

SAMMUTUSJÄRJESTELMÄT AJONEUVOPALOISSA

Jukka Vaari

VTT Laskennallinen ja rakenteellinen paloturvallisuus

PL1000, 02044 VTT

Tiivistelmä

Ajoneuvojen tulipaloihin liittyvä tutkimus on viimeisten vuosien aikana lisääntynyt runsaasti. Suurimpana yksittäisenä riskikohteena ovat nousseet esille maantietunnelit, joissa paloriskit ovat kasvaneet tunnelien määrän ja pituuden, sekä niissä kulkevan liikenteen määrän kasvun johdosta. Ajoneuvopalot voivat kuitenkin aiheuttaa vaaraa myös muissa suljetuissa tiloissa, joita ovat mm. maanalaiset pysäköintitilat ja laivojen autokannet. Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on parhaillaan kattavasti uudistamassa laivojen sammutuslaitteistoja koskevia standardejaan, ja osana tätä työtä on meneillään autokansien sammutusjärjestelmille asetettavien suorituskykyvaatimusten tarkastelu. Tässä esityksessä tarkastellaan VTT:n osuutta ao. työssä. VTT:n suorittaman tutkimuksen pääasiallisena tarkoituksena oli löytää sellaiset henkilöautoa ja täysperävaunullista rekkaa kuvaavat palokuormat, joiden aiheuttamat tulipalot voitaisiin hallita nykyisin vaadittavilla laivojen autokansien sammutusjärjestelmillä. Työ muodostaa pohjan uudistettaville suorituskykyvaatimuksille.

JOHDANTO

Laivojen autokansien suojaus vesisammutusjärjestelmällä toteutetaan pääsääntöisesti käyttäen IMO:n päätöslauselman A.123(V) määrittelemää avosuutinjärjestelmää. Päätöslauselman mukaan avosuutinjärjestelmän tulee hallita valuvan polttoaineen palo. Tähän vaadittava avosuutinjärjestelmä

- tuottaa vesivuon 3.5 mm/min kansikorkeuden ollessa enintään 2.5 m,
- tuottaa vesivuon 5.0 mm/min kansikorkeuden ylittäessä 2.5 m,
- peittää koko autokannen lohkoina, joiden leveys on koko autokannen leveys, ja pituus 20 m; järjestelmän hydraulinen mitoitus tehdään tavallisesti kahdelle lohkolle.

Päätöslauselma sallii myös muiden sammutusjärjestelmien käytön, mikäli ne kykenevät hallitsemaan valuvaa polttoainepaloa vähintään yhtä hyvin kuin yllä kuvattu avosuutinjärjestelmä.

Päätöslauselma A.123(V) on päivätty 25.10.1967 ja on siten 40 vuotta vanha. Tässä ajassa ymmärrys ajoneuvopalojen dynamiikasta on huomattavasti lisääntynyt. Aiemmin päähuomio kiinnitettiin polttoainesäiliöstä valuvan palavan nesteeseen. Erityisesti maantietunneleissa tehdyt viimeaikaiset kokeet ovat kuitenkin osoittaneet, että ajoneuvoissa olevat kiinteät polttoaineet ovat merkittävä paloriski, ja niiden aiheuttamat palot voivat olla seurauksiltaan vähintään yhtä vakavia kuin palavien nesteiden palot. Säiliöautojen paloja lukuun ottamatta palavien nesteiden vuodot voivat edistää palon leviämistä ajoneuvosta toiseen, mutta itsessään palavat vain rajallisen ajan.

VESISAMMUTUSJÄRJESTELMIEN MITOITUKSESTA

Palavat nesteet

Standardi EN14816:2003 antaa nykyaikaiset mitoitusohjeet avosuutinjärjestelmille palavien nesteiden paloissa. Mikäli kattokorkeus on enintään 5 m, käytetään vesivuota 7.5 mm/min jos nesteen leimahduspiste on yli 40 °C. Vesivuo nousee asteittain arvoon 13 mm/min jos leimahduspiste laskee arvoon -60 °C. Mikäli kattokorkeus on enintään 3 m, vesivuo on 5 mm/min. Nämä vesivuot tulee kuitenkin kertoa pinta-alatekijällä

$$f = \frac{b(a+b)}{90} + 0.33,$$

missä a ja b ovat suorakaiteen (a>b) tai ympyrän (a=b) muotoisen lammikon mitat metreinä. Pinta-alatekijän vähimmäisarvona käytetään arvoa 1. Ympyränmuotoiselle, halkaisijaltaan 5.5 m olevalle lammikolle pinta-alatekijä on 1, ja olettamalla palamisnopeus 0.06 kg/s sekä palamislämpö 40 MJ/kg saadaan palotehoksi 57 MW. Tulos pätee kuitenkin vain paksuille palavan nesteen kerroksille. Todelliset palavat lammikot ovat ohuita, ja näille paloteho voi olla jopa 75 % vastaavaa paksua lammikkoa pienempi [1].

