



PELASTUSOPISTO



POLIISI
POLIISIAMMATTIKORKEAKOULU

Sähköautojen akkupalojen sammutusmenetelmät

Pelastustoimen toteuttamat sammutusmenetelmät tilannepaikalla
Tarmo Helander

9/2022

Poliisiammattikorkeakoulun opinnäytetyö / AMK

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Tarmo Helander

Julkaisun nimi: Sähköautojen akkupalojen sammutusmenetelmät

Opinnäytetyön muoto: Tutkimuksellinen

Julkisuusaste: Julkinen

Ohjaaja: yliopettaja Ismo Huttu

Tutkinto: Pelastusalan päällystötutkinto (AMK)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli arvioida erilaisia menetelmiä sähköautojen akkupalojen sammuttamiseksi ja lämpökarkaamisen jäähdyttämiseksi. Opinnäytetyössä esitetyt menetelmät arvioitiin ja menetelmien hyvät ja huonot ominaisuudet dokumentoitiin osana arviointeja. Opinnäytetyötutkimuksen tuloksena saatiin useita vaihtoehtoisia sammutus- ja jäähdytysmenetelmiä, jotka voidaan soveltaa onnettomuuspaikalla. Opinnäytetyö tarjoaa viime kädessä tietoa suomalaisille pelastuslaitoksille sähköautojen akkupaloista sekä lämpökarkaamiseen liittyvistä ilmiöistä ja niiden hallintamenetelmistä.

Tämän opinnäytetyön sisältö koostui teoreettisesta viitekehyksestä sekä tutkimuksen raportoiduista tiedoista sähköautojen akkupaloista tai sähköautoihin liittyvistä palovaarallisista tehtävistä Suomessa vuosina 2017–2022. Lisäksi tutkimukseen sisältyi National Transportation Security Boardin laatima onnettomuustutkintaraportti sähköautojen tulipaloista Yhdysvalloissa. NTSB:n raportista käännettiin ja analysoitiin neljä sähköautojen akkupaloa koskevaa onnettomuustutkintaselostetta tutkimusta varten.

Tutkimuksen analyysi osoitti, että Suomessa tällä hetkellä käytössä olevat menetelmät voivat olla oikein toteutettuina riittävän tehokkaita sähköautojen akkupalon sammuttamiseen tai akustossa olevan lämpökarkaamisen jäähdyttämiseen. Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO:n raporttien perusteella Suomessa pelastuslaitosten tietämys oikeista menetelmistä sähköautojen akkupaloissa tai sähköautojen suurjännitejärjestelmien vikaantumisiin liittyvissä palovaarallisissa tilanteissa osoittautui riittämättömäksi.

Tutkimuksen analyysin perusteella tehdyissä johtopäätöksissä todettiin, että sähköautojen akkupaloja koskeva koulutus Suomen pelastusallalle on järjestettävä ja suunniteltava johdonmukaisesti. Tarvittavat sammutuskalustohankinnat tulisi suunnitella siten, että koulutettavat vaihtoehtoiset sammutus- ja jäähdytysmenetelmät ovat toteutettavissa turvallisesti ja tehokkaasti.

Sivumäärä: 56 + liitteet

Tarkastuskuukausi ja vuosi: syyskuu 2022

Avainsanat: sähköauto, akkupalo, lämpökarkaaminen, sammutusmenetelmät

ABSTRACT

Author: Tarmo Helander

Title of thesis: Methods for extinguishing battery fires in electric vehicles

Type of thesis: research

Confidentiality: public

Academic Supervisor: Mr. Ismo Huttu, Head Instructor. Emergency Services Academy Finland

Degree Programme: Fire Officer's Degree (UAS)

The aim of this thesis was to evaluate different methods in extinguishing battery fires and cooling down thermal runaway in electric vehicles. The thesis presents the methods that were evaluated, and the pros and cons of the methods were documented as part of the evaluations. The thesis study resulted in a variety of alternative extinguishing and cooling methods that can be applied at the scene of an accident. This thesis ultimately provides information to Finnish rescue services on the phenomena related to battery fires and thermal runaway of the electric vehicles and methods to control them.

The content of this thesis consists of a theoretical framework and research of reported data on battery fires or related fire accidents involving electric vehicles in Finland from 2017 to 2022. In addition, the research included the National Transportation Security Board's safety report on electric vehicle fires in the United States. Four specific accidents in the safety report were translated and analysed in this study.

The study analysis shows that the methods currently used in Finland can, if properly implemented, be effective enough to extinguish a battery fire of an electric vehicle or cool down the thermal runaway. Based on the accident reports from the rescue services resource and accident statistic program PRONTO, the knowledge of Finnish rescue services on currently used methods for battery fires or fire-hazard incidents due to failures on high-voltage systems on electric vehicles proved to be insufficient.

The conclusions drawn from the analysis of the study shows that training and education for electric vehicle battery fires for the Finnish rescue services should be organised and planned in a coherent way. The necessary purchases of the firefighting equipment should be planned so that the alternative extinguishing and cooling methods and the training needed can be implemented safely and efficiently.

Pages: 56 pages + appendix

Month and year: September 2022

Keywords: electric vehicle, battery fire, thermal runaway, extinguishing methods

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	3
2 HYBRIDI- JA SÄHKÖAUTOT TIELIIKENTEESSÄ.....	5
2.1 Hybridi- ja täyssähköautojen osuus Suomen ajoneuvokannasta	5
2.2 Hybridi- ja sähköautotyypit	7
2.3 Ladattavien hybridi- ja täyssähköautojen eri lataustapojen toteuttaminen	7
3 SÄHKÖAUTOJEN LITIUMIONIAKUT	9
3.1 Sähköauton litiumioniakuston sijainti ja rakenne	9
3.2 BMS-akunhallintajärjestelmä.....	9
3.3 Akkukennot	10
3.4 Akkumoduulit	12
3.5 Akkupaketti	13
4 SÄHKÖAUTOJEN TULIPALOT	15
4.1 Tilastotietoa tieliikennevälineiden paloista Suomessa 2017–2021.....	16
4.2 Sähköautojen litiumioniakkujen tulipalojen syyt.....	17
4.3 Lämpökarkaaminen.....	18
4.4 Palokuorma ja paloteho	20
5 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS.....	22
5.1 Tutkimusmenetelmä.....	22
5.2 Tutkimuksen tekeminen	22
5.3 Sähköautojen tulipalot Suomessa	23
5.4 Sähköautojen tulipalot Yhdysvalloissa	23
NTSB:n raportin onnettomuustutkintaselosteet.....	25
6 TUTKIMUSTULOKSET	30
6.1 Pelastuslaitoksen suorittamat sammutustoimenpiteet Suomessa.....	30
6.2 Pelastuslaitoksen suorittamat sammutustoimenpiteet Yhdysvalloissa	31
6.3 Luotettavuuden arviointi	32
7 SÄHKÖAUTON AKKUPALON SAMMUTTAMINEN.....	34
7.1 Tunnistaminen	34
7.2 Autopalon sijainnin huomioiminen	35

7.3 Akkupalon sammuttaminen tai akun lämpökarkaamisen hallinta jäähdyttämällä	36
7.4 Muita akkupalojen sammuttamiseen ja jäähdyttämiseen kehitettyjä menetelmiä	40
7.5 Akkupalosta syntyvät haitalliset yhdisteet ja niiden huomioiminen.....	44
7.6 Sammutus- ja jäähdytysjätevesien huomioiminen	45
7.7 Hallittu poltto	47
8 POHDINTA.....	49
8.1 Tutkimustulosten hyödyntäminen	49
8.2 Jatkotutkimusaihe ja kehittämiskohteet	49
8.3 Johtopäätökset.....	51
8.4 Oma oppiminen.....	52
LÄHTEET	54
LIITE 1.....	57

1 JOHDANTO

Sähköautojen tulipalot ovat olleet toistaiseksi harvinaisia, koska sähköautoja on vähän Suomen tieliikenneajoneuvokannassa. Sähköautojen määrä on kuitenkin ollut viime vuosina selkeästi tasaisesti nousussa, ja toistaiseksi ei ole ollut havaittavissa merkittävää tekijää, joka muuttaisi vallitsevaa tilannetta. Sähköautojen yleistyessä tieliikenteessä hybridi- ja täyssähköautoissa olevien akustojen tulipalouhat aiheuttavat huolestuneisuutta. Tapahtuneissa sähköautopaloissa on sattunut yllättäviä tilanteita, joita sammutus- ja pelastustehtävillä oleva henkilöstö ei ole välttämättä osannut ottaa huomioon.

Pelastusalalla toistaiseksi ehkä tunnetuin sähköautopalo Suomessa tapahtui Lahdessa 2019, jolloin parkissa ollut sähköauto oli syttynyt yllättäen palamaan. Pelastuslaitoksen sammuttamisen jälkeen auto syttyi voimakkaasti uudelleen palamaan. Alkutilanteessa sammuttamiseen oli käytetty autopalojen sammuttamisessa tyypilliseen tapaan vettä. Tavanomaisesta autopalosta poiketen sähköauton palaneen akuston lämpötila ei ollut laskenut riittävästi liekkipalon sammuttamisen jälkeen, jolloin akustossa syntyneen kemiallisen reaktion takia tapahtui uudelleensyntyminen. Tilanne oli yllättänyt pelastushenkilöstön ja aiheuttanut selkeän vaaratilanteen, johon ei ollut varauduttu.

Suomessa pelastustoiminnassa olevien henkilöiden tietoisuus sähköautojen akkujen tulipaloihin liittyvistä kemiallisista ja fysikaalisista ilmiöistä ei välttämättä ole tarpeeksi riittävä kaikille, jolloin sammutus- ja pelastustoiminta tilannepaikalla ei ole työturvallista tai tilanteeseen nähden oikein toteutettu. Suomessa on käytössä joitakin toimintamalleja sähköautojen akkupalojen varalle, mutta selkeää valtakunnallista toimintamallia ei ole olemassa.

Tällä opinnäytetyöllä pyrin keräämään saatavilla olevan tiedon tapahtuneista sähköautopaloista yhdeksi kokonaisuudeksi, jolloin lukija voi muodostaa oman käsityksensä eri sammutusvaihtoehdoista sekä niiden hyödyistä ja haitoista. Tällöin pelastustoiminnan johtaja voi soveltaa omaksuttua tietoa käytännön kokemuksen kanssa ja johtaa tilanteen mahdollisimman tehokkaasti ja turvallisesti.

Lahdessa sattunut tapaus osoittaa, kuinka sähköautojen akkupalot eroavat selkeästi tavanomaisten polttomootorikäyttöisten ajoneuvojen paloista. Sähköauton akkupalo tai sen riski muodostaa ajoneuvojen sammutus- ja varmistustehtävistä vaativia niin kalustollisten resurssien kuin myös pelastustoimen henkilöstön osaamisenhallinnan osalta. Tutkittua tietoa sähköautojen akkupaloista ja etenkin niiden sammuttamisesta ei ole vielä paljoa saatavilla. Sähköautokannan kasvaessa väistämättä myös sähköautoille tapahtuvien onnettomuuksien ja tulipalojen määrä kasvaa lähitulevaisuudessa. Tähän skenaarion nähden olisi ensiarvoisen tärkeää pyrkiä lisäämään pelastushenkilöstön tietoisuutta akkupaloihin liittyvistä ilmiöistä ja kehittämään operatiivisen henkilöstön sammutustaktista hahmottamista

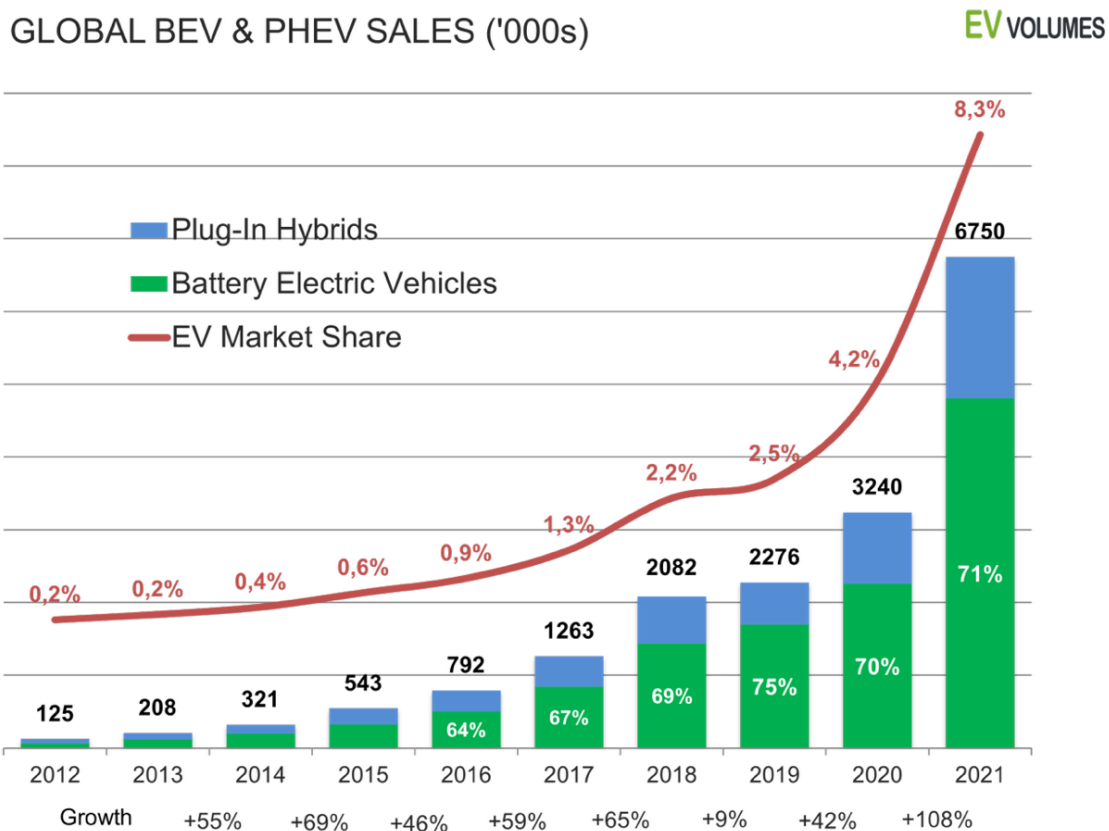
sekä -teknistä osaamista. Tarve yleisen tietoisuuden lisäämiselle niin akkujen tulipalotilanteista kuin myös sammuttamismenetelmistä on tavoite, johon pyrin tällä opinnäytetyöllä.

