on suhteellisen helppoa ja ne tukevat hyvin sekä mallissa olevan ominaisuustiedon tarkastelua että visuaalista arviointia. Ohjelmien avulla tehtyjen mallitarkastelujen perusteella kolmiulotteiset mallit ovat huomattavasti havainnollisempia kuin pelkät piirustukset. Mallit auttavat erityisesti hahmottamaan rakennuksen kokonaisuutena. Mallien sisällä tehtävät virtuaaliset kävelyt helpottavat poistumisteiden käytettävyyden arviointia. Molempaa valittua ratkaisua pitää edelleen kehittää, jotta ne palvelisivat niitä käyttäjiä, jotka tekevät poistumisturvallisuuden arviointia. Erityisen tärkeää on löytää nopeasti ja rajata erilaisilla hakutoiminnoilla tarvittava tieto ja rakennuksen komponentit. Tietomallien käytön peruslähtökohta poistumisturvallisuuden arvioinnissa on, että niiden tietosisältö kattaa nimenomaan tarkasteltavassa käyttötapaussessa tarvittavat komponentit. Tarkastelussa tapauksessa korostui poistumistietä kuvaavat ominaisuudet ja poistumistiemerkintöjen löytyminen malleista. On myös tärkeää, että mallit ovat helposti ja tietoturvaselästi käyttäjien saatavilla pilvipalvelujen ja nettilinkkien avulla. ▶

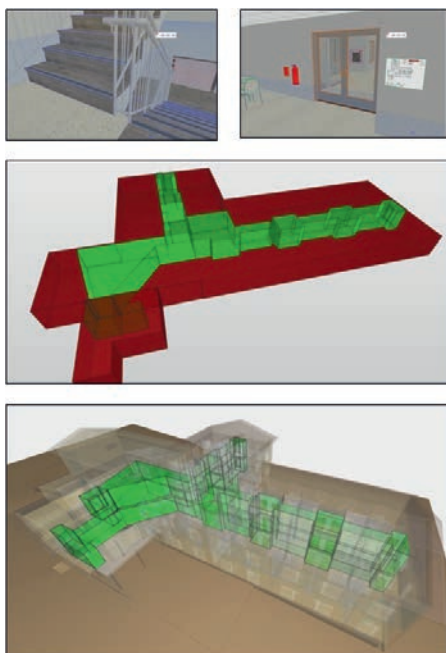


Kuva 1. Rakennuksen pohjaratkaisu-alarajien muodostama osuus kehitetyssä tiedon hierarkiamallissa.

### Poistumisturvallisuutta tukeva päättelypuu

Pelastusviranomaisen arviointiprosessi hoivapalvelualueiden poistumisturvallisuudessa määritettiin A-, B- ja C-osa-alueista koostuvana prosessina (Liite 1).

Päättelypuun tuottamisen yhteydessä havaittiin kansallisesti merkittäviä eroja poistumisturvallisuutta mitoittavissa ajoissa niiden kohteiden osalta, joissa on automaattinen sammutuslaitteisto. Työpajoissa ja kumppanuuksissa nousi esille tarve poistumisturvallisuutta mitoittaviksi yhteisiksi ajoiksi. Vaikka yksittäisessä onnettomuustilanteessa on arvioitava aina erikseen se, onko



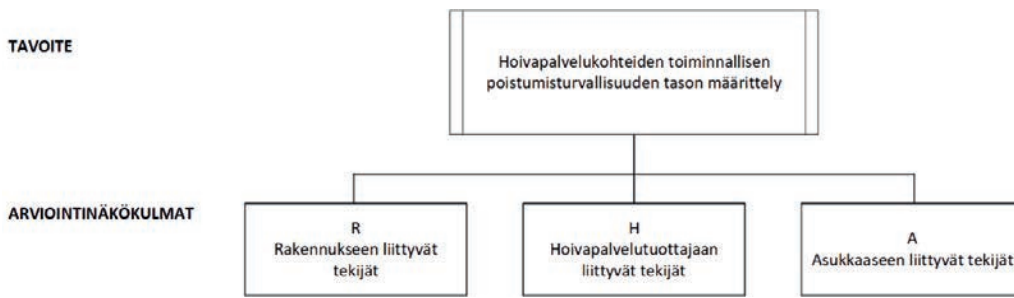
Kuva 2. Näkymiä yhdestä pilotti-kohteen arkkitehtuurimallista (kuva: Jarno Rautiainen, LAB-AMK).

alkusammutus tai evakuointi ilman suojavarusteita turvallista toteuttaa, tulee mitoitettavien aikojen olla samat kaikkialla Suomessa myös automaattisilla sammutuslaitteistoilla vastustetuissa kohteissa. Hankkeessa mitoitettavat ajat on arvioitu toteutuneiden tulipalojen [5] ja tehtyjen polttokokeiden [6] perusteella. Näiden perusteella nykyistä aikamäärettä kohteissa, joissa ei ole automaattista sammutuslaitteistoa, selkeytettiin ja samalla todettiin sen olevan oikeaa suuruusluokkaa eli enintään kolme minuuttia. Automaattinen sammutuslaitteisto lisää pelastamisen onnistumistodennäköisyyttä ja pienentää muille potilaille ja henkilökunnalle aiheutuvaa vaaraa ja sen osalta esitettiin yhteistä mitoitettavaa aikaa seitsemän minuuttia.

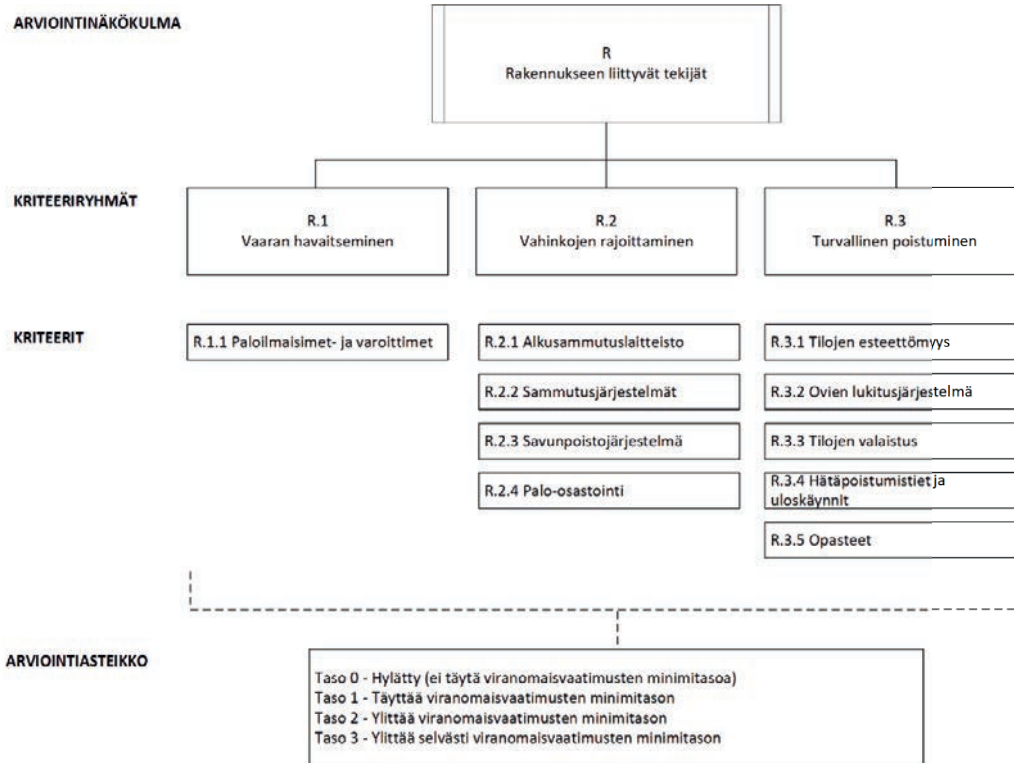
### Hoivapalvelukohteen poistumisturvallisuuden laskennallinen arviointimalli

Laskennallinen arviointimalli on hierarkkiseksi rakenteeksi muotoiltu moninäkökulmainen ja -kriteerinen päätöksentekoa tukeva väline hoivapalvelukohteen poistumisturvallisuuden kokonaisvaltaiseen arviointiin. Arviointimalli tuottaa laskennallisen tuloksen tarkasteltavan kohteen poistumisturvallisuuden tilasta kolmesta eri arviointinäkökulmasta: Rakennukseen liittyvät tekijät; Hoivapalvelutuottajaan liittyvät tekijät; ja Asukkaaseen liittyvät tekijät (Kuva 3), ja yhdistää arviointituloksen poistumisturvallisuusindeksiksi. Työkaluina on hyödynnetty Excel-laskentataulukoita ja AHP-ohjelmistoa. Laskennallinen tulos perustuu näitä näkökulmia tarkentavien painotettujen kriteerien arviointiin kohdekohtaisiin tietoihin. Laskennallisten tulosten perusteella voidaan mm. tuottaa herkkyysanalyysjä arviointimallin kriteerien painotuksia muuttamalla (eli voidaan tarkastella, miten tulos muuttuu, jos tehdään kehitystoimenpiteitä), kehittää ennakoivasti kohteen poistumisturvallisuuden käytäntöjä ja toimintatapoja sekä vertailla saman tyyppisiä kohteita keskenään.





Kuva 3. Laskennallisen arviointimallin rakenne ylätasolla.



Kuva 4. Rakennukseen liittyvien tekijöiden ryhmittely.

*Rakennukseen liittyvät tekijät* on jaennetty kolmeksi kriteeriryhmäksi (Vaaran havaitseminen; Vahinkojen rajoittaminen; Turvallinen poistuminen), joihin liittyy yhteensä kymmenen tarkempaa arviointikriteeriä (Kuva 4). Kohteen suorituskykyä arvioidaan näiden kriteerien suhteen neliportaisen tasomallin avulla, jossa Taso 0 ei täytä viranomaisvaatimusten minimitasoa, ja Taso 3 ylittää selvästi viranomaisvaatimusten minimitasoa.

*Hoivapalvelutuottajaan liittyvät tekijät* mittaavat kohteessa toimivan palveluntuottajan näkökulmasta laadudokumentaation ajantasaisuutta (sis. pelastussuunnitelma, poistumissuunnitelma, omavalvontasuunnitelma), tilannetietoisuutta (esim. ajantasainen tieto kiinteistössä olevasta henkilömäärästä), rakennuksen tunteudesta, turvallisuusosaamisen perehdytys- ja koulutuskäytäntöjä sekä resursseja, turvallisuuskulttuurin tasoa, ja turvallisuusjohtamisen prosesseja ja käytäntöjä kohteessa. Näiden tekijöiden arvioinnissa hyödynnetään laadullisia arviointiasteikkoja ja mittareita.

*Asukkaaseen liittyvien tekijöiden* osalta arvioidaan erilaisten RAI-järjestelmästä saatavien standardoitujen arviointikysymysten ja -mittarien avulla hoivapalvelukohteen asukkaiden aistitoimintoja, kykyä liikkua ja siirtyä, apuvälineiden tarvetta, päivittäisten toimintojen suorituskykyä, kognitiota ja liikkumiskykyyn vaikuttavia sairauksia. Nämä tekijät vaikuttavat asukkaan kykyyn poistua vaaratilanteesta kohteesta itsenäisesti tai avustettuna. RAI-järjestelmä mahdollistaa tehokkaasti mittaritietojen keruun kohde-

kohtaisesti poistumisturvallisuuden arviointiin erikseen kehitettyjen laatumoduulien avulla tai vaihtoehtoisesti tiedot voidaan poimia asukaskohtaisesti. Laskennallista arviointimallia varten RAI-raakadasta jalostetaan luokiteltuja numeerisia muuttujia, jotka kuvaavat kohteen koko asukaskunnan tilaa edellä listattujen tekijöiden suhteen.