Kiinteät polttoaineet

Taulukkoon 1 on koottu vesivuon ja mitoitusalan arvoja eurooppalaisten ja amerikkalaisten sprinklerisääntöjen mukaan muovituotteiden ja kuormalavojen varastojen suojaamiseksi. Vaaditut vesivuot ovat merkittävästi suurempia kuin päätöslauselman A.123(V) vesivuot.

Taulukko 1: Eurooppalaisiin ja amerikkalaisiin sprinklerisääntöihin perustuvia vesivuon ja mitoitusalan arvoja.

	Eurooppa, EN12845:2004	USA, NFPA 13:2002
Muovituotteet (plastic commodity)	- ST1 / Cat III - 7.5 mm/min - ST1 / Cat IV - 15 mm/min - mitoitusala 260 m ²	Control Mode Density/Area, kattokorkeus enintään 6.1m - 16.3 mm/min mitoitusallalla 232 m ² - 12.2 mm/min mitoitusallalla 465 m ²
Puiset kuormalavat	- ST1 / Cat IV - 10 mm/min - mitoitusala 260 m ²	Pinoamiskorkeus enintään 1.8 m, sprinklerin K-arvo 115 (SI) - 8.2 mm/min

Standardin EN14816 mukaan paisutetun polystyreenin (EPS) varastoille vesivuo on 10 mm/min jos varastokorkeus on enintään 2 m, ja 15 mm/min, jos varastokorkeus on enintään 3 m.

AJONEUVOPALOJEN SAMMUTUSKOKKEITA

Ajoneuvojen tai niitä kuvaavien palokuormien polttokokeita on viime vuosina tehty runsaasti, ja yhteenveto tällaisista kokeista on esitetty mm. viitteessä [2]. Erityisesti tässä yhteydessä on

mainittava Runehamarin tunnelikokeet [3], joissa käytettiin neljää erilaista palokuormaa kuvaamaan rekan perävaunun paloa. Yksi käytetyistä palokuormista koostui 380 puisesta ja 74 muovisesta kuormalavasta 2.9 m x 10.5 m x 3.0 m muodostelmassa. Tämä palokuorma aiheutti hetkellisesti yli 200 MW:n palotehon.

Varsinaisia sammutuskokeita, joiden tulokset olisivat edes osittain julkisia, on huomattavasti vähemmän. Kenties ensimmäinen hyvin dokumentoitu sammutuskokeita sisältävä palokoesarja tunneleissa tehtiin Sveitsin Ofeneggissä 1965 [4]. Kokeissa poltettiin erikokoisia palavan nesteen lammikoita, ja muutamissa kokeissa käytettiin avosuutinjärjestelmää jonka vesivuo oli 19 mm/min. Sammutusjärjestelmä sammutti palot, mutta muutoin kokeiden tulokset ovat olleet kiistanalaisia, ja johtaneet siihen, että mm. kansainvälinen tiejärjestö PIARC sekä NFPA 502-standardi on näihin päiviin asti vastustanut sammutusjärjestelmien asentamista tunneleihin.

Japani muodostaa merkittävän poikkeuksen PIARC:n ja NFPA:n edustamasta linjasta. Japanin tietunneleihin on aktiivisesti asennettu avosuutinjärjestelmiä vuodesta 1963, ja kattava esitys näistä järjestelmistä löytyy viitteestä [5]. Japanilaiset tietunnelit suojataan tyypillisesti vesivuolla 6 mm/min, ja kokemukset järjestelmien todellisesta toiminnasta ja ylläpidosta ovat kauttaaltaan positiivisia.