Olen laatinut tämän opinnäytetyön rakenteen siten, että johdantoluvun jälkeen luvut 2–4 esittelevät opinnäytetyön teoreettisen viitekehyksen. Luvuissa 5 ja 6 käsittelen opinnäytetyön tutkimuksellista osuutta ja esitän tutkimuksesta saadut tulokset. Olen laatinut tuloksien perusteella erillisen taulukon Suomen pelastuslaitoksien suorittamista sammutustoimenpiteistä. Taulukko on opinnäytetyön liitteenä.

Luvussa 7 esitän mitä asioita sähköauton akkupalon sammuttamisessa tai akuston lämpökarkaamisessa tulee huomioida. Esittelen Suomessa ja maailmalla käytettyjä erilaisia sammutus- ja jäähdytysmenetelmiä sekä innovaatioita, joita on kehitetty akkupalojen sammuttamiseksi tai lämpökarkaamisen hallisemiseksi. Esiteltävien menetelmien yhteydessä olen arvioinut niiden hyviä ja huonoja puolia. Viimeisessä luvussa pohdin ja esitän kuinka tätä opinnäytetyötä voisi hyödyntää käytännön pelastustoiminnan kehittämisessä ja mihin asioihin koulutuksessa tulisi kiinnittää huomiota.

2 HYBRIDI- JA SÄHKÖAUTOT TIELIIKENTEESSÄ

Hybridi- ja sähköautojen osuus tieliikenteen ajoneuvokannasta maailmalla on ollut kasvussa viimeisten vuosien aikana. Uusien täyssähkö- tai hybridautojen myyntimäärät ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosikymmenen alkuvuosista, ja merkkejä myynnin hidastumisesta ei ole (Kuva 1). Fossiilisia polttoaineita käyttävien ajoneuvojen kohoavat käyttökustannukset sekä maailmanlaajuiset pyrkimykset vähentää tieliikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä lienevät pääasiallisia syitä sähköautojen markkinaosuuden kasvuun kaikkien autojen myynnistä.

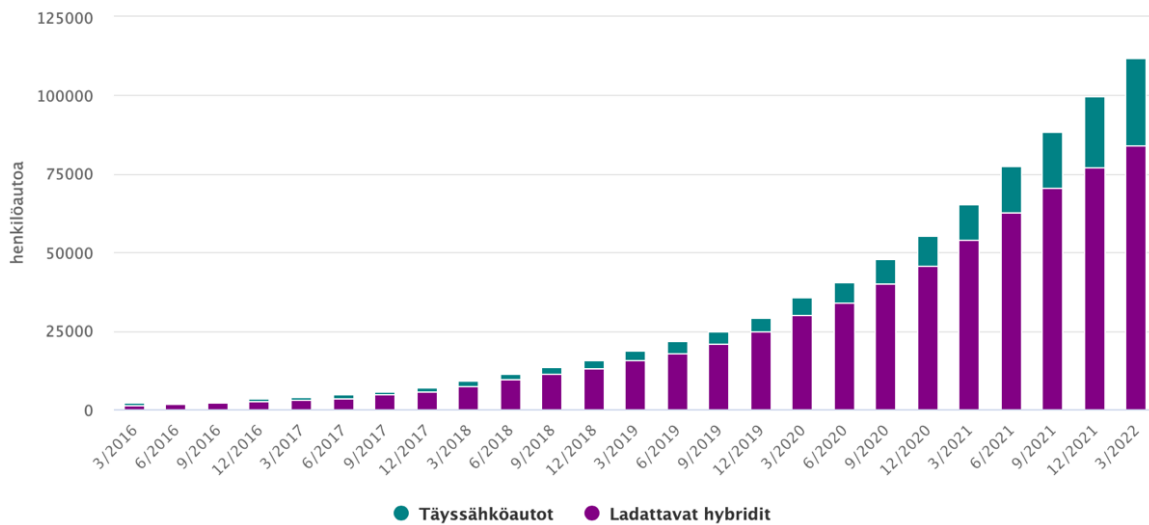


Kuva 1. Hybridi- ja täyssähköautojen myynnin kehitys maailmanlaajuisesti (EV Volumes).

2.1 Hybridi- ja täyssähköautojen osuus Suomen ajoneuvokannasta

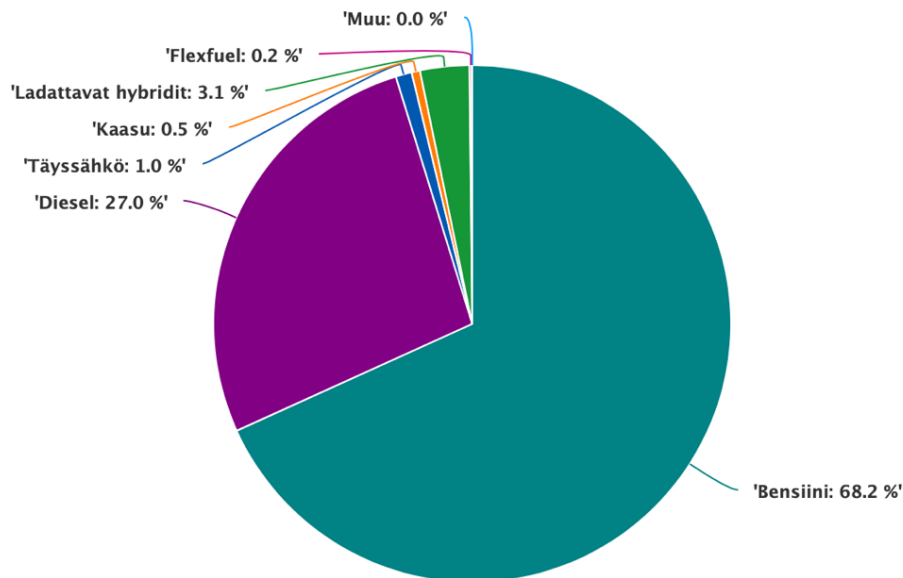
Suomen tieliikenteessä olevien ajoneuvojen määrä on kasvanut viimeisten vuosikymmenten aikana koko ajan (Kuva 2). Viimeisimpinä vuosina tapahtunut muutos ajoneuvokannan ajoneuvotyyppien osuuksissa seuraa maailmanlaajuista kehitystä. Suomessa täyssähköautojen määrä on viimeisen vuoden aikana yli kaksinkertaistunut ja ladattavien hybridautojen määrä on kasvanut 57 % (Trafficom).

Liikennekäytössä olevat sähkökäyttöiset autot



Kuva 2. Tilasto hybridi- ja täyssähköautojen määrän kehityksestä Suomessa (Traficom).

Liikenne- ja viestintävirasto Traficomien tilastojen mukaan Manner-Suomessa oli 2022 maaliskuun lopussa liikennekäytössä kaikkiaan 2,75 miljoonaa henkilöautoa. Näistä liikenteessä olevista ajoneuvoista oli 111 832 sähkökäyttöistä henkilöautoa, joista 27 559 oli täyssähköautoja ja 84 273 ladattavia hybridejä. (Traficom.) Eri käyttövoimatyyppiä käyttävien ajoneuvojen prosentuaaliset osuudet ajoneuvokannasta ovat esitettyinä kuvassa 3.



Kuva 3. Suomen ajoneuvokannassa esiintyvät eri käyttövoimatyyppit maaliskuussa 2022 (Traficom).

2.2 Hybridi- ja sähköautotyypit

BEV, *A Battery-Powered Electric Vehicle* – täyssähköauto. Auton kaikki käyttövoima tulee ladattavasta akustosta, josta se siirtyy sähkömoottoreihin. Täyssähköautoissa ei ole polttomoottoria. Akkujen kapasiteetti on alle 40 kWh, tällä hetkellä suurimmat ovat yli 100 kWh. (Current EV.)

EREV, *An Extended Range Electric Vehicle* – sarjahybridiauto. Auton käyttövoima pääosin saadaan ladattavasta akustosta. Akuston lisäksi voimalinjaan on liitetty toimintasädettä (ajomatkaa) lisäävä polttomoottoritoiminen generaattori, joka tuottaa energiaa sähköisellä voimansiirrolla akustoon tai suoraan sähkömoottoriin. Akkujen kapasiteetti riittää ajamaan sähköllä sääolosuhteiden mukaan 75–145 km. (Current EV.)

FCEV, *A Fuel Cell Electric Vehicle* – polttokenno-/vetyhybridiauto. Auton sähkömoottorin energia tuotetaan vetykaasusta ja ilman hapesta sähkökemiallisessa reaktiossa. Reaktiosta saatu energia varastoituu akustoon. Polttokennoauto ei tuota hiilidioksidipäästöjä liikennekäytössä.

HEV, *A Hybrid Electric Vehicle* – sarja- ja rinnakkaishybriditoiminnot yhdistävä auto. Auton voimalinjassa on ajossa latautuvalla akustolla toimiva sähkömoottori sekä polttomoottori, jotka yhdessä tuottavat auton käyttövoiman. Toimintasäde pelkällä sähköllä ajettaessa on muutamia kilometrejä ja käytössä vain alhaisissa nopeuksissa. Energiatuotanto perustuu polttomoottoriin hukkaenergian hyödyntämiseen (tyhjäkäynti) ja jarrutusenergian talteenottoon. Akustoa ei voi ladata sähköverkosta. Akkujen kapasiteetti on 1–2 kWh. (Current EV.)

MHEV, *Mild Hybrid Electric Vehicle* – kevythybridiauto. Auton sähkömoottori tehostaa tarvittaessa polttomoottorin toimintaa kuten ajoneuvon käynnistyessä tai kiihdytyksissä. Tämän toiminnon ansiosta kevythybridiauton polttoaineen kulutus on vähäisempää kuin perinteisen polttomoottoriauton. Kevythybridiauton 48 V:n sähköjärjestelmän 10 kW:n teho ei mahdollista pelkällä sähköllä ajamista, mutta auton apulaitteiden käyttö polttomoottorin ollessa sammuksissa on mahdollista. Sähkömoottorin akusto latautuu jarrutuksien (mekaaninen jarrutus tai moottorijarrutus) yhteydessä saadusta liikeenergiasta. (Moottori.fi.)

PHEV, *A Plug-In Hybrid Electric Vehicle / Plug-In Hybrid* – rinnakkaishybridiauto. Auton ladattavaan akustoon liitetty sähkömoottori yhdessä polttomoottorin kanssa tuottaa auton käyttövoiman. Voimalinjan polttomoottori toimii tarvittaessa yhtä aikaa sähkömoottorin kanssa. Lataushybridillä pystyy ajamaan 8–15 kWh:n akuilla 30–100 km. (Current EV.)

2.3 Ladattavien hybridi- ja täyssähköautojen eri lataustapojen toteuttaminen

Sähköteknisen alan kansallinen standardointijärjestö SESKO ry julkaisee tasaisin väliajoin päivitetyn suosituksen ja ohjeistuksen sähköajoneuvojen erityyppisten lataustapojen toteuttamisesta. Seuraavassa on koostettuna eri lataustavat 2021 julkaistusta suosituksen 5. painoksesta.

Lataustapa 1 (Kevyiden sähköajoneuvojen lataus):

- Kevyttä pienitehoista sähköajoneuvoa (sähköskootteri, -nelipyörä ym.) ladataan vaihtosähköllä tavanomaisesta maadoitetusta hyväkuntoisesta 230 V kotitalouspistorasiasta, joka on suojattu kiinteään asennukseen kuuluvalla 30 mA vikavirtasuojalla (SESKO ry 2021, 2.).

