

Palotutkimuksen päivät 2025



**Palotutkimusraadin järjestämät Palotutkimuksen päivät
3.–4.9.2025 Hilton Helsinki Kalastajatorpassa**

Tilaa oma lehti, ettei tarvi selän takana kurkkia

pelastustieto.fi > tilaa-lehti



KUVA: DIMITRI LISTOV

Pelastustieto

2/2025 PELASTUSTOIMI, ENSIHOITO JA VARAUTUMINEN

Kymmenen
päivän keikka vaati turmakestävyyttä



UUDET TIKET

SESONKI TOI
Sofia-auton Kirttiin

PALOKÄRKI-PALKINTO ILLON VPK:N
"spesujen" iloiselle vetäjäpariskunnalle

Pelastustoimen, ensihoidon ja varautumisen media

Pelastustieto

Palotutkimuksen päivät -erikoisnumero

Julkaisija: Palo- ja pelastustieto ry.

Päätoimittaja: Esa Aalto • esa.aalto@pelastustieto.fi
Ratamestarinkatu 11, 00520 Helsinki
puh. 050 5620 735 • www.pelastustieto.fi

Ulkoasu ja taitto: Kimmo Kaisto • Kirjapaino: Grano
Kannen kuva: Juhan-Petteri Laakso, SPPL

ISSN 2954-2766 (painettu) • ISSN 2954-2774 (verkkojulkaisu)



- 4....Pelastustoimen yhteiskuntavaste muuttuvassa toimintaympäristössä | [Marko Juutinen, Pelastusopisto](#)
- 13...Palontutkiminnan tietotarpeet ja pelastusalan lainsäädäntöuudistukset | [Heidi Liukkonen, Pelastusopisto](#) ja [Eero Nyman, Etelä-Suomen aluehallintovirasto](#)
- 20...Paloturvallisuusjärjestelmän laadunhallinta ja oleellisten teknisten vaatimusten tarvekartoitus rakennushankkeissa
[Markus Kortelainen, Tampereen yliopisto](#) ja [Lauri Lehto, Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö](#)
- 24...Rivitalojen yläpohjien palo-osastointien toimivuus | [Juhan-Petteri Laakso, Suomen Palopäällystöliitto](#)

Teema: Mallinnus ja simulointi

- 31...Maastopalojen mallinnus ja simulointi virtauslaskennalla | [Terhi Kling, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy](#)
- 34...Fire safety analysis of the Cryostat for the DEMO fusion power plant | [Timo Korhonen, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy](#)
- 42...CFD-simulation of hydrogen jet fires using Fire Dynamics Simulator (opinnäytetyö) | [Antti Henriksson, Aalto-yliopisto](#)
- 44...Reduced scope modelling of nuclear power plants' ventilation system and its interaction with fire | [Nikhil Verma, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd](#)

Teema: Puurakentamisen paloturvallisuus

- 52...Ristiinliimatun puun kokeellinen tutkimus kartiokolorimetrillä | [Simo Hostikka, Aalto-yliopisto](#)
- 57...CLT-vaakarakenteen palonkesto luonnollisessa palossa (opinnäytetyö) | [Tuomas Hakamäki, Tampereen yliopisto](#)
- 61...Pohjoismaisen puutavaran pyrolyysi ja halkeilu ulkoisen lämpöaltistuksen aikana | [Aleksi Rinta-Paavola, Aalto-yliopisto](#)

Teema: Palo- ja poistumisturvallisuus hoitolaitosympäristössä

- 70...Kvantitatiivisen paloturvallisuuden arviointimenettelyn kehittäminen monimuotoistuviin hoivalaitosympäristöihin | [Simo Hostikka, Aalto-yliopisto](#)
- 77...Hoivalaitosten palosimulaatioiden lähtötietojen muodostaminen (opinnäytetyö) | [Antti Linna, Itä-Suomen yliopisto](#)
- 80...Poistumisturvallisuus ja asukkaiden toimintakyky ikääntyneiden asumisyksiköissä | [Outi Ronkainen, Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö](#)
- 86...Komposiitti- ja nanomateriaalit operatiivisessa toiminnassa, altistuminen ja sen vähentäminen | [Riikka Salmi, Pelastusopisto](#)
- 93...Thermochemical properties of five polymeric firestop materials (opinnäytetyö) | [Laura Lukkarila, Aalto-yliopisto](#)
- 96...Palotutkimuksen nykytila ja tulevaisuuden näkymät | [Laura Kuurne, Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö](#)

Pelastustoimen yhteiskuntavaste muuttuvassa toimintaympäristössä

Tiivistelmä

Tämän kirjoituksen tavoitteena on kuvailla pelastustoimen toimintaympäristöä, sen muutostekijöitä, haasteita ja mahdollisuuksia, sekä kartoittaa keinoja haasteisiin vastaamiseksi ja mahdollisuuksien hyödyntämiseksi. Työtä jäsentää PESTEL-kehiksen mukaisesti toteutettu Tulevaisuusselonteon strateginen toimintaympäristöanalyysi. Työn aineisto on muodostunut pelastusalan ennakoitutyöpajassa, jossa tarkasteltiin valtakunnallisella tasolla tunnistettujen muutostekijöiden vaikutuksia pelastusalan palveluiden kannalta ja ideoitiin keinoja niihin vastaamiseksi. Työpajaan osallistui noin 60 pelastusalan asiantuntijaa sisäministeriöstä, hyvinvointialueiden pelastuslaitoksilta, Pelastusopistolta, järjestökentältä ja alan tutkijoiden parista. Tässä työssä raportoidaan työpajan alustavia tuloksia. Tulosten rikastamista ja jatkojalostamista ei ole vielä tehty. Tässä esitetty jäsenitys tarjoaa jatkokäsittelyyn soveltuvaa aineistoa. Alustavien tulosten perusteella voidaan tehdä joitakin tulkintoja. Pelastustoimen yhteiskuntavasteen kehittämisen kannalta näyttää nousevan esille yhteistyön, tietojohtamisen ja pelastustoimen kyvykkyyksien vahvistaminen eräänlaisina yleisinä teemoina. Kansainväliseen turvallisuusympäristöön, julkisen talouden tilaan tai väestökehitykseen ala ei voi vaikuttaa, mutta yhteistyöhön, tietojohtamiseen ja kyvykkyyksien kehittämiseen voi.

Johdanto

Pelastustoimella ei ole vielä ole systemaattista, valtakunnallisesti toteutettavaa toimintaympäristöanalyysia. Alueellisella tasolla toimintaympäristöanalyysi on kuitenkin osa arkea, joskin toimintamallit ja tietotuotteet voivat olla hyvinkin erilaisia. Alueelliset riskiarviot perustuvat toimintaympäristöanalyysin, mutta ovat fokusoidumpia. Myös pelastustoimen palvelutasopäätösten taustalla on toimintaympäristöanalyysi, joskin rajoittuen lähinnä onnettomuusriskejä koskevaan historialliseen tietoon. Silti systemaattisesti tuotettu, päivittyvä ymmärrys pelastustoimen valtakunnallisesta toimintakentästä puuttuu.

Prosessi valtakunnallisen, päivittyvän toimintaympäristöanalyysin tuottamiseksi on kuitenkin aloitettu. Tässä työssä raportoidaan prosessin ensimmäisen vaiheen tuloksia. Työssä raportoidaan Pelastusopiston ja Hyvinvointialueyhtiö Hyvil Oy:n järjestämän pelastusalan ennakoitutyöpajan tuloksia. Työpajan lähtökohdaksi valittiin valtakunnallinen toimintaympäristöanalyysi. Työpajassa näitä jo tunnistettuja muutostekijöitä ja niiden vaikutuksia arvioitiin pelastusalan palveluiden näkökulmasta. Lisäksi työpajassa mietittiin keinoja varautua riskeihin, ennakoida haasteita ja hyödyntää mahdollisuuksia, jotta pelastusalan yhteiskuntavaste säilyisi vahvana jatkossakin.

Sisäministeriön pelastusosasto, Pelastusopisto sekä Etelä-Karjalan pelastuslaitos ovat samaan aikaan tehneet työtä valtakunnallisen mallin laatimiseksi pelastustoimen toimintaympäristöanalyysille. Työtä on tehty pelastusosaston johtamassa epävirallisessa työryhmässä. Sen alustavat hedelmät näkyivät pelastuslaitoksille vuoden 2025 suunnatun kyselyn sisällössä. Siihen oli sisällytetty avoin osio alueellisten toimintaympäristötekijöiden ja niiden merkittävyyden sekä todennäköisyyden arvioinnista. Kyselyn tuloksia käytetään ennakoivan analyysin pohjana ja ne raportoidaan osana Pelastustoimen palveluiden ja talouden tila vuonna 2025 -selvitystä. Näillä kahdella raiteella katetaan siis valtakunnallisen toimintaympäristön merkityksiä toimialalla sekä nostetaan alueellisia tekijöitä valtakunnalliselle tasolle.

Tämän kirjoituksen pääasiallinen tavoite on raportoida, miten valtakunnallisessa, poikkihallinnollisessa toimintaympäristöanalyysissa tunnistetut muutostekijät näkyvät pelastusalalla, miten ala voi niihin reagoida sekä kehittää toimintaansa niitä hyödyntäen tai niistä huolimatta. Työ tarjoaa siten erään, prosessin alkuvaiheeseen perustuvan tulokulman pelastustoimen toimintakenttään ja pelastustoimen kehittämiseen muuttuvassa maailmassa. Työn toissijainen tavoite on nostaa esille sellaiset kriittiset tekijät, jotka vaikuttavat pelastusalan yhteiskuntavasteeseen ja joihin ala voi itse omalla toiminnallaan vaikuttaa.

Analyttinen viitekehys

Valtioneuvoston (2024) toimintaympäristöanalyysissa jäsennyksenä toimii PESTEL-malli [1]. Se on yleisesti käytetty luokitella muutostekijät poliittisiin, taloudellisiin, yhteiskunnallisiin, teknologisiin, ekologisiin ja lainsäädännöllisiin muutostekijöihin [2]. PESTEL pyrkii kattamaan kokonaisuuksia. Tällä tavalla siinä on tiettyä systeemistä logiikkaa, vaikka se ei olekaan teoreettinen malli siitä, miten esimerkiksi poliittisen ja taloudelliset muutostekijät kietoutuvat yhteen [3]. Verrattuna esimerkiksi Wallersteinin jopa deterministiseksi luokiteltavissa olevaan maailmansysteemien analyysiin, pyrkii PESTEL luokittelun kautta kerättäviin havaintoihin eikä havaintojen selittämiseen systeemisen logiikan kautta [4, 5].

Erilaissa tutkijakeskusteluissa on tunnistettu systeemistä logiikkaa PESTEL-mallin mukaisten muutostekijöiden kehityksessä ja keskinäisriippuvuuksissa. Marxilainen yhteiskuntatiede korostaa kapitalistisen kasautumisen logiikkaa, poikkikansallisten eliittien merkitystä sekä kapitalismiin liittyviä diskurssiivisia valtasuhteita [6]. Tällaisiin selitysmalleihin liittyy erilaisten taloudellisten ja poliittisten sydänaleuiden välistä kamppailua, alueiden välistä konfliktia, sekä alueiden sisäisiä jännitteitä, joita ruokkivat kansalliset ja kansainvälisten niukkuudet. Jotkut tutkijat korostavat kulttuurien merkitystä jännitteiden paikallisten ja alueellisten jännitteiden taustalla, toiset kansallista etua ja toiset taas jatkuvaa, kaikilla tasoilla tapahtuvaa kamppailua sitä, kuka saa, mitä ja milloin. [7, 8, 9].

Teoreettiset mallit pyrkivät selittämään juurisyytä. Niiden yksi tärkeä anti toimintaympäristöanalyysille on selitysmallit siitä, miksi yhteisten tavoitteiden asettaminen on niin vaikeaa, miksi päätöksenteko ei aina heijastele tarkoituksenmukaisinta tietoa, miksi samasta tietoa-aineistosta voidaan tehdä niin erilaisia tulkin-toja, miksi luonnollisten yhteistyökumppaneiden välinen kilpailu on niin yleistä tai yksinkertaiseksi, miksi maailma on niin kaottinen paikka.

Toimintaympäristöanalyysi tarkoittaa tunnistettujen ja tunnistamattomien, epävarmojen ja todennäköisten sekä yllätyksellisten muutostekijöiden kartoittamista, jäsentämistä ja koontia. Se on osa ennakoitavuutta, mutta myös siitä erillistä työtä. Käytännössä pelkästään ajankohtaiseen tilannekuvaankin tähtäävä aineiston keruu ja koonti sisältää ennakoitavuuden ensimmäisen ja tärkeän elementin: ymmärryksen niistä erilaisista todennäköisyyksistä ja epävarmuuksista, jotka vaikuttavat toimintaamme nyt ja tulevaisuudessa. Tulevaisuus syntyy nykyhetken rakennusosista. Siksi toimintaympäristöanalyysi on ennakkoinnin ensimmäinen askel.

Päätöksenteko eri tasoilla edellyttää erityyppistä ennakoitavuutta. Korkeimmalla tasolla on visionäärinen ja strateginen työ, joka tarvitsee tuekseen toimintaympäristöanalyysia ja pitkällekin tulevaisuuteen tähtäävää ennakoitavuutta. Vaistonvarainen taso on alin, ja siinä toimitaan tilannekohtaisesti tuntemuksien, kokemusten, ennakkokäsitysten – ja luulojen ja yleensä jäsentymättömän tiedon perusteella. Näiden välissä on vielä taktinen ja operatiivinen taso. Taktisella tasolla tarvitaan toimintaympäristötietoa, mutta myös strategista ohjausta ja aikajänne on lyhempi. Operatiivisella tasolla aikajänne on vielä lyhempi, laajoja toimintaympäristöanalyysijä ei tarvita, mutta kylläkin tilannekuvatiemoisuutta. [3]. Operatiivisessa toiminnassa ennakoitavuus voi tarkoittaa varasuunnitelman ja hätäsuunnitelman tekemistä pääsuunnitelman lisäksi.

Menetelmät

Tämän työn tulokset perustuvat pääosin pelastusalan ennakoitavuustyöpajan tuottamaan aineistoon. Työpajassa lähtökohdaksi otet-

tiin valtakunnallinen toimintaympäristöanalyysi. Tavoitteena oli kerätä pelastusalan asiantuntijoilta käsityksiä ja näkemyksiä siitä, miten valtakunnallisella tasolla tunnistetut muutostekijät voivat vaikuttaa pelastustoimen palveluihin. Lisäksi työpajaan osallistuville tehtiin ennakkokysely. Siinä pyydettiin priorisoimaan VNK:n muutostekijät sekä kirjoittamaan avoimeen kenttään pelastusalaan koskevia muutostekijöitä, niiden vaikutuksia ja tarvittavia tai suotavia toimenpiteitä. Vastauksia saatiin kaikkiaan 20, kun työpajaan osallistuvia oli noin 60. Vastaukset käytiin läpi ennen työpajaa. Niistä nousi esille erityisesti aluekehitykseen, pelastusalaan hakeutuviin sekä arvoihin ja asenteisiin liittyviä sellaisia muutostekijöitä. Myös nämä teemat ja niihin liittyvät muutostekijät nostettiin työpajatyöskentelyn asialistalle.

Työpaja jaettiin kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa käsiteltiin valtakunnallisen toimintaympäristöanalyysin ja taustakyselyn muutostekijöitä. Tältä osin työpajaa voinee luonnehtia puolistrukturoiduksi asiantuntijahaastatteluksi [10]. Toisessa osassa keskusteltiin ennakoitavuudesta. Työpajaan osallistujat arvioivat pienryhmissä, millaisia toimenpiteet muutostekijöiden hallitsemiseksi, hillitsemiseksi, ehkäisyksi tai hyödyntämiseksi tulisi tehdä. Työpajan kolmas osa keskittyi tulevaisuuden visiointiin. [11]

Työpajassa työskentely tapahtui pienryhmissä. Jokaisella ryhmällä oli puheenjohtaja, jonka tuli kirjata osallistujien keskustelussa esille nousseet havainnot. Puheenjohtajat, jotka itsekin olivat alan asiantuntijoita, toimivat yhtä aika haastattelijoina ja keskusteluun osallistujina. Pienryhmien koko vaihteli noin viiden ja kahdeksan välillä. Osa ryhmistä toimi etänä verkossa ja osa paikalla Helsingin Kuntatalolla. Tässä tekstissä raportoidaan työpajan havaintoja. Niitä on raportointia varten yksinkertaistettu, sellaisia havaintoja, joiden kontekstia ei kirjauksista saanut selville on jätetty pois, ja ryhmittelyn avulla niistä on pyritty muodostamaan kokonaisuuksia. Lopuksi havainnoista on pyritty löytämään muutamia ydinteemoja tai haasteita, jotka määrittävät pelastusalan palvelukykyä ja joihin pelastusala voi itse omalla toiminnallaan vaikuttaa.

Tässä kirjoituksessa tehty jäsennyksen ja tuloksin perustuvat pääosin kirjoittajan tulkintoihin. Muutostekijöiden ja toimenpiteiden jatkokäsittely, kuten rikastaminen ja priorisointi, ovat osa myöhempää ja jatkuvaa ennakoitavuutta, jolle tämä kirjoitus tarjoaa eräitä välineitä. Havaintojen kokoamisessa eräitä teemoja on täydennetty joiltakin osin Pelastusopiston omassa ennakoitavuudessa esille nousseiden havaintojen avulla. Tulkintaosio etupäässä kirjoittajan, mutta osin myös Hyvinvointialueyhtiö Hyvil Oy:n Terhi Virtasen, Vesa-Pekka Tervon ja Esa Kokin ajatustenvaihtoon.

Tulokset

Geopoliittiset muutostekijät

Geopoliittisista muutostekijöistä pelastustoimen kannalta kriittisimpinä nähtiin Venäjän rooli ja turvallisuusympäristön epävakaus. Pelastustoimeen kohdistuu lisääntyvää tiedustelutoimintaa. Tiedustelun tavoitteena voi olla iskukohteiden tunnistaminen, viranomaisen uskottavuuden heikentäminen, turvattomuuden luominen, yhteiskunnan epävakauttaminen ja viranomaistoiminnan heikentäminen. Erään osallistujan mukaan jonkinlaista tiedustelutoimintaa on nähtävissä viikoittain.

Tiedustelutoiminta asettaa korkeampia vaatimuksia toimitilaturvallisuudelle, turvallisuusselvityksille ja osaamiselle. Se voi johtaa pelastustoimen tilojen sulkemiseen, pääsyn rajoittamiseen ja julkisista tapahtumista luopumiseen. Tällä tavalla se voi heikentää paitsi kansalaisten ja viranomaisten välistä luottamusta, mutta myös yhteistyötä viranomaisten välillä. Yhteistyökyvyn heikentyminen muodostuu, kun turvallisuusriskejä nähdään siellä- ▶

Geopoliittiset muutostekijät

- 1 Strateginen kilpailu moninapaistuvassa maailmassa
- 2 EU tavoittelee vahvempaa geopoliittista toimijuutta
- 3 Yhdysvaltojen kahtiajako syvenee
- 4 Kiina tarjoaa vaihtoehtoja maailmanjärjestystä
- 5 Venäjä säilyy merkittävänä kansainvälisenä toimijana, turvallisuustekijänä ja -haasteena
- 6 Turvallisuus heikentyy ja turvallisuusympäristö säilyy epävakana
- 7 Arktisen alueen strateginen merkitys kasvaa

Taloudelliset muutostekijät

- 8 Globaali talousjärjestelmä liikkeessä
- 9 Suuret muutokset taloudessa
- 10 Vihreä siirtymä – kohti ekologisesti kestävää taloutta
- 11 Kilpailu luonnonvaroista ohjaa kohti kiertotaloutta
- 12 Työn ja työelämän muutokset haastavat nykyisiä toimintatapoja

Yhteiskunnalliset muutostekijät

- 13 Epätasainen demografinen kehitys jatkuu
- 14 Muuttoliikkeiden merkitys kasvaa
- 15 Kaupungistuminen jatkuu
- 16 Eriarvoisuuden ja yhdenvertaisuuden ristiriitainen kehitys
- 17 Inhimillinen pääoma kasvaa, osaamistarpeet muuttuvat ja TKItoiminnan merkitys korostuu
- 18 Hyvinvoinnin, terveyden ja elintapojen haasteet muuttuvat
- 19 Arvot, asenteet, maailmankatsomukset ja elämäntavat muuttuvat

Teknologiset muutostekijät

- 20 Murrokselliset teknologiat muuttavat arkea, elinkeinotoimintaa ja yhteiskuntia
- 21 Avaruustoiminnan merkitys kasvaa arjen palveluissa ja sotilaallisessa toiminnassa

Ympäristölliset muutostekijät

- 22 Ilmaston kuumeneminen kiihtyy
- 23 Luonnon monimuotoisuus köyhtyy
- 24 Ympäristön tila heikkenee

Lainsäädännölliset muutostekijät

- 25 Oikeusvaltion vakaus rapautuu
- 26 Demokratiakehityksen heikentyminen

kin, missä ne olisivat hallitavissa. Yhteistyökyvyn turvaaminen ja tiedustelutilanteiden tunnistamisen vaatimukset siis korostuvat.

Turvallisuusympäristön heikentyminen ja siihen liittyvät uhkat tarkoittavat käytännössä varautumisen tason nostamista. Tähän sisältyviä ulottuvuuksia ovat osaaminen, kalusto ja materiaali, henkilöstön riittävyys eli kyvykkyys suoriutua tehtävistä myös häiriötilanteissa ja tarvittaessa tavanomaisesta poikkeavien keinoin silloinkin, kun voimavarat ovat erityisen kulutuksen kohteena.

Taloudelliset muutostekijät

Talouden teemasta pelastustoimen kannalta kriittisimmiksi määriteltiin muutostekijät 9 ja 12: talouden suuret muutokset ja työn sekä työelämän muutokset. Niihin liittyviä tarkempia kriittisiä muutostekijöitä ryhmän näkemyksen mukaan on pelastustoimen henkilöstön saatavuus ja rahoituspohjan turvaaminen. Fyysisesti raskaassa työssä toimivien virkasuhteisten pelastajien määrä on yksi haaste, mutta yhtä lailla sopimushenkilöstön saatavuus. Rahoituspohjaan vaikuttavana yhtenä uhkana nähtiin, että pelastustoimi jää sotilaallisen maanpuolustuksen varjoon. Toisaalta mahdollisuutena nähtiin pelastustoimen roolin nostamista korostamalla pelastustoimen väestönsuojelutehtävää.

Henkilöstön määrään ja resursseihin vaikuttaa vahvistavasti ikääntyvästä väestöstä ja ilmastoturmista johtuva mahdollinen

tehtävämäärän lisääntyminen. Tieverkoston ja kriittisen infrastruktuurin kunto vaikeuttavat toimintaa muuten, vaikka eivät suoraan liity pelastustoimen resursseihin.

Yhteiskunnalliset muutostekijät

Valtakunnallisen toimintaympäristöanalyysiin muutostekijöistä tärkeimpinä pidettiin alue- ja väestökehityksen muodostamaa kokonaisuutta (muutostekijät 13–17. Palveluiden keskittyminen kaupunkeihin ja aluekeskuksiin tunnistettiin yhdeksi käynnissä olevaksi trendiksi. Tämä voi olla ristiriidassa palveluiden yhdenvertaisen saatavuuden kanssa. Harvaan asutuilla alueilla tehtäviä on vähemmän kuin keskuksissa, mutta ne eivät silti häviä kokonaan. Lomakaudet ja etätyöskentely voivat rasittaa palveluverkostoa, jota ei ole mitoitettu äkillisesti ja väliaikaisesti kohoavaan palvelutarpeeseen. Harvaan asutuilla alueilla tehtävämäärään voi vaikuttaa niitä nostavia trendejä, kuten väestön ikääntyminen, kiinteistöjen rapautuminen ja ilmastonmuutoksen seuraukset.

Tätä taustaa vasten työryhmässä todettiin, että pelastustoimen palvelutason määrittelyssä on kehitettävää. Kehittämistarve liittyy yhtäältä ennakoiwaan palvelutarpeen arviointiin huomioimalla esimerkiksi alue- ja väestökehityksen sekä ilmastonmuutoksen yhteisvaikutukset tehtävämääriin. Toisaalta kehittämistarve kietyy palvelutason määrittelyssä taustalla olevaan tietoon: se on tehtäviin sidottua historiallista tietoa, mutta ei heijastele onnetto-

Taulukko 2: Geopolitiittisen muutostekijöiden vaikutuksia ja niihin liittyviä toimenpiteitä.

Toimintaympäristö	Vaikutuksia ja haasteita	Toimenpiteitä
Turvallisuusympäristö ja strateginen kilpailu	• Toimitilaturvallisuus, salassa pidettävä tieto. • Yhteistyön vaikeutuminen (foliohattuefekti) pelastusalan sisällä, viranomaisten välillä ja sidosryhmien kanssa, epäluottamuksen ilmapiiri. • Henkilöstöresurssin riittävyys poikkeusoloissa (erit. sopimuspalokuntalaiset). • Osaamistarpeet kasvavat: tietoturva, teknologia, tilannekuva, viestintä. • Häiriöt kansainvälisissä tuotantoketjuissa vaarantavat materiaalin saatavuuden häiriötilanteessa ja poikkeusoloissa. • Pelastusalan pirstaleisuus, päätöksenteko siiloissa, koordinaation puutteet. • Tietojärjestelmien ja tekniikan kytkökset yritysjetzeihin ja suurvallakilpailuun: kustannusten hallinta ja tietoturva.	• Tietoturvaosaamisen nostaminen, turvallisuusselvitykset; tilanteen tunnistaminen. • Viestinnän valtakunnallinen ja toimialakohtainen koordinoiti, monikanavaisuus; kriisitilanteessa jatkuva radioviestintä ja tilannehuone. • Omavaraisuusasteen kasvattaminen, materiaallisen varautumisen koordinoiti, alueellisesti, valtakunnallisesti ja kansainvälisesti (esim. Pohjoismaiden ja Baltian maiden välillä). • Pelastusalan varautumistyön koordinoiti. • Väestönsuojelun kehittäminen. • Alueellinen varautumisen ja omatoimisen varautumisen vahvistaminen. • Pelastusalan teknologiatiekartta ja teknologinen varautuminen.
	Kokonaisturvallisuus	
	Kansalaisten luottamus viranomaisiin rapautuu; johtaminen vaarantuu; väestön henkinen kriisinsietokyky laskee; pelastustoimen rooli sisäisen turvallisuuden tuottaja laskee.	
Taloudelliset muutostekijät, aluekehitys, pelastajiksi hakeutuvien osaaminen, polarisaatio ja ekologiset muutostekijät voivat heikentää sisäisen pääoman ja kokonaisturvallisuuden perusteita.		

Taulukko 3: Taloudellisten muutostekijöiden vaikutuksia ja niihin liittyviä toimenpiteitä.

Toimintaympäristöhaasteita	Toimenpiteitä
• Henkilöstön riittävyys	• Markkinointi (iltapäiväkerhot, NouHätä! opetussuunnitelmiin). • Alan avautuminen sulkeutumisen sijaan. • Kyläturvallisuus ja väestönsuojelu • Ratkaisuja esim. tietoturvaluuteen liittyviin rajoituksiin. • Spontaanien vapaaehtoisten hyödyntäminen • Panostetaan onnettomuuksien ehkäisyyn (kansalaistaito kouluihin) • Teknologiset ratkaisut onnettomuuksien ehkäisyyn ja pelastustoiminnan tehtävissä • Suorituskykyvaatimusten uudelleen tarkastelu, tarvitseeko jokaisen osata kaikkea? • Rekrytoimalla laajemmilta osa-alueilta henkilöstöä pelastustoimeen, tehtävänkuvien ja kelpoisuusvaatimusten arvioiti.
• Pelastustoimen rahoitus	• Lisättävä esillä oloa / edunvalvonta / vaikuttamistyö • Käytettävä momentum väestönsuojelun rahoittamisen lisäämiseen • Tunnustettava, että resurssit eivät riitä kaikkeen, priorisoinnit. • Tiivistettävä yhteistyötä kuntien kanssa, esim. rooli väestönsuojelussa. • Rahoituksen optimointi, esim. keskitetyt hankinnat. • Osa-optimoinnin poistaminen: esimerkkinä luopuminen liesivahdeista ja ensivasteen lääkehoidosta • Rahoitusperusteiden kokonaistarkastelu. • Vaikuttavuusmittareiden kehittäminen: mitä vaikutusta rahoituksella saadaan?
• Ilmastoturismi • Ikääntyvä väestö • Korjausvelka kasvaa • Tiestö, kriittinen infra huonokuntoista	• Tehtäväpiikit ja palvelutaso. • Ennalta ehkäisevän työn merkitys kasvaa: palvelutaso. • Palveluintegraatio.
Turvallisuusympäristöön liittyvä epävarmuus, siiloista johtaminen, järjestötoiminnan suosion hiipuminen nuorten keskuudessa, polarisaatio sekä tietojärjestelmiin ja tekniikkaan liittyvät kustannukset vaikeuttavat ratkaisujen toteuttamista.	

muuksien ennalta ehkäisyyn vaikuttavuutta. Eräs osallistuja totesi, että tehokkaalla onnettomuuksien ennalta ehkäisyllä voidaan vähentää onnettomuuksien määrää niin paljon, että se heijastuu rahoituksen vähenemiseen, jolloin ennalta ehkäisyltä putoaa pohja samalla kun vasteen ylläpitoon varatut varat ovat pudonneet. Työryhmässä vaikutti olevan jaettu ymmärrys siitä, että palvelutaso-

päätösten tulisi perustua riittävän nykyistä kattavampaan tietopohjaan, joka heijastelisi juurisyiden tasolla tapahtuviin muutoksiin ja ennalta ehkäisevän toiminnan vaikuttavuutta.

Rahoitusmallin ohella ryhmässä nostettiin esille tietojohdamisen teema. Tietoa on kyllä sinänsä paljon olemassa, mutta sitä ei ole aina tarvittaessa saatavilla. Palvelutarpeiden määrittely, strate-

Aluekehitys	
• Palveluiden keskittyminen suurten kaupunkien yhteyteen, harvaan asuttujen alueiden palvelukyky? • Tehtäväpiikit. • Pelastustoimella heikko kyky vastata pienten kuntien onnettomuuksiin, asukkaat ottavat enemmän vastuuta omasta turvallisuudesta. • Harvaan asutuilla alueilla ei saada sopimuspalokuntalaisia, eikä sinne saada pelastuslaitoksen henkilöstöä. • Omatoiminen varautumisen tarve korostuu. • Tarve uusien palveluihin (järjestöt, kylät yms.). • Yhteistyötarpeet voimistuvat. • Uutta sopimustekniikkaa esim. VPK:n välillä. • Yksityisen sektorin roolin vahvistuminen. • Uutta aktiivisuutta paikallisista lähtökohdista. • Etäpalvelut laajentuvana palvelumuotona (mikä kyvykkyys ottaa vastaan ikäihmisillä). • Sosiaali- ja terveystoimen sekä pelastustoimen yhteistyön tarve. • Jalkautuminen asiakkaan äärelle (yhdessä soten kanssa tai kylätilaisuuksiin yms.). • Asumispalvelujen muotojen uudistaminen ja pelastustoimen aktiivinen ja vaikuttava rooli uudistustyössä. • Sitoutumisen ylläpitämisen tarve: osa-aikatyömallien tarve, työkyvyn ylläpidon tuki. • Rakennuskannan ikääntyminen, infran eriytyminen.	• Sopimuspalokuntastrategia. • Systemaattinen järjestöyhteistyö. • Digitaaliset- ja muuta etäpalvelut vahvemmin käyttöön. • Yhteistyö nuorisitoimen kanssa. Jalkautuminen järjestöjen ja kylien tilaisuuksiin. • Kansalaisten kyvykkyysien hyödyntäminen. • Osallistuminen maahanmuuttajien palveluiden toteutukseen. Integroituminen hyvinvointialueiden palvelukokonaisuuksiin. • Henkilöstön työkyvyn tukeminen, osa-aikatyömallien käyttö ja muut joustot (monipaikkaisuus). Kärkiyksikkötoiminnan laajentaminen. Dynaaminen toimintavalmiuden suunnittelu.
Monimuotoisen väestön kohtaaminen	
• Monimuotoisuuden kohtaaminen: osaamisvaje • Monimuotoisuus: palveluvaje • Asenteet: miten kohtamme, osaammeko • turvallisuusviestintä: uudet kielet, ikääntyvät	• Koulutuksen kehittäminen: suorituskykyvaatimukset ja monimuotoisuus • Monimuotoinen rekrytointi. • Viestinnän temaattinen ja kohderyhmiä koskeva laaja-alaisuus. • Kohdennettu viestintä. • Pelastustoimen sisäisen yhtenäisyyden vahvistaminen (esim. visiotyö). • Pelastusalan koordinaation vahvistaminen.
Avun hälyttäminen ja työrauha	
• Arvostus hupenee, uhkatilanteet lisääntyvät • Polarisaatio ruokkii asennesaarekkeitä alalla • Polarisaatio haasta yhdenvertaisen palvelutuotannon • Polarisaatio haastaa avun vastaanottamisen • Viranomaisvastaiset ryhmät? • Kynnys hälyttää apua laskee • Pelastajia häiritään kriittisellä hetkellä • Uhkatilanteet ja pitovoima	• Pelastusala sisäisesti yhtenäiseksi (laitosten, opiston, ministeriöiden, järjestöjen kesken). • Ei kilpailuasetelmaa pelastusalan toimijoiden välille. • Muutostekijöiden kokonaisvaltainen huomioinen julkishallinnossa osana kokonaisturvallisuutta.

Taulukko 4: Yhteiskunnallisten muutos-tekijöiden vaikutuksia ja niihin liittyviä toimenpiteitä.

gisten painopisteiden määrittelyt, rajapinnat esimerkiksi sosiaali- ja terveyspalveluiden ja pelastuspalveluiden välillä ja ylipäätensä päätöksenteko eri tasoilla edellyttäisi tarkoituksenmukaista tietopohjaa. Vaikka tietoa on sinänsä paljon, sitä tuotetaan siiloissa eikä tiedon jakaminen ja kerääminen ole aina systemaattista ja jäsennettyä hyvinvointialueen sisällä saati valtakunnallisella tasolla. Tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminta alalla nähtiin sekin pirstaleisena eikä sen nähty nykyisessä mallissa kykenevän palvelemaan alan tarpeita.

Aluekehityksen, rahoitusmallin ja tietojohdamisen ohella työpa- jassa nousi esille monimuotoistuvan väestön kohtaaminen, avun hälyttämiseen ja pelastajien työrauhaan liittyvät asenteet, hakijoi- den ominaisuudet sekä muuta väestömuutokset.

Teknologiset muutostekijät

Teknologisiin muutostekijöihin keskittynyt ryhmä ei nostanut esille esimerkkejä teknologisten innovaatioiden vaikutuksesta

alalla vaan käsitteli teemaa yleisellä tasolla. Teknologiakehityk- seen liitettiin toiveita toiminnan tehostumista ja säästöistä. Pelas- tusalan todettiin olevan hyvä kehittämään ja innovoimaan sekä ottamaan käyttöön uutta teknologiaa. Esimerkkinä tästä mainitiin miehittämättömät ilma-alukset. Toisaalta ryhmä arvioi, että alalla on myös paljon muutosvastarintaa. Kehittämistyötä haittaa- viksi tekijöiksi nähtiin teknologian kehittämisessä tiedolliset haas- teet tunnistaa hyötyjä ja tuottaa käyttötapauksia, kokonaisymmär- ryksen puuttuminen siitä, mihin tarpeisiin teknologiaa ylipäänsä on mahdollista käyttää sekä mitä teknologiaa on käytettävissä ja kehitettävissä. Ryhmä nosti esille tarpeen saada pelastusala- le oma teknologiatiekartta sekä teknologisen kehittämisen stra- teginen johtaminen.

Ekologisia muutostekijöitä käsitelleessä ryhmässä sen sijaan nousi esille useita teknologisia muutostekijöitä, joilla asettavat vaa- timuksia pelastustoimen suorituskyvylle, pelastajien työturvalli- suudelle ja työterveydelle.

Taulukko 4:
Yhteiskun-
nallisten
muutos-
tekijöiden
vaikutuksia
ja niihin
liittyviä toi-
menpiteitä.

Alalle hakeutuvien ominaisuudet	
• Käden taidot • Kyky negatiivisten asioiden käsittelyyn • Koulutusvaatimukset: käden taidot • Työn muutokset ja pääsyvaatimukset • Nuoret tietoisia oikeuksistaan, vaatii myötäsillittelyä, johon keskiöjohdon työstä menee suuri osa aikaa. Tämä on aika uusi ilmiö. • Pelastusallalle hakijoissa huomioitava psyykkiseen ulottuvuus ja jaksaminen. • Opinnoissa paljon itsenäistä, etäopetusta ja digitaalista. Fysiikkapuoli muistettava, mutta saatava ajattelua mukaan. • Individualismi ja paapominen on nykyaikaa • On kuulunut, että "ryhmänjohtajaksi luuli tulevansa, aika meneekin henkilöstöstä huolehtimiseen". • Alalle hakeutuvien ominaisuudet muuttuvat, he voivat tuoda myös ratkaisuja esim. digitalisaation avulla.	• Tunnistetaan osaamisprofiiliin ja osaamistarpeiden keskeiset muuttujat: päivitetään koulutusta tarpeiden mukaan dynaamisesti. • Psykologisten testien uudistaminen. Oppimiselle lisää tukea ja osaamista opettajille sekä tuntiopettajille. käden taitojen opetusta lisättävä tutkinto-opetukseen, mentorimalli tai perehdytysjakso työpaikalle. • Enemmän henkilöstöjohtamisen opintoja päällystölle.
Tietojohtaminen	
• Toimintavalmiuden suunnitteluohjeen puutteet • Tiedon puute (palvelutarve) • Juurisyyt: rahoitukseen ja päätöksiin • TKI-toiminta pirstaleista • TKI-toiminta ei palvele valtakunnallisia tarpeita • Tietojohtamista konkreettisella tasolla • Toimintaympäristöanalyysia palvelutarpeeseen vaikuttavien juurisyiden kehityksestä • Palvelutuotannon siilot	• Palvelutasopäätösten sitominen kattavaan ja ennakoivaan toimintaympäristöanalyysiin huomioiden ennalta ehkäisevän toiminnan vaikuttavuus • Tietojohtoisuuden vahvistaminen kaikilla tasoilla. • TKI-toiminnan koordinaation vahvistaminen (tutkimusohjelma, TKI-asiantuntijaverkosto, tutkimustarpeiden kerääminen, käynnissä olevan TKI-toiminnan kartoitus). • TKI-toiminnan vaikuttavuus (viestintä, tietojohtamisen prosessit). • Pelastustoimen vaikuttavuusmittareiden kehittäminen ja seuranta.
Väestömuutokset	
• Kotona on yhä enemmän henkilöitä, joilla ei ole mitään mahdollisuuksia pärjätä onnettomuustilanteissa. Palokuolemien määrä voi nousee. Onnettomuuksien ehkäisyhenkilöstön turhautuminen, pelastajien kuormittuminen (henkisesti). • Monimuotoistuva väestö. • Ikääntyminen: pelastustoimen tehtävät ja pelastajien työkyky. • Väestön yleinen liikkuminen yms. - työntekijöiden kunnon ylläpito, kilpailu fyysisestä työstä kiinnostuneista (työn pitovoima), tehtävänkuvat ja huonokuntoisuus. • Hupeneva sosiaalinen liima ja kansalaisyhteiskunta sosiaalisena tukirakenteena. • Uusavuttomuus lisää "turhia" HÄKE-soittoja: rasite. • Omatoiminen varautuminen vähenee. • Ihmisten omatoimisuus lisääntyy. • Maaseudulla omatoimisuutta, kaupungeissa vähemmän. • Kansalaisten välinpitämättömyys lisääntyy. • "Minä-minä-assenne": vapaaehtoistoiminta vähenee. • Sukupolvien väliset kuilut ja yhteisöllisyys • Sukupolvikuilut: Yhteinen huolehtiminen asemilla vähenee • Kilpailu vapaa-ajasta, VPK ja some	• Ks. aluekehitys. • Muutostekijöiden kokonaisvaltainen huomioinen julkishallinnossa osana kokonaisturvallisuutta.

**Tämä ja aiemmat Palotutkimuksen päivien
julkaisut ovat vapaasti ladattavissa:
www.spek.fi/palotutkimuksenpaivat**

Ekologisiin muutoksiin liittyvät teknologiset muutokset	Toimenpiteitä ja kehittämiskohteita
Ilmastonmuutoksen juurisyyn hiilidioksidipäästöjen hallinnan toteuttaminen uusien teknologioiden avulla. Sähköautot, vetäytöt ja maakaasautot yleistyvät. Ne tuovat haasteita tieliikennepelastamiselle. Sähkön tuottaminen aurinkopaneelilla ja tuotetun sähkön varastointi litiumioniakkuvarastoihin tuottavat uusia riskejä julkisiin rakennuksiin ja myös kotitalouksiin. Lainsäädäntö laahaa perässä. Uusi akkuteknologia vaatii mineraaleja, joiden myötä kaivokset lisääntyvät ja ne aiheuttavat pelastustoimelle haasteita maanalaisten pelastustehtävien muodossa. Akkuihin tarvittavat mineraalit tulee jalostaa ja kyseiset prosessit vaativat haitallisia kemikaaleja, joiden käsittelyyn tulee pelastuslaitosten varautua metallinjalostuksessa tapahtuvien onnettomuuksien vuoksi. Vihreän vedyn tuotannon ylläpitäminen vaatii tietotaitoa ja osaamista, joka erityisesti korostuu onnettomuustilanteissa, joihin pelastuslaitosten on varauduttava. Aurinkopaneelientä ja niiden energiavarastot vaativat tietotaitoa ja osaamista, joka erityisesti korostuu onnettomuustilanteissa, joihin pelastuslaitosten on varauduttava. Tuulipuistot ja niiden energiavarastot vaativat tietotaitoa ja osaamista, joka erityisesti korostuu onnettomuustilanteissa, joihin pelastuslaitosten on varauduttava.	- Suorituskykyvaatimusten ja koulutuksen dynaaminen päivitys uusien onnettomuustyyppien ja materiaallisen suhteen. - Työterveyden ja työturvallisuuden kehittäminen myös uudet onnettomuustyyppit ja altistumisen huomioiden. - Uusiin onnettomuustyyppihin varautuminen toimialakohtaisesti ja yhteistyössä. - Uusiin onnettomuustyyppihin liittyvä onnettomuuksien ehkäisy.
Muut tekijät	
- Pelastustoimelta puuttuu teknologinen ennakointi, käsitys alalle soveltuvista uusista teknologioista. - Teknologian täysimääräinen hyödyntäminen vaatii suunnitelmallisuutta, osaamista ja muutoskykyä. Pelastusalan pirstaleisuus haittaa kehittämistyötä.	- Pelastusalan teknologiatiekartta. - Kärkiteknologioiden ennakointi. - Strategia teknologian kehittämiseen.

Taulukko 5: Teknologisten muutostekijöiden vaikutuksia ja niihin liittyviä toimenpiteitä.

Ilmaston kuumeneminen	Toimenpiteitä ja kehittämiskohteita
- Sään ääri-ilmiöt lisääntymistä (tuulet, rankkasateet, maastopalot). - Vaativat, toistuvat ja kuluttavat vahingontorjuntatehtävät lisääntyvät, jolloin resurssien niukkuus korostuu. - Energiankulutus voi nousta, kun viilennyksen tarve kasvaa. Tämä osaltaan, yhdessä esimerkiksi sähköistymisen ja tekoälypalveluiden kanssa, voivat haastaa energiantuotantoa. - Ilmaston lämpeneminen voi johtaa tulevaisuudessa johtaa hallitsemattomiin muuttoliikkeisiin. - Pelastustoimen kannalta mahdollisuuksia tarjoaa metsäpalo-osaamisen vieminen maan ulkopuolelle, esim. EU-metsäpaloкомпания.	- Kuinka paljon rankkasateita tulee ja paljonko sademäärät lisääntyvät seuraavan 10 vuoden aikana? Tällöin ennakointijänne on realistisempi ja sopeuttamistarve on ymmärrettävämpi. Esimerkiksi viemärit mitoitettu nykyisten sade-ennusteiden mukaan, joten on oletettavissa kaupunkitilvia, joihin kaupunkisuunnittelussa on tulevaisuudessa varauduttava. Nykyisin PELA:n resurssit eivät riitä rankkasadetilanteissa. Ilmastonmuutos aiheuttaa korostetusti tarvetta myös pelastuslaitosten varautumiseen esimerkiksi maastopaloissa (maastopalotorjuntasuunnitelmat, syttyvyysherkkyysskartojen hyödyntäminen, erityisen herkat alueet, resurssien hallintajärjestelmät, metsäpaloherkkyyttä pienentävät toimenpiteet (metsänhoidolliset toimenpiteet ja kaupunkisuunnittelu, maastopalotarkastukset). Digitaalet apuvälineet käyttöön metsäpalojen sammutuksessa (tilannekuvan muodostamisessa, miehistön paikallistamisessa ja heidän toimintakyvyykkytensä arvioinnissa). Maastopalokoulutusta on lisättävä tutkinto- ja täydennyskoulutuksessa sekä myös pelastuslaitosten viikkoharjoituksissa. Millaiset valmiudet koulutus antaa suurten metsäpalojen hoitamiseen? Vastatutiteknikoiden kouluttaminen. Tehtävä selvitys, miten pelastustoimi pystyisi osallistumaan osaltaan kohti kestävää taloutta. Pelastustoimessa pienetkin muutokset aiheuttavat isoja vaikutuksia, koska toimialalla käytetään paljon energiaa. (esimerkki tyhjäkäynnin vähentäminen harjoitustilanteissa, jolloin myös melu- ja dieselpakokaasuallistumista voidaan vähentää)
Luonnon monimuotoisuuden köyhtyminen	
Vähentää maan sitomiskykyä, josta seuraa eroosioita ja maanvyöryjä. Luonnon monimuotoisuuden väheneminen vähentää myös metsien puskurikykyä tuholaisia ja myrskyjä vastaan, jolloin puiden kuivuminen altistaa metsät herkemmin maastopaloille ja myrskyvahingoille, jolloin nämä pelastustehtävät lisääntyvät.	
Ympäristön tila heikkenee	
Ihmisten hyvinvointi ja heidän kykynsä huolehtia itsestään huononee. Sammutusveden saannin vaikeutuminen altistaa metsät samanaikaisille maastopaloille, jolloin pelastustoimen kyvykyys maastopalojen hallintaan joutuu koetukselle.	
Ekologisten muutostekijöiden vaikutuksen pelastustoimella näkyvät vahvasti myös teknologisissa muutostekijöissä uusina tehtävinä ja osaamisvaatimuksina.	

Taulukko 6: Ekologisten muutostekijöiden vaikutuksia ja niihin liittyviä toimenpiteitä.

Ekologiset muutostekijät

Valtioneuvoston toimintaympäristöanalyysissa oli tunnistettu kolme ekologista muutostekijää, ilmaston lämpeneminen, luonnon monimuotoisuuden väheneminen, ympäristön tilan heikkeneminen. Työryhmän puheenjohtaja kirjasi keskustelusta seuraavat huomiot [9, lainattu mukaillen, Laitinen, 3.4.2025].

Lainsäädännölliset muutostekijät

Tärkeimpiä valtakunnalliseen toimintaympäristöön liittyviä muutostekijöitä olivat polarisaatio ja viranomaisyhteistyö. Polarisaatio voi johtaa tehtävämäärien kasvuun ja sillä voi olla suoria vaikutuksia työturvallisuuteen. Se voi synnyttää viranomaisvastaisuutta, lisätä vahingontekoja, välinpitämättömyyttä yksityistä ja julkista omaisuutta sekä ympäristöä kohtaan sekä laskea ilmoituskynnystä. Jos ja kun viranomaistoimintaa kyseenalaistetaan, korostuu tarve välittää kansalaisille yhtenäinen kuva viranomaistoiminnasta sekä vahvistaa kaikkien kansalaisten luottamusta viranomaisiin.

Turvallisuusympäristön heikkeneminen ja julkisen rahoituspohjan heikkeneminen voivat näkyä julkisten tehtävien priorisoinnissa. Pelastustoimen rahoitukseen tällä voi olla kielteisiä tai myönteisiä vaikutuksia paljolti riippuen siitä, millaisena turvallisuus toimijana pelastustoimi nähdään.

Polarisaatio, turvallisuusympäristö, oikeusvaltiokehityksen rapautuminen, ilmastoturismi, lokausien piikit tehtävämäärissä ja

julkisen rahoituspohjan heikentyminen ovat toimintaympäristöä epävakauttavia tekijöitä. Ne tuottavat toiminnan ennustamattomuutta ja lisäävät vaatimusta toiminnan joustavuudelle. Samalla ne lisäävät ulkoisen viestinnän tarvetta turvallisuuden tunteen yhtenä osatekijänä sekä viranomaisten välisen viestinnän, tilannekuvatietoisuuden, tietojen vaihdon ja yhteistyön tarvetta turvallisuuden tuottamisen yhtenä välineenä.

Tulkinta

Pelastusalan kannalta valtakunnallisen toimintaympäristöanalyysin teemoista yhteiskunnalliset muutostekijät tuottivat verrattain paljon ja monipuolisia havaintoja. Teknologisia muutostekijöitä tarkasteltaessa voidaan sen sijaan ajatella, että alan kyvykkyys tunnistaa uutta teknologiaa ja niiden käytettävyyttä voi olla kypsymätön, ellei kytköstä pelastustoimintaan ole jo esimerkiksi onnettomuuksien ehkäisyn kautta olemassa. Voidaan nähdä, että teknologiatiekartan laatiminen pelastustoimella voisi paikata tätä puutetta.

Geopoliittiset ja ekologiset muutostekijät nostavat pelastustoimen varautumisen vaatimustasoa. Samalla taloudellinen niukkuus heikentää tähän käytettävissä olevaa rahoituspohjaa. Myös yhteiskunnan asennemuutokset, polarisaatio ja järjestötoiminnan hiipuminen tekevät toimintaympäristöstä vaikeamman.

Muutostekijöitä	Toimenpiteitä ja kehittämiskohteita
- Oikeusvaltiokehitys: Pelastustoimen julkikuvaa voidaan yrittää rapauttaa. - Luottamus viranomaisiin laskee. - Polarisaatio voi lisätä tehtävämääriä, vaikutukset myös työturvallisuuteen. - Toiminnan ennustamattomuus lisääntyy. - Yhteistyön tarve korostuu. - CER-direktiivi vahvistaa yhteistä varautumistoimintaa, mutta asettaa myös vaatimuksia yhteistyölle.	Yhteistyö - Varautuminen edellyttää toimivaa ja jäsenettyä yhteistyötä toimialakohtaisesti sekä toimialojen sekä yksityisen ja kolmannen sektorin välillä niin alueellisesti kuin valtakunnallisesti. - Yhteinen tilannekuvan tuottaminen: esimerkiksi onnettomuuskehityksen seurannasta (PeLL 43 §) tietoa esim. alue- ja ilmiöseurannan tarpeisiin. Ensihoito, pelastus ja poliisi toimivat tilannekuvan tuntosarvina. Esim. Satakunnassa pelastustoimen, ensihoidon, sosiaali- ja kriisipäivystys samoissa tiloissa – viikoittaisessa palaverissa (missä myös poliisi mukana) voi nostaa esiin, että X-tyyppiset tapaukset ovat nousussa.
	Viestintä - Viestinnän merkitys viranomaisten välillä. - Ulkoinen viestintä: turvallisuuden tunteen lisääminen. Positiivinen ote, luottamuksen ja turvallisuuden ilmapiiri. Palvelutehtävän tai yhteiskunnallisen arvon korostaminen viestinnässä. - Viestinnässä nostetaan esille, että viranomaisen hallitsee tilanteita. - Pelastustoimi pysyy puolueettomana toimijana, joka auttaa kaikkia: otetaan huomioon erilaiset tarpeet ja syrjimättömyys. Tässä tärkeä viestinnällinen ulottuvuus.
	Tietojohteisuus - Ennakointi ja pelastustoimen omien toimien kohdentaminen. - Teknologia: esim. tekoälyn/koneoppimisen mahdollisuudet, esim. predikttiivisen tekoälyn tuottama analyysi.
	Lainsäädäntö Pelastuslaki, hallintolaki, valmiuslaki, laki hyvinvointialueiden rahoituksesta, CER-direktiivi: tietojenvaihto, varautuminen, väestönsuojelu, johtaminen, ketteryys?

Taulukko 7: Lainsäädännöllisten muutostekijöiden vaikutuksia ja niihin liittyviä toimenpiteitä.

► Turvallisuuksympäristö voi säilyä epävakaa vielä pitkään eikä sen heikentyminen entisestään näyttäisi epätodennäköiseltä. Sama koskee julkisen talouden tilaa. Vaikka työllisyys ja veropohja lähtisivät nousuun, asettavat puolustusmenojen kasvattaminen, velkaantuminen ja väestörakenne julkisen talouden raamit tiukalle jatkossakin. Niinpä erityisen tärkeää on panostaa sellaisiin toimenpiteisiin, jotka eivät edellytä rahoituksen merkittävää nostamista. Toiminnan tehostaminen ja priorisoiminen ovat tärkeitä.

Tietojohtamisen vahvistaminen alalla voi olla yksi tällainen teema. Se on väline lisätä toiminnan vaikuttavuutta, mutta edellyttää osaamista ja prosesseja alkaen tietotarpeiden tunnistamista, tietoon perustuvan päätöksenteon integroimisen osaksi kaikkea toimintaa, päätöksentekorakenteiden dynaamisuutta ja sujuvaa tiedon johtamista. Tietojohtaminen edellyttää myös yhteistyötä toimialan sisällä ja läpi sektorirajojen. Yhteistyö on myös luottamuksen ydinelementti samoin kuin väline ylläpitää pelastustoimen yhteiskuntavastetta alue- ja väestökehityksen asettamista haasteista huolimatta. Alueellinen varautuminen, omatoiminen varautuminen, toimialan varautuminen, uhkiin reagoiminen sekä toimintatapojen ja teknologian kehittäminen perustuvat nekin laajasti yhteistyöhön.

Kolmas esille nouseva elementti koostuu pelastustoimen kyvykkyyksistä ja käsittää sekä osaamisen että materiaalin ja kaluston. Osaamisen ylläpitäminen ja kehittäminen tulee olla ennakoivaa ja dynaamista, tuottaa vaste uusiin uhkiin ja riskeihin. Tietojohtaminen ja yhteistyö ovat osaamisen ennakoivassa ja tarveperusteisessa kehittämisessä edellytyksiä. Ne ovat myös riittävän materiaalin ja kaluston turvaamiselle edellytyksiä: jos pelastuslaitoksilla on jaettu ymmärrys alueellisista kyvykkyyksistä, mahdollistaa se toiminnan jatkuvuuden silloinkin, kun omat resurssit ovat tiukalla. Kansainvälinen yhteistyö on yksi väline vastata toimitusketjujen haasteisiin.

Lopuksi

Toimintaympäristöanalyysin avulla voidaan varautua tunnistettuihin uhkiin ja ennalta ehkäistä niiden toteutumista. Parhaimmillaan ennakoiva toimija ei pelkästään varaudu tulevaan, vaan myös visioi ja muokkaa tulevaisuutta. Yrityksille se voi tarkoittaa tuotekehittelyä ja sijoittajille riskejä, mutta myös suurten voittojen mahdollisuutta. Tulevaisuudessa uusiutuvan energian laajamittainen varastointi voi sekä tuoda sijoittajille suuria voittoja että mahdollistaa maapallon kantokyvyn tulevilla vuosisadoilla.

Viranomaistoiminnassa visiointi ei ehkä johda samalla tavalla suuriin mullistuksiin, koska riskirahoitus puuttuu. Silti oman toimijuuden vaikuttavuutta nimenomaan tulevaisuuden tekijöinä ei sopesi unohtaa. Visiointi on väline luoda yhteistä toimijuutta, yhteenkuuluvuutta ja tiekarttoja siitä, missä tulevaisuudessa halutaan olla. Tässä työssä raportoitu toimintaympäristöanalyysi jatkaa pelastustoimen visioinnilla, yhteisen tahtotilan määrittelyllä ja tämän jälkeen strategiatyöllä niistä keinoista, joilla tuohon tavoiteltua voidaan päästä.

Suomen turvallisuustilanteeseen vuonna 2045 vaikuttavat monet tekijät. Yksi niistä tekijöistä on pelastustoimi. Millainen pelastustoimi on vuonna 2045, määrittäen sen mukaan, mitä me pelastusalalla suunnittelemme tänään ja toteutamme huomenna. Vahva ja ennakoiva pelastustoimi on yksi kokonaisturvallisuuden kivijaloista.

Kiitokset

Kiitokset Vesa-Pekka Tervolle, Terhi Virtaselle, Esa Kokille, Juha Laitiselle, Oliver Saalille, Heidi Liukkoselle, Päivi Mäkelälle, Mim-

mi Tolvaselle, Mikko Rökköläiselle, Tuula Kekille sekä kaikille ennakointityöpajaan osallistuneille.

Lähteet

1. Valtioneuvosto (2024). Tulevaisuusselonteon 1. osan strateginen toimintaympäristöanalyysi. Valtioneuvoston julkaisu ja 2024:54.
2. Dufva, M. (2022). Toimintaympäristön analyysi. Peste ja sen variaatiot. Teoksessa H-K. Aalto, K. Heikkilä, P. Keski-Pukkila, M. Mäki. & M. Pöllänen (toim.), Tulevaisuudentutkimus tutuksi – Perusteita ja menetelmiä. Tulevaisuudentutkimuksen Verkostoakatemia julkaisuja 1/2022 (ss. 105–112). Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto. <https://tulevaisuus.fi/oppikirja-2022/>
3. Kaivo-Oja, J. & Santonen, T. (2022). Päätöksentekotilanteet ja sosiaalinen systeemiteoria ennakointitoiminnassa ja tulevaisuuden tutkimuksessa. Teoksessa H-K. Aalto, K. Heikkilä, P. Keski-Pukkila, M. Mäki. & M. Pöllänen (toim.), Tulevaisuudentutkimus tutuksi – Perusteita ja menetelmiä. Tulevaisuudentutkimuksen Verkostoakatemia julkaisuja 1/2022 (ss. 89–104). Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto. <https://tulevaisuus.fi/oppikirja-2022/>
4. Wallerstein, I. (1983). Historical Capitalism. London: Verso.
5. Wallerstein, I. (1984). The Politics of the World-Economy. The States, the Movements and the Civilizations. Cambridge: Cambridge University Press.
6. De Goede, M. (2006). Introduction: International Political Economy and the Promises of Poststructuralism. In International Political Economy and Poststructural Politics (ss. 1–20). New York: Palgrave.
7. Gilpin, R. (2001). Global Political Economy. Understanding the International Economic Order. Princeton: Princeton University Press.
8. Juutinen, M., & Kähkönen, J. (2016). Battle for Globalisations? BRICS and US Mega-Regional Trade Agreements in a Changing World Order. New Delhi: Observer Research Foundation. <https://www.orfonline.org/research/battle-for-globalisations>
9. Huntington, S. (2009). “The Clash of Civilizations?”, In Bowden, Brett (ed.), Civilization, Critical Concepts in Political Science, IV, Oxon: Routledge, ss.108–130.
10. Alastalo, M. & Åkerman, M. & Vaittinen, T. (2017). Asian-tuntijahaastattelu. Teoksessa M. Hyvärinen, P. Nikander & J. Ruusuvaara (toim.), Tutkimushaastattelun käsikirja. Vastapaino: Tampere (ss. 111–130).
11. Armanto, R. & Lauttamäki, V. & Siivonen, K. (2022). Monimuotoinen tulevaisuusverstas. Teoksessa H-K. Aalto, K. Heikkilä, P. Keski-Pukkila, M. Mäki. & M. Pöllänen (toim.), Tulevaisuudentutkimus tutuksi – Perusteita ja menetelmiä. Tulevaisuudentutkimuksen Verkostoakatemia julkaisuja 1/2022 (ss. 222–236). Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto. <https://tulevaisuus.fi/oppikirja-2022/>

Palontutkinnan tietotarpeet ja pelastusalan lainsäädäntöuudistukset

Tiivistelmä

Hallitusohjelmassa on asetettu tavoitteeksi onnettomuuksien tehokas ennaltaehkäisy ja tulipalojen määrän puolittaminen vuoteen 2030. Onnettomuuksien ehkäisyn riskiperusteisuutta ja vaikuttavuutta korostetaan myös pelastustoimen strategisissa tavoitteissa sekä koti- ja vapaa-ajan tapaturmien ehkäisyn ohjelmassa.

Palokuolemien määrä on nousussa, eikä tulipalojen määrän puolittamisesta ole merkkejä. Tyypillisesti tulipalossa loukkaantuneen tai menehtyneen henkilön toimintakyky on alentunut, ja hänen mahdollisuutensa vastata asumisen turvallisuudesta on heikentynyt. Keskeisinä syinä tähän ovat ikääntymisen seurauksena tapahtuva luontainen toimintakyvyn lasku, sairaudet ja päihteiden käyttö. Huolellisesti tehty palontutkinta ja tehokas tutkintatiedon hyödyntäminen vastaa sekä tulipalojen määrän vähentämisen että tietoperusteisen toiminnan tavoitteisiin.

Palontutkinnan tavoitteita ei saavuteta ilman riittävän laajaa tutkintaotetta. Lainsäädännön on mahdollistettava tutkinnan kannalta välttämättömien henkilötietojen käyttäminen. Valtaosan tulipaloista on arvioitu syttyneen ja tulipalon seurausten aiheutuneen ihmisen toiminnan tuloksena. Tutkinnassa tulisi päästä tunnistamaan syytymisten juurisyyt – ei vain syytymisen syytä. Sen rinnalla on analysoitava seurausten juurisyyt: miksi tulipalon seurauksena aiheutui henkilövahinko? Esimerkiksi terveystietojen tarvetta korostaa toimintakyvyn moniulotteisuus: kysymys on niin havainnointikyvystä, reagoitakyvystä kuin kyvystä toimia oikein.

Paloturvallisuus strategisena tavoitteena

Parhaillaan on meneillään pelastuslain uudistamistyö, jonka valmistelussa painotetaan hallitusohjelman tavoitteiden toteuttamista. Petteri Orpon hallituksen ohjelmassa *Vahva ja välittävä Suomi* (20.6.2023) asetetaan tavoitteeksi, että onnettomuuksia ehkäistään tehokkaasti ja tulipalojen määrä puolitetaan vuoteen 2030 mennessä.¹

Hallitusohjelman tavoite on yhdenmukainen *Valtakunnalliset strategiset tavoitteet pelastustoimen järjestämiselle vuosille 2023–*

2026 asiakirjan kanssa, missä tavoitteen saavuttamisen edellytyksiä on avattu tarkemmin. Kolmannen tavoitteen – Pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisy on järjestetty riskiperusteisesti, yhdenmukaisesti ja vaikuttavasti – tiivistelmä kuuluu seuraavasti:

”Tavoitteena on onnettomuuksien määrän vähentäminen ja onnettomuuksien seurannaisvaikutusten pienentäminen. Tulipalojen määrä vuoden 2030 loppuun mennessä puolitetaan. Asumisen paloturvallisuuden edistämisen tavoitteena on palokuolemien, henkilövahinkojen ja aineellisten vahinkojen vähentäminen. Tavoitteena on vahvistaa oma-toimisen varautumisen osaamista kaikissa väestöryhmissä onnettomuuksien ehkäisemiseksi ja onnettomuuksien seurannaisvaikutusten vähentämiseksi.”²

Turvallinen ja onnettomuuksista vapaa arki 2025 – Pelastustoimen toimintaohjelma onnettomuuksien ehkäisemiseksi julkaistiin vuonna 2019. Toimintaohjelmassa määriteltyjä vaikuttavuustavoitteita ovat toimintakyvyltään rajoittuneiden – kuten vammaisten ja muistisairaiden – tarpeiden erityinen huomioiminen, samoin kuin eri asiakasryhmien (kuten ikäihmisten ja maahanmuuttajien) tarpeiden tunnistaminen systemaattisesti.³ Ohjelmassa viitattujen asiakasryhmien ja niitä koskevien tavoitteiden sekä tilannetietoisuuden saavuttaminen edellyttää tiedonkeruuta ja sen analysointia.

Turvallisesti kaiken ikää – Koti- ja vapaa-ajan tapaturmien ehkäisyn ohjelma 2021–2030 sisältää niin ikään paloturvallisuuteen liittyviä tavoitteita. Ohjelman tavoitteena on pitkällä aikavälillä nollavisio: kenenkään ei tarvitse kuolla tai loukkaantua vakavasti tapaturman seurauksena. Ohjelman tavoite on, että palokuolemien ja tulipalojen aiheuttamien vakavien palovammojen määrä vähenee 25 prosenttia vuoden 2020 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Turvallisuuden kehittämiseksi käytetään rakenteellisia ja teknisiä ratkaisuja, taktisia ja strategisia tekoja, sekä ihmisen toimintaa hallitsemattoman tulen eli tulipalon estämiseksi ja turvallisuuskulttuurin parantamiseksi.⁴

Paloturvallisuudelle asetetut tavoitteet ovat kunnianhimoisia, ja niitä on mahdotonta tavoittaa ilman riittävää tietoa ennaltaehkäisytoimenpiteiden tueksi. Palontutkinta on käytännössä ainoa keino, jolla onnettomuuskehityksen juurisyihin päästään kiinni ja niihin voidaan puuttua. Tästä huolimatta palontutkinnan resursointi on edelleen kaukana sille asetetuista vaatimuksista. Palontutkinnan edellytysten turvaaminen on kuitenkin olennaista, jotta edellä viitattuihin strategisen tason tavoitteisiin voidaan päästä. Sama luonnollisesti koskee myös voimassa olevan pelastuslain (379/2011) tavoitetta, mikä on kirjattu sen 1 §:n ensimmäiseen virkkeeseen:

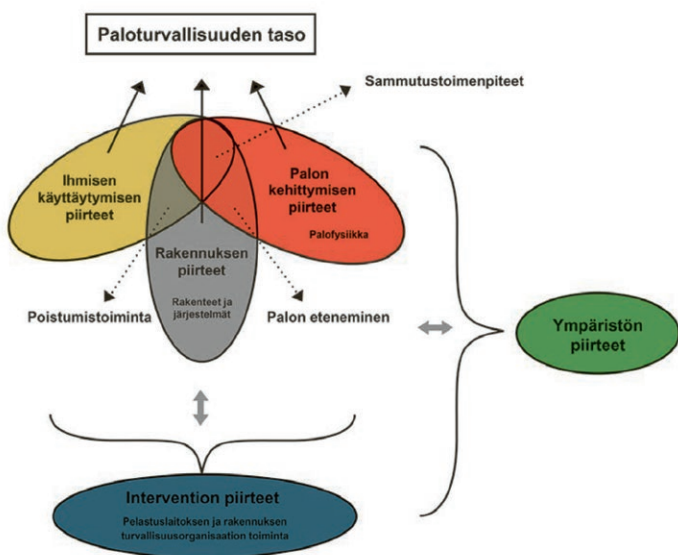
”Tämän lain tavoitteena on parantaa ihmisten turvallisuutta ja vähentää onnettomuuksia.”

Mitä inhimillisen toiminnan osuudesta ja taustoista palo-onnettomuuksissa tiedetään?

Onnettomuuksien tutkinnassa yleisesti käytössä olevat ajattelumallit lähtevät siitä perusoletuksesta, että onnettomuudet syntyvät aina usean eri tekijän yhteisvaikutuksena ja onnettomuuksia voidaan ennaltaehkäistä vastaavasti puuttumalla eri tekijöihin⁵. Ihmisen tekemä virhe on vain yksi osa tapahtumaketjua, eikä onnettomuuteen useinkaan ole osoitettavissa yhtä yksittäistä syytä. Tämä on havaittavissa esimerkiksi Onnettomuustutkintakeskuksen tutkintaselosteissa kerrostalopaloista.^{6,7}

Onnettomuustutkintakeskuksen tutkinnat ovat aina laaja-alaisia onnettomuustyyppistä riippumatta. Lisäksi muun muassa tiili- ja keraamikonnettomuuksien tutkinnassa käytettävä malli⁸ on huomattavan laaja, ja samaa mallia käytetään myös ajoneuvossa palokuolemaan johtaneiden liikenneonnettomuuksien tutkinnassa. Perinteinen palontutkinnan malli on edellisiä kapeampi.

Palo-onnettomuuksien tutkinnassa on otettava huomioon seuraavat tekijät:



Kuva 1: Paloturvallisuuden ulottuvuudet. (lähde: Hagen, Witloks & Somerkoski 2019, 14)⁹

Vuonna 2006 Suomessa tilastoitiin 109 tapaturmaista palokuolemaa¹⁰. Sisäisen turvallisuuden ohjelman ministeriryhmä päätti joulukuussa 2006, että kaikki henkilövahinkoja aiheuttaneet tulipalot tutkitaan. Palontutkinnan tueksi pelastustoimen tilastointijärjestelmään valmisteltiin palontutkintaseloste, jonka avulla palontutkinnan tiedot voitiin dokumentoida vakiomuotoises-

ti. Palontutkinnasta kerätyn tiedon avulla palokuolemien määrä saatiin vähennettyä puoleen^{11,12}. Pelastusopiston tekemän palokuolemaseurannan perusteella on pääteltävissä, että merkittävin vähenemä palokuolleiden joukossa saavutettiin normaalin toimintakyvyn omaavien sekä työikäisten ja sitä nuorempien joukossa¹³. Vuodesta 2018 lähtien palokuolemia on ollut noin 50 joka vuosi.

Haaste on saada vähennettyä palokuolemia yli 65-vuotiaiden ja alentuneen toimintakyvyn omaavien joukossa. Palokuolemista valtaosa tapahtuu asuintaloissa. Pirkanmaan pelastuslaitoksen johdolla kehitettiin vuosina 2015–2016 sosiaali- ja terveystoimen palveluissa käytetyn RAI-arviointimenetelmän avulla niin sanottu EVAC-mittari arvioimaan kotihoidon asiakkaiden poistumisturvallisuutta.¹⁴ Etelä-Karjalan pelastuslaitos aloitti vuonna 2014 Kotona asumisen turvallisuus (KAT) -hankkeen. Hankkeen eri vaiheissa on kehitetty konseptia, jolla tuotetaan turvallisuutta koteihin tilanteessa, jossa ikääntyneiden hoito siirtyy painotetusti laitoshoidosta kotiolosuhteisiin.¹⁵ Vastaavia kehityshankkeita on ollut ja toimintamalleja on kehitetty myös muiden pelastuslaitosten alueella ja järjestöissä, mutta palokuolemien määrä ei ole laskenut vuoden 2018 jälkeen. Jos palokuolemien määrää halutaan edelleen vähentää, tarvitaan nykyistä yksityiskohtaisemman tiedon keruuta ihmisen käyttäytymisen piirteistä ennen tulipaloa ja sen aikana.

Todorovic¹⁶ tarkasteli Helsingin asuinrakennuspaloja spatiaalisten aineistojen avulla. Työssä luotiin tilastollinen malli, jolla pyrittiin tunnistamaan tulipalojen alueelliseen esiintyvyyteen vaikuttavia naapurustojen rakenteellisia, sosioekonomisia ja väestöllisiä piirteitä. Merkittäviä paloriskiä lisääviä selittäviä tekijöitä olivat väestön tiheys, alhainen koulutustaso, työttömyys, asumisväljyys sekä asumismuoto. Todorovic toteaa, että tulisi kehittää tarkempia malleja paloriskin ja siihen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen. Tämä edellyttää tarkemman ja monipuolisemman aineiston ja menetelmien hyödyntämistä.