Aivan viime aikoina asenteet aktiivisten järjestelmien asentamiseen tunneleihin ovat hiukan muuttuneet. Tähän on osaltaan vaikuttanut Hollannissa v. 2000-2001 suoritettu koesarja [6], jossa avosuutinjärjestelmän (vesivuo 12.5 mm/min) todettiin merkittävästi ehkäisevän palon leviämistä ja parantavan pelastautumismahdollisuuksia tunnelissa.

Myös uusi vesisumuteknologia kiinnostaa tunnelioperaattoreita. Niinpä 10 km pitkä osuus Pariisia kiertävästä A86-tien tunnelista suojataan vesisumuun perustuvalla järjestelmällä, samoin kuin osuuksia Madridia kiertävän M30-tien tunnelista. Näihin tunneleihin asennettava vesisumujärjestelmä on testattu täyden mittakaavan sammutuskokeissa, joissa suurin käytetty palokuorma on muistuttanut Runehamarin kokeissa käytettyä, ollen kuitenkin puolta lyhyempi ja vastaten potentiaalista maksimipalotehoa 95 MW [7]. Vesisumuteknologiaa on testattu myös eurooppalaisen UPTUN-projektin yhteydessä [8].

PALOKUORMIEN SUUNNITTELU

Rekan perävaunu

Rekan perävaunun fyysisiä ulottuvuuksia edustivat varastohyllyt, jotka oli pystytetty 5 m korkeuteen asennetun teräskaton alle. Palokuorma koostui puisista kuormalavapinoista (eurolavoja). Pinoja palokuormassa oli 16 kappaletta, ja jokaisessa pinossa oli 7 kuormalavaa. Palokuormaksi voidaan arvioida 34 GJ. Koska kuormalavapinot olivat varsin matalia, koko palokuorma päätettiin sijoittaa varastohyllyjen yläosaan, jotta lämpörasitus kattoon saataisiin maksimoitua.

Rekan perävaunujen sisältämä kuorma on usein suojattu peittämällä se pressuin, mutta nykyisissä rekoissa on yhä tavallisempaa, että ainakin osa suojasta on rakennettu palamattomasta tai huonosti palavasta materiaalista, joka yhtäältä hidastaa palon leviämistä mutta toisaalta toimii esteenä sammutusveden pääsulle paloon. Palamattomien rakenteiden vaikutus paloon ja sammutukseen huomioitiin kokeissa siten, että puolet palokuormasta peitettiin teräslevyillä, jotka oli asetettu 4 m

korkeudelle lattiasta. Näin kyettiin samassa kokeessa arvioimaan sammutusjärjestelmän tehoa avointa ja osin piilotettua paloa vastaan.

Palokuorman molemmille puolille pituussuunnassa asennettiin 12 mm:n vanerista tehdyt kohteet, pituudeltaan 3,6 m ja korkeudeltaan 1,8 m. Kohteiden etäisyys palokuormasta oli 1 m. Laivojen autokansilla ajoneuvojen välinen etäisyys on luonnollisesti pienempi. Kuitenkin tutkimuksen kannalta oli oleellista säätää kohteiden etäisyys sellaiseksi, että kohteet syttyisivät vapaassa palossa, mutta eivät syttyisi sellaisessa sammutuskokeessa, joka suoritetaan käyttäen hyväksyttyä avosuutinjärjestelmää. Valokuva palokuormasta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Rekan perävaunua kuvaava palokuorma.

Sytytyslähteenä toimi kaksi neliön muotoista teräsallasta, joiden sivun pituus oli 30 cm. Altaat asetettiin keskeisesti palokuorman alle siten, että välimatka altaiden yläreunasta alimman kuormalavan alapintaan oli 25 cm. Altaiden keskikohdat sijaitsivat 40 cm palokuorman pituusakselin molemmin puolin, jolloin liekit parhaiten osuivat kuormalavojen lautoihin.

Kumpaankin altaaseen kaadettiin 1 litra heptaania ja vettä sen verran, että altaiden vapaaksi reunaksi saatiin 4 cm. Esipaloaika oli 120 s, jossa ajassa palo oli kehittynyt siten että liekit ylsivät kattoon asti, mutta kohteet eivät vielä olleet syttyneet. Esipaloajan lopussa sammutusjärjestelmä käynnistettiin ja sitä käytettiin 30 minuutin ajan. Tämän jälkeen jäljellä oleva palo sammutettiin käsin.