Lataustapa 2 (Hidas lataus):

- Syötetään vaihtosähköä tavanomaisesta maadoitetusta kotitalouspistorasiasta tai kolmivaiheisesta voimapistorasiasista liitäntäjohdolla, jossa on tarvittavat suoja- ja ohjauslaitteet (ml. vikavirtasuojaja) sisältävä yksikkö. Pitkäaikaisessa kotitalouspistorasian käytössä latausvirta on rajoitettava 8 A:iin. (SESKO ry 2021, 1.)

Lataustapa 3 (Peruslataus, suositeltavin sähköajoneuvojen lataustapa):

- Syötetään vaihtosähköä yksi- tai kolmivaiheisena siihen tarkoitettulla kiinteästi asennetulla latauslaitteella, jossa on sähköajoneuvon lataukseen tarkoitettu pistorasia tai kaapeli ja pistoke. Vaihtosähköverkosta latausvirta voi olla 6X63 A, jolla saavutetaan latausteho 43 kW. (SESKO ry 2021, 1)

Lataustapa 4 (Teho-/Pikalataus):

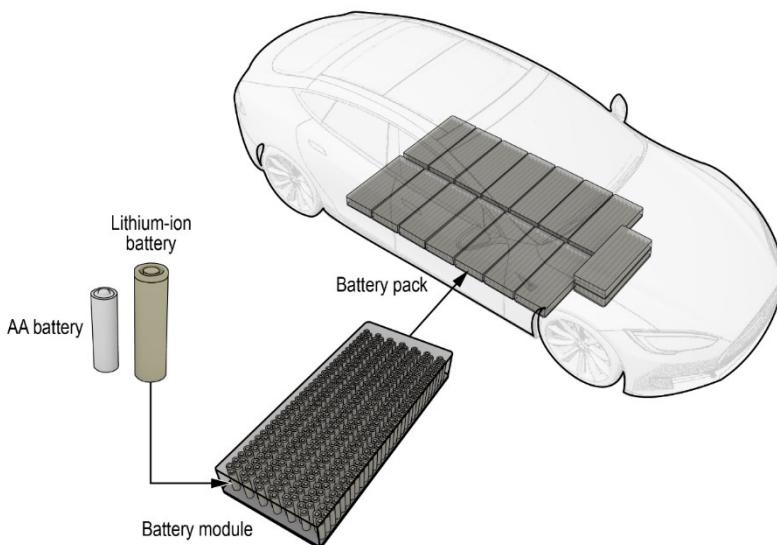
- Teholataus, jossa akustoa syötetään tasasähköllä suurella virralla auton ulkopuolella olevasta tasasähkölaturista. Latausjohto on kiinteästi asennettu latausasemaan. Teholatureiden autoon syöttämät tasavirrat ovat satoja ampeereita ja lataustehot ovat tyypillisesti 50–350 kW. (SESKO ry 2021, 2.)

3 SÄHKÖAUTOJEN LITIUMIONIAKUT

Sähköautoissa akusto toimii ajoneuvon energialähteenä, jolloin siihen varastoitunut energia käytetään kaikkiin auton toiminnallisiin tekijöihin. Hybridi- ja täyssähköautoissa on käytössä erilaisia akkutyyppejä, joiden eroavaisuus riippuu akkukemiassa käytetyistä raaka-aineista.

3.1 Sähköauton litiumioniakuston sijainti ja rakenne

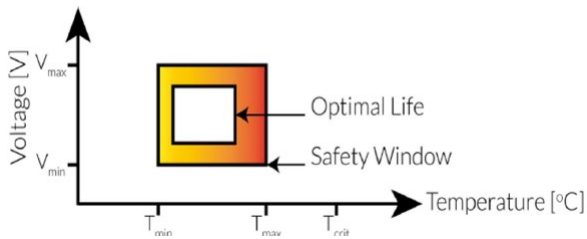
Tyypillisesti henkilöautojen kokoluokassa olevien täyssähköautojen akkupaketit sijaitsevat auton alustassa. Ladattavissa hybrideissä akkupaketit ovat pienempiä ja voivat sijaita auton mallin mukaan esimerkiksi takapenkin tai takakontin alla. Sähköautojen akkupaketit koostuvat yksittäisiä akkukennoja sisältävistä akkumoduuleista. Akkumoduulien määrä akkupaketissa riippuu autovalmistajasta ja ajoneuvon mallista. Auton alustarakenteessa oleva akkupaketti on hyvin suojattu ulkoisilta mekaanisista vauriosta aiheuttavilta tekijöiltä. Alustarakenne toimii samalla ajoneuvon runkoa jäykistävänä osana kuten tavanomaisissa polttomootoriautoissa. Kuvassa 4 on havainnekuva litiumioniakuston sijainnista sähköajoneuvon alustarakenteissa, akkumoduulin koostuminen akkukennoista sekä kokovertailu tyypillisen AA-pariston ja sylinterimäisen akkukennon välillä.



Kuva 4. Sähköauton akuston osat (Spangler).

3.2 BMS-akunhallintajärjestelmä

Akunhallintajärjestelmä BMS (*engl. battery management system*) monitoroi ja kontrolloi akkua siten, että akun toimintapiste pysyy aina turvallisen käyttöalueen sisällä (Kuva 5). BMS:n toiminta on jakaantunut akuston eri osiin, jotta mahdolliset akun toimintakykyä uhkaavat ilmiöt kyettäisiin torjumaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Tarvittaessa BMS katkaisee virrankulun akustossa sulakkeella vahingon estämiseksi, ellei kyseessä ole akkukennon sisäinen oikosulku (Kultanen 2019, 11).



Kuva 5. BMS-akunhallintajärjestelmä pyrkii pitämään akustossa vallitsevat olosuhteet mahdollisimman optimaalisina ja turvallisina (Bisschop ym.).

BMS-akunhallintajärjestelmän päätehtävät ovat seuraavat (Sähköautot – Nyt!):

1. Turvallisuuden varmistaminen

- ylikuormituksen, ylijännitteen ja alijännitteen estäminen
- akun lämpötilan pitäminen turvallisen käytön alueella
- virran rajoittaminen ja akun irtikytkentä.

2. Käytön optimointi

- kennojen balansointi
- virran rajoittaminen kylmässä ja kuumassa eliniän pidentämiseksi
- latauksen hallinta.

3. Monitorointi, estimointi, diagnostiikka

- virta, jännite, lämpötila, varaustaso, käytettävissä oleva energia ja teho
- kunnonvalvonta (state of health, SOH), jäljellä oleva elinikä
- käyttöhistoria, loki, datan lähettäminen ajoneuvon ohjausyksikölle.

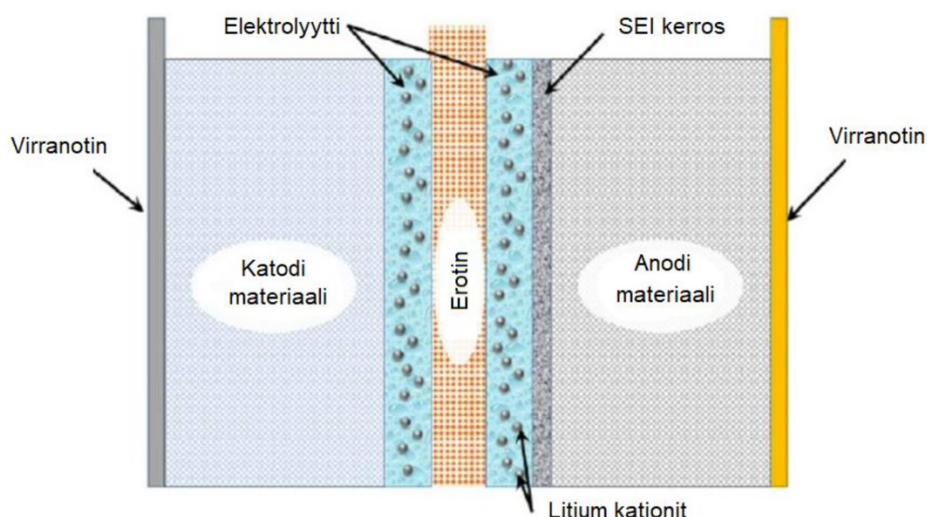
3.3 Akkukennot

Akkupaketin pienin yksittäinen osa on akkukenno. Akkukennoja voi olla autovalmistajan mukaan useita tuhansia kappaletta. Akkukennoja on kolmea eri tyyppiä; sylinterikenno, pussikenno ja prismaattinen kenno (Kuva 6). Akkukennojen sijoittelu akkumoduulissa riippuu käytettävästä akkukennotyypistä.



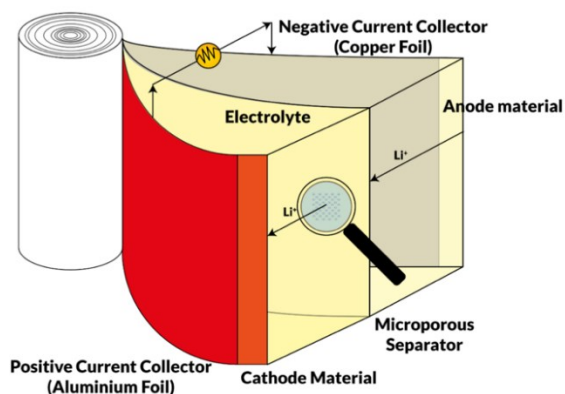
Kuva 6. Akkukennojen tyypit (Bisschop ym.).

Litiumioniakku koostuu kahdesta elektrodista, anodista ja katodista, joiden välissä on väliaine eli elektrolyytti. Katodi on positiivinen elektrodi ja akun positiivinen puoli, kun taas anodi on negatiivinen elektrodi ja akun negatiivinen puoli. Elektrolyytti on yleensä nestemäinen liuos, jossa on orgaanisia liuottimia, litiumsuoloja ja lisäaineita. Elektrolyytin lisäksi anodin ja katodin välissä on erotin/separaattori, joka on ohut huokoinen polymeerikalvo (Kuva 7). (Kalliotiura 2021, 2.)



Kuva 7. Litiumioniakun rakenne (Kalliotiura).

Katodi ja anodi koostuvat virranottimista ja aktiivisista materiaaleista. Katodin virranotin on useimmiten ohut kerros alumiinifoliota, joka päällystetään aktiivisella materiaalilla. Katodilla tämä on jotakin metallioksidia. Yleisimpiä materiaaleja ovat litiumkobolttioksidi (LCO), litiummangaanioksidi (LMO), litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (NCA) ja litiumnikkelimangaanikoboltti-oksidi (NMC). Anodin virranotin on useimmiten kuparia, joka päällystetään hiilipohjaisella materiaalilla, yleensä grafiitilla. (Kalliotiura 2021, 2.) Kuvassa 8 on esitettyä, kuinka yksittäisessä sylinteriakukennossa akkukennon eri osat kerrostuvat ja muodostavat sylinterimäisen muodon.



Kuva 8. Yksittäisen sylinteriakkukennon rakenne (Bisschop ym.).

Elektrolyytin tehtävä on toimia väliaineena, joka mahdollistaa ionien liikkumisen katodin ja anodin välillä. Elektrolyytti on yleensä nestemäinen liuos, jossa on orgaanisia liuottimia, litiumsuoloja ja lisäaineita. Elektrolyytin lisäksi anodin ja katodin välissä on erotin, separaattori, joka on ohut huokoinen polymeerikalvo. Sen tehtävä on eristää anodi ja katodi toisistaan ja täten estää sisäinen oikosulku. Jotkin erottimet toimivat myös ”sulakkeena”, sillä jos kennon lämpötila nousee vaaralliselle tasolle, alkaa erotin sulamaan. Tällöin sen huokokset sulkeutuvat estäen litiumionien liikkumisen ja kennon toiminta pysähtyy. (Kalliotiura 2021, 3.)

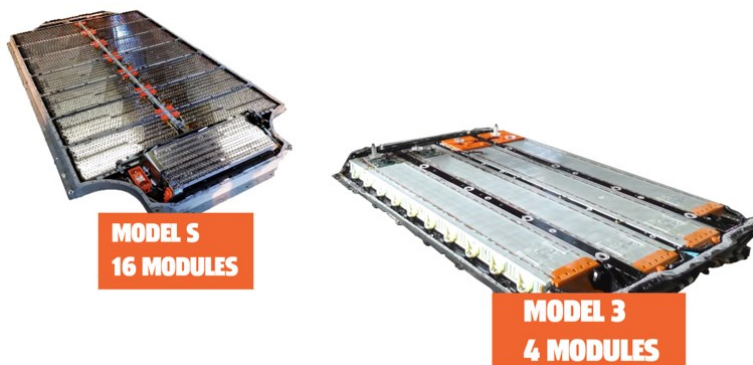
Kiinteän elektrolyytin välivaihe- eli SEI-kerros (*solid electrolyte interphase*) on anodin pintaan muodostuva ohut kerros. Se muodostuu elektrolyytin ja anodin välisten kemiallisten reaktioiden johdosta, jolloin materiaalia tarttuu anodin pintaan. SEI-kerros koostuu litiumioneista ja elektrolyytin sisältämistä liuottimista, suoloista ja epäpuhtauksista. SEI-kerros muodostuu akun ensimmäisen lataus-purkusyklin aikana, jolloin sen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lataus- ja purkunopeuksilla sekä latausmäärällä. Nämä vaihtelevat erilaisten akkujen ja valmistajien välillä, mutta yleisesti akku ladataan ja puretaan hitaasti. Yleisesti ottaen SEI-kerros myös jatkaa muodostumistaan ensimmäisen syklin jälkeen. (Kalliotiura 2021, 3.)