Yksi tekijä paloturvallisuuden kehityksen pysähtymiseen on mahdollisesti vanhus- ja sosiaalipalveluiden politiikan linjaus, jonka tavoitteena on sekä sosiaalipalveluiden että iäkkäiden asiakkaiden asuminen kotona mahdollisimman pitkään. Asuminen mahdollistetaan kotiin annettavilla palveluilla. Toisaalta samaan aikaan tiedetään, että toimintakyvyltään alentuneiden kotona asumiseen liittyy sekä palo- että poistumisturvallisuuteen mutta myös muuhun asumisturvallisuuteen liittyviä riskejä. Riskit tunnustetaan pelastuslaitoksilla ja on havaittavissa muun muassa huoli- ja vaarailmoituksissa^{17, 18, 19, 20}. Huoli nimenomaan kotona asuvien henkilöiden paloturvallisuudesta on tullut esiin myös lähihoitajille tehdys- kyselyssä, jossa kotona asuvien asiakkaiden paloturvallisuudesta oltiin selvästi useammin huolissaan kuin erillisissä hoivapaikoissa asuvien henkilöiden turvallisuudesta²¹.

Myös liesipalojen yhteydessä on viitteitä laajemmista toimintamalleihin liittyvistä riskitekijöistä²². Tosin nykyisessä palontutkintatilanteessa tiedonsaanti liesipalojen – samoin kuin muiden huoneistopalojen – laajemmista taustatekijöistä on hankalaa²³.

Kuurne²⁴ on tutkinut henkilövahinkoihin johtaneisiin rakennuspaloihin liittyviä riskitekijöitä olemassa olevien spatiaalisten aineistojen avulla. Tulosten perusteella asukkaiden määrä riskiruudussa sekä alueella esiintyvien melu- ja häiriöilmoitusten esiintyvyys olivat merkittävimpiä rakennuspaloihin korreloivia tekijöitä. Lisäksi asumus- ja avioerot, työttömyys, työkyvyttömyys ja ikääntyminen korostuivat spatiaalisen aineiston tarkastelussa. Kuurne arvioi näiden viittaavan heikentyneeseen toimintakykyyn tai elämänhallintaan.

Sekä Kokin, Todorovicin että Kuurneen tulokset osoittavat pelkkää syttymistä laaja-alaisempia taustatekijöitä paloille. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin Anderssonin ja Nilsenin asuinrakennusten paloista tehdyssä tutkimuksessa, jossa todettiin palokuo-

leman kohonnut riski miehillä, iäkkäillä, yksinasuvilla, työttömillä, tupakoivilla ja alkoholia käyttävillä henkilöillä. Lisäksi riski on kohonnut, jos henkilöillä on matala sosioekonominen asema, alhainen koulutustaso, matalat tulot, asuvat vuokralla tai ovat enenaikaisella eläkkeellä.²⁵

Etenkin iäkkäiden henkilöiden asumisessa on merkittävänä riskinä paitsi syttymiset ylipäätään, poistumisturvallisuus, palokuolemat, mutta myös palovammat. Vammat paranevat hitaasti ja palovammojen hoito aiheuttaa merkittäviä kustannuksia^{26, 27}. Kyse ei siis ole pelkästään palojen määrästä, vaan myös niiden aiheuttamista vahingoista ja henkilövahingoista. Jotta tulipalojen syttymisiin vaikuttavia tekijöitä saadaan selville, tarvitaan yksityiskohtaista palontutkintatietoa ihmisen käyttäytymisestä ennen tulipaloa.

Laaja tutkintaote tarpeen

Pelastuslaissa (379/2011) palontutkinnan tavoite on määritelty seuraavasti (41 § 1 mom.):

”Palontutkinnan tavoitteena on vastaavien onnettomuuksien ehkäisy ja vahinkojen rajoittaminen sekä pelastustoiminnan ja toimintavalmiuksien kehittäminen.”

Palontutkinnan sisältö puolestaan määritellään toisessa momentissa:

”Palontutkinnassa arvioidaan tulipalon syttymissyy ja selvitetään tarvittavassa laajuudessa palon syttymiseen ja leviämiseen vaikuttaneet tekijät, palosta aiheutuneet vahingot ja vahinkojen laajuuteen vaikuttaneet tekijät sekä pelastustoiminnan kulku. Selvityksen laajuuteen vaikuttaa erityisesti palon seurausten vakavuus.”

Palontutkinnan tavoitteet ovat tarkoituksenmukaisia, mutta tutkinnan sisällön määrittely on ongelmallinen. Palontutkinta on perinteisesti tarkoittanut palon syttymissyyä välitöntä arviointia, ja pykälän perusteluissa onkin tuotu korostuneesti esille tutkinnan vähimmäistaso. Tutkintavelvoitteen täyttää vähimmillään pelastustoiminnan johtajan ammattikokemukseen ja käytettävissä oleviin tietoihin perustuva arvio.

Sisältöä määrittelevässä momentissa ohjataan rajaamaan tutkinnan laajuutta ensisijaisesti yksittäisen tulipalon seurausten perusteella. Käytännössä vakavimpia tulipaloja lukuun ottamatta onnettomuuden taustalla olevien tapahtumien kulku jääkin usein selvittämättä. Palontutkinnan laajempaa vaikuttavuutta tavoiteltaessa erityisesti tutkinnan sisällön määrittelevä momentti tulisi muotoilla uudelleen. Lain tulisi ohjata arvioimaan tutkinnan laajuutta samaan suuntaan valtakunnallisten onnettomuuksien ehkäisyyn tavoitteiden kanssa.

Pelastusviranomaisen palontutkinnan pykälän sisältöä on tarkoituksenmukaista verrata Onnettomuustutkintakeskusta (OTKES) ja Onnettomuustietoinstituuttia (OTI) ohjaaviin lakeihin. Kaikissa edellä mainituissa laeissa tutkinnan yleiset tavoitteet ovat samat omissa viiteryhmissään. Laajasti eri toiminnan sektoreita koskevaa turvallisuustutkintaa tekee OTKES, ja liikenneonnettomuuksien tutkintaa OTI. OTIn toimintaa säännellään laissa tie- ja maastoliikenneonnettomuuksien tutkinnasta (1512/2016), minkä 2 §:ssä määritellään tutkinnan sisältö:

”Tutkinnassa selvitetään liikenneonnettomuuden kulku, riskitekijät, seuraukset ja olosuhteet liikenneonnettomuuden syiden selvittämiseksi ja niistä johtuvien onnettomuuksien ehkäisemiseksi vastaisuudessa.”

Onnettomuuden kulun, riskitekijöiden ja olosuhteiden korostaminen viittaa laajempaan tapahtuman kaaren ja taustatekijöiden

huomioimiseen kuin pelastuslain syttymissyykeskeinen muotoilu. Tämä näkyy myös tutkinnan toteuttamisessa: esimerkiksi OTIn tapauksessa onnettomuuteen vaikuttaneita taustatekijöitä – niin ajoneuvon kuntoon, tienpitoon kuin ihmisen toimintaan ja toimintakykyyn liittyviä – otetaan laajasti tutkinnassa huomioon.

OTKESin tutkinnan tavoitteet säädetään puolestaan turvallisuustutkintalain (525/2011) 5 §:ssä:

”Turvallisuustutkinnassa selvitetään tapahtumien kulku, syyt ja seuraukset sekä tehdyt pelastustoimet ja viranomaisten toiminta.”

Palontutkinnan määrittely eroaa suhteessa OTIn ja OTKESin tutkintojen määritelmiin. Niiden määrittelyssä puhutaan ensisijaisesti tapahtumien tai onnettomuuden kulusta ja vasta sen jälkeen syistä monikossa. Palontutkinnan määritelmä sen sijaan ohjaa ensisijaisesti arvioimaan tulipalon syttymissyyä ja sen lisäksi selvittämään palon syttymiseen vaikuttaneita tekijöitä. Palontutkinnan määritelmään on sisäänrakennettu oletus siitä, että onnettomuudelle on löydettävissä yksi syy.

Kuten kuvasta 1 voidaan todeta, myös palontutkinnan perusteltu tiedonintressi on laaja kokonaisuus. Tätä korostettiin myös OTKESin jo vuonna 2004 julkaisemassa tutkintaraportissa olleessa esityksessä siitä, mitä tietoja kuolemaan johtaneiden tulipalojen tutkinnassa tulisi selvittää:

Selvitettävä asia		Tietolähde
Tapahtumien kulku	- tulipaloa edeltäneet tapahtumat - tulipalon syttyminen - tulipalon ja savun leviäminen - alkusammutus ja poistuminen - pelastaminen ja sammutus	- paikatutkinta - silminnäkijät - naapurit - viimeksi ennen paloa paikalla käyneet
Olosuhteet	- kellonaika ja sää - ruokakunnan koko - paikalla olleet muut ihmiset - mahdolliset muut olosuhteet	- paikatutkinta - kuulemiset
Henkilön tiedot	- ikä, sukupuoli, ammatti, koulutus, toimeentulo - toimintarajoitteet (aistit, ymmärrys, liikkuminen) - mielenterveys (laajasti ymmärretty) - asiaan vaikuttavat sairaudet, lääkkeet - apuvälineet - hoito ja huolenpito palvelujen asiakuus - henkilölle tyypillinen psykososiaalinen käyttäytymisen ja piintyneet tavat (esim. erakoituneisuus, luonteen poikkeavuus, taustaa selittävät tekijät)	- ystävät - naapurit - omaiset - kunnan sosiaali- ja terveystoimi (kuulemalla)
Tiedot henkilön toimintatavoista yleisesti ja palon aikaan	- uhrin riskitietoisuus ja valvutuneisuus etenkin tuleen liittyvissä asioissa - mielentila - tupakointi - poikkeavat tapahtumat, jotka ovat saattaneet vaikuttaa asiaan (kihtymys, masentuneisuus, ihmissuhteet, taloudelliset tapahtumat jne) - päihteiden käyttö ja käyttötavat - sosiaalinen tilanne (juhlit, joulun aika, juhannus, merkkipäivä, palkka- tai eläkepäivä jne.)	- ystävät - naapurit - omaiset - kunnan sosiaali- ja terveystoimi (kuulemalla)
Rakennuksen tiedot	- rakennuksen ja asunnon yleisetiedot - palon syttymisen ja leviämisen edellytykset, rakenteellinen paloturvallisuus - kiinteistön ja asunnon hallinta - turvallisuusjärjestelyt	- paikatutkinta - rakennusvalvonta - kuulemiset - omistaja
Vahingot	- henkilövahingot - aineelliset vahingot	- vakuutusyhtiö - omistaja - paikatutkinta
Suosikukset	- pohdittuja ajatuksia, miten vastaavanlaisia kuolemia voitaisiin yleisesti välttää	- tutkintaa suorittavat henkilöt

Kuva 2: Onnettomuustutkintakeskuksen esitys kuolemaan johtaneiden palojen tutkinnassa selvittävistä asioista. (lähde OTKES 2004, 62)²⁸

Laajaa tutkintaotetta painotettiin myös jo kaksi vuosikymmentä sitten palontutkinnan kokeiluhankkeen yhteydessä. Hankkeen johtopäätöksenä todettiin, että palonsyy, palon kehittymisen, rakenteellisen paloturvallisuuden ja pelastustoiminnan selvittämisen lisäksi tarvitaan erityisesti kuolemaan johtaneista paloista ja niiden uhreista mahdollisimman tarkat tiedot muuttujista, joilla on ollut vaikutusta palokuolemaan. Näitä tietoja ovat muiden muassa havainto-, reagointi-, liikunta- ja ymmärryskyky – tai kyky toimia oikein.²⁹

► Myös pelastuslakia (379/2011) koskevassa hallituksen esityksessä mainitaan tulipalon aiheuttamien vahinkojen laajuuteen vaikuttavina tekijöinä asukkaiden ja henkilökunnan toiminta³⁰. Käytännössä erityisesti asukkaiden toimintaan vaikuttavat tekijät voivat sisältää terveystietoja. Näitä ovat palon havaitsemiseen ja poistumisturvallisuuteen vaikuttavat tekijät, jotka voivat liittyä esimerkiksi

- aistipuutoksiin (näkö, kuulo, haju)
- kognitioon (muistisairaus, toiminnanohjauksen ongelmat, neurokirjo, ym.)
- lääkitykseen (unilääkkeet, psyykelääkkeet, ym.)
- päihtymykseen (alkoholi, muut päihteen)
- liikuntakykyyn.

Ihmissen toiminnan piirteet ovat aivan keskeisessä roolissa tarkasteltaessa onnettomuuden syntyä. Jos palojen yhteydessä niitä ei tutki pelastusviranomaisen, ei niitä tutki kukaan muukaan; poliisin tutkintavollisuus koskee mahdollisen rikoksen selvittämistä ja näin osaltaan rikosvastuun toteuttamista.

Lainsäädännön lähtökohdat henkilötietojen käsittelylle

Ihmissen toiminnan selvittämisessä lähestytään väistämättä perusoikeuksilla suojattua yksityisyyden suojaa. Sen murtaminen on mahdollista vain lain perusteella. Palontutkinnan osalta menneet vuodet on eletty aikaa, jolloin tulipaloon osallisen henkilön toiminnan tarkastelu on tehty vanhentuneen lainsäädännön turvin. Menneen tarkasteluun ei ole tarvetta. Nyt tulee keskittyä siihen, miten riittävät tiedonsaantioikeudet tutkinnan tekemiseksi varmistetaan tulevaan lainsäädäntöön.

Henkilötietojen olennaisuudesta huolimatta pelastuslaki (379/2011) ei riittävästi tunnista tätä tietotarvetta, ja anna riittävää toimivaltaa esimerkiksi terveystietojen tai muiden tutkinnassa välttämättömien arkaluonteisten tietojen saamiseen palontutkinnan käyttöön. Vuoden 2025 pelastuslain uudistuksessa tähän haasteeseen ei ole ratkaisua. Palontutkinnan tiedonsaantioikeuksia koskevan 88 §:n määrittely siitä, että palontutkintaa suorittavalla hyvinvointialueen pelastusviranomaisella on oikeus saada ”salassapitosäännösten estämättä maksutta tutkinnassa välttämättömiä tietoja ja asiakirjoja onnettomuuskohteen edustajalta ja viranomaisilta” ei täytä valtiosääntöisiä edellytyksiä täsmällisestä ja tarkkarajaisesta sääntelystä, joita arkaluonteisten tietojen käsittelylle asetetaan. Sama koskee myös 91 §:n 2 momenttia, joka sääntelee onnettomuudesta toimenpiderekisteriin tallennettavia tietoja.³¹ Palontutkinnassa selvittävän rakennuksen, palon kehittymisen, ympäristön ja intervention ominaisuudet eivät sen sijaan tuota tiedonsaannin osalta ongelmia.

Arkaluonteisten – kuten henkilön terveydentilaan tai sosiaalihuollon asiakkuuteen liittyvien – henkilötietojen saamiselle asetetaan erittäin tiukat kriteerit. Sitä koskeva sääntely on valtiosääntöoikeudellisesti merkityksellistä perustuslain (731/1999) 10 §:n 1 momentissa jokaiselle turvattujen yksityiselämän suojan ja henkilötietojen suojan kannalta.

Henkilötietojen käsittelyyn vaikuttaa ensisijaisesti EU:n tietosuojasääntely. EU:n yleinen tietosuojasetus suojaa luonnollisten henkilöiden henkilötietojen käsittelyä. Tietosuojasetus on suoraan sovellettavaa lainsäädäntöä unionin jäsenmaissa. Tietosuojasetuksen 5 artiklassa määritellään yleiset periaatteet henkilötietojen käsittelylle. Käsittelyssä on noudatettava tietosuojasetuksen mukaan muun ohella lainmukaisuutta, läpinäkyvyyttä, käytötarkoitussidonnaisuutta ja täsmällisyyttä.

Perustuslakivaliokunnan mukaan lainsäätäjän tulee turvata yk-

sityiselämän ja henkilötietojen suoja tavalla, jota voidaan pitää hyväksyttävänä perusoikeusjärjestelmän kokonaisuudessa. Valiokunnan vakiintuneen käytännön mukaan lainsäätäjän liikkumavaraa rajoittaa henkilötietojen käsittelystä säädetty erityisesti juuri se, että henkilötietojen suoja osittain sisältyy perustuslain 10 §:n 1 momentissa turvattun yksityiselämän suojan piiriin. Lainsäätäjän tulee turvata tämä oikeus tavalla, jota voidaan pitää hyväksyttävänä perusoikeusjärjestelmän kokonaisuudessa. Valiokunta on kuitenkin katsonut, että yksityiselämän ja henkilötietojen suojalla ei ole etusijaa muihin perusoikeuksiin nähden. Perusoikeuksien välisessä arvioinnissa onkin kyse kahden tai useamman perusoikeussäännöksen yhteensovittamisesta ja punninnasta.³²

Lainmukaisuuden periaatteen mukaisesti henkilötietojen käsittelylle tulee olla laillinen peruste. Tietosuojasetuksen 6 artiklan mukaisesti henkilötietojen käsittely on lainmukaista ainoastaan, jos ja vain siltä osin kuin vähintään yksi artiklassa mainituista edellytyksistä täyttyy. Palontutkintaan liittyvä henkilötietojen käsittely olisi perusteltua 6 artiklan 1 kohdan e) alakohdan mukaan; *käsittely on tarpeen yleistä etua koskevan tehtävän suorittamiseksi tai rekisterinpitäjälle kuuluvan julkisen vallan käyttämiseksi*.

Tärkeät kansallisen tason turvallisuustavoitteita palvelevat toimet on yhtä kaikki toteutettava tarkasti tietosuojasääntelyn raameissa. Hyvin olennainen niistä on välttämättömyysedellytys: oikeus saada tiedot on vain, jos tiedot ovat välttämättömiä tutkitavan onnettomuuden kulun, syyn tai seurausten selvittämiseksi. Toisin sanoen viranomaisen ei ilman kyseistä tietoa voi suorittaa lakisääteistä tehtäväänsä, eikä vähempi keino tai vähempi tieto tämän täyttämiseksi ole mahdollinen. Esimerkiksi terveystieto koskevista tiedoista tarkat diagnoosittiedot rajautuvat ulkopuolelle, jolloin tarkkuustaso voisi liikkua esimerkiksi liikkumiskykyyn tai muistiin liittyvien sairauksien yleisluontoisessa käsittelyssä.

Mitä pitäisi tehdä?

Erityisesti ihmisen toiminnan osuutta koskevien palontutkinnan tietotarpeiden kokonaisuus on erittäin haastava. Tämä aiheuttaa haasteita ainakin lainsäädännölle, palontutkinnan käytännön järjestämiselle, tulevalle tietovarannolle sekä koulutukselle.

Lainsäädännön osalta muutostyö on parhaillaan käynnissä. Pelastuslain uudistamista tehtiin kiireellä ja sillä reunaehdolla, että muutokset eivät saa aiheuttaa lisää kustannuksia. Vuonna 2026 voimaan tulevat uudistukset koskevat pääosin varautumista ja väestönsuojelua, eikä palontutkinnan sääntelylle ole tätä kirjoitettaessa tehty toistaiseksi mitään.

Toisena lakihankkeena aloitettiin keväällä 2025 valmistelu laiksi pelastustoimen henkilötietojen käsittelystä ja tiedonsaantioikeuksista. Tätä kirjoitettaessa kerran kokoontuneen lakihankkeen sisältö on vielä muotoutumisvaiheessa. Jos palontutkinnalla halutaan tavoitella mm. tulipalojen määrän puolittamisen strategista tavoitetta, palontutkinnan sääntelyä on välttämättömästi ajanmukaistaa. Ylipäättään vastaaminen esimerkiksi EU:n yleisen tietosuojasetuksen vaatimuksiin on tämän lakihankkeen olennainen päämäärä, koska pelastuslain henkilötietojen käsittelyä koskevaa sääntelyä ei ole tarkistettu tietosuojasetuksen voimaantulon jälkeen.

Miten tiukat tietosuojakäytännöt sitten pitäisi ratkaista käytännössä? Tässä on erotettavissa karkeasti kaksi tasoa: alueellinen sekä valtakunnallinen. Alueellisen tason sisällä voidaan nähdä myös paikallinen taso, mutta nyt käsiteltävästä näkökulmasta jako voidaan typistää kahteen. Alueellisella tasolla yksi ratkaisuvaihtoehto voisi olla tutkijalautakuntiin perustuva järjestely niissä tapauksissa, joissa on tarpeen käsitellä arkaluonteista tietoa – toisin sanoen tutkittaessa vakavia henkilövahinkoja aiheuttaneita tulipaloja, ja lisäksi vakavissa vaaratilanteissa. Tätä käytäntöä on jo vuo-

sikymmeniä onnistuneesti hyödynnetty OTIn alueellisissa tutkijalautakunnissa, joihin kuuluu asiantuntijoita poliisista, lääketieteestä, ajoneuvotekniikan, tienpidon ja käyttäytymistieteen aloilta, ja tarvittaessa myös muita erityisasiantuntijoita. Myös OTKESin tutkinnat toteutetaan monijäsenisten ja monipuolisten tutkintaryhmien voimin.

Palontutkinnan kontekstissa tutkijalautakunnan luontevana lähtökohtana voisi olla pelastuslaitosten asema hyvinvointialueiden kokonaisuudessa. Tällöin vakavia henkilövahinkoja tai niiden riskitilanteita aiheuttaneet tilanteet tutkittaisiin niin, että mukana olisi viranomaisia hyvinvointialueen pelastustoimesta, terveystoimesta ja sosiaalitoimesta. Tässä järjestelyssä etuna olisi myös se, että esimerkiksi terveystietoja ja niiden merkitystä onnettomuuden kululle ja lopputulokselle olisivat arvioimassa terveydenhuollon asiantuntijat. Tämä toteutus toisi myös palontutkinnan ja ylipäätään pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisytyön näkyväksi hyvinvointialueilla. Samalla se nostaisi esille esimerkiksi poistumisturvallisuuteen liittyvät näkökulmat nykytilanteessa, jossa erityisesti ikääntyneiden kotona asumista painotetaan voimakkaasti. Näin sote-sektorilla tehtyjen ratkaisujen turvallisuus- ja kustannusvaikutukset tulisivat paremmin osoitetuksi, ja turvallisuutta koskevan tutkintatiedon hyödyntäminen hyvinvointialueiden päätöksenteossa tehostuisi.

Hyvinvointialueiden sisällä eri asiantuntijoiden yhdessä tekemä turvallisuustutkintatyö vastaisi myös Pelastustoimen onnettomuuksien ennaltaehkäisyohjelman tavoitteisiin. Kuten ohjelmassa todetaan, alueellisen tutkintayhteistyön kehittäminen myös vähentää vain yhdelle toimialalle eli pelastustoimeen kohdistuvaa kustannuspainetta:

--- ”yhteistyö mahdollistaa turvallisuustyöhön liittyvän kuorman jakamisen useimmille harteille ja siten suuremman vaikutuksen edistettävissä asioissa. Yhteistyössä pelastustoimen asiantuntijuus yhdistyy muiden toimijoiden asiantuntijuuteen ja kykyyn ja luo siten hedelmällisemmän pohjan yhteiskunnallisen vaikuttavuuden aikaansaamiseksi.

--- Yhteisen työn mahdollistamisen myötä syntyy yhteinen tilannetietoisuus, yhteiset suunnitelmat ja yhteinen työ samankaltaisten palvelujen luomiselle.”³³

Myös hyvinvointialueiden kokonaisuuteen ja yleiseen kustannuskeskusteluun pätee se, että paras ja halvin onnettomuus on torjuttu onnettomuus.

Palontutkintatiedon hyödyntäminen on monessa yhteydessä tunnistettu ja korostettu tarve.³⁴ Valtakunnallinen tiedonhyödyntämisen järjestämiseen alkaa nyt (mm. tulipalojen määrän puolittamistavoitteesta tulevan) tarpeen ohella olla myös pakko: jotta palontutkinnan tietotarpeet saadaan perusteltua, se edellyttää valtakunnallista hyödyntämistä. Muuten ei realisoidu se hyöty, jolla tietojen saamista on perusteltava – vain alueellisen turvallisuustyön tekeminen ei riitä arkaluonteisten tietojen käsittelyn perusteeksi. Valtakunnallinen tilastointitehtävä tuleekin määritellä lainsäädännössä, mahdollistaa se tarkoituksenmukaisella sääntelyllä, ja toiminnan tasolla myös riittävällä resursoinnilla.

Nykyinen Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto ei vastaa käyttäjien tarpeita palontutkinnassa. Tulevassa tietovarantoratkaisussa tulee ottaa huomioon palontutkinnan monipuolisuus ja entistä paremmin myös ihmisen toiminnan huomiointi. Tämä vaatii ratkaisuja niin tiedonhallinnan, käyttäjähallinnan kuin tietojen käsittelyn eri vaiheiden osalta.

Vaikka tutkinta järjestettäisiinkin eri alojen asiantuntijoista koostuvassa tutkijalautakunnassa, ihmisen toiminnan moniulotteisuus onnettomuuteen liittyen joka tapauksessa haastaa myös

palontutkijoiden osaamista. Kuitenkin yleisemminkin on tunnistettu palontutkinnan osaamismäärittelyjen tarve³⁵, joihin alan tutkinto- ja täydennyskoulutusta tarjoavien on vastattava. Merkittävän osaamishaasteen muodostaakin jo yksin kiristynyt tietosuojasääntely, sen edellyttämät muutokset toimintaan, sekä tulevan tietovarannon haltuunotto.

Palontutkinta osana tiedolla johtamista

Palontutkinta on pelastusviranomaisen lakisääteinen tehtävä. Tutkimalla tulipaloja ja seuraamalla onnettomuuskehitystä pelastuslaitoksilla on edellytykset suunnata onnettomuuksien ehkäisyä palveluja kuten ohjausta, neuvontaa ja turvallisuusviestintää sinne, missä pelastuslain tavoitteisiin – kuten ihmisten turvallisuuden parantamiseen ja onnettomuuksien vähentämiseen – on valtakunnallisestikin mahdollista vaikuttaa.

Tulipalojen määrän puolittaminen seuraavien viiden vuoden aikana edellyttää ennakoivan turvallisuustyön johtamista tiedolla. Hallitusohjelman tavoitteen asettamisen jälkeen tulipalojen määrä ei ole vähentynyt³⁶. Pelkkä sanan julistaminen tai hyvä tahto ei riitä. Viimeisten kahden vuoden aikana kerätty ja käytetty tieto ei ole auttanut vähentämään tulipalojen määrää. Olemassa olevia aineistoja on hyödynnettävä entistä paremmin, uutta palontutkintatietoa on kerättävä, ennakoivan turvallisuustyön toimenpiteitä on priorisoitava ja valittava niistä vaikuttavimmat. Toimenpiteiden priorisoinnissa tarvitaan aiempaa yksityiskohtaisemman palontutkintatiedon keräämistä ja hyödyntämistä, jotta onnettomuuksista opitaan³⁷. Vaikuttavien toimenpiteiden valintaan tarvitaan tiedolla johtamista.

Yhteiskunnallisen lisäarvon kannalta oleellista ei ole tulipalojen määrän vähentäminen. Tilastoituun tulipalojen määrään pystytään vaikuttamaan toimenpitein, jotka eivät vaikuta itse ilmiöön; esimerkiksi tulipalon määrittelyä muuttamalla niiden määrää voidaan vähentää. Yhteiskunnallista vaikuttavuutta saadaan, kun saadaan vähennettyä tulipalojen aiheuttamia seurauksia. Henkilö- ja omaisuusvahinkojen puolittaminen on määrän puolittamista tärkeämpää.

Epilogi

Sisäministeriö käynnisti Palontutkinnan kokeiluhankkeen vuonna 2005. Sen loppuraportin keskeisiä toimenpide-ehdotuksia olivat seuraavat:

- palokuolematiedot tulee koota yhteen ja saada mahdollisimman tarkka palokuolematilasto Suomeen
- PRONTOon ”tulee laatia erillinen kysymyssarja siitä miksi ihminen kuoli tulipalossa. Kysymyssarjalla kerätään tietoja siitä, miksi uhri ei poistunut itse ajoissa hengenvaaraliseksi muuttuneesta tilasta tai miksi häntä ei ehditty pelastaa ajoissa”
- palontutkijoille ”tulee järjestää syvällisempää koulutusta onnettomuustutkinnan teorioista ja käytännön toteutuksesta”
- tulee laatia valtakunnallinen ohjeistus ja yhtenäinen käytäntö poliisin tutkintatietojen luovuttamisesta pelastusviranomaisille.³⁸

Raportti julkaistiin 16.3.2006. Kokeiluhankkeen tuloksia kommentoineessa tiedotteessaan tuolloinen sisäasiainministeri Kari Rajamäki lausui seuraavasti:

”Yhteiskuntapolitiittinen linjaus suosii ikäihmisten asumista mahdollisimman pitkään kotonaan. Väestön ikääntyminen ja yksinasuvien vanhusten määrän kasvu edellyttävät siksi paloturvallisuutta parantavien toimien lisäämistä. Pelastusviranomaiset

- ▶ ovat paljon vartijoita eri väestöryhmien ja turvallisen sekä tarpeet tyydyttävän asuinympäristön turvaamisessa.”³⁹

Olisiko jo aika toteuttaa kaksi vuosikymmentä sitten määritellyt tavoitteet?

Kiitokset

Lähtökohtana artikkelille on ollut PSR:n rahoittama ja Pelastusopiston ja Itä-Suomen yliopiston yhteistyössä toteuttama Palontutinnan tietovarantohanke. Kiitämme Itä-Suomen yliopiston tiedonhallinnan asiantuntijoita Helinä Tiura-Virtaa ja Tomi Voutilasta pelastuslainsäädännön ongelmien esiin nostamisesta, sekä kaikkia hankkeen työpajoihin osallistuneita.

Palontutinnan tietotarpeita tulevassa pelastuslainsäädännön uudistamisessa on kartoitettu työryhmässä, johon on kuulunut pelastuslaitosten palontutkijoita sekä edustajia aluehallintovirastosta, Pelastusopistosta, Hyvistä sekä palontutkintatietoa hyödyntävistä organisaatioista. Kiitämme työryhmän jäseniä antoisasta keskustelusta ja työstä palontutinnan kehittämiseksi.

Lähteet

1. Vahva ja välittävä Suomi. Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023, 186. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165042/Paaministeri-Petteri-Orpon-hallituksen-ohjelma-20062023.pdf>, luettu 30.4.2025.
2. Valtakunnalliset strategiset tavoitteet pelastustoimen järjestämiselle vuosille 2023–2026 (2023). Sisäministeriö. 15–16 (sit. s. 15). https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164541/SM_2023_1.pdf, luettu 30.4.2025.
3. Turvallinen ja onnettomuuksista vapaa arki 2025 (2019). Sisäministeriö. 18–22. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161956/SM_2019_33.pdf, luettu 30.4.2025.
4. Turvallisesti kaiken ikää. Koti- ja vapaa-ajan tapaturmien ehkäisyn ohjelma 2021–2030 sekä selvitys kustannuksista (2020). Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja. 76–86, 202–208. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162537/STM_2020_33_j.pdf, luettu 30.4.2025.
5. Reason, J. (1997). Managing the risk of organizational accidents. Taylor & Francis.12.
6. Onnettomuustutkintakeskus (2014). Puijen pienkerrostalon palo Turussa 4.11.2014. Tutkintaselostus. https://turvallisuus-tutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2014/DIQmXVdxn/Y2014-03_Turku.pdf, luettu 9.5.2025.
7. Onnettomuustutkintakeskus (2021). Senioritalon tulipalo Jyväskylässä 10.7.2021. Saatavilla verkosta: https://turvallisuus-tutkinta.fi/material/collections/20210418105601/7Peh3jiO2/Y2020-01_Jyvaskyla.pdf, luettu 9.5.2025.
8. Onnettomuustietoinstituutti (2025). Onnettomuuksien tutkinta. Verkkosivu: <https://www.lvk.fi/onnettomuustietoinstituutti/onnettomuuksien-tutkinta/>, luettu 8.5.2025.
9. Hagen, R. & Witloks, L. & Somerkoski, B. (2019). Rakennusten paloturvallisuus. Hagenin ja Witloksin englanninkielisestä alkuteoksesta The Basis for Fire Safety – Substantiating fire protection in buildings (2014) suomenkielisen version toimittanut Brita Somerkoski. <https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/164579/Rakennusten%20paloturvallisuus%20verkkoversio.pdf>, luettu 8.5.2025.
10. Tilastokeskus. Kuolemansyyt. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ksyyt/, luettu 8.5.2025.
11. Kokki, E. (2014) Palokuolemat vähentyneet. Suomen palokuolematilasto 2007–2013. B-sarja: Tutkimusraportit. Pelastusopiston julkaisu. 13. https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2016/12/52749_B2_2014.pdf, luettu 8.5.2025.



Pelastustaitoja 8.-luokkalaisille
jo vuodesta 1996.



12. Loponen, T & Liukkonen, H. (2024). Pelastustoimen taskutilasto 2019–2023. D-sarja: Muut julkaisut. Pelastusopiston julkaisu. 31. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D3_2024.pdf, luettu 8.5.2025.
13. Liukkonen, H. (2021) Palokuolemien määrän väheneminen tasaantunut. Pelastusopiston tiedote. <https://www.pelastusopisto.fi/tutkimuksen-tiedotteet/palokuolemien-maaran-va-heneminen-tasaantunut-huomio-palovaroitimiin-ja-toimin-takykyyn/>, luettu 9.5.2025.
14. Björkgren, M., Borg, F., Kokki, E., Mäkinen, L., Männikkö, S., Oksanen, T. & Suoja, J. (2017). PaloRAI ja EVAC-mittari. B-sarja: Tutkimusraportti. Pelastusopiston julkaisu. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B3_2017.pdf, luettu 8.5.2025.
15. Etelä-Karjalan hyvinvointialue. KAT-toimintamalli. Verkkosivu: <https://asumisturvallisuustesti.fi/kat-toimintamalli/>, luettu 8.5.2025.
16. Todorovic, S. (2020). Urbanien asuinrakennuspalojen riskitekijöiden mallintaminen Helsingissä. Pro gradu työ. Helsingin yliopisto. 52–57. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/b41aca1e-f396-4e90-b8e8-7c96297bcbfe/content>, luettu 8.5.2024.
17. Ojala, T. (2021). Pelastuslain 42 §:n mukaisen ilmoitusvelvollisuuden vaikuttavuus. Palotutkimuksen päivät 2021, 38–42. Palo- ja pelastustieto ry. https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2021/11/Palotutkimuksen_paivat_2021.pdf, luettu 8.5.2025.
18. Ojala, T., Hammar, T., & Dufva, V. (2023). Ilmoitusvelvollisuus asumisen turvallisuuden varmistajana. Pelastustieto. Palotutkimuksen päivät 2023, 4–8. Palo- ja pelastustieto ry. https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2023/08/Palotutkimuksen_paivat_2023.pdf, luettu 8.5.2025.
19. Ring, M. & Hammar, T. (2022). Huoli-ilmoituksen käyttö Suomessa: Selvitys. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. Saatavilla verkosta: <https://www.julkari.fi/handle/10024/145774>, luettu 8.5.2025.
20. Mattila-Nousiainen, K. & Salmi, S. (2023). Pelastuslain 42 § mukaiset ilmoitukset käytännössä. Palo- ja pelastustieto ry. Saatavilla verkossa: https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2023/08/Palotutkimuksen_paivat_2023.pdf, luettu 8.5.2025.
21. Ojala, T. (2021). Toimintakyvyltään heikentyneiden henkilöiden asumisturvallisuus, hoivahenkilöstön työturvallisuus ja turvallisuuskoulutus lähihoitajien kokemana. SPEK. Saatavilla verkosta: https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2025/07/SPEK_puheenvuoroja_10.pdf, luettu 8.5.2025.
22. Ojala, T. (2021). Turvatekniikka ja liesipalojen ehkäisy. Teoksessa A. Puustinen (toim.) Pelastus- ja turvallisuustutkimuksen vuosikirja 2021, 8–27. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D1_2021.pdf, luettu 9.5.2025.
23. Hostikka, S., Castagnoli, E., Mikkola, R., Salonen, H., Jhatal, T., Törrö, R., Janardhan, R. K., Aatamila, M., Laitinen, J., Hassinen, M., Toivanen, P., Kiviranta, K., Kuurne, L., Ojala, T. & Lepistö, J. (2024). Liesipalojen syttyminen, vaikutukset ja ehkäisy. Aalto-yliopiston julkaisusarja Tiede + Teknologia 2/2024. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-1803-2>, luettu 9.5.2025.
24. Kuurne, L. (2023). Riskianalyysimallit onnettomuuksien ehkäisyssä. SPEK tutkii. 25. <https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2023/10/SPEK-Tutkii-29.pdf>, luettu 9.5.2025.
25. Andersson, R. & Nilsen, P. (2017). Mot en evidensbaserad nollvision kring bostadsbränder. Slutrapport. <https://www.brandforsk.se/wp-content/uploads/2020/02/systematisk-forebyggande-arbetet-mot-bostadsbrander-1.pdf>, luettu 9.5.2025.
26. Haikonen, K., Lillsunde, P., Lunetta, P., Lounamaa, A., & Vuola, J. (2013). Fire-related injuries with inpatient care in Finland: A 10-year nationwide study. Burns, 39(4), 796–802. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2012.09.021>, luettu 9.5.2025.
27. Haikonen, K., & Kokki, E. (2020). Liekkivammojen ja palokuolemien epidemiologiaa Suomessa. Teoksessa A. Puustinen (toim.), Pelastus- ja turvallisuustutkimuksen vuosikirja 2020 (s. 8–21). Pelastusopisto. https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/Pelastus-ja-turvallisuustutkimuksen-vuosikirja-2020_final.pdf, luettu 8.5.2025.
28. Onnettomuustutkintakeskus (2004). Asumiskäytössä olleen koulurakennuksen palo Jyväskylän maalaiskunnassa ja viisi muuta paloa 20.4.–20.5.2003. 62. Saatavilla verkosta: https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/d12003y_tutkintaselostus/d12003y_tutkintaselostus.pdf, luettu 12.5.2025.
29. Männikkö, S. (2006). Palontutkinnan kokeiluhanke vuonna 2005, loppuraportti. Sisäasiainministeriö, 2–3.
30. Hallituksen esitys Eduskunnalle pelastuslaiksi ja laiksi meripelastuslain 23 §:n muuttamisesta (HE 257/2010 vp). 58. https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Documents/he_257+2010.pdf, luettu 11.5.2025.
31. Tiura-Virta, H. & Voutilainen, T. (2024). Palontutkinnan tiedonhallinnan sääntely. B-sarja: Tutkimusraportit. Pelastusopiston julkaisu. 36, 55, 59. http://info.smedu.fi/kirjasto/sarja_B/B3_2024.pdf, luettu: 9.5.2025.
32. Perustuslakivaliokunnan mietintö 42/2016, s. 2–3 ja siinä viitattut lausunnot; PeVL 26/2018 vp, PeVL 14/2018 vp, PeVL 54/2014 vp ja PeVL 10/2014 vp.
33. Turvallinen ja onnettomuuksista vapaa arki 2025 (2019). Sisäministeriö. 21. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161956/SM_2019_33.pdf, luettu 30.4.2025.
34. Kivivirta, V. & Vahteristo, A. (2024). ”Monesti sitä voitellaan, että ku ei palontutkintatietoo hyödynnetä.” B-sarja: Tutkimusraportit. Pelastusopiston julkaisu. http://info.smedu.fi/kirjasto/sarja_B/B4_2024.pdf. Ks. myös: Koivisto, N. (2022). Pelastuslaitosten tuottaman palontutkintatiedon hyödyntäminen. Pelastusalan päällystötutkinnon opinnäytetyö (AMK), Pelastusopisto. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/747939/Koivisto_Niko.pdf.
35. Paloluoma, P. (2025). Pelastustoimen palontutkijan osaamisen hallinta. Turvallisuuden ja riskienhallinnan tradenomitutkinnon opinnäytetyö (AMK), Laurea-ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/884185/Paloluoma_Pasi.pdf, luettu 7.5.2025.
36. Nyman, E. (2025). Puolittuuko tulipalojen määrä vuoteen 2030 mennessä vai karkaako maali kauemmas? Pelastustieto blogi. <https://pelastustieto.fi/pelastustieto-blogi/puolittuuko-tulipalojen-maara-vuoteen-2030-mennessa-vai-karkaako-maali-kauemmas>, luettu 10.5.2025.
37. Kletz, T. (2001). Learning from accidents. Gulf Professional.
38. Männikkö, S. (2006). Palontutkinnan kokeiluhanke vuonna 2005, loppuraportti. Sisäasiainministeriö, II (kuvailulehti).
39. Sisäasiainministeri Kari Rajamäki: Palontutkinnan tehostamisella parannetaan myös kansalaisten arjen turvaa. Mediatiedote 16.3.2006.

Paloturvallisuusjärjestelmän laadunhallinta ja oleellisten teknisten vaatimusten tarvekartoitus rakennushankkeessa

Tiivistelmä

Talotekniikka ja erilaiset turvallisuusjärjestelmät ovat keskeinen osa nykyaikaista rakennettua ympäristöä. Paloturvallisuutta varmistavat järjestelmät kuuluvat tähän monimuotoiseen integraatioon sisältäen muun muassa palonilmaisimet, sammutuslaitteistot, savunpoistojärjestelmät sekä evakuointia tukevat järjestelmät. Turvallisuuden kannalta on tärkeää, että laitteistojen luotettavuus ja yhteistoiminta hallitaan niiden käyttöönottohetkellä sekä läpi rakennuksen koko elinkaaren. Järjestelmien luotettavuus vaikuttaa rakennusten suunnitteluun ja toteutukseen sekä kiinteistön ylläpidon aikaisiin vaatimuksiin ja tehtäviin. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK ja Tampereen yliopisto ovat selvittäneet usean tutkimustyöhaankkeen sarjassa paloturvallisuusjärjestelmien suunnitteluprosesseihin, hankintaan, toteutukseen, yhteensovittamiseen, dokumentointiin sekä ylläpitoon liittyviä kehitystarpeita. Tutkimuksissa on todettu, että järjestelmien oleellisten teknisten vaatimusten määrittely ja laadullisten kriteereiden toteutumisen varmistaminen jäävät rakennushankkeissa usein ilman riittävää huomiota ja valvontaa. Käynnissä olevassa tutkimushankkeessa yhdistetään aikaisempi tutkimustieto sekä alan eri työryhmissä tuotettu uusin ohjeistus, tavoitteena kehittää laitteistokokonaisuuksien toteutusta tukeva tarvekartoitusmalli helpottamaan ja selkeyttämään laitteistojen kohde- ja tapauskohtaisten oleellisten teknisten ja laadullisten vaatimusten määrittelyä ja arviointia. Tässä artikkelissa esitellään tutkimuskokonaisuus, sen tavoitteet sekä tarvekartoitusmallin visio.

Johdanto

Palontorjuntatekniikka vaikuttaa rakennusten paloturvallisuuteen monella tavalla. Se tukee poistumista palotilanteessa, parantaa henkilöturvallisuutta, rajoittaa palon kehittymistä, edesauttaa rakenteellisen palonkestävyyden toteutumista sekä tehostaa sammutus- ja pelastustoimintaa. Rakennusten paloturvallisuus perustuu yhä useammin monien järjestelmien muodostamaan koko-

naisuuteen, jossa useat tekniset laitteistot ja järjestelmät toimivat yhdessä muun talotekniikan kanssa. Paloturvallisuutta varmistavat järjestelmät, kuten paloilmoinjärjestelmä, sammutuslaitteistot, savunhallintajärjestelmät ja poistumista tukevat hälytys- ja opastusjärjestelmät eivät ole enää irrallisia ratkaisuja, vaan osa laajempaa integroitua järjestelmäkokonaisuutta, johon kuuluu paloturvallisuusjärjestelmien ohella muun talotekniikan ja rakennusautomaation sekä tietoliikenneverkon järjestelmiä ja mahdollisia näitä tukevia älykkäitä järjestelmiä.

Integroitu järjestelmä on moniulotteinen kokonaisuus, jonka suunnittelu, toteutus ja ylläpito edellyttävät laajaa osaamista, suunnittelualojen välistä koordinoitua ja toimivia laadunhallinnan käytäntöjä. Rakennushankkeeseen ryhtyvän vastuu ulottuu myös siihen, että paloturvallisuusjärjestelmien suunnittelu, hankinta ja valvonta toteutetaan rakennuksen vaativuuden ja säädösten edellyttämällä tavalla. Erityissuunnittelu on usein pirstaloitunutta ja paloturvallisuusjärjestelmien toteutus jää irralliseksi osaksi ilman selkeää koordinoitua, jolloin kokonaisuuden hallinta heikkenee ja laadulliset vaatimukset sekä laadulliset kriteerit toteutuvat puutteellisesti. Järjestelmäkokonaisuus on toteutettava hyvää teknistä käytäntöä noudattaen, mikä edellyttää sääntelyn ja kansallisesti vakiintuneiden ohjeiden tuntemusta sekä niiden soveltamista hankkeen erityispiirteisiin. Suunnitteluohjeet, kuten Talotekniikka RYL -osat ja niiden päivityksen korostavat suunnittelu- ja toteutusvaiheen laatuvaatimuksia. RYL:n paloturvallisuusjärjestelmäosiossa on tuotu esiin erityisesti tarve varmistaa järjestelmien yhteensovittaminen, suunnittelun tavoitteellisuus ja dokumentoinnin laatu. Samoja havaintoja on noussut SPEKin ja Tampereen Yliopiston toteuttamissa tutkimushankkeiden sarjassa [1–8]. Tutkimussarjan aikana on havaittu, että laadunhallintaa haastavat erityisesti järjestelmäkokonaisuuden yhteensovittaminen, vastuiden hajanaisuus, suunnittelualojen yhteistyön puutteet sekä tiedon pirstaleisuus eri osapuolten välillä. Lisäksi teknologian nopea kehitys, säädösmailman muutokset ja rakennusten

käyttötapojen muutospaineet korostavat tarvetta kehittää yhtenäisiä toimintamalleja, joilla paloturvallisuusjärjestelmien laatu voidaan varmistaa koko rakennushankkeen ajan.

Järjestelmäkokonaisuuden on täytettävä omat tekniset ja toiminnalliset vaatimuksensa, mutta myös kyettävä toimimaan yhteen tehokkaasti ja luotettavasti koko rakennuksen elinkaaren ajan. Paloturvallisuusjärjestelmien laadunhallinta muodostuu useista kriittisistä osa-alueista, jotka ulottuvat varhaisen vaiheen suunnitteluperusteiden määrittelystä laitteistojen yhteensopivuuden arviointiin, hankintapäätöksiin, asennuksen ja käyttöönnoton laadunvarmistukseen sekä järjestelmien ylläpitoon ja elinkaari-seurantaan. SPEKin ja Tampereen yliopiston tutkimussarjan aikana on havaittu, että paloturvallisuuslaitteistojen toteutus pirstaloituu helposti eri osiksi LVI-, sähkö- ja automaatio-suunnittelun mukana. Tämä johtaa usein siihen, että järjestelmien välinen yhteensovittaminen ja kriittisten teknisten sekä laadullisten vaatimusten määrittely jää puutteelliseksi. Nykykäytänteillä suunnitelmat ja hankintamateriaaleissa esitetyt tekniset kuvaukset eivät ole riittävällä tasolla, minkä vuoksi asennusteknisiä kriteereitä joudutaan usein täsmentämään myöhemmissä vaiheissa - joskus vasta urakoinnin aikana. Tämä kasvattaa osaltaan kustannuksia ja kirstittää entuudestaan tiukkoja aikatauluja. Toisinaan suunnitelmat tehdään valmiiksi ylimitoitetuiksi varmuuden vuoksi ja virheiden välttämiseksi, kun vaatimuksia ja kriteerejä ei ole tunnistettu ja määriteltä kattavasti hankkeen alkuvaiheessa. Molemmissa tapauksissa kustannuksen lisääntyvät ja toteutus voi heikentää paloturvallisuusjärjestelmän kokonaisvaltaista toimivuutta.

Rakennushankkeiden suunnitteluprosesseissa onkin tunnistettu kehitystarve erityisesti osaamisen, tiedonjaon ja yhteistyön osalta. Tarvitaan selkeitä toimintamalleja, joiden avulla voidaan varmistua, että suunnittelualojen välinen tiedonkulku toimii ja että kaikilla osapuolilla on riittävä ymmärrys järjestelmäkokonaisuuden vaatimuksista. Aikaisemmat tutkimukset korostavat, että suunnitteluperusteet jäävät usein laadullisesti heikolle tasolle jo hankkeen alkuvaiheessa, mikä heijastuu puutteellisina tarveselvityksinä ja epäohjonmukaisena toteutuksena. Samaan aikaan rakentamisen toimintaympäristö kehittyä ja digitaalisten suunnittelumallien käyttö yleistyy, mikä johtaa myös uusiin vaatimuksiin myös paloturvallisuustiedon näkökulmasta. SPEKin ja Tampereen yliopiston käynnissä olevassa Palosuojaohjelmahaston rahoittamassa tutkimushankkeessa ”Paloturvallisuusjärjestelmän laadunhallinta ja oleellisten teknisten vaatimusten tarvekartoitus rakennushankkeissa” on tavoitteena laatia yleiset perusteet tarvekartoitusmallille, joka vastaisi näihin todettuihin haasteisiin ja ohjaisi palontorjuntatekniikan laitteistoja koskevien oleellisten teknisten vaatimusten ja laadullisten kriteerien määrittelyä jo hankkeen aikaisessa vaiheessa, hankintojen ja toteutuksen aikana sekä rakennuksen käytön aikana. Tarvekartoitusmallin vaatimusmäärittelyjen kehittämisessä otetaan huomioon aiempien tutkimushankkeiden havainnot, järjestelmähankkeiden nykykäytänteet sekä olemassa oleva oh-

jeistus. Näitä tietoja täydennetään järjestelmähankkeen eri sidosryhmille kohdistetulla haastattelututkimuksella sekä tarjouspyyntöaineistojen analyysillä. Haastatteluilla pyritään tarkentamaan eri sidosryhmien laadunhallintaan ja tarvekartoitusmalliin liittyviä tarpeita ja näkemyksiä. Hankinta-aineiston analyysi täydentää aikaisemman tutkimussarjan havaintoja suunnitteluperusteiden laadun puutteista ja auttaa tunnistamaan tarvekartoitusmallilla ohjattavia oleellisia vaatimuksia. Käynnissä oleva tutkimushanke päättyy vuoden 2025 lopussa ja tässä artikkelissa esitetään tutkimuksen tähänastisia havaintoja ja tuloksia.

Paloturvallisuusjärjestelmien tekniset ja laadulliset vaatimukset

Paloturvallisuusjärjestelmien tekniset ja laadulliset vaatimukset perustuvat lainsäädännön ohella useiden standardien ja ohjeistojen yhdistelmään sekä kohdekohtaisiin tarpeisiin. Teknisiä vaatimuksia ohjaavat viranomaismääräykset, kansalliset ja eurooppalaiset standardit, valmistaja- ja tuotekohtaiset ohjeet sekä talotekniikan yleiset laatuvaatimukset. Näiden lisäksi rakenteelliset ratkaisut, käyttötarkoitus ja rakennuksen riskiluokitus vaikuttavat järjestelmiltä edellytettävään suojaustasoon. Laadulliset vaatimukset liittyvät erityisesti järjestelmien toimintavarmuuteen, huollettavuuteen, yhteensopivuuteen ja elinkaaren aikaiseen valvontaan.

Paloturvallisuusjärjestelmät toimivat harvoin itsenäisinä osina, vaan ne muodostavat toisiinsa kytkeytyvän järjestelmäkokonaisuuden liittyen muuhun talotekniikkaan. Yhteistoiminnan varmistamiseksi keskeisessä roolissa on järjestelmien ohjauksen ja rajapintojen määrittelyt suunnitteluperusteissa riittävällä tarkkuudella. Käytännössä kuitenkin usein erityissuunnittelualat toimivat toisistaan erillään, eikä yhteensopivuuden edellytyksiä käsitellä riittävän kattavasti yhteisissä suunnitteluperusteissa tai urakka-asiakirjoissa.

SPEKin ja Tampereen yliopiston tutkimussarjan [1–8] havaintojen perusteella rakennushankkeissa esiintyy toistuvasti tilanteita, joissa teknisiä vaatimuksia joudutaan täsmentämään hyvin myöhemmissä vaiheissa, mahdollisesti vasta toteutusvaiheessa. Suunnitteluperusteet jäävät usein yleiselle tasolle, eivätkä mahdollista laitteistojen vertailukelpoista arviointia tarjousvaiheessa. Lisäksi vaatimusten epäselvyys voi johtaa sekä ylitettä alimitoitettuihin järjestelmäratkaisuihin heikentäen toteutuksen kustannustehokkuutta ja toiminnallista laatua. Laatuvaatimukset, kuten järjestelmän huollettavuuteen, testattavuuteen tai käyttöön liittyvät seikat jäävät usein pimentoon tai ne kirjataan yleisluontoisesti.

Modernit paloturvallisuusratkaisut, kuten IoT-tekniikkaan pohjautuvat järjestelmäseurannat tai käyttöliittymät avaavat uusia mahdollisuuksia laitteistojen elinkaaren aikaiseen laadunvarmistukseen. Näiden hyödyntäminen edellyttää kuitenkin entistä tarkempaa teknistä määrittelyä jo hankesuunnitteluvaiheessa [1, 4]. Tällä hetkellä tietomallien hyödyntäminen paloturvallisuusjärjestelmien suunnittelussa on Suomessa vielä hajanaista, eikä niiden avulla saatavaa tietoa hyödynnetä systemaattisesti vaatimusten hallinnassa tai elinkaaren aikaisessa seurannassa [6].

Tarve järjestelmien teknisten ja laadullisten vaatimusten yhdenmukaiselle määrittelylle ja dokumentoinnille on tutkimussarjan havaintojen pohjalta ilmeinen, mikä korostaa tarvekartoitusmallin merkitystä hankkeen alkuvaiheessa käytettävänä työkaluna koota ja konkretisoida järjestelmäkohtaiset vaatimukset sekä mahdollistaa järjestelmien yhteensopivuuden ja elinkaarikestävyyden hallinta. Kun tekniset vaatimukset kirjataan selkeästi ja ajantasaisesti, voidaan hankkeessa välttää päällekkäisyyksiä, ristiriitoja ja epäselvyyksiä, jotka heikentävät järjestelmien toimivuutta ja turvallisuustavoitteiden saavuttamista.

"Tarvitaan selkeitä toimintamalleja, joiden avulla voidaan varmistua, että suunnittelualojen välinen tiedonkulku toimii ja että kaikilla osapuolilla on riittävä ymmärrys järjestelmäkokonaisuuden vaatimuksista."

► Paloturvallisuusjärjestelmien laadunhallinnan kehitystarpeet

SPEKin ja Tampereen yliopiston tutkimussarjan [1–8] havaintojen perusteella voidaan todeta, että paloturvallisuusjärjestelmien laadunhallinta ei nykykäytännöllä vastaa riittävästi nykyaikaisen rakentamisen vaatimuksiin. Rakennushankkeissa teknisten järjestelmien suunnittelu ja toteutus on entistä monimutkaisempaa, mutta järjestelmien välinen yhteensovittaminen, vaatimustenmukaisuuden hallinta ja laadunvarmistus eivät ole kehittyneet samassa tahdissa. Keskeisenä haasteena on, etteivät paloturvallisuuteen liittyvät vaatimukset nouse esiin riittävän aikaisessa vaiheessa eikä niitä määritellä riittävällä tarkkuudella. Useat erityissuunnittelualat toimivat rinnakkain, mutta niiden välinen koordinaatio jää usein puutteelliseksi. Erityisesti hankkeen alkuvaiheen suunnitteluperusteissa on havaittu laadullisia puutteita, jotka heijastuvat koko toteutusprosessiin.

Laadunhallintaa vaikeuttavat vastuunjaon epäselvyydet, osamisen puutteet ja tiedonkulku: järjestelmien toteutukseen osallistuu laaja osapuolten kokonaisuus, joille ei ole yhteistä viitekehystä järjestelmäkokonaisuuden hallintaan. Ilman selkeää koordinaatiota teknisten ratkaisut suunnitellaan siiloissa, jolloin yhteistoiminnan varmistamisen voi jäädä viime hetkeen. Hyvät käytännöt jalkautuvat vaihtelevasti, ja järjestelmiin liittyvä asiantuntijatieto ei välttämättä saavuta hankkeiden ohjauksen päätöksentekoa. Samaan aikaan loppukäyttäjien tarpeet ja rooli jäävät usein huomioimatta hankkeen alussa.

Erityisen haasteellisia laadunhallinnan näkökulmasta ovat rakennushankkeiden kiireiset toteutusaikataulut, jotka pakottavat ratkaisuihin ennen vaatimustenmukaisuuden toteamista. Tarkastuksia saatetaan joutua tekemään keskeneräisissä kohteissa, dokumentaatio voi olla vajavaista ja osa järjestelmien yhteistoiminnasta voi perustua oletuksiin. Näissä tilanteissa laadunvarmistus muuttuu ennaltaehkäisevästä toiminnasta reaktiiviseksi tulipalojen sammuttamiseksi.

Myös teknologinen kehitys haastaa nykykäytänteitä. Älyrakentaminen, IoT-pohjaiset ratkaisut ja tietomallien hyödyntäminen avaavat uusia mahdollisuuksia myös paloturvallisuuden hallintaan sekä järjestelmien toteutukseen ja käyttöön. Erityisesti tietomallinnuksen on nähty tarjoavan potentiaalia paloturvallisuustiedon kokoamiseen ja ylläpitoon koko rakennuksen elinkaaren ajan. Käytännössä paloturvallisuustiedon jalkauttaminen tietomalleihin edellyttää sen hyödyntämistarpeiden määrittelyä suunnittelun alkuvaiheessa. Tällä hetkellä tietomalleja hyödynnetään pääosin rakentamisen aikaisena suunnittelutyökaluna, eikä potentiaalia elinkaaren aikaisena laadunhallinnan välineenä ole laajasti otettu käyttöön. Monissa tapauksissa paloturvallisuustieto jää erillisiin asiakirjoihin tai unohtuu päivityksen puutteessa, jolloin ylläpidon ja viranomaisvalvonnan edellyttämä ajantasaisuus kärsii.

"Erityisen haasteellisia laadunhallinnan näkökulmasta ovat rakennushankkeiden kiireiset toteutusaikataulut, jotka pakottavat ratkaisuihin ennen vaatimustenmukaisuuden toteamista."

Jotta paloturvallisuusjärjestelmät voisivat vastata rakentamisen teknisiin, taloudellisiin ja toiminnallisiin vaatimuksiin, tarvitaan selkeitä välineitä ja prosesseja laadunhallinnan tueksi. Tarvitaan keinoja, joilla vaatimukset tunnistetaan ajoissa, dokumentoidaan yhdenmukaisesti ja tuodaan osaksi hankkeen ohjausta – ei erillisinä liitteinä vaan kokonaisvaltaisina laatu- ja turvallisuustavoitteina. Tämän tarpeen tunnistaminen on keskeinen perusta tarvekartoitusmallin kehittämiseksi. Mallin avulla voidaan konkretisoida järjestelmäkohtaiset vaatimukset, selkeyttää osapuolten vastuuta ja luoda rakenne, jolla paloturvallisuustavoitteet jalkautetaan suunnittelusta toteutukseen ja ylläpitoon.

Tarvekartoitusmalli

Talotekniikan ja siihen integroitavan paloturvallisuusjärjestelmän toteuttaminen vaatii tietoon perustuvaa ohjausta. Tarvekartoitusmallilla pyritään luomaan systemaattinen lähestymistapa paloturvallisuusjärjestelmien teknisten ja laadullisten vaatimusten määrittelyyn ja hallintaan koko rakennushankkeen ajan. Malli toimii ohjaavana työkaluna tai lomakkeena, jonka avulla voidaan tapausha ja kohdekohtaisesti tunnistaa ja kuvata järjestelmään kohdistuvat tarpeet, laitteistokokonaisuuden kriittiset vaatimukset sekä järjestelmien yhteensovittamiseen liittyvät näkökulmat. Tarvekartoitusmallin keskeisenä tavoitteena on varmistaa, että suunnittelussa ja toteutuksessa otetaan huomioon kaikkien järjestelmien tekniset erityispiirteet, toiminnalliset tavoitteet sekä järjestelmien integraatio paloturvallisuusjärjestelmäkokonaisuuden ja muun talotekniikan osalta. Näin varmistetaan, että eri laitteistot toimivat yhteen suunnitellulla tavalla ja että laitteistokokonaisuus tukee rakennuksen käyttötarkoitusta koko sen elinkaaren ajan. Mallin avulla voidaan eri hankevaiheissa koota oleelliset tiedot eri järjestelmistä ja täydentää toiminnallista kuvausta. Tämä tukee erityisesti hankintavaihetta, jolloin voidaan tarkemmin esittää järjestelmäkohtaiset tekniset ja laadulliset vaatimukset. Näin tilaajalla on paremmat edellytykset valvoa tarjottujen ratkaisujen vaatimustenmukaisuutta ja varmistaa, että ne vastaavat sekä suunnitteluasiakirjoihin kirjattuja tavoitteita että loppukäyttäjän tarpeita.

Tarvekartoitusmallin kehittäminen pohjautuu SPEKin ja Tampereen yliopiston tutkimussarjan aikana esiin nousseisiin havaintoihin ja oppeihin, joiden mukaan paloturvallisuusjärjestelmien laadunhallinta kärsii tiedon hajanaisuudesta, vastuiden epäselvyydestä sekä vaatimusten puutteellisesta määrittelystä ja dokumentoinnista. Erityisesti on painotettu suunnittelualojen välisen yhteistyön vahvistamisen tarvetta ja laadunvarmistuksen yhtenäistämistä jo hankkeen alkuvaiheessa. Malli on tarkoitettu suunnitella joustavaksi, jolloin sitä voidaan soveltaa erilaisten rakennuskohdeiden ja hankemallien tarpeisiin. Systemaattinen ja vaihteellinen käyttö edistää sekä suunnitteluprosessin läpinäkyvyyttä että päätöksenteon laatua. Kun kriittiset tekniset vaatimukset, laadutavoitteet ja yhteensovittamisen tarpeet dokumentoidaan keskitetysti, vähennetään riskiä, että ratkaisut perustuvat oletuksiin tai puutteelliseen tietoon. Pitkällä aikavälillä tarvekartoitusmalli voi tukea myös alan kykyä sopeutua teknologian ja sääntelyn muutoksiin tarjoamalla jatkuvasti päivittyvän viitekehyksen vaatimusten ja laadun hallintaan.

Tarvekartoitusmallin avulla voidaan valvoa suunnitteluperusteiden täyttymistä riippumatta yksittäisten järjestelmien teknisestä spesifikaatiosta. Näin vältetään liian yksityiskohtaisten vaatimusten asettaminen liian varhaisessa vaiheessa, mikä voisi muutoin rajoittaa hankintaa, lisätä sokeita pisteitä tai tuoda mukanaan teknisiä haavoittuvuuksia. Mallin tarkoituksena ei ole korvata muita hankemateriaaleja tai laitteistokohtaisia suunnitteluperusteita. Sen sijaan se toimii tukevana työkaluna, johon voidaan liittää



CFPA EUROPE®

Fire Safety | Security | Natural Hazards

Tunnetko jo CFPA European oppaat ja koulutukset?

Paloturvallisuutta käsitteleviä oppaita on yli 40.

Tutustu ja tilaa CFPA European uutiskirje:

cfpa-e.eu

tarkentavat tiedot tai sellaiset asiat, jotka määritellään tarkemmin hankkeen edetessä. Näin malli täydentää olemassa olevaa dokumentaatiota ja tarjoaa yhdenmukaisen alustan tiedon kokoamiselle ja arvioinnille.

Tarvekartoitusmalli toimii apuna kattavan tarveselvityksen laadinnassa, jotta kohteen kriittiset paloturvallisuusjärjestelmät ja niihin liittyvät tietotarpeet. Tämän avulla voidaan arvioida, mitä asioita suunnittelussa, hankinnassa ja toteutuksessa tulee huomioida, ja varmistaa, että kaikki oleelliset tekniset ja laadulliset näkökohdat tulevat huomioiduksi. Malli toimii siten työkaluna paitsi suunnittelu- ja hankintavaiheessa, myös toteutuksen ja käyttöönoton aikana sekä ylläpidon ohjauksessa. Tarvekartoitusmallilla voidaan lisätä rakennushankkeiden suunnittelun ja toteutuksen tehokkuutta sekä parantaa päätöksenteon laatua. Hyvin laaditun tarvekartoituksen avulla laitteistot vastaavat paremmin haluttua lopputulosta, ja käyttöönoton jälkeisiltä muutostöiltä ja virheiden korjaamiselta voidaan suurelta osin välttyä. Tämä tuo mukanaan sekä kustannussäästöjä että laadun parantumista. Mallin hyödyntäminen voi pienentää paloturvallisuusjärjestelmien selvitystyön määrää ja kohdistaa resurssit oikeisiin asioihin suunnittelu- ja toteutusprosessin aikana. Se tukee myös elinkaariajatteluun perustuvia nykyaikaisia hankintamalleja, joissa korostuvat pitkäaikainen toimivuus ja yhteensopivuus. Tarvekartoitusmallin katsotaan tukevan myös alan ohjeistuksia, kuten RYL-paloturvallisuusjärjestelmä -osiota ja nykyisin käytössä olevaa paloilmioittimen elinkaarikirjaa, vahvistaen niiden tavoitteita yhteensovitun ja laadukkaan järjestelmäkokonaisuuden aikaansaamiseksi.

SPEKin ja Tampereen yliopiston käynnissä olevan tutkimuksen tavoitteena on esittää rakennusten paloturvallisuusjärjestelmää koskevan tarvekartoitusmallin muoto sekä tunnistaa mallin keskeinen sisältö. Hanke päättyy vuoden 2025 lopussa ja sen tulokset tullaan julkaisemaan alkuvuodesta 2026.

Kiitokset

Tutkimus on toteutettu Suomen Pelastusalan Keskusjärjestön (SPEK) ja Tampereen yliopiston tutkimushankkeessa ”Paloturvallisuusjärjestelmän laadunhallinta ja oleellisten teknisten vaatimusten tarvekartoitus rakennushankkeissa”, jonka on rahoittanut Palosuojelurahasto. Tutkimushanketta ohjasi Palontorjuntatekniikan kehitysryhmän asiantuntijaverkosto, mitä kautta hankkeella on ollut merkittävänä tukena alan kokemus sekä hankintaa sel-

ventävä tutkimusaineisto. Tutkimushankkeeseen on osallistunut lisäksi suuri joukko viranomaisia ja asiantuntijoita erilaisten haastatteluiden ja tilaisuuksien kautta. Esitämme suuret kiitokset heille kaikille.

Lähteet

1. Pyllkkänen, T. (2018). IoT (Internet-of-Things) -teknologian hyödyntäminen rakennuksien paloturvallisuuden kehityksessä ja integroidussa älykkäässä ympäristössä. Diplomityö. LUT-yliopisto. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/156628>
2. Pyllkkänen, T. (2018). IoT (Internet-of-Things) – teknologian hyödyntäminen rakennuksien paloturvallisuuden kehityksessä ja integroidussa älykkäässä ympäristössä. SPEK Puheenvuoroja 4. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. ISBN 978-951-797-652-7. <https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2025/07/SPEK-puheenvuoroja-IoT.pdf>
3. Malaska, M., Aaltonen, A., Lehto, L. (2019). Paloturvallisuuden huomiointi ja asenteet nykyaikaisessa älyrakentamisessa. SPEK Puheenvuoroja 6. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. ISBN 978-951-797-666-4. <https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2025/07/SPEK-puheenvuoroja-6.pdf>
4. Mäkelä, J. (2020) Integroituva paloturvallisuus rakennuksissa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/122435>
5. Mäkelä, J., Malaska, M., Lehto, L. (2020). Uusien teknologioiden sovellus- ja käyttömahdollisuudet paloturvallisuudessa. SPEK Puheenvuoroja 8. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. ISBN 978-951-688-6. <https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2025/07/SPEK-puheenvuoroja-8.pdf>
6. Tuokko, K., Malaska, M., Lehto, L. (2021). Rakennusten paloturvallisuuden varmistaminen ja hallinta tietomallien avulla. SPEK Puheenvuoroja 11. Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. ISBN 978-951-797-710-4. https://www.spek.fi/wp-content/uploads/2021/12/SPEK_puheenvuoroja_11.pdf
7. Tuokko, K. (2022). Rakennusten paloturvallisuuden varmistaminen ja hallinta tietomallien avulla. Diplomityö. Tampereen yliopisto. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/136586>
8. Harjamäki, T. (2024). Palontorjuntatekniikan luotettavuus ja laadunhallinta. Diplomityö. Tampereen yliopisto. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/154971>

Rivitalojen yläpohjien palo-osastointien toimivuus

Tiivistelmä

Palopäälystöliitto toteutti tiiviissä yhteistyössä pelastuslaitosten kanssa *Rivitalojen yläpohjien palo-osastointien toimivuuden selvityshankeen*. Hanke oli koko Suomen kattava ja kaikki pelastuslaitokset osallistuivat hankkeen toteutukseen. Pelastuslaitosten palontutkinnan ja muiden havaintojen perusteella on herännyt huoli yläpohjien palo-osastointien toimivuudesta.

Palo-osastoinnin periaate asuntojen sekä asuntojen ullakoiden välillä on rakentamismääräyksissä ollut sama vuodesta 1990¹. P3-paloluokassa ullakot osastoidaan alapuolisten tilojen mukaan². Tämän perusteella aineiston rakennuksissa on oletuksena samalla periaatteella oleva palo-osastointi.

Nykytilan selvittämiseksi aineistoon valikoitiin uudehkoja rivitaloyhtiöitä. Valinnassa käytettiin satunnaisotantaan, joskin kaikilla paikkakunnilla tämä ei ollut mahdollista. Aineistoon saatiin 79 taloyhtiötä, joiden rakennusvuosi ajoittui välille 2010–2023. Näihin tehtiin tarkastuskäynti paikan päällä.

Keskeisimmät haasteet havaintojen perusteella liittyvät rakenneliitosten toteutukseen. Ruoteellisen vesikaton ja seinän liitos havaittiin useassa kohteessa epätiiviiksi.

Tilastotarkastelu rivitalojen tulipaloihin

PRONTOn kirjausten perusteella vuosina 2020–2024 rivitaloissa tapahtui 368 rakennuspaloa³. Näissä noin 11 prosentissa (n=39) pelastustoiminnan johtaja on arvioinut, ettei palo-osastointi pitänyt vaadittua aikaa. Noin 71 prosentissa (n=263) arvioitiin, että palo-osastointi on pitänyt vaaditun ajan. Tämä sisältää myös tulipalot, joissa alkusammutuksen vaikutus on ollut positiivinen eli *sammutti palon tai rajoitti paloa*. Alkusammutuksen positiivinen vaikutus esiintyy noin 30 prosentissa näitä rakennuspaloja (taulukko 1). Tällöin luonnollisesti palo-osastointia ei ole koeteltu täydellä huoneistopalon palorasituksella. Tarkasteluvälin kaikkien rakennuspalo- ja tulipalotapausten suhteen tämä osuus on noin 21 prosenttia.

Palo-osastoinnin toimivuus vs. alkusammutus		
Palo-osastointi piti vaaditun ajan (kyllä):		N= 263
Yritettiinkö alkusammutusta?	n=	%
Kyllä	96	37 %
<i>Kyllä (sammutti palon)</i>	37	14 %
<i>Kyllä (rajoitti paloa)</i>	40	15 %
<i>Kyllä (ei vaikutusta)</i>	19	7 %
Ei	142	54 %
Ei tietoa	25	10 %

Taulukko 1: Alkusammutuksen vaikutus rakennuspalo- ja tulipalotapaustissa, joissa palo-osastointi on pitänyt vaaditun ajan.