On syytä korostaa, että kokeissa käytetty palokuorma on merkittävästi pienempi kuin vaikkapa Runehamarin kokeissa käytetty palokuorma, eikä välttämättä edusta täyteen lastatun rekan perävaunun palokuormaa. Syynä palokuorman pienuuteen on se, että kokeiden tarkoituksena oli löytää palokuorma jossa syttyvää paloa voidaan hallita vesivuolla 5 mm/min. Ennen kuin kuvassa 1 esitettyyn palokuormaan päädyttiin, suoritettiin esikokeita suuremmilla palokuormilla, mutta näissä esikokeissa palot riistäytyivät sammutusjärjestelmän hallinnasta. Kuvaukset näistä esikokeista, samoin kuin yksityiskohtaiset tulokset tässä artikkelissa esitetyistä kokeista, löytyvät VTT:n tutkimusraportista VTT-S-11913-06 [9].

Henkilöauto

Henkilöauton runkoa kuvaava teräs rakenne oli valmistettu 2 mm teräslevystä tyypillisen SUV-auton mittojen mukaisesti, tässä tapauksessa mallina oli Volvo XC90. Palon oletettiin syttyvän matkustamossa, ja olevan näin ollen kiinteän aineen palo. Yksinkertainen ja toistettava palokuorma voitiin tässä tapauksessa rakentaa 12 Euro-kuormalavasta asetettuna kahteen vierekkäiseen pinnoon. Ikkunoita ei kokeissa käytetty, ja niiden tilalla oli yksinkertaisesti aukot. Todellisilla henkilöautoilla tehdyissä polttokokeissa on todettu, että ikkunoiden hajoaminen on melko satunnainen ilmiö, mikä heikentää kokeiden toistettavuutta. Kuitenkin palon kehittyessä kaikki ikkunat lopulta hajoavat.



Kuva 2: Henkilöautoa kuvaava palokuorma.

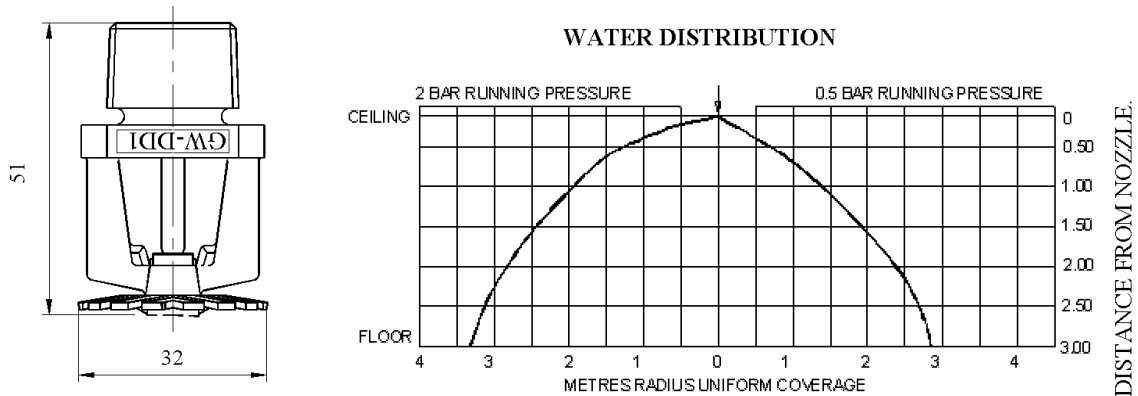
Palokuorman kummallekin puolelle asetettiin vanerista tehdyt kohteet, joiden avulla pyrittiin selvittämään palon leviämistä viereisiin ajoneuvoihin. Vanerilevyt olivat 122 cm leveitä, 170 cm korkeita ja paksuudeltaan 12 mm. Ne oli asetettu 60 cm etäisyydelle teräs rakenteen kyljistä. Vanerien yläreuna oli peitetty 0.7 mm teräslevyillä, jotka toimivat lämpösäteilyä katkaisevina esteinä. Tämän järjestelyn ansiosta oli kokeen päätyttyä helposti nähtävissä, oliko kohde syttynyt kokeen aikana vai oliko se vain hiiltynyt lämpösäteilyn vaikutuksesta. Valokuva koejärjestelystä on kuvassa 2.