Käytännön arviointityön tueksi on laadittu mittarikäsikirja, joka sisältää arviointiohjeistuksen ja kriteerikohtaiset mittarikortit arviointitietojen keräämiseen. Mittarikäsikirja on tarkoitettu kohteen arvioitsijoiden käyttöön.

## JOHTOPÄÄTELMÄT TULOISTA

Poistumisturvallisuus on keskeinen osa laadukasta hoivalaitosympäristöä, jonka tietoperusteisen arviointimenettelyn kehittämiseen keskityttiin ToPo-hankkeessa. Arviointimenettelyn päätasoina toimivat rakennusta, hoivalaitostoimijaa ja hoidettavia asukkaita koskevat keskeiset tietosisällöt ja näistä muodostunut kokonaisuus. Rakennusta koskevan arviointitiedon keskeisinä tuloksina todettiin, että rakennusten IFC-standardin mukaisia tietomalleja voi hyödyntää laajasti arvioitaessa rakennusten poistumisturvallisuutta ja vastaavasti hankkeessa kehitetyn arviointimenettelyn käytännön toteutuksessa. Mallien on oltava sellaisia, että ne sisältävät poistumisturvallisuuden arvioinnissa tarvittavan tiedon

► ja rakennuksen geometrian. Tietomallien käyttö poistumisturvallisuuden arvioinnissa soveltuu parhaiten uudisrakennuksiin, ja turvallisuudesta vastaavien on pyrittävä tekemään mahdollisimman varhaisessa vaiheessa yhteistyötä mallien laadinnasta vastaavien suunnittelijoiden kanssa, jotta tietomallien sisältö vastaa rakennuksen käytön aikaista arviointia optimaalisesti. Laajemmassa perspektiivissä hankkeen tuloksia tietomallien sisältövaatimusten ja käyttötapauksen osalta voidaan hyödyntää kansallisten tietomallivaatimusten päivitystyössä (Yleiset tietomallivaatimukset) sekä valmisteltaessa uutta maankäyttö- ja rakennuslakia, johon on suunnitteilla lisätä vaatimuksia rakennusten tietomallien tietosisällöille esimerkiksi rakennuslupavaiheessa. Samalla kannattaa ottaa huomioon laajemmin rakennuksen turvallisuuteen liittyvät tietosisältötarpeet, joita on jo määritelty aiemmissa kehityshankkeissa [4] ja [7]. Hankkeen tulokset palvelevat lisäksi tietomallien tarkasteluun soveltuvien, käyttäjystävällisten ohjelmatyökalujen valintaa ja edelleen kehittämistä.

Turvallisuus hoivapalveluissa on monialainen kokonaisuus, jonka muodostumiseen vaikuttavat mm. fyysinen hoivapalveluympäristö, palveluntuottajan turvallisuuskulttuuri, henkilöstöresurssit ja osaaminen sekä hoidettavien toimintakykyisyys. Hoidettavien toimintakyvyn rajoitteita, apuvälineitä ja lääkitystä ja näiden vaikutusta poistumisturvallisuuteen on kyettävä arvioimaan ennakoivasti ja kattavasti. Ikääntyneiden toimintakyvyn arviointiin tarkoitettua RAI-järjestelmätietoa soveltamalla saadaan yhtenäistettyä ja systematisoitua toimintakyvyn vaikutusten arviointia poistumisturvallisuuteen. Asukkaan toimintakyvyn päivittäisten muutosten vaikutus poistumisturvallisuuteen on haasteellinen tutkimuskohde, jonka osalta tarvitaan suunnitelmallista arvioinnin kehittämistyötä. Hoivalaitostoimijan tulokulmasta ToPo-hankkeen yhtenäisellä arviointimallilla lisätään tilannekuvaymmärrystä, turvallisuuden ennakoivaa hallintaa ja turvallisuusosaaamista. Mallin avulla voidaan vaikuttaa siihen, että poistumisturvallisuus näyttyy hoivalaitoksissa entistä kiinteämpänä osana organisaation turvallisuuskulttuuria. Hyvällä ja vahvalla turvallisuuskulttuurilla vaikutetaan kokonaisvaltaisesti turvallisuuteen palvelutuotannossa ja vähennetään riskejä. Luotu arviointimalli on koettu selkeänä apuna erityisesti hoivapalvelutoiminnan esimiehille poistumisturvallisuusosaamisen kehittämisessä. Hankkeessa sote-toimijoiden ja pelastustoimen välinen tiedonvaihto ja yhteiskehittäminen on koettu selkeänä hyötynä ja tämän toivotaan saavan jatkossa entistä systemaattisempia toimintamuotoja. Esimerkiksi poistumisturvallisuus harjoituksia voisi jatkossa suunnitella luovemmin huomioiden yhteistyö hoidettavien ja näiden lähiomaisten kanssa.

Pelastusviranomaiset tuottivat hankkeessa poistumisturvallisuusselvityslomakkeen osaksi ns. päättelypuumäärittelyn, joka on looginen, prosessimaisesti esitetty poistumisturvallisuuden arviointikokonaisuus, jonka osana tullaan suunnittelemaan arviointipisteytys. Tavoitteena on motivoida pisteytyksellä täyttäjää saavuttamaan minitasoa korkeampi pistemäärä, kun saatua hyvää pistemäärää voidaan käyttää tunnisteena poistumisturvallisuuden hyvästä hallinnasta. Mallissa huomioidaan henkilön pelastautumiskyvykyys ja tämän vaikutus poistumisturvallisuuden arviointiin, kuten alentuneen toimintakyvyn potilaiden sekä sängyssä hoidettavien osuudet hoivapalvelukohteessa. Poistumisturvallisuusselvityslomakkeen päättelypuu tuotetaan lähtökohtaisesti web-pohjaiseksi lomakkeeksi, jota on sujuvaa käyttää sekä tarvittaessa päivittää. SPEK ry on laatinut ja vastaa poistumisturvallisuusoppaan päivityksistä, johon ToPo-hankkeen kehitystyö integroituu kehittämissyhteistyönä.

Hankkeessa havaittiin tarve poistumisturvallisuudessa käytettävien mitoitusaikojen yhteismittallistamisesta, joka tarvittaessa

todennetaan poistumiskokeella. Poistumisturvallisuusselvityksen perusteella tehtävä poistumiskoe on viranomaisen vaatima toimenpide poistumisturvallisuuden arviointiin, joka täytyy pitää myös jatkossa viranomaistehtävänä, mutta kriteerit arviointiin on otettava huomioon turvallisuustoiminnassa jo ketjun varhaisemmissa vaiheissa. Kokeen toteutus on kokonaisuutena resurssi-intensiivinen työvaihe valvovalla viranomaisella eli pelastuslaitoksilla, ja tulevaisuudessa arvioinnissa tulee pyrkiä siihen, että poistumiskoe-järjestämistarve on mahdollisimman vähäinen. Tässä hankkeessa lopputuloksena tuotettavan, ja oletettavasti sähköisen arviointiselvitysmenettelyn odotetaan selkeyttävän, tehostavan ja yhdenmukaistavan kansallista poistumisturvallisuuden arviointikykyä siten että tarve poistumiskokeiden tarve vähenee. Sähköinen arviointimenettelytieto mahdollistaa myös sitä koskevan tiedon keräämisen, tilastoinnin sekä analysoinnin nykyistä tehokkaammin. Poistumisturvallisuutta koskevaa tietoa analysoimalla on mahdollista ilmentää ja tulkita tehokkaammin poistumisturvallisuutta lisäävien tai sitä heikentävien syiden muodostamaa kokonaisuutta ja kohdentaa hallintatoimenpiteet näitä syitä vastaavalla tavalla.

Laskennallinen arviointimalli tarjoaa välineen ikäihmisten hoivapalvelukohteiden toiminnallisen poistumisturvallisuuden kokonaiskuvan määrittämiseen. Arviointinäkökulmien yhdistäminen rikastaa ja syventää poistumisturvallisuuden kokonaistilanteen ymmärtämistä, ja ohjaa systemaattisesti ja ennakoivasti kehittämään kohteen turvallisuuskäytäntöjä. Soveltamisessa tulee kuitenkin tiedostaa, että arviointimalliin sisällytetyt kriteerit ovat luonteeltaan erityyppisiä. Tekijöitä voidaan tarkastella esimerkiksi niiden staattisuuden (esimerkiksi rakennuksen tilaratkaisut) tai dynaamisuuden (esimerkiksi asukkaan toimintakyky) kautta, mikä kertoo tekijöiden mahdollisesta muutosfrekvenssistä. Lisäksi tekijät voivat olla aktiivisia (esimerkiksi sprinklerijärjestelmä) tai passiivisia (esim. laatudokumentaatio) sen suhteen, mikä on niiden rooli osana poistumisturvallisuutta tukevaa käytännön toimintaa riskien realisoituessa. Kriteerien luonne vaikuttaa oleellisesti keinoihin ja aikajänteeseen, joilla poistumisturvallisuuden tilaa voidaan ennakoivasti kehittää. Tarvitaan sekä aktiivisia että passiivisia keinoja ja poistumisturvallisuustekijöiden dynamiikan ymmärrystä. Tekijöiden havainnointiin tarvitaan erityyppistä tietoa useista eri tietolähteistä (muun muassa RAI, rakennuspiirustukset ja tietomallit, kohdekohtainen kokemusperäinen asiantuntijatieto, turvallisuus- ja laatudokumentaatio). Tietojen helppoa hyödynnettävyyttä tulisi edistää, jotta poistumisturvallisuuden arviointikäytännöistä ei tulisi liian kuormittavia.

## KIITOKSET

Tutkimusta toteuttava organisaatiot kiittävät Palosuojelurahastoa hankkeen mahdollistaneesta tutkimusrahoituksesta. Pelastuslaitosten kumppanuusverkostoa ja Suomen Pelastusalan Keskusjärjestöä SPEK ry:tä kiitetään hyvästä yhteistyöstä hankkeen toteutuksessa. Hankkeen ohjausryhmää kiitetään asiantuntevasta ja aktiivisesta hankkeen ohjaamisesta.

## LÄHDELUETTELO

[1] Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto. 2019. EVAC-mittari – RAI-arviointimenetelmät työkalu asiakkaiden poistumisturvallisuuden arviointiin. Loppuraportti. [www.pirkanmaanpelastuslaitos.fi/js/upload/1556261956\\_EVAC\\_loppuraportti.pdf](http://www.pirkanmaanpelastuslaitos.fi/js/upload/1556261956_EVAC_loppuraportti.pdf)

[2] Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. 2021. <https://thl.fi/fi/web/ikaantymisen/palvelutarpeiden-arviointi-rai-jarjestelmalla/tietoa-rai-jarjestelmasta>

Huomioi, että kyseessä on poistumisturvallisuutta mittaavat ajat. Yksittäisessä tilanteessa on arvioitava aina erikseen onko alkusammutus tai evakointi ilman suojarasteita turvallisista toteutettua. Mittoitavat ajat on arvioitu toteutuneiden tulipalojen (esim. SPEK 7/2020, Vuosina 2012-2019 automaattisen sammutuslaitteiston aktivoineet tulipalot henkilöturvallisuuskohteissa) ja tehtyjen polttokokeiden (VTT-R-001108-19, Sprinklatun terveyskeskuksen polttokokeet). Automaattinen sammutuslaitteisto lisää pelastamisen onnistumistodennäköisyyttä ja pienentää muille potilaille ja henkilökunnalle aiheutuvaa vaaraa.