Rivitaloissa tapahtuneissa rakennuspaloissa syttymispaikalla on havaittavissa merkitys tarkasteltaessa palo-osastoinnin toimivuutta. Vuosina 2020–2024 rakennuksen ulkopuolella syttyi 69 tulipaloa, joissa 20 prosentissa on arvioitu, että palo-osastointi ei ole pitänyt vaadittua aikaa. Vastaavasti rakennuksen sisäpuolelta syttyneissä tulipaloissa (n=292) on arvioitu, että palo-osastointi ei ole pitänyt vaadittua aikaa noin 8 prosentissa. Suhteellisessa osuudessa esiintyy noin 12 prosenttiyksikön ero. Taulukossa 2 on esitetty viisi yleisintä syttymissyitä syttymispaikkaan jaoteltuna.

Pelastuslaitoksille tehtiin tietopyyntö vuosien 2020–2024 rivitalopaloista, joissa palo-osastointi ei ollut pitänyt vaadittua aikaa (n=39) tai tieto ei ollut kirjattu (n=46). Jälkimmäiseen liittyy lähtökohtainen epäloogisuus eli selosteen täyttäjän on kirjannut, että rivitalossa ei olisi ollut palo-osastointia. Tämä ei pitäisi olla käytännössä mahdollista läheskään kaikissa tapauksissa, koska vuonna 1976 rakentamismääräyksissä asunnot on määritelty omiksi

Pelastusopisto				Määrät ja prosenttiosuudet			
Laakso Juhan-Petteri/6.3.2025							
Rakennuksen sisäpuoli		n	%	Rakennuksen ulkopuoli		n	%
Sähkölaitteen tai -asennuksen vika, häiriö tai huollon laiminlyönti		56	19 %	Tahallaan sytytetty palo		14	20 %
Tahallaan sytytetty palo		38	13 %	Savuke tai muu tupakka-aine		12	17 %
Ei voida arvioida		35	12 %	Kynttilä, tuike, soihtu, roihu		8	12 %
Koneen tai laitteen väärä käyttö		26	9 %	Sähkölaitteen tai -asennuksen vika, häiriö tai huollon laiminlyönti		7	10 %
Savuke tai muu tupakka-aine		24	8 %	Ei voida arvioida		5	7 %
Käytetyt poimintaehdot							
Vuosi = 2024, 2023, 2022, 2021, 2020							
Onnettomuustyyppi (myös toissijaiset) = Rakennuspalo							
Rakennustyyppi 2018 luokitus = Rivitalot							
Pelastustoimen alue =							
Osallistunut pelastuslaitos =							
Onnettomuustyyppi (ensisijainen) = Rakennuspalo							
Onnettomuus-/tehtäväselosteet = Onnettomuusselosteet							
Onnettomuusselosteen liitteet (yt-selosteet) = Ei							

Taulukko 2: Arvio syttymissyystä verrattuna syttymiskohtaan 2020–2024, viisi yleisintä arvioitua syytä.

palo-osastoiksi⁴. Kaikkien pelastuslaitosten alueella oli vähintään yksi tehtävä, josta tietopyyntö tehtiin.

Tietopyynnöllä saatiin selosteiden vapaatekstikentät analysoidaksiksi pois lukien salattavat tiedot. Näistä selosteista etsittiin pääasiassa havaintoja palon leviämiskeinoista ullakkoille ja yläpohjaan. Yleisiä esiintyneitä leviämiskeinoja on ulkoa syttyneissä paloissa leviäminen ulkorakenteita pitkin kahden tai useamman asunnon ullakolle. Vastaavasti sisäpuolella syttyneissä paloissa avoin ovi, ikkunan rikkoutuminen ja yksittäisessä tapauksessa läpivienti. Kirjoitushetkellä tietojen analysointi on vielä kesken.

Tietojen luovutuksen teknisenä havaintona nousi esiin, että pelastuslaitoksilla on hyvin vaihtelevat luovutuskäytännöt. Osa lähettää selosteet tavallisena sähköpostina, osa salattuna sähköpostina, osa haluaa henkilövarmennuksen ennen tietojen luovutusta, jotta varmistetaan, kenelle tietoja luovutetaan.

Havaintoja kohdekäynneiltä

Kohdekäyntien aineisto koostuu vuosina 2010–2023 rakennetuista taloyhtiöistä. Aineistossa 76 prosenttia on rivitaloyhtiöitä (n=60). Muita yhtiömuotoja aineistossa, joista kerättiin havaintoja, on rivitalo-paritalo (n=12), rivitalo-luhtitalo (n=3), luhtitalo (n=2), rivitalo-erillistalo (n=1) ja rivitalo-hoivakiinteistö (n=1). Ennen fyysistä kohdekäyntiä perehdyttiin rakennuksen/rakennusten suunnitelmiin, jotka olivat palotarkastajan kautta saatavissa. Pääosin palotarkastajat, joko itse latasivat suunnitelmat rakennusvalvonnan järjestelmästä tai pyysivät suunnitelmia rakennusvalvonnan arkistosta. Yksittäisissä kohteissa suunnitelmia saatiin lisäksi isännöitsijän kautta. Kaikista kohteista ei ollut löydettävissä rakennesuunnitelmia, jolloin suunnitelman ja toteutuksen vertaamista ei pystytty analysoimaan.

Kohdekäynneillä huomio kiinnitettiin VTT:n ontelopalojen tutkimussarjan⁵ mukaisiin ullakkopalojen kriittisiin leviämiskohtiin. Toisena tarkastelun näkökulman oli vastaako suunnittelu ja toteutus Pientalon palokortin⁶ mukaisia periaatteita. Pientalon palokortista on julkaistu useita päivityksiä vuosien varrella. Ensimmäinen vuonna 2018. Pientalon palokortissa on esimerkkiratkaisuja muun muassa vesikaton ja osastoivan seinän joustavasta liitoksesta sekä ulkoseinälle tehtävän palo-osastoinnin levytyksen toteutuksesta. Tätä ennen yksittäisillä rakennusvalvonnoilla on ollut vastaavan tyyppinen ohjekortti pientalojen paloturvallisuusratkaisuihin.

Perustietoja aineiston rakenteista

Kohdekäynneillä rakennuksista ja suunnitelmista kerättiin tiedot sekä palo-osastovien seinien materiaaleista ja toteutuksista että yläpohjan muista materiaaleista ja toteutuksista rakennustyyppi-kohtaisesti. Noin 40 prosenttia ullakon palo-osastovista seinistä pystyttiin päättämään elementtinä toteutetuksi. Katemateriaalina lukkosaumapelti oli yleisin sekä yleisin kattokulma oli 1:3 (taulukko 3).

Lämpöeristeellä voi olla paloa pidättävä vaikutus tai paloa levittävä vaikutus. Puhallusvillaa havaittiin lähes kaikissa kohteissa eristeenä. Osassa kohteita yläpohjan lämmöneristys oli toteutettu höyrynsulkumuovin päälle asennetulla levyvillalla, jonka päällä oli puhallusvillakerros. Kyseinen toteutus on myös palotilanteessa edullinen, koska levyvilla lepää yleisesti 300...400 mm:n jaolla olevan sisäkaton koolauksen päällä. Sisäkaton palaessa pois höyrynsulkumuovikin on oletettavasti sulanut ja palamaton levyvilla koolauten varassa kannattelee edelleen puhallusvillaa, ainakin osittain. Ilman levyvillaa höyrynsulkumuovin sulamisen jälkeen puhallusvillassa esiintyy niin sanotun linnunruokinta-automaatin kaltainen efekti, jolloin villat putoavat asuntoon sisään ja pa-

Vesikatemateriaali	N=	79
Lukkosaumapelti	n=	26 33 %
Tiilikate	n=	20 25 %
Huopakate	n=	16 20 %
Konesaumapelti	n=	6 8 %
Profiilipelti (sileä)	n=	6 8 %
Profiilipelti (aaltoileva)	n=	5 6 %

Kattokulma		
1:3 (yleisin)	n=	15 21 %
1:2,5	n=	14 20 %
1:4	n=	11 16 %
1:2	n=	6 9 %
1:5	n=	5 7 %
1:7	n=	5 7 %

Taulukko 3: Katemateriaalien ja yleisimpien kattokaltevuuksien osuudet aineistossa.

Lämpöeristeen toteutus yläpohjassa

N= 79

Puhallusvilla	n= 52	66 %
Levyvilla + puhallusvilla	n= 21	27 %
Recticell + puhallusvilla	n= 4	5 %
Uretaanilevy + puhallusvilla	n= 1	1 %
Ei voida arvioida	n= 1	1 %

Taulukko 4: Yläpohjien lämpöeristeet ja toteutus.

- lokaasut pääsevät purkautumaan ullakolle. Taulukossa 4 on esitetty määrät ja suhteet lämmön eristysten periaatteista.

Suunnitelmista ja toteutuksista

Rakennusten pääsuunnitelmissa palo-osastoinnin päälinjat havaittiin esitetyksi noin 80 prosentissa ja osittain esitetyksi noin 17 prosentissa. Yhden kohteen pääsuunnitelmissa ei pohjakuvassa esitetty palo-osastoivia päälinjoja.

Räystään palo-osastointi tai palo-osastoinnin levitys ulkoseinille oli harvemmin huomioitu pääsuunnitelmissa. Noin 13 prosentissa oli palo-osastoinnin levitys ulkoseinälle ja/tai räystään palo-osastointi esitetty pääsuunnitelmassa. Ullakon palo-osastoinnin liittyminen rakennuksen ulkopintaan on yksi tulipalon leviämisen kriittinen yksityiskohta, kuten VTT:n tutkimussarjassa⁵ on kuvattu.

Rakennesuunnitelmissa pääosin oli laadittu leikkaus huoneistojen väliseinän ja vesikaton liitoksesta. Kahdessa kohteessa rakennelikkauksessa ei esitetty liitoksen toteutusta vaan leikkaus loppui ennen seinän ja vesikaton liitosta. Rakennesuunnitelmaa ei ollut käytössä yhdeksän kohteen osalta. Yhteenveto ullakon huoneistojen välisen palo-osastoivan seinän (HVS) ja vesikaton (VK) liitoksen rakennesuunnitelmista on esitetty taulukossa 5. Aineiston perusteella noin 34 prosentissa havaittiin, että liitoksen toteutus vastaa rakennesuunnitelmaa. Neljänneksessä liitoksen havaittiin osittain vastaavan suunnitelmaa.

Toteutus yleisesti: HVS-VK-liitos vastaa suunnitelmaa?

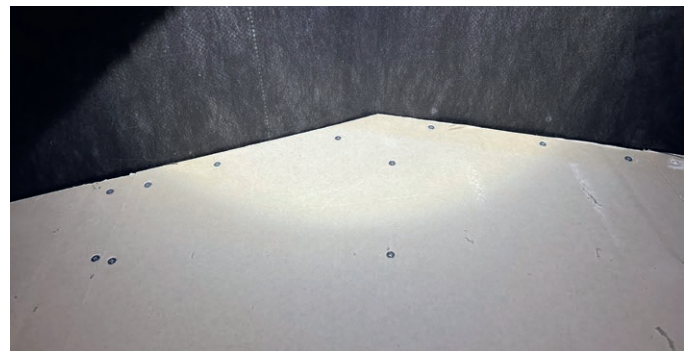
	N=	79
Ei voida arvioida	12	15 %
N - "ei voida arvioida"	67	
Kyllä	23	34 %
Ei	27	40 %
Osittain	17	25 %

Taulukko 5: Rakennesuunnitelman ja toteutuksen vastavuus palo-osastoivan seinän ja vesikaton liitoksen osalta.

Kuvassa 1 on esitetty liitoksen toteutus, joka vastaa suunnitelmaa. Kuvassa 1 näkyy myös osittain ulkoseinän suuntaisen palo-osastoinnin levityksen levytystä. Kuvassa 2 toteutus, joka ei vastaa rakennesuunnitelmaa. Tässä poikkeamana on tuki- ja tiivistyssoirot, jotka oli suunniteltu seinän yläosaan, mutta ei asennettu. Kyseisessä rakennesuunnitelmassa ei esitetty tukisoirojen kiinnitystapaa. Kuvassa 3 on esimerkki kohteesta, joka vastaa osittain rakennesuunnitelmaa. Rakennesuunnitelmassa seinä oli suunniteltu puskulle ruoteiden alapintaan ilman seinän yläosan sivuilla olevia tuki- ja tiivistyssoirot. Kuvasta nähdään, että seinän yläosan ja ruoteiden väliin on asennettu lauta. Liitos on niin sanottu kovaliiitos, jossa ei ole joustovaraa. Tällöin kattoristikoiden taipuessa kuormien vaikutuksesta seinä muuttuu kantavaksi, ainakin



Kuva 1: Palo-osastoivan seinän ja vesikaton liitos, joka vastaa rakennesuunnitelmaa (J-P Laakso / SPPL).



Kuva 2: Palo-osastoivan seinän ja vesikaton liitos, joka ei vastaa rakennesuunnitelmaa. Rakennesuunnitelman mukaisia tukisoiroja ei ole asennettu seinän yläosaan (J-P Laakso / SPPL).

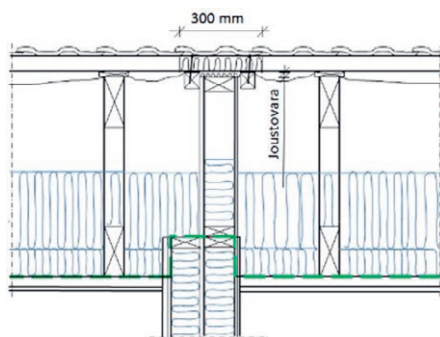


Kuva 3: Palo-osastoivan seinän ja vesikaton liitos katolta kuvattuna. Liitos vastaa osittain rakennesuunnitelmaa (J-P Laakso / SPPL).

osittain. Kantavalla ja palo-osastoivalla seinällä on yleisesti käytössä olevan valmistajan taulukossa eri minimivaatimukset (esim. runkopaksuudelle) kuin ei kantavalla palo-osastoivalla seinälle⁷. Kyseinen ero on tavanomaista materiaalista riippumatta.

Pientalon palokortissa⁶ esitetään palo-osastoivan seinän vesikatton liitoksesta hyvän rakennustavan mukainen leikkaus. Liitoksen (kuva 4) yksityiskohtiin kuuluu ruoteisiin kiinnitettävät tuki- ja tiivistyssoirot molemmiin puolin seinää sekä joustovara, jotta seinä ei muutu kantavaksi kattoristikoiden taipuessa. Kuvassa 5 on esitetty havainto kohdekäynniltä liitoksen toteutuksesta. Liitoksen tuki- ja tiivistyssoirot havaittiin kiinnitetyksi seinään, jolloin liitoksen joustokyky menetetään. Kuvassa 6 on esimerkki tiilikatteellisesta rakennuksesta. Kuvassa 6 on tiilikatteellinen rakennus, jossa havaitaan tukisoirojen välissä tiivistysvilla. Ruoteiden välissä oleva tiivistysvilla on siirretty kuvauksen ajaksi sivuun. Tukisoirot havaittiin kiinnitetyksi ruoteisiin (ei näy kuvassa).

Taulukkoon 6 on kerätty yhteenveto kohdekäyntien havainnoista. Taulukosta huomataan Pientalon palokortin julkaisemisen ajankohta. Vuonna 2018 tai myöhemmin rakennetuissa ra-



Kuva 4: Palo-osastoivan seinän ja vesikatton liitos⁶.



Kuva 5: Palo-osastoivan seinän ja vesikatton liitos, jossa tukisoiro kiinnitetty seinään (J-P Laakso/SPPL).



Kuva 6: Palo-osastoivan seinän ja vesikatton liitos katolta kuvattuna. Tukisoirojen välissä aluskatteen alla havaitaan tiivistysvilla (J-P Laakso/SPPL).

Liitossuunnitelma TOPTEN-kortin mukainen?			
	N=	79	%
Ei voida arvioida	10	14 %	
N - "ei voida arvioida"	69	100 %	
(rakennusvuoden mukaan)			
Kyllä, ≤ 2018	3	4 %	
Ei, ≤ 2018	21	30 %	
n= (≥ 2018)	45	65 %	100 %
Ei, ≥ 2018	32	46 %	71 %
Kyllä, ≥ 2018	13	19 %	29 %

Taulukko 6: Yhteenveto kohdekäynneistä, jossa liitosten vastavuutta verrattu Pientalon palokortin⁶ ohjeeseen.

kennuksissa havaittiin useammin liitossuunnitelma, kuten Pientalon palokortissa on esitetty. Palokortin esimerkkileikkaus ei ole kuitenkaan täysin jalkautunut kentälle, koska enemmistö liitossuunnitelmista ei vastaa palokortin esimerkkiliitosta. Kymmenesosa kohteessa ei ollut käytettävissä rakennesuunnitelmaa tai rakennesuunnitelmassa ei esitetty kyseistä leikkausta.

Vesikatton ja palo-osastoivan seinän tiivistysperiaatteita

Vesikatton ja huoneistojen välisen seinän tiivistämisessä havaittiin yhdeksän variaatiota, miten liitos on tiivistetty tai yritetty tiivistää. Taulukossa 7 on esitetty periaatteet ja määrät. Mineraalivilla tai kivillä on yleisin ruoteiden välin tiivistysmateriaali.

Tiivistysperiaate vastaa suunnitelmaa				Tiivistysperiaatteita			
	N=	79			N=	76	
Kyllä	n=	53	67 %	Toteutus (min.villa tai kivillä)	n=	50	66 %
Ei	n=	10	13 %	Toteutus (kovavillapala)	n=	3	4 %
Ei esitetty suunnitelmassa	n=	2	3 %	Toteutus (ruoteiden väli kapulointi/umpeen laudoitus)	n=	11	14 %
Ei päästy tarkastamaan	n=	3	4 %	Toteutus ("palo"uretaani)	n=	2	3 %
Suunnitelmaa ei käytössä	n=	9	11 %	Toteutus (ei tiivistystä)	n=	2	3 %
Osittain, vaihtelua toteutuksessa	n=	2	3 %	Toteutus (tiivistys ja ei tiivistystä, toteutus vaihtelee)	n=	3	4 %
				Toteutus (min.villa+"palo"uretaani)	n=	3	4 %
				Toteutus (Umpeen laudoitus+min.villakaista)	n=	1	1 %
				Toteutus (kova-kova [puu-puu] liitos)	n=	1	1 %

Taulukko 7: Palo-osastoivan seinän ja vesikatteen väliset tiivistysperiaatteet.

- Kuvassa 7 ruoteiden välin tiivistys on kuvattu kuitukameralla aluskatteen saumasta peltikatteellisessa rakennuksessa. Kuvasta nähdään, että villa on tiiviisti pintoja vasten puskulla. Kuvassa 8 havaitaan epäonnistunut tiivistys palo-osastoivan seinän ja vesikaton välissä. Kovalla kivivillalla ei käytännössä saa tiivistä liitosta aaltoilevan profilipeltikatteen ja seinän väliin kuten kuvasta havaitaan. Lisäksi kuvassa villa on ohuempi kuin ruodelauta. Kohteen rakennesuunnitelmassa tiivistykseen on määritelty ”mineraalivilla”.



Kuva 7: Tiivistysvilla peltikatteen, ruoteiden ja seinän välissä (J-P Laakso/SPPL).



Kuva 8: Kova kivivillapala ruoteiden välissä. Kova-villa ei tiivistä seinän ja vesikaton liitosta (J-P Laakso/SPPL).

Ruoteiden välin kapuloinnin toteutuksessa havaittiin kohdekäynneillä epäjatkuvuuskohtia. Osa näistä muodostuneista raoista voi johtua puun luontaisesta kosteuskäyttäytymisestä. Kuvassa 9 on esimerkki ruoteiden välin kapuloinnista, jossa on jäänyt kapuloiden ja ruoteiden väliin rakoja. Havaintojen perusteella ka-

pulointia on haastava saada tiiviiksi. Lisäksi kapulointi johtaa käytännössä liitokseen, johon ei muodostu joustovaraa.

Peltikate, tiilikate ja huopakate

Peltikatteella ja tiilikatteella aluskate havaittiin niin sanotusti vapaasti roikkuvana asennetuksi kahta kohdetta lukuun ottamatta. Molemmat näistä olivat rivipeltikattoja, joissa toisessa on kattopohjana peltien alla raakaponttilaudoitus ja aluskermi. Toisessa kattopeltien alla on ruoteet ja korotusrima, jonka alla aluskermi sekä kattovaneri. Tällöin seinän tiivistäminen ullakon puolella tapahtuu tasaiseen kattopohjaan. Luonnollisesti ruoteiden väli on myös tiivistettävä asuntojen rajalla.

Tiilikatteellisen rakennuksen yläpohjasta on olemassa rakennetyyppi, jossa ruoteiden sekä korotusriman alapuolella on aluskermi ja vanerilla tai raakaponttilaudoituksella toteutettu kattopohja⁸. Tällaisia yläpohjia ei kuitenkaan päätyntä kohdeaineistoon.

Tiilikatteellisen yläpohjan toteutuksessa havaittiin järjestelmällinen haaste tiivistyksessä. Aaltoilevasta muodosta ja tiilien ladonnasta johtuen on tyypillistä, että tiivistykseen jää kahden kolmen sormen kokoinen epäjatkuvuuskohta (kuva 10). Suora-kaiteen muotoinen villapala ei tiivisty tiilen alapintaan. Vastaava haaste esiintyy aaltoilevassa profilipeltikatteessa, kuten kuvassa 8 on esitetty. Käytännössä tiilikate vaatii kolme kerrosta tiivistysvillaa: 1. kerros korotusriman paksuudella, 2. kerros ruoteiden paksuudella ja 3. kerros tiilen kourun pohjissa. Tällä tavalla toteutetuna liitos on erityistä tarkkuutta asentajalta vaativa. Aikaa vievä ja erityistä tarkkuutta vaativa työvaihe soveltuu huonosti urakalla tehtäviin rakennusprojekteihin.



Kuva 10: Tiilikatteen tyypillinen tiivistyksen epäjatkuvuuskohta. Tiivistysvilla on lisäksi hieman liian ohut ruoteisiin verrattuna (J-P Laakso / SPPL).



Kuva 9: Ruoteiden välin kapulointi kolmesta eri kohtaa (J-P Laakso/SPPL).

Peltikatteellisella katolla tulee vastaavasti ruuteiden väli tiivistäväksi. Villatiivistys on myös kerroksellinen ja tehtävissä kahdella kerroksella: 1. kerros korotusriman paksuudella ja 2. kerros ruuteiden paksuudella. Kuvassa 11 huomataan, että seinän ja kattopohjan välissä on joustovara oikeaoppisesti. Lisäksi kuvasta huomataan, että ruuteiden välissä on tiivistysvilla. Valo paljastaa ruuteen ja seinän yläosan kohdalla epäjatkuvuuskohdan. Ruuteen alapinnan ja seinän väli on tiivistämättä, josta valo kajastaa seinän ”yli”. Kohteessa ei myöskään ole asennettu tuki- ja tiivistyssoiroja seinän yläosan sivuun.



Kuva 11: Peltikatteellinen rakennus, jossa ruuteen alapinnan ja seinän väli tiivistämättä (J-P Laakso/SPPL).

Huopakatteellisen ja levymäisen kattopohjan tiivistäminen havaittiin hieman yksinkertaisempänä kuin ruuteellisten kattopohjien. Kuvassa 12 on Pientalon palokortin mukainen toteutus, jossa tuki- ja tiivistyssoivot kiinnitetty kattopohjan läpi. Liitos on joustava. Toinen esimerkki on kuvassa 13, jossa rakennesuunnitelmaa vastasi Pientalon palokortin mukaista ratkaisua, mutta toteutuksessa ei ole asennettu tiivistysvilla eikä tuki- ja tiivistyssoiroja. Valo loistaa seinän ”yli”.



Kuva 12: Huopakatteellinen vesikatto kattovaneerilla. Toteutus vastaa rakennesuunnitelmaa (J-P Laakso/SPPL).



Kuva 13: Huopakatteellinen vesikatto raakaponttilaudoituksella. Toteutus ei vastaa rakennesuunnitelmaa (J-P Laakso/SPPL).

Välikaton ja ullakon palo-osastoivan seinän liitos

Välikaton ja ullakon seinän liitos havaittiin yleisimmin tuoduksi lämmöneristekerrokseen, kuten aiemmassa kuvassa 4 on esitetty. Tällöin sisäpalon leviämistä vastaan muodostuu luontainen limitus, ja palokaasut eivät kierrä helposti naapurin puolelle. Kuvassa 14 on esimerkki toteutuksesta sekä taulukossa 8 havaintojen yhteenveto ullakon/yläpohjan palo-osastojen runkorakenteista.



Kuva 14: Huoneistojen välissä sisäseinä kivirakenteinen ja ullakolla levyrakenteinen. Kivirakenteisia seiniä havaittiin noin 32 prosentissa aineiston kohteissa. Puhallusvillan pohjalla havaitaan levyvilla kerros (J-P Laakso/SPPL).

Taulukosta 8 huomataan, että osassa kohteita ei ole liitosta villakerroksen sisällä, vaan sama runko jatkuu lattiasta vesikattoon. Lisäksi noin 15 prosentissa kohteista runkona oli käytetty ristikkorakennetta. Ristikkorakennetta ei saa ilman erillistä suunnittelua jättää osastoivan rakenteen sisään⁶. Niin sanottua ”paloristikkoo”⁹ eli R30-luokkaan suunniteltua ristikkokenttää ei havaittu kohdekäynneillä.

HVS runko ullakolla/yläpohjassa	N=	79
Oma runko (välikaton kohdalla liitos)	n=	58 73 %
Sama runko asunnon kanssa (asunnon runko jatkuu YP:aan)	n=	5 6 %
NR-ristikko (ei lisäkoolausta)	n=	2 3 %
NR-ristikko (lisäkoolauksella)	n=	10 13 %
NR-ristikko (ei lisäkoolausta, toispuoleinen levytys)	n=	1 1 %
Ei varmuutta (suunnitelmaa ei käytössä tai ei päästy tarkastamaan)	n=	2 3 %
Muu	n=	1 1 %

Taulukko 8: Huoneistojen välisen palo-osastoivan seinän rungon toteutus ullakolla. Eri variaatiot ja määrät aineistosta.

► Räystäät ja katokset

Räystäät on todettu yhdeksi kriittiseksi rakenteeksi, josta palokaasut voivat levitä ullakon palo-osastojen välillä⁵. Räystääiden toteutukseen julkaistiin tarkennus Pientalon palokorttiin syksyllä 2024. Päivityksessä opastetaan katkaisemaan lisäpaarteella räystääskotelo, jotta palo ei kierrä kotelon kautta. Kuvassa 15 havaitaan räystääskotelo, jota ei ole katkaistu asuntojen rajalla. Palokaasut pääsevät kiertämään kotelon kautta ullakoiden välityksellä.



Kuva 15: Räystääskotelo, jossa osastoiva seinä (valon vasemmalla puolella) päättyy ulkoseinän kohdalle lämpörajalle. Kotelo kuvattuna 360-kameralla. Kuvassa oikealla näkyy otsalauta ja ruuheet sekä vasemmalla keskellä NR-yläpaarre (J-P Laakso/SPPL).

Katosten osalta palon levittävä vaikutus on vielä suurempi kuin räystäällä. Tästä löytyy rakennuspaloesimerkki, jonka Onnettomuustutkintakeskus on tutkinut¹⁰. Rakennuspalossa palokaasut ja liekit levisivät ulkokautta pitkän lappeen/katoksen välityksellä koko rakennuksen alalle. Kuvassa 16 on esimerkki sisäänkäyntikatoksen ontelosta, joka havaittiin avoimena koko rakennuksen mitalla.



Kuva 16: Sisäänkäyntikatokas, joka avoin koko rakennuksen matkalla. Katoksen alapinta harvalaudoitettu. Levytyksen kohdalla asuntokohtaiset varastot (J-P Laakso/SPPL).

Lopuksi

Rivitalojen paloturvallisuus ja palo-osastointien toimivuus on rakennetyiskohtien ketju, jonka lenkin pettäessä kaikki muut hyvin suunnitellut ja toteutetut osat menettävät merkityksensä. Palokaasut leviävät pienestäkin raosta palo-osastosta toiseen. Jälkikäteen rakennusosien tarkastaminen vaatii erikoiskamerakalustoa ja osa toteutuksesta voi olla mahdoton tarkastaa jälkeenpäin.

Tämän vuoksi etenkin liitosten, jotka usein ovat piiloon jääviä, toteutuksen dokumentointi oikea-aikaisesti on erityisen tärkeää. Käytännössä tekijän on dokumentoitava (valokuvattava) toteutus, koska pientalotyömaalla on tyypillistä, että vastaava työnjohtaja ei ole jatkuvasti paikalla. Kyseinen toimintamallin on käytössä hyvin toimivilla palokatkourakoitsijoilla, jotka tiivistävät palo-osastoitujen rakenteiden läpivientejä.

Selvityshankkeen aikana saatiin myös palontutkintaraportteja, jossa todellisessa tulipalossa havaittiin toimiva ullakon palo-osastointi. Toisessa case-esimerkissä palo-osastointi ei toiminut, ja palokaasut levisivät koko rakennuksen yläpohjan alalle.

Selvityshankkeen havainnot ovat helposti laajennettavissa ja yhdistettävissä muihinkin vesikattorakenteisiin, etenkin ristikkorakenteisiin toteutuksiin. Vastaavat haasteet tai hyvät ratkaisut eivät rajoitu pelkästään puurakenteisiin. Selvityshankkeen koko tutkimusraportti on luettavissa palopäällystöliiton verkkosivulla: <https://sppl.fi/rivitalojen-ylapohjat/>.

Kiitokset

Suomen Palopäällystöliitto kiittää kaikkia selvityshankkeeseen osallistuneita tahoja sekä rahoittajana toiminutta Palosuojaohjelurahastoa. Pelastuslaitosten asiantuntijatyöpanos oli merkittävä kohdekäyntien toteutuksen onnistumisessa ja aineiston keräämisessä. Palopäällystöliitto kiittää suuresti ohjaus- ja projektiryhmään osallistuneita henkilöitä sekä lähettäjä organisaatioita työryhmätyöskentelyyn annetusta asiantuntijoiden työajasta.

Lähteet

1. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteellinen paloturvallisuus. Määräykset E1/81, sivu 23. Päivitys 1.10.1990. https://ym.fi/documents/1410903/155128351/E1_1981_K.pdf/4a09cfec-262b-e002-3bf3-a0050d205eda/E1_1981_K.pdf?t=1680087568376 Haettu 26.4.2025.
2. 848/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen paloturvallisuudesta, taulukko 5. Annettu 28.11.2017.
3. Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO. 2025. Haettu: 6.3.2025.
4. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteellinen paloturvallisuus. Määräykset E1/76, luku 3.6. 1.7.1976. https://ym.fi/documents/1410903/155128351/E1_1976_K.pdf/f6a5368c-c3e7-cd3e-f115-7e78f56b1bf3/E1_1976_K.pdf?t=1680087536587
5. Hietaniemi, J. ym. (2004). Ontelotilojen paloturvallisuus – VTT tiedotteita 2249, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, sivut 34–40. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2004/T2249.pdf>
6. TOPTEN-rakennusvalvonnat (2024). Pientalon palokortti, P3-paloluokan pientalon paloturvallisuuden perusteita. <https://toptenrava.fi/rakentamisen-yhteiset-kaytannot/>
7. Gyproc-käsikirja (2021). Kevytrakennearjestelmät. Sivut 58–59. https://www.gyproc.fi/sites/mac3.gyproc.fi/files/2022-08/Gyproc_Kasikirja-2021_082022-web_avoin.pdf
8. YP400a. Rakennetyyppi, Kerabit yläpohja. <https://tuotteet.kerabit.fi/Download/23251/YP400%20a.pdf>
9. Palon kestävä yläpohja (2020). Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/palonkestava-nr-ylapohja>
10. Kahden lapsen kuolemaan johtanut rivitalopaloo Raahessa 13.9.2016, Y2016-03. Onnettomuustutkintakeskus. <https://turvallisuustutkinta.fi/fi/index/tutkintaselostukset/muutonetto-muudet/tutkintaselostuksetvuosittain/2016/y2016-03kahden-lapsenkuolemaanjohtanutrivitalopaloraahessa13.9.2016.html>

Maastopalojen mallinnus ja simulointi virtauslaskennalla

Tiivistelmä

Euroopan unionin rahoittamassa tutkimushankkeessa FIRE-RES on vuosina 2021–2025 tutkittu äärimmäisen voimakkaita maastopaloja, joiden hallintaan on projektissa kehitetty innovatiivisia prosesseja, menetelmiä ja työkaluja kokonaisvaltaisemman palonhallinnan toteuttamiseksi. VTT:n roolina on ollut virtauslaskennan (Computational Fluid Dynamics, CFD) soveltaminen maastopalojen mallinnukseen, ja erilaisten paloprosessiin vaikuttavien tekijöiden merkityksen arviointi simulointien avulla. Kahta erilaisista virtauslaskennan ohjelmistoa, Fire Dynamics Simulator (FDS) ja OpenFOAM, testattiin tieteellisessä kirjallisuudessa kuvattujen hyvin tunnettujen palokokeiden mallinnuksella, ja herkkyystarkasteluilla tutkittiin palokäyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Kaiken kaikkiaan tulosten yhdenmukaisuus aikaisempien löydösten ja odotetun käyttäytymisen kanssa on rohkaisevaa, koska se vahvistaa ymmärrystämme maastopalojen monimutkaisesta dynamiikasta. Tällaisten tulosten kokeellinen validointi ei kuitenkaan ole helposti toteutettavissa todellisten metsäpalojen mittakaavassa. Laskentakapasiteetti ja mallinnukseen kuluva aika rajoittavat edelleen menetelmän käyttöä käytännön sovelluksissa, ja lisäksi palavan maaston tuntemus on puutteellista CFD-laskentaa ajatellen. Edellä mainituista syistä virtauslaskentaa ei vielä voi käyttää käytännön operatiivisessa toiminnassa, jos tavoitteena on ennustaa palon leviämistä. CFD on kyllä käyttökelpoinen metsäpalojen dynamiikan tutkimukseen, eli sen avulla on mahdollista saada uutta tietoa metsäpaloista.

Empiirisestä fysikaaliseen mallinnukseen

Maastopalojen simulointi on pitkään rajoittunut pääasiassa empiirisiin malleihin, jotka toimivat melko hyvin operatiivisessa käytössä, jossa korostuu laskennan nopeuden merkitys. Tutkimuslaskennassa käytössä tarvitaan kuitenkin fysikaalisempaa mallinnusta,

jolla voidaan paremmin tutkia kasvillisuuteen, topografiaan, tuuleen jne. liittyviä palokäyttäytymistä ohjaavia parametreja ja niiden suhteellista merkitystä.

Metsäpalon fysikaalinen malli kirjoitetaan differentiaaliyhtälöinä, jotka kuvaavat keskeisten prosessien käyttäytymistä ja vuorovaikutusta sekä kunkin riippuvan muuttujan muutosta ajan ja paikan suhteen. Yhtälöt ovat epälineaarisia ja linkittyneitä, mikä luo monimutkaisen muuttujien, kertoimien ja parametrien verkoston, joka on välttämätön tietyn ilmiön käyttäytymisen ja sen kehityksen kuvaamiseksi. Likimääräiset ratkaisut yhtälöjoukolle saadaan käyttämällä numeerisia laskentamenetelmiä. Kenties kriittisin vaihe mallin kehityksessä on validointi, jossa mallin tuloksia verrataan havaintoihin, jolloin voidaan arvioida mallin kykyä kuvata todellisuutta.

Simulointikehitystä tehtiin VTT:llä kahden palomallinnustiimin yhteistyönä. Toinen tiimi käytti pääasiallisena mallinnustyökalunaan FDS:ää (Fire Dynamics Simulator) ja toinen OpenFOAM:ia, jotka molemmat ovat avoimen lähdekoodin CFD-malleja. Fireflux-ruohopalokokeita käytettiin simulointityökalujen ja mallintajien validointiin. Kyseinen palokoe tehtiin vuonna 2006 Houston Coastal Centressä, Texasissa, 400 m × 970 m koalueella, jossa 100 ja 400 metrin päähän sytytyskohdasta sijoitettiin kaksi mitausantureilla varustettua tornia. Kokeiden aikana torneissa olevat anturit rekisteröivät palon leviämisenopeutta, lämpötilaa, nettosäteilyä, lämpövirtaa, vesihöyryä jne. Lisäksi mitattiin mm. tuulen nopeutta ja suuntaa. Ruohon keskimääräinen massa ja kosteus laskettiin kymmenestä 38 × 38 cm²:n näytteestä, jotka oli leikattu satunnaisista osista preeriaa.

FDS:n validointiin käytettiin lisäksi eri pituisille ja erilaisen kosteuspitoisuuden omaaville Douglas-kuusille tehtyjä kontrolloituja ja polttokokeita. Kyseisessä artikkelissa raportoidaan myös joitakin simulointeja, jotka tehtiin niin sanotulla Wildland Urban In-

► terface Fire Dynamics Simulator (WFDS) -ohjelmistolla, joka on FDS-version 5.2 laajennus ulkona tapahtuviin palonleviämis- ja savunkulkeutumisongelmiin. Tällä kertaa malleja testattiin FDS-versiolla 6.8.0.

Kun mallien sovellettavuus ja laskentatarkkuus validointitapauksissa oli todennettu, tehtiin herkkyystarkasteluja, ja simulaatioita laajennettiin interpoloimalla ja ekstrapoloimalla erilaisiin olosuhteisiin, mukaan lukien tilanteet, joissa äärimmäistä palokäyttäytymistä tyypillisesti havaitaan. Herkkyysanalyysillä saatiin odotetusti näkyviin palon leviämisenopeuden lisääntyminen tuulen nopeuden myötä, polttoaineen massan ja kosteuspitoisuuden vaikutus palon voimakkuuteen, sekä muun muassa topografian vaikutus; ruohikkopalon simuloinneissa 15° ja 30° kaltevuuksilla nähtiin palon kehitys niin sanotuksi äärimmäiseksi palotapahtumaksi. Douglas-kuusista rakennetuilla metsämalleilla tutkittiin myös metsäpalon muuttumista normaalista äärimmäiseksi, jolloin kriittisenä vaikuttavana tekijänä herkkyystarkasteluissa oli tuulen nopeus. Simulointien avulla tuotettiin erilaisia kaavioita ja taulukoita, jotta paremmin voitaisiin ymmärtää tällaisten palonkehitysten mekanismit.

Uusia sovellusmahdollisuuksia

Materiaalimalli männynneulasten palosimulointiin

FDS:n mallinnusominaisuuksia sovellettiin myös männynneulasten palamiseen, mitä varten Norjasta oli saatu boreaaliseen mäntymetsään liittyviä mittaustietoja. Neulasnäytteet mallinnettiin kahdella variaatiolla: toinen oli tavanomainen FDS-pintamalli ja toinen niin sanottu Boundary Fuel Model (BFM). Nämä mallit ovat alustavia, koska kokeellisen datan määrä oli hyvin rajallinen ja puuttuva data täydennettiin käyttämällä FDS:n käyttöohjeessa ja validointioppaassa esitettyjä yleisiä kasvillisuusmalleja, jotka näyttivät olevan varsin hyvä lähtökohta metsäpaloskenaarioiden kasvillisuuden mallinnukselle.

Materiaalimallien testaamiseksi suoritettiin FDS-simulaatio, jossa yhtä FDS:n validointioppaan esimerkitapauksista (CSIRO-ruohopalo tapaus C064) sovellettiin männynneulasille, eli palokuorma muutettiin ruohosta männynneulasiksi. Simuloinneissa käytettiin männynneulasten materiaalimallin BFM-versiota, koska männynneulat ovat niin pieniä, ettei niitä voida simulaatiossa erottaa. CSIRO-ruohikkosimulaatioissa käytetty sytytyslähde ei sytyttänyt männynneulasia, mutta kun sytyttimen HRR:ää nostettiin (5000 kW/m²) ja maksimaalisen HRR:n kesto sytytyslinjan jokaisessa pisteessä kasvatettiin 30 sekuntiin, männynneulat sytyivät ja eteenpäin leviävä palo muodostui.

"Mallia testattiin myös erilaisilla ympäristön kosteuksilla, kasvillisuuden kosteuspitoisuuksilla ja ympäristön lämpötiloilla. Pääosin tulokset vastaavat odotuksiamme: korkeampi ilmankosteus ja kasvillisuuden kosteuspitoisuus johtivat lievempiin tulipaloihin."

Äärimmäisen palokäyttäytymisen ennakointi

Seuraavaksi kehitettiin yksinkertaistettu laskennallinen nestedynamiikkaan perustuva metsäympäristö, jossa tutkittiin metsäpalon kehittymistä Tedim-paloluokasta toiseen, kattaen eri paloluokat normaalista äärimmäiseen. Tavoitteena oli luoda simuloimalla niin sanottuja esiasteita, eli kehityskulkuja ja olosuhteita, joissa palo voisi kehittyä niin sanotuksi äärimmäiseksi palotapahtumaksi. Esiasteet määriteltiin reaaliajassa mitattavilla parametreilla, kuten leviämisenopeus, palorintaman intensiteetti ja liekin korkeus. Simuloinneissa matalan intensiteetin palorintama eteni metsäympäristössä, ja palokäyttäytymisen kehitystä tutkittiin muuttamalla hallitsevaa tekijää eli tuulen nopeutta.

Palorintaman etenemisnopeus ja palon intensiteetti osoittivat yleisesti eksponentiaalista kasvutrendiä tuulen nopeuden kasvaessa. Lisäksi liekkien pituudet osoittivat yleisesti logaritmistä trendiä tuulen nopeuden kasvaessa, kun tuulen nopeudet vaihtelivat hitaasta kohtalaiseen. Liekin pituuden ja tuulen nopeuden välinen suhde on jyrkkä, mutta tuulen nopeuden kasvaessa liekin pituuden asteittainen kasvu alkaa tasaantua. Simulaatioissa havaitut käyttäytymismallit ovat linjassa sen kanssa, mitä on havaittu ja raportoitu todellisissa tulipaloissa. Mallia testattiin myös erilaisilla ympäristön kosteuksilla, kasvillisuuden kosteuspitoisuuksilla ja ympäristön lämpötiloilla. Pääosin tulokset vastaavat odotuksiamme: korkeampi ilmankosteus ja kasvillisuuden kosteuspitoisuus johtivat lievempiin tulipaloihin.

Kaiken kaikkiaan tulosten yhdenmukaisuus aiempien havaintojen ja odotetun käyttäytymisen kanssa on rohkaisevaa, sillä se vahvistaa ymmärrystämme metsäpalojen monimutkaisesta dynamiikasta laskennallisen nestedynamiikan avulla. Tällaisten tulosten kokeellinen validointi ei kuitenkaan ole helposti mahdollista simulaatiossa käytetyn metsäalan valtavan mittakaavan vuoksi. Tällaisten simulaatioiden (myös erilaisten puiden ja kasvillisuuden kanssa) odotetaan kuitenkin tarjoavan suuntaa antavia tuloksia, jotka voitaisiin yhdistää realistiseen ymmärrykseen metsäpaloista, jotta voidaan tehdä harkittuja sammutuspäätöksiä.

Teknologian valmiustaso

Käyttämämme työkalut ovat laajasti validoituja ja käytössä monissa sovelluksissa. Maastopalot ovat kuitenkin niin haastavia mallinnuskohteita, että niiden simuloinnissa CFD-menetelmät ovat käytännössä vasta alkuvaiheessa. Menetelmän käyttö vaatii paljon osaamista ja tietoa, jota on vielä hyvin vähän saatavilla. Operatiivisessa toiminnassa käytettävien mallien palokuormamäärittelyt ovat riittämättömiä CFD-syötteiden tekemisen kannalta; tarvittaisiin yksityiskohtaisempaa dataa kasvillisuuden esiintymisestä ja lisäksi materiaalien palo-ominaisuudet, esimerkiksi jakaumina.

Teknologian kypsyys voidaan arvioida niin sanotun teknologian valmiustason (TRL=Technology Readiness Levels) mukaisesti. TRL 1 on alin taso, joka tarkoittaa "havaittuja peruseriähteitä"; TRL 9 on korkein taso, joka tarkoittaa, että "systemin toiminta on osoitettu käyttöympäristössä". Edellä esitetyt kehityskäskyt, jotka koskevat CFD-mallinnuksen soveltamista metsäpalo-ongelmiin, edustavat TRL-tasoa 2–5. Preerialla tehdyn ruohopalo kokeen simulaatiot sijoittuvat TRL-tasolle 5 ("validointi asiankuuluvassa ympäristössä") ja Douglas-kuusen palokokeen simulaatiot TRL-tasolle 4 ("validointi laboratorioympäristössä"). Nämä validointisimulaatiot olivat mahdollisia, koska sopivaa dataa oli saatavilla. Metsäpaloille ei löytynyt sopivaa validointidataa, joten kehitystyö sijoittuu TRL-tasolle 3, "konseptin ominaispiirteiden demonstrointi". Lisäksi kehitimme EWE-riskin ennustamiseen menetelmän, joka edustaa TRL-tasoa 2 "muotoiltu teknologikonsepti".

Kiitokset

Hanke on saanut rahoitusta Euroopan Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta; sopimus nro 101037419.

Lähteet

1. FIRE-RES (2023). <https://fire-res.eu/>
2. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanel-la, M. & Mueller, E. (2024a). Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edition.
3. CFD Direct (2024), OpenFOAM Documentation <https://cfd.direct/openfoam/documentation/>
4. Clements, G.B., Zhong, S., Goodrick, S., Li, J., Potter, B.E., Bi-an, X., Heilman, W.E., Charney, J.J., Perna, R., Jang, M., Lee, D., Patel, M., Street, S. & Aumann, G. (2007). Observing the Dynamics of Wildland Grass Fires. American Meteorological Society, BAMS Sep. 2007, p. 1369–1382.
5. Mell, W., Maranghides, A., McDermott, R., L. Manzello, S. (2009). Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees, Combustion and Flame, Volume 156, Issue 10, October 2009, Pages 2023–2041.
6. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanel-la, M., Mueller, E. (2023). Fire Dynamics Simulator User's Guide. U.S. Department of Commerce: National Institute of Standards and Technology (2023). https://github.com/fire-models/fds/tree/master/Manuals/FDS_User_Guide
7. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanel-la, M. & Mueller, E. (2024b). Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 3: Validation, NIST Special Publication 1018-3, Sixth Edition.
8. Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M.R., Delogu, G.M., Fernandes, P.M., Ferreira, C., McCaffrey, S., McGee, T.K., Parente, J., Paton, D., Pereira, M.G., Ribeiro, L.M., Viegas, D.X. & Xanthopoulos, D. (2018). Concept Paper: Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. Fire 2018, 1, 9; doi:10.3390/fire1010009.
9. Mihaly, H. (2017). From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. The Innovation Journal. 22: 1–23.



22.11.–1.12.2025
Kampanja haastaa koko valtakunnan
parantamaan liesiturvallisuutta

paloturvallisuusviikko.fi

Suomen Pelastusalan
Keskusjärjestö
SPEK

Fire safety analysis of the Cryostat for the DEMO fusion power plant

Abstract

Fire safety analysis of the cryostat inside the Tokamak building of the demonstration fusion power plant DEMO is introduced in this paper. In the cryostat, fires can occur only during long maintenance breaks when there is air inside, that is, no vacuum as in normal operation. In the analysis, different tools with varying levels of complexity (analytical calculations, zone fire models, CFD simulation) were used, and their applicability for different purposes were assessed. The simulations showed that fires inside the cryostat are not threatening the load bearing capacity of the cryostat globally. Some local problems close to the fire might arise, but these can be dealt with a proper design with enough robustness for load-bearing capacity. It should be noted that the available specifications, which this study is based on, are still at a very early stage, and many assumptions had to be made in the study.

Introduction

Fusion energy production is of immense interest worldwide due to its significant benefits. The fuels are abundant everywhere on the planet, fusion does not emit any greenhouse gases, and fusion power plants are inherently safer than fission power plants, posing very low risk to populations in the vicinity and generating no long-lasting waste.

In the EUROfusion programme [1], one of the two main pillars is to develop a concept for the future demonstration fusion power plant DEMO [2]. DEMO is currently in conceptual design phase, and its construction is expected to start early 2040s [3].

Despite the inherent safety of fusion power plants compared to fission power plants, there are still several safety topics to be studied and confirmed. One of those is fire safety. Fire risk analysis for DEMO includes fire hazard identification and fire consequence assessment. Areas of primary interest are high-risk areas, such as those which include critical equipment, radioactive material inventories or large fire loads.

Fire risk analysis for DEMO includes fire hazard identification and fire consequence assessment. Foremost, the fire safety analysis should show that any radioactive releases will remain within the plant limits and no conditions for cliff-edge effects will occur. The main radioactive hazard is related to the hydrogen isotope tritium which is used as a fuel together with the hydrogen isotope deuterium. The activation products that are induced by the neutron flux from the fusion reaction also pose hazard potential. Areas of primary interest are high-risk areas, such as those which include critical equipment, radioactive material inventories or large fire loads. In the forthcoming years, the analysis will cover all relevant DEMO buildings.

In this paper, we introduce the fire safety analysis of the cryostat inside the DEMO Tokamak building. The cryostat provides an environment for the vacuum vessel hosting the fusion reaction and the superconducting magnets confining and controlling the plasma within the vacuum vessel. In the cryostat, fires can occur only during long maintenance breaks when there is air inside, that is, no vacuum as in normal operation. The main goal of the work is to ensure the structural stability of the cryostat in case of fire. In the analysis, different tools with varying levels of complexity (analytical calculations, zone fire models, CFD simulation) were used, and their applicability for different purposes were assessed. Different kinds of fires, temperature development inside the structure, and the relation of peak heat release rate with openings and thermal exposure on the structure were studied.

Fire Dynamics Simulator (FDS) code [4] was used to study the cryostat's load-bearing capacity in case of fire. Simulations were performed for the empty cryostat, the cryostat containing the Tokamak machine without the cold thermal shield (CTS), and the cryostat containing both the Tokamak machine and CTS. The main challenge of the simulation work comes from only partly specified design of the DEMO power plant. It should be noted that the available specifications, which this study is based on, are

still at a very early stage, and many assumptions had to be made in the study. The example scenarios should be reassessed when more accurate and detailed information is available.

Fire risk analysis of DEMO cryostat

The DEMO facility will contain many buildings. At present, the main emphasis of the fire accident analysis is on the Tokamak building that contains the actual fusion reactor machine, Tokamak. The cryostat is a large cylindrical steel enclosure surrounding the actual fusion reactor that consists of the actual vacuum vessel (VV) containing the fusion plasma and the superconducting magnets around it. This paper is focusing on the cryostat only, i.e., the interaction between the cryostat and the Tokamak building is not considered. In reality, the cryostat is inside the bioshield which significantly affects the possible ventilation scenarios. The main goal of the work is to ensure the structural stability of the cryostat in case of fire occurring inside the cryostat. In the analysis, different tools with varying levels of complexity (analytical calculations, zone fire models, CFD simulation) were used, and their applicability for different purposes was assessed.

Cryostat definitions

The present work studies the cryostat and its response to fires that ignite inside it. The design of the cryostat is currently not very well known. DEMO is in conceptual design stage, and there are different variations of the cryostat. The input data required for the simulations was either collected from available drawings and Tokamak description documents or estimated. The steel grade to be used is not known, at least to the present authors. Thus, we are assuming some general steel thermal properties from the literature. Especially, carbon and stainless steel properties of Eurocode 3 [5] are used if temperature dependent values are needed in the simulations. For the very crude and simple models, some other commonly used non-temperature dependent values for steel were used, when sensitivity checks, and parametric studies were done in order to get some insight how significant the effect of the actual thermal properties is for the presented results.

In normal operation (plasma mode) and during most maintenance breaks, there is a vacuum inside the cryostat. The vacuum is rather coarse compared to the vacuum inside the VV. However, it is still a vacuum where fire cannot exist. Thus, the possible fires can only occur during long maintenance breaks when the cryostat is filled with (dry) air that is in about ambient pressure. During these breaks, there are some openings open at the cryostat

outer steel boundary. The openings are the manholes (16 pieces at the bottom of the cylindrical wall), the remote maintenance (RM) holes on top (16 pieces at ceiling), the central magnet hatch at the top piece, and the different ports. In this study, only the manholes and RM holes are considered to be open. The ports are going through the outer wall of the cryostat, through the CTS up to the VV. Thus, it can be assumed that the ports do not affect the gas flow inside the cryostat air space now considered. The central magnet lid is quite large. It can be assumed that it is not typically opened during the maintenance breaks. If it would be open, the hot fire gases would easily flow away through it and, thus, the load bearing capacity of the cryostat would not be in danger.

The self-supported and bioshield-supported cryostats were modelled according to CAD drawings. The generated FDS simulation geometries are shown in Figure 1. The CAD geometries were imported in the commercial Pyrosim programme [6] that is a widely used user interface to perform FDS simulations. Unneeded parts of the CAD data, if any, were removed before the geometries were transferred to a FDS readable format (made to cartesian blocks). At this point, some obstacles and holes were added to the cryostat outer wall geometry, if they were needed in the simulations. For example, the VV port penetrations at the cryostat cylinder were just holes in the CAD file, and Pyrosim was used to close these openings by adding blocks. It was assumed that the self-supported cryostat has 60 mm thick and the bioshield-supported cryostat 20 mm thick carbon steel walls. All or some of the manholes (16 pieces) at the bottom of the cryostat cylindrical outer surface were blocked according to the fire scenario simulated. The used CAD file of the bioshield-supported cryostat contained also 16 (RM) duct shape penetrations at the top lid that also were blocked according to the simulated fire scenario. Similar RM holes were also added to the self-supported cryostat FDS model even though they were not present in the CAD geometry as the RM operations should also be possible for this version of cryostat. Anyway, having some (small) openings at the top part of the cryostat enhances the ventilation, and the fire scenarios are worse than without these openings. We are considering large design fires in the present analysis as the main emphasis is to study the overall load bearing capacity of the cryostat under fires that burn for a relatively long time and the maximum heat release rate is determined by the available ventilation after the initial oxygen present has been consumed.

In order to check the applicability of the simpler zone fire models to simulate the cryostat, a FDS model was made where the cylindrical geometry of the cryostat was approximated by a rectan-

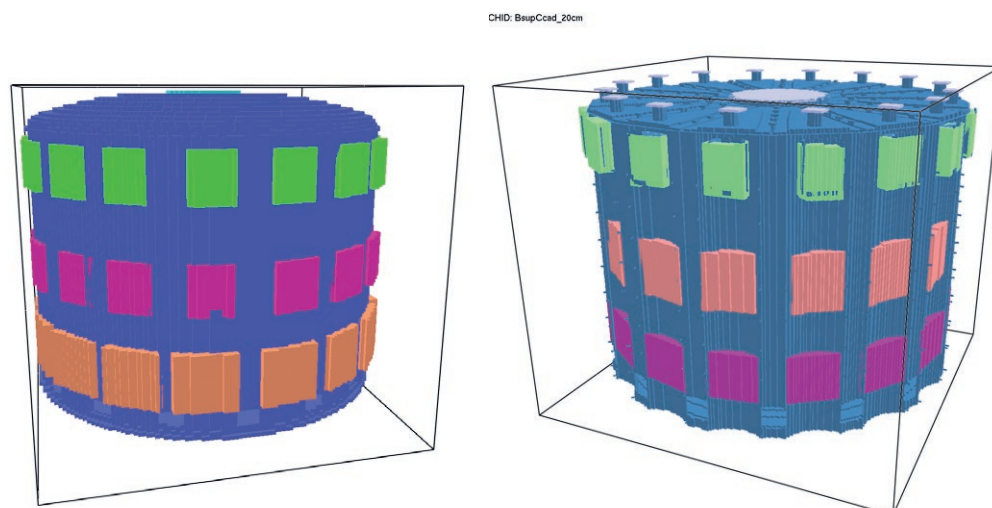


Figure 1: FDS models of the self-supported cryostat (left) and the bioshield supported cryostat (right). Diameter of the cryostat cylinders is about 39 m, and the height is about 30 m. The magenta, orange, green, and grey patches are added using Pyrosim to block unnecessary holes that were present in the CAD geometries.

- gular volume whose horizontal cross section was a square. Some approximations were made in the transition from cylindrical to square geometry because the areas of the walls and ceiling/floor and the height of the model could not be equal in these two different geometries. The simple square room geometry was chosen so that the area of the steel on the walls and ceiling and the height of the compartment would be close to the cylindrical. Most of the heat from the fire is absorbed in the ceiling and the top part of the walls. The cryostat is rather large: the diameter of the cylindrical outer wall is almost 39 m, and the height of the cryostat is about 30 m. The circular cross section (floor area) has an area of about 1100 m². The square model height is 22.3 m, and the side of the square floor is 33.5 m.

In some FDS simulations, the fusion reactor was modelled including the actual machine and other large equipment. The Tokamak-machine CAD model was available, but this model does not have the CTS. A similar CTS as in the ITER experimental fusion reactor was assumed. There have been some other accident analyses that face the same problem with CTS than the present fire analysis. For example, the report on helium ingress accidental scenario uses a “self-made” model for the CTS in CFD simulation. We have used that model as a guide for our CTS model, shown in the results section.

Fire scenarios, fire loads, and design fires

Since there is not exact information on fire loads inside the cryostat, the fire scenarios studied are very general in nature. In most cases, the assumed fire load density was 400 MJ/m² as advised by the experts of the EUROfusion consortium. Very localized fire loads are not the main interest of the present work. The aim is to address fictitious large fires and see how large fires there can be considering the available ventilation (oxygen for burning) and the fire load. At this early stage of the DEMO design, we use generic design fires that are chosen by the available ventilation and the overall estimate of fire load density. As the main concern is the structural stability of the cryostat, these kinds of general fires are good enough as they produce “correct” amount of energy inside cryostat. By “correct” amount we mean an estimate that is well on the conservative side, i.e., we model larger fires than there possibly could be. In reality, the fire load is not very large and is mainly shielded from the air volume that we are now dealing with. During long maintenance breaks, there might be additional fire load inside the cryostat like some RM machinery. A pool fire of lubrication, hydraulic, or similar oil might be a possible fire scenario, but it is not very likely as pneumatic machinery is probably preferred over oil containing machinery inside a vacuum device. Anyhow, the amount of burning material in RM machinery will be small compared to the large amount of steel in the cryostat. So, these kind of fire scenarios can only have some local effects, and they are not considered in this analysis.

It was assumed that all solids and air spaces were at an ambient temperature of 20 °C. This should be a relevant approximation of the state of the cryostat during long maintenance breaks as there should not be much decay heat to be removed from the vacuum vessel anymore and the superconducting magnets might not be cooled close to the absolute zero during these breaks. Actually, the cooling of VV operates also during the maintenance breaks and, thus, VV would act in reality as larger heat sink than just assuming it to be initially at the ambient temperature. The same is true for the superconducting magnets and the CTS that could be initially at much lower temperatures than ambient. Many similar (over)conservative assumptions were made frequently in the presented analysis partly due to the lack of available information.

Description of simulations and their results

First, very crude order of magnitude type estimations using analytical formulas were made to estimate the total heat amount needed to heat up the steel as a whole, i.e., lumped model was utilized for the cryostat steel structure. The effects of different simulation method dependent assumptions were tested, e.g., the 1 dimensional vs. 3 dimensional heat conduction in solid obstacles in FDS. As the CFD based FDS simulations are very time consuming, the ability of zone models to simulate the cryostat was tested so that some of the sensitivity/parametric studies might be done using these simpler models. In total 27 full cryostat geometry FDS simulations were made in the present analysis.

Simple analysis of fires

The heated parts of the bioshield-supported cryostat (20 mm thick steel) weigh about 800 tons (the cylinder and the top surface for simplicity), and there is about 150 GJ energy potential in the initial oxygen (13.1 MJ/kgO₂). Using 600 J/kg/K (a rough average over temperature) for the specific heat, one ends up to about 300 °C increase in the steel temperature for the bioshield-supported cryostat and about 100 °C for the self-supported cryostat (three times heavier). There are also many other heat sinks inside the cryostat than its outer boundaries, e.g., the CTS, the magnets, the VV, and the VV thermal shield (VVTs). Thus, the initial oxygen is not able to threaten the global load bearing capacity of the cryostat, i.e., there should be some openings open at the outer boundaries of the cryostat in order to have a fire that can affect the global load bearing capacity of the cryostat.

The second analysis assumes that the cryostat has a fire load density of 400 MJ/m². It should also be noted that the 400 MJ/m² fire load density needs about one hour to burn out with a HRR of 80 MW. For an 80 MW fire, about four 3 m × 3 m sized openings (like the manholes) are needed to supply enough oxygen. Using this and constant (non-temperature dependent) thermal properties for steel, the temperature increases for different steel thicknesses (60 mm, 20 mm, and 5 mm) are 321 °C, 964 °C, and 3859 °C, respectively. It should be noted that these results are overconservative, but they give some idea of the case.

A fast conclusion is that the self-supported cryostat (60 mm steel) has no problems with fire, when the structural stability of the cryostat is considered. Some local fires might have some effects, but there is not much local fire load close to the outer cylinder of the cryostat. Most of the fire load is inside the CTS and the port penetrations. At the bottom of the cryostat a fire could be a danger for the structures supporting the CTS and the Tokamak machine locally. For the bioshield-supported cryostat, fires can be a problem for the load bearing capacity. It should be noted that in the case of the bioshield-supported cryostat, the outer walls of the cryostat are not considered to be safety important components as they are not considered to be a barrier for radioactive release as it is the case for the self-supported cryostat. One should keep in mind that during long maintenance breaks the largest structural load to cryostat, the atmospheric air pressure, is not present as there is no vacuum inside the cryostat. Atmosphere weight corresponds to about 1.3 m thick steel that is more than 20 times of the thickness of steel of the cryostat (60 mm at most).

It should also be said that the situation for the bioshield-supported cryostat is not as bad as above simple lumped model calculation shows, as there is much more “lumped” steel inside the cryostat in reality. Furthermore, the CTS divides the volume to two volumes, and the space between CTS and the cryostat outer walls will not contain much fire load. The fire load inside the CTS

is not a problem for the load-bearing capacity of the cryostat, as the inside space of the CTS is quite ventilation-controlled regime and fire sizes are moderate there even if there would be much fire load. The load-bearing capacity of the (bioshield-supported) cryostat should be designed so that it has some robustness, e.g., some parts of the outer wall (incl. wall supports) might be heated to elevated temperatures where the strength of steel is reduced significantly. Nevertheless, more detailed analysis of fires is done using more sophisticated methods as the question is on the nuclear safety, i.e., no radioactive release allowed in any scenario.

Fire simulations: Empty cryostat

OZone [7, 8] is a single room zone fire model. It was used to simulate fires in empty cryostats. The simulations varied various parameters: steel thickness, fire size, openings, steel thermal properties, and the impact of fire area and fire base height. Also, the solid wall solver gridding issues of OZone were checked.

The following tests have been calculated with OZone for an empty cryostat:

- Multi-layer vs. single-layer steel structures
 - OZone solid state heat conduction calculation spatial numerical mesh
- Structural thickness and fire intensity
 - to check the above discussed lumped steel models
- Influence of openings
 - scenario definitions for CFD simulations
- Steel property variations
 - sensitivity checks using fast simulations compared to CFD simulations
- Impact of fire size and height
 - scenario definitions for CFD simulations

In OZone, the square room model of the cryostat was used. The manholes at each wall were combined into one opening, the dimensions of which were 2.2 m × 8 m (four times four holes, i.e., all 16 manholes open). No top RM holes were open.

The steel properties were according to Eurocode 3 [4]. These parameters were used for the material by default, except in the calculations where their variation was separately tested. The heating of the structure was tested by changing the emissivity, conductivity, and specific heat values of steel. Emissivity varied between 0.35 and 0.9, which is a conservative assumption, when possible, soot formation is considered. Higher emissivity resulted in higher heat absorption, but the overall difference remained small. Changes in other considered characteristics were also found to have only a small effect.

OZone simulations were made using different thicknesses of the steel structure and different fire powers. In a 100 MW fire, the 20 mm thick cryostat heated up to 350 °C, while the 60 mm structure remained well below 200 °C. Figure 2 shows the heating of structures of different thicknesses in an 80 MW fire. The increase in thickness significantly slows down the heating, so that the structure can withstand higher fire gas temperatures.

CFAST zone fire model [9] simulations were used to estimate the maximum upper gas temperatures in fires that were burning at the maximum HRR size allowed by the ventilation conditions for varying manhole and top RM hole settings for self-supported and bioshield-supported cryostats. The simulation model, built for an empty cryostat, has the square room geometry. The default steel thickness is 0.02 m, and the emissivity is 0.09. The ambient temperature is 20 °C with 50 % humidity. In all the cases, fire has been created in the model's centre. Several parametric simulations were made, where the steel emissivity, steel thickness and

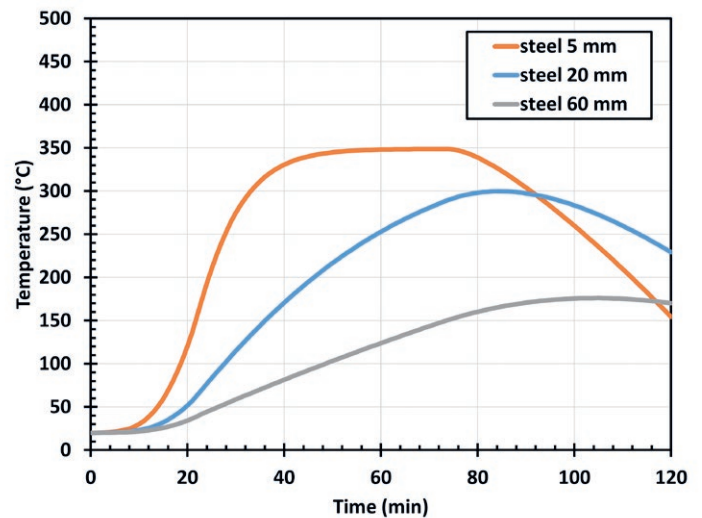


Figure 2: Ceiling temperature of the cryostat with different thicknesses of steel for an 80 MW fire simulated using OZone fire zone model.

the number of open ventilation holes (both bottom manholes and top RM holes) were varied.

Figure 3 shows the upper gas layer temperature in CFAST simulations for different numbers of top openings opened in conjunction with different numbers of manholes opened. In general, the greater the number of top RM holes opened, the lower the temperature of the upper gas layer developed as more smoke is exhausted through those openings. However, a minor discrepancy was observed when all manholes were opened, which supports a fire with the highest heat release rate of 153 MW. The upper gas layer temperature increased when a few top RM openings were opened for such a fire. Such phenomena can happen with fewer opened top RM openings, leading to too much smoke around the fire and oxygen deficiency. However, as more top openings are opened, oxygen deficiency around the fire gets reduced, leading to an increased heat release rate and, thus, higher upper gas layer temperature. There appears to be an optimum number of opened top openings and opened manholes, which can lead to a peak upper gas layer temperature for a given fire size of high magnitude. Advanced software like FDS can be used for more precise study. ►

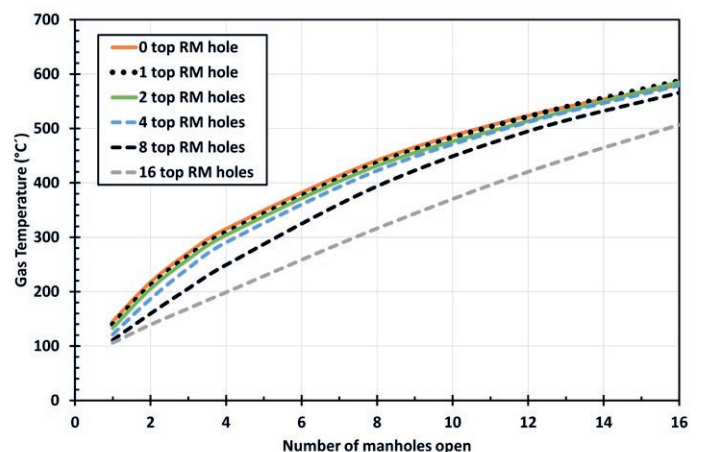


Figure 3: Upper gas layer temperatures in CFAST simulations. Shown are the temperatures actuated in simulations having different number of manholes and top RM holes open.

► It should be noted that the above-mentioned fire zone model simulations might lie outside the validity range of the used models. Thus, CFD based fire simulations using the FDS software were also made for the empty cryostat to see how suitable the above-mentioned zone fire models are to study the present fire scenario. FDS demands remarkably more computational resources than the above-mentioned simpler models. Thus, thorough parametric studies cannot be made using FDS simulations and at least some parts of parametric/sensitivity studies should be made using these simpler models. In short, FDS simulations on empty cryostat were made to produce some validation data for the simple zone fire models.

The fire scenarios studied using FDS were very general in nature. Mainly just the maximum (steady state) heat release rate was determined and some fire growth to the maximum was assumed. The aim of the studies was to address the load-bearing capacity of the cryostat steel. Therefore, the initial growth phase of the fire was no interest in that case. The fire sizes 40 MW, 80 MW, and 160 MW were used in the simulations, and the lengths of the fires were calculated from the assumed 400 MJ/m² fire load density.

In Figure 4, the FDS simulation results for an empty cryostat are shown for both bioshield-supported and self-supported cryostats. Shown are also the results for the simple square geometry version of the bioshield-supported cryostat. The simulations used

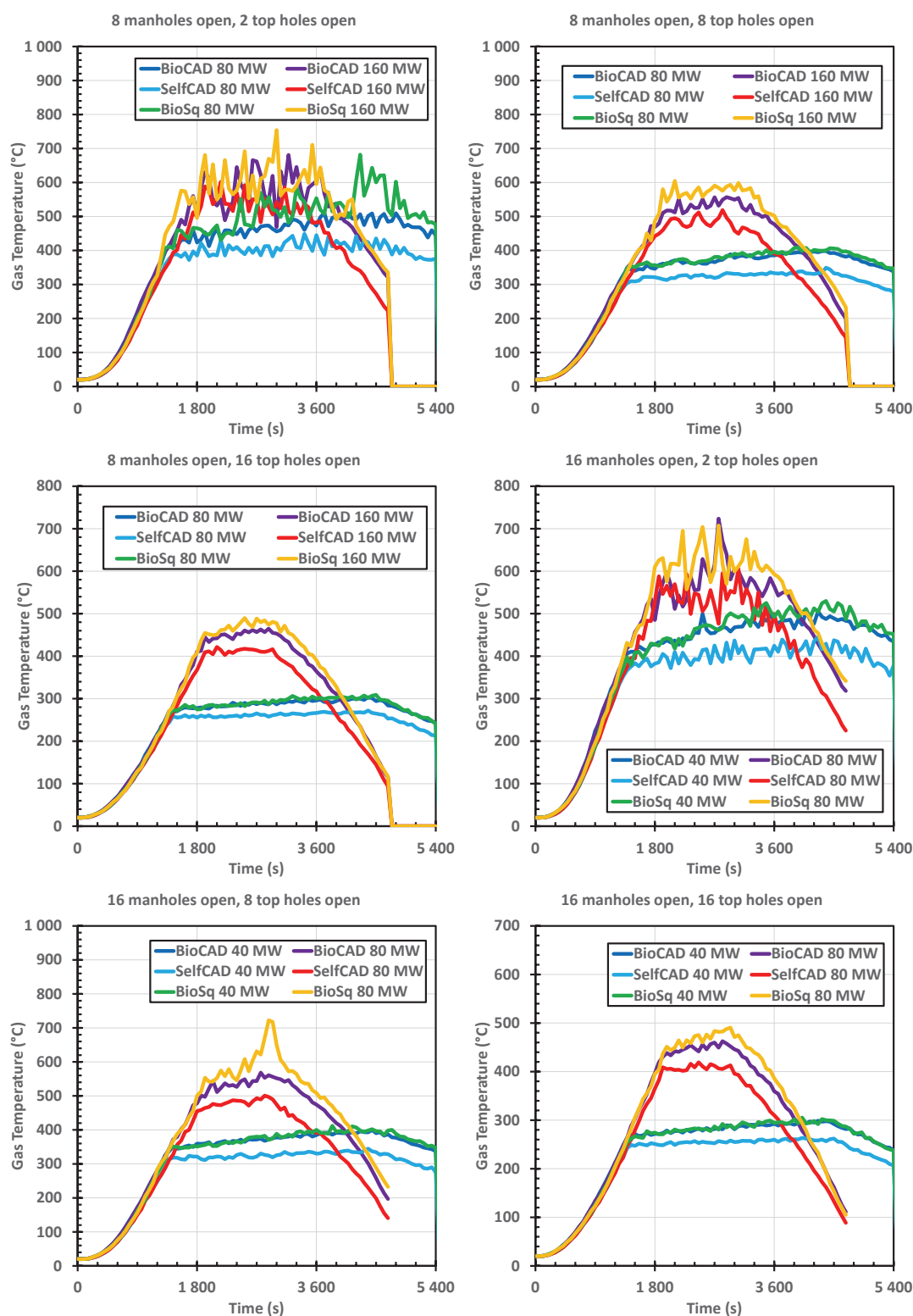


Figure 4: FDS simulation results for the empty cryostat. Shown are the gas temperatures measured at the top of the cryostat for different heat release rates and cryostat models: "BioCAS" bioshield supported cryostat model using CAD geometry, "SelfCAD" self-supported cryostat model using CAD geometry, "BioSq" bioshield supported cryostat model using the simple square geometry.