3.4 Akkumoduulit

Akkumoduulien määrä akkupaketissa riippuu sähköauton valmistajasta ja automallista. Akkumoduulit voivat sisältää sarjaan- tai rinnankytkettyjä kennoja. Akkumoduulit on eristetty erilliseksi palo-osatoksi, jossa valmistajan mukaan ovat paineenpurkausaukot. BMS-järjestelmä suorittaa jännite- ja lämpötilanmittauksia akkumoduuleissa ja tarvittaessa ohjaa suojaustoimia.

Akkuteknologian kehittyessä useita moduuleja sisältävien akkupakettien muutoksena on tullut akkupaketti, jossa moduulien määrä on vähentynyt merkittävästi (Kuva 9). Akkumoduulien uudelleensuunnittelulla säästetään valmistuskustannuksissa vähentämällä käytettäviä materiaaleja, varsinkin kobolttin osalta, sekä saavutetaan parempi energiatiheys.

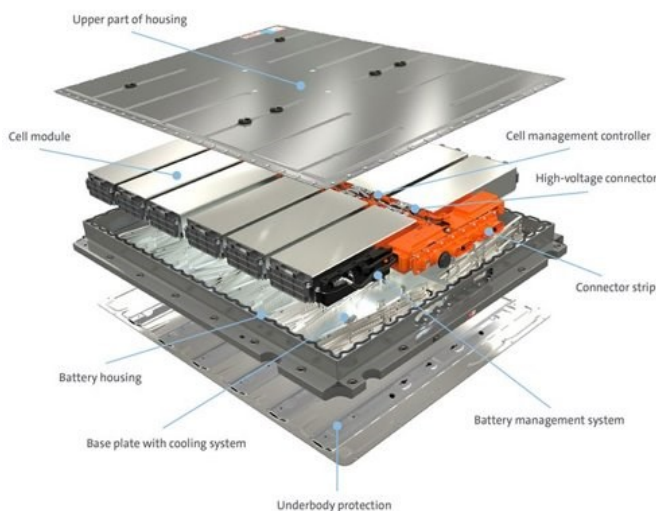
Yhdysvaltalainen autovalmistaja Tesla ja kiinalainen Contemporary Amperex Technology Ltd (CATL) ovat hakeneet patenttia kehittämälleen Cell-to-pack-pakkausmenetelmälle. Tämä menetelmä mahdollistaa ohittamaan akun valmistuksessa vaiheen, jossa akkukennot pakataan ensin moduuleiksi.



Kuva 9. Muutos akkumoduulien määrässä, Teslan ja CATL kehittämä cell-to-pack-pakkausmenetelmä (Jalopnik).

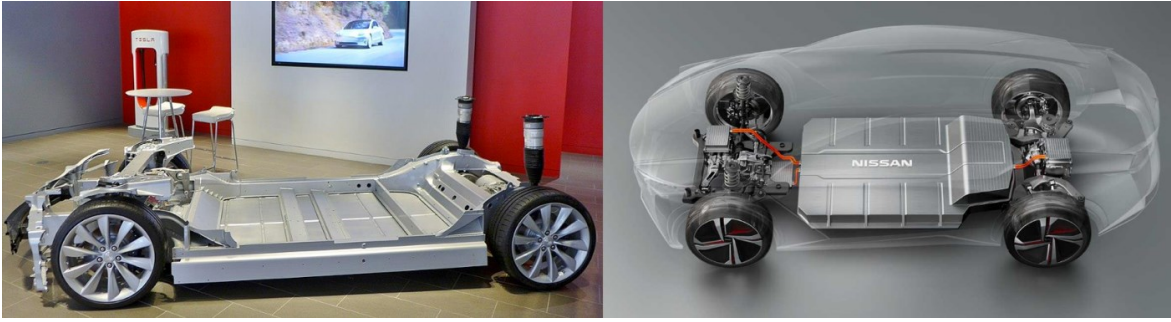
3.5 Akkupaketti

Akkupaketit koostuvat sarjaan tai rinnan kytketyistä akkumoduuleista. Akkupakettiin sisältyy myös kontaktorit ja sulakkeet. Akkupaketin kotelointi suojaa akustoa hyvin ulkoisilta vaurion aiheuttajilta (Kuva 10). BMS-järjestelmä toteuttaa akkupaketin virranmittausta, lämmönhallintaa ja tarvittaessa ohjaa akkupaketin jäähdytystä.



Kuva 10. Akkupaketin rakenne, jossa on 12 akkumoduulia (Volkswagen AG).

Akkupaketit ovat yleisimmin sijoitettuina henkilöauton alustarakenteisiin kuvassa 11 esitetyn erään autovalmistajan mallin mukaisesti. Tällöin painavan akkupaketin sijoittelussa saadaan auton massakeskipiste mahdollisimman matalalle, jolloin auton ajettavuus ja vakaus ovat mahdollisimman hyvät.



Kuva 11. Henkilöautoissa akkupaketti muodostaa auton rungon alustan kanssa skateboard-rakenteen (VTT).

4 SÄHKÖAUTOJEN TULIPALOT

Maantieliikenteessä olevat ajoneuvotyypit ovat olleet reilun vuosisadan ajan pääsääntöisesti polttomoottorikäyttöisiä kulkuneuvoja. Näiden erityyppisten öljyperäisiä polttoaineita käyttävien ajoneuvojen tulipaloihin pelastustoimi on varautunut kalustollisesti ja laatinut selkeät toimintamallit, joilla ajoneuvo-palot pyritään sammuttamaan mahdollisimman tehokkaasti ja työturvallisesti.

Sähköautojen tultua markkinoille niille sattuvat tulipalot Suomessa ovat toistaiseksi olleet harvinaisia. Tilanteen voidaan kuitenkin olettaa muuttuvan sähköautojen yleistyessä, minkä suorauksena sähköauton osallisuus tavanomaisissa tieliikenneonnettomuuksissa ja autopaloissa on todennäköisempää.

Tilastoitua tietoa ajoneuvojen tulipaloista Suomessa on saatavilla pelastustoimen ylläpitämästä PRONTO-rekisteristä. Pelastustoiminnan johtaja on pelastuslain mukaisesti velvollinen kirjaamaan toimenpiderekisteriin tiedot, jotka koskevat

- 1) toimenpiteen kohdetta
- 2) onnettomuus- tai tehtävätyyppiä
- 3) onnettomuuden teknisiä yksityiskohtia ja onnettomuuden etenemistä
- 4) toimenpiteessä käytettyjä pelastus- ja torjuntamenetelmiä lukuun ottamatta poliisin tietoja
- 5) toimenpiteessä käytettyjä henkilöstövoimavaroja lukuun ottamatta poliisin tietoja
- 6) toimenpiteessä käytettyjä ajoneuvoja ja muuta kalustoa lukuun ottamatta poliisin tietoja
- 7) pelastustoiminnan tuloksellisuutta
- 8) onnettomuuden aiheuttamia vahinkoja ja vahinkojen laajuuteen vaikuttaneita tekijöitä
- 9) onnettomuuden syitä.

(Pelastuslaki 2011/379, 91 §).

Suosalo tuo esiin opinnäytetyössään (2020, 20) monikansallisen tutkimusryhmän tutkielman tuloksista (Bisschop ym. 2020, 30) mainiten, että tutkimusryhmän laskelmien perusteella voidaan todeta sähköautojen palotehojen olevan verrattavissa polttomoottorikäyttöisten autojen palotehoon. Keskeisinä eroina kuitenkin havaittiin, että sähköauton palo saattaa tuottaa myrkyllisiä kaasuja enemmän kuin polttomoottorikäyttöisen auton palo. Lisäksi akun uudelleensyttymisriskin vuoksi sähköautopalon sammuttaminen on tavanomaista autopaloa haasteellisempää.

Sähköautojen akkupalojen tai akustoissa syntyneen lämpökarkaamisen estäminen ovat tilanteita, jotka aiheuttavat, ja ovat jo aiheuttaneet pitkäkestoisia sammutus- ja varmistustoimenpiteitä. Litiumioniakun tulipalon sammuttamiseen tai akussa syntyneen lämpökarkaamisen hallitsemiseen on varauduttava erittäin suurilla vesimäärillä. Akkupalon sammuttamisen tai akuston jäähtymisen toteutuksen mukaan veden tarve on useita tuhansia litroja.

Tavanomaisissa Suomessa käytössä olevissa sammutusautoissa vesisäiliöiden tilavuudet ovat 2–3 m³. Tämän vuoksi voidaan todeta, että autopalo- ja tieliikenneonnettomuustehtäville hälytetyissä väesteissa pelastustoiminnan johtajan on kiinnitettävä tilannepaikan tiedustelussa erityistä huomioitava kohteena tai osallisena olevien ajoneuvojen käyttövoimatyyppeihin. Vain yhden sammutusauton sammutusvesimäärä sekä kalustolliset resurssit eivät välttämättä riitä, jos kyseessä on sähköauton akkupalon sammuttaminen tai akustossa syntyneen lämpökarkaamisen hallitseminen. Jos tilannepaikka sijaitse alueella, jossa sammutusauton kalustolla kyetään toteuttamaan henkilöresurssit huomioiden lisävesiselvitys joko vesijohtoverkoston sammutusvesirakenteista, paineettomista palovesilähteistä tai luonnonvesilähteistä on sammutustehtävä mahdollista suorittaa yhden sammutusauton resursseilla.

4.1 Tilastotietoa tieliikennevälineiden paloista Suomessa 2017–2021

Taulukko1. Tilasto tieliikennevälineiden tulipaloista (PRONTO).

Tieliikennevälinepaloit liikennevälineen mukaan 2017 - 2021													
Vuosi	Henkilöauto	Pakettiauto	Matkailuauto	Kuorma-auto	Linja-auto	Traktori	Moottoripyörä	Moottoripyörä	Mopo	Mopoauto	Mönkijä (tieliikenne)	Muu tieliikenneväline	Yhteensä
2017	1241	146	20	209	44	94	55	14	49	14	7	12	1905
2018	1296	143	27	247	51	123	103	17	45	15	11	21	2099
2019	1275	161	14	236	48	79	89	15	31	21	9	14	1992
2020	1239	148	24	204	31	91	62	18	55	10	19	15	1916
2021	1214	165	27	248	31	88	76	18	50	12	13	21	1963
Yhteensä	6265	763	112	1144	205	475	385	82	230	72	59	83	9875

Taulukossa 1 olevassa PRONTOsta saadusta tilastosta voidaan todeta, että Suomessa vuosittain sattuneita tieliikennevälinepaloja viimeisen viiden vuoden aikana on ollut noin 2000 vuodessa. Henkilöautojen osuus kokonaismäärästä on ollut tasaisesti reilu 1200. Ajoneuvorekisterissä olevan autokannan kasvaessa tarkasteltavan ajanjakson aikana voidaan todeta yleisellä tasolla, että tieliikenneajoneuvoihin liittyvä paloturvallisuustaso on parantunut.

Tieliikenneajoneuvoille tapahtuvien tulipalojen pääasialliseksi syttymissyynä on arvioitu PRONTO-raporttien mukaan olevan ajoneuvoon liittyvän koneen tai laitteen vika. Henkilöautojen osalta ihmisen toiminnan on arvioitu olleen toiseksi yleisin syttymissyynä, kun taas muiden liikennevälineiden osalta syttymissyynä ei ole voitu arvioida (Taulukko 2).

Taulukko 2. Liikennevälinepalojen syttymissyyt (PRONTO).

Tieliikennevälinepalojen syttymissyyt 2017 - 2021

Arvio, mikä aiheutti tulipalon	Henkilöauto	Pakettiauto	Matkailuauto	Kuorma-auto	Linja-auto	Traktori	Moottoripyörä	Mopo	Mopopuoli	Mönkijä (tieliikenne)	Muu tieliikenneväline	Yhteensä	
Ihminen toiminta	1165	87	10	54	4	18	17	21	88	9	4	13	1490
Eläin	3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	6
Luonnontapahtuma tai -ilmiö	4	0	1	11	0	1	1	1	0	0	0	1	20
Koneen tai laitteen vika	3974	513	79	829	184	390	313	38	95	50	41	59	6565
Palovaarallinen aine	19	2	1	74	0	13	13	2	6	0	2	1	133
Muu syy	145	24	3	102	8	23	12	4	5	2	1	3	332
Ei voida arvioida	955	137	18	73	9	29	28	16	36	11	11	6	1329
Yhteensä	6265	763	112	1144	205	475	385	82	230	72	59	83	9875

Taulukoissa 1 ja 2 olevissa PRONTO-tilastoissa ei ole eriteltyä hybridi- tai täyssähköautoille sattuneita paloja, mutta ollessaan tieliikennevälineitä ovat ne mukana kokonaislukumäärässä. Perehdyn tilastoihin sähköautoihin liittyviin tulipaloihin tarkemmin luvussa 6.