**Web-pohjainen lomakkeen täyttö:**

- Tarvittaessa aukeavat opasteet ja kuvat helpottamassa täyttöä
- Täytetyt kentät ohjaavat vastauksia / siirtävät oikeaan kenttään
- Pisteytys eri osa-alueista:
  - pisteytys auttaa vertaamaan osastoja / rakennuksia
  - pisteytys kannustaa kehittämään, vaikka minimi täyttyisi
  - pisteytystä voidaan hyödyntää mm. kilpailutuksissa
    - esim. toiminnanharjoittaja tai sote-alue voi priorisoida toimenpiteitään / verrata ostopalveluita
- Lomake mahdollistaa:
  - osastokohtaisen arvioinnin
  - useiden rakennusten vertaamisen
  - rakennuksen kokonaisuuden arvioinnin
  - yksittäisten poikkeamien osoittamisen tarkemmin

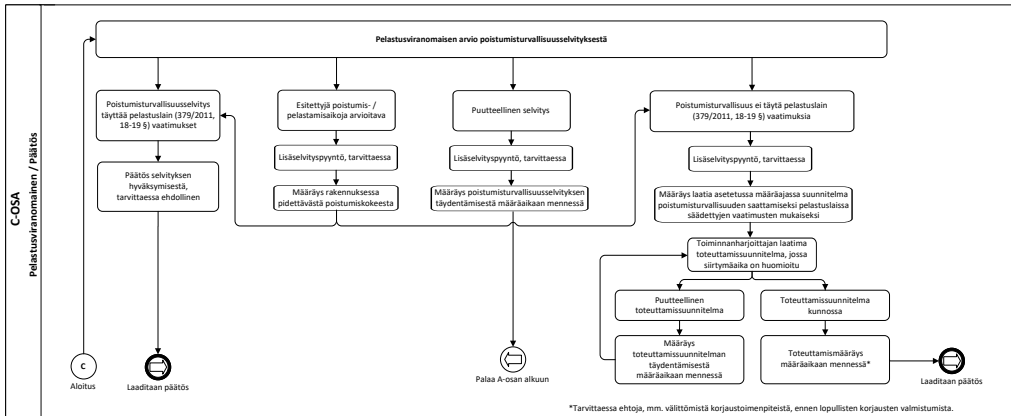
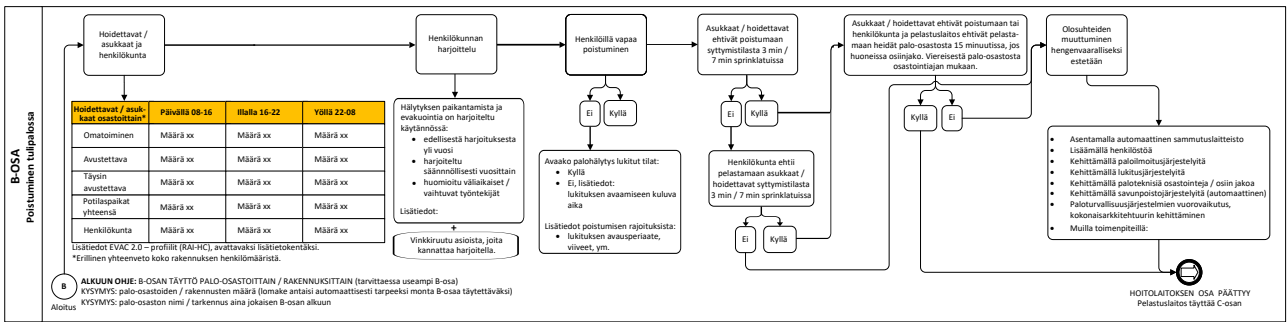
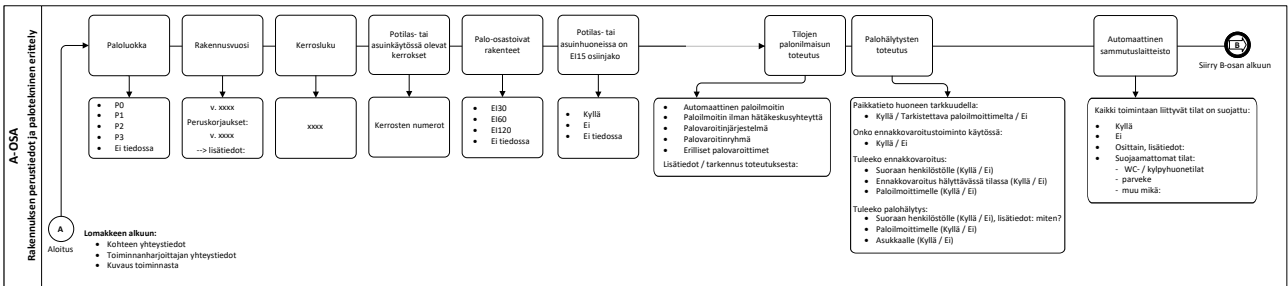
**Täytön ohjaus esimerkki:**

Vastaus A-osassa **EI** automaattista sammutuslaitteistoa:  
B-osassa kysyy Syttyneestä huoneesta 3 min pelastaminen Palo-osaston muista huoneista 15 min Vireiset palo-osastot A-osan luokituksen mukaisesti

Vastaus A-osassa **ON** automaattinen sammutuslaitteisto:  
B-osassa kysyy Syttyneestä huoneesta 7 min pelastaminen Palo-osaston muista huoneista 15 min Vireiset palo-osastot A-osan luokituksen mukaisesti  
\*Tilassa on tavanomainen palokuorma.

Jatkossa mahdollistaa poistumisturvallisuuden reaaliaikaisen arvioinnin, RAI luokka potilaiden kirjauksen yhteydessä voi johtaa toimenpiteisiin.

**Arviointi tulee toteuttaa / mitoittaa potilaiden / asukkaiden suurimman avustustarpeen mukaan!**



[3] Saaty, R.W. 1987. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. Math. Modelling, Vol. 9, No. 3–5, pp. 161–176.  
 [4] Lehtoviita, T. & Rautiainen, J. 2019. Tietomallit rakennusten turvallisuuden varmistamisessa: Tietomallien sisältötarpeet turvallisuuden näkökulmasta. Saimaan ammattikorkeakoulun julkaisuja. Sarja A: Raportteja ja tutkimuksia 89 ISBN 978-952-7055-60-1 (PDF) ISSN 1797-726  
 [5] Stén, T. & Lehto, L. 2020. Vuosina 2012–2019 automaattisen sammutuslaitteiston aktivoineet tulipalot henkilöturvallisuuskohteissa. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestön, SPEK, puheen- vuoroja 7/2020.

[6] Hostikka, S., Veikkanen, E., Sikanen, T., Kajolinna, T., Hakkarainen, T., Afzalifar, A., & Kling, T. 2019. Sprinklatun terveyskeskuksen polttokokeet. Pelastustieto: Palontorjuntateknikka-erikoisnumero, 6–11.  
 [7] Lehtoviita, T., Pylkkänen, T., Paappanen, J., Huuskonen, H., Kanerva, J., Rautiainen, J. & Windahl, T. 2019. Tietomallit rakennusten turvallisuuden varmistamisessa: Hankkeen yhteenveto- raportti. Saimaan ammattikorkeakoulun julkaisuja. Sarja A: Raportteja ja tutkimuksia 90. ISBN 978-952-7055-61-8 (PDF) ISSN 1797-7266

# Vuokratalojen paloturvallisuusinvestointien kustannushyödyt

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa vertailtiin erilaisten paloturvallisuustekniikoiden, kuten sähköverkkoon kytkettyjen palovaroittimien ja liesiturvalaitteiden, kustannusten ja hyötyjen välistä suhdetta vuokrataloympäristössä. Kustannus-hyötylaskelmien avulla selvitettiin, tuottaako paloturvallisuustekniikkaan investoiminen kustannushyötyjä yhteiskunnalle. Kustannuksia ja hyötyjä arvioidessa arvioidaan muun muassa henkeen, terveyteen ja omaisuuteen kohdistuvia välittömiä ja välillisiä kustannuksia. Tutkimuksen johtopäätöksenä todetaan, että kustannustehokkaimman ratkaisun nyt olemassa olevassa tilanteessa muodostaisi tilanne, jossa tuetaan taloudellisesti palovaroittimien, alkusammuttimien kuin myös liesihälytinten tai liesivahtien asentamista ja niiden ottamista kiinteistön omistajan vastuulle. Liesihälyttimiä tai -vahteja ja alkusammutuskalustoa saattaa olla tehokasta tukea myös erikseen ilman kiinteistön omistajan velvoitteita, mutta ainakin palovaroittinten osalta olisi suositeltavaa, että kiinteistön omistaja ottaa ne vastuulleen. Jos erityistä tukea tarvitsevien henkilöiden (”erityisryhmien”) osuus väestöstä kasvaa, nousee entisestään myös liesivahtien ja sammutuslaitteiston kustannushyödyt. Siten olisi suositeltavaa, että erityisesti erityisryhmille kohdennetussa asumisessa kuten senioriasunnoissa ja vastaavissa, asennettaisiin asumisen turvaksi aktiivisia turvalaitteita kuten liesivahti ja korkean riskin kohteissa myös automaattinen sammutuslaitteisto.

## Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksessa tarkastellaan, miten vuokratalojen turvallisuutta kannattaisi jatkossa kehittää ja mitkä keinot olisivat kustannustehokkaimpia erityisesti paloturvallisuuden edistämiseksi. Hankkeessa hyödynnettiin tapaustutkimusta, johon valittiin kolme eri-ikäistä vuokratalokokonaisuutta, joiden nykyisiä paloturvallisuusratkaisuja arvioidaan. Lisäksi hankkeen yhteydessä tehtiin kirjallisuuskatsaus jo tehtyihin palontorjuntatekniikan kustannus-hyötyanalyysseihin, haettiin tilastotietoja pelastustoimen Resurssi- ja onnettomuustietokanta PRONTOsta, toteutettiin kysely pelastustoimen, vakuutusyhtiöiden ja jälkivahinkojen torjuntayritysten

edustajille ja hankittiin SPEKin sidosryhmiltä hintatietoja erilaisen teknisten ratkaisujen hankinta- ja asennuskustannuksista.

Siltä osin, kun tilastoista ei ollut johdettavissa eri tekniikoiden vaikutuksesta tulipalojen esiintyvyyteen ja niiden seurauksiin, PRONTO:n tilastotietoja täydennettiin mainitulla pelastuslaitoksille tehdyllä kyselyllä. Kyselyä hyödynnettiin myös tulipalojen aiheuttamien vesi- ja palovahinkojen arvioimiseksi. Jälkimmäiseen osuuteen vastasi vakuutusyhtiöiden ja jälkivahinkojen torjuntayritysten (JVT) asiantuntijoita. Näiden pohjalta laadittiin kustannus-hyötyanalyysit eri teknisten ratkaisujen kustannustehokkuudesta vuokratalokohteisiin.

Tutkimuksessa vertailtiin erilaisten paloturvallisuustekniikoiden, kuten sähköverkkoon kytkettyjen palovaroittimien ja liesiturvalaitteiden, kustannusten ja hyötyjen välistä suhdetta vuokrataloympäristössä. Kustannus-hyötylaskelmien avulla selvitettiin, tuottaako paloturvallisuustekniikkaan investoiminen kustannushyötyjä yhteiskunnalle. Kustannuksia ja hyötyjä arvioidessa arvioidaan muun muassa henkeen, terveyteen ja omaisuuteen kohdistuvia välittömiä ja välillisiä kustannuksia.