Sytytyslähteenä toimi neliön muotoinen teräsallas, jonka sivun pituus oli 30 cm ja reunan korkeus 10 cm. Allas asetettiin lattialle kuormalavapinojen väliin, ja siihen kaadettiin 1 litra heptaaniamia ja vettä sen verran, että altaan vapaaksi reunaksi saatiin 4 cm. Esipaloaika oli 150 s. Esipaloajan lopussa sammutusjärjestelmä käynnistettiin, ja sitä käytettiin 30 minuutin ajan. Tämän jälkeen jäljellä oleva palo sammutettiin käsin.

SAMMUTUSJÄRJESTELMÄ

Rekkakokeet

Rekkakokeissa käytetty sammutusjärjestelmä perustui GW-DD1 –sprinklereihin, joilla on laivoihin DNV:n tyyppihyväksyntä no. F-17635. Avosuutinkokeita varten sprinklerien lasiampullit poistettiin. GW-DD1 on alaspäin asennettava spraysprinkleri, jonka K-arvo on $80 \text{ l/min/bar}^{1/2}$, ja jonka vesijakauma on esitetty kuvassa 3. Neliöhilan suutinvälin ollessa 3.5 m vesivuo 5 l/min/m^2 saavutetaan suutinpaineella 0.563 bar.



Kuva 3: Vasemmalla: piirros GW-DD1 -sprinkleristä. Oikealla: vesijakauma.

Henkilöautokokeet

Henkilöautokokeissa käytetty avosuutinjärjestelmä perustui Wormald MV-18 –keskinopeussuuttimiin, joilla on laivoihin Lloydsin tyyppihyväksyntä no. SAS F050409. Suuttimen K-arvo on $28 \text{ l/min/bar}^{1/2}$ ja kartiokulma 125° . Neliöhilan suutinvälin ollessa 3.5 m vesivuo 3.5 l/min/m^2 saavutetaan suutinpaineella 2.3 bar.

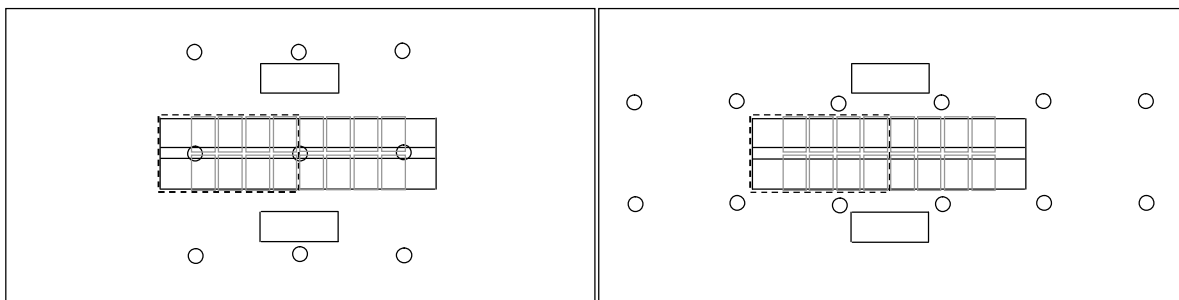


Kuva 4: Vasemmalla GW-DD1, oikealla Wormald MV-18-125.

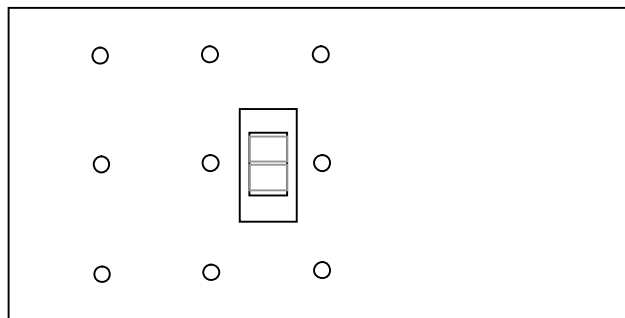
KOEJÄRJESTELY

Kokeet suoritettiin VTT:n sammutushallissa. Hallin lattiapinta-ala on 378 m² maksimikorkeus 18 m ja tilavuus 6000 m³. Halli on varustettu savunpuhdistuslaitteistolla ja sammutusveden talteenotolla. Kokeissa käytetyt suutinhilat asennettiin mitoiltaan 10 m x 20 m teräskattoon, joka rekkakokeissa oli asennettu 5 m korkeudelle lattiasta, ja henkilöautokokeissa 2.5 m korkeudelle lattiasta.