0.4 m grid resolution in the underlying computational mesh. The numbers of open manholes and open top RM holes, and the maximum HRR were varied.

It is seen that the CAD-based and square geometries give about the same gas temperature. This is especially true for the cases where the fires do not become ventilation controlled. The CAD-based and square geometries have different openings and slightly different area due to the CAD to FDS model transformation with 40 cm resolution. For the cases where the fire is not ventilation controlled, the steel mass and the steel area (outer surface of the cryostat) are the main quantities affecting the gas temperature. So, the outer cylinder area of the cryostat should be close to the square geometry wall areas and ceiling “circle” area close to the square ceiling in the square model. These cannot be exactly matched, but quite close.

As a conclusion, it is seen that the square geometry can be used for parametric studies. However, it should be noted that the fire analysis of the cryostat using zone fire models will not give informative results due to the fact that these models are suitable only to model an empty cryostat. In a real fire case, the cryostat is quite filled with equipment, especially Tokamak-machine and the CTS. The machine acts like a huge heat sink for the fire, and the CTS also divides the volume to two volumes inside each other.

Fire simulations: Cryostat containing Tokamak machine

The information available at the time of the presented analysis did not contain any (detailed) information of the CTS, it was not discussed in the documentation, nor was it present in the CAD drawings. Some information was obtained from other accident analyses like helium ingress CFD simulations, where the CTS had to be modelled, and it was added to the model more like an ad hoc process that used the information on the CTS that is planned for the experimental/research ITER fusion reactor that is already under construction in France. Thus, a couple of FDS simulations were done without the CTS before the other simulations that contained a “self-made” CTS.

The CAD geometries were used for the self-supported cryostat and for the Tokamak machine, respectively. Bioshield-supported cryostat was not modelled. It is assumed that the main aspects of the results would be rather similar to those of the self-supported cryostat. This was partly a practical choice as the CAD models found were fitting better together for the self-supported cryostat than for the bioshield-supported cryostat, i.e., Tokamak machine

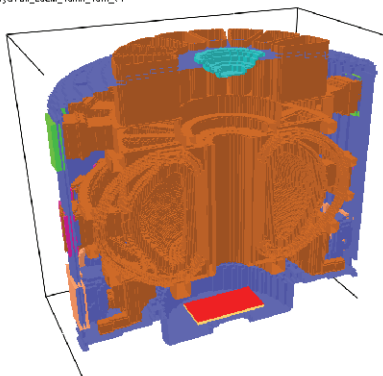
"It is seen that the CAD-based and square geometries give about the same gas temperature. This is especially true for the cases where the fires do not become ventilation controlled."

fitted better inside the self-supported cryostat. The FDS model used 0.2 m grid resolution, because it was found that 0.4 m resolution was too coarse to model the air space inside the cryostat when the machine and the CTS were added there. Some narrow “air channels” were not reproduced when using the 0.4 m resolution. Since not much information was found on VVTS and CTS, their properties were mainly assumed. They were assumed to be 30 mm thick carbon steel, whereas the self-supported cryostat was assumed to be 60 mm thick carbon steel.

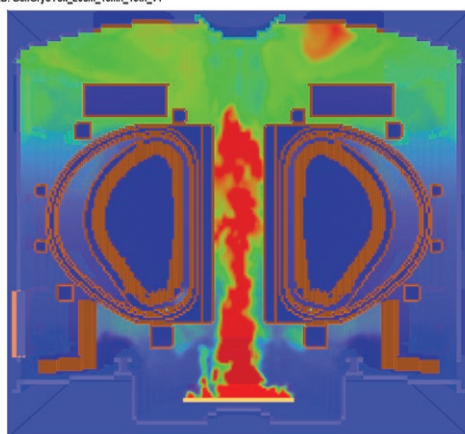
To get definite conclusions, a realistic enough model of the actual case of concern, i.e., the fusion reactor in its operational state, should be analysed. This would include the cryostat, CTS, magnets, VVTS, and VV. In the real reactor, there is much more installations inside the cryostat than now described in the documentation including the CAD drawings, like different pipes, cables, etc. For the present purposes, however, the main shortage is the lack of the CAD drawing of CTS.

In Figure 5, the simulation geometry without CTS and a gas temperature in a simulation are shown. The fire size is 80 MW, and all manholes and top RM holes are assumed to be open. The fire (shown as a red rectangle) is under Tokamak machine at the cylindrical support ring space. It is seen that the results are not realistic for the actual case including CTS. The fire plume is able to rise all the way to the top of the cryostat via the middle empty space of the cylindrical central magnet. The fire is not ventilation controlled in this case. This would lead to a large heating up of the magnets and VVTS walls. In reality, the fire location is quite sealed from the connections to fresh air (manholes and RM ducts). There are just leaks between the CTS and the port penetrations that act as ventilation paths.

CHID: SelfCryoTok_20cm_16mth_16th_v1



CHID: SelfCryoTok_20cm_16mth_16th_v1



Time: 2520.

Slice temp C



Figure 5: Simulation model without CTS (left) and a gas temperature in a 80 MW fire scenario. The “20 °C” blue parts are isolated from the considered cryostat “air space”, these isolated volumes.

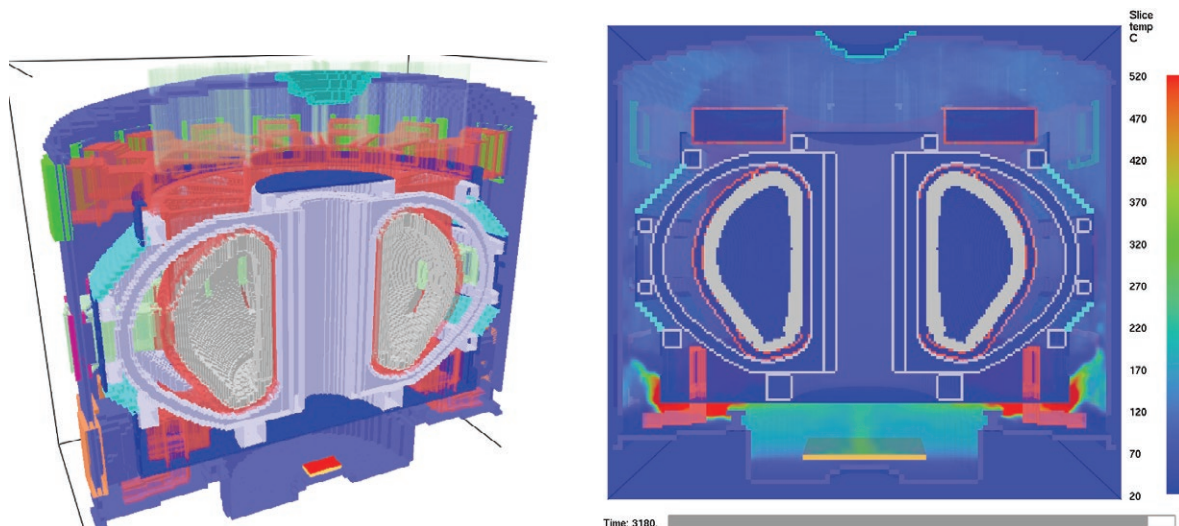


Figure 6: The simulation model of the self-supported cryostat containing CTS and Tokamak machine. The “ad-hoc” CTS is shown as blue and cyan cylindrical surfaces between the magnets and the cryostat cylinder and as blue circular discs at top and bottom parts (left). The gas temperature in the case of 80 MW fire centrally located below CTS when the fire is severely ventilation controlled (right). The ambient temperature space in the middle of the machine is the vacuum vessel that is not connected to the “air space” of the cryostat. Also, some other isolated spaces show up at ambient temperature value.

- The “self-made” CTS model can be seen in Figure 6 and its applicability to fire simulations was examined by doing a test simulation that had an 80 MW fire in the bottom cylinder part (like in the above shown cryostat simulation without CTS). This fire became heavily underventilated already at 600 s, and the actual HRR was about 15 MW, see Figure 7. It is seen that later in the simulation the fire burns close to the manholes where it gets fresh air. This may be considered an artefact due to the input definitions of the simulation, where no auto-ignition temperature was used and where the fire was modelled as a gas burner whose gas release was prescribed. Later simulations used auto-ignition temperature and also the input HRR(t) was chosen so that excess fuel gas amount was reasonable, i.e., about the amount of fuel gas was

released that there was oxygen available. The importance of CTS modelling is clearly seen when the results of simulations with and without it are compared.

In total eight “production” FDS simulations for the final self-supported cryostat model containing CTS and Tokamak machine were made. The fire sizes range from 10 MW to 80 MW according to fire location, all 16 manholes and 16 RM top holes were assumed to be open, and design fires were placed both inside CTS and outside CTS locations. The concentrations of carbon dioxide and carbon monoxide, the gas temperatures, and the soot mass fractions were recorded in the simulations at the top RM hole locations. This information could be used, e.g., when the detection of the fire is considered. Since it takes some time for the gases to

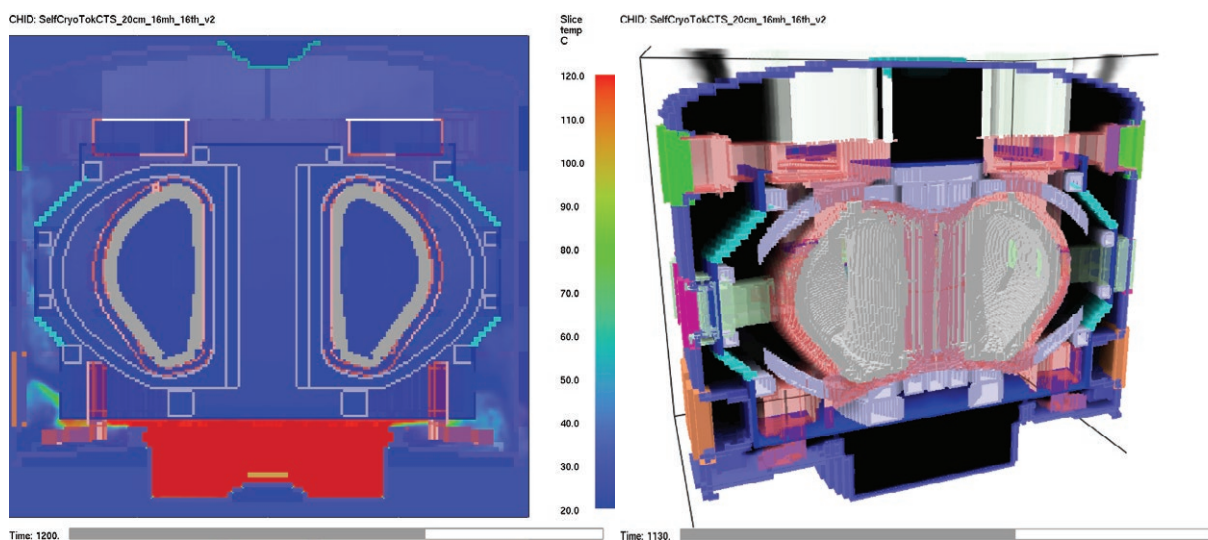


Figure 7: An example of 10 MW fire centrally located below CTS. Shown are the gas temperature (left, note the temperature scale) and the smoke spread (right).

reach the top RM holes, the detection can be delayed. At the present stage of DEMO design, there was no information on the long maintenance period “dry air” ventilation of the cryostat, so no mechanical ventilation was modelled.

The results show that the temperatures at the top part of cryostat are not very high. Even in the 80 MW fire outside CTS case, the average gas temperatures at the maximum HRR phase are below 180 °C. If the fire location is inside CTS, the gas temperatures between the CTS and the outer wall of the cryostat are much colder, remaining under 100 °C. In these cases, the fire becomes ventilation controlled quite soon, and there cannot be very large fires inside the CTS due to the lack of oxygen. Also, the hot gases have a long and complicated flow path to outside CTS and, thus, they cool down during this travel when they are interacting with the cold steel structures.

On the basis of the simulations done, it can be stated that the fires occurring during the long maintenance breaks of the DEMO facility inside the cryostat are not threatening the load-bearing capacity of cryostat globally. Some local problems close to the actual fire might arise, but these can be dealt with a proper design that has enough robustness for the load-bearing capacity. It is a well-known fact that a local fire attached to a steel structure will heat up the structure fast. The steel structures inside the cryostat are massive, and a local fire will heat them up relatively slowly. In the later design phases of DEMO, one should return to this issue, i.e., to check the locations of the actual fire loads present and if these fire loads could be of any danger to the load-bearing steel structures of cryostat or structures inside cryostat supporting the equipment installed there. Another concern is to check the locations of possible fires with respect to the safety important equipment, like some pipes and cables, inside cryostat. The main precaution is to avoid any remarkable ignitions inside CTS. A relatively small fire that does not have much thermal effects, will produce soot and distribute it efficiently “everywhere”. Cleaning operation after a relatively small fire will be tedious keeping in mind that we are discussing vacuum equipment and radiation contamination issues.

Conclusions

In the EUROfusion programme, one of the two main pillars is to develop a concept for the future demonstration fusion power plant DEMO. In this paper, we introduced the fire safety analysis of the cryostat inside the DEMO Tokamak building. The cryostat provides an environment for the vacuum vessel hosting the fusion reaction and the superconducting magnets confining and controlling the plasma within the vacuum vessel.

The cryostat's unique structure, with its various manholes and openings, presents a distinct case for fire safety evaluation. The main goal of the work is to ensure the structural stability of the cryostat in case of fire. In the cryostat, fires can occur only during long maintenance breaks when there is air inside, i.e., no vacuum as in normal operation. Since fire loads inside the cryostat are not yet known in detail, the fire scenarios studied were very general in nature. In the analysis, different tools with varying levels of complexity (analytical calculations, zone fire models, CFD simulation) were used, and their applicability for different purposes were assessed.

Analytical models were used to get crude estimates on the heating of the steel and estimating the size of fires that might have enough heating power to be analysed with more detailed methods. The effect of the thermal properties of steel on the heating of the structure was tested using fire zone model by changing the emissivity, conductivity, and specific heat values. Higher emissiv-

ity resulted in higher heat absorption, but the overall difference remained small. Changes in other characteristics were found to have only a minor effect. Some CFD based FDS fire simulations were done to estimate the applicability of zone fire models for the current purposes, i.e., some zone model simulations were replicated using FDS for an empty cryostat model.

FDS simulations were performed for the cryostat containing the Tokamak fusion machine. It was seen that the CTS needs to be included in the model to simulate the situation realistically. The simulation results showed that fires occurring during long maintenance breaks of the DEMO facility inside the cryostat are not threatening the load bearing capacity of the cryostat globally. Some local problems close to the fire might arise, but these can be dealt with a proper design with enough robustness for load-bearing capacity.

Acknowledgements



This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 – EUROfusion).

Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

References

1. <https://euro-fusion.org/programme/>
2. <https://euro-fusion.org/glossary/demo/>
3. https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf
4. <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
5. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design.
6. <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>
7. Cadorin, J-F. and Franssen, J-M. (2003). A tool to design steel elements submitted to compartment fires—OZone V2. Part 1: pre- and post-flashover compartment fire model, Fire Safety Journal 38, pp. 295–427. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(03\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(03)00014-6)
8. Cadorin, J-F, Pintea, D., Dotreppe, J-C., and Franssen, J-M. (2003). A tool to design steel elements submitted to compartment fires—OZone V2. Part 2: Methodology and application, Fire Safety Journal 38, pp. 429–451. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(03\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(03)00015-8)
9. <https://pages.nist.gov/cfast/>

CFD-Simulation of hydrogen jet fires using fire dynamics simulator

Introduction

The ongoing transition towards low-carbon technologies in energy and transport sectors brings hydrogen close to public and every-day life, thus increasing the need for fire safety engineering tools and methods that can be used for assessing the consequences of hydrogen accidents. Computational fluid dynamics (CFD) simulations are commonly used for fire analyses in the context of building and vehicle fires, but it is unclear how well the weakly compressible solvers, such as the Fire Dynamics Simulator (FDS), can be applied for high-speed jet flames.

CFD simulations of large hydrogen jet flames have been reported using Fluent [1], FireFOAM [2] and in-house codes [3]. All these works avoid resolving the actual nozzle flow using a 'notional nozzle' concept, where the inflow boundary is prescribed at a distance outside the expansion region, typically having a diameter of few cm. But even with the help of notional nozzle, the computational burden of real-scale scenarios may become exhaustive. The goal of this study is to investigate if Lagrangian particles can be used for prescribing the fuel inflow boundary condition for Eulerian solution of high-speed hydrogen jet flame.

Method

Simulations were carried out with Fire Dynamics Simulator (FDS) versions 6.8.0 and 6.9.1. Hydrogen fuel was introduced into the domain as a spray on a surface of a virtual sphere 13–25 cm distance depending on flame length from the actual nozzle. The droplet size distribution was a combination of log-normal and Rosin-Rammler with median diameter of 750 μm . For most simulations, the opening angle was 10° with Gaussian mass flux distribution internally. Droplet speed were determined from the experimental conditions according to jet speed approximation methods. After evaporation, the combustion was calculated using a single-step, mixing controlled model and ra-

diation using a RadCal-based, grey model. Optically thick medium was assumed.

Simulations were performed for a time-dependent vertical jet flame of Schefer et al. [4] and two horizontal flames of Ekoto et al. [5]. The Schefer's experiment, where the fuel mass flow decreased from 359.3 g/s to 11.2 g/s during a 400 s period, was simulated as six steady flames with constant boundary conditions. The size of the computational domain varied with flame size. Sides and top of the domain were open and the bottom was defined either as an inert solid surface or open domain depending on the simulation case. Spatial resolution was 10 cm in the vertical flames and non-uniform 10–40 cm in the horizontal flames, with number of cells varying in range 1–15 million, distributed in 5–165 meshes for parallel processing.

Results and Discussion

Comparison of the measured and computed flame lengths (Figure 1 left) shows that the simulated flames reproduce well the experimental trend. Using 1500 K temperature as a flame threshold [3] is more comparable than the heat release rate – based flame tip approach. The simulated center-line temperatures showed 100–200 K underpredictions at peaks but very close to the experimental values close to the flame tip. Sensitivities to various input parameters were determined.

Computed radiative heat fluxes in various locations around the two horizontal flames are compared against their measured counterparts in the right side of Figure 1. Assuming a 7.1 % combined experimental uncertainty, the simulation uncertainty measures as 26 % positive bias and 43 % relative standard deviation. The results demonstrate that the Eulerian-Lagrangian approach can be used for modelling high-speed sources of hydrogen in the context of fire CFD.

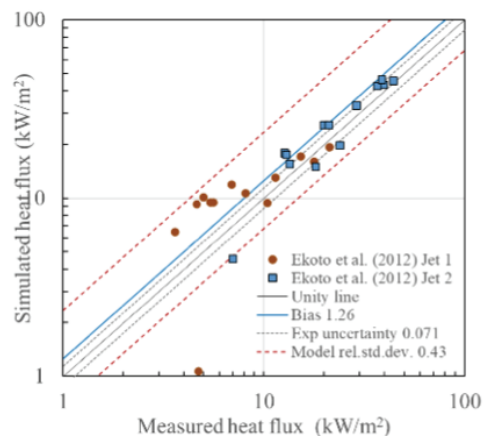
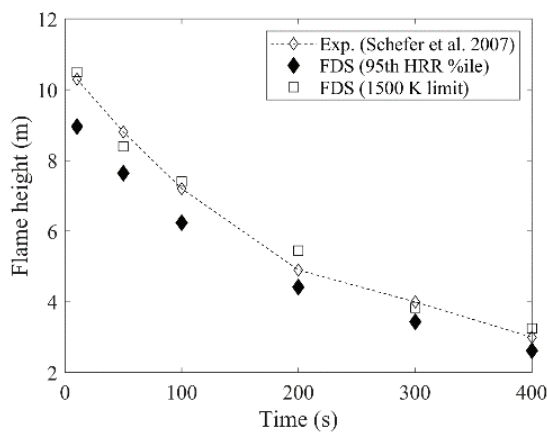


Figure 1: Comparison of measured and computed heights of vertical flames [4] (left) and radiative heat fluxes from horizontal flames [5] (right).

Acknowledgements

This Master's thesis was made at the Aalto University, in project "Hydrogen combustion simulation tools and experiments – HEN-NES". The project was funded by Business Finland.

References

1. S.L. Brennan, D.V. Makarov, V. Molkov, LES of high pressure hydrogen jet fire. *J. Loss Prevention Process Ind.* 22 (2009) 353–359.
2. C.J. Wang, J.X. Wen, Z.B. Chen, S. Dembele, Predicting radiative characteristics of hydrogen and hydrogen/methane jet fires using FireFOAM. *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (2014) 20560–20569.
3. J.-L. Consalvi, F. Nmira, Modeling of large-scale under-expanded hydrogen jet fires, *Proc. Combust. Inst.* 37 (2019) 3943–3950.
4. R. Schefer, W. Houf, T. Williams, B. Bourne, J. Colton, Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames, *Int. J. Hydrogen Energy* 32 (2007) 2081–2093.
5. I.W. Ekoto, W.G. Houf, A.J. Ruggles, L.W. Creitz, J.X. Li, Large-scale hydrogen jet flame radiant fraction measurements and modeling. *Int. Pipeline Conference* 45158 (2012) 713–724.

Reduced scope modelling of nuclear power plants' ventilation system and its interaction with fire

Abstract

A fire in a confined but mechanically ventilated environment (CMVE) behaves differently from an open environment which has unlimited air supply. CMVEs are typical of nuclear power plants, where complex ventilation networks enable pressure cascades to ensure the confinement of gaseous and particulate releases during accidents or fires. When a fire happens in a CMVE, pressure increases due to hot gas expansion, which can alter the ventilation conditions. Altered ventilation changes the dynamics of the availability of fresh air or exhaust of smoke to fire, leading to a change in the fire's heat release rate. To correctly estimate the heat release rate of a fire through simulations, it becomes of the utmost importance that one has a reliable ventilation system model so that it correctly interacts with a fire. At times, the lack of data on ventilation system specifics hinders building a reliable ventilation system model for simulations. In such cases, one has to rely on the test data to extract values and parameters for a simplified ventilation system model. This work presents a systematic approach to finding required values and parameters for reduced scope modelling of a ventilation system such that the interaction of a ventilation system with a fire can be reliably studied. CFD-based Fire Dynamics Simulator software has been used, and a test case has been taken from the OECD NEA FAIR project. The test case has a fire in a compartment, leading to pressure variation and consequent change in volumetric flow rates in ducts. From the test data, a ventilation system with a reduced scope has been built, which led to satisfactory pressure development and volumetric flow rates in ducts in simulation compared to actual test results.

Introduction

Built environments often have rooms or compartments that are well separated but simultaneously connected through a complex network of ventilation systems. The classic case of such a setup is nuclear power plant compartments, where compartments are

sealed from each other but still connected through a complex network of ventilation systems. Such systems, through pressure cascades, ensure the confinement of possible gaseous and particulate releases in case of an accident or a fire. However, in the case of a fire, pressure increases in the compartment due to hot gas expansion, which can alter the ventilation conditions¹. For example, smoke may enter the inlet branch and propagate against the nominal flow direction, thus reducing fresh air flow into the space. In such cases, after some time, the heat release rate starts to decrease due to the reduction of fresh air, the pressure in the room decreases, and the fresh air flow into the room starts again². The subsequent cyclic pattern affects the flow in the ventilation ducts and pressure in the room, as noted in various test cases³. High-pressure development is also a concern⁴. As the unwanted passage of smoke and high-pressure development can endanger confinement and equipment⁵ and possibly life safety, it becomes important to computationally study and reproduce the interaction of ventilation systems with fire to check its undesirable effects.

A reliable ventilation system model must be built in fire simulation software to acceptably predict duct pressure and flow rates. Unfortunately, due to a lack of data on the ventilation system, such as duct dimensions, friction losses, roughness, and, most importantly, the fan curve properties that govern it, one has to rely on test data, specifically the volumetric flow rates in ducts and the pressure in the compartment as they are interrelated. From such data, values and parameters can be extracted to build a simplified ventilation system for the study. Unfortunately, no standard method exists to analyse such data and extract the required parameters. Manufacturers generally provide operating parameters for the ventilation fans, but the pressure range may not cover the high pressures of the fire situation. Besides the lack of standard data, additional leakages further exacerbate the problem⁶. A modelled network in simulation software typically contains many simplifications, and the missing data and their sensitivity are estimat-

ed through simulation trials⁷. As fire behaviour is strongly coupled to the ventilation system performance, it is of utmost importance to have reliable models of the complex ventilation systems through an established and proven method.

This study presents a systematic approach to finding unknown parameters for the reduced scope modelling of a complex ventilation system to have a reliable fire simulation. The approach includes a procedure for parameter estimation for the fan curve, simplifying ducts for reduced scope, and optimising a duct property to achieve the target flow and pressure conditions in the compartment. The study has been performed using the Fire Dynamics Simulator (FDS)⁸ for a test case taken from the OECD NEA FAIR project. In the FAIR project, fire tests are conducted in a built-in facility operated by the French l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR), formerly IRSN, at Cadarache, France. The test, named FR_HVE_D1⁹, is selected from a series of tests conducted under the HVE (Hot and Vitiated Environment) campaign of the FAIR project, which aims to study fire behavior in hot and vitiated conditions. The chosen test case has pressure variation in the fire test compartment, consequently affecting the flows in the inlet and outlet ducts during a fire and the peak pressure reached 552 Pa in the test. It is to be noted here that only selected/limited data are stated in this paper due to the confidentiality of the project.

Fire Test Setup

The test was conducted in one of the rooms of the ASNR DIVA facility (a reinforced concrete building). The room had approximately a volume of 120 m³ (length ≈ 6 m, width ≈ 5 m, height ≈ 4 m), and its doors were kept closed during the test. The thickness of its concrete wall was 0.3 m. The side walls were protected with concrete panels (thickness = 0.05 m). The ceilings were protected with three layers of insulation panels. The outermost material facing the floor was a calcium silicate monalite panel (thickness ≈ 0.026 m), the middle material was calcium silicate board panel (thickness ≈ 0.01 m), and the third material was rock wool thermipan panel (thickness ≈ 0.1 m).

The room had one air inlet, and one air outlet connected to a complex industrial ventilation network equipped with fans (Figure 1). The cross-sections of the air inlet and air outlet were rectangular, with a height of 0.6 m and a width of 0.3 m. The inlet section was located in the upper part of the room, and the outlet section was in the lower part at the height shown in Figure 1. Figure 1 also shows the other ducts for other rooms in the DIVA building, but as they were closed during this test, their connections to the rooms are not shown. The target flow in the fire test room was aimed at 1800 m³/h.

A fire source pan was placed over a masonry structure at an elevated height in the middle of the room. Dodecane (C₁₂H₂₆) was used as a fuel with a total volume of 40 liters and put in the fire source pan, which had a pool area of 0.8 m². The combustion enthalpy of the fuel was 44,000 kJ/kg. The fuel was ignited using a propane burner that powered 10 kW.

Many variables were recorded during the test and calculated post-test. Variables relevant to this work were heat release rate (or mass loss rate), pressure development in the room, and volumetric flow rates in the ducts during the test. Moreover, the room's leakage was tested for under-pressure and overpressure before the test. The leak flow rate at overpressure of 500 Pa was found to be 20.5 m³/h, and at under-pressure of -500 Pa it was 23.7 m³/h. Such values are required to be used to model leakages during a fire in the simulation. Furthermore, a steady state condition was established with the target airflow to produce a stable pressure condi-

tion in the room before the fire was ignited. At steady conditions, the established pressure was around -110 Pa with an inlet airflow rate of 1758 m³/h and an outlet airflow rate of 1815 m³/h. There was also an undetermined leak during the steady state condition that likely contributed to balancing the mass conservation respecting the uncertainty in the measurement of volumetric flow rates. Steady pressure was required to be established in the simulation with such airflow rates to validate the ventilation model for the satisfactory establishment of steady conditions before a fire starts in the simulation.

Numerical Modeling

This study uses the CFD code Fire Dynamics Simulator (FDS, version 6.8.0) for numerical simulations. FDS employs a Large Eddy Simulation (LES) based code to model thermally driven low-Mach number flow. The focus is on heat and smoke transport from fires within a computational domain, where boundary conditions are applied to both flow boundaries and solid surfaces with specified or solved thermal characteristics. For detailed descriptions of various theoretical models and numerical implementations, interested readers can refer to the software literature^{8,10}. The default simulation mode of FDS, known as "Very Large Eddy Simulation" (VLES) mode, along with its default models and sub-models, has been utilized in the various simulations unless specified otherwise. Below is a summary of some relevant theories relevant to the ventilation system modelling.

FDS uses an HVAC solver based on the MELCOR thermal solver (solver is coupled to FDS). MELCOR is a computer program used to simulate accidents in nuclear power plant containment buildings. Under MELCOR, an HVAC system is represented as a network of ducts and nodes. A node signifies the point where a duct connects to the FDS computational domain (FDS fluid solver) or where multiple ducts converge, such as at a tee joint. A duct segment in the network represents any uninterrupted continuous flow path, which may include multiple fittings (elbows, expansions, contractions, etc.) and may have varying cross-sectional areas along its length. As nodes have no volume, the mass and energy conservation equations dictate that whatever flows into a node must also flow out. In its default operational mode, the transport

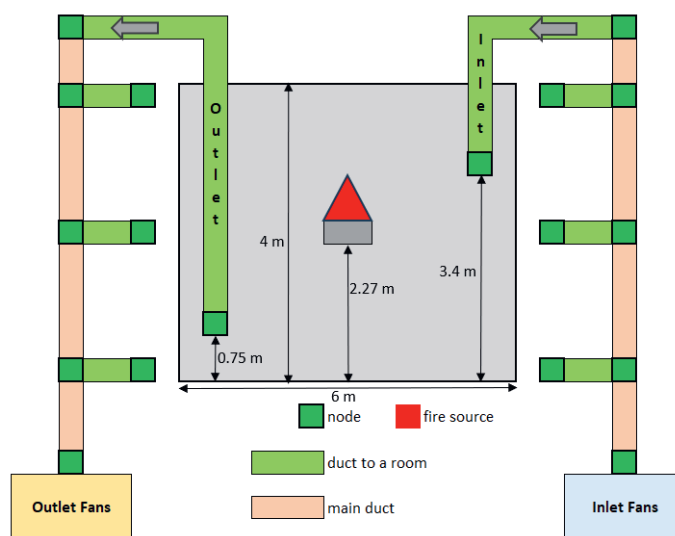


Figure 1: Schematic of fire test room with ventilation network and fire source (side view).

- delay of mass and energy along the length of a duct is not considered. The response of ventilation system is sensitive to the loss coefficient which is calculated as

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho u^2} \quad \text{equation 1}$$

Where K is the loss coefficient for the duct, ρ is the gas density (kg/m^3), ΔP is the pressure difference between two nodes (Pa), and u is the mean velocity (m/s). FDS uses “quadratic” fan model as the pressure is proportional to the square of the volume flow rate formulated as

$$V = V_{\max} \text{sign}(P_{\text{stall}} - P) \left(\frac{|P - P_{\text{stall}}|}{P_{\text{stall}}} \right)^{0.5} \quad \text{equation 2}$$

Where V is the volumetric flow rate of the fan (m^3/s), $V_{\max}$ is the maximum volumetric flow rate of the fan (m^3/s) when there is no pressure difference, P_{stall} is the stall pressure of the fan (Pa), and P is prevailing pressure in the compartment (Pa). For FDS, it is essential to provide the values of $V_{\max}$ and P_{stall} for a fan being used in a simulation.

Moreover, FDS uses leakage model as shown

$$V_{\text{leak}} = C_d A_L \text{sign}(\Delta P) \left(\frac{2\Delta P}{\rho_{\infty}} \right)^{0.5} \quad \text{equation 3}$$

Where V_{leak} is the volumetric flow rate of the leak (m^3/s), C_d is the discharge coefficient (1 by default), ΔP is the pressure difference (Pa) between two compartments, ρ_{∞} is the ambient density (kg/m^3), and A_L is the area of leakage (m^2).

$$A_L = A_{L,\text{ref}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ref}}} \right)^{n-0.5} \quad \text{equation 4}$$

Where $A_{L,\text{ref}}$ (m^2) is the reference leak area at reference pressure ΔP_{ref} (Pa), and n is the leak pressure exponent. For any duct, K needs to be either estimated from the test results or optimized to get the required pressure in a compartment depending upon the approach to making the ventilation model. Moreover, the two fan parameters, i.e., $V_{\max}$ and P_{stall} needs to be determined for both inlet and outlet fans after quadratic curve fitting to the pressure vs volumetric flow rate data. Furthermore, n also needs to be determined from the test results concerning under-pressure and over-pressure conditions.

Approach

The reduced-scope modelling approach focuses on one single compartment at a time. It does not account for the entire ventilation system network connected to other compartments. Instead, it incorporates only one straight duct for an inlet and one straight duct for an outlet, each starting from an ambient condition. The duct's loss coefficient is optimised in conjunction with the fan properties given for a duct such that initial steady pressure in the compartment and volumetric flow rates in the ducts are established as noted before the start of a fire in the test (steady state values). With such an approach, the uncertainty brought by the entire ventilation system network and its unmeasurable parameters is avoided, and the reliability of a reduced-scope ventilation model for a single compartment is improved. However, selecting fan parameters and, subsequently, the loss coefficient plays a central role in this approach. If, with the chosen fan parameters, the optimisation of the loss coefficient is not able to produce the required steady pressure in the compartment, then this method will not be able to produce a reliable ventilation model. In such cases,

fan parameters must be rechecked for their correct estimation and the source data from which it is estimated. Source data means the pressure vs volumetric flow rate data, where the pressure of the compartment is recorded against the volumetric flow rates in the ducts. Such data comes in two forms. The first form (Data_set_1) is the full-scale data collected from the fire test covering the room's pressure against the ducts' volumetric flow rates. Such data generally has lots of noise, which needs data preprocessing before it is used for any analysis. The second form (Data_set_2) is cold data collected covering the pressure vs volumetric flow rates in the ducts where pressure change in the room is brought by varying the opening valves for inlet and outlet ducts. No fire is involved in the second form of data collection, and it has been noted that the noise is almost non-existent, although there is no problem for such data to undergo data preprocessing.

The approach broadly involves three steps. The first step concerns data preprocessing. The second step involves fitting a quadratic fan curve to the preprocessed data to find the fan parameters like $V_{\max}$ and P_{stall} for the inlet and outlet fans. In the third step, the loss coefficient for each duct is optimised in conjunction with given fan parameters so that initial steady pressure in the compartment and volumetric flow rates in the ducts are established as noted before the start of a fire in the test (steady state values). The steps are discussed below.

Data Preprocessing

The raw data of pressure vs volumetric flow rates (till approximately 3000 s as fire almost ended by 3000 s) were preprocessed using Python program (3.11.7) using a few of its libraries. PANDAS (2.2.1) library was first used for data reading and structuring. PYOD (1.0.9) library was used for outlier detection. From the PYOD library, the KNN (k-Nearest Neighbors) outlier detection technique was used to detect the outliers, which played a crucial role in cleaning Data_set_1, which had many outliers. KNN was made to work at 0.05 contamination level with mean method for 5 neighboring points based on Euclidean distance. The detected outliers were removed from the data set without replacing them with suitable values or interpolation. Some other miscellaneous steps were also taken, which did not have much effect on the data compared to the ones mentioned before. Raw and clean data for Data_set_1 is shown in Figure 2. The data processing has removed 397 data points, which were primarily flagged by the KNN outlier detection technique. Data_set_2 had only five data points which did not get affected from data preprocessing and are shown in Figure 2.

Quadratic Fan Curve Fitting

Under quadratic curve fitting, preprocessed data has to be fitted with a quadratic curve such that curve intersection with x axis (volumetric flow rate axis) gives $V_{\max}$ and with y axis (pressure axis) gives P_{stall} for a fan. Quadratic equations generally assume a form of $ax^2 + bx + c$. However, the quadratic fan curve should be the same as the fan model formulated by the numerical software being used. If equation 2 is rearranged for the case of no reverse flow in ducts for normal operation of the fan ($P_{\text{stall}} > P$), we get

$$P = -\frac{P_{\text{stall}}}{V_{\max}^2} V^2 + P_{\text{stall}} \quad \text{equation 5}$$

Equation 5 can be represented as $P(V) = aV^2 + b$ where $a = -\frac{P_{\text{stall}}}{V_{\max}^2}$ and $b = P_{\text{stall}}$. To fit such specific quadratic curve, SKLEARN library (1.4.2) of python programming language was used from which polynomial regression fitted the required curve to the da-

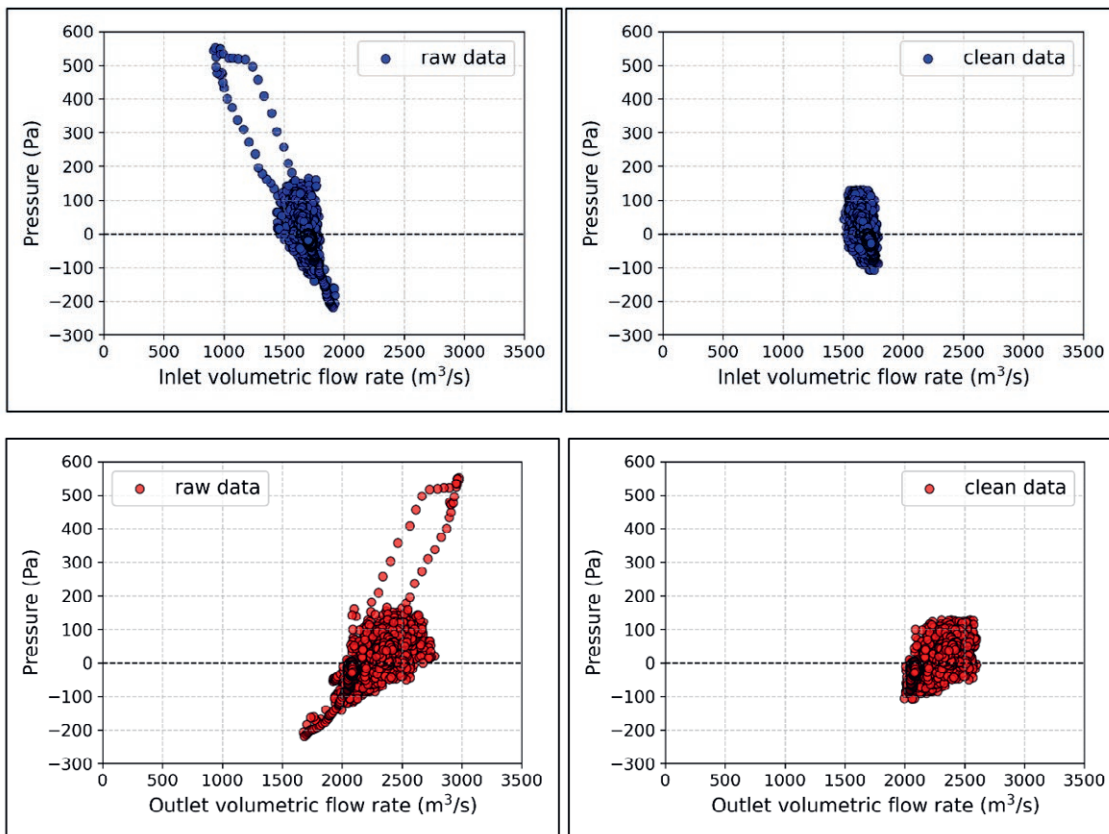


Figure 2: Raw data and clean data for fire test data (Data_set_1).

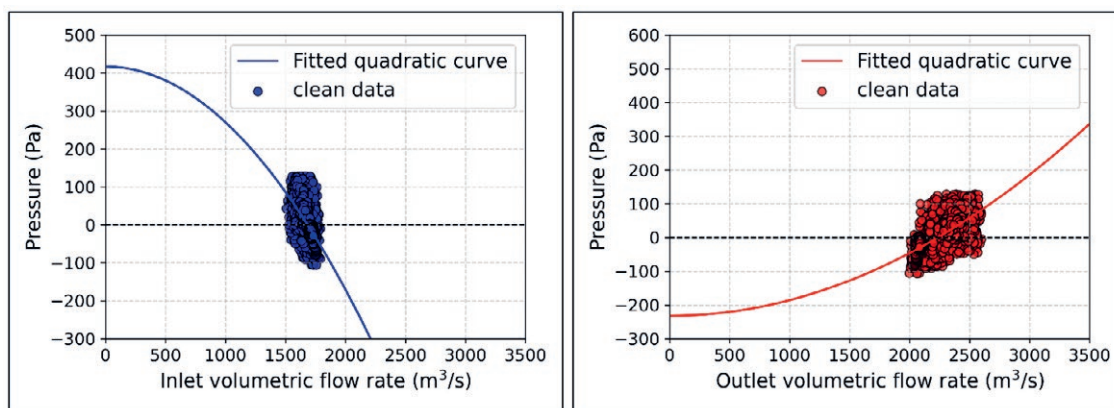


Figure 3: Quadratic curve fitting to the fire test data (Data_set_1).

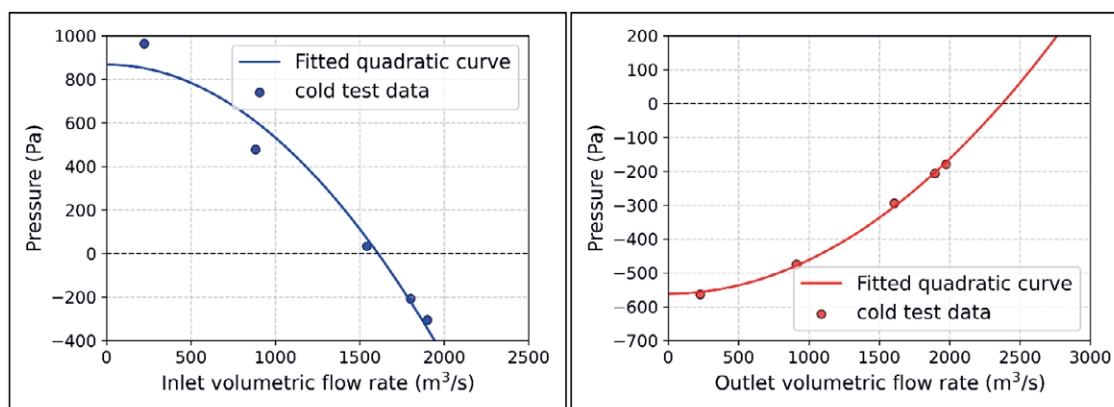


Figure 4: Quadratic curve fitting to the cold test data (Data_set_2).

ta and gave the values of a and b . The quadratic curve fitting for Data_set_1 and Data_set_2 is shown in Figure 3 and Figure 4, re-

spectively. Table 1 shows the parameters of the fan extracted from the quadratic curve fitting and respective R^2 values.

	V_{max} (m ³ /h)	P_{stall} (Pa)	R^2 value	Remark
Data_set_1: Inlet fan	1684	417	0.27	Low R^2 value, poor fitting
Data_set_1: Outlet fan	2235	-232	0.39	Low R^2 value, poor fitting
Data_set_2: Inlet fan	1607	868	0.97	Very high R^2 value, very good fitting
Data_set_2: Outlet fan	2373	-561	0.99	Very high R^2 value, very good fitting

Table 1: Parameters of fan extracted from quadratic curve fitting and R^2 values.

- From Table 1, it can be noted that the R^2 for Data_set_1 was very low compared to the for Data_set_2. Thus, fan parameters obtained from Data_set_2 were used for the fans for the next step where loss coefficient for inlet duct and outlet duct was optimised.

Loss Coefficient Optimisation

To optimise the loss coefficient, an FDS model for the room was built with ducts and nodes, as shown in Figure 5, with reduced-scope modelling. The ducts with fans were directly connected to the ambient nodes. In the FDS model, the cross area of the ducts (vent size) was kept the same, leading to the following relationship (derived from equation 1):

$$\frac{K_{inlet_duct}}{K_{outlet_duct}} = \frac{v_{outlet_duct}^2}{v_{inlet_duct}^2} \quad \text{equation 6}$$

Using equation 6, the inlet duct's loss coefficient was found to be approximately 1.07 times that of the outlet duct. From the test results, the steady state condition for pressure was -110 Pa (target pressure, P_t) with the inlet volumetric flow rate of 1758 m³/h and the outlet volumetric flow rate of 1815 m³/h. Multiple iterations were done to achieve the target pressure in the simulation by optimising the loss coefficients. In all such iterations, the ratio of the duct's loss coefficient was preserved, and the first iteration started with a loss coefficient of 1.07 for the inlet duct and 1 for the outlet duct. An objective function was defined to govern the convergence of pressure in the simulation, P_s to the P_t . In this case, the objective function, $f(P_s)$ was formulated as follows:

$$f(P_s) = P_s - P_t \quad \text{equation 7}$$

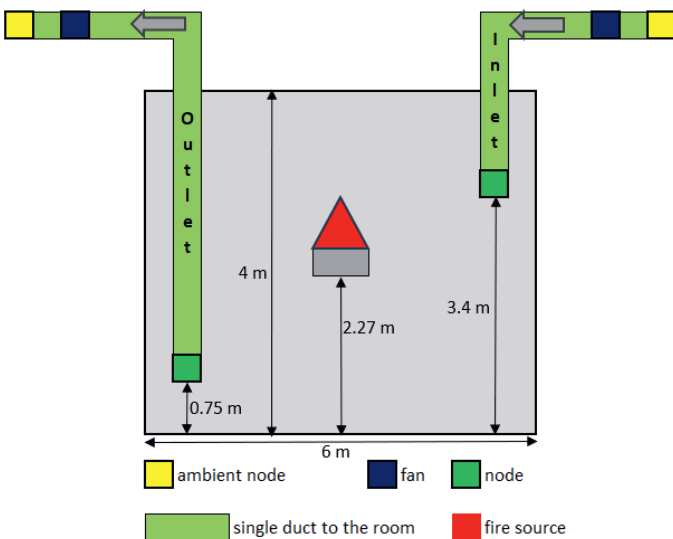


Figure 5: Schematic of reduced-scope ventilation network for the room.

Such pressure difference expressed by the objective function was multiplied by a tuning factor (T), which determined the changes to be made in the loss coefficient. The tuning factor draws an analogy to the Hyper-parameter concept in machine learning, which defines the learning rate for the model to learn and optimise. The tuning factor can be viewed as an external configuration variable that has to be chosen by the user before optimization is carried out. It has nothing to do with the physical parameters of the simulations.

Starting with a loss coefficient of 1.07 for the inlet duct and 1 for the outlet duct, $f(P_s)$ was calculated from simulation. If $f(P_s)$ was found to be high and unacceptable, it had to be reduced with next iteration (simulation). In such a case, $f(P_s)$ was multiplied by T to get $f(P_s)T$ for the next iteration in which the loss coefficient was reduced by $f(P_s)T$ and $f(P_s)$ was again calculated from the simulation. If $f(P_s)T$ was still high, it had to be reduced. Such a process was repeated until we get the acceptable $f(P_s)$. It should be noted that $f(P_s)$ can also be defined in terms of pressure percentage difference, which will lead to a different scale of T . Table 2 shows the different values of loss coefficients during convergence. As the tuning factor 0.05 slowed the convergence at the end, the tuning factor 0.1 was used to check for any improvement in the result, which led to a slightly better result. Thus, the target pressure very close to -110 Pa (0.05 % error) was established in the simulation with an inlet volumetric flow rate of 1844 m³/s (-5 % error) and an outlet volumetric flow rate of 1815 m³/s (+2 % error). The respective values of loss coefficients were used in the fire simulation. It is important to note that during a trial, when the loss coefficient was optimized using the fan parameters from Data_set_1 to achieve a steady-state condition, the lowest pressure recorded was approximately -50 Pa. This value remained significantly higher than the target of -110 Pa.

Computational Domain and Simulations

Figure 6 shows the computational model. The domain had a uniform mesh of 0.2 m grid size, and the room was built with $x=5$ m (width), $y=6$ m (length), and $z=3.8$ m (height). The black box in the room is an elevated masonry structure on which the fire pan is kept. The heat release rate of the fire was prescribed for FDS (not predicted using FDS), which means that the heat release rate computed by FDS should be the same as the prescribed values if no under-ventilated conditions are encountered in the simulation run. The green patch on the right side of the room is an inlet vent, and the red patch on the left side is an outlet vent. Both vents had a 0.16 m² cross-section area, and the respective ducts had fan properties and loss coefficients. The floor, walls and ceiling had concrete properties. Additional concrete and insulation panel properties were applied on walls and ceilings, as stated in the earlier section (Fire Test Setup). The fire was prescribed in the simulation based on the fire test data. A leak pressure exponent

Tuning_factor	0.05
Ratio	1.07
P_t	-110

Iteration	K _{inlet_duct}	K _{outlet_duct}	P _s	P _s -P _t	(P _s -P _t)/P _t %
0	1.07	1	-13.0	97.00	88.18%
1	6.24	5.85	-71.0	39.00	35.45%
2	8.31	7.80	-88.5	21.49	19.54%
3	9.46	8.87	-97.0	13.00	11.82%
4	10.15	9.52	-101.0	9.00	8.18%
5	10.63	9.97	-104.0	6.00	5.45%
6	10.95	10.27	-107.0	3.00	2.73%
7	11.11	10.42	-108.0	2.00	1.82%
8	11.22	10.52	-108.0	2.00	1.82%

Table 2: Iteration table for pressure convergence with different tuning factors.

Tuning_factor	0.1
Ratio	1.07
P_t	-110

Iteration	K _{inlet_duct}	K _{outlet_duct}	P _s	P _s -P _t	(P _s -P _t)/P _t %
0	1.07	1.00	-13.0	97	88.18%
1	11.41	10.70	-109.3	0.68	0.62%
2	11.48	10.77	-109.8	0.20	0.18%
3	11.50	10.79	-109.9	0.10	0.09%
4	11.51	10.80	-109.9	0.06	0.05%

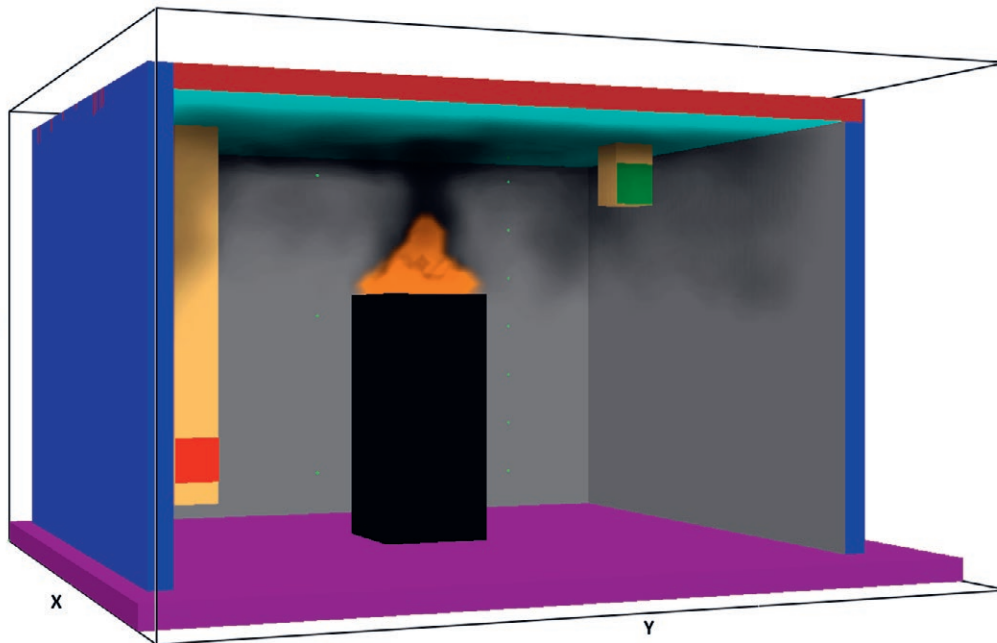


Figure 6: Computational domain with fire, inlet vent, and outlet vent.

of 0.822 was used for the leakage model for the room. It was estimated using two sets of estimated values of leakage area against their respective pressure in the room. ($(A_L \approx 0.0004 \text{ m}^2, \Delta P \approx 2000 \text{ Pa})$, $(A_L \approx 0.0005 \text{ m}^2, \Delta P \approx 4000 \text{ Pa})$) Such values were obtained by analysing the leakage-related data.

Results and Discussion

Figure 7 and Figure 8 compare the pressure and volumetric flow rate of the test with those of the simulation. It can be noted that the prediction of the pressure matches the test result well, with a slight delay at some time points. Moreover, the pressure reading from the test has more noise than the simulation. Regarding the volumetric flow rates, the simulation results profile matches the test results well. However, the inlet volumetric flow rate has an underprediction of around 11 % (average estimation between 500 s and 2500 s). Overall, the interaction of the fire with the ven-

tilation system is satisfactorily captured, given the reduced scope for modelling. If such interaction had not been satisfactorily captured, then the computation of the heat release rate by FDS for the prescribed fire would not have been almost perfectly replicated, as shown in Figure 9. It has been noted in the trial simulations that if there was a considerable mismatch between the volumetric flow rates of the test and simulation leading to under-ventilated conditions, then the heat release rate computed by FDS did not match the prescribed values for heat release rate. Figure 10 shows the mesh sensitivity study for the pressure development using 0.2 m grid size and 0.1 m grid size which hardly shows any change in the result. Mesh refinement to 0.1 m grid size did not significantly change the result, even for volumetric flow and heat release rates. However, it took more computational time than 0.2 m grid size computation. Given the extra computational time required for the 0.1 m grid computational domain, the results produced by the simulations with a 0.2 m grid size are considered acceptable for the outputs considered in this study.

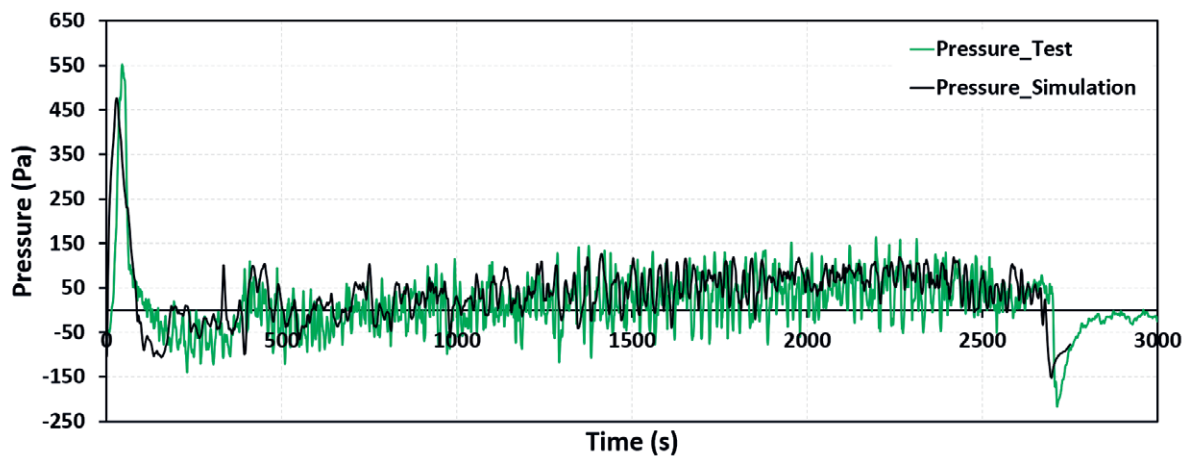


Figure 7: Pressure development in fire test and simulation.

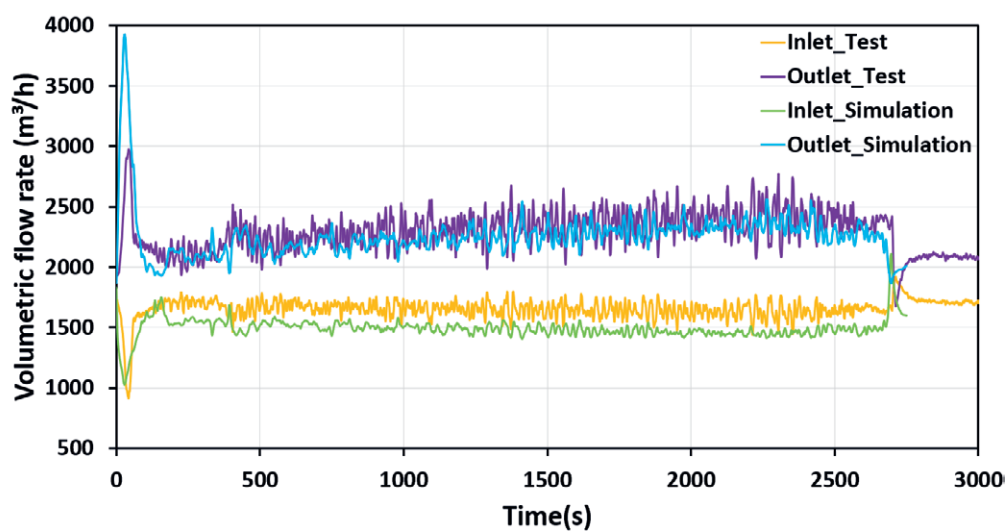


Figure 8: Volumetric flow rate development in fire test and simulation.

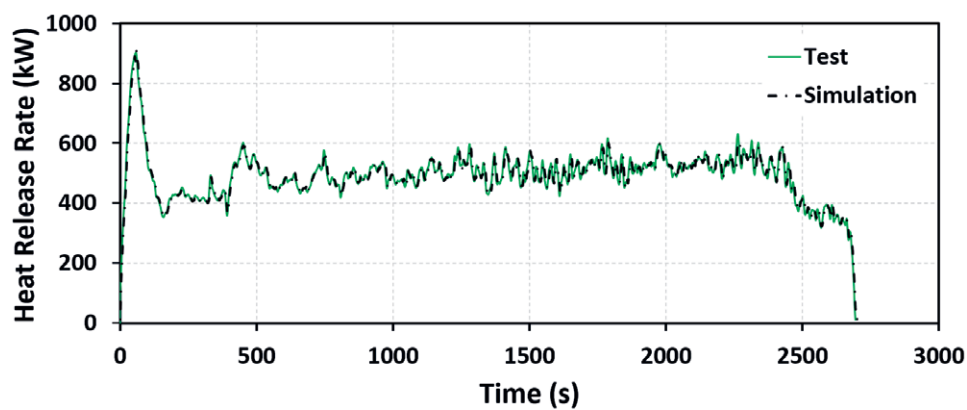


Figure 9: Heat release rate in fire test and simulation.

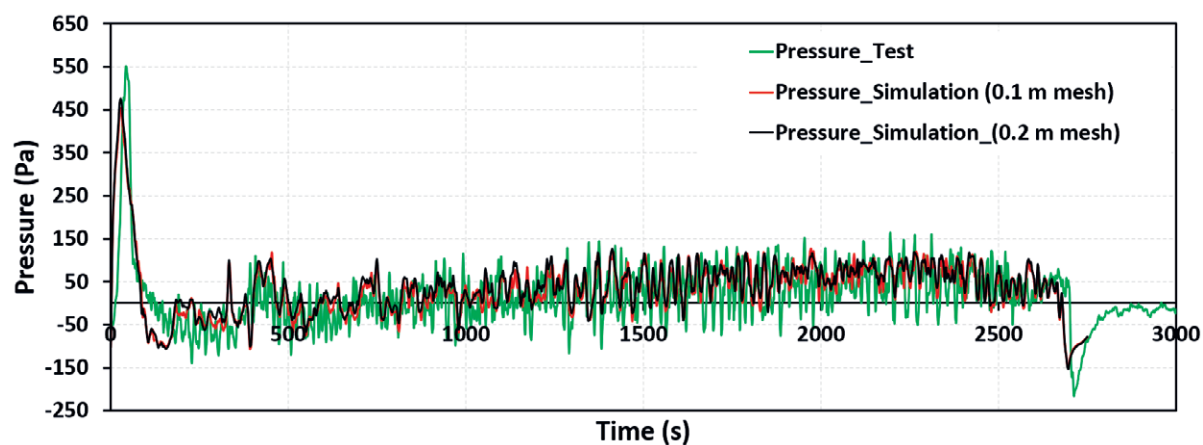


Figure 10: Mesh sensitivity study for pressure development.

Conclusion

Assessing the pressure development of possible fires is critical for the nuclear industry, as pressure development and its effect on the volumetric flow rates of a duct can endanger the confinement setting, equipment safety, and possibly life safety in the facility. In a computational study, a robust ventilation system model must be built in fire simulation software to acceptably predict pressure in the compartment and flow rates in ducts. However, insufficient data on duct dimensions, friction losses, duct roughness, leakages, and fan curve properties limit such a process. As a result, one has to rely on test data, particularly volumetric flow rates and compartment pressure, which are interrelated. This data can help extract parameters for a simplified ventilation model. However, a standard method for analysis does not currently exist to analyse such data and extract the required parameters systematically. This study has presented a systematic approach to finding unknown parameters and required variable values for the reduced scope modelling of a complex ventilation system to have a reliable fire simulation. The approach included a procedure for parameter estimation for the fan curve, simplifying ducts, and optimising a duct property to achieve the target flow and pressure conditions in the compartment. Compared to the actual test results involving the fire, the approach led to satisfactory pressure development in the compartment and volumetric flow rates in ducts in the simulation when fire condition was enabled. As the developed method allowed for incorporating a few selected parameters of a ventilation system, the uncertainties brought by the entire ventilation system network and its unmeasurable parameters were avoided. Overall, the approach provided confidence in building and using the simplified ventilation model with reduced scope to assess the possibility of high-pressure development and unwanted volumetric flow rates in ducts brought by a fire in a compartment. Different users using the approach will be able to produce comparable results, which will minimise the user's effect. Future work will include extending the scope of such modeling so that multiple ducts connected to a compartment can also be confidently modelled in such studies. Moreover, the modelling approach should also extend to include multiple compartments connected through a ventilation network so that interactions between different compartment zones and their collective influence on pressure and flow dynamics during a fire event can be realistically captured. This extension will enable a more holistic analysis of ventilation-driven smoke movement, pressure buildup, and flow reversals across interconnected spaces.

Acknowledgements

State Nuclear Waste Management provided funding for this work through the SAFER2028 program, which we gratefully acknowledge. Thanks are also extended to the OECD NEA FAIR project and its members for providing the full-scale fire experiment results.

References

1. Merci, B., & Beji, T. (2016). Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003204374>
2. Audouin L., Rigollet L., Pr  tre H., Le Saux W., R  wekamp M. (2013). OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and main experimental results. Fire Safety Journal, Volume 62, Part B, Pages 80-101, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.07.008>
3. Wahlqvist J., Hees P. (2013). Validation of FDS for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior. Fire Safety Journal, Volume 62, Part B, Pages 102-114, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.07.007>
4. Li J., Beji T., Brohez S. (2020). Merci B., CFD study of fire-induced pressure variation in a mechanically-ventilated airtight compartment, Fire Safety Journal. Volume 115, 103012, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103012>
5. Pr  tre H., Saux W., Audouin L. (2012). Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment. Fire Safety Journal, Volume 52, Pages 11-24, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.04.005>
6. Brohez S., Caravita I. (2020). Fire induced pressure in airtight houses: Experiments and FDS validation. Fire Safety Journal, Volume 114, 103008, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103008>
7. Li J., Pr  tre H., Suard S., Beji T., Merci B. (2021). Experimental study on the effect of mechanical ventilation conditions and fire dynamics on the pressure evolution in an air-tight compartment. Fire Safety Journal, Volume 125, 2021, 103426, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103426>
8. McGrattan, K., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E., Hostikka, S., Floyd, J. (April 18, 2023). Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th Edition, NIST Special Publication 1019.
9. H. Pr  tre, FAIR HVE CAMPAIGN - TEST FR_HVE_D1 TEST REPORT - IRSN report n  2024-00462.
10. McGrattan, K., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E., Hostikka, S., Floyd, J. (April 18, 2023). Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. 6th Edition, NIST Special Publication 1019.

Ristiinliimatun puun kokeellinen tutkimus kartiokalorimetrilla

Tiivistelmä

Ristiinliimattu puu (cross-laminated timber eli CLT) on suosittu puurakentamisen materiaali. Tulipalossa suojaamaton CLT-tuote muiden massiivipuutuotteiden tapaan hiiltyy ja osallistuu paloon. Puukerrostojen välisten liimasaumojen suorituskyvyllä on suuri merkitys CLT:n palonkäyttäytymiselle, koska ulomman kerroksen irtoaminen kiihdyttää alempien kerrosten palamista. Työssä tutkittiin CLT:n palamista kartiokalorimetrissa valmistamalla puukerrostojen irtoamisen mahdollistava näytteenpidin. Näytekapaleet valmistettiin 17 mm:n kuusilaudoista käyttäen kahta kaupallista ja yhtä kehitteillä olevaa ligniini-epoksiliimaa. Yksi- ja kaksikomponenttisten kaupallisten liimojen delaminointitulokset havaittiin hyvin toistettaviksi ja selvästi toisistaan poikkeaviksi, mutta kehitettävällä liimalla tuloksissa oli runsaasti hajontaa. Lisäksi mitattiin delaminoitumisaikoja ja liimakerroksen lämpötiloja sekä palotehoa ja massanmuutoksia. Delaminoitumisen jälkeiset palotehoarvot ($400 \pm 200 \text{ kW/m}^2$) olivat jopa neljä kertaa puupinnan ensimmäistä palotehoarvoa ($100/150 \pm 50 \text{ kW/m}^2$) korkeampia. Yksikomponenttisen polyuretaaniliiman lämpötila delaminointihetkellä (n. 280°C) vastasi hyvin liiman DSC-kokeessa havaittavaa ensimmäistä reaktiota. Koemenetelmää voidaan pitää soveltuvana tuotekehityksen menetelmänä, mutta sitä tulisi vielä kehittää lisäämällä pieni kuormitus uloimmaiseen puukerrokseen, se tulisi validoida suuren mittakaavan kokein, ja kokeiden suoritusta alennetussa happipitoisuudessa pitäisi tutkia.

Johdanto

Ristiinliimattu puu (cross-laminated timber eli CLT) on suosittu teollisen puurakentamisen materiaali, koska sillä on hyviä mekaanisia ominaisuuksia, ja koska sitä voidaan hyödyntää myös näkyvänä puupintana. Tulipalossa palosuojaamaton CLT-tuote muiden massiivipuutuotteiden tapaan hiiltyy ja osallistuu paloon. Hiiltynyt kerros kuitenkin suojaa alla olevaa puuainesta ja rajoittaa hiiltymisnopeuden kasvua. Yhtenäisessä puumateriaalissa hiilikeros

voi pysyä paikoillaan pitkään, kunnes hiilessä tapahtuvat hapettumisreaktiot ja halkeilu heikentävät sitä mekaanisesti. CLT-levyssä puukerrostojen välisten liimasaumojen kohdalla on epäjatkuvuuskohata, ja siksi liimasauman suorituskyvyllä on suuri merkitys CLT:n palonkestävyydelle [1, 2]. Osittain tai kokonaan hiiltyneen kerroksen irtoaminen korkeassa lämpötilassa (delaminointi) kiihdyttää lämmön tunkeutumista alla oleviin rakenteisiin, pienentäen ehyen ja lujan puun osuutta. Hiiltymättömän puun äkillinen altistuminen korkealle lämpötilalle kasvattaa hetkellisesti palotehoa, ja voi johtaa sykliseen palonkehitykseen, jos CLT-pinnat ovat lämmönsiirron kautta kytkettyjä [3]. CLT-rakenteisiin liittyy siksi voimakkaiden teho- ja lämpötilaheilahteluiden riski.

Korkeissa lämpötiloissa toimivien liimojen ja liimausprosessien kehittäminen on olennainen askel paloturvallisten CLT-tuotteiden kehitystyössä. Wiesnerin ym. mukaan yleisimmin käytetyt CLT-liimat ovat joko polyuretaani (PU) tai melamiini-urea-formaldehydi (MUF) -tyyppisiä. Muita rakenteellisen puun liimauksessa käytettäviä liimoja ovat fenolipohjaiset (fenoliformaldehydi (PF), fenoliresorsinoliformaldehydi (PRF), resorsinoliformaldehydiliima (RF)), ja emulsiopolymeeri-isosyanaattiliima (EPI) [4].

Delaminoitumattomien liimojen kehitystyötä vaikeuttaa täyden mittakaavan palotestien korkea hinta, työläys, sekä suuri materiaallimäärä. Bunsen-polttimeen perustuvan, pienen mittakaavan menetelmän on aiemmin todettu tuottavan keskikokoisen uunikokeen kanssa samankaltaisia delaminoitumistuloksia [2]. Merkittävänä pieneen mittakaavaan liittyvänä ongelmana tutkimus mainitsi sen, että normaalissa happipitoisuudessa tehdyt mittaukset tuottivat liian suuria hiiltymisnopeuksia verrattuna uunikokeisiin, joissa happipitoisuus on alentunut. Eräs keskikoon koemenetelmä, jossa happipitoisuutta voidaan alentaa, on kartiokalorimetri. Kartiokalorimetriä käytetään yleisesti, kun kehitetään rajoitetusti paloon osallistuvia pintamateriaaleja (esim. paloluokka B), koska kokeisiin vaadittavan näytteen koko on pieni ja kokeiden hinta varsinaista luokituskokeita edullisempi. Delaminoitumisen tut

kimiseen kartiokalorimetria ei kuitenkaan toistaiseksi ole käytetty, koska standardin mukainen näytteenpidin ja koeasetelma eivät mahdollista puulamellien irtoamista ja koska on epäilty, etteivät pienen mittakaavan kokeet riittävän hyvin edusta suuren mittakaavan uunikokeen olosuhteita, saatikka todellista paloa.