## Tutkimusmenetelmä ja -kysymykset

Tässä tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä on kohteena olevien vuokratalojen teknisen paloturvallisuuden nykytilanne?
- Mitkä paloturvallisuutta edistävät ratkaisut ovat kustannus-hyötysuhteeltaan sopivimmat tarkasteltavissa kohteissa?
- Onko paloturvallisuutta edistävien ratkaisujen kustannus-hyötysuhteessa eroa eri asukasryhmien välillä?

Kustannusten ja hyötyjen välistä suhdetta tarkastellaan vertailemalla turvallisuusinvestointien tuottamia laskennallisia hyötyjä suhteessa onnettomuuden todennäköisyyteen ja taloudelliseen haittaan. Aineistona käytetään kirjallisuuslähteitä, pelastustoimen PRONTO-tietokantaa, estimaatteja täydentävää kyselyä sekä aiempaa tutkimusta aiheesta. Laskenta perustuu kategoriisiin asunto- ja onnettomuusmalleihin.

Kustannus-hyötyanalyysi (KHA) arvioi yksittäisen hankkeen nettonykyarvoa eli tietoa hankkeen yhteiskunnallisesta kannattavuudesta. Nettonykyarvo syntyy tarkasteltavan kohteen synnyttämien hyötyjen ja kustannusten erotuksesta, jotka ovat diskontattu nykyhetkeen. Menetelmän käytön ns. sivutuotteena saadaan tietoa myös investoinnin tai hankkeen ajallisesta ulottuvuudesta.

## Kohdekäynnit

Hankkeen yhteydessä ei ollut tietoa siitä, mikä on erityisesti ARAtuettujen vuokra-asuntojen tilanne paloturvallisuutta tukevan turvatekniikan suhteen. Toisaalta laajamittainen kartoitus vuokratalokohteisiin ei hankkeen puitteissa ollut mahdollista. Tästä syystä päädyttiin otokseen, joka kattaa niin 1970-, 80- ja 90-luvuilla rakennetut ARA-kohteet. Tarkasteltavien kohteiden ulkopuolelle rajattiin 2000-luvulla rakennetut asuinrakennukset, koska näissä teknisten ja rakenteellisten ratkaisujen arvioitiin olevan paremmalla tasolla kuin sitä ennen rakennetuissa kohteissa.

Kohdekäynnit tehtiin yhteistyössä Tuusulan kunnan kiinteistö Oy:n, Mestaritoiminta Oy:n (Järvenpää) ja Helsingin Kaupungin Asunnot Oy:n omistamiin kohteisiin. Asuntojen lukumäärä oli 207. Noin sata asuntoa oli pinta-alaltaan yli 60 m<sup>2</sup>, ja edellyttäisi siten vähintään kaksi toimivaa palovaroitinta per asunto. Tätä määrää on kuitenkin pidettävä minimivaatimuksena, sillä huoneistoalan lisäksi palovaroittimien määrässä ja sijoittamisessa tulee ottaa huomioon suojattavan tilan muoto ja erityistä syttymisvaaraa aiheuttavat toiminnot.

Kohdekäyntien tuloksena todetaan, että kaikista asunnoista 33,2 prosentissa oli jokin puute palovaroittimissa. Toisaalta ”vain” 20,3 prosentissa asunnoista oli jokin puute palovaroittimessa, kun kiinteistön omistaja huolehtii niistä. 70,0 prosentissa huoneistoista oli puute palovaroittimessa (puuttuu kokonaan, yli-ikäinen, ei toimi tai väärin asennettu), kun kiinteistön omistaja ei huolehdi palovaroittimista. Ero on huomattava – kiinteistön omistajan vastuu palovaroittimista lisää toimivien ja oikein asennettujen palovaroittimien esiintyvyyttä huomattavasti.

Tarkastusten yhteydessä kerättiin myös tietoa palovaroittimien tyypeistä, liesitekniikasta sekä palo-ovien kunnosta. Suuresta osasta palovaroittimia tietoa ei saatu, mutta niistä, joista saatiin, toimintatavaksi varmistui optinen 41 tapauksessa (75,9 %) ja ionisoiva 13 tapauksessa (24,1 %). Kaikki havaitut palovaroittimet olivat paristotoimisia. Lähes kaikissa kohteissa oli käytössä tavanomainen valurautaliesi.

Valtaosassa palo-ovista oli ongelmia tiivisteissä, postiluukku ei sulkeutunut kunnolla, palo-ovi oli vääntynyt tai muutoin vaurioitunut tai oven ja karmin väliin jäi liian iso rako. Merkittävin puute palo-ovissa olikin karmin ja oven väliin jäävä liian iso rako. Vain muutamassa palo-ovessa oli EI30-hyväksytty postiluukku. Rakennusten iällä ei ollut merkittävää vaikutusta palo-ovien kuntoon. Ainoastaan ne palo-ovet (4 kpl, 2,0 %), jotka olivat syystä tai toisesta vaihdettu modernimmaksi, toimivat kohtuullisesti, joskin näissäkin havaittiin eräitä puutteita erityisesti karmin ja oven välisissä raoissa. Ne olivat lisäksi varustettu paloturvallisella postiluukulla sekä paisuvalla palotiivisteellä, mutta olivat kuitenkin sisäovella varustettuja palo-oviyhdistelmiä. Kaikissa muissa oli suuria puutteita edellä mainittuja seikkoja vasten arvioitaessa.

## Tekniset suojausratkaisut

Tarkasteluun pyrittiin saamaan mahdollisimman paljon erilaisia paloturvallisuuslaitteita, joilla arvioitiin olevan vähentävä vaikutus joko tulipalojen syttymisiin tai niiden aiheuttamiin vahinkoihin. Tarkasteltavat tuotteet valittiin SPEKin sisäisesti, asiantuntijoiden kesken käytyjen neuvotteluiden perusteella. Hintatietoja kerättiin SPEKin yhteistyökumppanien kautta. Automaattisten sammutus-

Kustannukset (alv 0%)	Lähde	Kohde A	Kohde B	Kohde C	Yhteensä
Asuntoja	Aineisto	22	44	143	209
Rappuja	Aineisto	3	5	10	18
		Hankintahinnat			Hinta/asunto
Sprinkleri, hankinta					
Hankintakustannus (suun.+asen.)	Kery	51 500,00 €	61 400,00 €	187 850,00 €	1 439,00 €
Hankintakustannus (suun.+asen.)	Kirjallisuus	37 832,30 €	56 984,80 €	258 143,10 €	1 688,80 €
Hankintakustannus (suun.+asen.)	YM	99 385,12 €	198 770,23 €	646 003,25 €	4 517,51 €
Korkeapainevesisumu					
Hankintakustannus (suun.+asen.)	Kery	136 750,00 €	164 800,00 €	523 075,00 €	3 945,57 €
Hankintakustannus (suun.+asen.)	YM	198 770,23 €	397 540,46 €	1 292 006,51 €	9 035,01 €
Huoneistokohtainen sammutuslaite					
Hankintakustannus	Kumppani	110 000,00 €	220 000,00 €	715 000,00 €	5 000,00 €
Paloilmoitin					
Hankintakustannus (suun.+asen.)	Kery	25 200,00 €	49 000,00 €	160 855,00 €	1 124,67 €
Palovaroitin alkaliparistolla (tarve 1,5 per asunto)		2 761,00 €	5 522,00 €	17 946,50 €	125,50 €
Hankinta	Oma arvio	165,00 €	330,00 €	1 072,50 €	7,50 €
Asennus	Oma arvio	220,00 €	440,00 €	1 430,00 €	10,00 €
Huolto	Oma arvio	2 376,00 €	4 752,00 €	15 444,00 €	108,00 €
Palovaroitin 10v paristolla (tarve 1,5 per asunto)		572,00 €	1 144,00 €	3 718,00 €	71,00 €
Hankinta	Oma arvio	352,00 €	704,00 €	2 288,00 €	16,00 €
Asennus	Oma arvio	220,00 €	440,00 €	1 430,00 €	10,00 €
Huolto (vuosittain)	Oma arvio	990,00 €	1 980,00 €	6 435,00 €	45,00 €
Turvalliesi		6 270,00 €	12 540,00 €	40 755,00 €	285,00 €
Hankinta	Kumppani	5 720,00 €	11 440,00 €	37 180,00 €	260,00 €
Asennus	Kumppani	550,00 €	1 100,00 €	3 575,00 €	25,00 €
Keraaminen liesi		7 150,00 €	14 300,00 €	46 475,00 €	265,00 €
Hankinta	Kumppani	6 600,00 €	13 200,00 €	42 900,00 €	240,00 €
Asennus	Kumppani	550,00 €	1 100,00 €	3 575,00 €	25,00 €
Induktioliesi		8 690,00 €	17 380,00 €	56 485,00 €	395,00 €
Hankinta	Kumppani	8 140,00 €	16 280,00 €	52 910,00 €	370,00 €
Asennus	Kumppani	550,00 €	1 100,00 €	3 575,00 €	25,00 €
Liesihälytyn		1 870,00 €	3 740,00 €	12 155,00 €	85,00 €
Hankinta	Oma arvio	1 760,00 €	3 520,00 €	11 440,00 €	80,00 €
Asennus	Oma arvio	110,00 €	220,00 €	715,00 €	5,00 €
Liesivahti		4 950,00 €	9 900,00 €	32 175,00 €	225,00 €
Hankintahinta	Kumppani	4 400,00 €	8 800,00 €	28 600,00 €	200,00 €
Asennus	Kumppani	550,00 €	1 100,00 €	3 575,00 €	25,00 €
Sammutuspeite		286,00 €	572,00 €	1 859,00 €	13,00 €
Hankinta	Kumppani	176,00 €	352,00 €	1 144,00 €	8,00 €
Asennus	Kumppani	110,00 €	220,00 €	715,00 €	5,00 €
Vaahtonestesammutin		1 980,00 €	3 960,00 €	12 870,00 €	90,00 €
Hankinta	Kumppani	880,00 €	1 760,00 €	5 720,00 €	40,00 €
Asennus	Kumppani	220,00 €	440,00 €	1 430,00 €	10,00 €
Tarkastukset 2v välein 8 vuotta	Kumppani	880,00 €	1 760,00 €	5 720,00 €	40,00 €
Alkusammutuskoulutus (tarve 1,4 per asunto)					
Hinta per henkilö 30€	Oma arvio	1 848,00 €	3 696,00 €	12 012,00 €	42,00 €
Palo-ovi					
Hankintahinta (sis. asennus)	Kumppani	24 200,00 €	48 400,00 €	157 300,00 €	1 100,00 €
Savuun reagoiva sulkijalaitteisto (ovipumppu)					
Hankintahinta (sis. asennus)	Kumppani	14 025,00 €	28 050,00 €	91 162,50 €	637,50 €
Sähköverkkoon kytketty palovaroitin (tarve 1,5 per asunto)					
Hankintahinta (sis. asen.+sähkö)	Kumppani	6 600,00 €	13 200,00 €	42 900,00 €	300,00 €
Porrashuoneen savunpoistolaukku					
Hankintahinta (sis. asennus)	Kumppani	11 250,00 €	18 750,00 €	37 500,00 €	322,97 €

Taulukko 1. Tekniikoiden hintatiedot kohteittain ja asunnoittain.

laitteistojen ja paloilmittimien hintatiedot saatiin SPEKin yhteydessä toimivalta Palontorjuntatekniikan kehitysryhmältä.