Suutinhilojen asettelu palokuormien suhteen on esitetty kuvissa 5 ja 6. Rekkakokeissa sytytyslähde asetettiin joko yhden suuttimen alle tai neljän suuttimen keskelle. Henkilöautokokeissa sytytyslähde sijoitettiin edellisten lisäksi myös kahden suuttimen väliin. Rekkakokeissa itse palokuorma pidettiin paikallaan ja suutinhilan paikkaa vaihdettiin, kun taas henkilöautokokeissa voitiin sytytyslähteen pakkaa vaihtaa parhaiten siirtämällä itse palokuormaa.

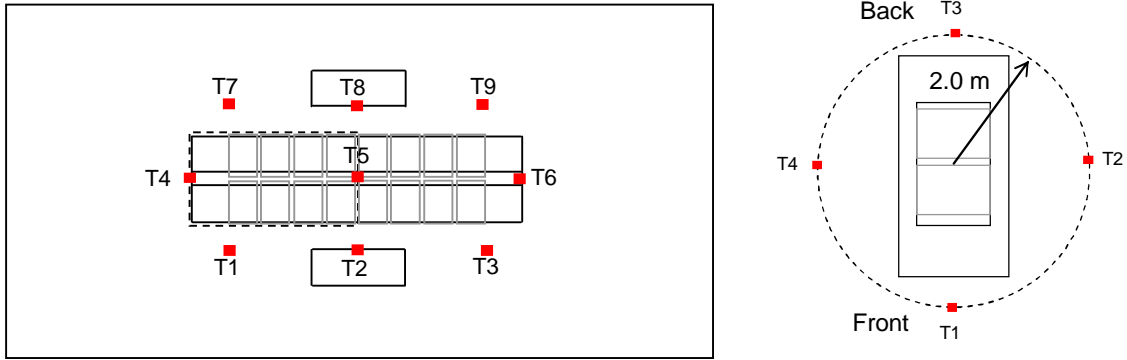


Kuva 5: Rekkakokeissa käytetyt suutinhilat. Vasemmalla: sytytys yhden suuttimen alla. Oikealla: sytytys neljän suuttimen keskellä.



Kuva 6: Henkilöautokokeissa käytetty suutinhila, ja sytytyskohta sijoitettuna kahden suuttimen keskelle.

Kokeissa mitattiin kaasulämpötiloja katonrajassa kuvan 7 mukaisissa kohdissa, sekä vesipainetta syöttöputkistossa suutinhilan tasolla. Rekkakokeissa määritettiin palokuormalle aiheutuneet tuhot kokeen jälkeen arvioimalla palaneen tai hiiltyneen palokuorman pinta-ala. Henkilöautokokeissa vastaavaa tuhoanalyysiä ei suoritettu, koska tavallisesti koko palokuorma tuhoutui kokeessa. Kaikissa kokeissa määritettiin kokeen jälkeen myös mahdolliset kohteiden syttymät.

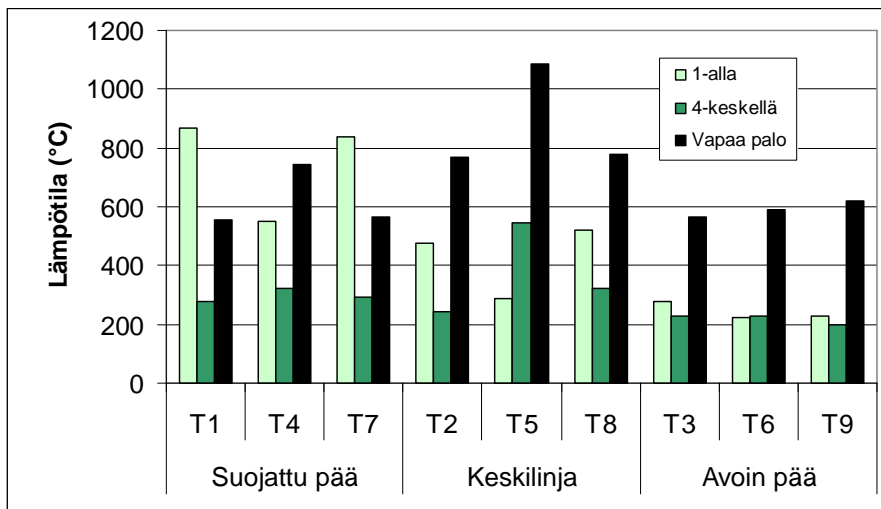


Kuva 7: Kaasulämpötilojen mittauspaikat. Anturit oli asennettu 75 mm kattopinnan alapuolelle ja suojattu vesisuihkuilta ohuin metallisuojin.