Tässä työssä tutkittiin CLT-tuotteiden paloteknisen suorituskyvyn mittaamista kartiokalorimetrisi. Tavoitteena oli selvittää, voidaanko delaminointumista havainnoida luotettavasti ja toistettavasti pienen mittakaavan kokeilla. Kokeet tehtiin normaalissa happipitoisuudessa. Työ tehtiin osana ligniini-pohjaisen CLT-liiman tutkimusprojektia, jonka tavoitteena on tuottaa biopohjainen liima, jolla olisi hyvät palotekniset ominaisuudet.

Materiaalit ja menetelmät

Näytekappaleet valmistettiin liimaamalla yhteen kolme B-laatuista kuusilaudan kappaletta, kooltaan 100 mm × 100 mm × 17 mm, ja tiheydeltään 410–490 kg/m³. Liimaamiseen käytettiin kolmea eri liimaa: Kaksi liimoista oli kaupallisia liimoja: EN 15425 -normin vaatimukset täyttävä 1-komponenttinen polyuretaaniliima (1K) ja normin JIS K 6806-1985 vaatimukset täyttävä 2-komponenttinen isosyanaattiemulsiopolymeeri (EPI) -liima (2K). Lisäksi tutkittiin hankkeessa kehitettävää pallomaisiin ligniinipartikkeleihin [5] perustuvaa kaksikomponenttista liimaa, jossa kovetteena oli biopohjainen epoksiharts ja apukovetteena ammoniakki (LI). (Tämä liima on LignoSphere Oy:n ja HAMK:n yhteisen kehityksen tuote, josta on vireillä patenttihakemus.)

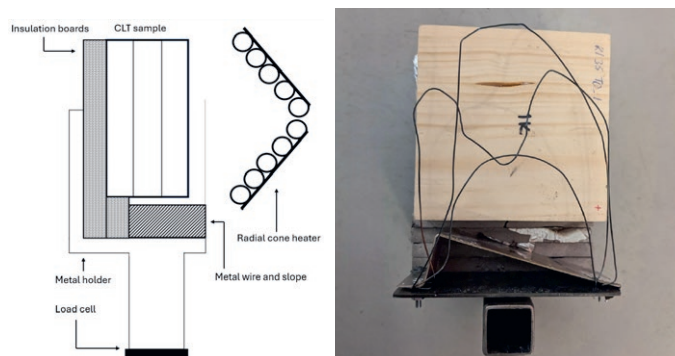
Kuhunkin liimapintaan siveltiin 180 g/m² kaupallista liimaa tai 300 g/m² ligniini-epoksiliimaa. Kaupallisia liimoja käytettiin valmistajan ilmoittamalla tavalla: avoin aika < 10 min., puristusaine 1 N/mm² ja puristusaika 1 tunti. Ligniini-epoksiliimalla toimittiin muuten samalla tavalla, mutta puristusta jatkettiin vähintään viikko, jotta liimasauma ei irtoaisi ennen lopullista kovettumista. Puristus suoritettiin betonipuristimella. Liimaus suoritettiin vuorokauden sisällä höylyksestä. Puutavara oli pidetty 60 %:n suhteellisessa kosteudessa ja 20 °C:n lämpötilassa ennen liimausta, jolloin puutavaran kosteuspitoisuus oli alle 12 %. Näytteitä valmistettiin neljä kappaletta per liimatyyppi. Kahteen jokaisen liimatyyppin näytteeseen asennettiin K-tyyppin termoelementit ensimmäisen ja toisen puukappaleen väliin. Ennen koetta näytteitä säilytettiin 45 %:n suhteellisessa kosteudessa 25 °C:n lämpötilassa, jolloin näytteen kosteuspitoisuudeksi muodostui 10 %.

Liimojen reaktiota korkeissa lämpötiloissa tutkittiin termisen analyysin menetelmällä (Simultaneous Thermal Analysis) Netzsch STA 449 F3 Jupiter -laitteella. Kokeet tehtiin typpivirtauksessa 10 K/min lämmitysnopeudella lämpötila-alueella 40–600 °C.

Kartiokalorimetrikokeita tehtiin pystysuunnassa oleville näytteille 35 kW/m² ja 50 kW/m² nimellisillä säteilytehoilla normaalissa ilmassa. Koesarjan jälkeen huomattiin, että näytteenpitimen epästandardista muodosta johtuen säteilytehon kalibrointi ei vastannut normaalia käytäntöä, ja todelliset säteilytehot olivat 32 ± 1 kW/m² ja 45 ± 1 kW/m². Palokaasut sytytettiin erillisellä sytytti-

mellä, koska pystysuunnassa suoritettavassa kokeessa kalorimetrisin kipinä lähde on etäällä pyrolyysikaasujen virtauksesta eikä onnistu sytyttämään niitä, vaikka kyseessä olisikin syttymiskelpoinen seos. Itsesyttymiseen taas vaadittaisiin yli 60 kW/m² säteilyteho [6]. 35 kW/m²:n teholla sytytystä yritettiin 10 minuutin kuluksi ja 50 kW/m²:n teholla 7 minuutin kuluksi.

Kokeita varten suunniteltiin erityinen näytteenpidin, joka sallii puukerroksen irtoamisen ja putoamisen (Kuva 1). CLT-näyte on kiinni näytteenpitimestä kolmannen kerroksen kohdalta, joten kaksi ensimmäistä pääsevät irrotessaan putoamaan. Puukerrokseen ei kohdistu muuta mekaanista kuormaa kuin niiden oma paino. Kokeissa mitattiin näytteen paloteho (HRR) ja massa ajan funktiona. Samalla havainnointiin syttymisaika sekä puukerrosten osittaista tai täydellistä delaminointumista.



Kuva 1: CLT-näytteen pidin kartiokalorimetrikokeissa; vasemmalla kaavio sivusuunnasta ja oikealla näyte+näytteenpidin kuvattuna säteilykartion suunnasta.

Tulokset ja pohdinnat

Liimojen terminen stabiilisuus

Liimojen termogravimetrikokeiden (TGA) tulokset on koottu taulukkoon 1. Yksikomponenttinen polyuretaaniliima (1K) jätti jälkeensä vähiten massajäännöstä, 2-komponenttinen EPI-liima (2K) eniten, ja ligniini-epoksiliima (LI) näiden välistä. Hajoamisreaktiot alkoivat kaikilla liimoilla jo alle 200 °C:n lämpötilassa, mutta 2-komponenttiliimalla hajoamisreaktion huippu havaittiin korkeimmassa lämpötilassa. Vastaavasti ligniini-epoksiliiman hajoaminen tapahtui muita liimoja aiemmin. Differentiaalisen pyyhkäisykalorimetria (DSC) -mittauksen mukaan kaikki hajoamisreaktiot ovat luonteeltaan endotermisiä.

Delaminointuminen ja kerrosten irtoaminen

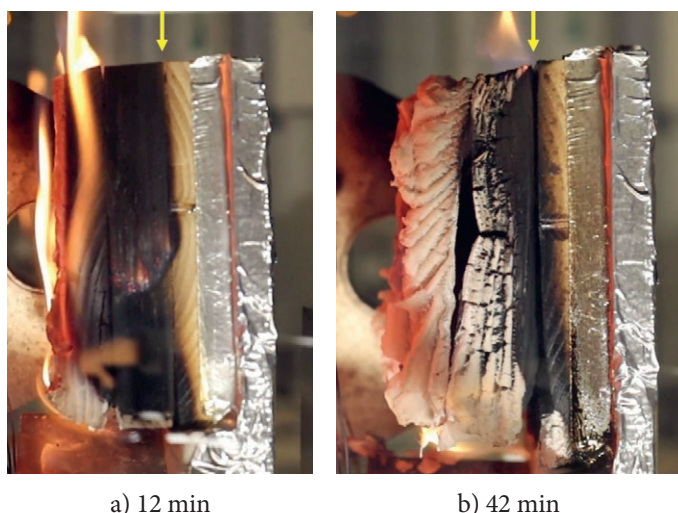
Kokeissa esiintyi neljä erilaista tapaa kerrosten irtoamiseen: Yleisimmin kerrokset irtosivat yksi kerros kerrallaan, ensin yksi, sitten toinen. Tämä prosessi toistui kaikilla 1K-liimoilla ja kahdella LI-liimanäytteellä. Täysin irtoamattomia olivat kaikki 2K-liimanäytteet ja yksi LI-liimattu. Tulos ei tarkoittanut, ettei delaminointumista

Liima	1K	2K	LI
Kemia	1-komponenttinen PU	2-komponenttinen EPI	Ligniini-epoksi
Näytteen massa (mg)	8,9 – 11,7	9,9 – 11,4	25,5 – 26,7
Massajäännös (%)	18,8	40,4	27,4
Massanmuutoksen kynnyslämpötila (°C)	196	185	155
Massanmuutoksen huippulämpötila (°C)	379	275, 416	307

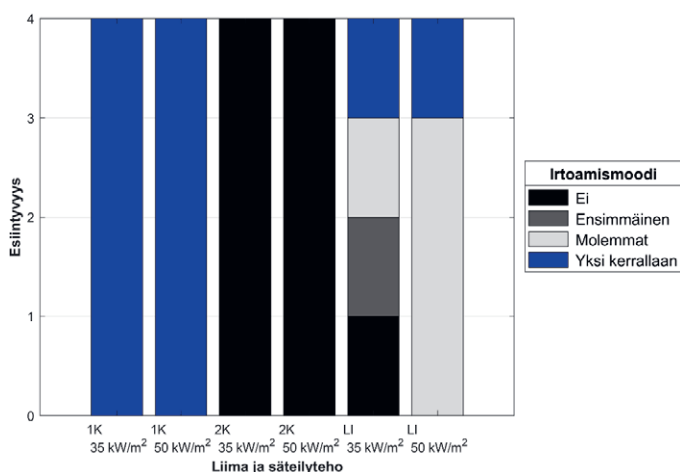
Taulukko 1: Liimojen terminen stabiilisuus. PU = polyuretaani. EPI = isosyanaattinen emulsiopolymeeri.

► ta näissäkin tapauksissa esiintyisi, mutta puukerrokset pysyivät kokeen ajan paikoillaan. Kuvassa 2 näkyy esimerkiksi K2-liimalla liimatun kappaleen osittainen delaminoituminen, jonka tuloksena kerrokset eivät kuitenkaan irronneet. Ligniini-epoksiliimalla liimatujen näytteiden yleisin irtoamistapa oli kahden uloimman kerroksen irtoaminen samanaikaisesti. Lisäksi vain ensimmäisen kerroksen irtoaminen esiintyi yhdessä LI-näytteessä. Yhteenveto irtoamismooideista on kuvassa 3.

Jälkikäteen on mahdotonta arvioida, olisivatko jotkut, pitkään paikallaan pysyneet kerrokset irronneet, jos lamelleihin olisi kohdistunut ylimääräistä kuormaa. Jossain tilanteissa hiiltynyt liima muodosti paksun verkkomaisen rakenteen, ja syntyi epäily, että irtoamiselta välttyminen saattoi liittyä näytteen pienen kokoon ja lamellien keveyteen. Tulos voi tällöin antaa todellista tulipalotilannetta ajatellen liian turvallisen kuvan. Jatkossa olisi syytä tutkia mahdollisuutta pienen pystysuoran kuorman lisäämistä, jotta heikosti paikallaan roikkuva lamelli myös irtoaisi.



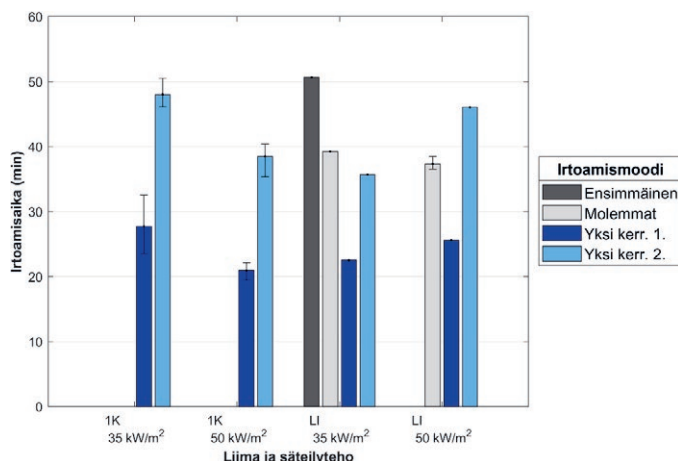
Kuva 2: K2-liimalla liimatun kappaleen osittainen delaminoituminen 50 kW/m² lämpövirralla 12 min (a) ja 42 min (b) hetkillä.



Kuva 3: Irtoamismoodien esiintyminen eri liimatyypeillä ja säteilytehoilla.

Kuva 4 esittää keskimääräiset puukerrosten irtoamisajat eri irtoamismooideissa. Virhejanoilla on merkitty suurinta poikkeamaa. Ensimmäinen kerros irtosi yleensä 20–30 minuutin kuluttua kokeen alkamisesta ja 35–50 minuutin kuluttua. Ligniini-epoksiliiman tulosten suurta vaihtelua osoittaa sekin, että kokeessa, jossa

vain ensimmäinen kerros irtosi, irtoaminen tapahtui myöhemmin kuin missään muussa kokeessa. Molempien kerrosten yhtäaikaista irtoamista sen sijaan sattui osapuilleen samaan aikaan kuin toisen liimakerroksen pettäminen kerros kerrokselta etenevässä delaminoitumisessa.



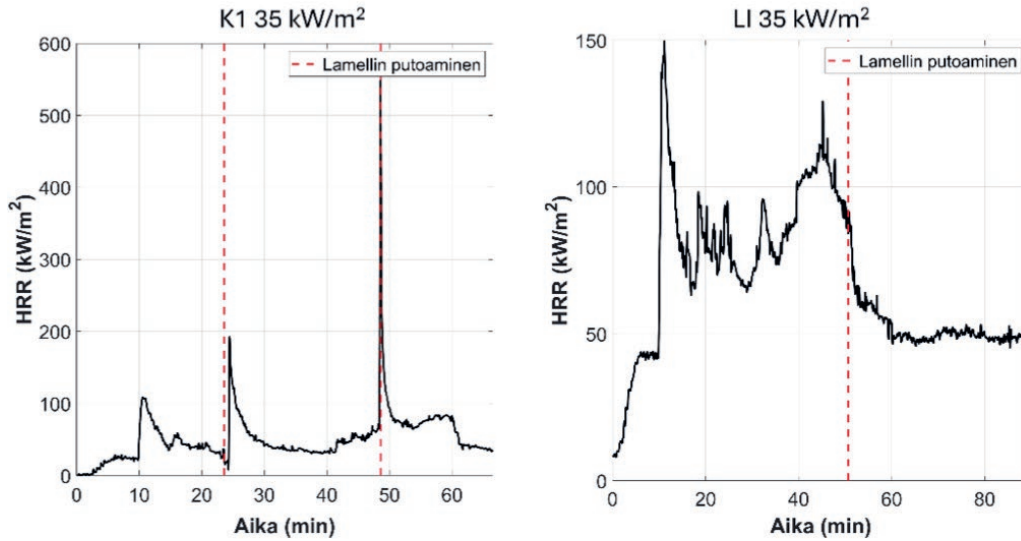
Kuva 4: Kerrosten keskimääräiset irtoamisajat eri irtoamismooideilla, liimoilla ja säteilytehoilla.

Liimapintoihin sijoitettujen termoelementtien osoittamat lämpötilat nousivat delaminoitumisen hetkellä voimakkaasti, koska puukerroksen osittainen irtoaminen ennen putoamista altisti termoelementit kaasun lämpötilalle. Delaminoitumislämpötiloiksi tulkitaan lämpötilat ennen nousunopeuden kiihtymistä (kriteeri 0.07 °C/s). 1K-liimalla vaurioitumishetken lämpötilat olivat 280–300 °C ja LI-liimalla noin 200 °C. Selvää yhteyttä esimerkiksi hajoamisreaktioiden onsets-lämpötiloihin ei ole havaittavissa, mutta 1K-liimalla lämpötila osuu yksiin DSC-kokeen ensimmäisen endotermisen piikin kanssa.

Paloteho

Kartiokalorimetrin vahvuus koemenetelmänä on kyky mitata näytteen paloteho lämpörasituksen aikana. CLT-tuotteilla kiinnostavaa on nähdä miten puulamellien delaminoituminen ja irtoaminen vaikuttaa palotehoon. Kuvassa 5 on esitetty kahden 35 kW/m²:n (todellisuudessa 32 kW/m²) säteilytehoilla tehdyn kokeen tulokset. Vasemman puolisen kuvan K1-liimalla liimattu näyte delaminoitui kerros kerrokselta, jolloin delaminoituneet lamellit irtosivat kokonaan ja putosivat pois näytteenpitimestä. Kokeen aikana nähdään kolme palotehopiikkiä. Ennen syttymistä paloteho muodostui lähinnä voimakkaasta kytemisestä. Ensimmäinen piikki nähdään 10 minuutin kohdalla, kun näyte syttyi palamaan. Ensimmäinen puulamelli irtosi ja putosi 24 minuutin kohdalla, jolloin palotehossa näkyy voimakas piikki (lähes 200 kW/m²). Teho palautui aiemmalle tasolle noin 10 minuutissa, kun hiiltymisen eteni paljastuneessa lamellissa. Sama toistui 50 minuutin kohdalla, tällä kertaa tosin vielä huomattavasti korkeampana palotehopiikkinä (yli 500 kW/m²). Tällaista palotehon arvoa voidaan pitää puutuotteelle hyvin poikkeuksellisenä.

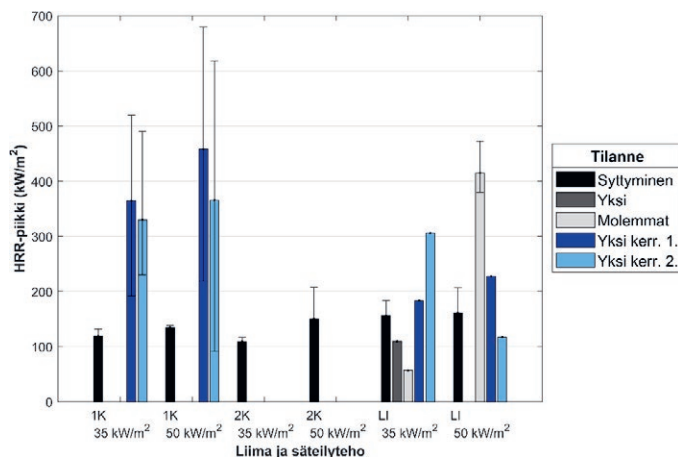
Kuvan 5 oikea puoli esittää LI-liimalla valmistetun näytteen palotehoa. Ensimmäinen palotehopiikki nähtiin syttymishetkellä, mutta toinen piikki havaittiin ennen lamellin varsinaista putoamista hetkellä 50 min. Syynä on delaminoitumisen vaiheittainen eteneminen niin, että puukerrokset irtosivat toisistaan jo 30 minuutin jälkeen, jolloin niiden väliin muodostui tyhjä tila, jossa tapahtui palamista ja puupintojen välinen säteily nosti niiden lämpötilaa. Lamellin irtoaminen johti siten lämpövirran alenemiseen ja palotehon laskuun.



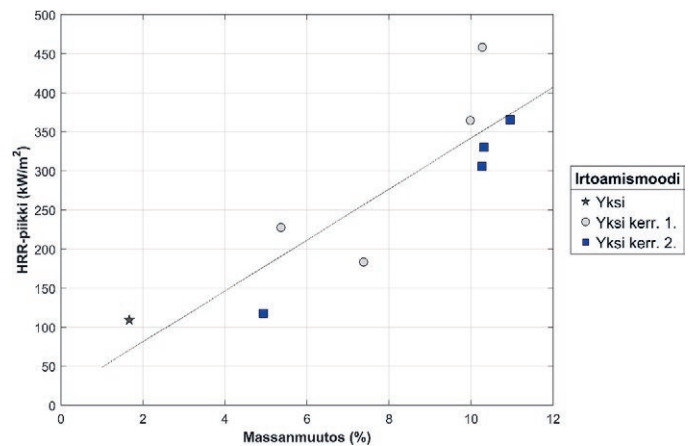
Kuva 5: K1 (vasen) ja LI (oikea) -liimoilla liimattujen näytteiden paloteho 35 kW/m² (todellisuudessa 32 kW/m²) säteilyteholla.

Kuvaan 6 on koottu palotehopiikkien korkeudet eri kokeista. K1-liimalla delaminointumisen aiheuttamat piikit ovat systemaattisesti korkeampia, kuin syttymishetkellä mitatut. On kuitenkin huomattava, että näytteet sytytettiin myöhemmin, kuin mikä olisi ollut optimaalisella kipinän sijainnilla mahdollista. Vaakasuunnassa olevilla kuusilaudoilla tehtyjen kokeiden perusteella aikaisempi syttyminen johtaa korkeampiin palotehopiikkeihin, kuten esimerkiksi $192 \pm 13 \text{ kW/m}^2$ 35 kW/m² säteilyteholla [7], mikä on edelleen delaminointumisen aiheuttamaa piikkiä selvästi alhaisempi. Ligniini-epoksiliimalla tuloksissa on jälleen enemmän hajontaa, mutta yleisesti voidaan todeta, että delaminointumisen aiheuttamat palotehopiikit ovat tälläkin materiaalilla samaa suuruusluokkaa syttymispiikkien kanssa.

Massamittauksista voitiin arvioida irronneiden kerrosten paino. Vertaamalla suhteellisia massanmuutoksia puun oletettuun hiilijäännökseen voitiin päätellä, että suurin osa pudonneista puukerroksista eivät olleet vielä täysin hiiltyneitä. Voidaan olettaa, että täysin hiiltyneen kerroksen tapauksessa myös paljastuva lamelli on ehtinyt jo osittain hiiltyä, joten syntyvä palotehopiikki on alempi kuin osittain hiiltyneen kerroksen irrotaessa. Kerroksen irtoamisesta aiheutuvan suhteellisen massanmuutoksen ja palotehopiikin välille voidaan siis olettaa yhteys. Kuvassa 7 on esitetty piikkien korkeudet suhteellisten massanmuutosten funktiona. Havaittua korrelaatiota voidaan hyödyntää CLT-rakenteiden palotehojen ennustamisessa.



Kuva 6: Palotehopiikkien korkeudet syttymisen tai kerrosten irtoamisen hetkellä.



Kuva 7: Palotehopiikin ja lamellin irtoamiseen liittyvän suhteellisen massamuutoksen yhteys.

Johtopäätökset

Tässä työssä kehitettiin kartiokaloreimetriin perustuva pienen mittakaavan menetelmä CLT-tuotteen palokäyttäytymisen kokeelliseen tutkimukseen. Kaksi kaupallista liimaa pystyttiin erottelemaan selvästi toisistaan delaminointitulosten perusteella. Menetelmää voi siksi pitää tuotekehitykseen soveltuvana. Kehitteillä olevan ligniini-epoksiliiman tuloksissa oli paljon hajontaa. Ennen laajempaa käyttöönottoa, menetelmää tulee vielä parantaa lisäämällä pieni kuormitus uloimmaiseen puukerrokseen (parhailaan käynnissä), ja se tulisi validoida suuren mittakaavan kokein.

Kehitteillä olevan ligniini-epoksiliiman tuloksia verrattiin kaupallisilla liimoilla liimattujen CLT-kappaleiden tuloksiin. Delaminointumisen suhteen ilmeni neljä eri lopputulosta: Kaksikomponenttiliimalla ja yhdellä ligniini-epoksiliimanäytteellä delaminointumista ei tapahtunut lainkaan. Kaikki yksikomponenttiliimalla valmistetut näytteet sen sijaan delaminoutuivat yksi puukerros kerrallaan (noin 20 min/kerros), samoin kuin osa ligniini-epoksiliimalla liimatuista. Delaminointumisen jälkeiset palotehopiikit ($400 \pm 200 \text{ kW/m}^2$) olivat jopa neljä kertaa puupinnan ensimmäistä palotehopiikkiä ($100/150 \pm 50 \text{ kW/m}^2$) korkeampia. Massamuutosten perusteella voitiin päätellä, että irtoavat puukerrokset eivät yleensä olleet vielä täysin hiiltyneitä. Yksikomponenttiliimakerroksen lämpötila delaminointihetkellä (noin 280 °C) vastasi hyvin liiman DSC-kokeessa havaittavaa ensimmäistä reaktiota.

- Tulokset osoittavat, että kartiokaloreimetrikokeilla pystytään kvantifioimaan kerroksellisten rakenteiden delaminoitumisesta aiheutuva palotehon kasvu, toisin kuin suuren mittakaavan uunikokeilla. Tulokset ovat tärkeitä puurakennusten palodynamiikan ymmärtämisen kannalta, koska tähän asti kerrosten irtoamisesta aiheutuvaa palon syklisyyttä on tutkittu pelkästään suuren mittakaavan kokeiden lämpötilahavaintojen perusteella. Kokeet tehtiin normaalissa happipitoisuudessa, mutta tulevaisuudessa vastaava koesarja kannattaisi toistaa alennetussa happipitoisuudessa, jotta hapettumisreaktioiden vaikutus hiiltymisnopeuteen vastaisi paremmin todellisia tulipalon olosuhteita.

Kiitokset

Kiitämme tutkimushankkeen osapuolia hyvästä yhteistyöstä ja tuesta: Kiilto Oy, Versowood Oy, Aureskosken Jalostetehdas Oy ja LignoSphere Oy. Tutkimuksen rahoitti Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. STA-kokeissa hyödynnettiin Aalto-yliopiston biotalousinfrastruktuuria.

Lähteet

1. Wiesner F, Thomson D, Bisby L. (2021) The effect of adhesive type and ply number on the compressive strength retention of CLT at elevated temperatures. Construction and Building Materials, 266, 121156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121156>.
2. Brandon D, Dagenais C. (2017) Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 5 – Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber (CLT) in Fire. NFPA Report FPRF-2018-05 <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Aanbn%3Ase%3Ari%3Adiva-59256>
3. Hopkin D, Węgrzyński W, Gorska C, Spearpoint M, Bielawski J, Krenn H, et al. (2024) Full-Scale Fire Experiments on Cross-Laminated Timber Residential Enclosures Featuring Different Lining Protection Configurations. Fire Technology, 60(6), 3771–3803. <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01581-1>.
4. Puuinfo. Puutieto, Insinööripuutuotteet, Puurakentamisen liimat <https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/puurakentamisen-liimat/>. Viitattu: 15.5.2025.
5. Henn KA, Forssell S, Pietiläinen A, Forsman N, Smal I, Nousiainen P, et al. (2022) Interfacial catalysis and lignin nanoparticles for strong fire- and water-resistant composite adhesives. Green Chemistry, 24(17), 6487–6500. <http://doi.org/10.1039/D2GC01637K>.
6. Terrei L, Acem Z, Georges V, Lardet P, Boulet P, Parent G. (2019) Experimental tools applied to ignition study of spruce wood under cone calorimeter. Fire Safety Journal, 108, 102845. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102845>.
7. Rinta-Paavola A, Sukhomlinov D, Hostikka S. (2023) Modeling Charring and Burning of Spruce and Pine Woods During Pyrolysis, Smoldering and Flaming. Fire Technology, 59(5), 2751–2786. 10.1007/s10694-023-01458-9.

Yritysturvallisuusfoorumi 5.–7.11.2025

Helsinki–Tukholma–Helsinki

Yritysturvallisuusfoorumi (YTF) tuo vuosittain yhteen yritysturvallisuuden toimijat eri sektoreilta: yrityksistä, viranomaisista ja järjestöistä. Tule tapaamaan kollegoitasi ja kasvata ammatillista osaamistasi!

Avauspuheenvuoro

- Mikko Hautala, johtaja, Nokia

Poliisi kokonaisturvallisuuden tuottajana

- Ilkka Koskimäki, poliisiylijohtaja, Poliisihallitus

Digitaalinen suojaus: defensiivinen yksityisyys

- Saara Jantunen-Paju, sotatieteiden tohtori, viestinnän asiantuntija, valtioneuvoston kanslia

Kurkistus suojamuurien taakse: Insider-riskit ja niiden suuri tuhovoima

- Anna Scherf, Chief Specialist, ASCiRI

Onnettomuuksista oppiminen:

Turvallisuustutkinnan kehitys ja case-esimerkit

- Veera Jämsén, Head of HSSEQ, Fortum
- Essi Koivukangas, Safety & Security Specialist, Fortum

VIERAILUKOhteet Tukholmassa (1/hlö)

- PostNord-pääkonttori
Navigating the Hybrid Warfare Landscape
- MSB / Ruotsin yhteiskuntasuojelu- ja valmiusvirasto
The Swedish civil preparedness structure and private-public cooperation
- Brandskyddsföreningen / Ruotsin palontorjuntaliitto
Lessons Learned from the Oceana Fire



Tutustu koko ohjelmaan ja ilmoittaudu!
➔ ytf.fi

CLT-vaakarakenteen palonkesto luonnollisessa palossa

Tiivistelmä

Puurakenne hiiltyy ja sen kantavuus heikkenee eri tavalla palon ja paloa seuraavan jäähtymisvaiheen aikana. Tässä tutkimuksessa rakenteen palonkestävyyttä tulipalon jäähtymisvaiheessa on arvioitu ns. DHP-konseptin avulla.

Tutkimuksessa suoritettiin polttokoe, jossa kuormitettu CLT-vaakarakenne altistettiin DHP-konseptin mukaiselle lämpötila-aikakäyrälle, jonka kuumenemisvaiheen pituus oli 35 minuuttia, jonka jälkeen rakenteen annettiin jäähtyä hallitusti. Koekappaleen kantavuus menetettiin ajanhetkellä 263 minuuttia. Tämän rakenteen B-luokitus oli siis korkeintaan B 34, koska se ei kestänyt 35 minuutin palon kuumenemisvaihetta sortumatta jäähtymisvaiheessa.

Polttokokeen mukainen tilanne mallinnettiin numeerisesti SAFIR-illa, jolloin rakenteen sortuma havaittiin sen jäähtymisvaiheessa ajanhetkellä 91 minuuttia. Rakenteen B-luokitukseksi määritettiin numeerisesti B 25. Poltto-kokeen ja numeerisen mallinnuksen tulosten perusteella tarkastellun rakenteen B-luokituksen arvioitiin olevan 53–73 % sen R-luokituksesta.

Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että kantavuuden menetys jäähtymisvaiheessa on CLT-vaakarakenteelle relevantti uhka. CLT-rakenne on altis viivästyneelle sortumalle luonnollisessa palossa jo lyhyillä kuumenemisvaiheen kestoilla.

Johdanto

Puurakenteiden käyttö rakentamisessa yleistyy jatkuvasti. Useiden etujen lisäksi puurakenteissa tunnustetaan myös haasteita, kuten käyttäytyminen palotilanteessa. Puurakenne hiiltyy ja sen kantavuus heikkenee eri tavalla palon ja paloa seuraavan jäähtymisvaiheen aikana. Historia tuntee useita tapaturmia, joissa palavan kaasun maksimilämpötilan saavuttamisen jälkeen tapahtuvassa rakenteen sortumisessa syntyy merkittäviä henkilö- tai omaisuusvahinkoja.

Työssä tutkittiin ristiinliimatun massiivipuurakenteen (CLT) palonkestävyyttä tulipalon jäähtymisvaiheessa. Tarkasteltu CLT-kappale oli 5-lamellinen vaakarakenne, jonka palonkestävyyttä tarkasteltiin The Duration of the Heating Phase (DHP) -konseptin mukaisesti kokeellisesti sekä numeerisesti.

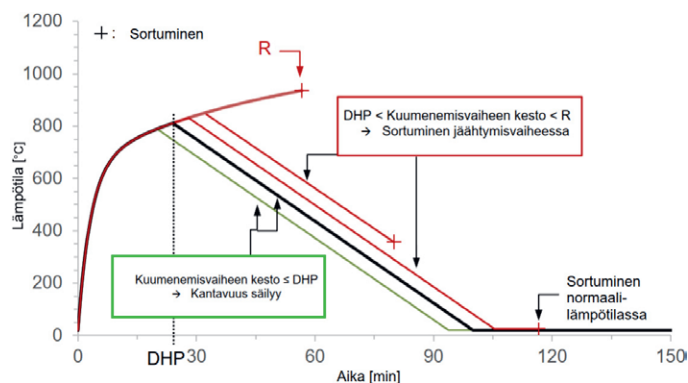
DHP-konsepti

Tarkasteltavan rakenneosan lämpötila kasvaa palavan kaasun lämpötilan noustessa. Palon jäähtymisvaihe alkaa sen jälkeen, kun palavan kaasun lämpötila on saavuttanut maksimilämpötilansa. Rakenneosan lämpötila ei kuitenkaan käyttäydy samalla tavalla palavan kaasun kanssa. Lämpötila rakenneosan poikkileikkauksessa kohoaa vielä pitkään osaston maksimilämpötilan saavuttamisen jälkeenkin¹.

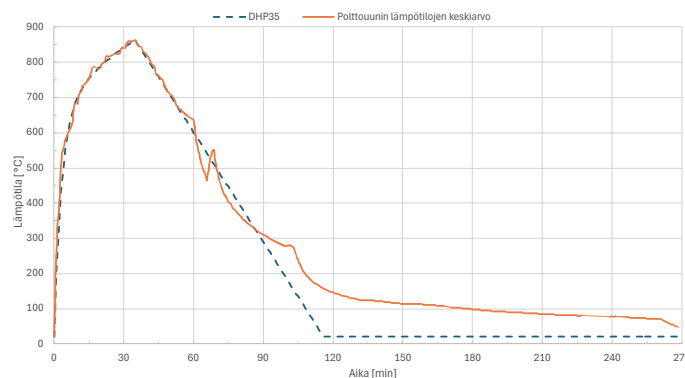
DHP-konseptin avulla tutkitaan pisintä mahdollista paloaltistuksen kuumenemisvaiheen kestoa, jonka jälkeen rakenne säilyttää kantavuutensa vielä palon sammumisen ja rakenteen hallitun jäähtymisen jälkeen². Palokäyränä menetelmässä hyödynnetään parametrin huonepalon mallin yksinkertaistusta, jossa parametri Γ asetetaan arvoon 1. Näin saadaan likimain standardipalokäyrän mukainen palavan kaasun kuumenemisvaiheen käyttäytyminen ja jäljelle jää yksi muuttuja, parametri t_{max} , joka vastaa DHP:n pituutta³.

DHP-konseptissa määritetään rakenteelle niin sanottu B-luokitus, joka kuvaa pisimmän standardipaloa mukailevan palon kuumenemisvaiheen keston, jonka jälkeen rakenne kestää vielä sortumatta koko jäähtymisvaiheen ajan. Tämä luokitus on lisäinformatiivinen, eikä se pyri korvaamaan olemassa olevia luokituksia. B-luokituksen määrittäminen perustuu iteratiiviseen prosessiin ja on toteutettavissa kokeellisesti tai numeerisesti. Molemmilla menetelmillä rakennetta tulee tarkastella eri ajanhetkillä, jotta sen pisin mahdollinen kuumenemisvaiheen kesto (DHP),

- jonka rakenne kestää sortumatta jäähtymisvaiheessa, voidaan määrittää².



Kuva 1: Kuumenemisvaiheen keston vaikutus rakenteen kantaavuuden säilymiseen.



Kuva 3: Polttokoeuunin lämpötilojen keskiarvo ajan funktiona.

Puurakenteiden on havaittu olevan erityisen alttiita sortumiselle palon jäähtymisvaiheessa johtuen puun materiaaliominaisuuksien heikkenemistä jo verrattain matalissa lämpötiloissa. Aikaisemmassa tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin liimapuupilareiden palonkestoa luonnollisessa palossa, määritettiin pilareiden B-luokituksen olevan noin 0,2–0,5-kertainen rakenteen R-luokitukseen verrattuna⁴.

Tutkimusmenetelmät

Työssä tarkasteltava kappale oli yksiaukkoinen nivelellisesti tuettu 3,77 m pitkä (tukiväli) ja 501 mm leveä CLT-laattarakenne. Rakenteen lamellien ilmoitetut koot olivat 40–20–20–20–40, ja ne oli liimattu lappeistaan kiinni polyuretaanipohjaisella liimalla. Palo altistettiin kappaleen alapuolelta, jossa se oli alkuaan suojaamaton rakenne. Rakenteen R-luokitukseksi uuden sukupolven eurokoodin mukaisesti määritettiin R 47.

Polttokoe

Tutkimuksessa suoritettiin polttokoe, jossa kuormitettu CLT-vaakarakenne altistettiin DHP-konseptin mukaiselle lämpötila-aikakäyrälle, jonka kuumenemisvaiheen pituus oli 35 minuuttia. Kuumenemisvaiheen jälkeen rakenteen annettiin jäähtyä hallitusti. Rakenteen kuormitus toteutettiin kuormitustunkilla ja kuormanjakopalkilla, jolloin rakenteeseen kohdistui kaksi pistekuormaa. Kuormana kokeessa oli 20,6 kN, joka vastasi noin 28 % rakenteen eurokoodin mukaisesta normaalilämpötilan mitoituskuormasta. Polttokokeessa toteutunut lämpötila ja tavoitteena ollut teoreettinen lämpötila-aikakäyrä on esitetty kuvassa 3.

Rakenteessa tapahtuva lämpötilan eteneminen ja taipuminen jatkuivat huomattavan pitkään kuumenemisvaiheen päättymisen jälkeen. CLT-vaakarakenteen sisäisiä lämpötiloja mitattiin lamellien liimasaumoista sekä kappaleen ala- ja yläpinnasta kolmes-

ta eri kohdasta. Kokeen aikaisia taipumia mitattiin kolmesta pisteestä: kuormitustunkin kohdalla, sekä kuormanjakopalkin päiden alueilta.

Numeerinen mallinnus

Numeerinen mallinnus suoritettiin käyttämällä elementtimenetelmää hyödyntävää numeerista laskentaohjelmaa SAFIR:ia. Laskennassa SAFIR huomioi mallin materiaalin ja geometrian epälineaarisuudet sekä materiaaliominaisuuksien muuttumisen lämpötilan funktiona.⁵

Mallinnettu poikkileikkaus oli sama, kuin kokeellisesti tarkasteltu kappale. Poikkileikkaus diskretisoitiin lämpötila-analysissä 0,5 mm paksuisiksi yksiulotteisiksi palkkielementeiksi. Mallinnetun kappaleen tiheytenä käytettiin arvoa 477 kg/m³, kosteuspitoisuutena arvoa 10,2 %, emissiivisyyden arvon 0,8 ja kuljettumisen lämmönsiirtokertoimen arvona 35 W/m² W. Mekaanisessa analyysissä käytettiin taivutuslujuuden arvioitua arvoa 31,2 N/mm².

Tulokset

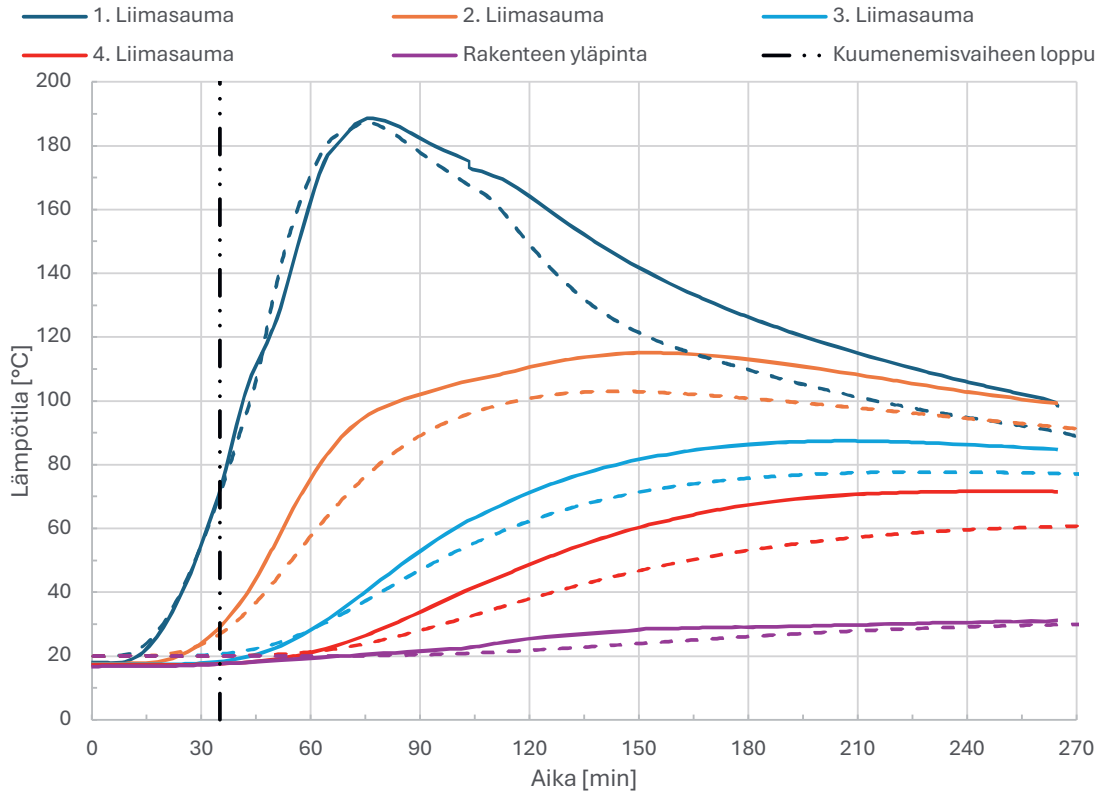
Koekappaleen kantavuus menetettiin ajanhetkellä 263 minuuttia. Rakenteen sortuma tapahtui siis 228 minuuttia palavan kaasun maksimilämpötilan saavuttamisen jälkeen. Tarkastellun rakenteen B-luokitus tällä kuormatasolla oli siis korkeintaan B 34, koska se ei kestänyt 35 minuutin palon kuumenemisvaihetta sortumatta jäähtymisvaiheessa. Rakenteen viivästynyttä sortumaa selittää sen poikkileikkauksessa pitkään jäähtymisvaiheessakin tapahtunut lämpöaallon eteneminen.

Sortuman jälkeen kappale jäähdytettiin ja siitä määritettiin kokeen aikaiset hiiltymissyvytykset neljästä eri leikkuusta. Hiiltymissyvyyskeskiarvot näissä leikkuissa olivat 30,9–31,3 mm, joten hiiltymäraja sijaitsi ensimmäisessä lamellissa. Rakenteen sortuminen ei johtunut siis alimman lamellin menetyksestä, vaan kantavien lamellien lujuusominaisuuksien heikentymisen yhteisvaikutuksesta.

Polttokokeen mukaisilla parametreilla sekä CLT-vaakarakenteen arvioidulla taivutuslujuuden arvolla suoritettu laskenta SAFIR:illa

Kuva 2: Koe-poltettu kappale koejärjestelyssä.





Kuva 4: Liimasaumojen lämpötilat kokeellisesti (yhtenäinen viiva) ja SAFIR:illa (katkoviiva).

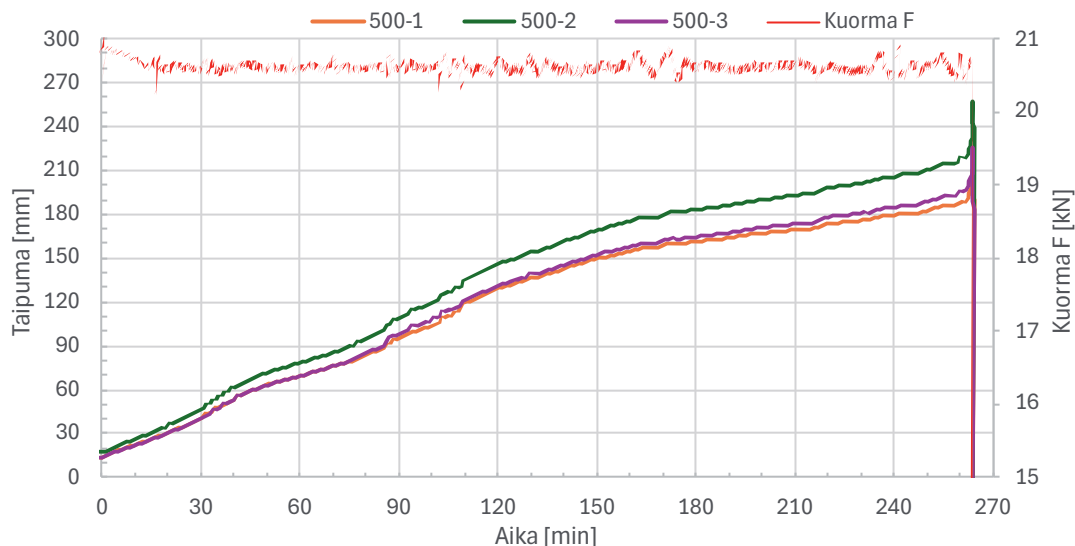
päättyi ajanhetkellä 91 minuuttia. Tällöin laskenta ei enää onnistunut saavuttamaan tasapainoa, vaan siirtymät kasvoivat suuremmiksi, kuin asetettu yläraja 2 m.

Rakenteen liimasaumoista mitatut lämpötilat jatkoivat nousemista vielä selvästi palon kuumenemisvaiheen päättymisen jälkeen. Kuvassa 4 on esitetty kokeellisesti sekä numeerisesti määritettyjen lämpötilamittausten tulokset mittapisteissä ajan funktiona. Yhtenäisillä viivoilla on esitetty polttokokeesta mittaamalla saatujen lämpötilojen keskiarvot jokaisessa liimasaumassa. Katkoviivalla on esitetty polttokokeen SAFIR-mallinnuksen lämpötila-analyysin mukaiset lämpötilat liimasaumoissa. Mustalla kaksoispistekatkoviivalla on esitetty kuumenemisvaiheen päättymisen ajanhetki.

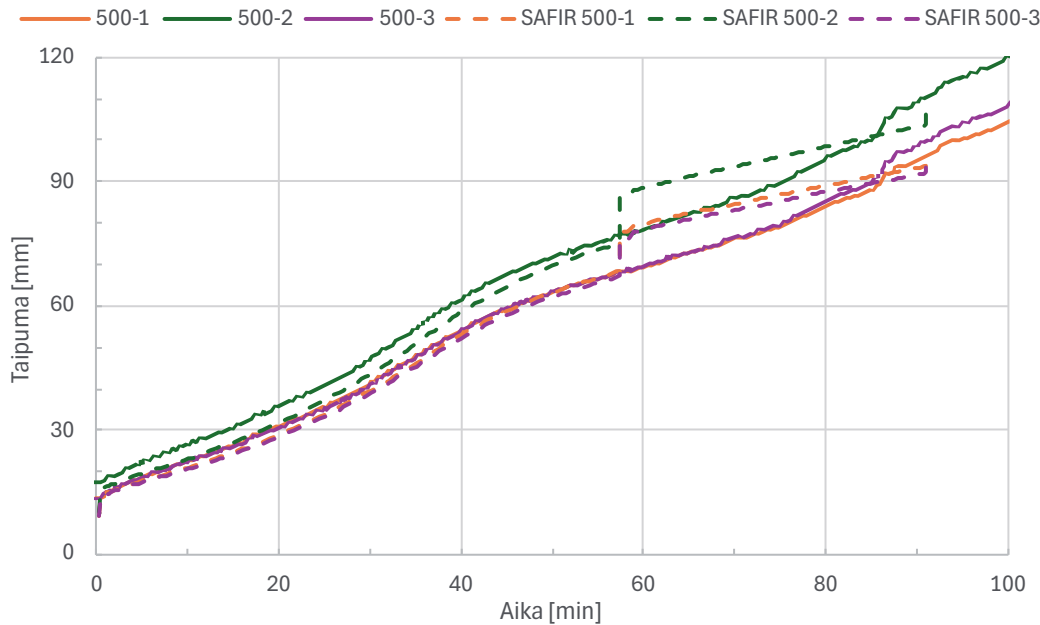
Kokeellisesti ja numeerisesti määritetyt taipumat mukailivat

toisiaan pääosin hyvin. Noin 60 minuutin kohdalla SAFIR-mallissa havaittiin äkillinen taipuman. Tämän arvioitiin johtuvan siitä, että alimman lamellin kantavuus menetettiin. Rakenteelle jäi kuitenkin vielä tarpeeksi lujuutta siten, että se ei menettänyt kantavuuttaan tässä vaiheessa. Taipuman maksimiarvo numeerisesti määritettynä (104 mm) määritettiin olevan vain noin 45 % siitä arvosta, mikä mitattiin polttokokeessa (232 mm). Tämän arvioitiin johtuvan SAFIR:in materiaalmallista puulle, mikä ei oleta sille lainkaan plastista käyttäytymistä.

Kuvassa 5 on esitetty kokeenaikaiset taipumat mittapisteittäin ajan funktiona. Mittapiste 500-2 sijaitsi jännevälin keskellä ja mittapisteet 500-1 ja 500-3 noin 650 mm jännevälin keskeltä molempiin suuntiin. Kuvaan on lisäksi sovitettu kuormitustunkilla kohdistettu kuorman arvo ajan funktiona.



Kuva 5: Kokeen aikaiset taipumat sekä kohdistettu kuorma.



Kuva 6: Taipumat kolmessa pisteessä kokeellisesti ja SAFIR:illa määritettyinä.

► Kuvassa 6 on esitetty taipumamittausten vertailu. Yhtenäisellä viivalla on merkitty polttokokeessa mitatut taipumat ja katkoviivalla SAFIR:illa määritetyt taipumat.

Johtopäätökset

Polttokokeessa käytetyn rakenteen ja sitä vastaavan kuormitustason kantavuuden luokitus uuden sukupolven eurokoodin mukaisesti oli R 47 ja sen B-luokitus polttokokeen perusteella määritettiin olevan vähemmän kuin B 34. Tämä tulos tarkoittaa, että CLT-vaakarakenteella, jonka kuormitustaso $LR \approx 28\%$, B-luokitus on alle 73 % sen kantavuuden luokituksesta.

SAFIR:illa laskettuna pisin DHP-konseptin mukainen kuumenemisvaiheen kesto, jonka rakenne säilytti kantavuutensa koko tarkastelun ajan jäähtymisvaihe huomioiden, oli 25 minuuttia. Tällöin rakenteen B-luokituksella, kun sen kuormitustaso $LR \approx 28\%$, määritettiin B 25. Tämä tulos on noin 53 % sen kantavuuden luokituksesta.

Johtopäätöksenä voidaan arvioida CLT-vaakarakenteen, jonka kuormitustaso $LR \approx 28\%$, B-luokituksen olevan noin 53–73 % sen R-luokituksesta. Tämän arvion alarajan 53 % nähdään olevan käytetyillä parametreillä todennäköisesti todellista pienempi. Tämä perustuu SAFIR:in mekaanisen analyysin epävarmuuksiin CLT-rakenteilla. Arvion ylärajan 73 % vastaavasti nähdään olevan hieinan todellista korkeampi, sillä polttokokeesta ei pystytty määrittämään rakenteen todellista B-luokitusta.

Tämän tutkimuksen tulokset osoittivat, että kantavuuden menetykseen jäähtymisvaiheessa on CLT-vaakarakenteelle relevantti uhka. Standardipalolle altistetun rakenteen, jonka palonkestävyysluokka on R 60, ei oleteta sortuvan, mikäli sen vastaanottama paloaltistus on kestänyt alle 60 minuuttia. Luonnollisen palon mukaisessa mitoitustarkastelussa, joka sisältää palon jäähtymisvaiheen, rakenne voi murtua jäähtymisvaiheessa, vaikka palon kuumenemisvaihe olisi kestänyt selvästi alle 60 minuuttia. CLT-rakenne on altis viivästyneelle sortumalle luonnollisessa palossa jo lyhyillä kuumenemisvaiheen kestoilla.

Kiitokset

Kiitokset työssä mukana olleille henkilöille: professori Mikko Malaska (ohjaus, tarkastus), professori Sami Pajunen (tarkastus) ja väitöskirjatutkija Mika Alanen Tampereen yliopistosta sekä TkT Mikko Salminen (ohjaus) ja Aleksi Ojala (ohjaus) Jensen Hughes Finland Oy:stä.

Lähteet

1. Wiesner, F., Bisby, L., Bartlett, A., Hidalgo, J., Santamaria, S., Deeny, S. & Hadden, R., (2019), Structural capacity in fire of laminated timber elements in compartments with exposed timber surfaces, Engineering structures, Kidlington: Elsevier Ltd, 179, s. 284–295, DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.084.
2. Gernay, T. & McNamee, R., (2024), Burnout resistance based on the Duration of Heating Phase concept-Literature Review and Roadmap, Division of Fire Safety Engineering, Lund University, 55 s., Retrieved from <https://portal.research.lu.se/en/publications/burnout-resistance-based-on-the-duration-of-heating-phase-concept>
3. Gernay, T. & Franssen, J.-M., (2015), A performance indicator for structures under natural fire, Engineering structures, Elsevier Ltd, 100, s. 94–103, DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.06.005.
4. Gernay, T., (2021), Fire resistance and burnout resistance of timber columns, Fire safety journal, Lausanne: Elsevier Ltd, 122, s. 103350-. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103350.
5. Franssen, J.-M., (2005). SAFIR: A Thermal/Structural Program for Modeling Structures Under Fire, Engineering journal (New York), 42(3), s. 143–158.

Pohjoismaisen puutavaran pyrolyysi ja halkeilu ulkoisen lämpöaltistuksen aikana

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitetään kirjoittajan väitöstyön [1] keskeiset löydökset ja johtopäätökset. Työn tavoitteena on toiminnallisen palosuunnittelun edistäminen kehittämällä materiaalmallit mänty-, ja kuusipuutavaralle ennustamaan hiiltymän etenemistä ja lämmönvapautusta palavassa puussa. Lisäksi väitöstyössä on esitetty ensimmäiset julkaistut suorat havainnot hiiltymän puun pinnan halkeilusta, auttamaan halkeilun vaikutuksen huomioimisessa materiaalmallinnuksessa myöhemmässä tutkimuksessa.

Sekä männylle että kuuselle kehitettiin kaksi erillistä materiaalmallia: yhden reaktion malli, joka olettaa puun yhdeksi materiaalikomponentiksi, sekä rinnakkaisten reaktioiden malli, joka tarkastelee puun kunkin pääkomponentin pyrolyysiä erillisesti. Materiaalmallien estimoinnissa ja validoinnissa käytettiin kartiokalorimetrikokeita. Yhden reaktion malli osoittautui suositeltavaksi, sopivuuden koetuloksiin ollessa vastaava kuin monimutkaisemmalla rinnakkaisten reaktioiden mallilla, kuitenkin ilman monimutkaisemman mallin suurempaa epävarmuutta. Mallin ennusteen havaittiin olevan herkkä ympäristön happipitoisuudelle.

Halkeamien muodostumista hiiltymien mänty-, kuusi-, ja koivupuutavarojen pinnoilla seurattiin infrapunakameralla. Vastoin odotuksia halkeamien lukumäärä ei kasvanut johdonmukaisesti ulkoisen lämpövirrantiheyden funktiona. Aiemmin kehitetyn halkeilumallin analyttinen muotoilu ennusti halkeamien määrän oikeassa suuruusluokassa kykenemättä kuitenkaan tarkkaan ennusteeseen.

Johdanto

Puurakentamista kohtaan on kasvavaa maailmanlaajuista kiinnostusta, sillä puu on uusiutuva ja ympäristöystävällinen materiaali [2]. Puu on kuitenkin syttyvää, ja kaikki puiset rakenneosat kasvattavat palokuormaa. Pyrolyysin, eli puun termisen hajoamisreaktion tuotteena muodostuu hiiltymää. Hiiltynyt puu on me-

nettänyt kaiken mekaanisen kestäväyytensä, jonka vuoksi palava puurakennus on vaarassa romahtaa. Paloturvallisuushuolien takia puun käyttöä rajoitetaan kantavissa rakenteissa ja näkyvissä pinnoissa [3]. Toiminnallinen palosuunnittelu on ainoa keino toteuttaa riittävällä paloturvallisuuden tasolla rakennuksia, joissa ratkaisut eivät noudata taulukoitujen määräysten rajoitteita. Määritelmällisesti toiminnallinen palosuunnittelu tarkoittaa riittävän turvallisuuden tason osoittamista perustuen laskelmiin ja tekniiseen analyysiin, taulukoitujen vaatimusten suoraviivaisen noudattamisen sijasta.

Toiminnallisessa palosuunnittelussa käytettävässä laskennallisessa mallissa terminen-, eli materiaalmalli kuvaa lämpötilan kehitystä palolle altistuneessa materiaalissa, ja puun tapauksessa hiiltymän edistymistä. Aiemmassa tutkimuskirjallisuudessa puulle on kehitetty puulle useita materiaalmalleja eri monimutkaisuuden tasoilla. Varhainen esimerkki on Lautenbergerin et al. [4] kehittämä verrattain yksinkertainen malli, jossa oletetaan äärettömän ohut pyrolyysirintama ja ainoastaan yksi materiaalikomponentti. Richter et al. [5] esittävät esimerkin uudemmasta ja monimutkaisemmasta mallista, joka tarkastelee puun kunkin pääkomponentin (hemiselluloosa, selluloosa, ligniini) pyrolyysireaktiota erillisinä, sisältäen myös hapettumisreaktion. Monimutkaisuuden kasvattamisessa vaarana on kuitenkin mallin epävarmuuden kasvu, jota osaltaan kasvattaa jokainen malliin sisällytettävä uusi parametri [6]. Yhtä monimutkaisuuden tasoa edustava hapettumisreaktio jätetään usein huomiotta. Tähän on usein perusteena oletus lähes happivapaasta pinnasta, liekehtivän palamisen kuluttaessa hapen ennen kuin se ehtii saavuttaa puun pinnan. Toisaalta erityisesti voimakkaan eksoterminen hiiltymän hapettuminen saattaa kiihdyttää pyrolyysiä merkittävästi vapauttamansa lämmön kautta.

Hiiltymä suojaa alla olevaa puuta liekkien lämpövirralta, mutta sen suojaava vaikutus heikkenee halkeamien muodostuessa. Huolimatta halkeilun merkittävästä vaikutuksesta, siitä on ainoastaan

▶ vähän aiempaa tutkimusta. Baroudi et al. [7] kehittivät halkeamakuviota ennustavan mallin, joka perustuu hypoteesiin lämpörasitetun puun pehmenevän ja lämpölaajenevan pintakerroksen termomekaanisesta lommahduksesta. Ainoa kirjallisuudessa saatavilla oleva sekä pyrolyysin että halkeilun huomioiva materiaalmalli on Nguyenin, Wichmanin ja Pencen kehittämä [8, 9], jossa halkeilu perustuu pyrolyysin aiheuttamasta kutistumisesta seuraavaan jännitykseen materiaalissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on muodostaa kahdelle pohjoismaiden olosuhteissa keskeisille puutavaralle, männylle ja kuuselle, toiminnallisessa palosuunnittelussa käyttökelpoinen materiaalmalli. Hapettuminen on mahdollisesti vaikutukseltaan merkittävä reaktio vapauttamansa lämmön kautta. Hiiltymän halkeilulla on merkittävä vaikutus, mutta sen mekanismit ovat huonosti tunnettuja. Näin ollen väitöstyössä etsitään vastaukset kolmeen seuraavaan tutkimuskysymykseen:

1. Mitkä ovat monimutkaisuuden tasoltaan toiminnalliseen palosuunnitteluun soveltuvan, kuusen ja männyn palamista ennustavan materiaalmallin parametrit?
2. Mikä on hapettumisen merkitys puun palamisessa?
3. Miten ja milloin hiiltynyt puu halkeilee ulkoisessa lämpöaltistuksessa?

Menetelmät

Materiaalit

Koemateriaaleina käytettiin kuusta (*Picea abies*), mäntyä (*Pinus sylvestris*) ja koivua. Koivun tarkka laji ei ole tiedossa, mutta kyseessä on todennäköisesti hies-, tai rauduskoivu. Kuusen ja männyn kuivatiheydet 408 ja 493 kg/m³ mitattiin kokeellisesti [10], ja koivun kuivatiheydeksi oletettiin malliin sovitettuna parametrina saatu 600 kg/m³ [11]. Testattuja puunäytteitä säilytettiin 20 °C:n lämpötilassa ja 45 %:n suhteellisessa kosteudessa, johtaen 9 %:n kosteuspitoisuuteen märkäpainosta. Kuusen ja männyn kemialliset koostumukset pääkomponentteittain oletettiin Sjöströmin [12] mukaisesti: kummallekin puulajille massaperusteisesti noin 28 % hemiselluloosaa, 40 % selluloosaa ja 27 % ligniiniä. Uuteaineita kummassakin on alle 3.5 % ja tuhkaa alle 1 %. Koivua mallinnettiin tässä työssä ainoastaan yhden reaktion mallilla, joten sille ei ollut tarvetta määrittää vastaavaa koostumusta.

Kokeelliset menetelmät

Kokeellisista mittauksista suoritettiin aina kolme toistoa.

Puumateriaalin termistä hajoamista ja termofysikaalisia ominaisuuksia tutkittiin mikroskaalan koemenetelmillä, joissa käytetyn näytteen määrä on pieni, ainoastaan milligrammoja. Näistä käytettiin tässä työssä termogravimetristä analyysia (*thermogravimetric analysis*, TGA), differentiaalista pyyhkäisykalorimetriä (*differential scanning calorimetry*, DSC) ja mikrokolorimetriä (*microscale combustion calorimetry*, MCC). Tässä tutkimuksessa mikroskaalan menetelmiin ryhmiteltiin myös laserpulssianalyysi (*laser flash analysis*, LFA). Kaikissa tutkittava näyte pidettiin inertissä typpivirtauksessa. TGA-kokeilla mitattiin kuusen ja männyn massahäviö lämpötila-alueella 20–800 °C neljällä eri lämmitysnopeudella: 2, 5, 10 ja 20 K/min. Kuusen ja männyn ominaislämpökapasiteetti mitattiin DSC-kokeilla lämpötila-alueella 0–300 °C ja lämmitysnopeudella 10 K/min vertaamalla näytteen lämpövirtaa safiiristandardiin. Kuusen ja männyn lämmönluovutusnopeudet määriteltiin mikrokolorimetriakokeilla lämpötila-alueella 75–750 °C ja nimellisillä lämmitysnopeuksilla 20 ja 60 K/min. Kuusen ja männyn lämmönjohtavuudet mitattiin kohtisuoraan synn suuntaan vastaan LFA-menetelmällä. Mittaukset suoritettiin 20–200 °C lämpötila-alueella käyttäen näytteinä mitattavasta puusta työstet-

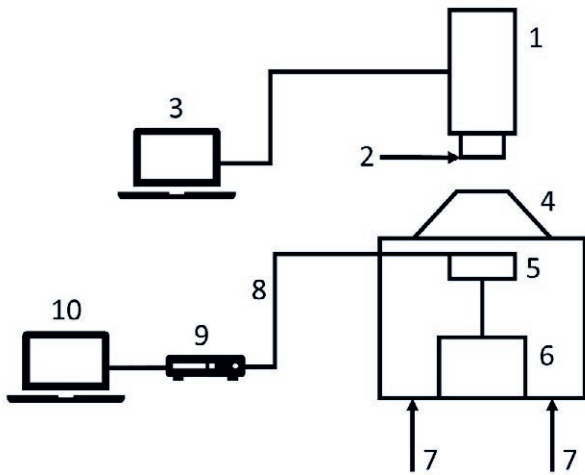
tyjä 12.4–12.7 mm leveitä ja 2.9–4.25 mm paksuja kiekkoja, jotka päällystettiin ennen kokeita grafiittisuihkeella.

Tutkimuksen keskeisenä koevälineenä oli kartiokalorimetri, jossa katkaistun kartion muotoinen lämpösäteilijä kohdistaa mitattavan näytteen pinnalle lämpövirran, ja mittaa samanaikaisesti näytteen massahäviötä, savunmuodostusta, sekä palotehoa. Näytteen päälle liikutettava valokaarisytytin sytyttää pyrolyysikaasut välittömästi palavan seoksen muodostuttua näytteen pinnalle. Kartiokalorimetrissä mitatut kuusi-, ja mäntynäytteet olivat neliönmuotoisia, altistetulta pinnaltaan 10 × 10 cm ja paksuudeltaan 2 cm. Lämpöaltistuksen suunta oli aina syiden suuntaan nähden kohtisuorassa. Kokeet suoritettiin hapettomissa oloissa typpi-ilmakehässä sulkemalla näytekammiota ja syöttämällä sinne typpivirtaus, liekittömän kytemispalon, sekä liekehtivän palamisen olosuhteissa ISO 5660-1 -standardin mukaisesti, kahden jälkimmäisen ollessa normaali-ilmakehässä. Liekitön kytemispalo saatiin aikaan ilman ulkoista sytytystä ja riittävän alhaisella ulkoisella lämpösäteilyvirralla. Näytteet käärittiin kaikilta paitsi altistetulta pinnaltaan alumiinifolioon, ja asetettiin näytteenpitimeen 1.3 cm kerroksen keraamista villaa päälle. Kartiokalorimetrimittaukset hapettomissa oloissa toteutettiin 35 ja 50 kW/m² ulkoisilla lämpövirrantiheyksillä. Lämpövirrantiheys kytevä palamisen kokeissa oli 25 ja 35 kW/m² kuuselle, ja männylle alennettuna 20 ja 30 kW/m² itsestään syttymisen välttämiseksi. Kokeet liekehtivän palamisen oloissa toteutettiin 25, 35 ja 50 kW/m² ulkoisilla lämpövirrantiheyksillä. 35 kW/m² ulkoisella lämpövirrantiheydellä toteutetut hapettomat ja liekehtivät kokeet toistettiin lämpötilamittauksilla näytteen sisällä 1 cm:n syvyydellä, sekä takapinnalla 2 cm:n syvyydellä. Kullakin syvyydellä käytettiin kahta K-tyypin lämpöparia, joista 1 cm:n syvyydellä olevat asetettiin näytteen sivusta porattuun reikään.

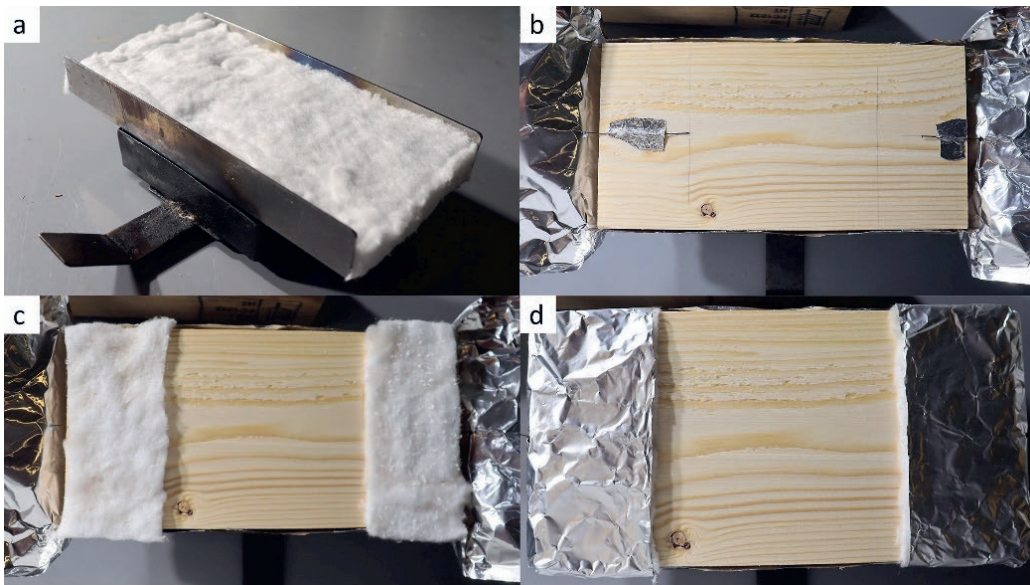
Hiiltymän halkeilua tutkittiin suljettavassa näytekammiossa, jonka huipulla oli ISO 5660-1 -standardin mukainen kartiolämmittin. Tutkittava näyte asetettiin kartiolämmittimen alle, ja sen pintaa seurattiin infrapuna(IR)kameralla. IR-kamera asetettiin suojakotelossaan suoraan näytekammion yläpuolelle siten, että puunäytteen pinta näkyi kartiolämmittimen yläosassa olevan aukon läpi. Kokeet suoritettiin hapettomissa oloissa sulkemalla näytekammiota ja ohjaamalla sinne typpivirta näkyvyyden peittävän liekehtivän palamisen estämiseksi. Poistuvien kaasujen ainoa ulospääsy oli kartiolämmittimen yläosan aukon läpi. Kameran suojakotelon ikkunaa huuhdeltiin paineilmalla sen tahriintumisen välttämiseksi. Tutkittuja puulajeja oli kolme: kuusi, mänty ja koivu. Kuusi- ja mäntynäytteistä testattiin kolme eri näytegeometriä: sivultaan 10 cm neliö ja paksuudeltaan joko 2 tai 4.5 cm, sekä 20 cm pitkä, 10 cm leveä ja 2 cm paksu suorakulmio. Suorakulmion muotoisista näytteistä peitettiin keraamisella villalla ja alumiinifoliolla kummastakin päädystä 5 cm:n osuus, jolloin lämmölle suoraan altistettu pinta oli 10 × 10 cm. Tämän tarkoituksena on selvittää lämpöaltistuksen epähomogeenisuuden vaikutusta halkeiluun. Puun pintalämpötilaa suojatulla osuudella tarkkailtiin lämpöpareilla. Koivunäytteitä testattiin ainoastaan 2 cm paksuina 10 × 10 cm neliöinä. Kuva 1 esittää koejärjestely halkeilun tutkimiseen ja kuvassa 2 esitetään 20 cm pitkien näytteiden valmistelu.

Reaktiomallit

Tutkimuksessa määritettiin sekä kuuselle että männylle parametrit kahdelle erilliselle reaktiomallille: yhden ja rinnakkaisten reaktioiden malleille. Hostikan ja Matalan tutkimuksessa koivulle [11] nämä kaksi johtivat parhaaseen mallin sopivuuteen eri koetuloksiin. Yhden reaktion mallissa puu oletetaan yhdeksi homogeeniseksi komponentiksi, joka tuottaa hajotessaan hiiltymää ja pyrolyysikaasuja, kun taas rinnakkaisten reaktioiden mallissa jokaiselle pääkomponentille (hemiselluloosa, selluloosa, ligniini)

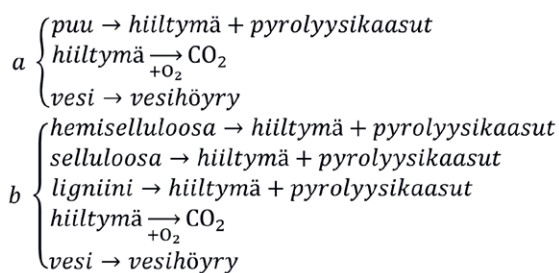


Kuva 1: Vasemmalla kaa-
viokuva ja oikealla valokuva
koejärjestelystä. 1) IR-kame-
ra suojakotelossaan,
2) paineilmapuhallus,
3) IR-kameran ohjaustieto-
kone, 4) kartiolämmitin,
5) näyte pitimessään,
6) vaaka, 7) tyypivirtauksen
sisääntulo, 8) lämpöparilan-
ka, 9) dataloggeri, 10) da-
taloggerin ohjaustietokone.
8, 9 ja 10 olivat käytössä ai-
noastaan testattaessa 20 cm
pitkiä näytteitä.