Lisäksi hintatietoja kerättiin SPEKin muiden yhteistyökumppanien kautta ja täydentävänä myös kuluttajahintoihin perustuvilla arvioilla vähennettynä arvonlisäveron osuudella. On syytä huomata, että hinnoissa voi olla suurta vaihtelua, ja tästä syystä tässä esitettyjä hintatietoja voidaan pitää vain suuntaa antavina, mutta kuitenkin tällä hetkellä ainoana käytettävissä olevana lähtökohtana tehtyjen kustannus-hyötyanalyysien kannalta.

## Tekniikoiden vaikuttavuuden arviointi

Erialaisten paloteknisten laitteiden vaikutusta tulipalon syntyyn ja haittaan on hyvin vaikea mitata johtuen suuresta määrästä teki-

Asuinkerrostalopalot 2016-20	Alkusammutettu	Ei leviä huoneistosta	Savu levinnyt	Palo+savu levinnyt	Edelliset yhteensä	Keskiarvo
Tapauksia yhteensä (Pronto)	141	513	524	106	1284	
Kokonaiskustannukset (Pr)	516 330 €	12 054 470 €	16 994 400 €	19 072 240 €	48 637 440 €	
Kokonaiskust, kysely	1 499 958 €	20 823 696 €	32 742 664 €	23 327 950 €	78 394 268 €	
Yksikkökustannus (Pronto)	3 662 €	23 498 €	32 432 €	179 927 €		37 880 €
Yksikkökustannus (Kysely)	10 638 €	40 592 €	62 486 €	220 075 €		61 055 €
Pronto + kysely keskiarvo/1	7 150 €	32 045 €	47 459 €	200 001 €		49 467 €
Pronto + kysely keskiarvo yht.	1 008 144 €	16 439 083 €	24 868 532 €	21 200 095 €		63 515 854 €

Taulukko 2. Asuinkerrostalopalot 2016–2020, omaisuusvahingot.

jöitä, jotka vaikuttavat arvioon. Tutkimusten laatu ja menetelmät eroavat toisistaan ja ovat osin ristiriidassa keskenään. Olemme kuitenkin arvioimassa teknisten menetelmien kustannushyöty-menetelmän avulla ja käytettävissä olevan tiedon perusteella. Huolimatta siitä, että epävarmuutta huomioidaan laskelmia tehdessä, laskelmat ovat suuntaa antavia projisointeja.

Koska tutkimuskirjallisuuden valossa ainoastaan palovaroit-timista ja automaattisista sammutuslaitteistoista oli saatavissa koh-tuullisen tuoretta ja varmaa tietoa, päädyttiin arvioita täydentä-mään pelastuslaitosten päällystölle ja alipäällystölle kohdennetulla kyselyllä. Kyselyssä pyydettiin tietoja niiden tekniikoiden vai-kutuksista, joista ei ole saatavissa tietoa tutkimuskirjallisuudesta.

Kyselyssä tiedusteltiin myös sitä, mikä vaikutus on henkilön kuulumisella ns. erityisryhmään. Erityisryhmillä tarkoitetaan tässä henkilöitä, joiden toimintakyky on psyykkisistä, fyysisistä tai kognitioon liittyvistä syistä rajoittunut. Näillä henkilöillä voi olla haasteita havaita palo tai huomata inhimilliset virheet ajoissa palon ennaltaehkäisemiseksi tai tehokkaiden alkusammutustoimen-piteiden toteuttamiseksi, joka voi lisätä palon syttymisen toden-näköisyyttä tai johtaa siihen, että palo pääsee kehittymään huoneistopaloksi. Lisäksi asukkaan toimintakyvyn heikentyminen voi vaikeuttaa palosta poistumista ja lisätä palossa vammautumisen ja kuoleman riskiä. Tästä ryhmästä voidaan käyttää myös nimi-tystä erityistä tukea tarvitsevat henkilöt.

Kyselyllä kartoitettiin paitsi erilaisten turvatekniikoiden vaikut-tavuutta, myös savun ja palon leviämisestä aiheutuvia vahinkoja eri tilanteissa. Vastaavat tiedot kerättiin asuinkerrostalojen osalta PRONTO-järjestelmästä ja yhdistettiin kyselyllä saatuihin vakuu-tusyhtiöiden ja jälkivahinkojen torjuntayritysten tietoihin. Nämä tiedot on esitetty seuraavassa taulukossa.

Kyselyn perusteella saadut arvot ovat hieman suurempia kuin PRONTOsta saadut tiedot. Tutkimuksessa laskettiin myös näiden kahden keskiarvot (kaksi viimeistä riviä), mutta päädyttiin kuin-kin käyttämään myöhemmin kyselyllä saatuja kustannusarvioita, sillä ne perustuvat vakuutusyhtiöiltä ja jälkivahinkojen torjunta-yrityksiltä saatuihin kustannusarvioihin, joita pidetään PRONTOsta saatavia arvioita parempina.

Automaattisten sammutuslaitteistojen osalta päädyttiin käyttä-mään Fraser-Mitchellin ja Williamsin [1] tutkimuksen estimaat-teja, jotka ovat laajasti viitattuja tutkimuskirjallisuudessa, kohdis-tuvat erityisesti kerrostaloasuntoihin ja ovat maantieteellisesti ja kulttuurisesti arvioitavissa soveltuvan parhaiten Suomeen. Palova-roittimien virtalähteen vaikutuksista ei ole saatavissa tietoa muu-alta kuin Yhdysvalloista, joten laskenta perustui Ahrensin [2] lii-tetaulukoista saatuihin arvioihin. Eniten arvostelua voidaan koh-distaa puhtaasti arvioon (paloilmoitin) sekä PRONTO:n ja kyse-lyn perusteella laadittuihin estimaatteihin. Asiantuntija-arvioi-ta voidaan käyttää kuitenkin niiltä osin, kun tilastoihin pohjau-tuvaa tietoa ei ole saatavissa – sitä voidaan kirjoitushetkellä pitää parhaana käytettävissä olevana tietona. Siltä osin kun saatavissa oli tilastotietoa, vertailtaessa kyselyllä saatuja arvioita tilastoihin, ne olivat hyvin lähellä toisiaan.

## Henkilövahinkojen arviointi

Onnettomuuksien esiintyvyys lasketaan tarkasteltavan asunto-ryhmän kohdalla siten, että toteutuneita vahinkoja verrataan ole-massa olevaan asuntokantaan ja tästä arvioidaan keskimääräi-nen odotusarvo ko. asukasryhmälle. Käytännössä tämä tapahtui yhdistämällä ARAsa saadut kaikkien Suomen vuokrakohteiden tiedot pelastustoimen PRONTO-tietokannan onnettomuustie-toihin. Lisäksi tarkastellaan eroavatko keskimääräiset vahinko-jen odotusarvot ARA-asuntokannassa. Vahingon odotusarvoina käytettiin nykyisten olemassa olevien laskelmien pohjalta laadi-tuja piste-estimaatteja.

Tulipalon aiheuttamia henkilövahinkoja on arvioitu sekä kan-sainvälisessä että kotimaisessa tutkimuskirjallisuudessa. Tuoreim-mat Suomessa tehdyt tutkimukset ovat varsin tuoreita ja erityisen laadukkaasti toteutettuja tutkimuksia [3, 4, 5]. Haikonen, Lillsun-de, Lunetta ja Kokki [3] ovat arvioineet palokuolemien aiheutta-maa kustannusta Human capital approach -menetelmällä. HCA-menetelmä tuottaa keskimäärin pienempiä estimaatteja kuin muil-la yleisesti käytetyillä menetelmillä tuotetut arviot, sillä HCA-me-netelmä arvioi ainoastaan taloudelliseen toimintaan kohdistuvaa haittaa. Haikosen soveltama menetelmä huomioi kuolemasta seu-raavan työkyvyn ja tuotannon menetyksen, joka koostuu palkka-työn lisäksi myös kotitaloustyöstä. Päädyimme käyttämään pa-lokuolemahaitan osalta Väyläviraston vahinkoarvoja [6] ja louk-kaantumisten osalta Haikosen tutkimuksista laskettua lievän ja vakavan loukkaantumisen haittaa.

Onnettomuuksien esiintyvyys lasketaan tarkasteltavan asunto-ryhmän kohdalla siten, että toteutuneita vahinkoja verrataan ole-massa olevaan asuntokantaan ja tästä arvioidaan keskimääräinen odotusarvo ko. asukasryhmälle. Vahingon odotusarvoina käytet-tiin nykyisten olemassa olevien laskelmien pohjalta laadittuja pis-te-estimaatteja. Odotusarvot on esitetty taulukossa 4.

Vahinkojen osalta käytössämme on olemassa olevaa tietoa pa-lokuolemien, henkilövahinkojen ja omaisuushaittojen määrästä erilaisissa kerrostaloyhtiöissä. Rakennuspalojen odotusarvot las-ketaan kyseessä olevaa talotyyppiä edustavista taloyhtiöistä käyt-tämällä hyväksi onnettomuus- ja resurssitietokanta PRONTOa. Kustannusten osalta, arvioimme koko elinkaaren kustannusta, jotka diskontataan tämän päivän arvoon.

Koska hankkeen tarkoituksena oli pyrkiä tarkastelemaan kaik-kia vaihtoehtoja mahdollisimman yhteismitallisesti ja vertailukel-poisesti, suurelle osalle tarkastelluista laitteista on laadittu PRONTO:n aineistoa ja asiantuntijakyselyyn perustuvia estimaatteja, jot-ka ovat puhtaasti vertailevaan pohjatietojen tarkasteluun perustu-via ei-kokeellisia arvioita. Tämä merkitsee, että kausaliteetin tar-kastelu ei perustu ilmiöiden perimmäisiin mekanismeihin tai koe-asetelmalla hankittuun kvantitatiiviseen evidenssiin. Analyysin si-säinen luotettavuus on siis suhteellisen heikko ja mm. jakaumao-letusten tekeminen on haasteellista, ellei mahdotonta.