4.2 Sähköautojen litiumioniakkujen tulipalojen syyt

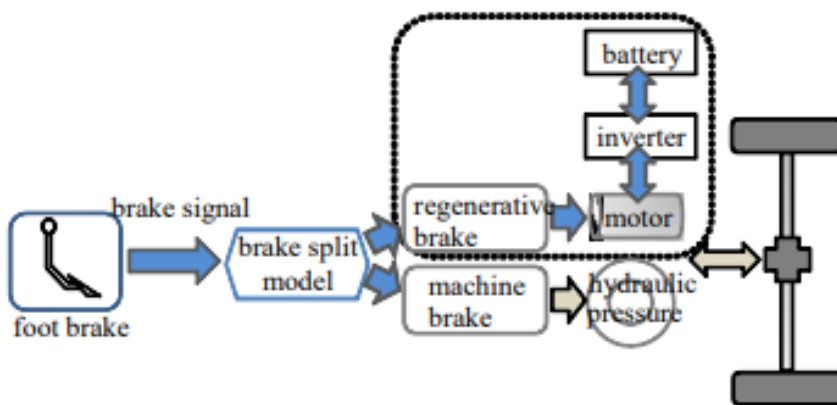
Ruotsalainen RISE (*Research Institutes of Sweden*) on todennut 2019 julkaisemassaan raportissaan *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*, että pääasialliset sähköautojen akkujen syttymissyyt ovat seuraavat:

1. Akkukennon sisällä tapahtuva oikosulku voi johtua akustoon kohdistuvasta ulkoisesta voimasta, käytettävien materiaalien heikkolaatuisuudesta tai valmistusvirheestä (RISE 2020a, 33–34).
2. Akun mekaanisesta vaurioitumisesta johtuva oikosulku voi johtua esimerkiksi kolaritilanteessa aiheutuneesta törmäysvoimasta. Akkupaketin suojarakenteiden mekaaninen vaurioituminen altistaa akun oikosulun mahdollistamaan tilaan, jos akusto joutuu kosketuksiin veden kanssa. (RISE 2020a, 34–36.)
3. Lataustilanteessa akun lataamista seuraava BMS-järjestelmä ei toimi suunnitellulla tavalla. Järjestelmähäiriön seurauksena tapahtuu yllätaut, jolloin akkukennossa syntyy oikosulun mahdollistavia muutoksia (RISE 2020a, 36–37).
4. Akun ylipurkauksessa BMS-järjestelmän toimintahäiriöstä johtuva akun purkautuminen johtaa liian alhaiseen varaustilaan. Jännitteen laskiessa alle minimitason akkukennon sisällä tapahtuvien kemiallisten muutoksien johdosta voi syntyä oikosulku. Pitkäaikainen säilytys talviolosuhteissa voi johtaa akun ylipurkaukseen. (RISE 2020a, 37–38.)
5. Ulkoinen oikosulku voi johtua akuston mekaanisesta vaurioitumisesta (katso kohta 2.), veden pääsemisestä akustoon ajoneuvon joutuessa veden alle tai ulkoisen sähköiskun seurauksena (esimerkiksi huollon aikana) (RISE 2020a, 38–39).

6. Akuston altistuminen korkeille lämpötiloille voi johtua esimerkiksi muualla autossa olevasta tulipalosta tai akustossa lämpöä kerryttävästä valmistusvirheestä. Akuston altistuessa korkealle lämpötilalle, jota BMS-järjestelmä ei kykene hillitsemään, muodostuu akkukennoissa sisäinen oikosulku (katso kohta 1.) (RISE 2020a, 39–40).

Merkittävää todistusaineistoa täyssähköautojen korkeammasta syttymisriskistä verrattaessa polttomoottoriautoon ei ole, ja voidaan todeta, että täyssähköautojen syttymisriski saattaa olla pienempi. Tutkimusten mukaan tavanomaiset polttomoottoriautojen tulipalot aiheutuvat useasti polttoaineen päästessä vuotamaan ajoneuvossa riittävän kuumalle pinnalle, minkä seurauksena herkästi syttyvä neste syttyy palamaan. (Willstrand 2020.)

Huomioitavaa on myös, että sähköautojen voimalinjassa on tyypillisesti jarrutuksessa syntyvän kiineettisen energian talteenottojärjestelmä (regenerointi/rekuperatio). Kuvassa 12 on havainnollistettu talteenottojärjestelmän toiminta. Regenerointi vähentää tavanomaisten jarrujen käyttöä, minkä seurauksena jarruelementtien ylikuumentuminen on harvinaisempaa.



Kuva 12. Sähköauton jarrutusenergiasta regeneroiva järjestelmä (Yabe ym.).

Täyssähköautoissa polttoaineen kaltaista palavaa nestettä ei ole, joten sen osalta voidaan arvioida syttymisriskin olevan pienempi. Täyssähköautojen akkujen paloturvallisuuden osalta suurin tekijä on käytetty akkutyyppi. (Willstrand 2020.)

4.3 Lämpökarkaaminen

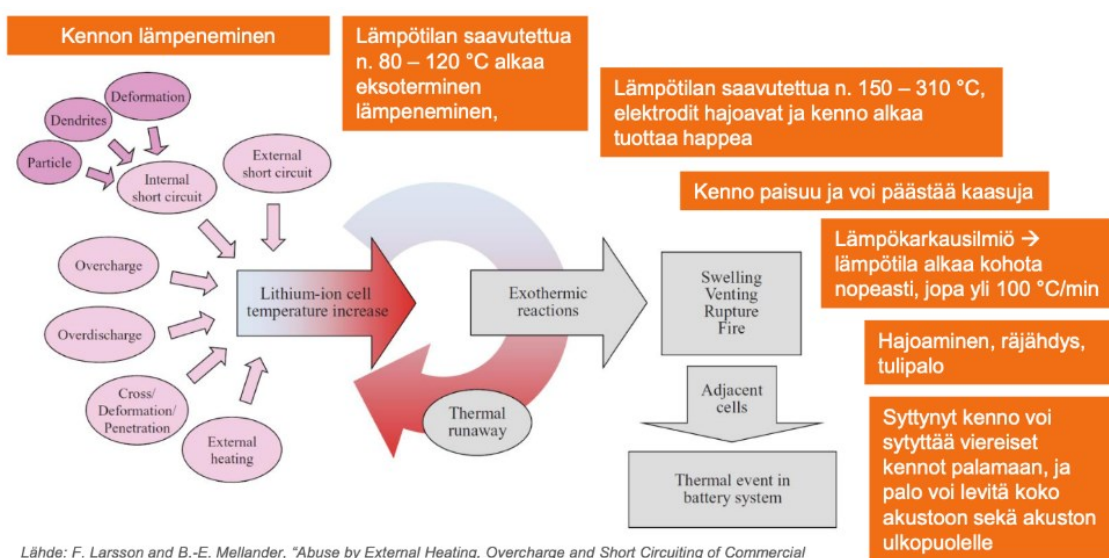
Tässä opinnäytetyössä korostuu hybridi- ja täyssähköauton akustossa tapahtuvasta lämpökarkaamisesta (*engl. thermal runaway*) johtuvat autopalot tai sähköautojen tulipalot, jotka ovat johtaneet akuston lämpökarkaamiseen. Lämpökarkaaminen on tapahtuma, jossa akustossa on syntynyt hallitsematon ketjureaktio. Ketjureaktion seurauksena akkukenno kuumenee itsekseen. Tyypillisesti hallitsemattomaan ketjureaktioon johtava lämpeneminen tapahtuu joko ulkoisesta lämmöstä tai jonkinlaisesta viasta korkeajännitejärjestelmässä. Lämpökarkaamisprosessin pysäyttäminen tai prosessia hidastava vaikuttaminen ulkopuolisesti on hankalaa.

Lämpökarkaamiseen johtava ketjureaktio alkaa, kun yksi akkukkenno saavuttaa niin korkean lämpötilan, että akkukennon sisällä tapahtuvan kemiallisen reaktion seurauksena alkaa vapauttamaan happea. Muodostuva happi kiihdyttää prosessia, minkä johdosta akkukennon lämpötila nousee edelleen. Lämpötilan noustessa noin 80°C:seen akkukennon anodin pintakerros alkaa hajoamaan eksotermisessä (lämpöenergiaa vapauttavassa) reaktiossa. (Warner 2019, 67.)

Akkukennon lämpötilan noustessa noin 100–120°C:seen, alkavat kemialliset reaktiot (mm. elektrolyytin hajoaminen) kennon sisällä kiihtymään ja muodostamaan eksotermisena reaktion lisää lämpöä ja painetta. Kohoavan lämpötilan vaikutuksesta akkukennossa alkaa vapautumaan useita palavia kaasuja (hiilimonoksidia, metaania, etaania, etyleeniä ja vetyä) akussa käytetyn litiumioniteknologian mukaan. Ketjureaktion jatkuessa kohoava lämpötila sulattaa lopulta elektrodeja eristävän rakenteen (separaattori), jolloin elektrodit pääsevät suoraan kontaktiin. (Warner 2019, 67.)

Elektrodien suoran kontaktin seurauksena akkukkenno on oikosulussa, mikä aiheuttaa edelleen lämpötilan nousemista. Noin 150°C:n lämpötilassa katodi alkaa hajoamaan kemiallisesti vapauttaen lisää happea ja kiihdyttää prosessia entisestään. Tulipalo syttyy, kun LiPF₆ katodi ja vapautuva happi yhdistyvät. Muut vapautuvat palavat kaasut kiihdyttävät paloa. (Warner 2019, 67.)

Lämpötilan noustessa noin 150–180°C:n lämpötilaan reaktio on itseään ruokkiva ja jatkuu, kunnes kaikki palavaksi kelpaava materiaali on kaasuuntunut ja palanut loppuun. Palo voi tapahtua kennon sisällä ilman kontaktia ilmaan, koska reaktiossa vapautuu happea useassa vaiheessa. Usein kuitenkin kennojen ylipaineventtiilit vapauttavat erittäin suureksi nousseen paineen ja palo jatkuu kennon ulkopuolella. Lämpökarkaamisen seurauksena ylikuumentunut akkukkenno alkaa lämmittämään viereisiä kennoja, mikä johtaa vastaavan reaktion kehittymiseen. (Warner 2019, 67.) Lämpökarkaamisen kehityskulku on esitettyä kuvassa 13.



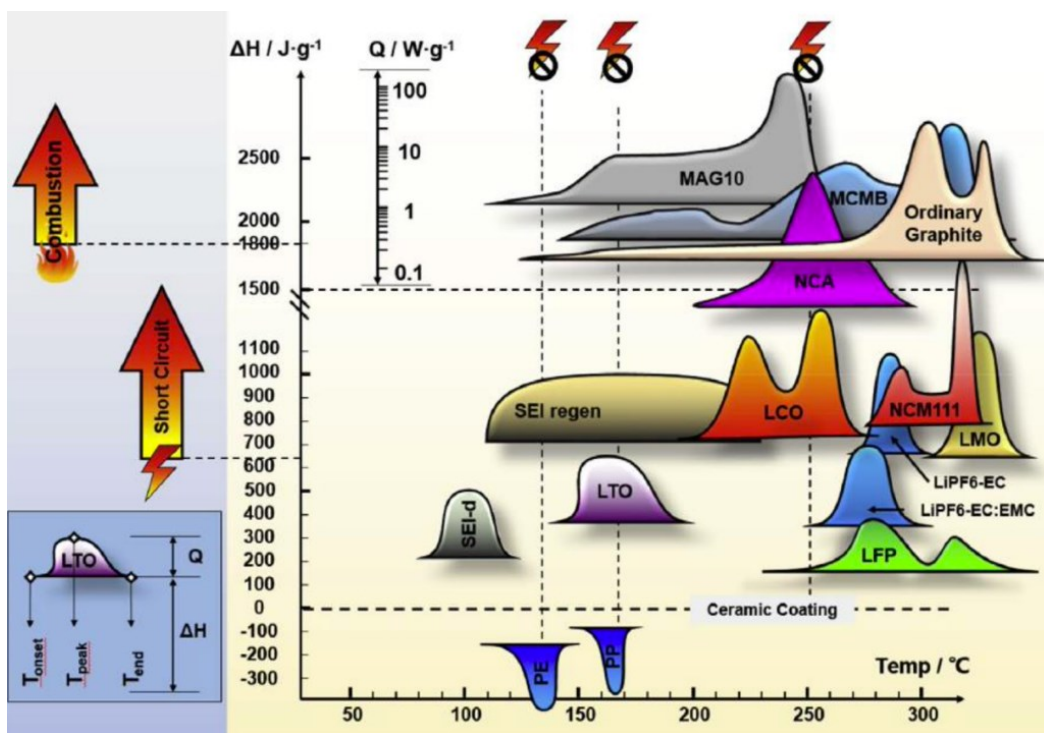
Kuva 13. Lämpökarkausilmiö (VTT).