TULOKSET

Rekkakokeet

Rekkakokeissa mitatut kaasulämpötilojen huippuarvot on esitetty kuvassa 8. Arvot on määritetty viiden minuutin yli keskiarvoistetuista lämpötilakäyristä. Sammutuskokeissa määritettyjä huippuarvoja verrataan kokeeseen, jossa palon annettiin kehittyä vapaasti ilman sammutusjärjestelmän vaikutusta siihen saakka kunnes kohteet palokuorman molemmiin puolin olivat syttyneet, jonka jälkeen hallia oli jäähdytettävä pienellä määrällä vesisumua.



Kuva 8: Rekkakokeissa mitatut kaasulämpötilojen huippuarvot.

Palokuormille aiheutuneet tuhot on lueteltu taulukossa 2. Vapaapalokokeessa kohteet syttyivät 324 s ja 347 s kuluttua sytytyksestä. Sammutuskokeessa, jossa sytytyskohta oli yhden suuttimen alla, toinen kohteista syttyi 844 s kuluttua sytytyksestä. Sytytyskohdan ollessa neljän suuttimen keskellä kumpikaan kohde ei syttynyt.

Taulukko 2: Palokuormille aiheutuneet tuhot rekkakokeissa.

	1-alla	4-keskellä	Vapaa palo
Avoin pää	16.3	24.5	60.6
Suojattu pää	100	57.0	88.5
Kokonaistuhot	58.1	40.8	74.6

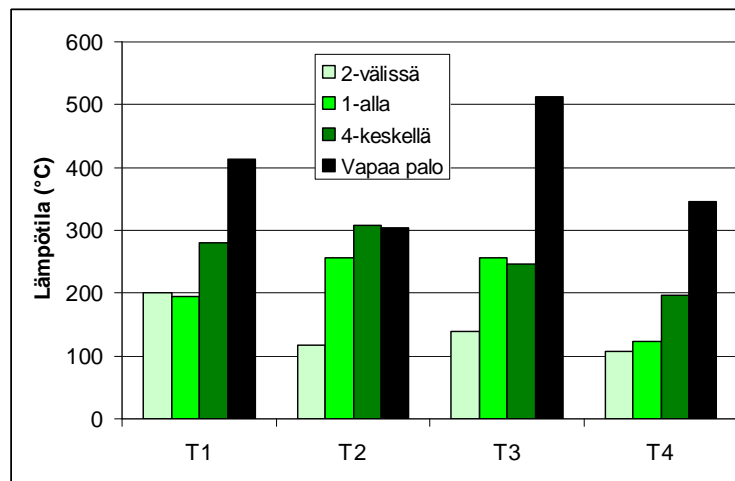
Normaaleihin sprinklerisuuttimiin perustuvan sammutusjärjestelmän pääasiallinen sammutusvaikutus on palokuorman pintojen kastelu. Tällaiset järjestelmät toimivat hyvin avoimia kiinteän aineen paloja vastaan, mutta jos esteet rajoittavat sammutusveden pääsyä pinnoille, sammutusteho laskee. Tämä on selkeästi nähtävissä myös taulukon 2 luvuissa, jossa suojatun pään tuhot ovat huomattavasti avoimen pään tuhoja suuremmat. Ilmiö näkyy myös mitatuissa kaasulämpötiloissa, jotka ovat korkeammat palokuorman suojatussa päässä.

Sammutusjärjestelmän teho riippui myös sytytyskohdan sijainnista. Tapauksessa, jossa sytytyskohta sijaitsi yhden suuttimen alla, tuhot olivat suuremmat kuin sytytyskohdan sijaitessa neljän suuttimen keskellä. Erityisesti havaittiin, että koko teräskaton suojaama osa palokuormaa tuhoutui. Ero selittyy sprinklerisuuttimen hajottajalevyn toiminnalla, sillä suoraan hajottajalevyn alle muodostuu katve-alue jonne vettä saadaan vähemmän kuin hiukan etäämmälle suuttimesta.