Kymmenen vuoden kustannushyötytarkastelussa asukaskannas-ta tehdään oletuksia erityisryhmän jakaumasta ja lasketaan kak-

Tarkenne	Laite	Lähde	Palokuolemat	Omaisuus	Loukkaantuminen
	Sammutuslaitteisto	Fraser-Mitchell & Williams (2013)	90,0 %	88,0 %	62,0 %
	Palovaroitin (alkaliparistolla)	Ahrens (2021) + laskenta	36,2 %	26,6 %	15,7 %
	Palovaroitin (li-ion paristolla)	Arvio	36,2 %	26,6 %	15,7 %
	Palovaroitin (sähköverkko)	Ahrens (2021) + laskenta	54,8 %	26,6 %	29,3 %
	Paloilmoitin	Arvio	59,8 %	31,6 %	34,3 %
	Turvaliesi	Pronto, kirjallisuus ja kysely	17,7 %	17,7 %	17,7 %
	Keraaminen liesi	Pronto, kirjallisuus ja kysely	11,4 %	11,4 %	11,4 %
	Induktioliesi	Pronto, kirjallisuus ja kysely	16,6 %	16,6 %	16,6 %
	Liesihälytintin	Pronto, kirjallisuus ja kysely	14,6 %	14,6 %	14,6 %
	Liesivahti	Pronto, kirjallisuus ja kysely	20,6 %	20,6 %	20,6 %
Ilman koulutusta	Sammutuspeite	Pronto + kysely	12,5 %	12,5 %	12,5 %
Koulutuksella	Sammutuspeite	Pronto + kysely	16,3 %	16,3 %	16,3 %
Ilman koulutusta	Käsisammutin	Pronto + kysely	14,5 %	14,5 %	14,5 %
Koulutuksella	Käsisammutin	Pronto + kysely	19,1 %	19,1 %	19,1 %
Ilman koulutusta	Sammutuspeite	Pronto + kysely (erityisryhmät)	2,9 %	2,9 %	2,9 %
Koulutuksella	Sammutuspeite	Pronto + kysely (erityisryhmät)	3,8 %	3,8 %	3,8 %
Ilman koulutusta	Käsisammutin	Pronto + kysely (erityisryhmät)	3,4 %	3,4 %	3,4 %
Koulutuksella	Käsisammutin	Pronto + kysely (erityisryhmät)	4,4 %	4,4 %	4,4 %
	Uusi palo-ovi	Pronto	3,6 %	10,5 %	3,6 %
	Ovensulkijalaitteisto	Pronto	2,4 %	8,1 %	2,4 %
	Savunpoistoluukku	Pronto + kysely	3,1 %	5,0 %	3,1 %

Taulukko 3. Analyysissä käytetyt estimaatit (tekniikan käytön vähentävä vaikutus eri vahinkotyyppiin %).

si skenaariota – oletetun nykytilanteen ja vaihtoehtoisen erityisryhmien osuuden kasvua kuvaavaan skenaarion.

Asuntopalojen esiintyvyys Ara-asuntokannassa on tarkastelun perusteella 0,0226 ja keskimääräinen onnettomuus esiintyvyys kansallisella tasolla on 0,019. Kyselyn perusteella erityisryhmien onnettomuusriski on noin 7-kertainen normaaliväestöön nähden. Huomioidaksemme erilaisen paloriskin erityisryhmien ja ns. normaaliväestön välillä, teemme muutamia melko karkeita oletuksia.

1. ARA-asuntojen korkeampi rakennuspalojen esiintyvyys aineistossa selittyy kohonneella erityisryhmien osuudella asukaskannassa. Kyselyn perusteella erityisryhmien onnettomuusriski on 7-kertainen normaaliväestöön nähden.

2. Oletamme iäkkäämmän väestön edustavan erityisryhmää tässä tarkastelussa. Tämä siitakin huolimatta, että iäkkäiden joukko on toimintakyvyttään erittäin heterogeeninen, erityisryhmien määrittelyä voidaan toteuttaa vaihtoehtoisin tavoin. Eläkeläisten osuus suomessa asuvista ihmisistä on 23,3 %.

Em. kahden oletaman avulla voimme arvioida ARA asuntokannan (kerrostalot) asukaskannan jakaumaa erityisryhmien ja ns. normaaliväestön suhteen. Ei-erityisryhmien osuudeksi arvioidaan 69,2 prosenttia ja vastaavasti erityisryhmien osuudeksi 30,8 prosenttia. Skenaariossa 1 esitetyt laskemat perustuvat vastaaviin osuuksiin. Skenaariossa 2. pyrimme laskemaan vaihtoehtoisen tilanteen, jossa erityisryhmien osuus kohoaa eli ns. miten väestön kehitys voisi tarkoittaa nykyiseen arvioon verrattuna. Erityisväestön määrä kasvaa suhteellisesti 50 prosenttia. Tällöin ei-erityisryhmään kuuluvan väestön osuudeksi saadaan 53,8 % ja eri-

tyisryhmiin kuuluvan väestön osuudeksi 46,2 %. Muutos tarkoittaisi myös tulipalojen kokonaisesiintyvyyden kasvua nykyisestä 0.0226 prosentista 0.0300836 prosenttiin, joka merkitsee suhteellisesti 33,1% kasvua tarkasteltavassa asuntokannassa.

### Kustannusten ja hyötyjen tarkastelu

Ensimmäisessä tarkastelussa arvioimme teknisten paloturvallisuuslaitteiden nettohyötyä investointina koko tarkastelujoukkoon eli aineiston sisältämään 63 316 asuinhuoneistoon. Paloturvallisuusriski vaihtelee asuinhuoneistoissa asuvan väestön sisällä ja huomioimme vain karkealla tasolla kaksi eri riskiryhmää: ei-erityisryhmä ja erityisryhmä.

Tarkasteluun koottiin ja laadittiin estimaatteja parhaan tietämyksen ja saatavilla olevan tiedon perusteella, jotta olisi mahdollista sisältää kaikki mahdolliset ratkaisut samassa kehikossa. Tässä lähestymistapaa ja asetelmaa sisältää omat selkeät kompromissit. Tuloksia tarkasteltaessa huomiota ei tulisi kiinnittää absoluuttisiin nettohyödyin arvoihin vaan erityisesti vaihtoehtojen keskinäiseen järjestykseen ja tasoon suhteessa muihin vaihtoehtoihin.

Skenaariossa 1 arvioimme nykytilaa ja skenaariossa 2 pyrimme tarkastelemaan mahdollista tulevaisuuden skenaariota, joka pyrkii havainnollistamaan väestökehitystä. Asetelman skenaario 1 on joillakin apoletuksilla yleistettävissä myös koko asuntokantaan. Kun tarkastelu kohdistuu koko asuntokantaan, kuvataan investointitilannetta, jossa kaikkia asuinhuoneistoja käsitellään tasa-arvoisesti eli investointi kohdistetaan myös alempiriskisiin asuinhuoneistoihin iästä ja toimintakyvystä riippumatta.

Tarkastelu kokonaisaineiston osalta osoittaa, että rakennuspalojen esiintyvyys on suhteellisen matala suhteessa investointien kustannuksiin ja toisaalta vaikuttavuuteen. Korkeamman vaikuttavuuden investoinnit tuottavat parhaan vaikutuksen, mutta ovat nettohyötytarkastelussa vahvasti negatiivisia. Parhaimman hyöty-kustannussuhteen tarjoaa litiumparistolla varustettu palovaroitin, jota seuraavat sammutuspeite, palovaroitin alkaliparistolla sekä liesihälytintin. Skenaario 2:n tulokset eivät eroa laitteiden keskinäiseltä järjestykseltään, mutta ovat arvoltaan korkeampia.

Nettohyötyyn vaikuttavat siis riskitasot sekä kokonaisinvestointien suuruus, jotka 63 316 asunnon investoinnissa nousevat korkeiksi. Seuraavassa tarkastelussa arvioidaankin, mitä tarkoittai-

<b>Rakennuspalot asuinkeuhkaloissa</b>	<b>1284</b>
<b>Loukkaantumisten osuus rakennuspalloissa</b>	0,449387
<b>Palokuolemien osuus rakennuspalloissa</b>	0,0529141
<b>Keskimääräinen rakennushaitta</b>	30 000 €
<b>Keskimääräinen irtaimistohaitta</b>	7 880 €
<b>Rakennus- ja irtaimistohaitta kysely</b>	61 055 €
<b>Vakavien loukkaantumisten osuus</b>	0,13
<b>Palokuoleman haitta</b>	2 564 513 €
<b>Loukkaantumisen hinta hoitokustannukset</b>	20 400 €
<b>Tuotannon menetys loukkaantuminen keskiarvo</b>	19 070 €

Taulukko 4. Arviot keskimääräisestä haitasta rakennuspalloissa.

► si, jos voisimme tunnustaa erityisryhmät aineistosta ja erottaa ne kokonaisjoukosta ja laskea erityisryhmälle nettohyödyt erikseen.

Erityisryhmäkohtaisessa tarkastelussa, tulokset säilyvät samansuuntaisina, mutta nettohyödyt ovat kautta linjan korkeammalla tasolla. Tämä johtuu toisaalta korkeammasta paloriskistä, joka tarkoittaa enemmän ennaltaehkäisevää ja rajoittavaa vaikutusta. Toisaalta myös kokonaisinvestointi on huomattavasti matalampi, joka parantaa edellytyksiä parempaan hyöty-kustannus-suhteeseen.

Sammutuspeite, liesihälytyn sekä kaikki erilaiset palovaroitintaratkaisut nousevat tarkastelussa nettohyödyiltään positiiviseksi. Liesivahti on hyödyiltään hyvin lähellä kannattavaa. Automaattisen sammutuslaitteiston, palo-ovien ja savunpoistoluukkujen investointiaika voidaan nähdä jopa 50 vuoden mittaisena, sillä laitteiden tekninen käyttöikä ylittää selvästi kymmenen vuotta. Korkeiden investointikustannusten ajallinen kohdentaminen nostaa odotetusti kaikkien kolmen laitteen nettohyödyn tasoa positiivisesti. Erityisen voimakkaasti nousee investoinneiltaan kallein laitevaihtoehto eli sammutuslaitteisto, joka saa 40 vuoden investointiajalla erityisryhmiin kohdennettuna positiivisen nettohyödyn.

### Johtopäätökset

Tutkimuksen keskeisenä havaintona on, että kiinteistön omistajan huolehtiminen palovaroittimista lisää merkittävästi niiden toimimisen todennäköisyyttä. Jos kiinteistön omistaja huolehti palovaroittimista, viidesosassa asunnoista on ongelmia palovaroittimien sijoittamisessa, toimintakunnossa tai niiden riittävydessä. Jos kiinteistön omistaja ei huolehdi palovaroittimista, ongelmia on yli kahdessa kolmasosassa asuinhuoneistoista.

Tuloksia tarkasteltaessa on pidettävä mielessä laskelmien luotettavuuteen liittyvät erilaiset lähtökohdat. Kustannus-elementtiin liittyvät arviot sisältävät tyypillisesti kaikkein vähiten epävarmuutta suhteessa ennustettuihin hyötyihin ja erityisesti vaikuttavuuteen. Laitekohtaiset erot luotettavien vaikuttavuusestimaattien käytössä ovat ilmeiset, jota kautta myös laskennallisiin hyötyihin liittyy epävarmuutta.

Tutkimuksen perusteella näyttäisi siltä, että nettohyöty on positiivinen edullisten laitteiden kuten liesihälytinten, erilaisten palovaroittimien sekä alkusammutuskaluston (erityisesti sammutuspeitteen) osalta. Näiden kohdalla on kuitenkin huomioitava, että niihin reagointi edellyttää asukkaan aktiivista toimijuutta, joko palosta poistumiseksi tai sen alkusammuttamiseksi. Siten ne soveltuvat huonommin erityisryhmien asuntoihin, joissa paloriskit ovat suurempia ja asukkaiden kyky aktiivisiin toimenpiteisiin voi olla heikko.

Tässä tutkimuksessa tarkoitettujen erityisryhmien määrän noustessa ikääntymisen, mutta mahdollisesti myös yhteiskunnallisen eriarvoistumisen seurauksena, myös arvokkaampien palovaroittimia, alkusammuttimia ja yksinkertaisia liesihälyttimiä kalliimpien turvateknisten laitteiden kustannushyödyt alkavat lähestyä kannattavuuden rajaa. Näistä selkeimmin erottuu liesivahti. Vastaava havainto on tehty muussa pohjoismaisessa tutkimuksessa, kuten Runeforsin & Franzichin tutkimuksessa [7] ja Norjassa [8].

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan suositella, että kaikkien vuokra-asuntojen osalta, asukkaiden toimintakyvystä riippumatta, parannetaan palovaroitinten toimintavarmuutta. Selkeää eroa ei havaittu kahden eri vaihtoehdon välillä: palovaroitin alikaliparistolla ja palovaroitin litiumparistolla, mutta sähköverkkoon kytketty on hieman muita vaihtoehtoja kustannushyödyiltään heikompi ja nykytilanteessa ei saavuta kannattavuuden rajaa jälkiasennettuina.