4.4 Palokuorma ja paloteho

Sähköauton akuston latauskapasiteettia voidaan verrata perinteisen polttomoottoriauton polttoainetankin tilavuuteen. Sähköauton akuston latausaste vastaa polttomoottorikäyttöisen ajoneuvon polttoainemäärästä muodostuvaa palokuormaa. Maailmalla 2010-luvulla toteutuneiden erillisten polttokokeiden, joissa tutkittiin polttomoottori- ja täyssähköautopalojen eroavaisuuksia, tuloksista voidaan todeta, että maksimaaliset palotehot ja kokonaisuudessaan muodostuneet lämmön vapautumisasteet ovat olleet lähellä toisiaan. (Suosalo 2020, 18–20.)

2020 julkaistun monikansallisen tutkimuksen perusteella havaittiin saman kaltaisuutta edellisellä vuosikymmenyksellä teetettyihin tutkimuksiin, mutta sen lisäksi havaittiin sähköautopalon saattavan tuottaa myrkyllisiä kaasuja enemmän kuin polttomoottorikäyttöisen auton palo. Tutkimuksessa ilmeni myös, että akun uudelleensyttymisriskin vuoksi sähköautopalon sammuttaminen on tavanomaista autopaloa haasteellisempää. (Suosalo 2020, 20.)

Kuvassa 14 esitetään eri akkumateriaaleista vapautuvia energiamääriä lämpötilan funktiona. Taulukossa 3 ovat suomennettuna kuvassa 14 esiintyvien akkumateriaalien lyhenteet. Kuvassa 14 eri materiaalien palamisreaktioiden kuvaajien leveydet osoittavat lämpötila-alueet, joissa reaktiot tapahtuvat. Kuvaajien sijoittuminen y-akseliin nähden osoittaa kunkin reaktion entalpian tason (ΔH) jouleina ja kuvaajien korkeus reaktioiden palotehoa (Q) watteina. (Zeng ym. 2021, 17.) Entalpia on energiaa ilmaiseva suure, joka määrittyy kemiallisen reaktion loppu- ja alkutilan energiamuutoksesta (Opetus.tv).



Kuva 14. Eri akkumateriaalien entalpiat ja palotehot (Zeng ym.)

Taulukko 3. Kuvassa 16 esiintyvät akkumateriaalit.

KATODI	SEPARAATTORI	ANODI	ELEKTROLYYTTI	SEI-KERROS
LFP - litiumrautafosfaatti	PE - polyeteeni	Gr - grafiitti	orgaanisia liuottimia	litiumioneja
NCM - nikkelimangaanikoboltti	PP - polypropeeni	C - hiili	litiumsuoloja	elektrolyytin liuottimia
LTO - litiumtitanaatti			lisäaineita	suoloja
LCO - litiumkobolttioksidi				epäpuhtauksia
LNO - litiumnikkelioksidi				

Huomioitavaa kuvassa 14 on ensimmäinen lämpökarkaamiseen liittyvä akkumateriaalin eksoterminen reagoiminen, kun lämpötila on noussut noin 80°C:seen asteeseen. Tällöin akkukennon lämpökarkaamiseen johtavia reaktioita ovat anodin pinnassa olevan SEI-kerroksen hajoaminen ja regeneroituminen sekä reaktio litioidun grafiittianodin ja elektrolyytin välillä. (Zeng ym. 2021, 17.)

5 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

5.1 Tutkimusmenetelmä

Tämän opinnäytetyön tutkimuksellisenä osana olen hakenut pelastustoimen PRONTOon kirjaamat raportit Suomessa tapahtuneista täyssähkö- tai hybridautojen tulipaloista tai tilanteista, joissa tulipalo olisi voinut syttyä ilman pelastuslaitoksen toimenpiteitä. Olen tehnyt sisällönanalyysiä haussa saaduista raporteista sekä Vesa Linja-ahon 7.4.2022 julkaisemasta *Litiumakkuteknikka, rakenne – ominaisuudet – turvallisuus* -julkaisusta saataviin tietoihin perustuen. Eri tietolähteiden sisällölle toteutettavan analyysin perusteella olen tuonut esiin Suomen pelastuslaitoksien tähän mennessä toteuttamat toimenpiteet täyssähkö- tai hybridautojen tulipalotehtävillä sekä kirjannut pelastustoimenjohtajien onnettomuusselosteisiin kirjaamat arviot tulipalojen syttymissyistä.

Yhdysvalloissa tapahtuneiden autopalojen osalta olen kerännyt tietoa eri tietolähteistä, jotka ovat avointa tietoa ja joita olen pitänyt luotettavina lähteinä. Pääpaino materiaalin analysoinnissa kohdistuu sähköautopaloista tehdyille onnettomuustutkintaraporteille. Olen ensin tehnyt raporteista käännökset, joiden pohjalta olen toteuttanut sisällön analyysiä teemoittelemalla autopaloihin liittyviä ilmiöitä ja pelastuslaitoksen sammutustoimenpiteitä. Analysoinnin tulokset ovat luvussa 6.

5.2 Tutkimuksen tekeminen

PRONTO-materiaalin keräämisen ja muokkaamisen tutkimuksen toteuttamiseksi olen hakenut raportit PRONTOon vapaa poiminta -toiminnolla. Olen soveltanut tehtävien poiminnassa Vesa Linja-ahon aiemmin laatimaa ja tallentamaa hakua, jossa oli valmiit hakuparametrit. Havaitsin, että parametrihaku tuli muokata osin, jotta tutkimusmateriaaliksi sai enemmän tapahtuneita tehtäviä.

Toisena osana tutkimuksellista osuutta olen perehtynyt Yhdysvalloissa tapahtuneisiin ja raportoituihin täyssähkö- tai hybridautojen tulipaloihin. Raportit eivät ole pelastuslaitoksien laatimia, vaan olen perehtynyt Yhdysvaltain hallinnon alaisen itsenäisen kansallisen liikenneturvallisuuslautakunnan National Transportation Safety Board (NTSB) -järjestön kirjaamaan *Safety Report* -raporttiin. Raportissa esitellään tutkimustuloksia sähköautoille sattuneista autopaloista Yhdysvaltojen alueella. NTSB:n asema Yhdysvalloissa on verrattavissa Suomen Onnettomuustutkintakeskukseen.

NTSB:n raportin lisäksi olen ottanut osaksi tutkimuksellista materiaalia itsenäistä markkinatutkimusta tuottavan Yhdysvaltalaisen IDTechEx:n sekä Yhdysvalloissa eri autovakuutuksien tutkimusta suorittavan AutoInsuranceEZ.com teettämästä datasta. Edellä olevat tahot on käyttäneet lähdetietona NTSB:n tuottamaa dataa.

5.3 Sähköautojen tulipalot Suomessa

PRONTO:n vapaa poiminta -tilastossa on luotu valmis pohja hybridi- tai täyssähköautojen tulipalojen hakemiseksi. Se sisältää seuraavat hakuehdot poiminnalle:

Poiminta

Vuosi = 2022, 2021, 2020, 2019, 2018, 2017

Onnettomuustyyppi (myös toissijaiset) = Liikennevälinepalo

Tekstihaku kaikista kentistä: jokin sanoista = AJOAKKU SÄHKÖAUTO

HYBRIDI PRIUS TESLA LEAF ID.3 ID.4 E-GOLF TAYCAN EQC EQS EQA E-TRON
ETRON;

Onnettomuustyyppi (ensisijainen) = Liikennevälinepalo

Onnettomuus-/tehtäväselosteet = Onnettomuusselosteet

Onnettomuusselosteiden liitteet (yt-selosteet) = Ei

Selosteiden vanhat versiot = Ei

Haettiin yhteensä: 29 riviä.

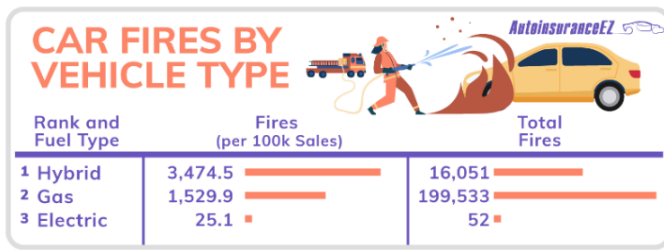
(PRONTO)

Näillä hakuehdoilla vuosilta 2017–2022 (toukokuu) saadaan yhteensä 18 tehtävää, jotka olen ottanut tarkasteltavaksi. Näissä tehtävissä on ollut kyse hybridi- tai täyssähköauton tulipalosta tai tilanteesta, joka olisi todennäköisesti johtanut autopaloon. Tarkastelun kohteena olevat tehtävät ovat vaatineet kohteeseen hälytetyltä pelastuslaitokselta sammutus-, raivaus- sekä lisävahinkojen torjuntatoimenpiteitä. Olen myös huomionut yhtenä toimenpidevaihtoehtona pelastustoimen suorittaman palavan ajoneuvon hallitun loppuun palamisen siten, että tilannepaikka on eristetty eikä tilanteesta aiheudu ylimääräistä vaaraa ympäristölleen. Näitä tilanteita oli tarkasteltavista tehtävistä yksi kappale.

Tarkasteltavat liikennevälinepalotehtävät ovat johtuneet akustossa olevasta tulipalosta, epäilyyn akustossa käynnissä olevasta lämpökarkaamisesta tai muusta ajoneuvon akuston tai korkeajännitejärjestelmän normaalista poikkeavasta palovaarallisesta toiminnasta. Taulukoidut tiedot tehtävistä ovat tämän opinnäytetyön liitteenä (LIITE 1).

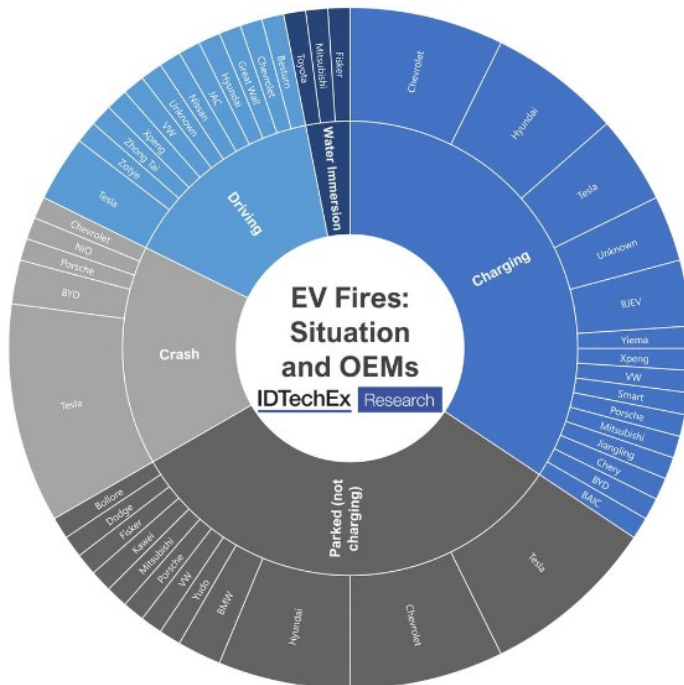
5.4 Sähköautojen tulipalot Yhdysvalloissa

NTSB:n tietoihin perustuen AutoInsuranceEZ.com on esittänyt (Kuva 15), että Yhdysvalloissa tapahtuvia autopaloja on 25,1 kappaletta jokaista 100000 myytyä täyssähköautoa kohden, kun polttomotorikäyttöisille autoille esiintyvyys on ollut 1530 kappaletta. Hybridiautoilla autopalojen esiintyvyys on ollut 3475 kappaletta myytyä 100000 ajoneuvoa kohden. (AutoInsuranceEZ.com.)



Kuva 15. USA:ssa sattuneet autopalot ajoneuvotyypin mukaan (AutoInsuranceEZ.com).

IDTechEx on julkaissut tammikuussa 2022 artikkelin, jossa on koostettuna NTSB:lta saadusta datasta täyssähkö- ja hybridiautojen tulipaloihin liittyvää tietoa. Artikkelin yhteydessä on kuva, jossa havainnollistetaan piirakkadiagrammina autovalmistajien automalleille eri tilanteissa tapahtuneet autopalot (Kuva 16).



Kuva 16. Eri autovalmistajien osuudet täyssähkö- ja hybridiautoille eri tilanteissa tapahtuneista tulipaloista Yhdysvalloissa (IDTechEx).

Artikkelissa kerrotaan, että autovalmistaja Teslan mukaan heidän autoillensa tapahtuvia tulipaloja olisi yksi jokaista 205 miljoonaa ajettua kilometriä kohden, jolloin niiden frekvenssi olisi harvempaa, kuin yksi kymmenestä polttomoottorikäyttöisille autoille tapahtuneista tulipaloista. Yhdysvaltalainen Pinfa (Phosphorous, Inorganic and Nitrogen Flame Retardants Association) on arvioinut, että polttomoottorikäyttöisille autoille sattuvia tulipaloja olisi 55 kappaletta ajettua miljardia mailia kohden ja sähköautoilla viisi kappaletta. (IDTechEx.)