Kuva 2: a) Varta vasten 20
cm pitkille näytteille tehty
pidin, asetettuna tavallisen
näytteenpitimen päälle, b)
20 cm pitkä näyte pitimes-
sä lämpöparit asetettuna
ennen päätyjen suojausta,
c) keraamisen villan kerros
asetettu näytteen päätyjen
päälle, d) näytteen alapuo-
lella oleva alumiinifolioker-
ros käännettynä päätyjen
villakerrosten päälle, jättäen
10 × 10 cm:n suoraan läm-
pösteilylle altistetun alan.

on määriteltä oma erillinen pyrolyysireaktion. Tutkimukses-
sa todettiin, että jatkumomittakaavan mallissa uuteaineiden tar-
kastelulla ei ole merkitystä, vaikka mallin sopivuudelle mikros-
kaalan kokeisiin niiden huomiointi on tärkeää. Täten Sjöströmin
[12] raporttoima uuteaineen määrä sisällytettiin sekä kuuselle et-
tä männylle osaksi hemiselluloosaa. Hiiltymälle määritettiin ha-
pettumisreaktio ja puuhun sitoutuneen veden haihtuminen mal-
linnetaan omalla reaktiolla. Reaktiomallit on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Tutkimuksessa käytetyt reaktiomallit: a) yksi reaktio, b)
rinnakkaiset reaktiot.

Numeeriset menetelmät

Numeeriseen materiaalmallinnukseen käytettiin Fire Dynamics
Simulator 6 (FDS) -ohjelmistoa. FDS on laskennalliseen virtaus-
mekaniikkaan perustuva tulipalojen mallinnusohjelmisto, joka
sisältää mallit myös lämmönsiirrolle ja pyrolyysille kiinteässä ai-
neissa. FDS määrittelee reaktionopeuden syvyydellä x Arrhenius-
tyyppisellä kinetiikalla.

$$r_{ij} = A_{ij} \rho_{s,i}^{n_{s,ij}} \exp\left(-\frac{E_{a,ij}}{RT_s}\right) X_{O_2}^{n_{O_2,ij}} \quad (1)$$

jossa r_{ij} on reaktionopeus, A_{ij} on Arrheniuksen vakio, ρ_{ij} on mas-
sakonsentraatio, $n_{s,ij}$ on reaktion kertaluku, $E_{a,ij}$ on aktivaatioener-
gia, R on yleinen kaasuvakio, T_s on kiinteän faasin lämpötila, X_{O_2}
on paikallinen hapen tilavuusosuus ja $n_{O_2,ij}$ on reaktion kertalu-
ku hapen suhteen. Alaindeksit i ja j symboloivat materiaalikom-
ponenttia i käymässä läpi järjestysluvultaan reaktiota numero j .

FDS ei mallinna suoraan kaasujen aineensiirtoa kiinteässä faa-
sissa, vaan olettaa hapen tilavuusosuudelle eksponentiaalisen vai-
menemisen kaasufaasin arvosta $X_{O_2,g}$ syvyyden x funktiona.

$$X_{O_2}(x) = X_{O_2,g} \exp\left(-\frac{x}{L_g}\right) \quad (2)$$

jossa L_g on keskenään kilpailevista hapen diffuusiosta ja sen reak-
tioissa kulumisesta johtuva diffuusion pituuskaala.

► FDS mallintaa kiinteän faasin lämmönsiirtoa yksiulotteisella lämpöyhtälöllä.

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + q_s''' \quad (3)$$

jossa ρ_s , c_s ja k_s ovat kiinteän faasin tiheys, ominaislämpökapasiteetti, sekä lämmönjohtavuus, t on aika ja q_s''' on kemiallisten reaktioiden sitomaa tai vapauttamaa lämpöä ja säteilyn absorptiota vastaava lähdetermi.

Pyrolyysireaktioiden kineettiset parametrit estimoitiin sovittamalla TGA-kokeisiin, ja materiaalimalli sovittamalla kartiokalorimetrikokeisiin. Mallien estimointiin käytettiin *shuffled complex evolution* (SCE) -algoritmia, estimointiin käytetyn ohjelman ollessa joko Gpyro [13] (kineettiset parametrit) tai PROPTI [14] (materiaalimalli).

Infrapunakameratallenteista laskettuja halkeamien määriä verrattiin Baroudin et al. [7] termomekaanisen halkeilumallin analyttisen muodon ennusteeseen. Analyttinen muoto on kaksikulotteinen approksimaatio täydestä kolmiulotteisesta numeerisesti elementtimenetelmällä ratkaistavasta mallista. Mallin syöteenä toimivan puun lämmenneen ja pehmenneen pintakerroksen paksuus laskettiin yksiulotteisilla FDS-simulaatioilla käyttäen kuuselle ja männylle tässä työssä ja koivulle Hostikan ja Matalan [11] tutkimuksessa kehitettyä yhden reaktion mallia.

Tulokset

Termogravimetria ja kineettisen mallin estimointi

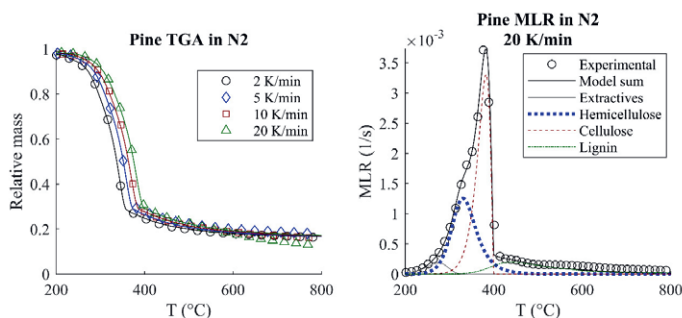
TGA-kokeisiin sovittamalla estimoidut puun pyrolyysireaktioiden kineettiset parametrit on esitetty taulukossa 1. Nämä ovat Arrheniuksen vakio, aktivaatioenergia, reaktion kertaluku, sekä hiil-

Komponentti, parametri	Yhden reaktion malli		Rinnakkaisten reaktioiden malli	
	Kuusi	Mänty	Kuusi	Mänty
Vesi	A (1/s)	$8.37 \cdot 10^{12}$	$8.37 \cdot 10^{12}$	$8.37 \cdot 10^{12}$
	E (kJ/mol)	121	121	121
	n_s (-)	1	1	1
Puu	A (1/s)	$2.121 \cdot 10^{11}$	$7.724 \cdot 10^{10}$	
	hs		$6.065 \cdot 10^9$	$9.49 \cdot 10^9$
	s		$4.25 \cdot 10^{14}$	$2.453 \cdot 10^{14}$
	l		$8.491 \cdot 10^{-2}$	$3.364 \cdot 10^{-2}$
	E_a (1/s)	190.5	185.1	
	hs		168.1	168.1
	s		195.1	191.2
	l		157.5	157.5
	n_s (-)	1.89	1.89	
	hs		2.5	2.3
	s		0.62	0.61
	l		6.11	6.11
	$v_{hiiltymä}$ (-)	0.16	0.16	
	hs		0	0
	s		0.043	0.033
	l		0.517	0.517
ΔH_c (kJ/kg)	13750	13850		
	hs		19500	17000
	s		13400	14000
	l		7000	7200
H_r (kJ/kg)	112	140		
	hs		249	404
	s		253	629
	l		-1230	-1250
Hiiltymä	A (1/s)	3.75	1.79	23.5
	E_a (kJ/mol)	27.7	27.7	32.5
	n_s (-)	1	1	1
	ϵ (-)	0.838	0.838	0.838
	ρ_s (kg/m ³)	52.5	104	20

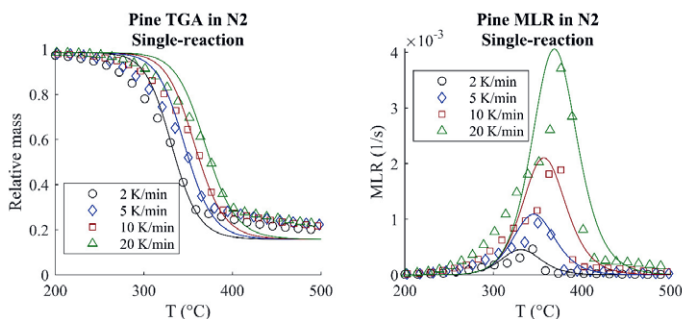
Taulukko 1: Mallien parametrit. Hemiselluloosa: hs; selluloosa: s; ligniini: l. Kineettiset parametrit pätevät puumateriaalille, jonka alkukosteus on 9 massa-% märkäpainosta.

mäsaanto $v_{hiiltymä}$. Taulukkoon on koottu myös muilla menetelmillä estimoidut parametrit: MCC-kokeilla mitattu palamislämpö ΔH_c , sekä kartiokalorimetrikokeisiin sovittamalla estimoidut puun pyrolyysilämpö H_r , hiililymän emissiivisyys ϵ , sekä hiililymän tiheys.

Kuvassa 4 esitetään männyn TGA-koetulokset ja niihin sovitettu rinnakkaisten reaktioiden malli, ja kuvassa 5 vastaavasti sovitettu yhden reaktion malli. Kuvissa vasemmalla esitetään suhteellinen massa (relative mass) eri lämmitysnopeuksilla, ja oikealla edellisen aikaderivaatta eli massahäviönopeus (mass loss rate, MLR). Kuuselle vastaavat on esitetty lähteessä [10]. Rinnakkaisten reaktioiden malli kykenee toistamaan koetulokset lähes täydellisellä tarkkuudella. Yhden reaktion malli ennustaa suurim-



Kuva 4: Vasen: suhteellinen massa männyn TGA-kokeissa, ja niihin sovitetun rinnakkaisten reaktioiden mallin ennusteet. Oikea: kokeellinen massahäviönopeus männyn TGA-kokeissa 20 K/min lämmitysnopeudella (Experimental), kunkin komponentin osuus massahäviönopeudesta, sekä näiden yhdessä muodostama mallisumma (Model sum). Extractives: uuteaineet, hemicellulose: hemiselluloosa, cellulose: selluloosa ja lignin: ligniini. Kokeelliset tulokset symboleina ja simulaatiot yhtenäisinä viivoina.



Kuva 5: Vasen: suhteellinen massa männyn TGA-kokeissa, ja niihin sovitetun yhden reaktion mallin ennusteet. Oikea: massahäviönopeus männyn TGA-kokeissa, ja niihin sovitetun yhden reaktion mallin ennusteet. Kokeelliset tulokset symboleina ja simulaatiot yhtenäisinä viivoina.

man massahäviönopeuden kohdan tarkasti, mutta ei kykene toistamaan massahäviön alkua matalissa lämpötiloissa tai korkeisiin lämpötiloihin jatkuvaa ligniinin hajoamista.

Palamislämpö

Taulukossa 1 on esitetty palamislämpö kuuselle ja männylle puulajikohtaisesti, sekä kummallekin puulajille komponenteittain. Ensimmäinen mitattiin MCC-kokeen tuloksena saadun lämmönvapautusnopeuskäyrän aikaintegraalina, ja jälkimmäinen sovitettamalla kunkin pääkomponentin palamislämpö käsin käyttäen taulukon 1 rinnakkaisten reaktioiden mallien kineettisiä parametreja (A , E_a , n_s , $v_{hiiltymä}$), kunnes simuloidun lämmönvapautusno-

peuskäyrän muoto ja sen integraali vastasi kokeellisia MCC-mitauksia. Menetelmä on esitetty tarkemmin lähteessä [10].

Ominaislämpökapasiteetti

Kuusen ja männyn mitatut ominaislämpökapasiteetit ovat lähellä toisiaan, ja näiden havaittiin kasvavan lineaarisesti lämpötila-alueella 30–230 °C. Korkeammissa lämpötiloissa mittaustuloksissa alkoi esiintyä epävarmuutta pyrolyysireaktioiden alkamisen vuoksi. Taulukossa 2 on esitetty materiaalimallissa käytetyt ominaislämpökapasiteetit kuuselle ja männylle lämpötiloissa 30 ja 230 °C. Lämpötila-alueen sisällä oletettiin lineaarinen kasvu, ja sen ulkopuolella lineaarinen ekstrapolaatio.

Lämpötila (°C)	Ominaislämpökapasiteetti (J/(kg·K))
30	920
230	1800

Taulukko 2: Kuusi-, ja mäntyyn kokeellisesti mitatut ominaislämpökapasiteetit 30 °C:n ja 230 °C:n lämpötiloissa.

Lämmönjohtavuus

Kuusen ja männyn materiaalimalleissa lämmönjohtavuuden oletettiin kasvavan absoluuttisen lämpötilan T funktiona LFA-koe-tuloksiin sovitettujen korrelaatioiden mukaisesti.

$$k_{kuusi} = 3.16 \cdot 10^{-4} T - 0.0305 \text{ (W/(m} \cdot \text{K))} \quad (4)$$

$$k_{mänty} = 3.57 \cdot 10^{-4} T - 0.00462 \text{ (W/(m} \cdot \text{K))} \quad (5)$$

Kartiokalorimetrikokeet ja materiaalimallin validointi

Taulukon 1 parametreista veden haihtumisreaktion kineettiset parametrit, puun pyrolyysilämpö, hiiltymän emissiivisyys sekä hiiltymän hapettumisreaktion kineettiset parametrit annettiin estimoitaviksi parametreiksi sovitettaessa materiaalimallia kartiokalorimetrikokeisiin. Taulukossa 1 esitetty hiiltymän tiheys kullekin materiaalimallille on säädetty siten, että täysin hiiltyneen näytteen simuloitu paksuus vastaa mitattua näytteen loppupaksuutta kokeen jälkeen. Muille materiaalimallien parametreille oletettiin seuraavat kirjallisuusarvot: puun emissiivisyydeksi 0.9 [15], konvektiiviseksi lämmönsiirtokertoimeksi 15 W/(m²K), joka on lähteessä [16] raportoidun 10–20 W/(m²K) vaihteluvälin keskiarvo. Hiiltymän ominaislämpökapasiteetin oletetaan noudattavan korrelaatiota lähteestä [17] ja lämmönjohtavuuden korrelaatiota lähteestä [18], kummatkin alla absoluuttisen lämpötilan T suhteen.

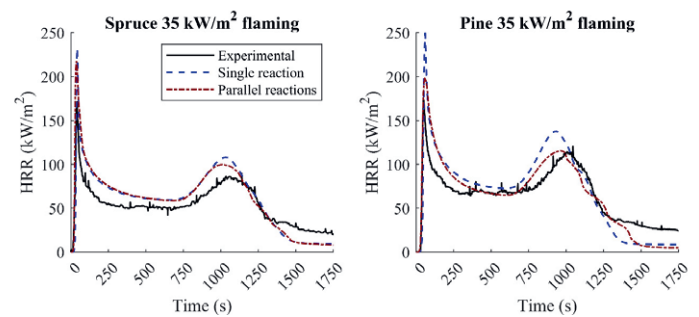
$$c_{hiiltymä} = 1430 + 0.355T - \frac{7.32 \cdot 10^7}{T^2} \text{ (J/(kg} \cdot \text{K))} \quad (6)$$

$$k_{hiiltymä} = 8.2 \cdot 10^{-5} T + 0.091 \text{ (W/(m} \cdot \text{K))} \quad (7)$$

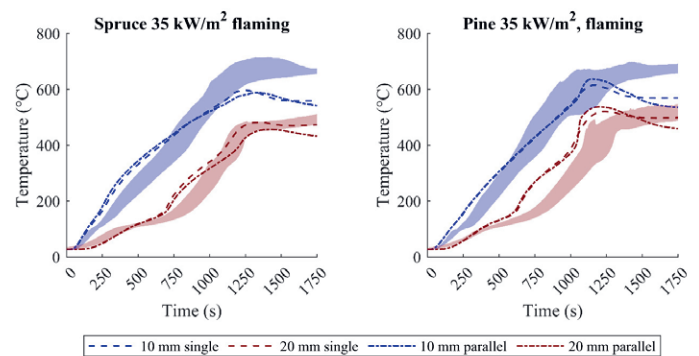
Kummankin puulajin muodostaman hiiltymän hapettumisreaktion kertaluvuksi hapen suhteen oletetaan 0.68 [19] ja hapettumislämmöksi -32000 kJ/kg [20]. Kaasun diffuusion pituusskaalaksi L_g valitaan 10⁻⁴ m hapen diffuusion rajoittamiseksi lähellä hiiltymän kappaleen pintaa.

Materiaalimallin estimointiin käytettiin kartiokalorimetrikokeita 35 kW/m²:n ulkoisella lämpövirrantiheydellä, sekä hapettomissa, kytemispalon, että liekehtivän palon olosuhteissa. Kokeita 25:n ja 50 kW/m²:n ulkoisilla lämpövirrantiheyksillä käytettiin mallin validointiin. Tässä esitetään ainoastaan tulokset 35 kW/m²:n lämpövirrantiheydellä liekehtivän palon aikana. Muut tulokset ovat saatavilla lähteessä [21]. Kuva 6 esittää kokeellises-

ti mitatut lämmönvapautusnopeudet, ja kuva 7 näyttää lämpötilat sisällä ja takapinnalla (10:n ja 20 mm:n syvyydet) kuuselle ja männylle liekehtivissä olosuhteissa 35 kW/m²:n lämpövirrantiheydellä, ja koetuloksiin sovitettujen yhden-, ja rinnakkaisten reaktioiden mallien ennusteet. Sekä tässä kirjoituksessa että lähteessä [21] esitetyt tulokset osoittavat sekä yhden-, että rinnakkaisten reaktioiden mallien tarkan ja lähes yhtäläisen sopivuuden kartiokalorimetrimittauksiin. Poikkeamana havaitaan systemaattisesti ylien-nustettu ensimmäisten massahäviö- ja lämmönvapautusnopeuspiikkien korkeus. Todennäköinen syy on mallien oletama haihtuvan veden ja pyrolyysituotteiden välitön aineensiirto kiinteän faasin pinnalle, kun taas todellisuudessa tätä hidastaa aineensiirtovastus kiinteän faasin sisällä. Merkittävin poikkeama on kuvan 7 havainnollistama mitattujen ja simuloitujen lämpötilojen välinen ero 10 mm:n syvyydellä kokeen lopussa. Epäily syy kokeellista alhaisempaan ennusteen lämpötilaan on lämmönsiirtoa edistävien halkeamien muodostuminen kokeen edetessä, jota ei ole huomioitu laskennallisissa malleissa.



Kuva 6: Vasen: kuusen kokeellisesti mitattu (Experimental) lämmönvapautusnopeus (heat release rate, HRR) liekehtivässä kartiokalorimetrikokeessa 35 kW/m² ulkoisella lämpövirrantiheydellä, sekä vastaavat ennusteet yhden (Single-) ja rinnakkaisten reaktioiden (Parallel reactions) malleilla. Oikea: männyn koetulos ja mallien ennusteet vastaavissa olosuhteissa.

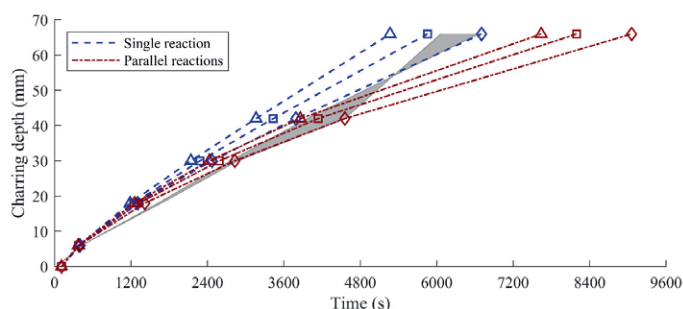


Kuva 7: Vasen: kuusen kokeellisesti mitattujen lämpötilojen vaihteluväli 10:n ja 20 mm:n syvyyksillä esitetty varjostetulla alueella, ja simuloitu lämpötilat kummallakin syvyydellä yhden (single) ja rinnakkaisten (parallel) reaktioiden malleilla liekehtivässä kartiokalorimetrikokeessa 35 kW/m²:n ulkoisella lämpövirrantiheydellä. Oikea: männyn koetulos ja mallien ennusteet vastaavissa olosuhteissa.

Validointi suuressa mittakaavassa

Materiaalimalleja kokeiltiin eri suuren mittakaavan palotestien tulosten ennustamisessa. ISO 834 -palotestiä [22] mallinnettiin kytemispalomallilla ilman erillistä kaasufaasin laskentaa, olettaen happipitoisuudeksi palotestiuunissa 7 % [23]. Testissä käytettyä puulajia ei ilmoitettu suoraan, mutta materiaaliominaisuuksien

perusteella kyseessä arvioitiin olevan kuusi. Lähteessä [21] osoitetaan tarkemmin, että nykyisessä muodossaan yhden-, eikä rinnakkaisten reaktioiden mallit eivät kykene ennustamaan testattavan puurakenteen lämpötilaprofiilin kehityksen yksityiskohtia, mutta kummatkin kykenevät ennustamaan 300 °C isothermien etenemisen, jonka yleisesti oletetaan vastaavan hiiltymärintamaa. Kuva 8 esittää mitatun 300 °C:n hiiltymärintaman etenemisen ISO 834 -palotestissä [22] 66 mm:n syvyydelle asti, yhden ja rinnakkaisten reaktioiden mallien ennusteet palotestiuunin 7 %:n happipitoisuudella, sekä herkkyysanalyysinä mallien ennusteet laskettuna 4:n ja 10 %:n happipitoisuuksilla. Kuva osoittaa hiiltymän etenemisen olevan herkkä uunin happipitoisuudelle: sekä yhden, että rinnakkaisten reaktioiden mallilla kolmen %-yksikön muutos happipitoisuudessa johtaa enimmillään kymmenen minuutin muutokseen ajassa, jossa hiiltymärintama saavuttaa 66 mm:n syvyyden.

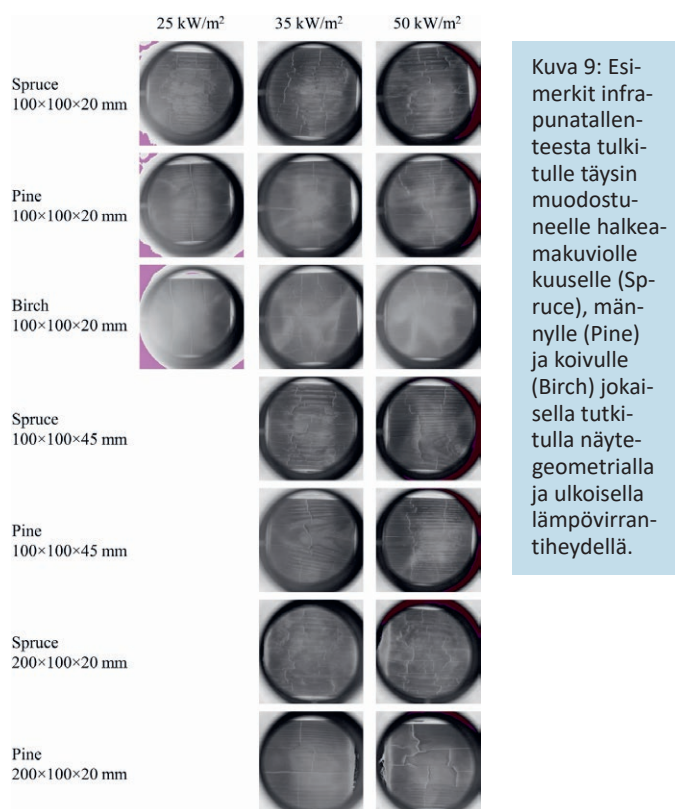


Kuva 8: 300 °C isothermin eteneminen ISO 834 -palotestissä [22], sekä yhden (Single-) ja rinnakkaisten reaktioiden (Parallel reactions) mallien ennusteet palotestiuunin happipitoisuuksilla 4, 7 ja 10 %. Varjostetulla alueella esitettyä kokeellinen vaihteluväli testin eri mittauspisteiden välillä. Testiuunin 10 %:n happipitoisuutta vastaava simulaatio on merkitty kolmioilla, 7 %:n happipitoisuutta vastaava simulaatio neliöillä, ja 4 %:n happipitoisuutta vastaava simulaatio vinoneliöillä.

Hiiltymän halkeilu

Tutkimuksen hiiltymän halkeilua koskeva osuus keskittyy erityisesti tutkimaan Baroudin et al. [7] hypoteesiä, jonka mukaan halkeamien muodostumisen perimmäinen syy on lämmölle altistettun puun pehmenemisen ja lämpölaajenevan pintakerroksen termomekaaninen lommahdus samalla, kun pintakerroksen laajenemista rajoittaa alla oleva kylmempi ja jähmeämpi puuaines. Tutkimuksessa keskitytään suunnaltaan kohtisuoraan syhyyn nähden oleviin halkeamiin, joiden voidaan olettaa olevan pintailmiöistä johtuvia. Infrapunatallenteita tarkkaillaessa lopullisen halkeamakuvion katsotaan muodostuneen, kun viimeinen halkeama kohtisuoraan syyn suuntaan nähden on muodostunut, mutta ennen kuin näytteen taipumisesta johtuva halkeilu alkaa. Kuva 9 esittää kuvakaappaukset infrapunatallenteesta täysin muodostuneen halkeamakuvion muodostumishetkeltä jokaiselle testatulle puulajin, ulkoisen lämpövirrantiheyden ja näytegeometrian yhdistelmälle.

Taulukko 3 esittää syyn suuntaan nähden kohtisuorien halkeamien määrien kokeelliset keskiarvot kullekin testatulle yhdistelmälle. Osittaiset halkeamat huomioitiin painotettuna niiden pituuden osuudella näytteen kokonaispituudesta, jonka seurauksena halkeamien määrä ei ole kokonaisluku. Havaittu halkeamien määrä ei kasva systemaattisesti ulkoisen lämpövirrantiheyden funktiona, joka on ristiriidassa aiempien tutkimustulosten kanssa [24]. Arvioitu syy on eroavuudet halkeamien määrittelyssä. Li et al. [24] laskevat ainoastaan syvät halkeamat läpi hiiltyneestä kappaleesta kokeen päätyttyä, joiden taas tässä tutkimuksessa arvioitiin infrapunatallenteiden perusteella johtuvan näytteen taipumisesta lähellä kokeen loppuvaihetta.



Kuva 9: Esi-merkit infrapunatallenteesta tulkitulle täysin muodostuneelle halkeamakuvion kuuselle (Spruce), mänty (Pine) ja koivulle (Birch) jokaisella tutkitulla näytegeometrialla ja ulkoisella lämpövirrantiheydellä.

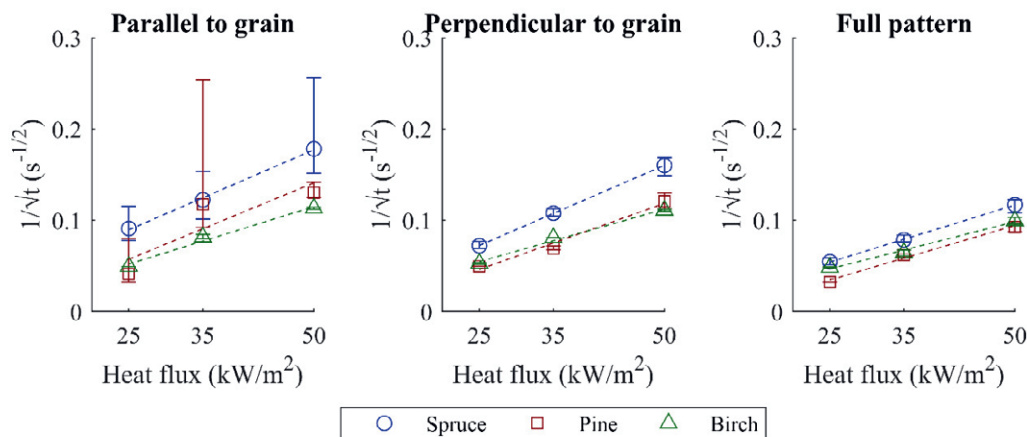
Puulaji, näytteen koko (mm)	Ulkoisen lämpövirrantiheys (kW/m²)		
	25	35	50
Kuusi			
100 × 100 × 20	2.19	2.47	2.29
100 × 100 × 45		2.10	1.59
200 × 100 × 20		2.42	2.25
Mänty			
100 × 100 × 20	0.33	1.23	1.39
100 × 100 × 45		1.78	1.67
200 × 100 × 20		1.53	1.56
Koivu			
100 × 100 × 20	2.67	3.27	2.45

Taulukko 3: Keskimääräinen halkeamien lukumäärä kohtisuoraan syyn suuntaan nähden jokaisella testatulla puulajin, näytegeometrian ja ulkoisen lämpövirrantiheyden yhdistelmällä.

Kuva 10 esittää 100 × 100 × 20 mm:n kuusi-, mänty-, ja koivu-näytteille halkeamien muodostumisaikojen neliöjuuren käänteisluvun ulkoisen lämpövirrantiheyden funktiona, halkeamille sekä syyn suuntaisesti että siihen nähden kohtisuoraan, sekä täysin muodostuneelle halkeamakuvion. Kuvasta havaitaan lineaarinen riippuvuus kaikille puulajeille. Lähteessä [25] esitetyt tulokset osoittavat, että näytteen paksuus tai pitkällä näytteillä tutkittu epähomogeeninen lämpöaltistus kappaleen pinnalle ei vaikuttanut merkittävästi halkeamien syntyajankohtaan.

Baroudin et al. [7] kehittämän termomekaanisen halkeilumallin analyttinen muoto laskee halkeamien määrän $n_{L,T}$ lämmenneen pintakerroksen osuuden ω koko näytteen paksuudesta funktiona.

$$n_{L,T}(\omega) = \frac{\sqrt[4]{12}}{\pi} \sqrt[4]{\frac{E_R(T_0)}{E_{L,T}(T^*)}} \left(\frac{\ell_{L,T}}{h} \right) \frac{1}{\omega^{3/4}} \sqrt[4]{\frac{h}{1/m}} \quad (8)$$



Kuva 10: Halkeamien syn-
tyjajankohden neliöjuuren
käänteisluku ulkoisen läm-
pövirrantiheyden (Heat flux)
funktiona $100 \times 100 \times 20$
mm kuusi- (Spruce), män-
ty- (Pine), ja koivunäytteille
(Birch) syyn suuntaisesti (Pa-
rallel to grain) sekä kohtisuo-
raan syyn suuntaan nähden
(Perpendicular to grain), ja
täysin muodostuneelle hal-
keamakuviolle (Full pattern).
Kokeiden toistojen keskiar-
vo on esitetty symbolilla ja
vaihteluväli pystysuoralla
virhepalkilla.

jossa alaindeksit L , T ja R merkitsevät puun rungon pitkittäistä, tangentialista ja säteittäistä suuntaa, E on Youngin moduuli, T_o on alkulämpötila, T^* on lämmenneen pintakerroksen lämpötila, $\ell_{L,T}$ on näytteen pituus ja h on näytteen paksuus. Youngin moduuli $E_{L,T}$ määritellään aina suunnassa, joka on kohtisuorassa tarkasteltaviin halkeamiin nähden.

Lämmenneen pintakerroksen osuus ω koko näytteen paksuudesta lasketaan pintakerroksen määrittävän isotermin läpäisy-
vyyden δ_T suhteena näytteen paksuuteen h .

$$\omega = \frac{\delta_T}{h} \quad (9)$$

Lähteessä [25] havaittiin, että kirjallisuudessa saatavilla olevista eri vaihtoehdoista Baroudin et al. [7] käyttämä kuivan puun lasinmuutoslämpötilaa vastaava 200°C osoittautui parhaaksi arvioksi lämmennytä pintakerrosta määrittävästä isotermitä. δT laskettiin yhden reaktion materiaalimallilla 200°C isotermin läpäisy-
syytytenä täysin muodostuneen halkeamakuvioiden muodostumishetkellä. Kuuselle ja männylle käytettiin tässä tutkimuksessa kehitettyä ja koivulle Hostikan ja Matalan [11] kehittämää mallia. Kuuselle ja männylle oletettiin $E_R(T_o) = 428 \text{ MPa}$ [26] ja $E_L(T^*) = 5590 \text{ MPa}$ [27]. Koivulle ei ollut saatavissa lämpötilariippuvaisia materiaaliominaisuuksia, joten oletettiin huoneenlämpötilaa ja 12 massa-% kosteuspitoisuutta vastaava $E_R/E_L = 0.078$ kaikissa läm-
pötiloissa [28]. Taulukko 4 esittää kullekin näytteelle kokeellises-

ti määritetyn täysin muodostuneen halkeamakuvioiden muodostu-
mishetken, lämmenneen pintakerroksen osuuden, siitä lasketun
halkeamien lukumäärän, ja laskennallisen halkeamien lukumää-
rän suhteellisen virheen taulukon 3 kokeellisiin arvoihin verrat-
tuna. Koska Baroudin et al. [7] termomekaanisen mallin analyyt-
tinen muoto olettaa homogeenisen lämpöaltistuksen kappaleen
koko altistuneelle pinnalle, 20 cm pitkät näytteet jätettiin tämän
tarkastelun ulkopuolelle.

Analyttisellä mallilla lasketut halkeamien lukumäärät kasvavat
monotonisesti ulkoisen lämpövirrantiheyden funktiona, joka joh-
tuu ohuemmasta lasketusta lämmenneen pintakerroksen paksuu-
desta halkeamakuvioiden muodostumishetkellä korkeammilla ulkoi-
silla lämpövirrantiheyksillä. Tämä on ristiriidassa taulukon 3 ko-
keellisten havaintojen kanssa, joiden mukaan halkeamien luku-
määrä saavuttaa kuusella ja koivulla huippunsa 35 kW/m^2 :n ulkoi-
sella lämpövirrantiheydellä, ja männyllä säilyy lähes muuttumat-
tomana 35 :n ja 50 kW/m^2 :n välillä. Näitä tuloksia ei kuitenkaan
voi käyttää termomekaanisen mallin falsifioimiseen. Analyyti-
sen mallin ennusteet ovat oikeassa suuruusluokassa, ja pyöristet-
tynä lähimpään kokonaislukuun, osassa tapauksista ennustettu ja
laskettu halkeamien lukumäärä ovat yhtäsuuret. Todennäköisenä
selityksenä ristiriidalle on, että termomekaanisen mallin analyyt-
tinen muoto sisältää useita yksinkertaistuksia, esimerkiksi jyrkän
rajapinnan lämpimän pintakerroksen ja kylmemmän alla olevan
puun välillä, eikä siksi kykene tuottamaan tarkkaa ennustetta. Toi-
sena epävarmuuden lähteenä on halkeamakuvioiden muodostumis-
ajankohdan määrittämisen perustuminen silmämääräiseen arvioon.

Johtopäätökset

Johdannossa esitettyihin tutkimuskysymyksiin voidaan antaa esi-
tettyjen tulosten pohjalta seuraavat vastaukset:

1. Yhden-, ja rinnakkaisten reaktioiden mallit ennustavat lä-
hes yhtäläisellä tarkkuudella kartiokalomitrikokeet se-
kä kuuselle että männylle. Näin ollen monimutkaisempaa
rinnakkaisten reaktioiden mallia ei voi perustella parem-
malla sopivuudella koetuloksiin, mutta siihen olennaises-
ti liittyy suurempi mallin epävarmuus parametrien suu-
remman määrän myötä. Näin ollen tutkimuksessa kehi-
tetyt yhden reaktion mallit männylle ja kuuselle ovat suo-
siteltava valinta materiaalimallinnukseen toiminnallisissa
palosuunnittelussa.
2. Tässä kirjoituksessa esitetyllä materiaalimallin suuren mit-
takaavan validoinnilla osoitettiin, että hiiltymäsyvyyden
kehitys on herkkä ympäröivälle happipitoisuudelle. Hiil-

Näyte, ulkoinen lämpövirrantiheys (kW/m^2)	Halkeamakuvioiden muodostumisajankohta (s)	ω (-)	n_c (-)	Suhteellinen virhe (%)
20 mm kuusi				
25	336	0.34	1.33	39
35	162	0.261	1.61	35
50	73	0.196	2.00	13
20 mm mänty				
25	945	0.674	0.85	158
35	260	0.33	1.39	13
50	116	0.238	1.76	27
20 mm koivu				
25	515	0.419	1.17	56
35	240	0.304	1.47	55
50	101	0.21	1.93	21
45 mm kuusi				
35	180	0.125	1.52	28
50	71	0.085	2.04	28
45 mm mänty				
35	257	0.143	1.39	22
50	85	0.085	2.04	22

Taulukko 4: Termomekaanisella mallilla lasketut halkeamien mää-
rät $10 \times 10 \text{ cm}$ neliönmuotoisten näytteiden pinnalla perustuen
materiaalimallilla määritettyihin lämmenneen pintakerroksen
osuuksiin.

tymän hapettumisreaktion huomioinnin osoitettiin olevan merkittävässä roolissa myös palon leviämisen oikeellisen ennustamisen kannalta [1]. Täten voidaan todeta hiiltymän hapettumisreaktion huomioinnin olevan ensiarvoisen tärkeää puurakenteiden palomallinnuksessa.

3. Väitöstyö vastaa kysymykseen esittämällä ensimmäiset julkaistut suorat kokeelliset havainnot halkeamien muodostumisesta hiiltävän puun pinnalla. Lopullinen vahvistus Baroudin et al. [7] hypoteesille termomekaanisesta lommahduksesta halkeamien syynä vaatii yksityiskohteisemmän mallin kehittämistä, ja sen ratkaisua numeerisesti kolmiulotteisena.

Kiitokset

Esitän kiitokseni väitöstyöni ohjaajalle professori Simo Hostikalle, sekä työhöni kuuluvien artikkelien apukirjoittajille, joita ovat Simon lisäksi Dmitry Sukhomlinov ja Andrea Ferrantelli. Työtä on rahoittanut sen eri vaiheissa Suomen Akatemia (päätos 297030), Palosuojelurahasto (päätokset VN/14174/2021 ja VN/35504/2022), sekä Suomen Kulttuurirahasto (päätos 00230995). Tutkimuksessa hyödynnettiin CSC – Tieteen tietotekniikan keskuksen laskentaresursseja, ja Suomen Akatemian RawMatTTERS Finland -infrastruktuuria (RAMI).

Lähteet

1. Rinta-Paavola, A. (2024). Pyrolysis and Cracking of Nordic Timbers Under External Heat Exposure. Väitöskirja. Espoo: Aalto-yliopisto. 165 s.
2. Östman, B. & Brandon, D. (2016). Fire safety engineering – Opportunities and challenges for timber buildings. Teoksessa: Eberhardsteiner, J., Winter, W., Fadai, A. & Pöll, M. (toim.) WCTE 2016: World Conference on Timber Engineering, Wien, Itävalta, 22–25.8.2016. Wien: TU Verlag Wien, s. 3829–3838.
3. Östman, B., Brandon, D. & Frantzich H. (2017). Fire safety engineering in timber buildings. Fire Safety Journal, 91, 11–20, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.002>
4. Lautenberger, C., Rein, G. & Fernandez-Pello, C. (2006). The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. Fire Safety Journal, 41(3), 204–214, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.12.004>
5. Richter, F. & Rein, G. (2020). A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale. Combustion and Flame, 216, 316–325, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.02.029>
6. Bal, N. & Rein, G. (2013). Relevant model complexity for non-charring polymer pyrolysis. Fire Safety Journal, 61, 36–44, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.08.015>
7. Baroudi, D., Ferrantelli, A., Li, K. & Hostikka, S. (2017). A thermomechanical explanation for the topology of crack patterns observed on the surface of charred wood and particle fibreboard. Combustion and Flame, 182, 206–215, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.04.017>
8. Nguyen, Y.T., Pence, T.J. & Wichman, I.S. (2019). Crack formation during solid pyrolysis: evolution, pattern formation and statistical behaviour. Proceedings of the Royal Society A, 475, 20190211, <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0211>
9. Wichman, I.S., Nguyen, Y.T. & Pence, T.J. (2020). A model for crack formation during active solid pyrolysis of a charring solid: crack patterns; surface area generation; vola-

tile mass efflux. Combustion Theory and Modelling, 24(5), 903–925, <https://doi.org/10.1080/13647830.2020.1772510>

10. Rinta-Paavola, A. & Hostikka, S. (2022). A model for the pyrolysis of two Nordic structural timbers. Fire and Materials 46(1), 55–68, <https://doi.org/10.1002/fam.2947>
11. Hostikka, S. & Matala, A. (2017). Pyrolysis Model for Predicting the Heat Release Rate of Birch Wood. Combustion Science and Technology, 189(8), 1373–1393, <https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1295959>
12. Sjöström, E. (1981). Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. New York: Academic Press. 223 s.
13. Lautenberger, C. & Fernandez-Pello, C. (2009). Generalized pyrolysis model for combustible solids. Fire Safety Journal, 44(6), 819–839, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.03.011>
14. Arnold, L., Hehnen, T., Lauer, P., Trettin, C. & Vinayak A. (2018). PROPTI — A Generalised Inverse Modelling Framework. Journal of Physics: Conference Series, 1107(3), 032016, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1107/3/032016>
15. Chaos, M. (2014). Spectral Aspects of Bench-Scale Flammability Testing: Application to Hardwood Pyrolysis. Teoksessa: Nilsson, D., van Hees, P. & Jansson R. (toim.) Fire Safety Science – Proceedings of the Eleventh International Symposium, Christchurch, Uusi-Seelanti, 9–14.2.2014. Lontoo: International Association for Fire Safety Science, s. 337–346. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-165>
16. Ryder, N. & Weckman E. (2013). Effects of convective heat transfer coefficient in prediction of materials properties from cone calorimeter testing. Teoksessa: Babrauskas, V., Grayson, S., Hirschler, M., Janssens, M. & van Hees, P. (toim.) Fire and Materials 2013 – 13th international conference and exhibition, conference proceedings, San Francisco, Yhdysvallat, 28–30.1.2013. Lontoo: Interscience Communications, s. 379–388.
17. Fredlund, B. (1988). A model for heat and mass transfer in timber structures during fire: a theoretical, numerical and experimental study. Väitöskirja. Lund: Lundin yliopisto. 254 s.
18. Alves, S.S. & Figueiredo, J.L. (1989). A model for pyrolysis of wet wood. Chemical Engineering Science, 44(12), 2861–2869, [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(89\)85096-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(89)85096-1)
19. Anca-Couce, A., Zobel, N., Berger, A. & Behrendt, F. (2012). Smouldering of pine wood: Kinetics and reaction heats. Combustion and Flame, 159(4), 1708–1719, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.11.015>
20. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R. & Vanella, M. (2021). Fire Dynamics Simulator User's Guide, 6th Edition, Revision: FDS-6.7.7-0-gfe0d4ef38. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 392 s.
21. Rinta-Paavola, A., Sukhomlinov, D. & Hostikka, S. (2023). Modelling Charring and Burning of Spruce and Pine Woods During Pyrolysis, Smoldering and Flaming. Fire Technology, 59(5), 2751–2786, <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01458-9>
22. VTT Expert Services (2016). One-dimensional charring of solid timber, glued-laminated timber, LVL and CLT, Test report VTT-S-04746-16. Espoo: VTT Expert Services. 123 s.
23. Babrauskas, V. (2005). Charring rate of wood as a tool for fire investigations. Fire Safety Journal, 40(6), 528–554, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.05.006>
24. Li, K., Hostikka, S., Dai, P., Li, Y., Zhang, H. & Ji, J. (2017). Charring shrinkage and cracking of fir during pyrolysis in an inert atmosphere and at different ambient pressures. Proceedings of the Combustion Institute, 36(2), 3185–3194, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.001>

25. Rinta-Paavola, A., Ferrantelli, A. & Hostikka, S. (2024). Experimental observation of crack formation on surface of charring timber. Fire Safety Journal, 148, 104231, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104231>
26. Adibaskoro, T., Makowska, M., Rinta-Paavola, A., Fortino, S. & Hostikka, S. (2021). Elastic Modulus, Thermal Expansion, and Pyrolysis Shrinkage of Norway Spruce Under High Temperature. Fire Technology, 57(5), 2451–2490, <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01123-z>
27. Kuronen, H., Mikkola, E. & Hostikka, S. (2021). Tensile strength of wood in high temperatures before charring. Fire and Materials, 45(7), 843–981, <https://doi.org/10.1002/fam.2813>
28. Kretschmann, D.E. (2010). Mechanical Properties of Wood. Teoksessa: Ross, R.J. (toim.) Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, s. 5–1–5–46.



SPEKin oppaat

vapaasti kaikkien saatavilla:
www.spek.fi/oppaat



**Oppaissa aiheita
alkusammuttimista savusaunoihin.**

Kvantitatiivisen paloturvallisuuden arviointimenettelyn kehittäminen monimuotoistuviin hoivalaitosympäristöihin

Tiivistelmä

Kvantitatiivisen paloturvallisuuden arviointimenettelyn kehittäminen monimuotoistuviin hoivalaitosympäristöihin -hankkeessa kehitettiin hoivalaitosyksikön poistumisturvallisuuden tilaa kuvaava parametrisointi, jossa sovellettiin tietoja asukkaiden toimintakyvystä ja henkilöstömitoituksesta – sekä rakennusten tietomalleja. Poistumisturvallisuuden arviointiin muotoiltiin palveludemo. Palosimulointia varten mitattiin alkupalojen tehoja ja haitallisten aineiden tuottoja. Poistumissimulointeja varten mitattiin asukkaiden ja hoitajien toimintakykyä kuvaavia aikajakaumia eettisesti hyväksyttävillä menetelmillä. Esimerkkikohteelle tehtyjen simulointien avulla todettiin, että henkilökunnan suorittaman evakuoinnin tulee suuntautua naapuriosastoon eikä pois rakennuksesta, mutta turvallisen ja tehokkaan evakuoinnin suorittaminen edes yhdelle asukashuoneelle edellyttää alkuvaiheen viiveiden minimointia. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta korvata asukkailla tehdyt mittaukset ikäpukuun puetuilla koehenkilöillä.

Pelastuslaitokset ja hoivapalvelutoimijat tulkitsivat simulointituloksia yhdistäen tuloksia mittaristoon. Tuloksena syntyi uusi, kattava ja laadukas arviointimenettely, joka tehostaa hoivalaitosympäristöjen palo-, poistumis- ja pelastusturvallisuutta. Arviointimenettelyllä turvataan palo- ja poistumisturvallisuuden laadukas, tiedolla johdettu arviointikyky sekä kyky ohjata hoivalaitosympäristöissä toimivia ammattilaisia toteuttamaan tarvittavat toimenpiteet. Artikkelissa esitetään tärkeimmät hankkeessa syntyneet suositukset ja menettelyt.

Johdanto

Länsimaisissa yhteiskunnissa, Suomi mukaan lukien, yli 65-vuotiaat ovat suhteellisesti voimakkaimmin kasvava väestönosa [1]. Ratkaisuna ikääntyneiden kasvaneeseen hoivapalvelutarpeeseen on tuotettu niin sanottuja välimuotoisia hoivapalvelumuotoja kotona asumisen rinnalle. Niissä kotona asumisen ja tehostetun palveluasumisen välillä on saatavilla monimuotoisia, joustavia,

yhteisöllisiä ja toimintakyvyn säilymistä tukevia asumis- ja palvelukokonaisuuksia. Tämä on johtanut hoivapalveluympäristöjen nopeaan monimuotoistumiseen [2].

Hoivalaitoksissa ja ikäihmisten tuetun asumisen yksiköissä asuvien henkilöiden toimintakyky on usein heikentynyt, ja suuri osa asukkaista tarvitsee poistumistilanteissa tukea. Tämän vuoksi palo- ja poistumisturvallisuuden arviointi vaatii yksilöllisten tarpeiden, hoivaympäristön rakenteellisten tekijöiden sekä organisatoristen tekijöiden huomioimista. Kokonaisvaltainen arviointi vahvistaa palo- ja poistumisturvallisuutta [3]. Pelastuslain 379/2011 asettamalle tasolle. Lisäksi systemaattisen ja kokonaisvaltaisen kokonaisarviointin kautta varmistetaan hoivakohteiden palo- ja poistumisturvallisuutta Sisäministeriön kansallisten tavoitteiden muodostamassa kokonaisuudessa [4].

Hoivalaitosten poistumisturvallisuuden mittarikehitystä tarkasteltaessa on kiinnitettävä huomio palo- ja poistumisturvallisuuden arvioinnin kriittisiin osa-alueisiin. Asukkaiden erityispiirteet ja poistumiskyky on tärkeä osa-alue. Tutkimusten mukaan merkittävä osa ikääntyneistä asukkaista ei kykene itsenäiseen poistumiseen tulipalotilanteessa. Liikuntakyvyn rajoitteet, aistitoimintojen vajeet ja kognitiiviset rajoitteet (esim. muistisairauksista johtuvat) hidastavat reagoimista hälytyksiin ja vaikeuttavat liikkumista. Tämä korostaa henkilökunnan määrän ja toimintakyvyn merkitystä. Lisähaasteita tuo henkilökunnan määrän muutokset päivä- ja yöaikaan. Useissa tutkimuksissa onkin painotettu tarvetta realistisiin evakuointisimulaatioihin, jotka huomioivat asukkaiden avuntarpeen, evakuointiaikojen pituuden sekä mahdolliset esteet rakenteissa. [5, 6]

Rakennustekniset ratkaisut, kuten automaattiset paloilmotitimet, sprinklausjärjestelmät ja savunpoistojärjestelmät, ovat keskeisiä tekijöitä, joilla voidaan vaikuttaa paloturvallisuuteen. Useat tutkimukset osoittavat, että sprinklerijärjestelmän olemassaolo alentaa merkittävästi palokuolemien riskiä, erityisesti silloin kun evakuointi kestää tavanomaista pidempään. Vanhemmissa raken-

nuksissa, joissa ei ole toteutettu rakenteellisia parannuksia, paloturvallisuuden taso voi kuitenkin jäädä heikoksi, vaikka muut järjestelmät olisivat kunnossa. Edistyneitä teknisiä ratkaisuja, kuten rakennuksen tietomallit (BIM, building information model) ja digitaaliset kaksoiset voidaan hyödyntää palo- ja poistumisturvallisuuden ratkaisussa esimerkiksi simulointimallien yhteydessä ja poistumisreittien suunnittelussa [6, 7, 8].

Henkilökunnan osaaminen, toimintakyky ja valmiudet reagoida tulipalotilanteisiin ovat ratkaisevassa roolissa erityisryhmien turvallisuuden takaamisessa. Tutkimuksissa on havaittu vaihtelua henkilöstön koulutuksen, harjoittelun ja ohjeistusten tasossa eri yksiköissä. Toimiva poistumissuunnitelma ei ole yksinään riittävä – sen käyttökelpoisuus riippuu esimerkiksi siitä, kuinka hyvin se tunnetaan ja kuinka usein sen noudattamista harjoitellaan. Turvallisuuskulttuurin ja sen konkreettisten käytäntöjen rooli on merkittävä sisältäen muun muassa ennaltaehkäisevän työn, sähkölaitteiden turvallisen käyttö, esteettömät poistumisreitit ja jatkuvan riskien arvioinnin. [9].

Edellä kuvatun perusteella, ja tämän hankkeen tavoitteet huomioiden, poistumisturvallisuuden arvioinnissa merkityksellisiä tekijöitä ovat erityisesti asukkaiden fyysinen ja kognitiivinen toimintakyky sekä henkilöstön määrä ja toimintakyky vuorokauden eri aikoina. Näitä tietoja voidaan hyödyntää rakennuksen tietomallien rinnalla tai yhteydessä.

Edellä kuvatun perusteella hoivapalveluympäristöjen kehitys haastaa pelastusviranomaisia kehittämään hoivapalveluympäristöjen palo- ja pelastusturvallisuuden arviointimenettelyitä, jotta turvallisuusarviointi perustuu ajantasaiseen, yhdenmukaiseen ja laadukkaaseen tietoon. Palo- ja poistumisturvallisuussuunnitelmien taustalla olevat oletukset paloista ja ihmisten käyttäytymisestä tulisi perustua kohteiden todellisiin ominaisuuksiin, jotta riskit tulisivat oikealla tavalla huomioiduksi, ja hoivapalvelujen asiakkaat tulisivat kohdelluksi yhdenvertaisesti elinympäristön turvallisuuden osalta. Arvioinnista kertyvän tiedon perusteella pelastusviranomaisen vaste erityyppisissä hoivakohteissa kyettään tuottamaan toistettavasti ja kehittämään sitä jatkuvan kehittämisen periaatteella.

Hankkeessa tuotettiin pelastustoimen käyttöön kvantitatiivinen menettely monimuotoisten hoivapalveluympäristöjen palo- ja poistumisturvallisuuden arviointiin. Arviointimenettelyn tuottaminen perustuu hoivapalveluympäristöjen palo- ja poistumisturvallisuuden kriittisiin tekijöihin. Kriittisyyden tietolähteinä sovellettiin aiempaa tietoa hoivapalvelukohteiden poltto-

kokeista sekä aiempien arviointia kehittäneiden tutkimusten [10, 11, 12] tuloksia.

Hanke tuotti kolme tulostasoa:

1. Hoivaympäristön kriittisten tekijöiden parametrisointi palo- ja poistumisturvallisuuteen (erityisesti asukkaiden toimintakyky ja hoivahenkilöstön mitoitus ja osaaminen),
2. Hoivalaitosten palo- ja poistumisaikataulukosten tarvitsemat simulointimallit lähtötietoineen sekä malleja hyödyntävä ja turvallisen poistumisen epäonnistumiseen johtavien tekijöiden tunnistamiseen johtava riskianalyysi ja herkkyystarkastelu, sekä
3. Pelastusviranomaisen ja hoivalaitosympäristöissä toimivien päätelmät 1- ja 2-tasojen tulosten perusteella parannetun arviointimenettelyn tuottamiseksi hoivalaitosympäristöihin.

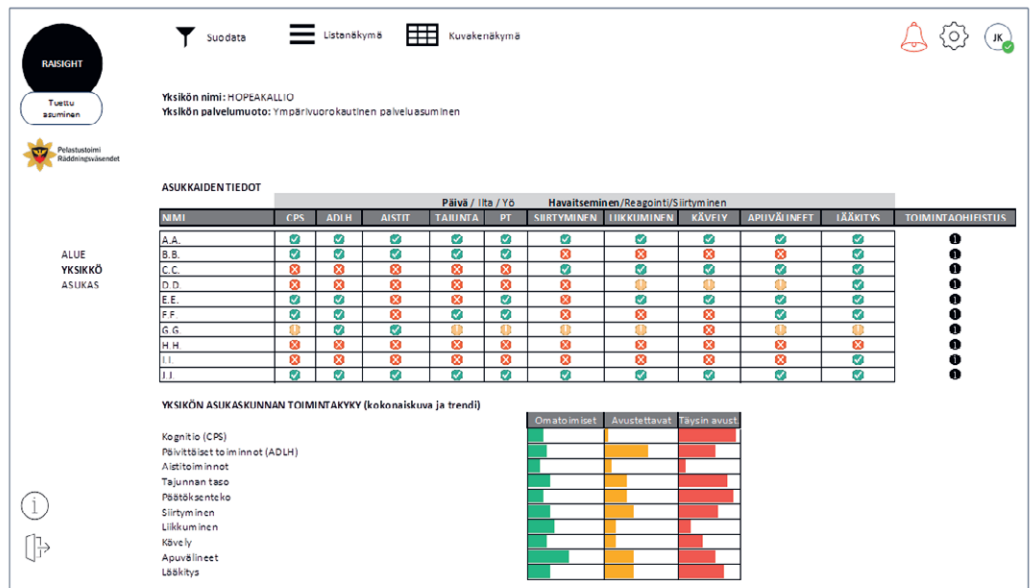
Hoivalaitosten poistumisturvallisuuden tilannekuva

Hankkeessa kehitetyn asumisyksikön poistumisturvallisuusmittarin logiikka perustuu siihen, että asukkaiden yksilötason toimintakykytietoa aggregoidaan ja yhdistetään asumisyksikön henkilöresurssitietoihin, jotta voidaan tuottaa yksikkö- ja aluetasoinen poistumisturvallisuuden tilannekuva (Kuva 1 ja 2). Pelastustoimen näkökulmasta keskeistä on, kuinka monta ihmistä tarvitsee apua poistumisessa ja paljonko henkilökuntaa on paikalla auttamassa. Arviointi perustuu RAI-aineistoon ja RAI-LTC-välineeseen (samaa tilannekuvan visualisointia voidaan soveltaa RAI-välineestä riippumatta). Keskeisiä poistumisturvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. fyysinen toimintakyky (liikkuminen ja siirtyminen), kognitiivinen kyky ja aistitoiminnot.

Yksilötasoiset toimintakykyprofiilit kertovat asukkaan toimintakykyvajaiden perusteella määrittyvästä tuen tarpeen tasosta poistumistilanteessa (itsenäinen, avustettava, täysin avustettava). Yksilötason tarkastelu on relevanttia sote-toimijan näkökulmasta, kun hoito- ja tukisuunnitelmaa ja toimintaohjeistusta yksilöllistetään ja konkretisoidaan. Asukaskohtaisesti voidaan tarkentaa ohjeistusta hätätilanteeseen varautumisessa (esim. ”tarvitsee 2 avustajaa ja rollaattoria” tai ”ei kykene reagoimaan palohälytykseen ilman ohjausta”). Toimintaohjeistus voi myös nostaa esille harjoittelutarpeita eli miten asukasta ja hoitajia tulisi ohjeistaa evakuoitiharjoittelussa.

Yksikkötasoinen poistumisturvallisuuden tilannekuva raken-

Kuva 1: Asumisyksikön poistumisturvallisuuden tilannekuva (yksiköiden nimet kuvitteellisia).





Kuva 2: Asumisyksiköiden poistumisturvallisuuden tilannekuva hyvinvointialueen tasolla (yksiköiden nimet kuvitteellisia).

► netaan yksilötasoisien toimintakykyprofiilien perusteella valittuja RAI-muuttujia hyödyntäen. Tällä tavoin voidaan tarkastella toimintakykyprofiilien jakaumia yksikössä. Yksikkötasolla tilannekuvamallin tarjoaman toimintaohjeistuksen tulisi tukea johtamista, turvallisuuskulttuurin rakentamista, henkilöstön koulutusta ja toiminnan suunnittelua. Ohjeistus voi tarkoittaa esim. käytännön toimien aktivointia, kun tietty riskikynnys ylittyy (esim. yli 50 % asukkaista täysin avustettavia). Poistumis- ja omavalvontasuunnitelmia tulisi tarkistaa ja mahdollisesti päivittää, jotta ne vastaavat asukkaiden todellista toimintakykyä. Kokonaisuutena yksikkö voi reagoida ennakoivasti ja osoittaa toiminnallaan vastuullisuutta ja riskienhallintaa. Pelastustoimen näkökulmasta yksikkötasoinen tarkastelu lisää ymmärrystä erityyppisten asumisen yksiköiden riskitasosta ja olosuhteista.

Hyvinvointialueen tasoinen poistumisturvallisuuden tilannekuva tukee pelastustoimen ja sosiaali- ja terveystoimen yhteistyössä toteuttamaa alueellisen palvelujärjestelmätason valvontaa ja riskienhallintaa. Alueen arvioinnissa tarkastellaan kaikkia alueen asumisyksiköitä vertailutietojen avulla. Alueella toimintaohjeistus voi laukaista toimenpiteitä hyvinvointialueen, pelastustoimen tai valvontaviranomaisen osalta. Voidaan ylläpitää priorisointilistoja tarkastuksiin ja harjoituksiin liittyen (esim. yksiköt, joissa riskitaso tai toimintakykyvajeet ovat korkealla, nostetaan prioriteettilis-

talle). Vertailemalla yksiköitä ja kehittämistoimenpiteitä, alue voi kohdentaa tukea tai resursseja niihin yksiköihin, joissa riskitaso on korkea. Alueen johto voi tarkastella strategisia resurssintähtäyksiä, esim. tarvitaanko tietyille alueille tai yksiköille lisähenkilöstöä tai teknistä varustelua.

Rakennusten tietomallien käyttö hoivalaitosten paloturvallisuuden arvioinnissa

Rakennusten tietomallipohjaisessa suunnittelussa ja tietomallien käytössä rakennushankkeessa korostuu niin sanottu OpenBIM-periaate. Siinä mallin käyttötarkoituksen mukaisen informaation ja kolmiulotteisen geometriatiedon sisältävät rakennusten tietomallit tuotetaan suunnittelijoiden toimesta kansainvälisen IFC-standardin [13] mukaisena formaattina. Kehittämishankkeessa tarkasteltiin arkkitehtisuunnittelijan tuottaman IFC-mallin käyttötapauksia taulukon 1 mukaisesti.

Rakennusten tietomalleille tunnistettiin useita erilaisia käyttötapauksia, jotka liittyvät rakennusten paloturvallisuuden varmistamiseen. Olennaista on käyttää IFC-standardin mukaisia rakennusten tietomalleja, joiden käyttö on jo vakiintunutta ja niille voidaan asettaa vakioituja tietosisältövaatimuksia erilaisissa käyttötapauksissa. IFC-mallien tietosisällöille asetettavia vaatimuksia

Käyttötapaus	Toimenpiteet ja menetelmät	Keskeiset tulokset
Mallin käyttö poistumis- ja paloturvallisuussimulaatio-ohjelmiston lähtöaineistona	- Kehitettiin kansainvälisenä yhteistyönä IDS-standardin käyttöön perustuva vaatimusmäärittelyprosessi [14]. - Testattiin IDS-standardia hyödyntäviä ohjelmistoratkaisuja [14]. - Testattiin pilottikohteen IFC-mallin käyttöä Pathfinder-ohjelmiston lähtöaineistona.	- IDS-standardia [15] voidaan hyödyntää tehokkaasti määrittäessä IFC-mallin tietosisällölle asetettavia vaatimuksia poistumissimulaatioissa. - IFC-mallin hyödyntäminen poistumissimuloinnissa oli suoraviivaista ja simulointimallin luominen IFC-mallin avulla koettiin hyödylliseksi. IFC-malli tuotti suurimman osan poistumismallin tarvitsemasta tiedosta.
Mallin käyttö paloturvallisuussimulaatio-ohjelmistolle	- Testattiin pilottikohteen IFC-mallin käyttöä Pyrosim- ja FDS-ohjelmiston lähtöaineistona.	- IFC-mallin sisältää helposti turhaa informaatiota ja mallin tehokas käyttö edellyttäisi sen muuntamista, jolloin sen käyttö simulaatioissa on tehotonta.
Mallin käyttö pelastusviranomaisen toiminnassa	- Testattiin mallin käyttöä palveludemossa. - Määriteltiin IFC-mallien käyttötapauksia pelastusviranomaisen perustoiminnoissa.	- Mallia voidaan hyvin hyödyntää pelastusviranomaisen digitaalisten palveluratkaisujen kehittämisessä. - IFC-mallien käyttö vähentää kohdekäyntejä. - IFC-malleja voidaan tehostaa palotarkastuksia ja erityisesti niiden ennakkovalmisteluja.
Mallin käyttö sote-toimijan toiminnassa	- Testattiin mallin käyttöä palveludemossa. - Arvioitiin markkinoilla olevien IFC-mallien lukuohjelmien käytettävyyttä pelastusviranomaisen näkökulmasta.	- Rakennusallalle on kehitetty useita IFC-mallien tarkasteluohjelmia, mutta ne eivät nykyisillä käyttöliittymillä sovi sote-toimijoiden käyttöön.
Mallin käyttö paloteknisessä suunnittelussa	- Arvioitiin IFC-mallien käytön nykytilannetta paloteknisessä suunnittelussa Suomessa [16].	- Simulaatioiden tuloksia voidaan jakaa IFC-muodossa osapuolten käyttöön. - Paloteknisen suunnittelun osana tuotettuja IFC-malleja (esimerkiksi sprinklausjärjestelmä) voidaan kytkeä osaksi suunnittelijoiden malleista tuotettua yhdistelmämallia.

Taulukko 1: Arkkitehtisuunnittelijan mallista tuotetun IFC-mallin käyttötapauksen tarkastelut hankkeessa.

voidaan entistä paremmin määritellä IDS-standardin [14] avulla. Näin saadaan jatkossa entistä laadukkaampia IFC-malleja palvelemaan paloturvallisuuden varmistamista. Tässä työssä on keskeinen rooli niillä tahoilla, jotka voivat hyödyntää IFC-malleja omassa työssään kuten rakennusten tilaajilla, pelastusviranomaisilla ja paloteknisillä suunnittelijoilla.

Rakennusten IFC-mallien käyttö edellyttää sopivia ohjelmatyökaluja, joilla malleja voidaan tarkastella. Näitä on tarjolla jo markkinoilla useita eri vaihtoehtoja, mutta niiden ominaisuuksia pitäisi kehittää palvelemaan entistä paremmin myös rakennusten paloturvallisuuden varmistamiseen liittyviä käyttötapauksia.

Yhtenä haasteena erityisesti pelastusviranomaisten kannalta on rakennusten IFC-mallien saatavuus. Uuden rakentamislain myötä IFC-mallien saatavuus paranee, koska yhtenä vaihtoehtona tuottaa lain ja siihen liittyvien asetusten mukaisia vaadittuja tietosisältöä on toimittaa rakennusvalvontaviranomaisille rakennusten ominaisuustietoa IFC-muodossa ja nämä tietosisällöt valvontaviranomaisen on toimitettava valtakunnalliseen rakennetun ympäristön tietojärjestelmään (RYTJ), johon pelastusviranomaisilla on pääsy. Viranomaisille toimitettavien IFC-sisältöjen määrittelyyn liittyvä asetus on valmisteilla. Käytännön tasolla rakennusten IFC-mallien jakamista pelastusviranomaisille voisi tehostaa ottamalla käyttöön pilvipohjaisia tietoympäristöjä, joissa yleensä on valmius IFC-mallien tarkasteluun ilman erillisiä työkaluja.

IFC-mallien tuottaminen uudisrakennushankkeissa tapahtuu luontevasti suunnittelijoiden toimesta, jos hanke on tietomallipohjainen. Olemassa olevien rakennusten osalta suurin osa Suomen rakennuskannasta on mallintamatta. Jos näiden osalta halutaan hyödyntää IFC-malleja paloturvallisuuden varmistamisessa, olisi määriteltävä mallien tietosisältövaatimukset olemassa olevien rakennuksien malleille eli niin sanotuille inventointimalleille.

Tietomallipohjainen palveluratkaisu pelastustoimelle

Tässä osatutkimuksessa tuotettiin tietomallipohjainen palveluratkaisu (palveludemo), jonka avulla voidaan tukea pelastustoimen ja sosiaali- ja terveystoimen välistä yhteistyötä palo- ja poistumisturvallisuuden arvioinnissa, valvonnassa ja riskienhallinnassa palveluasumisen yksiköissä. Tietomallipohjaisuudella viitataan rakennuksen tietomallien ja hoivalaitoksen asukkaiden toimintakyky- ja henkilöstöresurssitietojen hyödyntämiseen ratkaisussa.

Palveluratkaisun kehittämisessä sovellettiin palvelumuotoilun prosessimallia ja sen vaiheissa erilaisia menetelmiä (mm. asiantuntijahaastattelut, wireframe-prototyypit, käyttäjäpersoonat ja käyttötapauskaaviot). [17].

Löytämis- ja määrittelyvaihe tuotti ymmärrystä nykytilan arviointikäytännöistä (esim. arviointikäytännöt pistemäisiä, jatkuvaa

tilannekuvaa ei ole; tietojen hyödynnettävyyttä on kehitettävä) sekä listan konkreettisista vaatimuksista (esim. vaade reaaliaikaiselle ja luotettavalle tiedolle rakennuksesta, mahdollisuus historiatietojen tarkasteluun ja muutosten seurantaan). Tässä vaiheessa luotiin myös käyttäjäpersoonat (Kuva 3).

Ideointi- ja suunnitteluvaiheessa laadittiin wireframe-prototyypit käyttäjäpersoonien tavoitteiden ja turhaumien pohjalta. Ratkaisun suunnittelua kohdennettiin erityisesti palotarkastajan näkökulmaan, kun valmistaudutaan palotarkastukseen. Wireframe-prototyypin lisäksi laadittiin käyttötapauskaavio, jolla pyrittiin kuvaamaan palotarkastajan keskeiset palveluratkaisun käyttötapaukset (esim. kohteen tietojen päivittäminen, tarkastusprosessin harjoittelu, palotarkastuksen sopiminen). Lisäksi laadittiin tietokantakaavio, joka esittelee palveluratkaisuun liittyvät tietovarannot ja -järjestelmät.

Prototyyppi- ja testausvaiheessa rakennettiin pidemmälle vietyjä klikattavia prototyyppejä Figma-työkalulla (Kuva 2). Prototyypit testattiin aidoilla loppukäyttäjillä. Suunnitteluprosessin aikana ideointiin ja testattiin runsaasti erilaisia mahdollisia toiminnallisuuksia ja käyttötapauksia, joita palveluratkaisu voisi sisältää. Kaikkein potentiaalisimmaksi nousi palveluratkaisun käyttö palo- ja poistumisturvallisuuden arvioinnin tukena ja erityisesti palotarkastuskäyntiin valmistauduttaessa.

Palo- ja poistumissimuloinnit

Palosimulointi

Palosimulointien lähtötietoja ovat rakennuksen geometria, palotekniset järjestelmät sekä paloskenaarioon liittyvät suuret kuten paloteho ja haitallisten aineiden tuotto. Etelä-Karjalan ja Kymenlaakson pelastuslaitosten alueilla sattuneita hoitolaitospaloja tai rakennuspalovaaroja löydettiin PRONTOsta 49/58 kpl jaksolla 2010–2023. Tärkeimmät syttymissyynä olivat sähkölaitteen tekeminen vika, ruuanvalmistus, tahallinen sytyttäminen ja sähkölaitteen virheellinen käyttö. Syttyneistä materiaaleista kolme yleisintä ryhmää olivat sähkölaitteet, ruoka ja puu, paperi tai pahvi. Tällä perusteella palokokeisiin valittiin saunapaneeli, pesukone, tekstiilit, sähköliesi ja patja. Palokokeet toteutettiin Eurofins Expert Service Oy:n SBI-laitteella, jossa mitattiin paloteho. Palotuotteiden sisältämät haitallisten aineiden haitalliset pitoisuudet mitattiin FTIR-menetelmällä.

Saunapaneelien palo muodosti SBI-kokeessa tyypillisen kaksivaiheisen tehokäyrän. Pesukoneiden t2-palon kasvuaajat (aika 1055 kW:n saavuttamiseen) vaihtelivat 400 ja 1500 s välillä, mutta sytyttämistapa vaikutti alkuvaiheen viiveeseen merkittävästi. Kuvassa 4 on esitetty pesukonepalon leviäminen etupaneelissa. Tekstiilipalojen huippupalotehot olivat 142–187 kW, ja useimmissa kokeissa kasvuaika vaihteli välillä 247–610 s. Sähköliedelle jätetyt muo-

Anne Pyhäjoki

49

Työehtäjä Palotarkastaja

Pääkirkkunta Lappeenranta

Henkilökuva

Anne Pyhäjoki työskentelee palotarkastajana pelastuslaitoksella onnettomuuksien ehkäisyalueissa ja hänen vastualueen ovat erityisesti hoivalaitospaikoista. Anne on konkari, joka toimii ehkäyttämällä tietopankkiaan nauttien kollegoille ja on mieluisasti mukana toiminnan kehittämisessä. Hän osaa lukea tilanteita ja ihmisiä pitkin kokemusansa ansiosta ja hän keskittyykin aitoon vuorovaikutukseen kanteiden järjestelmien ja monimuotoisen prosessin sijaan.