Tässä yhteydessä paras hyöty saavutetaan, kun tähän samaan ”pakettiin” yhdistetään myös yksinkertaiset liesihälyttimet, joista

kiinteistön omistaja niin ikään huolehtisi osana palovaroitinten kunnossapitoa, ja jotka ovat hyvin lähellä kannattavuuden rajaa jo nykytilanteessa. Toisaalta, ottaen huomioon liesivahtien tarjoaman paremman suojan aktiivisina turvalaitteina, niiden kannattavuuden nousun väestön ikääntyessä sekä sen seikan, että liesivahdeille on olemassa yhdenmukaistetut tuotestandardit (joita liesihälyttimille ei ole), olisi suositeltavaa tukea ensi sijassa liesivahdeja ennemmin kuin liesihälyttimiä niiden huonommasta hyöty-suhteesta huolimatta. Kun myös alkusammutuskalusto, erityisesti sammutuspeitteet, ovat kustannus-hyötysuhteeltaan hyviä, myös näiden hankintaa kannattaa tukea.

Riskien kasvaessa kasvaa myös muiden tekniikoiden hyödyt. Erityisesti sammutuslaitteisto ja liesivahti saavuttavat riskitason noustessa tason, jolla laskettavissa olevat hyödyt tekevät investoinnista houkuttelevan. Automaattisia sammutuslaitteistoja kannattaa asentaa erityisen korkeariskisiin kohteisiin, joissa henkilön itsenäinen toimintakyky ei todennäköisesti riitä poistumiseen palon sattuessa.

Näitä on erityisryhmille tarkoitetut asunnot kuten seniorikodit (erityisesti iän noustessa) ja toimintakyvyltään rajoittuneiden henkilöisen asumisyksiköt. Kun näiden laitteiden kannattavuus on riskiryhmille suuri jälkiasennettuina, tulisi uudisrakentamisessa siirtyä lainsäädännöllisesti siihen, että näihin kohteisiin tulisi lakisääteiseksi vaatimukseksi automaattinen sammutuslaitteisto. Tämä keventäisi osaltaan myös niin sanottuun poistumisturvallisuusselvitysmenettelyyn liittyvää hallinnollista taakkaa.

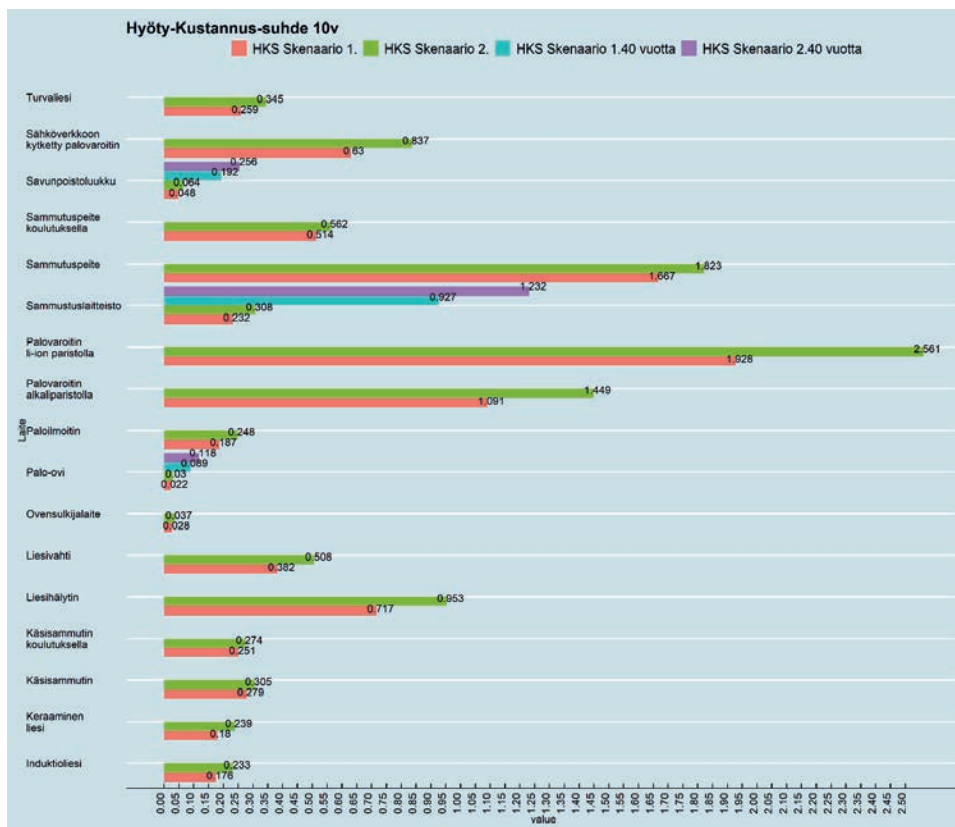
Tässä tutkimuksessa havaitsimme, että erityisesti keittiökohtaiset turvallisuusratkaisut ovat hyödyllisiä liesipalojen suuresta esiintyvyydestä johtuen. Emme väitä, että olisimme osanneet huomioida kaikkia hyötyjä. Tutkimuksessa arvioituun vaikuttavuuteen liittyy epävarmuutta. Tästä huolimatta tulokset antavat vahvan indikaation palovaroittimien sekä liesihälyttimen tehokkuudesta koko vuokra-asuntokannan osalta. Yhdistelmä on myös tehokas, sillä laitteiden vaikutusmekanismit ovat toisiaan täydentäviä.

Riskiryhmän osalta varmatoimisten ja ulkopuolisen huollon varassa olevien palovaroittimien merkitys korostuu. Vastaavasti alkusammutusvälineiden merkitys laskee suhteessa muihin vaihtoehtoihin. Erityisryhmän riskitason noustessa sammutuslaitteiston korkea vaikuttavuus tuo selkeitä hyötyjä ja vähentää palokuolematapauksia. Havainto on yhteneväinen Fraser-Mitchellin ja Williamsin [1] tulosten kanssa, joskin heillä kyse oli uudisrakennettavista kohteista. Riskitaso on kuitenkin tärkeä tunnustaa, jotta nettohyöty pysyisi hyvällä tasolla.

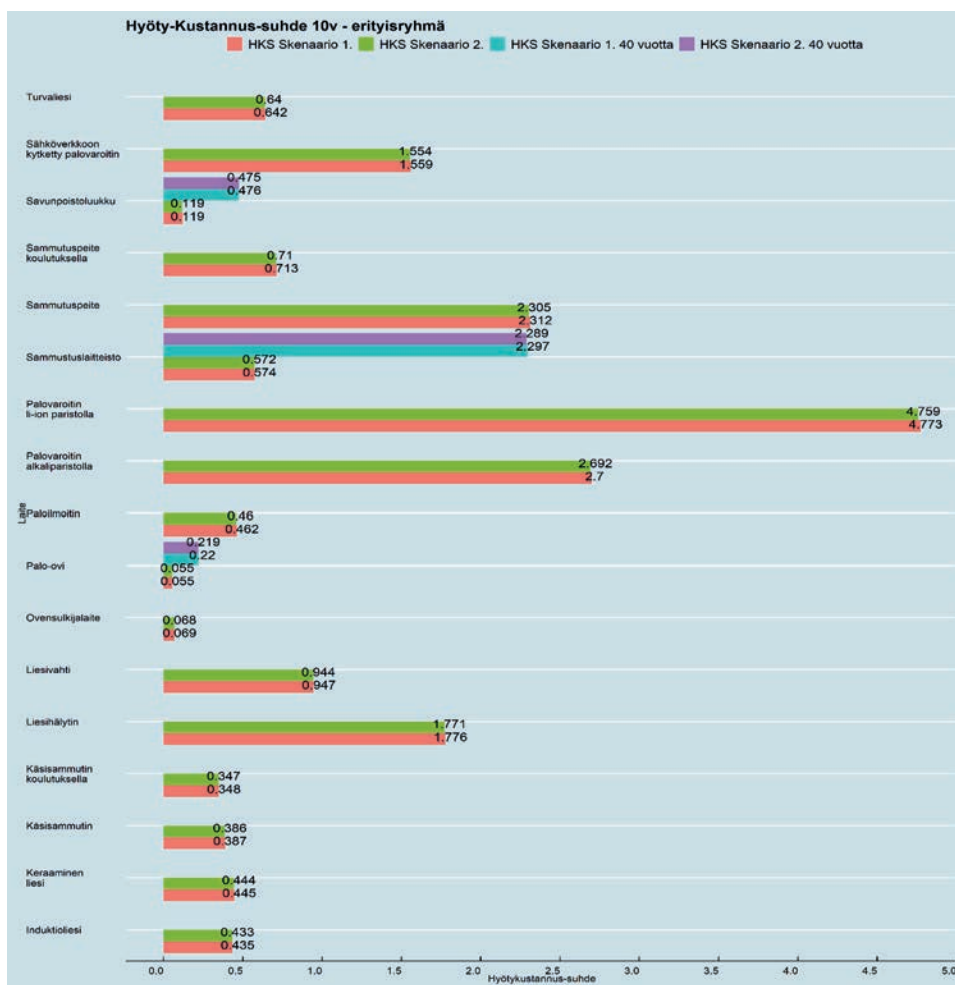
### LÄHDELUETTELO

1. Fraser-Mitchell, J. & Williams, C. 2013. Cost benefit analysis of residential sprinklers for Wales – Report of cost benefit analysis. BRE Global.
2. Ahrens, M. 2021. Smoke Alarms in US Home Fires & Supporting tables. National Fire Protection Association.
3. Haikonen, K., Lillsunde, P. M., Lunetta, P. & Kokki, E. 2015. Economic burden of fire-related deaths in Finland, 2000–2010: Indirect cost using a human capital approach. National Institute for Health and Welfare, Helsinki, Finland.
4. Haikonen, K., & Lillsunde, P. M. 2016. Burden of Fire Injuries in Finland: Lost Productivity and Benefits. Journal of Public Health Research, 5(2), 705.
5. Haikonen, K., Lillsunde, P. M. & Vuola, J. 2014. Inpatient costs of fire-related injuries in Finland. Injury prevention unit, National Institute for Health and Welfare, Helsinki Burn Centre, Helsinki University Hospital, Helsinki.
6. Metsäranta, H., Iikkanen, P., Ristikartano, J., Reimi, P. 2020.





Kuvio 1. Hyöty-kustannus-suhde (omaisuusvahinkojen arvona käytetty kyselyn omaisuusvahinkoarvoja).



Kuvio 2. Hyöty-kustannus-suhde, erityisryhmät (kyselyn vahinkoarvot).

Tie- ja rautatieliikenteen hankearvioinnin yksikköarvojen määrittäminen vuodelle 2018. Väylävirasto.

7. Runerfors, M. & Frantzych, H. 2017. Nyttanaly av spisvakt och portabelt sprinklersystem vid bostadsbränder. Lundin yliopisto.

8. Ludvigsen, S., Austerheim, T., Drivral N., Eriksen A., Eriksen E., Fjellberg S., Lyngolm W., Haarstad R., Nguyen M., Rød O., Smith A., Zapffe I., Kringen J., & Lunder R. 2012. Trygg hjemme – Brannsikkerhet for utsatte grupper. NOU 2012:4. Departementenes servicesenter. Informasjonsforvaltning. Oslo 2012.