NTSB:n raportin onnettomuustutkintaselosteet

Olen kääntänyt tässä luvussa olevat onnettomuustutkintaselosteet NTSB:n 2020 julkaisemasta *Safety Report, Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles* -raportista.

Lake Forest, Kalifornia, elokuu 2017

Kuljettaja oli menettänyt täyssähköauton hallinnan ja törmännyt asuinrakennusta päin. Autotalli ja siellä ollut henkilöauto syttyi palamaan. Pelastuslaitos sammutti palavan autotallin sekä autotallissa olleen henkilöauton. Muu rakennus oli edelleen tulessa. Autotalliin törmännyt sähköauto syttyi uudelleen useita kertoja. Autotallin rakenteiden sortumisen estämisen jälkeen pelastuslaitos hinasi sähköauton ulos, jolloin voitiin varmistaa, että kyseessä oli täyssähköauto. Sähköauto syttyi jälleen palamaan. Pelastuslaitos sammutti auton vedellä. Samaan aikaan rakennuspalo oli saatu hallintaan.

Sähköauto alkoi savuttamaan voimakkaasti 45 minuutin päästä ja syttyi uudelleen palon muistuttaessa kaasutohon liekkipalaa. Autopaloa yritettiin sammuttaa suihkuttamalla vettä 200 gal/min (757 l/min), mutta tällä ei ollut vaikutusta. Pelastuslaitos päätti antaa auton sisäpuolisten rakenteiden palaa loppuun. Tämän jälkeen autoa nostettiin tunkilla siten, että vettä saatiin suihkutettua auton pohjaan. Vettä suihkutettiin sähköauton pohjaan 45 minuutin ajan jäähdytysvesimäärän virtauksen ollessa suurimmillaan 600 gal/min (2271 l/min). Tämän jälkeen akkupalo sammui.

Pelastustoiminnan johtajan mukaan sähköauton olisi annettu palaa hallitusti loppuun kokonaan, ellei tilannepaikka olisi sijainnut keskellä asutusaluetta, jossa tulipalon leviäminen ja autopalon ympäristölle aiheuttamat terveyshaitat aiheuttivat liian suuria riskejä. Sähköauto syttyi uudelleen palamaan, kun autoa oltiin siirtämässä hinausauton kyytiin. Akustoa jäähdytettiin uudelleen vesisuihkulla, ja akkupalo sammui. Tapahtumasarjan kesto oli yhteensä kuusi tuntia. Pelastuslaitoksen arvio vedenkuluuksesta sähköauton akkupalon sammutus- ja jäähdytystoimenpiteisiin oli 20000 gallonia (75708 litraa). Akusto alkoi savuttamaan uudelleen sen jälkeen, kun auto oli jätetty onnettomuusautovarikolle. Auto ei kuitenkaan enää syttynyt palamaan.

Onnettomuustutkinnassa selvisi, että sähköauton akusto oli vaurioitunut törmäyksen yhteydessä oikeasta etukulmasta, jolloin akkukennojen suojaaviin rakenteisiin oli tullut repeämä ja akkukennot olivat tulleet esiin. Sähköauton 16 akkumoduulista kuudessa oli havaittu erityyppisiä vaurioita. Vaikka 80 % akkupaketin suojakuoresta oli vaurioitunut ja akusto oli kärsinyt lämpövaurioita, suurin osa akustosta oli säilynyt ehjänä. Autopalon kesto ja useat uudelleensyttymiset viittasivat siihen, että akustossa oli edelleen varastoituneena energiaa onnettomuudesta huolimatta.

Mountain View, Kalifornia, maaliskuu 2018

Täyssähköauto ajautunut moottoritiellä liikenteenjakkajan törmäyksenvaimentimeen ajonopeuden ollessa 71 mph (116 km/h). Pelastuslaitoksen saapuessa kohteeseen autopalo oli saatu nopeasti sammutettua käyttämällä veden ja vaahdotteen sekoitusta. Sammutus oli toteutettu auton molemmista päistä, ja vettä oli kulunut yhteensä 200 gallonaa (757 litraa). Sammutuksen yhteydessä oli havaittu valokaari auton etupäässä.

Liekkipalon sammuttamisen jälkeen havaittiin, että onnettomuusautosta oli tullut näkyviin sähkökaapeleita. Samalla alkoi autosta kuulumaan poksahduksia ja syntyi savunmuodostusta. Pelastuslaitos jatkoi veden suihkuttamista kohti autoa. Sammutustoimenpiteiden ohessa pelastuslaitos pyrki mittaamaan jännitteitä auton rakenteista sekä sähkökaapeleista siinä onnistumatta käytettävän mittauslaitteen ominaisuuksien takia.

Pelastustoiminnan johtaja oli yhteydessä ajoneuvovalmistajaan saadakseen lisätietoja ajoneuvon ominaisuuksista ja toimintaohjeita, kuinka onnettomuustilanteessa tulisi toimia. Pelastuslaitoksen taktiikaksi ohjeistettiin tilannepaikan eristys lisäonnettomuuksien ehkäisemiseksi niin pitkäksi aikaa, että kohteeseen saapuu autovalmistajan asiantuntija-apua. Onnettomuuskohteen eristys toteutettiin viranomaisyhteistyönä. Eristyksen aikana onnettomuusautosta kuuluva poksahdus jatkui, mutta liekkipaloa ei syntynyt.

Kun autovalmistajan asiantuntijat saapuivat, alkoivat he keräämään tilannepaikalla olevaan suuren vedellä täytettyyn saaviin akustosta irronneita akkukennoja sekä kokonaisen akkumoduulin. Autosta yritettiin irrottaa akuston vaurioituneita osia, jolloin poksahdelevat äänet jatkuivat. Samalla havaittiin, että auton alusta oli vääntynyt. Havaittuaan, että akusto oli pääosin ehjä, päättivät asiantuntijat pitäytyä vaurioituneiden osien keräämisestä raivaustoiminnan ollessa liian riskialtista akuston varaustilan takia.

Onnettomuusauto päätettiin siirtää turvallisempaan paikkaan onnettomuusautovarikolle. Siirto toteutettiin nostamalla onnettomuusauto siirtoauton lavalle ja varmistamalla pelastuslaitoksen nopea reagointi uudelleen syttymisen varalta saattamalla kuljetus sammutusautolla. Onnettomuusauton peitauksessa kuljetuslavalla käytettiin puisia petauspaloja, joilla estettiin mahdollinen korkeajännitevirran johtuminen kuljetusauton metallisiin lavarakenteisiin.

Siirtoauton saavuttua onnettomuusautovarikolle ilmeni haastavaksi jatkotoimenpiteeksi toteuttaa autovalmistajan onnettomuustoimintaohjeen mukainen 50 jaardin (46 metrin) eristysalue. 20 minuuttia saapumisen jälkeen alkoivat poksahdelevat äänet kuulumaan uudelleen, minkä suorauksena kohteeseen hälytettiin paikallinen pelastuslaitos. Saavuttuaan tilannepaikalle pelastuslaitos oli tutkinut auton lämpökameralla ja havaittuaan, että autossa ei ollut merkittäviä lämmön nousuja, oli he poistunut kohteesta. Vajaan tunnin päästä akusto oli syttynyt uudelleen palamaan ja pelastuslaitos oli hälytetty

uudelleen kohteeseen. Pelastuslaitoksen ollessa jälleen kohteessa autopalo oli sammunut itsestään ennen sammutustoimenpiteitä.

Viiden päivän kuluttua onnettomuusauto oli syttynyt uudestaan. Palon epäillään saaneen alkunsa aiemmin päivällä tehdyn onnettomuusauton tutkinnan yhteydessä. Pelastuslaitoksen saapuessa kohteeseen pressulla peitetyn auton oikeasta etukulmasta nousi muutamien kymmenien senttien pituiset liekit. Liekkipaloa pyrittiin alkuun sammuttamaan sammutusauton mukanaan kuljettamalla vesi-vaahdoteseoksella. Sammutusauton 500 gallonan (1892 litraa) vesisäiliön tyhjennettyä pelastuslaitos teki lisävesiselvityksen maanpäällisestä palopostista ja jatkoi liekkipalon sammuttamista 30–40 minuuttia. Tänä aikana arvioitu sammutusveden kulutus oli 600–700 gallonaa (2271–2650 litraa).

Sammutustoimenpiteiden aikana huolena ollut korkeaajännitesähkön mahdollinen johtuminen pitkin suihkutettavaa sammutusvettä aiheutti sen, että vettä oli suihkutettu katkonaisesti. Pelastustoiminnan johtajan saatua varmistus autovalmistajalta suorasuihkuksena toteutettavan sammutustaktiikan turvallisuudesta oli autopalo sammutettu vesi-vaahdoteseoksella viidessä minuutissa.

Pelastuslaitoksen vaarallisten aineiden torjuntaan erikoistunut yksikkö teki kohteessa sadevesiviemäriin kerääntyneelle sammutusjätevedelle mittaustoimenpiteitä. Mittaustuloksien perusteella sammutusjätevesi todettiin ympäristölle haitalliseksi, minkä johdosta sammutusjätevesi kerättiin talteen ja toimitettiin jatkokäsittelyyn.

Onnettomuustutkinnan yhteydessä pyrittiin purkamaan akustoon varastoitunut energia hallitusti. Tähän tarkoitukseen tarkoitettu akkupaketin pohjassa oleva energianpurkuportti oli korkeaenergisestä onnettomuudesta ja autopalosta huolimatta edelleen ehjän pohjapanssarin takana. Tutkijoiden poistettua purkuportin suojatulpan oli akustoon kerääntynyt sammutusvesi päässyt valumaan pois. Pois valuneen veden jälkeen oli akkupaketin suojarakenteiden sisäpuolella havaittavissa mutaa ja roskaa. Akustossa ollut vesi ja ylimääräinen irtojäte oli vioittanut purkuportin toimimattomaksi. Akuston eri moduuleihin varastoitunutta energiaa oli yritetty purkaa, mutta akuston eri osat olivat niin pahasti vioittuneet, ettei toimenpiteessä onnistuttu. Akuston eri osiin suoritettujen jännitemittauksien jännitemääristä (3–25 V) voitiin päätellä, että akustoon varastoituneen korkeaajännitteen aiheuttamat riskit olivat ilmeisiä.

Tutkimuksien edetessä havaittiin, ettei akuston BMS ollut enää toiminnassa. Tämän takia tutkijoilla ei ollut saatavilla tarkempaa tietoa akuston tilasta. BMS:n ja purkuportin toimimattomuuden takia onnettomuustutkijat päätyivät tutkimaan käsin akuston tarkemmin. Tutkimuksissa selvisi, että akuston 16 moduulista kaksi oli säilynyt ehjänä.

Fort Lauderdale, Florida, toukokuu 2018

Asutusalueella huomattavaa ylinopeutta ajanut täyssähköauton kuljettaja oli menettänyt autonsa hallinnan ja ajautunut asuintalon pihatien viereiseen muuriin. Auto oli törmäyksen yhteydessä syttynyt tuleen ja ajautunut takaisin tielle. Pelastuslaitoksen saapuessa tilannepaikalle paloi auto voimakkaimmillaan etuosastaan. Autopaloa aloitettiin sammuttamaan käyttämällä sammutusauton veden ja vaahdotteen seosta. Sammutusauton 500 gallonan (1293 litraa) vesisäiliön tyhjennettyä oli pelastushenkilöstö siirtynyt käyttämään vesijohtoverkoston maanpäällisestä palopostista saatavaa lisävettä.

Auton sisäpuolinen tulipalo oli sammunut muutamissa minuuteissa, minkä jälkeen sammutustoiminta keskittyi auton oikeaan etukulmaan, jossa oli havaittavissa valokaari. Auton a-pilarin kohdalla pohjassa oli nähtävissä vaurioituneen akkumoduulin sisältäviä yksittäisiä akkukenkoja. Kadulta löytyi myös kaksi suurta akuston osaa, jotka eivät olleet tulella. Jäljellä ollut osa akkupaketista oli irronnut osittain auton alustarakenteista ja oli katua vasten. Akkupalon sammutukseen käytettävä sammutusvesimäärä oli 200–300 gallonia (757–1136 litraa).

Kun sammutustoimenpiteiden jälkeen autoa oltiin hinaamassa siirtolavan kyytiin, oli auton akkupaketti irronnut kokonaan ja syttynyt palamaan. Palava akkupaketti sammui nopeasti pelastuslaitoksen vesi-vaahdoteseoksella. Akkupaketti oli syttynyt hetken päästä jälleen, kun akkupakettia ja muuta autosta irronnutta tavaraa oltiin sitomassa ketjulla kuljetuslavan kyytiin. Tällöin akkupalo sammui itsestään.

Kolmen tunnin päästä kuormauksesta, kun kuljetuslavalla siirrettyä tavaraa oltiin purkamassa, alkoi akkupaketista muodostumaan valokaarta ja savua. Valokaari ja savunmuodostus loppuivat itsestään ilman sammutustoimenpiteitä. Vahinkoautovarikolla onnettomuusauton eri osat eristettiin 20 jaardin (18 metriä) etäisyydellä palavasta materiaalista.