Henkilöautokokeet

Henkilöautokokeissa mitatut kaasulämpötilojen huippuarvot on esitetty kuvassa 9. Tuhoanalyysiä palokuormista ei tehty, sillä se tuhoutui täysin joka kokeessa. Vapaapalokokeessa kohteet syttyivät 430 s ja 469 s kuluttua sytytyksestä. Kohteet eivät syttyneet yhdessäkään sammutuskokeessa.

Lämpötilatuloksista havaitaan, että sammutusjärjestelmälle haastavin tapaus oli sytytyslähteen sijainti neljän suuttimen keskellä. Tulos poikkeaa rekkakokeissa käytetyn sammutusjärjestelmän tuloksista, sillä rekkakokeissa haastavin tapaus oli sytytyslähteen sijainti yhden suuttimen alla. Tulos voidaan osittain selittää käytettyjen sammutussuuttinten erilaisella toiminnalla, sillä keskinopeussuuttimen tuottamat vesisuihkut ovat hienojakoisempia kuin tavanomaisen sprinklerin. Tällöin sammutusveden tunkeutumiskyvyn merkitys nousee esiin, sillä veden tunkeutuminen paloon on sitä vaikeampaa mitä kauempana palosta suutin sijaitsee.



Kuva 9: Kaasulämpötilojen huippuarvot henkilöautokokeissa.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Koesarjassa saadut tulokset osoittivat, että käytetyt rekkaa ja henkilöautoa kuvaavat palokuormat olivat sellaisia, joiden aiheuttamat palot voidaan hallita IMO:n päätöslauselman A.123(V) määrittelemillä sammutusjärjestelmillä. Tulosten pohjalta voidaan myös asettaa määrällisiä kriteereitä laivojen autokansien vaihtoehtoisten sammutusjärjestelmien suorituskyvyille, perustuen mitattuihin kaasulämpötiloihin sekä palokuormille ja/tai kohteille aiheutuneisiin tuhoihin [9]. Suomi on ehdottanut tähän tutkimukseen perustuvaa koemenetelmää ja siihen liittyviä läpäisykriteerejä IMO:n paloalakomitealle käytettäväksi vaihtoehtoisten sammutusjärjestelmien sammutuskyvyn arvioinnissa.

KIITOKSET

Tutkimuksen on rahoittanut Marioff Corporation Oy. Yhtiö on myös osallistunut tutkimuksen käytännön toteutukseen. Tutkimuksen suunnitteluvaiheessa työhön ovat myös osallistuneet Magnus Arvidson (SP, Ruotsi) sekä Anders Tosseviken (Det Norske Veritas, Norja).

LÄHDELUETTELO

1. Gottuck, D.T. Liquid Fuel Fire Hazard Characterization, Presentation at Flammable and Combustible Liquids Symposium, Chicago, IL, 21.9.2004
2. Ingason, H. 'Design fires in tunnels', 2nd International Symposium "Safe & reliable tunnels" – Innovative European Achievements', Lausanne, 2006.
3. Ingason, H. & Lönnemark, A., 'Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels', Fire Safety Journal, 2005. Vol. 40, s. 646-668.
4. Haerter, A. Fire Tests in the Ofenegg-Tunnel in 1965. International Conference on Fire in Tunnels 10.-11.10.1994. SP Report 1994:54, s. 195-214.
5. Stroeks, R. Sprinklers in Japanese Road Tunnels. Bouwdienst Rijkswaterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Ministry of Transport, The Netherlands. Project Report BFA-10012, 2001.
6. Lemaire, T. & Kenyon, Y., Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel, Fire Technology, 2006. Vol. 42, s. 329-250.
7. Mawhinney, J. Evaluating the performance of water mist systems in road tunnels. IV Congreso Bienal APICI Ingenieria de PCI, Madrid, 21.-23.2.2007.
8. Opstad, K & Stensaas, J.P., 'Fire mitigation measures', 2nd International Symposium "Safe & reliable tunnels" – Innovative European Achievements', Lausanne, 2006.
9. Ala-Outinen, T. & Vaari, J. Performance requirements for fixed water-based fire fighting systems on shipboard vehicle decks. VTT Research Report no. VTT-S-11913-06.