# Missä menee palotutkimus?

**Kysyimme Palotutkimusraadin asiamieheltä, johtava asiantuntija Kari Telarannalta sekä raadin sihteeriltä, erikoistutkija Laura Kuurnelta viisi olennaista kysymystä palotutkimuksesta.**

1. Miten näet palotutkimuksen tilan tällä hetkellä? Missä on onnistuttu, missä on parannettavaa?
2. Miten turvataan palotutkimuksen rahoitus tulevaisuudessa? Mitä rahoituskanavia on mahdollisesti edelleen käyttämättä?
3. Miten tutkittavat asiat saadaan käytäntöön? Millainen tilanne on nyt?
4. Millaista suomalainen palotutkimus on kansainvälisesti arvioituna? Onko meillä opittavaa muualta tai muualla meiltä?
5. Mitkä palotutkimuksen aiheet odottavat tutkijan aiheeseen tarttumista?

## Kari Telaranta:

1. Suomessa tehdään laadukasta palotutkimusta monilla eri tahoilla. Yhteistyön lisääminen on onnistunut, josta yhtenä mutta ei ainoana hyvänä esimerkkinä Aalto-yliopiston, Pelastusopiston, SPEKin ja Tukesin yhteinen liesipalohanke. Siinä on onnistuttu valjastamaan eri toimijoiden parhaat ominaisuudet yhteisen tavoitteen edistämiseen. Vaikuttaa siltä, että tutkimusta tekevät tahot ovat viimeistään nyt löytäneet toisensa ja valmiita hyödyntämään yhteistyön antamia synergiaetuja.



2. Palotutkimus on vielä siinä määrin pieni ja hajanainen tutkimusala, että sen tukeminen on keskittynyt lähinnä muutamaan organisaatioon, joista keskeisimpänä voitaneen mainita Palotutkimuksen päiviäkin rahoittava Palosuojelurahasto. Tärkeintä onkin varmistaa Palosuojelurahaston riippumattomuus ja toimintaedellytykset myös tulevaisuudessa. Valtion budjetin ulkopuolisten rahoitusmekanismien tulevaisuus on kriittisen tarkastelun alla Veikkauskohun takia, joten myös nykyisen rahoitusmallin puolustaminen on tärkeää.

3. Siinä on vielä kehitettävää. Lainsäätö muuttuu hitaasti, mutta tutkimuksella voidaan siihenkin vaikuttaa. Hyvänä esimerkkinä se, että uusiin asuinhuoneistoihin ei enää asenneta sisäänpäin aukeavia sisäovia, koska ne voivat vaarantaa turvallisen poistumisen palotilanteessa savukaasujen ylipaineen vuoksi. Tästä on kiittäminen Aalto-yliopiston Paineenhallinta huoneistopaloissa -hanketta. Olisi kuitenkin hyvä saada vielä lisää työkaluja myös kentän käytänteiden muuttamiseksi entistä tutkimuspohjaisemmaksi.

4. Kansainvälisesti arvioituna suomalaisen palotutkimuksen vahvuutena voi pitää sitä, että Suomi on pieni maa eikä toimijoita ole liikaa. Vaikka voimavaroja tutkimuksen tekemiseen ei ole liikaa, se on paremmin kohdistettavissa, kun eri toimijat tietävät toistensa tekemisestä. Tutkimuksen merkitys pelastusalan kehittämiseksi on myös meillä kotimaassa tunnustettu hyvin, ja Suomessa tehdään aktiivista työtä tutkimuksen tekemisen edellytysten ja myös sen tulosten hyödyntämiseksi sisäministeriötä myöten.

5. Pelastusalan oikeudellista tutkimusta ja oikeudellista osaamista olisi vielä nykyisestäänkin varaa kehittää. Tässä on otettu isoja harppauksia viime vuosikymmeneltä lähtien, mutta toimijoita on vähän. Alan legitimitettiin paransi jatkuvalla, oman toiminnan kriittisellä parantamisella ja sen peilaamisella oikeudelliseen toiminta-kehikkoon.

## Laura Kuurne:

1. Tietojen keräämisessä ja sen hyödyntämisessä on vielä parannettavaa. Esimerkiksi nykyistä paremmin standardoitu ja valtakunnallisesti käyttökel-poinen valvontatieto sekä pääsy myös muiden kuin pelastustoimen omiin tietojärjestelmiin voisi tehostaa myös tutkimusta ja mahdollistaa tiedon paremman hyödyntämisen.



2. Olisi hyvä löytää keinoja hyödyntää palotutkimuksessa saatua tietoa muillakin tieteenaloilla, siis tehdä avauksia eri tieteenalojen yhteisiksi tutkimushankkeiksi. Tämä saattaisi avata mahdollisuuksia uusiin rahoituskanaviin. Siksi on tärkeää, että tutkimus on näkyvää ja siitä viestitään tehokkaasti myös muulla kuin pelastusalan omalla slangilla.

3. Samoilla linjoilla Kari Telarannan kanssa.

4. Pidemmällä tähtäimellä ilmastonmuutoksen ennakoidaan lisäävän ympäristökatastrofeja, kuten metsäpaloja. Metsäpalojen tutkimisesta, niiden ennakoimisesta ja niihin varautumisesta voidaan oppia paljon mailta, joissa metsäpalot ovat jo pitkään olleet yleisiä. Esimerkiksi Australiassa ja Etelä-Amerikassa on kehitetty mallinnustekniikoita, jotka ennustavat metsäpalojen alueellisia esiintyvyyksiä ja leviämismahdollisuuksia. Näiden avulla pystytään varautumaan katastrofeihin ja niiden seuraksiin entistä paremmin. Myös Suomessa on hiljattain tutkittu enemmän maastopaloja, esimerkiksi parhaillaan käynnissä olevan MAST-hankkeen tiimoilta, josta kerrotaan enemmän yhdessä tämän julkaisun artikkeleista.

Myös riskianalytiikan osalta voidaan oppia kansainvälisestä tutkimuksesta. Viime vuosina ulkomailla on alettu implementoidaan koneoppimista hyödyntäviä algoritmeja pelastustoimen riskianalyseissa yhä enenevässä määrin. Alalla onkin parhaillaan käynnissä useampia riskianalyysimenetelmiä tutkivia hankkeita.

5. Muutokset rakennetussa ympäristössä, ilmastossa ja väestössä tuovat esiin paljon mielenkiintoisia ja yhteiskunnan kannalta tärkeitä tutkimusaiheita. Tilastokeskuksen laskelmien mukaan väestön ikärakenteen muuttuessa iäkkäiden määrä tulee kasvamaan huomattavasti seuraavan 50 vuoden aikana. Iäkkäiden määrän kasvaessa voidaan myös ennakoita toimintakyvyltään heikentyneiden ihmisten määrän kasvavan, joka tulee ottaa huomioon asumisen paloturvallisuudessa. Tällä saralla riittää vielä paljon tutkittavaa.

Rakennetun ympäristön kehityksessä ekologisuus ja uudet teknologiset ratkaisut yleistyvät ja on tärkeää, että paloturvallisuus pysyy kehityksessä mukana. Viime aikoina alalla on ollut paljon keskustelua sähköautojen ja niiden latauspisteiden paloturvallisuudesta. Tästä aiheesta riittää tutkittavaa, jotta mahdollisia paloja voidaan ehkäistä tehokkaammin ja pelastustoimi pystyy varautumaan niihin paremmin.



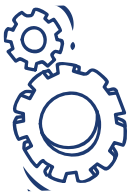
# Palontorjuntatekniikan KEHITYSRYHMÄ

Lähetä kehitysryhmälle kysymyksiä / aiheita käsiteltäväksi:  
[tekniikka@spek.fi](mailto:tekniikka@spek.fi)

**Palontorjuntatekniikan kehitysryhmä** on asiantuntijaryhmä, jonka jäsenten yhteisenä tavoitteena ovat turvallisuuden edistäminen sekä palontorjuntatekniikan laadun ja teknisten mahdollisuuksien kehittäminen. Ennakoiva ohjeistava toiminta sekä tiedon jakaminen ovat tärkeitä voimavaroja palontorjunnassa. Ympäristö kehittyy ja uusien haasteiden, myös ylläpidollisten, edessä palontorjunnan on pysyttävä ajan tasalla.

Tutustu kehitysryhmän sivuilta ohjeistaviin materiaaleihin ja tutkittuun tietoon:  
[www.palontorjuntatekniikka.fi](http://www.palontorjuntatekniikka.fi)

*Sivuilta voit ilmoittautua myös uutiskirjeen tilaajaksi*



## Kehitysryhmän toteuttamat toimintamallit

Ryhmän julkaisemat toimintamallit ovat tarkoitettu neuvoa antavaksi tueksi, ei korvaamaan voimassa olevia standardeja ja asetuksia tai muuta alalle julkaistua lainsäädäntöä, joiden vaatimukset laitteistoteutuksissa ja ylläpidossa on täytettävä.

Toimintamallit pyrkivät lisäämään yhteisiä käytänteitä palontorjunnan laitteistojen osalta koko laitteistoelinkaaren ajalta. Toimintamallit ovat tarkoitettu kaikille alalla toimiville tahoille tarjoamaan yleistä informaatiota laadun kehittämiseksi.

## Palontorjuntatekniikan kehitysryhmän sivuilta löydät:

- Tutkittua tietoa
- Kehitysryhmän laatimia toimintamalleja sekä muiden ohjeistavien työryhmien materiaalit
- Ajankohtaisia aiheita ja uutisia
- Oppimismateriaalia, joka on tarkoitettu kehittämään laitteistojen ylläpitoa ja laitteistojen parissa työskentelevien osaamista



## Kehitysryhmän jäsenet vuonna 2021 ovat:

- **Lauri Lehto** ja **Ilpo Leino**, Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö (SPEK)
- **Petri Mero**, Finanssiala (FA)
- **Jan Meszka**, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES)
- **Kimmo Kartano**, Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto
- **Petri Puttonen** ja **Henri Jokinen**, Tarkastuslaitokset (vuorotteleva edustaja)
- **Timo Nevalainen**, laitteistosuunnittelun edustus
- **Arja Rantala**, Sprinkleritekninen yhdistys (SPRITY)
- **Matti Helkamo**, Palonilmaisualan yhdistys
- **Jarmo Alaoja**, konsultointi
- **Olli Aromaa**, Laitteistojen käyttäjän rooli (Operaattori)



**PALOTUTKIMUSRAATI -  
BRANDFORSKNINGSRÅDET RY**  
PALOALAN TUTKIMUKSEN KEHITTÄMISORGANISAATIO

# Mitä tekee Palotutkimusraati?

Palotutkimusraadin tarkoituksena on laaja-alaisen yhteistyön kautta edistää ja kehittää palotutkimusta Suomessa. Palotutkimusraati muun muassa selvittää tutkimustarpeita, seuraa alan kansainvälistä tutkimusta ja osallistuu sitä koskevaan yhteistyöhön, tekee aloitteita tutkimusprojektien käynnistämiseksi ja tiedottaa sekä avustaa tutkimusten toteuttamisessa ja tutkimustulosten soveltamisessa käytäntöön. Palotutkimusraati ry järjestää 13. Palotutkimuksen päivät vuonna 2023. Seminaarissa esitellään kattavasti viimeaikaisia saavutuksia kotimaisessa palotutkimuksessa. Palotutkimuksen päivät on järjestetty vuodesta 1999 alkaen joka toinen vuosi.

Lisätietoja ja aiemmat julkaisut: [www.spek.fi/palotutkimuksenpaivat](http://www.spek.fi/palotutkimuksenpaivat)