Tavoitteet

- Arvioida kohteiden palo- ja poistumisturvallisuutta ja hallita riskejä ajantasaiseen ja oikeaan tietoon perustuen
- Käyttää asiakkaille ymmärrettäviä toimintatapoja ja tukea heitä turvallisuuskulttuurin parantamisessa
- Päätää hyvään ja aktiiviseen yhteistyöhön kohteiden kanssa ja tarjota apua matalalla kynnyksellä
- Tukea ja auttaa kollegoita heidän työtehtävissään

Turhautumat

- Kohteissa tapahtuvista palo- ja poistumisturvallisuuteen vaikuttavista muutoksista ei saada tietoa etukäteen tai lainkaan
- Tiedon löytämiseksi tulee tehdä ns. salapoliisityötä, eikä se ole järjestelmistä saatavilla
- Puutteelliset esitiedot esimerkiksi kohteen historiasta, aiemmista tarkastuksista ja toimenpiteistä
- Kankeat ja vanhanaikaiset järjestelmät, jotka eivät tue tarkastajan työtä
- Kohteiden epäohjelmallisuus toimintatavien, palo- ja poistumisturvallisuusprosessin ei ole standardoituja
- Korjausten ja kehittämisen tosiasialista tilaa on haasteellista seurata tarkastuksien ulkopuolella
- Kommunikointi sisäryhmän johdon kanssa on ajoittain haastavaa

Persoonaalisuus

- Järjestelmällinen
- Analyttinen
- Itsevarma
- Kriittinen

Testitietojen näkymä

Rakennus: 1067, Vuosi: 2021, Kanto: 2, Kanto: 1234, Pinta-ala: 1234, Pinta-ala: 1234

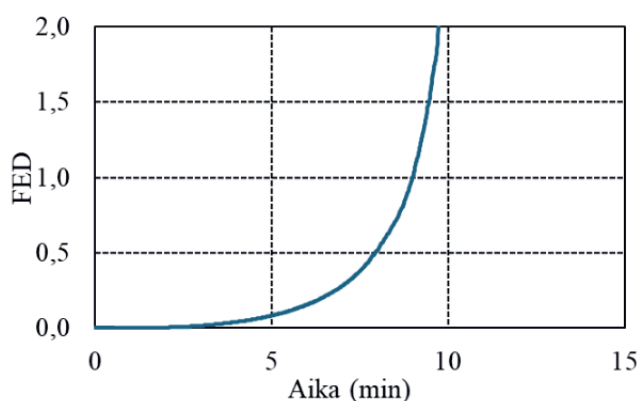
Palotarkastus: 1067, Vuosi: 2021, Kanto: 2, Kanto: 1234, Pinta-ala: 1234, Pinta-ala: 1234

Palotarkastus: 1067, Vuosi: 2021, Kanto: 2, Kanto: 1234, Pinta-ala: 1234, Pinta-ala: 1234

3D-malli kohteesta

Kuva 3: Palotarkastaja-käyttäjäpersoonat (henkilökuva ja tuotettu tekoälyllä) ja palo-osastoivien rakenteiden tarkastelu rakennuksen tietomallissa [17].

- vipussit paloivat 17–22 kW:n teholla, mutta sulaneen ja palavan kahvinkeitTIMEN tehoksi muodostui 180 kW (tg = 2350 s). Palo-suojaamattomien polyuretaanipatjojen paloa voi kuvata 250–300 s kasvuajalla ja noin 100 s syttymisviiveellä. [18].



Kuva 4: Pesukoneen polttokoe ja simuloitu, pesukonepalon tuottama FED-indeksi lähimmällä käytävällä.

Palavat materiaalit tuottavat suuren joukon haitallisia aineita, eikä kaikkia pystytä huomioimaan palosimuloinnissa, kun arvioidaan käytettävissä olevaa poistumisaikaa. Hankkeessa kehitettiin tapa yhdistää useiden kaasujen vaikutukset CO- ja HCN-kaasujen tehollisiksi tuotoiksi (Taulukko 2). [18]

Simuloinneissa tarkasteltiin Ortamonpuiston hoitolaitosta. Palosimulointimallit muodostettiin rakennuksen tietomallista Pyrosim-ohjelmaa käyttäen, ja simuloinnit tehtiin FDS-ohjelmalla. Simulointien tuloksena saatiin toimintakyvyn menettämistä kuvaavan FED-indeksin arvot rakennuksen eri osissa (kuva 4). [19]

	Sauna	Pesukone	Tekstiili	Muovi	Patja
X_{CO}	0.095	0.275	0.0212	0.0300	0.1656
X_{HCN}	0	0	0.000012	0	0.00087

Taulukko 2: Teholliset CO- ja HCN-tuotot, jotka simuloivat myös muiden myrkkujen vaikutuksia.

Poistumissimuloinnit

Ympäri vuorokautisen hoivan asiakkaiden suoriutuskykyä poistumistilanteissa tutkittiin kokeellisesti havainnoimalla heidän arkitutiinejaan kahden viikon ajan. Havaintojen perusteella muodostettiin jakaumat liikkumisnopeudelle sekä erilaisille aikaviiveille. Havaintojen lukumäärät ja tilastolliset tunnusluvut on esitetty taulukossa 3. Lisäksi muodostettiin RAI-muuttujien ja suoriutuskyky-mittarien väliset korrelaatio- ja luokittelumallit. [20]

Havainto	n	m	μ	σ	Min	Max
Liikkumisnopeus (m/s)	19	106	0.43	0.16	0.05	0.94
Asuinhuoneesta poistuminen (s)	23	47	105	89.7	9.98	365
Nousu tuolilta (s)	23	62	18.3	32.6	1.46	164
Nousu sängystä (s)	22	28	80.6	53.8	17.8	245
Pukeutuminen, jalkineet (s)	19	26	19.9	16.5	6.47	75.3
Pukeutuminen, vaatteet (s)	13	26	57.9	71.1	5.34	382
Reaktioaika puhutteluun (s)	24	29	1.88	0.75	1.00	3.68

Taulukko 3: Mitatut asukkaiden suoriutuskykyä kuvaavat poistumisaikasuureet. [20]

Poistumisaikasimuloinnit tehtiin niin ikään tietomalliin perustuvan mallin avulla, käyttäen Pathfinder-ohjelmaa. Simulointien perusteella koko rakennuksen evakuointi vie päiväaikaan 16–20 min ja yöaikaan se veisi kahden hoitajan voimin yli 60 min. Tilanne on toki epärealistinen. Horisontaalisessa evakuoinnissa yhdeltä hoitajalla kuluu 14 asukkaan osaston evakuointiin 25 ± 2 min ja kahdelta 14 ± 1 min. [21]

Simulointien yhdistäminen

Näkyvyyden ja myrkyllisyyden kriittiset ajat (ASET) laskettiin viivästyneen ilmaisen tapauksessa (ensimmäisen savuilmäisimen vikaantuminen). Evakuoinnin aloittamiseen liittyvät viiveet osoittautuivat niin pitkiksi, etteivät hoitajat kaikissa paloissa ehtisi evakuoimaan yhtään asukasta ennen näkyvyyden menettämistä. Ulos tapahtuvassa evakuoinnissa viiveet ovat suuria, ja savun hengittäminen johtaisi tajunnan menettämiseen jo toisen tai kolmannen asukkaan kohdalla. Pesukonepalon horisontaalisessa evakuoinnissa yksi auttaja ehtisi evakuoimaan 10–14 huonetta ennen myrkyllisyyskriteerin täyttymistä, mutta näkyvyyskriteeri (ja siten oletettavasti myös ärsyttävyysskriteeri) täyttyisi jo toisen tai kolmannen huoneen kohdalla. Apuvälineistä evakuointituolin ja pelastuspatjan välillä ei ollut kovin suurta eroa. Ensimmäisten huoneiden evakuointi ilman savun aiheuttamaa ärsytystä ja näkyvyyden menetystä on siis mahdollista vain, jos aloitusvaiheen viivettä saadaan pienemmäksi. Toisaalta tämän alkuvaiheen kestoon liittyy myös palon kehittymisen simuloinnissa suurimmat epävarmuudet. [19, 21]

Pelastusviranomaisen suositukset hoivayksiköille palo- ja poistumisturvallisuuden varmistamiseen

Hankkeessa muodostuneiden tutkimustulosten ja kehitettyjen arviointimallien perusteella pelastusviranomaisen näkee keskeisenä, että sote-toimialalle muodostuu vahvistettu kyky arvioida omatoimisesti erilaisten hoivakohteiden palo- ja poistumisturvallisuuden tilaa ja tuottaa siitä ajantasaista tilannekuvatieta toiminnan johtamiseen, hallintaan ja kehittämiseen. Osa hallinnan toimenpiteistä edellyttää tiivistä yhteistyötä pelastusviranomaisen kanssa.

Palo- ja poistumisturvallisuuden hallinta monimuotoistuvissa hoivakohteissa edellyttää palvelun tuottajalta kokonaisvaltaista ja ennakoivaa suunnittelua, osaamisen hallintaa ja operatiivis-

ta toimintaa. Näille kaikille yhteisiä keskeisiä kriteerejä ovat systemaattinen lähestymistapa, omatoimisen turvallisuuskulttuurin luominen ja vahvistaminen sekä laadukkaan osaamisen hallinta ja varmistaminen. Edellä kuvatut osa-alueet korostuvat hoivakohteissa, joissa asukkaiden toimintakyky on alentunut ja avuntarve poistumiseen onnettomuustilanteessa on suuri. Erityisen haavoittuvassa asemassa olevat asiakkuusryhmät, kuten muistisairaat, on kyettävä huomioimaan ennakoivasti turvallisuussuunnittelussa ja turvallisuuden hallinnassa. Myös asukkaan lääkitys voi tuoda haasteita asukkaan toimintakykyyn evakuointitilanteessa. Lisäksi asukkaan toimintakyky voi vaihdella suuresti päivittäin ja jopa eri vuorokauden aikoina, jolloin asukkaan toiminnan ennustettavuus heikkenee.

Turvallisuuden hallintaa hoivakohteissa haastavat henkilöstön mitoituksen vaihtelu esimerkiksi eri vuorokauden aikana, tyypillisesti yöaikaan on vähemmän hoitajia paikalla kuin päivä- ja iltavuorossa. Henkilöstömitoitukseen vaikuttaa myös tuotettavan hoivan tyyppi. Esimerkiksi hoivan ympärivuorokautisessa asumisessa henkilökuntaa on paikalla kaikkina viikonpäivinä ja vuorokauden aikoina, kun taas yhteisöllisessä asumisessa ei ole omaa henkilökuntaa, vaan asukkaita avustamassa käy kotihoito. Lisäksi yhteisöllisessä asumisessa voi olla asukkaita, joilla ei ole mitään tukipalveluita. Nopeasti vaihtuvan henkilöstön osuus, erityisesti lyhytaikaisissa sijaisuuksissa asettavat haasteita turvallisuusosaamisen edellytyksenä olevalle tuntemukselle kohteesta toimitilana ja sen turvallisuusratkaisusta, hoidettavien asiakkaiden kunnosta sekä henkilökunnan ohjeistuksesta ja toimintamalleista onnettomuusriskien hallintaan ja toimintaan onnettomuustilanteissa. Turvallisuushallinnan haastavuutta sote-kohteissa lisäävät lisäksi hankkeessa tunnistettu henkilöstön turvallisuusosaamisen vaihtelu yksiköittäin. Henkilöstön osaamiseen vaikuttavat työpaikan turvallisuuskulttuuri, harjoittelu sekä henkilöstön kyky ymmärtää ja sisäistää turvallisuuteen liittyviä asioita kokonaisvaltaisesti. Hankkeen tulosten mukaan yksiköiden toimintamallit ja menetelmät hätätilanteessa vaihtelevat ja osaamisen hallinnan taso on vaihtelevaa.

Summaten hoivakohteiden palo- ja poistumisturvallisuuden hallinta on monesta osa-alueesta rakentuva vaativa kokonaisuus, jossa korostuu organisaation turvallisuuskulttuurin kattavuus, henkilökunnan osaamisen ja hallinnan taso sekä systemaattiset toimintamallit palo- ja poistumisturvallisuuden varmistamiseksi. Hallinnan kokonaisvaltaisuus ja systemaattisuus on huomioitava palo- ja poistumisturvallisuuden hallintaa suunniteltaessa, mitoitettaessa ja toteutettaessa. Laadukas arviointikyky hallinnan eri osa-alueilta varmistaa ajantasaisen ja ennakoivia vahvistavan tilannekuvatieon sekä onnistumisten ja kehittämistä vaativien osa-alueiden havainnoinnin ja hallinnan toimenpiteiden tuottamisen riski- ja vaikuttavuusperusteisesti.

Pelastusviranomaisen suositukset sote-toimialalle palo- ja poistumisturvallisuuden ennakoivaan ja tehokkaaseen hallintaan on kuvattu taulukossa 4.

Jatkokehittämistarpeena pelastusviranomaisen esittää hoivapalveluja tuottavalle systemaattista hallintatapaa, jossa arvioidaan palo- ja poistumisturvallisuuden tilaa johdonmukaisesti ja kattavasti tietoperusteisen arviointimallin kautta. Tuekseen arviointi tarvitsee henkilöstön säännöllistä, vakioitua osaamisen hallintamallia, joka sisältää kaikki keskeiset palo- ja poistumisturvallisuuden osa-alueet. Lisäksi hoivapalveluja tuottavan tulee panostaa kokonaisuutena laadukkaan turvallisuuskulttuurin ylläpitoon ja kehittämiseen organisaatiossa.

Kiitokset

Hanketta toteuttaneet yhteistyösopuudet kiittävät Sisäministeriön Palosuojelurahastoa tutkimuksen mahdollistaneesta rahoituksesta.

Lähteet

1. Sosiaali- ja terveysministeriö. (2020). Laatusuositus hyvän ikääntymisen turvaamiseksi ja palvelujen parantamiseksi 2020–2023: Tavoitteena ikäystävällinen Suomi. So-

Pelastusviranomaisen suositukset hoivakohteisiin	
Toimintamallit	Systematisoitu toimintamalli henkilöstön turvallisuusosaamisen varmistamiseen turvallisuusjohtamisen ja omatoimisen ennakkoinnin, varautumisen osaamisen hallinnan keinoin.
Palo- ja poistumisturvallisuuden useasta osa-alueesta muodostuva kokonaisuus	Keskeiset osa-alueet palo- ja poistumisturvallisuuskokonaisuudessa • hoidettavien asukkaiden toimintakyky ja toimintakyvyn vaikutusten huomiointi • sote-henkilöstön osaaminen ja turvallisuuden johtaminen • hoivakohteen rakennusominaisuudet Laadukkaan arvioinnin varmistamiseen tarvitaan tietoon perustuvia arviointimenettelyjä, kuten hankkeessa kehitetty arviointimalli ja siihen sisältyvä palveludemo. Hankkeen tutkimustieto tukee palo- ja poistumisturvallisuuden hallinnan syventämisessä. Hankkeessa painotetaan evakuoitumista ensisijaisesti seuraavaan turvalliseen palo-osastoon rakennuksesta ulos poistumisen sijaan. Tehokas evakuoituminen edellyttää sote-henkilöstön perehtymistä ja osaamisen lisäämistä palo- ja poistumisturvallisuudesta hoivakohteissa. Hankkeessa tuotetut turvallisuuden tarkastuslista, ohjevideo pelastuslakanan/patjan oikeaoppisesta käytöstä sekä soten hoivakohteiden turvallisuusvastaavista muodostettava verkosto vahvistavat turvallisuuden hallintaa hoivakohteissa.
Evakuoinnin edellytysten varmistaminen	Tehokkaan ja laadukkaan evakuoinnin edellytysten varmistaminen hoivakohteiden erityyppisyys ja ominaispiirteet huomioiden: palo-osastoinnit, kulkuväylien käytettävyyden riittävä leveys, pelastuspatjojen/lakanoiden käytettävyyden.
Turvallisuusvastaavat	Pelastusviranomaisen suosittelee turvallisuusvastaavan nimeämistä jokaiseen hoivakohteeseen. Turvallisuusvastaavat toimivat turvallisuuden hallinnan ja kehittämisen avainhenkilöinä, joilla on ajantasaiset tiedot ja taidot myös perehdyttää ja kouluttaa muuta henkilöstöä niin, että palo- ja poistumisturvallisuuden osa-alueet on varmistettu

Taulukko 4: Pelastusviranomaisen suositukset hoivakohteiden palo- ja poistumisturvallisuuden vahvistamiseen.

► siaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:29. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-00-5457-1> Luettu 13.5.2025.

2. Sosiaali- ja terveysministeriö. (2022). Vanhuspalvelulain uudistaminen. <https://stm.fi/hanke?tunnus=STM006:00/2020>. Luettu 13.5.2025.
3. Pelastuslaki 379/2011. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadan-to/2011/379>. Luettu 14.5.2025.
4. Sisäministeriö. Strategiset tavoitteet pelastustoimen järjestämiselle. <https://intermin.fi/pelastustoimi/pelastustoimen-strategia>. Luettu 14.5.2025.
5. Goniewicz, K., Misztal-Okońska, P., Pawłowski, W., Burkle, F.M., Czerski, R., Hertelendy, A.J. ja Goniewicz, M. (2020). Evacuation from healthcare facilities in Poland: Legal preparedness and preparation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1779. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051779>
6. Abir, I.M., Ibrahim, A.M., Toha, S.F. ja Shafie, A.A. (2022). A review on the hospital evacuation simulation models. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, art. no. 103083. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103083>
7. Wu, I.-C., Lin, Y.-C., Yien, H.-W., Shih, F.-Y. (2020). Constructing constraint-based simulation system for creating emergency evacuation plans: A case of an outpatient chemotherapy area at a cancer medical center. *Healthcare (Switzerland)*, 8(2), art. no. 137. <https://doi.org/10.3390/healthcare8020137>
8. Wu, H., Nie, R., Zeng, X., Cheng, C., Pan J., Han D. ja Hosamo H. (2024). Review of advanced emergency evacuation procedures in hospital buildings: comprehensive analysis and insights. *Frontiers in Built Environment*, 10, art. no. 1381813. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1381813>
9. Reiman, T., Pietikäinen, E. ja Oedewald, P. (2008) Turvallisuuskulttuuri: Teoria ja arviointi. VTT Publications 700. Luettu 13.5.2025.
10. Björkgren, M., Bork, F., Kokki, E., Mäkinen, L., Männikkö, S., Oksanen, T. ja Suoja, J. (2017). PaloRAI ja EVAC-mittari. RAI-järjestelmän hyödyntäminen kotihoidon asiakkaiden palo- ja poistumisturvallisuuden arvioinnissa. Pelastusopiston julkaisu B-sarja: Tutkimusraportit 3/2017, luettu 13.5.2025.
11. Björkgren, M., Borg, F., Oksanen, T. ja Mäkinen, L. (2020). A classification of fire evacuation ability of home care clients based on the RAI-HC instrument. *Journal of Emergency Management*, 18(6), 535–540, luettu 13.5.2025.
12. Koivuniemi, J., Huuskonen, H., Kanerva, J., Carlson, J., Kapulainen, K., Kuukka, A., Lampila, J., Lehtoviita, T., Rautiainen, J., Seppälä, C. (2023). Poistumisturvallisuuden tietoperusteisen arviointimenettelyn kehittäminen ikääntyneiden asumispalveluüksiköissä. LUT Scientific and Expertise Publications, Tutkimusraportit – Research Reports 149, luettu 13.5.2025.
13. BuildingSMART International. 2025. Industry Foundation Classes. BuildingSMART International. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes>
14. Rautiainen, J. (2024). Palo- ja poistumisturvallisuusinformaatio rakennuskohteiden tietomalleissa. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/875417/Rautiainen_Jarno.pdf;jsessionid=F19A388BD026CE16C66F5E1162A5A972?ssequence=2
15. BuildingSmart International 2024. Information Delivery Specification (IDS). <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/#what-is-IDS>

16. Myllylä, P. Teemahaastattelu aiheena tietomallien käyttö paloteknisessä suunnittelussa. 18.12.2024.
17. Kurokallio, J. (2024). Tietomallipohjainen palveluratkaisu pelastustoimelle tiedolla johtamisen tueksi. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Diplomityö. 126 s. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2024091371020>
18. Linna, A. (2024) Hoivalaitosten palosimulaatioiden lähtötietojen muodostaminen polttokokeista. Itä-Suomen yliopisto. Pro gradu -tutkielma. 105 s. + 17 s. liit. <http://urn.fi/urn:nbn:fi:uef-20240377>
19. Moid, A. (2025) Simulation-Based Prediction of Available Safe Egress Time in Care Home Fires. Aalto-yliopisto. Diplomityö. 75 s + liitt. 3 s.
20. Kyllönen, K. (2024) Hoivalaitoksen poistumistilanteessa tarvittavan suorituskyvyn mallintaminen. Itä-Suomen yliopisto. Pro gradu -tutkielma. 87 s. + 18 s. liit. <http://urn.fi/urn:nbn:fi:uef-20241940>
21. Kazmi, A. (2025) Agent-based modelling of assisted evacuation in care homes. Aalto-yliopisto. Diplomityö. 60 s. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202503182846>

**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

Hoivalaitosten palosimulaatioiden lähtötietojen muodostaminen polttokokeista

Tiivistelmä

Ikääntyvän väestön ja monimuotoistuvien asumisratkaisujen myötä hoivakohteiden paloturvallisuuden yhdenvertaisen arvioinnin haasteet ovat kasvaneet. Tässä tutkimuksessa ongelmaan kehitettiin realistisiin polttokokeisiin perustuva lähestymistapa, jolla voidaan parantaa hoivakohteiden simulaatiopohjaista poistumisturvallisuusarviointia. Tutkimuksessa mitattiin hoivakohteille tyypillisten alkupalotilanteiden palotehoja ja haitallisten kaasujen tuottoa, joiden perusteella palotapahtumista luotiin niitä vastaavat simulaatiot. Lisäksi työssä kehitettiin menetelmä, jonka avulla usean kaasun yhteisvaikutuksen toksisuus voidaan simuloida käyttämällä simulaatiossa vain kahta kaasua, mikä mahdollistaa useiden kaasujen vaikutuksen huomioimisen helpommin ja nopeammin kuin mallintamalla jokainen kaasu erikseen. Menetelmää on tämän tutkimuksen jälkeen kehitetty edelleen.

Johdanto

Suomessa väestön ikärakenteen muutos on lisännyt hoivalaitosten ja erilaisten palveluasumisen muotojen tarvetta. Ikääntyneen väestön osuuden kasvu, yhdessä monimuotoistuvien asumisratkaisujen kanssa, on luonut uusia haasteita paloturvallisuuden varmistamiseen. Palveluasumisen kenttä on laajentunut kattamaan sekä kodinomaisia yksiköitä että perinteisempiä laitospäristöjä, mikä vaikeuttaa yhdenvertaisten paloturvallisuusarvioiden tekemistä.

Perinteisesti poistumiseen käytettävissä olevaa aikaa (ASET, Available Safe Egress Time) on arvioitu taulukoituuihin vakioarvoihin perustuen. Taulukoidut arvot voivat kuitenkin johtaa sekä ASET-ajan yli- että aliarviointeihin, sillä ne eivät huomioi esimerkiksi rakennuksen geometriaa, ilmanvaihtoa tai rakenteiden ja materiaalien määrän ja laadun vaikutusta palon kehitykseen. Simulaatiot tarjoavat keinon arvioida ASET-aikaa tarkemmin ja realistisemmin, sillä niiden avulla voidaan huomioida kunkin kohteen yksilölliset olosuhteet.

Tässä artikkelissa esitellään Antti Linnan pro gradu -tutkielma "Hoivalaitosten palosimulaatioiden lähtötietojen muodostaminen polttokokeista" (Linna, 2024). Tutkimuksessa mitattiin hoivakohteille tyypillisten alkupalotilanteiden palotehoja ja haitallisten kaasujen tuottoa. Mittausten pohjalta luotiin palotapahtumia vastaavat simulaatiomallit, joita voidaan hyödyntää ASET-analyyysien tekemisessä. Lisäksi työssä kehitettiin menetelmä, jolla voidaan simuloida usean kaasun yhteisvaikutuksen toksisuus käyttäen vain kahta kaasua. Tämä mahdollistaa useiden kaasujen vaikutuksen huomioimisen helpommin ja nopeammin kuin mallintamalla jokaisen kaasun erikseen. Menetelmää on sittemmin kehitetty edelleen tämän työn idean pohjalta.

Polttokokeet

Tutkimuksessa valittiin viisi hoivakohteille tyypillistä alkupalokuormaa, jotka perustuvat muun muassa pelastustoimen resurssi- ja tilastojärjestelmästä kerättyihin tietoihin Etelä-Karjalassa ja Kymenlaaksossa vuosina 2010–2023 sattuneista hoivalaitospaloista. Datan mukaan hoivalaitospalot saavat usein alkunsa ruuan valmistuksesta, sähkölaitteiden vioista tai virheellisestä käytöstä, ja satunnaisesti myös vuodevaatteiden tai patjojen syttymisestä. Polttokokeisiin valittiin paneloitu saunanurkka, pesukone, vuodevaatteet tekstiilirullakossa, liesipalo (polyeteenipussi, kahvinkeitin) ja terveystakeskusten hygieniapatja.

Polttokokeissa mitattiin palotehon (Heat Release Rate, HRR), sekä noin kahdenkymmenen haitallisen kaasun pitoisuuksien aikasarjat. Kokeet toteutettiin Single Burning Item (SBI) -laitteistolla, joka mahdollistaa pienten ja keskikokoisten kohteiden hallitun ja toistettavan polton. Paloteho mitattiin SBI-laitteiston hapenkulutuskalorimetrillä, ja kaasupitoisuudet analysoitiin poistokaasusta Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopiolla (FTIR) käyttäen Gasmeter Dx4000 -laitteistoa.

Tuloksena saatiin dataa palotehojen kehityksestä sekä haitallis-

- ten kaasujen, kuten hiilimonoksidin (CO), hiilidioksidin (CO₂), vetycyanidin (HCN) ja useiden ärsyttävien kaasujen pitoisuuksista palon eri vaiheissa. Mittaukset osoittivat selkeitä eroja eri materiaalien palokäyttäytymisessä ja haitallisten kaasujen muodostumisessa: esimerkiksi hygieniapatjan palaminen tuotti nopeasti merkittäviä määriä HCN:ää, kun taas liesipaloissa CO-pitoisuudet olivat hallitsevia.

Simulaatioiden lähtötietojen muodostaminen

Tutkimuksessa ASET-ajan pituutta arvioitiin haitallisten kaasujen vaikutusten perusteella, käyttäen Purserin (2016) kehittämää FED-indeksiä (Fractional Effective Dose). Laskennan mahdollistavan simulaation parametreiksi tarvitaan tieto palotehoista eri ajanhetkillä, sekä kunkin kaasun tuotto, jonka arvo ilmaisee, kuinka paljon kaasua muodostuu palavan materiaalin massa suhteutettuna (kg/kg).

Datan esikäsittelyvaiheessa mitatut aikasarjat synkronoitiin keskenään, mahdolliset mittausvirheet sekä palotehon polttimesta johtuva osa poistettiin. Tämän jälkeen toistokokeista mitattujen palotehon aikasarjojen alkuvaiheeseen sovitettiin t^2 -käyrä kuvaamaan palotehon kasvuvaihetta, kun taas palon mahdollinen hiipuminen mallinnettiin lineaarisella approksimaatiolla. Tämän jälkeen dataan sovitetuista funktioista muodostettiin syöte FDS-simulaatiotyökalulle (Fire Dynamics Simulator), jossa palotehon aikariippuvuus kuvattiin RAMP-funktion avulla.

Simulaatioon tarvittavan tuoton laskemiseksi määritettiin kokeen aikana palaneen materiaalin massahäviö ja muodostuneiden kaasujen massat. Massahäviö arvioitiin kahdella tapaa: punnitsemalla näytteet ennen ja jälkeen kokeen sekä integroimalla polttoaineen massavirta palon keston yli. Muodostuneiden kaasujen massat määritettiin FTIR-laitteistolla mitatusta datasta, jossa kaasujen pitoisuudet ilmoitettiin ppm-yksiköissä. Mittaustuloksista laskettiin kaasujen hetkellinen massavirta polttokokeen aikana, mistä saatiin määritettyä koko kokeen aikana muodostuneet kaasumassat integroimalla. Jakamalla muodostuneen kaasun massa palaneen materiaalin massalla saatiin tuottoarvot, joita voidaan hyödyntää FDS-simulaatiossa CO- ja HCN-kaasujen muodostumisen mallintamiseen.

Usean kaasun haittavaikutusten mallintaminen FDS-simulaatiossa

FDS-simulaatiosovelluksessa on helppo määrittää CO- ja HCN-päästöjen lähtöarvot, jotka vaikuttavat simulaatiossa muodostuvien kaasujen määrään. Lisäksi sovellus mahdollistaa näiden kaasujen vaikutusten mallintamisen toimintakykyyn. Tutkimuksessa haluttiin kuitenkin huomioida myös muiden muodostuneiden kaasujen vaikutusta ASET-aikaan, mikä vaatii niiden tarkan määrittämisen sekä massavirtausten laskemisen, mikä monimutkaistaa mallinnusta. Haasteen ratkaisemiseksi tutkimuksessa kehitettiin niin kutsuttu surrogaattihiilimonoksidimenetelmä, joka mahdollistaa ärsyttävien kaasujen vaikutuksen huomioimisen määrittämällä CO- ja HCN-tuottojen lähtöarvot siten, että niiden vaikutus toimintakykyyn kattaa myös muiden muodostuneiden kaasujen vaikutuksen. Menetelmä tarjoaa yksinkertaisen tavan simuloida useiden kaasujen vaikutuksia, helpottaen siten simulaatioiden toteuttamista ja parantaen niiden todenmukaisuutta.

Kaasujen vaikutusta altistuvien henkilöiden toimintakykyyn mallinnettiin Purserin FED-indeksin avulla. Se kuvaa savukaasujen kumulatiivista vaikutusta elimistössä suhteessa annokseen, joka aiheuttaa toimintakyvyttömyyttä tai vakavia terveyshaittoja.

Vaikka kaasuilla on erilaisia vaikutusmekanismeja, yksinkertaistusti voidaan todeta, että pidempiaikainen altistuminen ja suurempi kaasukonsentraatio johtavat suurempaan annokseen. FED-arvo lasketaan summana yksittäisten kaasujen suhteellisista annoksista verrattuna tunnettuun vaarallisuusrajaan. Kun indeksin arvo saavuttaa arvon 1, altistus on hengenvaarallinen normaalikuntoiselle henkilölle. Laskennassa huomioidaan kaasujen pitoisuudet ja altistusaika, kuten seuraavasta yhtälöstä ilmenee:

$$FED_{in}(t) = \int_0^t [(F_{I,CO} + F_{I,CN} + F_{I,NO_x} + FLD)V_{CO_2} + F_{I,O_2}] dt \quad (1)$$

Missä

- Integraali ajan yli kuvaa annoksen kumuloituvaa vaikutusta toimintakykyyn.
- $F_{I,CO}$ kuvaa hiilimonoksidin tukahduttavaa vaikutusta, joka johtuu sen sitoutumisesta hemoglobiiniin, estäen hapen kuljetuksen verenkierrossa.
- $F_{I,CN}$ kuvaa vetycyanidin soluhengitystä lamauttavaa vaikutusta.
- F_{I,NO_x} kuvaa typen oksidien aiheuttamaa hengityselinten ärsytystä ja vaurioita, sekä asfyksiaa.
- FLD kuvaa ärsyttäviä yhdisteitä, kuten HCl (suolahappo), HBr (vetybromidi), HF (vetyfluoridi), akroleiini ja formaldehydi, jotka aiheuttavat esimerkiksi silmien ja hengitysteiden ärsytystä sekä hengitysvaikeuksia.
- V_{CO_2} on hiilidioksidin aiheuttama hyperventilaatiokerron.
- F_{I,O_2} kuvaa alhaisen happipitoisuuden aiheuttamaa hypoksiaa elimistössä.

Koska FDS-simulaatiosovelluksella voidaan määrittää vain CO:n ja HCN:n vaikutus toimintakykyyn, täytyy yhtälön 1 ärsyttävien kaasujen ja typen oksidien termit sisällyttää jommankumman kaasun vaikutukseen, jotta nekin tulee huomioiduksi. Havaittiin, että tämä voidaan tehdä laskemalla arvo niin kutsutulle hiilimonoksidisurrogaatille, jonka vaikutus toimintakykyyn saadaan johdettua yhtälöstä 1:

$$F_{I,CO_{sur}} = F_{I,CO} + F_{I,NO_x} + FLD \quad (2)$$

Yhtälön 2 arvoista $F_{I,CO}$ saadaan simuloimalla määritetyn tuoton perusteella ja termit F_{I,NO_x} ja FLD matemaattisesti hyödyntäen laskennassa kaasujen mittauksista saatuja pitoisuuksia, sekä hiilimonoksidin simuloitua pitoisuutta.

Kun hiilimonoksidisurrogaatin aiheuttama vaikutus on tiedossa, syntyy inversio-ongelma: mikä tuottoparametrin arvo simulaation lähtötiedoissa tuottaa hengitysilmaan sen CO-aine-pitoisuuden, joka johtaa surrogaatin aiheuttamaan toimintakyvyn heikkenemiseen. Tämä käänteinen laskenta voidaan ratkaista lineaarialgebran yhtälöillä, jolloin saadaan surrogaattihiilimonoksidin tuottoparametrin arvo. Tämän myötä muodostuu simulaatio, joka huomioi CO- ja HCN-kaasujen lisäksi myös muiden haluttujen kaasujen vaikutukset.

Tulokset

Polttokokeiden ja simulaatioiden perusteella saatiin laaja ja luotettava aineisto hoivaympäristöille tyypillisten alkupalotilanteiden palotehoista ja haitallisten kaasujen muodostumisesta. Polttokokeiden palotehojen huippuarvot ja muodostuneiden palokaasujen pitoisuudet vaihtelivat odotetusti eri palokuormien välillä. Esimerkiksi saunanurkan ja hygieniapatjan palot tuottivat nopeasti korkean palotehon ja merkittäviä määriä hiilimonoksidia ja ve-

tysyanidia, kun taas liesipalo tuotti maltillisemmin palotehoa ja haitallisia kaasuja.

Simulaatioissa pystyttiin toistamaan polttokokeiden tuloksia ja mallintamaan palokaasujen leviämistä hoivaympäristöjen kaltaisissa tiloissa. Kehitetyssä surrogaattimenetelmässä ärsyttävien kaasujen vaikutusta ei mallinneta erillisinä kaasukohtaisina prosesseina, vaan muuttamalla CO:n pitoisuutta siten, että sen vaikutus toimintakyvyn heikkenemiseen sisältää sen itsensä lisäksi myös muiden haitallisten kaasujen aiheuttaman vaikutuksen. Tämä yksinkertaistus mallinna aukottomasi esimerkiksi hengitysteiden ärsytyksen vaikutuksia, mutta tarjoaa paloturvallisuusarvioinnin kannalta riittävän konservatiivisen arvion vaaratilanteiden kehittymisestä. Lähestymistapa vähentää merkittävästi simulointien monimutkaisuutta verrattaessa jokaisen kaasun erikseen mallintamiseen. Verrattaessa simuloituja arvoja kaasupitoisuuksista laskettuun FED-indeksiin arvoon, menetelmällä saatiin simuloitua huomattavasti realistisempia tuloksia, kuin simuloimalla vain CO:n ja HCN:n vaikutuksia toimintakykyyn.

Johtopäätökset

Tutkimuksessa tehty työ on edistysaskel simulaatiopohjaisen paloturvallisuusarvioinnin kehittämisessä hoivakohteiden erityispiirteitä silmällä pitäen. Polttokokeisiin perustuva mittadata mahdollisti realististen ja luotettavien simulaatiomallien rakentamisen, joiden syötiedot ovat avoimesti saatavilla. Työn tulokset tarjoavat täten pohjan kohdekohtaisten turvallisuussuunnitelmien laadinnalle ja tukevat paloviranomaisten päätöksentekoa entistä luotettavammalla tiedolla.

Työssä kehitetty surrogaattimenetelmä toi käytännön simulointityöhön parannuksia. Surrogaattituottojen käyttäminen hiilimonoksidille mahdollistaa usean kaasun vaikutuksen huomioimisen FDS-simulaatioalustalla. Lisäksi se yksinkertaistaa ja nopeuttaa niiden vaikutuksen simuloimisessa tehtävää käytännön työtä, sekä vähentää simulaatioiden laskennallista resurssitarvetta ja monimutkaisuutta ilman merkittävää tarkkuuden heikentymistä. Surrogaattimenetelmää on kehitetty tutkimuksen jälkeen edelleen muun muassa lisäämällä muillekin kaasuille surrogaatteja, mikä mahdollistaa laajemman kirjon paloskenaarioiden simuloimisen ja entistä tarkemmat ja realistisemmat tulokset.

Kiitokset

Kiitokset Palosuojelurahastolle tutkimuksen rahoittamisesta ja Etelä-Karjalan pelastuslaitokselle hankkeen vetämisestä. Kiitän myös opinnäytetyöni ohjaajia, Simo Hostikkaa ja Marko Hassista, heidän asiantuntevasta ohjauksestaan ja palautteestaan. Lisäksi kiitos Aalto-yliopistolle mahdollisuudesta osallistua tähän monitieteiseen ja merkittävään hankkeeseen.

Lähteet

1. Linna, A. (2024). Hoivalaitosten palosimulaatioiden lähtötietojen muodostaminen polttokokeista (Master's thesis, Itä-Suomen yliopisto).
2. Purser DA, McAllister JL. Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. New York, NY: Springer; 2016:2308–2428.

Pelastustieto

1/2025 PELASTUSTOIMI, ENSIHOITO JA VARAUTUMINEN



75 vuotta
turvallisuuden puolesta

REHTORIT SAMAN
pöydän ääressä

JARI-MYRSKYYN
varauduttiin hyvin

PELASTUSTOIMEN JA ENSIHOIDON
vaikuttajat pohtivat nykyyhteä ja tulevaisuutta

Tilaa itsellesi tai lahjaksi.
Vahva myös verkossa:
pelastustieto.fi



Pelastustieto

ETUOSIO PELASTUSTOIMI PELASTUSTOIMINTA OYSTELE BLOGIT INTERVIEWSOIT -SUOITTEILALLE



Kuljettajille johtamiskoulutusta - päivystävien palomestarien kuormaa voidaan keventää



Arvoas toiminta kalpa
laista turvaa -
sopimuspalokunta- ja
vapaaehtoisvoimien
tulevaisuutta tarkastellaan
pää valmisteissa
toimintajärjestämissä

"Päikköhuu"
Ensihoidon tarkkuus
ilmeisesti - 32 vuotta vanha
konsepti toimii yhä

Vakuttavana palikku
Etelä-Karjalan note-tike ja
kotien viivärvä palvelut



Talvihuollon Pelastushelikopteri Aulakissa
- ei leonä



Lokkijä: Kimmo Vuorilainen, Jyväskylä

KIRJALUO PALVELUUN

Pelastustieteen tilaajat voivat lukea kaikkea
gallerialla sivustilla

KIRJALUO PALVELUUN

TILAA PELASTUSTIETO

TILAA UUTISKIRJE

TILAA IRTONUMERO

UUSIN LEHTI



LEHTIMÄKISTO

SUOSIUTUT

**Kuljettajille johtamiskoulutusta -
päivystävien palomestarien
kuormaa voidaan keventää**

Kiitos teille, arjen sankarit

"Päikköhuu" - Ensihoidon
tarkkuus ilmeisesti - 32 vuotta
vanha konsepti toimii yhä

Kerjokelari muuttanut - pelava

Poistumisturvallisuus ja asukkaiden toimintakyky ikääntyneiden asumisyksiköissä

Tiivistelmä

Hätätilanteessa, kuten tulipalossa, poistumisaikaa on vain 2–3 minuuttia, mikä edellyttää palon havaitsemista ja nopeaa reagointia. Poistumisturvallisuusselvitysvelvollisten kohteiden piirissä on mm. iäkkäitä henkilöitä, joiden toimintakyky on heikentynyt, mikä vaikeuttaa reagointia ja ohjeiden noudattamista. Näillä henkilöillä voi olla vaikeuksia fyysisessä toimintakyvyssä ja esimerkiksi itsenäinen käveleminen ei onnistu. Henkilökunnan rooli on tällöin ensiarvoisen tärkeä. Rakenteellinen suojaus, kuten paloilmoin- ja automaattiset sammutusjärjestelmät, ovat välttämättömiä asumis- ja hoitoympäristöissä, joissa on toimintakyvyltään heikentyneitä henkilöitä. Pelastuslain 18–20 §:ssä säädetään hoitolaitosten sekä palvelu- ja tukiasumisen poistumisturvallisuudesta, sen selvittämisestä sekä poistumisturvallisuuden arvioinnista (1).

Poistumisturvallisuusselvityksessä on tärkeää huomioida sekä toiminnan että rakennuksen erityispiirteet, jotta voidaan varmistaa asukkaiden, henkilökunnan ja tilojen turvallisuus. Tämä edellyttää selkeää dokumentointia keskeisistä tiedoista, kuten toiminnan luonteesta, tilojen käytöstä ja pelastusjärjestelyistä ja palontorjuntatekniikasta. Poistumisturvallisuusselvityksen avulla voidaan arvioida riskitekijöitä ja suunnitella toimenpiteitä, jotka tukevat tehokasta vaaratilanteisiin varautumista.

Tässä artikkelissa tarkastellaan poistumisturvallisuusselvitysvelvollisia kohteita, joissa asuu iäkkäitä henkilöitä.

Johdanto

Poistumisturvallisuusselvityksen tavoitteena on varmistaa, että sairaaloissa, ikääntyneiden ympärivuorokautisessa palveluasumisessa, suljetuissa rangaistuslaitoksissa ja erilaisissa asumisympäristöissä asuvat henkilöt voivat poistua turvallisesti hätätilanteessa. Asukkaiden toimintakyky voi olla heikentynyt esimerkiksi iän, vamman tai sairauden vuoksi, mikä voi vaikeuttaa evakuointia.

Poistumisturvallisuusselvityksen avulla pyritään varmistamaan, että jokainen rakennuksen tai asumisyksikön käyttäjä pystyy poistumaan turvallisesti riippumatta mahdollisista toimintarajoitteista tai liikkumisen rajoittamiseen liittyvistä lukituksista.

Poistumisturvallisuusselvityksestä vastaa asumisyksikön, sosiaali- ja terveydenhuollon toimipisteen tai muun kohteen toiminnanharjoittaja, ja pelastusviranomaisen arvioi selvityksen asianmukaisuuden. Tämä varmistaa, että turvallisuustoimenpiteet ovat riittäviä ja että evakuointikäytännöt ovat asianmukaisesti suunniteltuja ja toteutettavissa kaikissa tilanteissa (2,1).

Pelastuslain pykälissä 18–21 § säädetään tarkemmin poistumisturvallisuusselvityksestä. Lain mukaan poistumisturvallisuusselvitys on laadittava ennen toiminnan aloittamista ja päivitettävä vähintään kolmen vuoden välein tai toiminnan muuttuessa olennaisesti. Poistumisturvallisuusselvitys ja sen muutokset on toimitettava alueen pelastusviranomaiselle. Poistumisturvallisuusselvitys on toimitettava lisäksi tiedoksi rakennusvalvontaviranomaiselle. Alueen pelastusviranomaisen tulee arvioida, täyttyykö poistumisturvallisuus säädettyjen vaatimusten mukaisesti. Tarvittaessa pelastusviranomaisen on voi velvoittaa toiminnanjärjestäjää järjestämään kohteeseen poistumiskokeen (1).

Poistumisturvallisuusselvityksessä on oltava toiminnanharjoittajan nimi ja yhteystiedot, kohteen käyntiosoite, palvelun sisältö ja tuottamistapa, sekä asukkaiden tai hoidettavien henkilöiden määrä toiminnan ja tilojen mukaan jaoteltuna, tulee ilmoittaa selkeästi. Lisäksi henkilökunnan määrä eri ajankohtina on tuotava ilmi. Poistumisturvallisuusselvityksessä on esitettävä tiedot rakennuksen paloluokasta ja kerrosluvusta, toiminnassa käytettävien tilojen pinta-aloista kerroksittain sekä kuvaus sammutus- ja pelastustehtävien järjestelyistä. Näihin järjestelyihin kuuluu tulipalon nopean havaitsemisen, sammuttamisen, avun hälyttämisen ja henkilöiden pelastamisen edellytysten turvaaminen. (3) Pelastuslain uudistaminen on käynnissä parhaillaan.

Sosiaalihuoltolailla (4) säädetään muun muassa hyvinvointialueen vastuulle kuuluvista tehtävistä ja palveluista sekä niiden toteuttamisesta, esimerkiksi asumispalveluista. Sosiaalihuoltolain pykälien 21–22 § mukaisia asumismuotoja ovat tilapäinen asuminen, tuettu asuminen, yhteisöllinen asuminen, ympärivuorokautinen palveluasuminen, laitospalvelut ja perheryhmäkoti. Uudistettu sosiaalihuoltolaki tuli voimaan 1.1.2023, jonka myötä yhteisöllinen asuminen korvaa entisen palveluasumisen ja ympärivuorokautinen palveluasuminen tehostetun palveluasumisen. Sosiaalihuoltolain mukaiset asumisyksiköt ovat poistumisturvallisuusselvitysvelvollisia kohteita. Lastensuojelun asumispalvelut järjestetään joko sijaishuoltona perhehoidossa tai laitospalveluna lastenkodissa, koulukodissa tai näihin rinnastettavissa lastensuojelulaitoksissa. Perhehoidosta tarkemmin säädetään Perhehoitolaissa (5) ja lastensuojelusta Lastensuojelulaissa (6).

Terveyden ja hyvinvoinninlaitoksen ylläpitämän TOPI-toimipaikkarekisterin (7) mukaan poistumisturvallisuusselvitysvelvollisia kohteita oli vuonna 2024 noin 4700 kappaletta.

SPEKissä on alkanut viime vuonna selvityshanke, jonka tavoitteena on luoda ajantasainen tilannekuva poistumisturvallisuusselvitysvelvollista kohteista ja tarkentaa, kuinka paljon kohteita on sekä valtakunnallisesta että hyvinvointialueittain, onko selvitysten taso hyväksyttävä pelastusviranomaisen arvion mukaan ja millainen turvallisuustaso kohteissa on. Hankkeen aikana on havaittu, että hyvinvointialueiden välillä on vaihtelua, kuinka helposti tiedot ovat saatavilla ja kuinka ajantasaisia ne ovat.

Alustavien havaintojen pohjalta voidaan todeta, että selvitysvelvollisten kohteiden määrä vaihtelee hyvinvointialueittain vajaan 100 kohteesta lähes 500 kohteeseen ja iso osa näistä kohteista on täysin tai osittain ikääntyneiden ympärivuorokautisen palveluasumisen kohteita.

Poistumisturvallisuusselvityksen taustaa

Suomessa poistumisturvallisuusselvitysmenettely otettiin käyttöön vuonna 1999 Maaningalla tapahtuneen vakavan palvelutalon tulipalon jälkeen. Tulipalossa menehtyi viisi ihmistä. Onnettomuuden tutkinnan mukaan pelastustoiminnassa kohdattiin merkittäviä haasteita, sillä asukkaat eivät pystyneet auttamaan itseään. Erityisen vaikeassa tilanteessa olivat muistisairaiden yksikön asukkaat, joilla ei ollut mahdollisuutta omatoimiseen pelastautumiseen ja jotka tarvitsivat ulkopuolista apua päästäkseen ulos rakennuksesta. Tutkinnassa todettiin myös, että viive hätäilmoituksen tekemisessä vaikutti merkittävästi tilanteen kulkuun. Mikäli kohteessa

olisi ollut hätäkeskukseen kytketty paloilmoin, ilmoitus olisi saapunut 7–8 minuuttia aiemmin. Lisäksi henkilöstöltä puuttui alkusammutuskoulutus, ja vaikka rakennuksen turvallisuussuunnitelma oli juuri valmistunut, sitä ei ollut vielä otettu käyttöön (8).

Maaningan tulipalon jälkeen ajoittui laaja tulipalojen tai palonalkujen sarja vanhusten tai muiden toimintakyvyltään heikentyneiden asukkaiden palvelutaloissa tai vastaavissa asumiskohteissa. Kaikkiaan paloja oli 17. Syttymisriskinä näille paloille oli asiakkaiden alentunut toimintakyky. Näiden tapahtumasarjojen perusteella työryhmä antoi yhteensä 13 suositusta; rakenteellisen paloturvallisuuden uudisrakentamiseen ja korjausrakentamiseen, käytössä olevien kohteiden paloturvallisuuteen sekä pelastustoimen järjestelyihin. Suosituksissa oli mukana muun muassa turvallisuusanalyysi, jonka pohjalta kohteen suojaustaso valitaan (8). Suositukset taulukossa 1.

Näiden onnettomuuksien tutkintaselosteen julkaisun myötä ympäristöministeriön julkaisema asetus rakennusten paloturvallisuudesta otti huomioon edellä mainitut suositukset ja rakentamismääräyksiin tuli termi Turvallisuusselvitys. Poistumisturvallisuutta koskevat säädökset tulivat Pelastuslakiin (486/2003) vuoden 2004 alussa (9).

Poistumisturvallisuuden kehitys Suomessa ja kansainväliset näkökulmat

Valtakunnallinen tilannekuva vuodelta 2015

Edellinen valtakunnallisen selvitys poistumisturvallisuusselvitysvelvollisista kohteista on tehty vuonna 2015 Pelastuslaitosten kumppanuusverkoston ja SPEKin yhteistyönä. Selvityksen tavoitteena oli luoda kansallisen tilannekuva poistumisturvallisuusselvitysvelvollisten kohteiden turvallisuustasosta, poistumisturvallisuuden arviointien laadun parantaminen sekä käytänteiden yhtenäistäminen. Tilannekuvan kokoaminen onnistui hyvin ja tuloksena saatiin tarkka ja yhdenmukainen kuva kohteiden turvallisuustasosta. Poistumisturvallisuus oli vuoden 2014 lopussa kunnossa 83 %:ssa selvitysvelvollisista kohteista, automaattinen sammutuslaitteisto oli asennettu 54 %:ssa kohteista. Eniten parannettavaa oli päihdehuollon kohteissa ja suurissa sairaaloissa. Analysoinnissa havaittiin, että tulkintaeroja oli poistumisturvallisuusselvitysprosessin käsittelyssä ja poistumisturvallisuuden arvioinnissa. Tuolloin poistumisturvallisuusselvitysvelvollisia kohteita oli yhteensä 3655 kappaletta.

Vuonna 2015 julkaistussa selvityksessä todetaan, että kaikkia

Rakenteellinen paloturvallisuus uudisrakentamisessa ja korjausrakentamisessa
Suositus 1. Henkilöturvallisuus analyysin laatiminen
Suositus 2. Poistumistiemääräysten täsmentäminen
Suositus 3. Ilmanvaihtoa koskevien määräysten selkiyttäminen
Käytössä olevien kohteiden paloturvallisuus
Suositus 4. Henkilöstöturvallisuusanalyysin laatiminen
Suositus 5. Turvallisuuskulttuurin kehittäminen
Suositus 6. Poistumis- ja pelastusvälineiden arviointi
Suositus 7. Sisäisen paloturvallisuusvalvonnan pakollisuus
Suositus 8. Ullakon ja yläpohjan onteloiden osastointi
Suositus 9. Sisustusmateriaalien paloturvallisuuden parantaminen
Suositus 10. Paloturvallisuuden huomioiminen vanhusten avuntarvetta määriteltäessä.
Pelastustoimen järjestelyt
Suositus 11. Kohdesuunnittelu ja harjoittelu kohteissa
Suositus 12. Yhteistoimintasuunnitelmien kehittäminen
Suositus 13. Vanhusten ja muiden erityisryhmien asunrakennusten määrittäminen erityiskohteiksi

Taulukko 1: Suositukset turvallisuustilanteen parantamiseksi.

- palvelu-aloja tarkasteltaessa, että 30 % kohteiden asiakkaista tai potilaista pystyy poistumaan kohteista itsenäisesti, vanhusten asu-
mispalvelujen osalta vain 16 % kykenee itsenäiseen poistumiseen.

Poistumisturvallisuustyöryhmä suosittelee tuolloin pelastusjohtajille, mm. että asetetaan yhteiseksi tavoitteeksi vaikuttaa lainsäädännön kehittämiseen siten, että nykyisten poistumisturvallisuusselvitysvelvollisten kohteiden suojaaminen automaattisella sammutuslaitteistolla tulee pakolliseksi sekä uudisrakentamisessa että käytössä olevissa kohteissa ja pelastuslaitokset määrittelevät yhteiseksi tahtotilaksi poistumisturvallisuusselvitys laadun parantamisen ja käytänteiden yhtenäistämisen omissa strategisissa suunnitelmissaan (9).

Kansainväliset tutkimukset

Laajemmin poistumisturvallisuutta ja evakuoitumista on mallinnettu useissa kansainvälisissä tutkimuksissa ja kirjallisuuskatsauksissa. Poistumisturvallisuus ja evakuointi on poikkitieteellinen tutkimusaihe, jota tutkitaan esimerkiksi yhteiskunta-, kognitio-, insinööri- ja palotieteellisestä ja psykologisesta näkökulmasta (10, 11). Ihmisten käyttäytymisen ja julkisista tiloista evakuoinnin mallintamisen (12, 13, 14) lisäksi osa tutkimuksesta keskittyy ihmisiin, joilla on heikentynyt toimintakyky, esimerkiksi sairaat, vammaiset ja ikääntyneet (11, 15, 16, 17).

Viime vuosien aikana on kirjoitettu useita akateemisia kirjallisuuskatsauksia evakuoinnista ja poistumisturvallisuudesta. Tee-
moja ovat muun muassa vammaisuuden vaikutukset poistumiseen tulipalosta (18), sairaalahenkilöstön evakuointivalmius (19) ja hoiv-
alaitosten onnettomuuksiin varautuminen ja vastaaminen (20).

Vaikka vammaisten ihmisten oikeudet ovat parantuneet, tämä trendi ei näy yhtä vahvasti rakennusten turvallisuustasossa. Toimintarajoitteiset ihmiset ovat kaikkein haavoittuvaisimpia rakennuspaloissa ja rakennettu ympäristö asettaa hankalimmat rajoitteet evakuoinnille. Ihmiset, joiden toimintakyky on heikentynyt, eivät pysty välttämättä käyttämään suunniteltuja evakuointitapoja, jos suunnittelussa ei ole otettu huomioon toimintarajoitteita (21).

Toimintarajoitteisten henkilöiden poistumisturvallisuutta käsittelevässä tutkimuksessa käytetään usein konseptia egressibility, joka kuvaa evakuointikeinojen saavutettavuutta (22, 23, 24). Lisäksi ihmisen ja ympäristön yhteensopivuus (person-environment fit) on teoreettinen lähtökohta toimintarajoitteisten henkilöiden poistumisturvallisuuden tutkimuksessa, sillä sen avulla tarkastellaan ympäristön vaatimusten ja toimintakyvyn kohtaamista, jotta voidaan määrittää evakuointikeinojen saavutettavuus. Ympäristön asettamat rajoitteet heikentävät saavutettavuutta (25) ja joillekin henkilöille pienikin muutos ympäristössä voi vaikuttaa peruuttamattomasti kyvykkyyksien heikkenemiseen (26).

"Vuonna 2022 Suomessa noin 580000 henkilöllä on jonkinasteisia toimintakyvyn rajoitteita, ja iän myötä rajoitteet yleistyvät. Yli 84-vuotiaista yli puolet kärsii vakavista toimintarajoitteista, jotka liittyvät usein liikkumiseen."

Toimintarajoitteisten henkilöiden poistumiseen vaikuttavia toimintakykymuuttujia on analysoitu useissa eri tutkimuksissa eikä selkeää konsensusa merkittävimmistä muuttujista tai mallinnuskeinoista ole muodostettu. Muuttujina on hyödynnetty mm. RAI-arviointitietoa tai kävelynopeutta. Kävelynajan havaittiin olevan hitaampi kuin aiemmissa tutkimuksissa, kun mallinnettiin evakuointitilanne kuusikerroksissa vammaisten ja iäkkäiden hoivakodissa (24). Tutkijat ovat myös havainneet toimintakykymuuttujien vaikutuksen asiakkaiden kuolleisuuteen, sairaalaan joutumiseen tai itsenäiseen evakuoitumiseen (27,28). Ympäristötekijöillä on myös vaikutusta evakuointitilanteissa, esimerkiksi kaiteiden puuttuminen sisäänkäyntien läheisyydessä on yhteydessä vanhusten korkeampaan kuolleisuuteen evakuointitilanteiden jälkeen (29).

Heikentyneen toimintakyvyn omaavat henkilöt

Pelastuslaissa viitataan poistumisturvallisuusselvitysvelvollisiin kohteisiin asukkaiden tai potilaiden toimintakyvyn näkökulmasta:

Sairaaloissa, vanhainkodeissa ja muussa laitoshuollossa, suljetuissa rangaistuslaitoksissa ja muissa näihin verrattavissa kohteissa (hoitolaitokset) sekä asumisyksikön muotoon järjestetyissä palvelu- ja tukiasunnoissa ja muissa näihin verrattavissa asuinrakennuksissa ja tiloissa, joissa asuvien toimintakyky on tavanomaista huonompi (palvelu- ja tukiasuminen), toiminnanharjoittajan on etukäteen laadittu selvitys ja suunnitelma ja niiden perusteella toteutettu toimenpitein huolehdittava, että asukkaat ja hoidettavat henkilöt voivat poistua turvallisesti tulipalossa tai muussa vaaratilanteessa itsenäisesti tai avustettuina. (1)

Toimintakyky

Toimintakyky tarkoittaa ihmisen fyysisiä, psyykkisiä ja sosiaalisia valmiuksia selviytyä arjen keskeisistä toiminnoista omassa elinympäristössään. Sitä voivat tukea asuinympäristö, muiden ihmisten apu ja erilaiset palvelut. Toimintakykyä kuvaa tasapaino yksilön kykyjen, ympäristön ja tavoitteiden välillä (30).

Toimintakyky on moniulotteinen käsite, joka kuvaa yksilön kykyä selviytyä arjessa ja vastata ympäristön asettamiin vaatimuksiin. Toimintakykyä jäsennetään usein neljän ulottuvuuden kautta, joita ovat fyysinen, psyykinen, kognitiivinen ja sosiaalinen toimintakyky. Näiden osa-alueiden välinen tasapaino vaikuttaa hyvinvointiin, elämänhallintaan ja osallisuuteen yhteiskunnassa ja täten myös turvallisuuteen. Fyysinen toimintakyky kattaa ihmisen fyysiset edellytykset arjen tehtävistä selviytymiseen, kuten lihasvoiman, kestävyuden, liikkuvuuden ja aistitoiminnot. Psyykinen toimintakyky liittyy mielenterveyteen, tunteiden käsittelyyn ja elämänhallintaan, kun taas kognitiivinen toimintakyky käsittää tiedonkäsittelyn prosessit, kuten muistin, oppimisen ja ongelmanratkaisun. Sosiaalinen toimintakyky ilmenee ihmisen vuorovaikutussuhteissa ja yhteisöön osallistumisessa (30).

Vuonna 2022 Suomessa noin 580 000 henkilöllä on jonkinasteisia toimintakyvyn rajoitteita, ja iän myötä rajoitteet yleistyvät. Yli 84-vuotiaista yli puolet kärsii vakavista toimintarajoitteista, jotka liittyvät usein liikkumiseen. Esimerkiksi yli 74-vuotiaista runsas neljäsosa kokee merkittäviä vaikeuksia kävelyssä tai portaiden kulkemisessa, eikä osa pysty suoriutumaan näistä lainkaan (31).

Ikääntyessä myös aistivaikeudet, kuten heikentynyt näkö ja kuulo, vaikuttavat toimintakykyyn. Tutkimukset ovat osoittaneet, että nämä haasteet voivat itsenäisesti heikentää liikkumista ja toimintakykyä, samalla vaikeuttaen sosiaalista kanssakäymistä ja mielekästä tekemistä (32).

Ikääntyneiden toimintakyky RAI-arviona

Poistumisturvallisuusselvitysvelvollisia kohteita tarkastellessa, voi-

daan todeta, että lähes puolet kohteista pitää sisällään ikääntyneet asiakkaat, joko yhteisöllisen asumisen tai ympärivuorokautisen palveluasumisen asiakkaina.

RAI-arviointivälineistö (Resident Assessment Instrument, RAI) on standardoitu työkalu, joka auttaa arvioimaan asiakkaan palvelutarpeita sekä laatimaan hoito-, kuntoutus- ja palvelusuunnitelmia. Vanhuspalvelulain mukaisesti RAI-välineistöä käytetään ikääntyneen henkilön toimintakyvyn arvioinnissa sekä sosiaalipalvelujen tarpeen selvittämisessä ja toteutuksen seurannassa (33). RAI-arviointivälineistö on otettu käyttöön Suomessa vuonna 2000 ja käyttö muuttui lakisääteiseksi iäkkäiden henkilöiden toimintakyvyn ja palvelutarpeiden arvioinnissa 1.4.2023 alkaen.

Säännöllinen RAI-arviointi onkin kattavuudeltaan laaja ja ikääntyneiden osalta antaa hyvän kuvan asiakkaiden ja asukkaiden toimintakyvystä, RAI-arvioituja asiakkaita vuonna 2023 oli 47 % yhteisöllisen asumisen asiakkaista ja 82 % ympärivuorokautisen palveluasumisen asiakkaista. Ympärivuorokautisessa hoidossa oli eniten (88 %) asiakkaita, joiden kognitio oli heikentynyt. Paljon apua tarvitsevia asiakkaita oli eniten ympärivuorokautisessa hoidossa (69 %). Yhteisöllisen asumisen asiakkaiden toimintakyky RAI-mittareilla tarkasteltuna on heikompaa kuin kotihoidon asiakkailla, mutta parempaa kuin ympärivuorokautisen palveluasumisen asiakkailla. Yhteisöllisen asumisen asiakkaista puolella (52 %) on jokin muistisairausdiagnoosi ja ympärivuorokautisen palveluasumisen asiakkaista suurella osalla (76 %) (34).

Poistumisturvallisuusvelvollisissa kohteissa asuvien ikääntyneiden henkilöiden toimintakyky on heikentynyt, suuri joukko näistä henkilöistä sairastaa muistisairautta ja on tämän vuoksi riippuvaisia henkilökunnan avusta ja ohjauksesta sekä päivittäistoimintoissaan että poikkeustilanteissa.

Tietojen kokoamisen haasteet poistumisturvallisuudessa: Kun käytäntöjä on yhtä paljon kuin tekijöitä

Aineisto

SPEK lähetti jokaiselle hyvinvointialueelle tietopyynnön poistumisturvallisuus selvityksellisten kohteista, kohteiden selvitysten hyväksyttävästä tasosta sekä rakenteellisesta suojauksesta tammi-kuussa 2025. Kaikki hyvinvointialueet ovat vastanneet pyyntöön myöntävästi ja valtaosa on toukokuuhun 2025 mennessä toimittanut aineiston. Kohdelistat käytiin hankevastaavan toimesta läpi ja tarkastettiin vertaamalla listausta THL:n TOPI-toimipaikkarekisteriin, AVI:lta saatuihin lastensuojelun ja ammatillisen perhehoidon listauksiin, Rikosseuraamuslaitokselta saatuihin vankiloiden kohdelistoihin, Poliisihallitukselta saatuihin listauksiin poliisivankiloista sekä Migrin avoimeen tietoon vastaanottokeskuksista. Tietopyyntöihin pyydettiin vertailun jälkeen tarkennuksia pelastusviranomaisilta tarvekohtaisesti. Tietopyyntöön vastaaminen on ollut osalle alueista haastavaa.

Huomioita aineistosta

Kohdelistausten ajantasaisuudessa on vaihtelua, osa aluista on pystynyt toimittamaan ajantasainen aineiston annettujen määräaikojen puitteissa, osalla materiaalin kokoaminen on edelleen kesken. Tiedon poimimista haastaa kankeat tietojärjestelmät ja osa pelastuslaitoksista joutuu tekemään työn manuaalisesti. Aineistosta on nähtävissä, että tieto toiminnanharjoittajan muutoksista ei päivitty pelastuslaitoksille. Myös kohteiden luokittelutavoissa on eroja pelastuslaitosten välillä. Kohdeluokittelu ei täysin vastaa sosiaalihuoltolain mukaisia asumismuotoja. Palvelualakohtainen tarkastelu puolestaan on haastavaa siksi, että iso osa kohteista ilmoittaa palvelualakseen kaksi tai useampia palvelumuotoja tai kohde-

"Automaattinen paloilmoitin hätäkeskusyhteydellä ja automaattinen sammutusjärjestelmä lisää kohteiden turvallisuustasoa merkittävästi, ja sellainen löytyy jo isosta osasta kohteita."

ryhmiä. Tuetun asumisen kohteet vaikuttavat olevan hyvin pelastuslaitosten tiedossa, vaikkei ne löydy toimipaikkarekisterissä. Kohdelistausten tarkastaminen ja täydentäminen on vaatinut ennakoitua pidemmän ajan.

Johtopäätökset

Poistumisturvallisuus vaikuttaa näiden alustavien huomioiden valossa olevan varsin hyvällä tasolla. Vaikuttaisi, että erityisesti kohteiden määrä, joissa kohteen poistumisturvallisuus selvitys ei ole pelastusviranomaisen arvioin mukaan ajan tasalla on vähentynyt edelliseen selvitykseen verrattuna. Automaattinen paloilmoitin hätäkeskusyhteydellä ja automaattinen sammutusjärjestelmä lisää kohteiden turvallisuustasoa merkittävästi, ja sellainen löytyy jo isosta osasta kohteita.

Aineiston kokoaminen ja tietojen kerääminen on ollut osalle alueista hyvin työlästä. Osalla hyvinvointialueista on puolestaan ollut hyvin ajantasaiset seurantalistaukset. Poistumisturvallisuus selvityksellisten kohteiden valvonnassa on haasteita, jotka johtuvat osittain kankeista tietojärjestelmistä ja tiedonkulusta. Tietojärjestelmien tulisi tukea pelastuslaitoksia valvontatehtävien suorittamisessa mahdollistamalla ajantasaisia poimintoja. Tieto kohteiden toiminnanharjoittajan tai toiminnan muutoksesta tulisi välittyä mahdollisimman reaaliaikaisesti taholta toiselle. Pelastuslaki velvoittaa toiminnanharjoittajaa ilmoittamaan toiminnan muutoksesta, mutta jostain syystä tiedon kulussa on haasteita. Sosiaali- ja terveydenhuollon tulisi pitää yhteystiedot ja kohdetiedot ajan tasalla THL:n TOPI-toimipaikkarekisterissä.

Poistumisturvallisuus selvityksellisten kohteiden luokittelussa on eroja ja siinä, millaiset kohteet tulkitaan lain mukaan selvitykselliseksi kohteiksi. Pelastuslain uudistuksen myötä kohteiden määrittämisen tulisi mukailla muun muassa sosiaalihuoltolain mukaisia asumismuotoja. Tulkinnanvaraa kohteiden osalta aiheuttaa myös eri toimijoiden käyttämät ilmaistut, esimerkiksi yksityinen toimija markkinoi asumispalveluja yhteisöllisenä palveluasumisena, vaikka tosiasialisesti asuminen tapahtuu senioritalossa omalla vuokrasopimuksella ilman palvelutarpeen arviointia ja päätöstä asumispalveluista. Tällöin ei ole kyse sosiaalihuoltolain mukaisesta yhteisöllisestä asumisesta, eikä kohde ole poistumisturvallisuus selvityksellisen kohde.

Kotona asumisen painotusten vuoksi erilainen tuettu ja niin sanottu välimuotoinen asuminen tulee yleistymään, joten on hyvä pohtia, miten esimerkiksi senioriasuminen suhteutuu poistumisturvallisuuteen, myös näissä kohteissa asuu toimintakyvyltään heikentyneitä ihmisiä. Kohdelistoilla oli myös useita mielenterveys- ja päihdekuntoutujille suunnattuja tuetun asumisen yksiköitä, joita ei ole sosiaali- ja terveydenhuollon toimipaikkarekiste-

► rissä. Näistä kuitenkin pelastuslaitoksilla vaikuttaisi olevan varsin kattava tietoisuus.

Aikaisempi tutkimus nostaa asiakkaiden tai asukkaiden toimintakyvyn tarkastelun keskiöön poistumisturvallisuuden näkökulmasta. Tähän täytyy kiinnittää huomioita, sillä suomalaisten toimintakyvyn myönteinen kehitys on lakannut ja tämä tarkoittaa, että meillä on tulevaisuudessa sekä asiakkaina että työntekijöinä henkilöitä, joilla on erilaisia toimintakyvyn rajoitteita. Tällöin ennaltaehkäisy ja rakenteellinen suojaus, kuten paloilmoin- ja automaattiset sammutusjärjestelmät korostuvat.

Hankkeen lopulliset tulokset tullaan raportoimaan SPEKin avoimessa verkkojulkaisussa vuoden 2025 loppuun mennessä.

Kiitokset

Kiitos Palosuojelurahastolle selvityshankkeen rahoituksesta. Kiitos Kari Telarannalle ja Vilma Ristikankaalle hankkeen käynnistämisestä ja laajasta taustatietojen keräämisestä. Hankkeen ohjausryhmälle; Marjo Oksanen Päijät-Hämeen hyvinvointialue, Tapio Sten Pirkanmaan hyvinvointialue, Pauli Nurminen Keski-Suomen hyvinvointialue, Jani Jämsä Etelä-Savon hyvinvointialue, Jani Kanerva Etelä-Karjalan hyvinvointialue, Jani Kuutsa Pohjois-Savon hyvinvointialue, Matti Hietalahti Etelä-Pohjanmaan hyvinvointialue ja Jan Meszka SPEK suuret kiitokset asiantuntemuksestanne, panoksestanne hankkeen eteenpäin viemiseen ja yhteisistä keskusteluista. Kiitos aluehallintovirastolle, Rikosseuraamuslaitokselle ja Poliisihallitukselle avustanne tietopyynnön vastaamiseen ja erityisesti kiitos kaikille pelastuslaitoksille yhteistyöstä, avustanne ja keskusteluista poistumisturvallisuusselvitysvelvollisista kohteista. Kiitos SPEKin tutkimuspäällikkö Tuula Kekille avusta artikkelin kirjoittamisessa.

Lähteet

1. Pelastuslaki 379/2011
2. Fried, S. (2022). Opas. Poistumisturvallisuusselvityksen laatimisopas, 5. Saatavilla verkossa: Poistumisturvallisuusselvityksen laatimisopas, luettu 5.5.2025.
3. Valtioneuvoston asetus poistumisturvallisuusselvityksestä 292/2014.
4. Sosiaalihuoltolaki 1301/2014.
5. Perhehoitolaki 263/2015.
6. Lastensuojelulaki 417/2007.
7. THL. (2025). Toimipaikkarekisteri (TOPI). Saatavilla verkosta: <https://thl.fi/tilastot-ja-data/ohjeet-tietojen-toimittamiseen/hoitoilmoitusjarjestelma-hilmo/toimipaikkarekisteri-topi#:~:text=Sosiaali-%20ja%20terveydenhuollon%20toimipaikkarekisterin%20%28TOPI%29%20koodilla%20yksil%C3%B6id%C3%A4%C3%A4n%20hoitoilmoitusj%C3%A4rjestelm%C3%A4ss%C3%A4,palveluntuottaja%20ja%20toimipaikka%2C%20jossa%20asiakas%20on%20saanut%20hoitoa>, luettu 23.5.2025.
8. Onnettomuustutkintakeskus. (2002). Tutkintaselostus A2/1999 Y. Vanhusten palvelutalon palo Maaningalla 4.12.1999 ja 17 muuta paloa vastaavissa taloissa 1.12.1999–29.2.2000.
9. Aso, J., Kuuru, M., Männikkö, S., Naskari, J., Orreinen, M., Päivärinta, A., Tervo, J.-P., & Stén, T. (2015). Pelastuslaitosten kumppanuusverkoston julkaisu 3/2015. Kansallisen tilannekuvan kokoaminen poistumisturvallisuusselvitysvelvollisten kohteiden turvallisuustasosta.
10. Wang, Y., Kyriakidis, M., Dang V. N. (2021). "Incorporating human factors in emergency evacuation – An overview of behavioral factors and models." International Journal of Disaster Risk Reduction, 60. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102254>, luettu 8.5.2025.
11. Ronchi, E. (2021). "Developing and validating evacuation models for fire safety engineering." Fire Safety Journal, 120. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103020>, luettu 8.5.2025.
12. Lovreglio, R., Ronchi, E. & Kinsey, M.J. (2020). "An Online Survey of Pedestrian Evacuation Model Usage and Users." Fire Technology 56. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00923-8>, luettu 8.5.2025.
13. Zhao, X., Lovreglio, R., Nilsson, D. (2020). "Modelling and interpreting pre-evacuation decision-making using machine learning." Automation in Construction, 113. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103140>, luettu 8.5.2025.
14. Chen, J., Shi T., Li, N. (2021). "Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools." Safety Science, 142. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105378>, haettu 8.5.2025.
15. Bagaria, J., Heggie, C., Abrahams, J., & Murray, V. 2009. "Evacuation and Sheltering of Hospitals in Emergencies: A Review of International Experience." Prehospital and Disaster Medicine, 24(5), 461–467. <https://doi.org/10.1017/S1049023X00007329>, luettu 8.5.2025.
16. Hashemi, M., & Karimi, H. (2015). "Indoor Spatial Model and Accessibility Index for Emergency Evacuation of People with Disabilities." Journal of Computing in Civil Engineering, 30, 04015056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000534](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000534), luettu 8.5.2025.
17. Thériault, W., Blanchet, G., Vincent, C., Feillou, I., Ruel, J., & Morales, E. (2024). "Current learning strategies in fire evacuation for seniors and people with disabilities in private seniors' residences and long-term care homes: A scoping review." Frontiers in Rehabilitation Sciences, 5, 1305180. <https://doi.org/10.3389/fresc.2024.1305180>, luettu 8.5.2025.
18. Hostetter, H., Naser, M.Z. (2022). "Characterizing disability in fire evacuation: A progressive review." Journal of Building Engineering, 53. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104573>, luettu 8.5.2025.
19. Moslehi, S., Masbi, M., Noori, N., Taheri, F., Soleimanpour, S. & Narimani, S. (2024). "Components of hospital personnel preparedness to evacuate patients in disasters: a systematic review." BMC Emerg Med, 21. <https://doi.org/10.1186/s12873-024-00942-x>, luettu 8.5.2025.
20. Pierce, J. R., Morley, S. K., West, T. A., Pentecost, P., Upton, L. A., & Banks, L. (2017). "Improving Long-Term Care Facility Disaster Preparedness and Response: A Literature Review." Disaster Medicine and Public Health Preparedness, 11(1). <https://doi.org/10.1017/dmp.2016.59>, luettu 8.5.2025.
21. Hostetter, H., Naser, M.Z. (2022). "Characterizing disability in fire evacuation: A progressive review." Journal of Building Engineering, 53. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104573>, luettu 8.5.2025.
22. Ronchi, E., Smedberg, E., Slaug, B., Carlsson, G., Gefenaitte, G., & Schmidt, S. M. (2022). "Evacuation of People with Functional Limitations: Research Knowledge, Gaps and Modelling Implications." PROCEEDINGS, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference.
23. van Solm, A. (2016). Application of interRAI Assessments in Disaster Management: Identifying Vulnerable Persons in the Community. Väitöskirja, University of Waterloo, Public Health and Health Systems. <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/2d536e41-9a88-4538-a973-fe3a157e7b52/content>, luettu 13.5.2025.
24. Kuligowski, E., Peacock, R., Wiess, E., & Hoskins, B. (2013).

- “Stair evacuation of older adults and people with mobility impairments.” Fire Safety Journal, 62. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.027>, luettu 13.5.2025.
25. Smedberg, E., Slaug, B., Carlsson, G., Gefenait, G., Schmidt, S. M., & Ronchi, E. (2023). “The Egress Enabler: Development and psychometric evaluation of an instrument to measure egressibility.” Disability and Health Journal, 16(1), 101396. <https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2022.101396>, luettu 13.5.2025.
 26. van Solm, A. (2016). Application of interRAI Assessments in Disaster Management: Identifying Vulnerable Persons in the Community. Väitöskirja, University of Waterloo, Public Health and Health Systems. <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/2d536e41-9a88-4538-a973-fe3a157e7b52/content>, luettu 13.5.2025.
 27. van Solm, A. (2016). Application of interRAI Assessments in Disaster Management: Identifying Vulnerable Persons in the Community. Väitöskirja, University of Waterloo, Public Health and Health Systems. <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/2d536e41-9a88-4538-a973-fe3a157e7b52/content>, luettu 13.5.2025.
 28. Björkgren, M., Borg, F., Kokki, E., Mäkinen, L., Männikkö, S., Oksanen, T., & Suoja, J. (2017). ”PaloRAI ja EVAC-mittari: RAI-järjestelmän hyödyntäminen kotihoidon asiakkaiden palo- ja poistumisturvallisuuden arvioinnissa.” Pelastusopiston Julkaisu B-Sarja: Tutkimusraportit 3/2017. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_B/B3_2017.pdf, luettu 13.5.2025.
 29. Rantakokko, M., Törmäkangas, T., Rantanen, T., Haak, M., & Iwarsson, S. (2013). ”Environmental barriers, person-environment fit and mortality among community-dwelling very old people.” BMC Public Health, 13(1), 783. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-783>, luettu 13.5.2025.
 30. THL. (2023). Mitä on toimintakyky? <https://thl.fi/aiheet/toimintakyky/mita-toimintakyky-on>, luettu 26.5.2025.
 31. Suomen virallinen tilasto (SVT): Elinolotilasto. (2022). ISSN=2669-8854. Helsinki: Tilastokeskus. <https://stat.fi/julkaisu/cl8lp2xd4rh530cw1789afim9>, luettu 23.5.2025.
 32. Enroth, L. & Pulkki, J. (2021). Aistivaikeudet, arki ja toimintakyky 90 vuotta täyttäneillä. Gerontologia 35(2), 2021. <https://doi.org/10.23989/gerontologia.96102>, luettu 23.5.2025.
 33. THL. (2024). Tietoa RAI-järjestelmästä. <https://thl.fi/aiheet/ikaantymisen/palvelutarpeiden-arviointi-rai-jarjestelmalla/tietoa-rai-jarjestelmasta>, luettu 26.5.2025.
 34. Edgren, J., Häsä, J., Asikainen, J., Aaltonen, M. (2024). Iäkkäiden palvelunsaajien toimintakyky ja palvelutarpeet – RAI-vertailutiedot 2023 Iäkkään väestön palvelutarpeet vaihtelevat alueittain – yhteisöllinen asuminen on uusi tulokas palvelutarjonnassa. Tilastoraportti 54/2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2024111995175>, luettu 26.5.2025.
 35. Koskinen, S. (2025). THL. Toimintakykyä kaikille! -seminaari. Seminaari esitys: Mitä toimintakyky on? Helsinki. 19.5.2025.

Suomen suurin koko perheen turvallisuusaiheinen tapahtuma

PÄIVÄ PALOASEMALLA® EN DAG PÅ BRANDSTATIONEN

22.11.2025



 Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö **SPEK**

Helppo tapa toteuttaa turvallisuusviestinnälliset tavoitteet:
tapahtumajärjestäjä saa valmiin materiaalipaketin
sekä SPEKin tuen tapahtuman toteuttamiseen.

PSR
PALOSUOJELURAHASTO

Ilmoita paloasemanne mukaan viimeistään 21.9.2025 osoitteessa paivapaloasemalla.fi

Komposiitti- ja nanomateriaalit operatiivisessa toiminnassa, altistuminen ja sen vähentäminen (COMPO-hanke)

Tiivistelmä

Hankkeen tarkoituksena on parantaa pelastajien työturvallisuutta onnettomuustilanteissa, joissa esiintyy komposiitteja. Hanke koostuu neljästä työpaketista. Työpaketissa yksi mitattiin komposiitista vapautuvia päästöjä työstettäessä erilaisia komposiittimateriaaleja. Lisäksi tässä työpaketissa tullaan mittaamaan komposiittimateriaalien epäpuhtauksia niiden palaessa. Työpaketissa kaksi testattiin ja arvioitiin nykyisten pelastustilanteessa käytettävien suojavausteiden suojaustasoa komposiittipölyä vastaan. Työpaketissa kolme testataan ja arvioidaan suojavaatteiden puhdistumista lujitekuiduista perinteisellä vesipesulla. Työpaketissa neljä tuleamme tuottamaan saamiemme tulosten perusteella koulutuspaketin pelastuslaitoksille komposiittien pelastustilanteessa huomioitavista erityispiirteistä. Alustavat tulokset osoittivat, että työstön aikana hengittyvän pölyn kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnetut pitoisuudet hiilikuiduille ja lasikuidulle (5 mg/m^3) ylittyivät koehenkilön hengitysvyöhykkeellä. Suurimmat keskimääräiset pitoisuudet mitattiin yksikerroshiilikuidun sahauksen aikana, olleen 28-kertaisia sen HTP_{8h}-arvoon verrattuna. Lasikuidun vastaavat pitoisuudet olivat 10-kertaisia. Myös suurimmat mitatut hiilikuitupitoisuudet saavuttivat Belgiassa annetun raja-arvon 2 kuitua/cm³. Sen sijaan lasikuidun sahauksessa kuitupitoisuudet jäivät pieniksi verrattuna sen kahdeksan tunnin raja-arvoon 1 kuitu kuutiosenttimetrissä. Tulokset osoittivat myös, että puhallinavusteinen hengityksen-suojain ei välttämättä riitä, vaan suodattimen tukkeutumisriski on olemassa pitkään kestävässä pelastustilanteessa. Lisäksi oli nähtävissä, että kuituja löytyi runsaasti palopuvun pinnasta sahauksen jälkeen, jonka vuoksi varusteiden vaihtaminen pelastustilanteen jälkeen on välttämätöntä. Runsaista pöly- ja kuitumääristä huolimatta palopuvun suojaustehokkuus hiilikuituja vastaan osoittautui hyväksi, olleen asemapalveluspuvun kanssa keskimäärin 99,9 %.

Johdanto

Komposiitit ovat yhdistelmäateriaaleja, jotka koostuvat kahdes-

ta tai useammasta eri aineesta, jotka yhdessä tarjoavat parempia ominaisuuksia kuin yksittäiset materiaalit erikseen. Komposiitit rakentuvat matriisista ja lujitteista sekä pinnoitus ja erilaisista täyteaineista. Matriisi on liima, joka sitoo lujitteet yhteen sekä suojaa niitä ympäristön vaikutukselta. Lujitteet ovat yleisnimi matriisiin sisällä oleville kuiduille, partikkeleille tai hiutaleille. Tyypillisiä matriiseja ovat erilaiset muovit, jolloin puhutaan muovi- tai polymeerikomposiiteista tai lujitemuoveista. Muovimatriisit jaetaan kesto- (polypropeeni) ja kertamuoveihin (polyesterit, vinyylies-terit ja epoksit). Tyypillisiä lujitteita puolestaan ovat lasi-, hiili- ja aramidikuidut sekä hiilinanokuidut ja -putket [1, 2]. Lasikuitua käytetään erityisesti polyesterin kanssa veneiden valmistuksessa ja hiilikuitua puolestaan sähköautoissa sekä hiili- ja aramidikuitujen yhdistelmää ilmailuteollisuudessa.

Komposiitit ovat lujia ja kevyitä, jonka vuoksi niillä on korvattu esimerkiksi terästä, alumiinia ja puuta. Komposiitteja käytetään esimerkiksi lentokoneissa, autoissa, tuulivoimaloissa ja veneissä [2, 3]. Muotoiltavuutensa, korroosion kestävänsä ja keveytensä ansiosta komposiitit ovat ihanteellisia materiaaleja auto- ja lentokoneteollisuudessa. Liikennevälineissä komposiitteja on käytetty kymmeniä vuosia. Ensimmäiset kaupalliset komposiittiveneet esiteltiin jo vuonna 1946 ja ensimmäiset komposiitit tulivat autoihin 70-luvulla. 70-luvulla keksittiin myös Kevlar-kuitu sekä hiilikuitukomposiitti [4]. Hiilikuitukomposiitit eivät ole pelkästään superautojen erikoismateriaaleja. On arveltu, että nykyään komposiitteja löytyy jossain muodossa 5000 superautosta, 5 miljoonasta luksusautosta ja jopa 100 miljoonasta sarjavalmisteisesta autosta [5]. Sotilasilmailussa komposiitteja, erityisesti hiilikuitua ja nanomateriaaleja käytetään keveyden ohella myös lisäämään koneiden häiveominaisuuksia [6, 7]. Suomen ilmavoimien uusissa tulevis- sa F-35 häivehävittäjissä komposiittimateriaaleja on merkittävästi enemmän kuin nykyisissä F-18 hävittäjissä [8, 9]. F-35 häivehävittäjissä ominaisuudet on saatu komposiittien monikerroksisella materiaalilla, johon on infusoitu hiilinanoputkia ja jota kutsutaan

"kuitumatoksi" [10]. Hiilinanokuitujen ja -putkien läsnäolo tuo omat haasteensa työterveydellisestä näkökulmasta, koska ne ovat halkaisijaltaan selvästi pienempiä normaaliin hiilikuituun verrattuna [11]. Auto- ja lentokoneteollisuudessa komposiittien käyttö tulee edelleen kasvamaan kovempien energiatehokkuusvaatimusten myötä. Kuljetusvälineiden keveneminen komposiittien avulla pienentää niiden energiankulutusta ja vähentää niiden hiilijalanjälkeä. On myös nähtävissä, että veneteollisuudessa komposiittien käyttö tulee edelleen lisääntymään [2]. Näin ollen pelastustoimi joutuu tekemisiin komposiittien kanssa yhä useammin kuljetusvälineiden pelastusoperaatioissa ja myös niitä valmistavien tehtaiden tulipaloissa.

Komposiiteilla ja erityisesti hiilikuidulla on erityisiä ominaisuuksia pelastustoimen ja työterveyden näkökulmasta. Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että komposiitit ovat syttyviä materiaaleja, ja syttyminen voi tapahtua jopa neljässä sekunnissa kartiokalorimetrimissä [12]. Komposiittien rikkoutuessa ilmaan vapautuu pölyn mukana myös lujitekuituja. Komposiittien palassa syntyy pienempiä hiukkasia kuin niitä työstettäessä. Vastavasti työstettäessä niitä leikaten pölypitoisuudet olivat korkeampia kuin poratessa [13]. Raportoidut terveysvaikutukset vaihtelevat ihon ja silmien ärsytyksestä vakaviin hengitysvaikeuksiin. Eläinkokeet ovat antaneet viitteitä, että hiilinanoputkien -ja kuitujen hengittäminen voi aiheuttaa haittoja, kuten tulehdusta ja keuhkokudoksen muutoksia. Niiden fysikaaliskemialliset ominaisuudet, biologinen käyttäytyminen ja pysyvyys kehossa muistuttavat asbestikuituja. Lisäksi moniseinäisten hiilinanoputkien on arveltu olevan yhteydessä lisääntyneeseen riskiin sairastua sydän- ja verisuonisairauksiin [11, 14–18]. Esimerkiksi lentokoneen ulkoisten rakenteellisten osien rikkoutuminen tai niiden syttyminen pala-

maan tuottaa vaaralliset olosuhteet palo-, pelastushenkilöstölle ja tutkinta- ja etsintäryhmille. Tämän vuoksi kyseisten toimijoiden on varustauduttava pahimman odotusarvon mukaisiin olosuhteisiin välttyäkseen henkilökohtaiselta altistumiselta [13]. Nyt tämä ongelma on myös tieliikenteessä tapahtuvissa onnettomuuksissa komposiittien yleistessä erityisesti sähkö- ja urheiluautoissa.

Hankkeen tarkoituksena on parantaa pelastajien työturvallisuuksia. Hankkeessa selvitetään ilma-alusten ja autojen yleisten komposiittien työstämisessä ja palamisessa vapautuvia epäpuhtauksia ja niiden päästöjä. Hankkeessa arvioidaan altistusten aiheuttamaa riskiä pelastajalle pelastustilannesimulaatioissa sekä nykyisten suojavarusteiden kykyä suojata pelastajia komposiittikuidulta. Lisäksi hankkeessa tarkastellaan likaantuneiden suojavarusteiden peseytymistä kuiduista vesipesussa. Tulosten myötä annetaan ohjeistusta pelastustoimintaan komposiittialtistumisen vähentämiseksi ja sen huomioonottamiseksi pelastustilanteessa.

Aineisto ja menetelmät

Esitestit komposiiteille

Esitestit komposiittimateriaaleille tehtiin Pelastusopiston harjoitusalueella. Testien tarkoituksena oli optimoida mittausaika ja käytettävät mittausmenetelmät lasi-, hiili- ja aramidikuitujen sekä hengittävän pölyn mittaamista varten. Testejä varten rakennettiin tutkimuskammio, jonne tuotettiin vakioidut olosuhteet ja säädettiin viisinkertainen ilmanvaihto (kuva 1). Työstettävä lasikuitu oli peräisin mopoauton ovesta (Chatenet) ja hunajakennokomposiitti helikopterista (NH-90) (kuva 2.)



Kuva 1: Tutkimuskammio sekä kuitukeräimet.



Kuva 2: Lasikuituinen mopoauto sekä hunajakennokomposiittilevy.

► Komposiitteja työstettiin puukkosahalla (Milwaukee M18 FUEL FSZ-502X, USA), jossa oli rescue-tarkoituksiin valittu terä. Työstäjällä oli suojaruusteina rakennuspaloihin suunniteltu sammutusasu (Viking Model 8066088J, Norja), pitkähihainen asemapalveluspuku ja tekninen aluskerrasto (Craft, Ruotsi), joka mallinsi työstäjän ihoa. Lisäksi hänellä oli puhallinvasteinen hengityksen-suojain varustettuna yhdistelmäsuodattimella (ABE2K2-P3) lasikuitua työstettäessä. Hiilikuitua työstettäessä käytettiin paineil-mahengityslaitetta. Kuitunäytteet kerättiin asbestikeräimillä kalvosuodattimille, jotka olivat valmistettu polykarbonaatista. Näytteenottoa testattiin kolmella eri mittausajalla (10, 20 ja 30 minuuttia) optimaalisen työstö- ja mittausajan varmistamiseksi varsinaisia testejä varten. Keräimet asennettiin työstäjän hengitysvyöhykkeen korkeudelle, työstökammion kattoon ja niihin kerättiin ilmaa 2,5 litraa minuutissa näytteenottopumpuilla (Gilian GilAir Plus, Sensidyne, USA). Esitestit tehtiin open-face-tekniikalla, jossa keräimien pää oli kokonaan avoimena näytteenoton ajan.

Kuitunäytteiden lisäksi otimme kammioista hengittyvän pölyn näytteitä työstäjän hengitysvyöhykkeeltä IOM-keräimellä (SKC, USA) 25 mm selluloosaesteriasetaatti kalvosuodattimelle. Lisäksi otimme myös kokonaispölynäytteitä aerosolikeräimellä 37 mm selluloosaesteriasetaatti kalvosuodattimelle. Suoraanosoittavalla mittarilla (Haz-Dust 7204, SKC, USA) seurattiin työstäjän hengitysvyöhykkeeltä hengittyvän pölypitoisuuden vaihtelua (kuva 3). Laite mahdollisti kerätyn pölypitoisuuden korjauksen gravimetrisesti, laitteeseen sisäänrakennetun IOM-keräimen avulla.

Hiukkaspitoisuuksia mitattiin esitestien mukaisesti työstäjän hengitysvyöhykkeeltä kiinnitetyillä IOM-keräimellä sekä 37 mm keräimellä sekä suoraan osoittavassa mittarilla (Haz-Dust, SKC, USA) (kuva 3.).

Suojavarusteiden komposiittikuidut

Työstökokeiden aikana tutkimme myös suojaruusteiden suojaustasoa. Koehenkilö puki teknisen alusasun asemapalveluspuvun alle, kuten esikokeissakin. Teknisellä alusasulla mallinnettiin ihon pintaa. Päällimmäiseksi koehenkilö puki sammutusasun (Viking Model 8066088J, Viking). Vaatteisiin päätyntä kuitupitoisuutta arvioitiin imuroimalla sekä sammutusasut (5 kpl) että tekniset alusasut (5 kpl) teholtaan 1380 W olevalla H-pölyluokan märkä-kuivaimurilla (Kärcher NT 30/1 Tact Te H (Kärcher, Saksa). Imurissa käytettiin haitallisten aineiden imurointiin tarkoitettua NT 30/1 turvapölypussia (Kärcher, Saksa), jonka suodatustehokkuus on 99,995 %. Näytteet kerättiin imuroimalla vaatteita järjestelmällisesti 7 minuutin ajan 90 mm kalvosuodattimille Nukleopore (Whatman, Iso-Britannia), jonka huokoskoko oli 0,4 µm. Pohjasuodattimena käytettiin 90 mm mikroselluloosasuodatinta (Millipore Corporation, USA), jonka huokoskoko oli 0,8 µm. Imurointinopeus suodattimelle oli optimoitu 50 litraksi minuutissa, jonka suodattimet pystyivät sietämään särkymättä. Kuitujen pitoisuuden määrittämisessä käytettiin samoin kriteerejä kuten ilmanäytteissäkin. Sammutusasujen ja välisasujen pinta-alat mitattiin ja tulokset ilmoitettiin yksikössä kuitujen lukumäärä imuroitavaa neliösenttimetriä kohden (kpl/cm²).



Kuva 3: IOM- ja 37 mm -keräimet sekä suoraanosoittava hiukkasmittari työstäjän päällä.

Varsinaiset testit

Varsinaiset työstökokeet tehtiin Pelastusopiston harjoitusalueella. Testitilanteissa komposiittimateriaaleja työstettiin esitestien mukaisesti ja sen lisäksi komposiitteja leikattiin akkukäyttöisillä leikkureilla (Holmatron Cutter GCU 5050 EVO 3, Hollanti). Materiaalien työstöajaksi valikoitui 10 minuuttia esitestien perusteella.

Materiaaleina oli lasikuitukomposiitti, joka oli peräisin mopautosta (Chatenet, Ranska) sekä hiilikuitukomposiitit. Hiilikuitukomposiitteja oli kolmea erilaista; yksinkertainen hiilikuitukomposiitti (NHIndustries NH90 -taktinen kuljetushelikopteri, Eurooppa), hunajakennorakenteinen hiilikuitu-aramidikuitukomposiitti (NHIndustries NH90 -taktinen kuljetushelikopteri, Eurooppa) sekä yksikerroshiilikuitu (BMW iX, Saksa).

Näytteet ja niiden analysointi

Ilman ja suojaruusteiden kuitujen pitoisuus määritettiin kalvosuodattimelle kerätystä ilmanäytteestä elektronimikroskoopilla ja siihen liitettyllä energiadiispersiivisellä spektrometrillä (EDS) soveltaen standardia SFS 3868. Standardin mukaan kuitujen lukumäärään laskettiin kuidut, joiden pituus oli vähintään 5 µm, läpimitta korkeintaan 3 µm ja pituuden suhde läpimittaan vähintään 3:1. Tulokset ilmoitettiin yksikössä kuitujen lukumäärä kuutio-senttimetriä kohden (kpl/cm³), ja laskutoimituksissa käytettiin laboratoriolle ilmoitettuja ilmamääriä. Hiilikuitujen pitoisuudelle ei Suomessa ole haitalliseksi tunnettua pitoisuutta, mutta Belgiassa sovelletaan raja-arvoa 2 kuitua kuutiosenttimetrissä. Aramidikuiduille on annettu kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnettu

pitoisuus (HTP_{sh} -arvo) 1 kuitua kuutiosenttimetrissä ilmaa (kuitua/ cm^3).

Palopukujen ja alusasujen näytteet määriteltiin halkaisijaltaan 90 mm polykarbonaattisuodattimelle imuroiduista näytteistä. Näyteastia huuhdeltiin isopropanolilla ja tislattulla vedellä kuitujen analysoimiseksi. Huuhdeltu näyte suodatettiin polykarbonaattisuodattimelle. Suodattimelta laskettiin vähintään 5 μm pitkien kuitujen lukumäärä elektronimikroskoopin avulla. Kuidut tunnistettiin EDS-analysaattorilla. Tulokset on ilmoitettu yksikössä kuitujen lukumäärä imuroitua vaatekankaan pinta-alaa kohden (kpl/cm^2).

Hengittyvän pölyn ja kokonaispölyn näytteet analysoitiin gravimetrisesti. Hengittyvän pölyn ja kokonaispölyn pitoisuuden mittaamisessa sovelletaan standardeja EN 481:1993 ja ISO 7708:1995. Tulokset on ilmoitettu yksikössä milligrammaa kuutiometriä kohden (mg/m^3) ja laskutoimituksissa on käytetty laboratoriolle ilmoitettuja ilmamääriä

Kaikki näytteet analysoitiin Työterveyslaitoksen akkreditoidussa työympäristölaboratoriossa Helsingissä. Mitatuista epäpuhtauksista hengittyvän pölyn analyysi on akkreditoitu.

Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet

Lasikuitupölylle sovellettiin jatkuville lasikuiduille annettua suomalaista hengittyvän pölyn kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnettua pitoisuutta (HTP_{sh}) 5 mg/m^3 . Vastaavasti lasikuitupitoisuuksille sovellettiin jatkuville lasikuiduille annettua haitalliseksi tunnettua kuitupitoisuutta 1 kuitua kuutiosenttimetrissä [19].

Hiilikuitupölylle sovellettiin suomalaista orgaanisen pölyn HTP_{sh} -arvoa 5 mg/m^3 . Vastaavasti hiilikuitupitoisuuksille ei ole Suomessa annettu haitalliseksi tunnettua [19]. Sen sijaan Belgiassa on hiilikuiduille annettu raja-arvo 2 kuitua kuutiosenttimetrissä [20].

Aramidikuiduille sovellettiin suomalaista p-aramidikuidun kahdeksan tunnin haitalliseksi tunnettua pitoisuutta 1 kuitu kuutiosenttimetrissä [19].

Tulokset

Esitestien tulokset

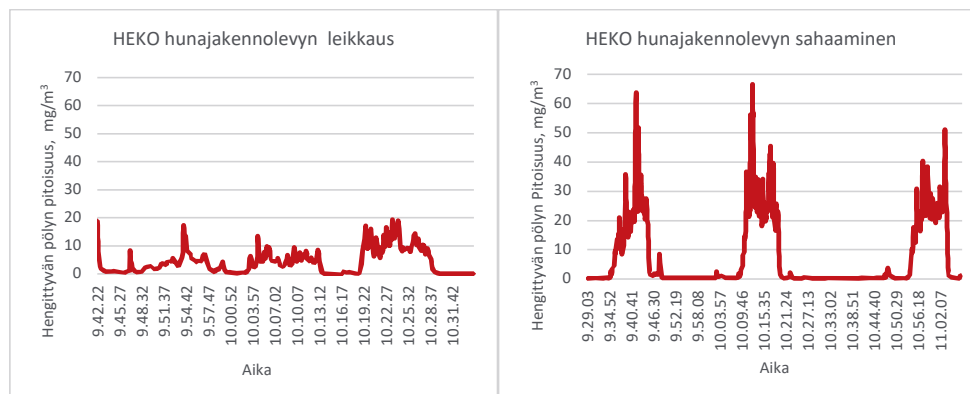
Esitestien tuloksien perusteella optimaaliseksi näytteenottoajaksi tuli 10 minuuttia. Esitesteissä lasikuituhiukkasia ei löytynyt keräimiltä sen sijaan hiilikuituja löytyi merkittäviä määriä. Lasikuidut ovat painavia ja ne vaativat keräytyäkseen suuremman nopeuden keräimen otsapinnalla. Tämän vuoksi varsinaiset testit mitattiin closed-face-tekniikalla, jossa asbestikeräimen etulevystä, otetaan koko levyn sijaan vain tulppa pois, jolloin lasikuitujen keräytymistä voidaan tehostaa. Tähän samaan päädyttiin myös hiilikuitujen näytteenotossa.

Ilman hengittyvän pölyn ja kuitujen pitoisuudet

Suoraan osoittavan mittarin tuloksista oli nähtävissä, että hunajakennorakenteisen hiilikuitulevyn sahaaminen puukkosahalla aiheutti ilmaan suuremmat hengittyvän pölyn pitoisuudet kuin leikkaaminen hydraulisilla leikkureilla. Sahaamalla pölypitoisuudet olivat korkeimmillaan noin 67 mg/m^3 kun taas leikkaamalla pitoisuudet nousivat korkeimmillaan noin 20 mg/m^3 (Kuva 4). Hiilikuidun HTP_{sh} -arvona sovellettiin orgaanisen pölyn haitalliseksi tunnettua pitoisuutta 5 mg/m^3 . Pitoisuudet ylittyivät työstön aikana molemmilla työmenetelmillä ollen hydraulisen leikkaamisen aikana suurimmillaan 4-kertainen ja sahaamisen aikana 13-kertainen HTP_{sh} -arvoon verrattuna (kuva 4).

Lasikuidun sahaaminen puukkosahalla aiheutti hiilikuidun lailla työstön aikana suuret hengittyvän pölyn pitoisuudet. Vaikka mopoauton runkoa leikattiin ulkoilmassa, työstäjän hengitysvyöhykkeeltä oli mitattavissa jopa 330 mg/m^3 pitoisuuksia (kuva 5). Hengittyvän pölyn HTP_{sh} -arvo arvo 5 mg/m^3 ylittyi hetimitään 66-kertaisesti.

Oluemman ja kovempirakenteisen yksikerroslevyn sahauksesta mitatut keskimääräiset hengittyvän pölyn pitoisuudet olivat mitatuista komposiittimateriaaleista korkeimmat, nousten työstön aikana keskimäärin jopa 140 mg/m^3 , osoittaen 28-kertaista pitoi-



Kuva 4: Hengittyvän pölyn pitoisuusvaihtelu työstäjän hengitysvyöhykkeellä monikerroshiilikuitulevyn leikkauksessa hydraulisella leikkurilla ja sahattaessa puukkosahalla.



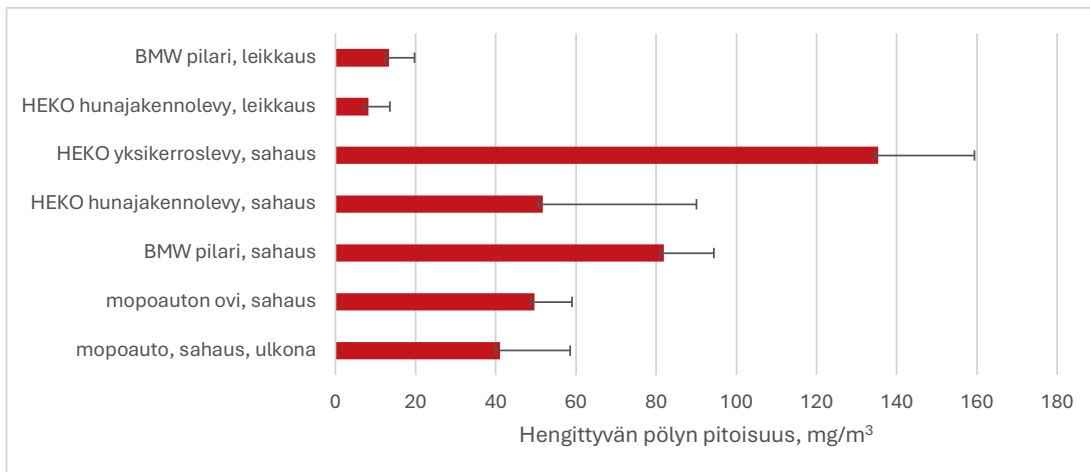
Kuva 5: Hengittyvän pölyn pitoisuusvaihtelu työstäjän hengitysvyöhykkeellä sahattaessa lasikuituista mopoautoa ulkona.

suutta orgaanisen pölyn HTP_{8h} -arvoon verrattuna (kuva 6). Toiseksi korkeimmat päästöt mitattiin BMW iX:n hiilikuitupilarin laminaattikomposiitin leikkauksessa, jossa hengittyvän pölyn pitoisuudet olivat keskimäärin 82 mg/m^3 , osoittaen 16-kertaista pitoisuutta orgaanisen pölyn HTP_{8h} -arvoon verrattuna (kuva 6). Kolmanneksi korkeimmat pitoisuudet mitattiin hunajakennolevyn sahauskassa, jossa keskimääräiset hengittyvän pölyn pitoisuudet olivat 10-kertaisia orgaanisen pölyn HTP_{8h} -arvoon verrattuna. Lasikuidun leikkauksesta mitatut keskimääräiset pitoisuudet olivat samaa luokkaa hunajakennolevyn pitoisuuksiin nähden, ollen noin 10-kertaisia lasikuidun hengittyvän pölyn raja-arvoon verrattuna.

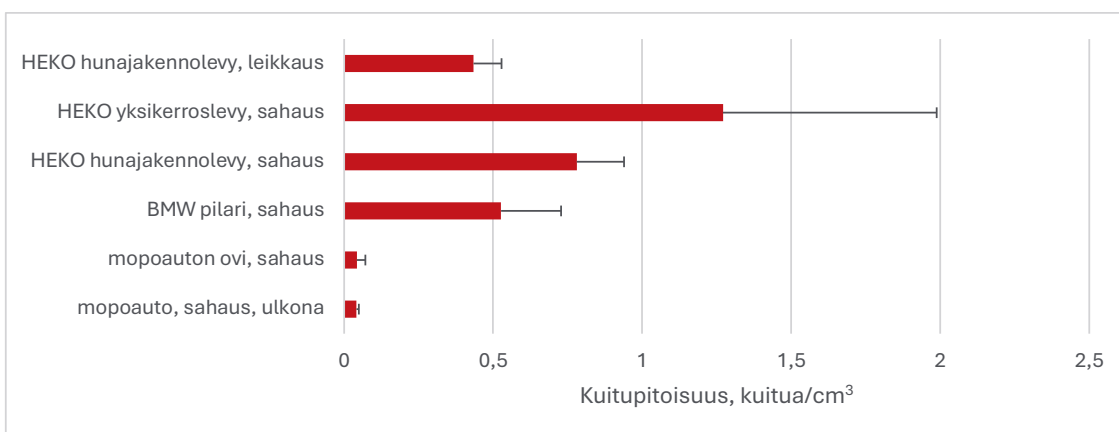
rimmat lasikuitupitoisuudet sahauskassa olivat 4,2 % sen HTP_{8h} -arvosta. Leikattaessa hunajakennolevyä hydraulikkaleikkureilla pitoisuudet olivat 55 % sahaamisen aikana mitatuista keskimääräisistä kuitupitoisuuksista.

Palopukujen ja alusasujen kuitumäärät ja palopukujen suojaustaso

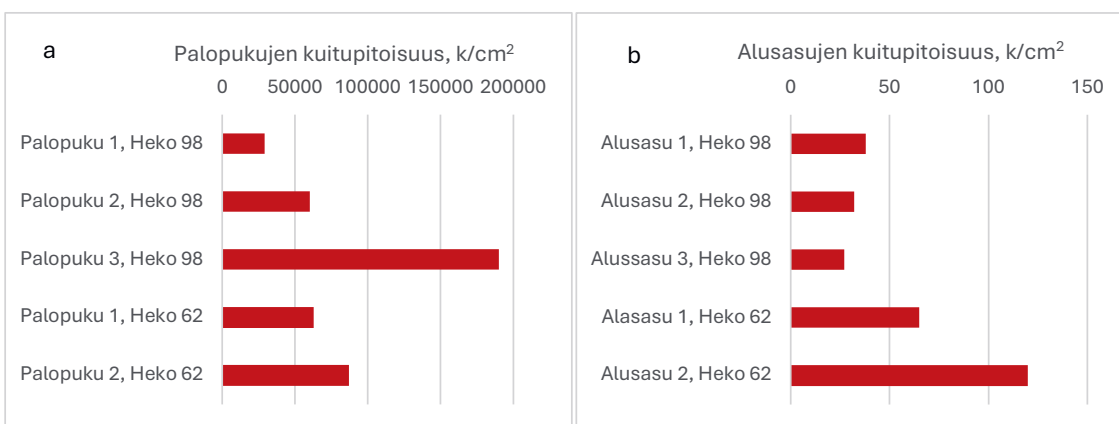
Palopukujen ja alusasujen pinnasta imuroiduista näytteistä määritettiin kuitumäärät hiilikuitukomposiittien sahauskassa, sekä tuloksista laskettiin palopuvun ja asemapalveluspuvun tuottama suojaustehokkuus. Palopuvuista kuituja löytyi keskimäärin



Kuva 6: Keskimääräiset hengittyvän pölyn pitoisuudet leikkauksen ja sahauskassa eri materiaaleilla työstäjän hengitysvyöhykkeellä.



Kuva 7: Keskimääräiset kuitupitoisuudet eri komposiiteilla ja työstömenetelmällä työstäjän hengitysvyöhykkeellä.



Kuva 8 a ja b: Kuitupitoisuudet palopukujen ja alusasujen pinnalla.

Yksikerroslevyn sahaaminen aiheutti suurimmat kuitupitoisuudet työstäjän hengitysvyöhykkeelle. Suurimmat mitatut pitoisuudet saavuttivat Belgiassa annetun raja-arvon 2 kuitua kuutiosenttimetrissä [20] (kuva 7). Lasikuidulle on Suomessa annettu haitalliseksi tunnettu pitoisuus 1 kuitua kuutiosenttimetrissä [19]. Suu-

rimmat lasikuitupitoisuudet sahauskassa olivat 4,2 % sen HTP_{8h} -arvosta. Leikattaessa hunajakennolevyä hydraulikkaleikkureilla pitoisuudet olivat 55 % sahaamisen aikana mitatuista keskimääräisistä kuitupitoisuuksista.

Mitattujen kuitumäärien perusteella palopuvuille laskettiin suojaustehokkuus. Palopuvun ja asemapalveluspuvun yhteiseksi suojaustehokkuudeksi saatiin keskimäärin 99.9 %.

Pohdinta

Komposiittien työstämisessä muodostuu hengitysvyöhykkeelle runsaasti pölyä ja kuituja. Altistumisen arvioinnissa on huomiotava, että perinteiset lasi- ja hiilikuidut ovat pituudeltaan ja halkaisijalta suuria. Tämän vuoksi altistumisen arviointi on tehtävä työstäjän hengitysvyöhykkeeltä, jotta altistumista kuidoille ei aliarvioitaisi [21]. Myös mittausmenetelmän täytyy olla sovelias kuitujen keräämiseen. Myös komposiitin työstöväline vaikuttaa muodostuvan pölyn pitoisuuksiin [13]. Sekä suoraan osoittavan mittarin että IOM-keräimien tulokset osoittivat, että sahaaminen aiheuttaa leikkaamista suuremmat pölypitoisuudet. Hiilikuitukomposiitin sahaaminen tuotti keskimäärin 89 mg/m³ hengittävän pölyn pitoisuuden. Amerikkalaisessa tutkimuksessa oli saatu vastaavia tuloksia, keskimäärin 73 mg/m³ [22].

Kuitupitoisuuksien mittauksissa oli nähtävissä, että yksikerros-hiilikuitulevyn sahaaminen vapautti suuremmat kuitupitoisuudet. Hiilikuidut ovat halkaisijaltaan 7–10 mikrometrin mittaisia, jonka vuoksi niitä ei ole pidetty sisään hengittyvinä [23]. Tätä on kuitenkin kyseenalaistettu, ja tutkimuksissa on saatu viitteitä kuitujen hajoamisesta pienemmiksi hengittyviksi partikkeleiksi työstön aikana [24].

Lasikuitu on vieläkin pidempää ja raskaampaa kuin hiilikuitu, jonka vuoksi ne sisään hengittyvät huonommin kuin hiilikuitu [25]. Tämän vuoksi mitatut lasikuitupitoisuudet olivat sahauksen aikana suurimmillaan vain 4,2 % sen 8 tunnin haitalliseksi tunnetusta pitoisuudesta. Mitatut kuitupitoisuudet olivat kuitenkin vastaavia sekä työstettäessä kokonaista lasikuituista mopautoa ulkona että mopon lasikuituovea testikammion sisällä. Tämä osoitti sen, että testitilanne testikammiossa on varsin hyvin verrattavissa autenttiseen työstötilanteeseen. Suurimmat hiilikuitupitoisuudet mitattiin yksikerroskomposiittilevyn sahauksen aikana saavuttaen belgialaisen raja-arvon, 2 kuitua/cm³.

Palopuvuista löytyvät kuitupitoisuudet olivat hyvin suuria, mutta vastaavasti ihoa mallintaneen alusasun pinnalta kuituja löytyi kohtuullisen pieniä määriä, joka kertoo palopukujen ja asemapalveluspuvun yhteisestä hyvästä suojaustasosta. Asemapalvelusasun kuitumääriä ei mitattu. Mahdollisissa seuraavissa mittauksissa olisi hyvä selvittää, kuinka paljon kuituja päätyy asemapalvelusasun pintaan.

Testihenkilö käytti hiilikuituja työstäessään paineilmahengityslaitetta ja lasikuitua työstäessään puhallinavusteista hengityksen-suojainta varustettuna yhdistelmäsuodattimella. Kuitenkin työstötilanteessa oli havaittavissa, että pidempi kestoisessa sahaustilanteessa puhallinavusteinen hengityksensuojain voi mennä tukkoon runsaan kuitu- ja pölymäärän takia. Hengityksensuojaimen käyttö silmät suojaavalla maskilla tai kypärällä on kuitenkin ehdottoman välttämätöntä, ja paineilmalaitteiden käyttö suositeltavaa.

Yhdysvaltojen ilmavoimat (USAF) suosittelee suojaamaan kädet nahkaisilla palokäsineillä, kun onnettomuuspaikalla on komposiittia. Myös aluskäsineiden käyttö on suositeltavaa [26]. Työstökokeiden aikana oli havaittavissa, että komposiitit aiheuttivat pistelyä käsiin, mikäli käytössä oli pelkät kevyet työhansikkaat. Havaintojen perusteella nahkaisten käsineiden käyttö on siis erittäin perusteltua.

Kiitokset

Esitämme lämpimät kiitokset Palosuojelurahastolle hankkeen rahoituksesta. Kiitokset menevät myös hankekumppanillemme Etelä-Savon pelastuslaitokselle sekä yhteistyökumppaneillemme Utin jääkäriyrykmentin tukipataljoonan turvallisuusosastolle, Patrialle, Suomen Ilmavoimille ja Kuusakoski Oy:lle. Tutkijat kiittävät

myös hankkeen seurantarhymää hankkeen aktiivisesta ohjauksesta ja arvokkaista kommentista sekä Pelastusopiston henkilökuntaa, erityisesti varustehuoltoa, merkittävästä avusta hankkeen eri vaiheissa. Erityiskiitokset suunnittelija Pekka Toivaselle ammatillisesta poltto- ja työstökokeiden käytännön toteutuksesta sekä opettaja Vesa Olkkoselle avustavista tehtävistä.

Lähteet

1. Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2007). Komposiittirakenteet. [www-dokumentti](http://www-dokumentti.fi). Sisällysluettelo - Komposiittirakenteet (lujitemuovi.fi). 14.6.2021.
2. Vuorinen, J., Mustakangas, M., Annala, M. (2016) Komposiitit loputtomasti mahdollisuuksia. Tampereen tekninen yliopisto, Patria ja Muoviteollisuus ry. <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/komposiitit/>
3. Hakkarainen, M. (2022). Komposiittimateriaalin haitat pelastustoimen tehtävillä. Poliisikorkeakoulun opinnäytetyö/AMK. 4/2022. <https://www.theseus.fi/handle/10024/747797>
4. Khan, F., Hossain, N., Mim, J.J., Rahman, S.M., Iqbal, Md.J., Billah, M., Chowdhury, M.A., 2024. Advances of composite materials in automobile applications – A review. Journal of Engineering Research S2307187724000440. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>
5. NitroPro Composites, 2025. Carbon Fiber Laminates vs Fiber Metal Laminate Composites. Blogi. <https://www.nitrocomposites.com/blog/carbon-fiber-laminates-vs-fiber-metal-laminate-composites> 2.4.2025.
6. Zhang, C., Wu, L., De Perrot, M., Zhao, X., 2021. Carbon Nanotubes: A Summary of Beneficial and Dangerous Aspects of an Increasingly Popular Group of Nanomaterials. Front. Oncol. 11, 693814. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.693814>
7. Silva, V.A., Folgueras, L.D.C., Cândido, G.M., Paula, A.L.D., Rezende, M.C., Costa, M.L., 2013. Nanostructured composites based on carbon nanotubes and epoxy resin for use as radar absorbing materials. Mat. Res. 16, 1299–1308. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000146>
8. Slayton, R., Spinardi, G., 2016. Radical innovation in scaling up: Boeing's Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions. Technovation 47, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2015.08.004>
9. Castanié, B. (2019) Composite structures in aeronautics: past, present and future. Proceedings of the Burapha University International Conference 2016, 28–29 July 2016, Bangsaen, Chonburi, Thailand. <https://hal.science/hal-02047980/document>
10. Hilton, S. (2023). Why the Best Jet Fighter in the World Uses Nanotechnology. Nanotechnology. Polymer nano centrum. <https://blog.polymernanocentrum.cz/the-best-jet-fighter-in-the-world-and-why-it-employs-nanotechnology/> 22.3.2025.
11. Robert, F. (1998) Service, Nanotubes: The Next Asbestos? Science 281,941-DOI:10.1126/science.281.5379.941.
12. Bello, D., Wardle, B., Yamamoto, N., Guzman de Villoria, R., Garcia, E., Hart, A., Ahn, K., Ellenbecker, M., Hallock, M. (2008) Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. J Nanopart Res (2009) 11:231–249. s11051-008-9499-420210920-4045-vjimt9-libre.pdf (d1wqtxts1xzl7.cloudfront.net).
13. Ramulu, M. & Kramlich, J. (2004). Machining of fiber reinforced composites: Review of environmental and health effects. [www-dokumentti](http://www-dokumentti.fi). https://www.researchgate.net/profile/M-Ramulu/publication/303155598_Machining

of fiber reinforced composites Review of environmental and health effects/links/57694a2508ae1a43d23a2f7a/Machining-of-fiber-reinforced-composites-Review-of-environmental-and-health-effects.pdf

14. Shvedova, A.A.; Kisin, E.R.; Mercer, R.; Murray, A.R.; Johnson, V.J.; Potapovich, A.I.; Tyurina, Y.Y.; Gorelik, O.; Arepalli, S.; Schwegler-Berry, D.; et al. (2005) Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *Am. J. Physiol. Lung Cell Mol. Physiol.* 2005, 289, L698–L708.
15. Takagi, A.; Hirose, A.; Nishimura, T.; Fukumori, N.; Ogata, A.; Ohashi, N.; Kitajima, S.; Kanno, J. (2008) Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *J. Toxicol. Sci.* 2008, 33, 105–116.
16. Legramante JM, Valentini F, Magrini A, Palleschi G, Sacco S, Iavicoli I, Pallante M, Moscone D, Galante A, Bergamaschi E, Bergamaschi A, Pietroiusti A. (2009) Cardiac autonomic regulation after lung exposure to carbon nanotubes. *Hum Exp Toxicol.* 2009 Jun;28(6-7):369–75. doi: 10.1177/0960327109105150. PMID: 19755448.
17. Gandhi, S., ja Lyon R.E. (1998). Federal Aviation Administration. Health hazards of combustion products from aircraft composite materials. [www-dokumentti. https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA355125.pdf](https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA355125.pdf)
18. Bergamaschi, E., Garzaro, G., Wilson Jones, G., Buglisi, M., Caniglia, M., Godono, A., Bosio, D., Fenoglio, I., & Guseva Canu, I. (2021). Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibres: More Than a Cobweb. *Nanomaterials*, 11(3), 745. <https://doi.org/10.3390/nano11030745>
19. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö. (2025) HTP-arvot 2025, Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- terveystieteiden ministeriön julkaisu 2025:4. Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/166151>
20. Zoltek Companies, Inc. (2020) https://zoltek.com/wp-content/uploads/CF-01_SDS_2020-09-02_ZOLTEK-CARBON-FIBER.pdf
21. Lovreglio P, Stufano A, Mele D, Acquafredda P, Vimercati L, Soleo L, De Palma G. (2020) Occupational exposure to carbon fibers impregnated with epoxy resins and evaluation of their respirability. *Inhalation toxicology* 2020, VOL. 32, NO. 2, 63–67.
22. Iyer, A. (2015) Characterization of Composite Dust generated during Milling of Uni-Directional and Random fiber composites. Thesis, Master of Science in Mechanical Engineering University of Washington 2015. file:///C:/Users/PE83041/Downloads/Iyer_washington_0250O_14586.pdf.
23. Kehren D, Simonow B, Bäger D, Dziurawitz N, Wenzlaff D, Thim C, Neuhoﬀ J, Meyer-Plath A, Plitzko S. (2019) Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 2185–2195, 2019.
24. Wang J, Schlagenhauf L, Setyan A. (2017). Transformation of the released asbestos, carbon fibers and carbon nanotubes from composite materials and the changes of their potential health impacts. *J.Nanobiotechnology.* 15(1):15.
25. Kroisová D, Dvůřáková S, Knap A, Knápek T. (2023) Destruction of Carbon and Glass Fibers during Chip Machining of Composite Systems. *Polymers* 2023, 15, 2888.
26. Olson, J. (1994) Mishap risk control for advanced aerospace/composite materials. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950016614/downloads/19950016614.pdf>



Palotutkimuksen päivillä esitellään viimeaikaisia saavutuksia kotimaisessa palotutkimuksessa. Palotutkimuksen päivät rahoittaa Palosuojelurahasto.

Thermochemical properties of five polymeric firestop materials

Abstract

In this work, the thermochemical properties of five polymeric firestop materials are studied. Thermogravimetric analysis was performed for the firestop samples in both inert and oxidizing atmospheres with three different heating rates. The decomposition temperatures and residual masses of the products were determined, and the results were compared with the thermochemical properties of polymers without fire-retardant treatment collected from the literature. The aim of this work is to study the chemical composition and behaviour of polymeric firestop materials, provide information about the features of the materials and to build a base for further studies.

Introduction

One elementary aspect of fire safety engineering is to prevent fire propagation and slow down its development. During construction this is achieved by using fire compartmentation and fire-resistant structures with the aim to stop the fire and smoke from spreading from the compartment of fire origin.¹ However, constructions are never completely closed as there are gaps at the interfaces between building elements and penetrations through the walls and floors, which are needed for functional building parts such as pipes and cables. Firestops are systems which are used to fill, insulate and protect the penetrations or gaps to ensure the compartment's ability to resist and contain the fire.

Firestops on the market can be based on both highly fire-resistant inorganic materials and organic materials. Choosing the right firestop materials and the form of the firestop system are essential when increasing fire safety. Understanding the principle, limitations and potential drawbacks of different firestop materials is a vital part of creating effective and safe fire compartmentation.

Materials

Five commercial polymer-based firestop products were chosen to be studied based on the prevalence of the product group and dis-

cussions with firestop manufacturers and suppliers. Acrylic- and silicone-based masses are commonly used firestop sealants which is why they were chosen. The insulating foam chosen for the study based on supplier suggestion was expandable polyurethane foam. Hybrid polymers have aroused interest in the field and modified silane-based hybrid mass was selected as the fourth product to be studied. In addition to different masses and foams, also solid materials are used in pre-manufactured module systems. EPDM rubber was chosen to represent this product group. All products are presented in Table 1.

Sampe name	Product group
FireStop1	Acrylic-based mass
FireStop2	Silicone-based mass
FireStop3	Two-component polyurethane foam
FireStop4	Modified silane, MS, -based mass
FireStop5	EPDM, rubber

Table 1: Studied firestop product groups.

Methods

The thermal analysis methods used were thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). In dynamic TGA, the sample is heated with a decided heating rate to wanted temperature and the mass loss of the sample is measured as a function of temperature or time. With DSC, it is possible to get information about the phase changes and reactions as DSC allows to study the energy needed or released during the heating.² The thermogravimetric properties of the firestop products were compared to the assumed base polymers' properties. The behaviour of non-fire-retardant treated acrylics, silicones, polyurethane foams, hybrid polymers and EPDM rubber was studied from literature³⁻¹³.

► All masses and the foam were hardened before the tests. This was done by dosing the masses and leaving them in fume hood in room temperature to cure or dry. EPDM rubber and hardened products were cut into suitable size particles. Sample masses for the products varied between 8–9 mg with FireStop3 being exception with sample masses of 4–5 mg as the low density and expandable nature of the product made it impossible to use bigger samples without risking the measuring equipment. Small enough samples are used to ensure the thermal equilibrium between the sample and the furnace, but the sensitivity of the device sets the minimum limit for sample masses².

Two different atmospheres, nitrogen and air, were used to obtain the thermal decomposition and decomposition energetics in both inert and oxidizing atmospheres. Materials were heated from 40 °C to 800 °C with three different heating rates: 5 K/min, 10 K/min and 40 K/min. Temperature range was chosen based on the feasible measurement time and ISO 834 standard describing the temperature evolution of apartment fires. Different heating rates were decided to detect the possible differences in the behaviour of the materials as the rate of heating has effect on how the material decomposes. When high heating rates are used, reaction overlapping is possible and distinguishing reactions from each other can be a challenging¹⁴. As the studied commercial products likely contain several substances and therefore several reactions are assumed, the slower heating rate of 5 K/min was expected to be particularly useful. To see the repeatability and comparability of the tests, three tests in the same atmosphere (N₂) and with the same heating rate (10 K/min) were conducted on all materials. All the planned measurements in N₂ are presented in Table 2 and measurements in air in Table 3.

HR (K/min)	5	10	40
FireStop1	1	3	1
FireStop2	1	3	1
FireStop3	1	3	1
FireStop4	1	3	1
FireStop5	1	3	1

Table 2: Planned TGA measurements for fire-stop products in N₂.

HR (K/min)	5	10	40
FireStop1	1	1	1
FireStop2	1	1	1
FireStop3	1	1	1
FireStop4	1	1	1
FireStop5	1	1	1

Table 3: Planned TGA measurements for fire-stop products in air.

Results

The TGA traces of all five products heated with 10 K/min heating rate in N₂ is presented in Figure 1 and in air in Figure 2. All the materials, except silicone-based FireStop2, start decomposing near 200 °C in both atmospheres. For FireStop1, FireStop3 and FireStop4, the decomposition of the pure base polymers should not start at the temperature of this level but at higher temperatures.

This can be explained by the decomposition of other substances than the polymer itself. The commercial products most probably include also other substances than the base polymer and fire retardants so the mass losses in lower temperatures can be result of fire retardant or any other filler or additive used to customise the properties of the product.

The number of decomposition steps and the amount of residue differ depending on the material but in general the amount of residue is on same level or higher for the tests done in N₂ atmosphere when compared to the measurements in air. FireStop2 is an exception in this case as well. The amount of decomposition steps is higher in air for all the materials except FireStop5.

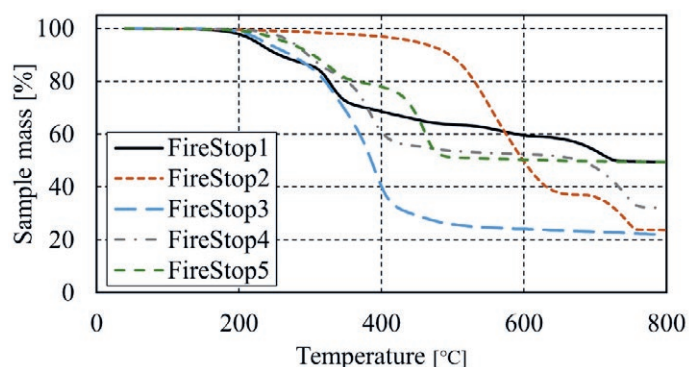


Figure 1: Mass loss traces of all firestop materials in N₂ with 10 K/min heating rate.

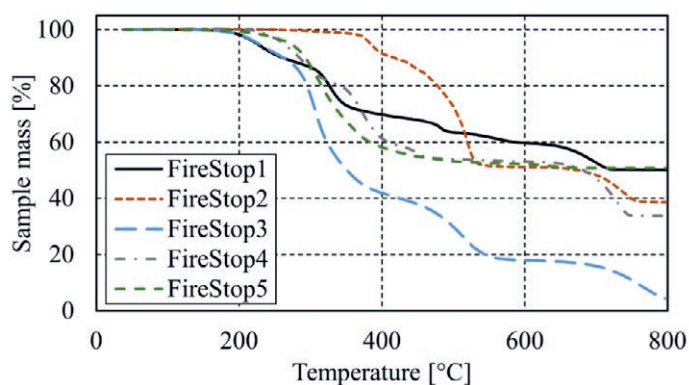


Figure 2: Mass loss traces of all firestop materials in air with 10 K/min heating rate.

The residue amounts of firestop materials after heating differ from each other. However, for each of them, the residue amount is clearly higher than for the assumed base polymers in similar heating conditions. Only FireStop3 is an exception by decomposing almost completely in air. For most of the materials, there was also more decomposition steps than for pure base polymers in similar surroundings which refers to more complex mixtures. However, similarities between the decomposition of base polymers and the fire-retardant treated polymer products were observed.

Conclusion

Thermochemical properties of five different firestop materials were studied and the results varied between the materials. For all five products, thermal decomposition was more complex, lasted to higher temperatures and left higher residual masses than de-

"The number of decomposition steps and the amount of residue differ depending on the material but in general the amount of residue is on same level or higher for the tests done in N₂ atmosphere when compared to the measurements in air."

composition of the assumed base polymers. For most products, decomposition of the samples started at lower temperatures than the decomposition of the reference base polymers. The effect of atmosphere on the decomposition mechanics is clear. Overall, the number of decomposition steps was higher or at least the same for measurements in air when compared to the measurements in N₂ of the same product. The relations of residue amount cannot be generalised as for some products the residue is almost same regardless the atmosphere and for some different atmospheres resulted in clearly different residue amount.

The uncertainty about the base polymers affects the reliability of comparison between the firestop products and untreated polymers and without knowing the fire retardants used for the firestop products, fire retarding reactions can not be determined. Laboratory scale thermogravimetric tests do not give a complete picture of how firestop system works as the amount of material and the heating ranges clearly differ. This applies in particular to FireStop3 which function is highly affected by the amount of the product. However, these results help to better understand the thermal decomposition and decomposition energetics of the material itself.

Acknowledgements

The thesis work, in which this article is based, was funded from two research projects: 'Fire behaviour and safety of nuclear infrastructure' (FASAANI), under the National Nuclear Safety and Waste Management Research Programme – SAFER2028; and 'Palokatkopolymeerien ominaisuudet, mallinnus ja vanheneminen', funded by the Finnish Fire Protection Fund (Palosuojelurahasto). I thank my thesis advisors, professors Simo Hostikka and Jukka Niskanen.

References

- Ye, Z., Abu, A. K., Fleischmann, C. M., & Dhakal, R. P. (2023). Modelling the thermal response of firestop sealant exposed to standard fire. In F. Biondini, & D. M. Frangopol, *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems* (pp. 3054–3061). London: CRC Press.
- Witkowski, A., Stec, A. A., & Hull, T. R. (2016). Thermal Decomposition of Polymeric Materials. In M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection* (pp. 167–254). New York: Springer.
- Ohara, T., Sato, T., Shimizu, N., Prescher, G., Schwind, H., Weiberg, O., . . . Nandi, P. (2024). Acrylic Acid and Derivatives. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 1–21). doi:10.1002/14356007.a01_161.pub4.
- Bouriche, A., Alachaher-Bedjaoui, L., Barrera, A., Staelens, J.-N., & Maschke, U. (2023). Thermal Degradation Studies of Poly(2-ethyl hexyl acrylate) in the Presence of Nematic Liquid Crystals. *Polymers*, 15(19), 3934. doi:10.3390/polym15193934.
- de la Fuente, J. L., Fernández-García, M., & López, M. E. (2001). Characterization and thermal properties of poly(n-butyl acrylate-g-styrene) graft copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(5), 783–389. doi:10.1002/1097-4628(20010502)80:5<783::AID-APP1155>3.0.CO;2-5.
- Hermansson, A., Hjertberg, T., & Sultan, B.-Å. (2003). The flame retardant mechanism of polyolefins modified with chalk and silicone elastomer. *Fire and Materials*, 27(2), 51–70. doi:10.1002/fam.817.
- Camino, G., Lomakin, S. M., & Lazzari, M. (2001). Polydimethylsiloxane thermal degradation Part 1. Kinetic aspects. *Polymer*, 42(6), 2395–2402. doi:10.1016/S0032-3861(00)00652-2.
- Zulfiqar, S., & Ahmad, S. (2001). Thermal degradation of blends of PVAC with polysiloxane — II. Polymer Degradation and Stability, 71(2), 299–304. doi:10.1016/S0141-3910(00)00179-8.
- Wang, S., Long, C., Wang, X., Li, Q., & Qi, Z. (1998). Synthesis and properties of silicone rubber/organomontmorillonite hybrid nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 69(8), 1557–1561. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19980822\)69:8<1557::AID-APP10%3E3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19980822)69:8<1557::AID-APP10%3E3.0.CO;2-S).
- Jiao, L., Xiao, H., Wang, Q., & Jinhua, S. (2013). Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2687–2696. doi:10.1016/j.polydegradstab.2013.09.032.
- Belva, F., Bourbigot, S., Duquesne, S., Jama, C., & Le Bras, M. (2006). Heat and fire resistance of polyurethane-polydimethylsiloxane hybrid material. *Polymers Advanced Technologies*, 17(4), 304–311. doi:10.1002/pat.689.
- Abadir, E. (2013). Mechanism and kinetics of the non-isothermal degradation of ethylenepropylene diene monomer (EPDM). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 114(3), 1409–1413. doi:10.1007/s10973-009-0308-9.
- Gamlin, C., Dutta, N., Roy-Choudhury, N., Kehoe, D., & Matisons, J. (2001). Influence of ethylene-propylene ratio on the thermal degradation behaviour of EPDM elastomers. *Thermochimica Acta*, 367–368, 185–193. doi:10.1016/S0040-6031(00)00668-7.
- De Lannoye, K., Trettin, C., Belt, A., Reinecke, E. A., Goertz, R. and Arnold, L. (2024). The influence of experimental conditions on the mass loss for TGA in fire safety science, *Fire Safety Journal*, vol. 144, p. 104079.

Palotutkimuksen nykytila & tulevaisuuden näkymät

Katsaus syksyn 2024 Palotutkimuksen kehittämis- ja verkostoitumispäivän sekä vuoden 2025 Palotutkimuksen päivien teemoihin

Teknologian nopea kehitys, väestön ikääntyminen, kotien akkulaitteiden monipuolistuminen sekä muuttuva turvallisuustyöympäristö, kuten kyberuhat ja kriisitilanteet, heijastuvat paloturvallisuuden tutkimukseen ja tutkimustarpeisiin. Tämän vuoden Palotutkimuksen päivillä käsitellään esimerkiksi pelastustoimen strategista kehittämistä, rakenteellisen paloturvallisuuden haasteita, asumisen ja poistumisturvallisuuden kysymyksiä sekä erilaisten materiaalien palokäyttäytymistä.

Kehittämis- ja verkostoitumispäivän syksyn 2024 havainnot

Viime syksyn verkostoitumispäivässä nousi esille osittain samoja teemoja, ja siellä keskusteltiin myös tekoälyn hyödyntämisestä laajemmin pelastusalaalla, asumisturvallisuuden sosiaalisista näkökulmista ja uusien energiaratkaisujen vaikutuksista rakennusten paloturvallisuuteen. Tekoälyn mahdollisuuksia tarkasteltiin erityisesti viestinnässä ja hybridivaikuttamisen torjunnassa. Tekoälyn arvioitiin kykenevän analysoimaan tilannekuvaa sekä kohdentamaan vaaratiedotteita eri yleisöille. Ryhmäkeskusteluissa ideoitiin myös tekoälypohjaisia chattibotteja, kuten mahdollinen TUVI-chat, joita voitaisiin hyödyntää paloturvallisuustiedon välittämisessä kansalaisille.

Asumisturvallisuuden osalta keskustelu painottui erityisryhmien, kuten ikäihmisten, tarpeisiin sekä siihen, kuinka heidän turvallisuuttaan voitaisiin parantaa häiriötilanteissa. Myös kotihoidon roolia pohdittiin palovaroittimen pariston vaihtamisen kaltaisissa arjen turvallisuustoimissa. Evakuointiin liittyen nostettiin esiin tarve kehittää uusia ratkaisuja. Samalla tunnistettiin tarve tutkia turvallisuuden tunteen ja

todellisuuden välistä suhdetta, jotta voitaisiin kehittää paremmin kohdennettuja toimenpiteitä eri väestöryhmille.

Rakenteellisen paloturvallisuuden näkökulmasta korostui uusien energiaratkaisujen, kuten aurinkopaneelien ja sähköpolkupyörien latausjärjestelmien tuomat riskit. Esimerkiksi aurinkopaneelien syttyvyys ja palon leviäminen rakennusten pintamateriaaleissa herättivät huolta. Sähköpolkupyörien turvallinen lataaminen kerrostaloissa ja yhteiskäyttötiloissa nähtiin vastaavasti kysymyksenä, joka edellyttää standardien päivittämistä ja teknisiä ratkaisuja, esimerkiksi kellokytkimiä tai valvontajärjestelmiä.

Työryhmissä korostui tarve monitieteiselle ja poikkihallinnolliselle tutkimukselle, datan tehokkaammalle hyödyntämiselle ja paloturvallisuuden tarkastelulle osana laajempia yhteiskunnallisia muutoksia. Käytännön sovellettavuus, tiivis yhteistyö eri toimijoiden kesken sekä data-analytiikan ja ennakoitimenetelmien mahdollisuudet pelastustoiminnan tukena olivat myös keskeisiä teemoja.

Yhtenevät painotukset paloturvallisuuden kehittämisessä

Sekä tämän julkaisun teemat että verkostoitumispäivän keskustelut vahvistavat aiemmin tunnistetun tarpeen tarkastella paloturvallisuutta teknisten ratkaisujen rinnalla osana arkea, käyttäytymistä ja väestöryhmien erilaisia tarpeita. Rakenteellinen paloturvallisuus nousee esiin molemmissa materiaalitutkimuksen, paloteknisen suunnittelun ja rakennuslainsäädännön kehittämisen kautta, mikä korostaa alan jatkuvaa tarvetta sopeutua uusiin teknologioihin ja energiaratkaisuihin. Ikäihmisten ja hoivaympäristöjen poistumisturvallisuus ja siihen liittyvät arviointimenetelmät ovat

sekä tutkimusten että keskustelujen kohteena, samoin kuin akkupalot ja kuluttajalaitteiden paloturvallisuus.

Tulevaisuuden tutkimustarpeet ja näkymät

Tulevaisuudessa olisi tärkeää syventää tutkimusta erityisesti aiheissa, joissa teknologian mahdollisuudet ja ihmisten arjen tarpeet kohtaavat. Samoin tarvitaan syvempää ymmärrystä siitä, miten uudet rakennusmateriaalit, akkuteknologiat ja energiaratkaisut vaikuttavat asumisen riskeihin ja kuinka nämä muutokset tulisi ottaa huomioon lainsäädännössä ja suunnittelukäytännöissä. Palotutkimuksen tulevaisuuden tarpeissa korostuvat nyt entistä enemmän monitieteisyys ja kokonaisvaltainen näkökulma, jossa paloturvallisuutta ei tarkastella vain yksittäisten keinojen vaan laajempien kokonaisuuksien kautta. Lopulta kyse on siitä, kuinka paloturvallisuuden tutkimus voi olla ennakoivaa, osallistavaa ja vaikuttavaa nopeasti muuttuvassa yhteiskunnassa.

Palotutkimuksen kehittämis- ja verkostoitumispäivän keskustelujen koosteen voi lukea kokonaisuudessaan Palotutkimusraadin sivuilla: <https://www.spek.fi/vaiikutaminen/palotutkimusraati/tutkimusluotauspaiva/>

Laura Kuurne, tutkija, SPEK

Palotutkimuksen päivät rahoittaa
Palosuojelurahasto.

PSR
PALOSUOJELURAHASTO

Pitkä julkaisuhistoria – tästä kaikki alkoi

Palotutkimusraati ry järjesti suomalaisen palotutkimuksen suurkatselmuksen Helsingissä elokuun lopulla. Yhdistys on perustettu vuonna 1982 ja sen tarkoituksena on edistää ja kehittää palotutkimusta maassamme. Nyt järjestettyjen päivien tehtävänä oli mahdollisimman kattavasti esitellä viime vuosien suomalaista palotutkimustyötä ja sen tuloksia.

Suomalaisen palotutkimuksen tavoitteena on tuottaa tietoa alalla tapahtuvassa työssä hyödynnettäväksi niin Suomessa kuin ulkomaillakin.

Eri yhteyksissä on valitettu sitä, ettei palotutkimusta ole riittävästi arvostettu ja ettei siihen ole osoitettu tarpeeksi varoja. Lisäksi on valitettu, että tutkimustoiminta on ollut liian hajanaista ja liian pie-

niin tutkimushankkeisiin pirstoutunutta. Sitäkin on harmiteltu, että teknisen paloturvallisuustutkimuksen ja käyttäytymistieteellisen tutkimuksen välillä on liian suuri kuilu. Neljäntenä puutteena on mainittu palokuntien sammutus- ja pelastustoimintaa ja palokuntien organisointia koskevan tutkimuksen vähäisyys.

Palotutkimuspäivät avannut pelastusylijohtaja **Pentti Partanen** iloitsi päivien olevan oiva esimerkki siitä, että paljon tärkeätä on saatu aikaan sekä perinteisillä palotutkimuksen aloilla että uudemmilla tutkimussektoreilla. Ylijohtaja arvioi päivien antaneen hyvän läpileikkauksen suomalaisen palotutkimuksen tasosta, tuloksista ja kiinnostuksen kohteista. Tämä Palontorjuntateknika-lehden koko numero käsit-



Käsissäsi oleva lehti on kymmenes Pelastustiedon toimittaja Kimmo Kaiston kokoama Palotutkimuksen päivien erikoisjulkaisu. "Mielenkiintoisia haasteita on riittänyt aineiston muokkaamisessa painokelpoiseksi kaavoista ja erikoismerkeistä lähtien." Kuva: Esa Aalto.

telee palotutkimuspäivien antia. Päivillä esiteltiin 24 tutkimusta, joista moni on jo julkaistu Palontorjuntateknikan tai Pelastustiedon sivuilla. Tässä numerossa esillä on seitsemän tutki-

musta. Jatkamme tutkimusten esittelyä seuraavissa numeroissamme. ■

Päätoimittaja

Juhani Katajamäki 23.9.1999

Palontorjuntateknikka 3/1999



Muistiinpanot

[illegible]

Varaudun osaan autan



Nuorille suunnattu tietopaketti varautumisesta ja onnettomuuksien ehkäisystä
Teemoina mm. onnettomuudet, häiriötilanteet, digiturva, liikenne ja lemmikit

nuortenvarautumissivusto.fi

Sopii kouluille, pelastuslaitoksille ja harrastusseuroille
Saatavilla myös ruotsiksi

Nuorten varautumis- sivusto



**PALOTUTKIMUSRAATI -
BRANDFORSKNINGSRÅDET RY**
PALOALAN TUTKIMUKSEN KEHITTÄMISORGANISAATIO

PSR
PALOSUOJELURAHASTO

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 järjesti 14. Palotutkimuksen päivät vuonna 2025. Seminaarissa esiteltiin kattavasti viimeaikaisia saavutuksia kotimaisessa palotutkimuksessa. Palotutkimuksen päivät on järjestetty vuodesta 1999 alkaen joka toinen vuosi. Palotutkimuksen päivät rahoittaa Palosuojelurahasto.

Lisätietoja ja aiemmat julkaisut: www.spek.fi/palotutkimuksenpaivat