Onnettomuustutkinnassa selvisi, että akkupaketin suojakotelointi oli vaurioitunut merkittävästi etuosastaan. Suojakotelon sisällä olevista akkumoduuleista suurin osa oli kuitenkin vielä ehjiä. Usean akkumoduulin kuumuuteen reagoivat ylipaineventtiilit olivat toimineet suunnitellusti. Ylipaineventtiileissä tai venttiilikanavista ei löytynyt merkkejä sammutusvedestä tai muusta sinne kuulumattomasta materiaalista. Akkumoduulien jännitemittauksissa selvisi, että 15 moduulissa oli edelleen varastoitunutta sähköenergiaa 3,3–167,3 V.

West Hollywood, Kalifornia, kesäkuu 2018

Täyssähköauto oli alkanut savuttamaan kesken ajon ja syttynyt tuleen sen jälkeen, kun kuljettaja oli pysäyttänyt auton tien sivuun. Paikalle saapunut poliisipartio alkoi ohjaaman liikennettä tilannepaikan ohi. Kohteeseen hälytetty pelastuslaitoksen sammutusauton pelastushenkilöstö sai sammutettua autopalon. Liekkipalon sammuttamisen jälkeen auton korkeajännitejärjestelmä eristettiin leikkaamalla auton 12 V -järjestelmän kaapelin poikki kohdasta, jonka autonvalmistaja on siihen tarkoitukseen merkinnyt. Tämän jälkeen vesi-vaahdoteseosta levitettiin auton eri osiin.

Vaikka näkyvät liekit olivat sammutettu, jatkui savunmuodostus autosta edelleen. Autoa jäähdytettiin 30 minuutin ajan. Auton vasemman etukulman rakenteita raivattiin pois jäähdytysveden saamiseksi paremmin kohtiin, joissa jäähdytyksen arvioitiin vaikuttavan parhaiten. Pelastustoimenjohtajan arvioima sammutus- ja jäähdytysveden määrä oli yhteensä 300 gallonaa (1136 litraa). Tarvetta lisävesiselvitykselle ei ollut.

Pelastustoimenjohtaja oli konsultoinut autovalmistajan asiantuntijaa edelleen jatkuvan savunmuodostuksen takia. Asiantuntija oli neuvonut jatkamaan akuston jäähdyttämistä niin kauan, kuin savunmuodostusta esiintyy. Onnettomuusauto päädyttiin kuitenkin siirtämään pois vilkkaasti liikennöidyltä tieosuudelta, jotta liikenne voisi palautua normaaliksi, vaikka asiantuntijat olivat varoittaneet uudelleen-syttymisen riskistä. Onnettomuusauto ei syttynyt enää uudelleen.

Onnettomuustutkinnassa selvisi, että yksi akkumoduuleista oli vaurioitunut ja muut 15 olivat ehjiä. Vaurioitunut moduuli oli eristetty ja muiden akkumoduuleiden varaustasoa laskettiin puoleen latauskapasiteetistaan, jotta niiden siirtäminen ja tutkiminen olisi turvallista. Tutkimuksissa ei havaittu, että akkupalon olisi aiheuttanut törmäys tai jokin muu ulkoinen tekijä. Palon syyksi oli arvioitu akuston sisäinen toimintavika.

6 TUTKIMUSTULOKSET

PRONTOsta kerätyille materiaalille laaditusta taulukosta (LIITE 1) on nähtävissä tilanteisiin liittyvien eriteltyjen ilmiöiden tai toimenpiteiden toistuvuus. Eri ilmiöt tai toimenpiteet ovat sarakkeiden otsikoina ja rivit ovat onnettomuusselosteista tehtyjä koonteja. Olen kirjannut Suomessa tapahtuneet tehtävät siten, että selkeästi yksilöivät tiedot ovat häivytettyjä. Tosin sähköautoille tapahtuneita tilanteita on ollut verrattain vähän, joten rivikohtaisia tietoja lukiessa on mahdollista, että tapahtuman voi tunnistaa.

NTSB:n *Safety Report* -onnettomuustutkintaraporttien tiedot ovat olleet julkisia ja vapaasti luettavissa verkkojulkaisuna, joten en nähnyt tarvetta yksilöivien tietojen häivyttämiseksi. Raporttien analysoinnissa en taulukoinut ilmiöitä tai toimenpiteitä raporttien vähäisen määrän takia.

6.1 Pelastuslaitoksen suorittamat sammutustoimenpiteet Suomessa

Sammutus vedellä – Tarkasteltavista tehtävistä 12 tapauksessa (67 %) olivat autopalot sammutettu vedellä. Raporteista ei käy ilmi sammutustekniikkaa, mutta oletettavaa on, että sammuttaminen on toteutettu perinteisesti työjohtoselvitystä (tarkempi kuvailu menetelmästä luvussa 7.3) käyttäen.

Pelastuslaitoksen käyttämät tapauskohtaiset sammutusvesimäärät vaihtelivat suuresti sadoista litroista kymmeneen kuutioihin. Yhdessä tapauksessa on oletettavaa, että PRONTO-raportin mukainen 400 m³ sammutusvesimäärä olisi yksikkövirhe, jolloin todellinen käytetty sammutusvesimäärä olisi 400 litraa. Muissa suuren sammutusvesimäärän vaatineissa tehtävissä on sammutustoimenpiteiden jälkeen toteutettu auton upotus veteen lisäonnettomuuksien estämiseksi epäillyn tai todennäköisen lämpökarkaamisen takia.

Kolmessa tapauksessa kahdestatoista oli sammuttamisen jälkeen toteutettu palaneen ajoneuvon vaahdottaminen. Tällä toimenpiteellä pyritään estämään autopalon uudelleensyttyminen liekkipalon sammuttamisen jälkeen. Näissä kolmessa tapauksessa oli ollut kyseessä hybridiauto, jossa voi olla sammutustoiminnan varmistamisen näkökulmasta merkittäviä määriä polttoainetta. Jos herkästi syttyvää polttoainetta pääsee valumaan vaurioituneesta polttoainejärjestelmästä autopalon jäljiltä kuumentuneelle pinnalle, on vaarana, että polttoaine leimahtaa tuleen.

Sammutusraivaus – Kahdessa tapauksessa pelastuslaitos oli ensitoimenpiteinä siirtänyt palavan auton kauemmaksi lähellä olevista rakennuksista, jotta tulipalo ei pääse leviämään ympäristöön. Tämän jälkeen autopalot oli sammutettu vedellä.

Itse autoon kohdistettua sammutusraivaukseksi luokiteltavaa toimintaa oli toteutettu yhdessä tapauksessa, jossa pelastuslaitos oli raivannut auton rakenteita. Sammutusraivauksen tavoitteena on ollut sammutus- ja jäähdytysveden saaminen suoraan akustoon. Raportin perusteella kahdesta autonrun-

koon poratusta reiästä oli saatu toimittua suuri vesimäärä (4 m³) suoraan akustoon, minkä seurauksena autopalo oli lopulta sammunut. Tässä tapauksessa on erittäin todennäköistä, että akustossa oli syntynyt lämpökarkaaminen.

Lisävahinkojen torjuntatoimenpiteet – Yleisimmäksi lisävahinkojen torjuntatoimenpiteeksi tarkasteltavista tehtävistä osoittautui ajoneuvon tekeminen virrattomaksi ajoakusta tai kytkemällä korkeajännitejärjestelmän huoltoerotin irti. Varsinaisen autopalon sammuttamisen jälkeen akustossa mahdollisesti olevaan lämpökarkaamisen torjuntaan oli kahdessa tapauksessa toteutettu akuston jäähdyttämistä suihkuttamalla vettä akustoa suojaaviin korirakenteisiin joko suihkuputkella tai alustasprinklerillä.

Lämpökarkaamisen hallitsemiseksi oli kahdesti toteutettu auton upottaminen veteen käyttäen siihen tarkoitukseen valmistettua sammutuslavaa. Raporteista ei käy ilmi, mitä syntyneelle jäähdytysjätevedelle oli tehty. Yhdessä tapauksessa pelastustoiminnan johtaja siirretti auton ympäristö- ja terveyshaittojen välttämiseksi turvalliseen paikkaan, koska epäili akustossa olevan käynnissä lämpökarkaamisen, joka aiheutti terveydelle erittäin haitallista savuamista.

6.2 Pelastuslaitoksen suorittamat sammutustoimenpiteet Yhdysvalloissa

NTSB:n raportin neljästä onnettomuustutkintaselosteista kolme tapausta liittyi liikenneonnettomuuteen, jonka seurauksena sähköautot olivat syttyneet tuleen. Yhdessä tapauksessa todennäköisin syytymissyy on ollut raportissa tarkemmin kuvailematta jäänyt akuston sisäinen toimintavika tai valmistusvirhe. Raportin kaikissa neljässä tapauksessa kyse oli ollut täyssähköautoista. Lukumäärällisesti raportissa esiteltyjä NTSB:n tutkimia tapauksia on vain neljä, mutta tapahtumien onnettomuustutkinnan tuottamien tietojen yksityiskohtaisuus ja liitettyjen valokuvien informatiivisuus tarjosivat mielestäni riittävän määrän aineistoa tämän opinnäytetyön rajauksen mukaisiin vaatimuksiin.

Sammutus vedellä – Kaikissa neljässä tapauksessa pelastuslaitoksien toimintataktiikka sähköauton sammuttamiseksi on ollut aloittaa sammutustoiminta vedellä tai painevaahdotjärjestelmällä (CAFS-sammutusjärjestelmä), jossa veteen on sekoitettu vaahdotetta ja paineilmaa. Sammuttamiseen tarvittu vesi on saatu ensisijaisesti sammutusauton säiliöstä. Lisävesiselvitys oli kolmessa tapauksessa toteutettu vesijohtoverkostoon kuuluvasta maanpäällisestä palopostista.

Sammutusraivaus – Yhdessä tapauksessa neljästä oli liekkipalon sammuttamisen jälkeen purettu auton osia. Tällöin suihkuputkella suihkutettava jäähdytysvesi saataisiin kohdistettua paremmin jäähdytettävälle alueelle, jolloin jäähdytysvaikutuksen voidaan arvioida olleen tehokkaampaa.

Lisävahinkojen torjuntatoimenpiteet – Kaikissa NTSB:n raportin selosteissa oli jouduttu varsinaisten liekkipalojen sammuttamisen jälkeen toteuttamaan akustojen jäähdytystä, jotta akustoissa lämpökarkaamisesta johtuvat vaaraa aiheuttavat ilmiöt olisivat hallittavissa. Kahdessa tilanteessa autopalot

olivat tapahtuneet vilkkaasti liikennöidyillä tieosuuksilla, jolloin tilannepaikan eristäminen oman toiminnan turvaamiseksi on ollut erityisen tärkeä. Vain yhdessä tapauksessa neljästä oli pelastustoiminnassa kiinnitetty huomiota sammutus- ja jäähdytystoiminnasta syntyneeseen sammutusjäteveeten, joka oli mittauksissa todettu sen verran ympäristölle haitalliseksi, että se kerättiin talteen ja toimitettiin jatkokäsittelyyn.

6.3 Luotettavuuden arviointi

Suomessa tapahtuneiden autopalojen kirjaaminen PRONTO-rekisteriin teki tutkimustuloksien analysoimisesta helppoa, koska raportteihin kirjatut tiedot olivat helposti siirrettävissä Microsoftin Excel- taulukko-ohjelmaan. Taulukko-ohjelman ominaisuuksien johdosta tietojen käytettävyys tutkimukselliseen analysointiin sarake- tai rivikohtaisesti oli kohtuullisen nopeaa.

Arvioitaessa tuloksien luotettavuutta ainoa asia, joka voi vaikuttaa tuloksien erheellisyyteen, on mielestäni lähtötietojen oikeellisuus. PRONTOon tuotettavia onnettomuusraportteja kirjataan vaihtelevan tarkasti ja onnettomuuksiin johtaneita syitä ei voida täysin varmaksi aina kirjata. Pelastustoimen toimenpiteiden ja niiden vaikuttavuuksien osalta kirjattuja tietoja voidaan pitää kohtuullisen tarkkoina.

Onnettomuusraportit pyritään kirjaamaan viipymättä tehtävien jälkeen, ja pelastustoimenjohtaja esittää vain arvionsa onnettomuuteen johtaneista syistä niiden tietojen perusteella, jotka ovat olleet saatavilla raportin kirjaamisvaiheessa. Tällöin ei ole vielä välttämättä tiedossa kaikkia onnettomuuteen liittyviä asioita.

Onnettomuuksien luonteen, aiheutuneiden henkilö- tai materiaalivahinkojen määrien ja suuruuksien mukaan niille tehdään eri tason palontutkintaa, jossa pyritään selvittämään kaikki onnettomuuden syntyyn vaikuttaneet seikat. Palontutkinnan osana selvitetään myös pelastustoimen toimenpiteiden vaikutukset ja arvioidaan niiden tehokkuus sekä esitetään mahdolliset ehdotukset pelastustoiminnan ja yleisen turvallisuuden kehittämiseksi.

Toinen selkeämpi PRONTO-raporteista saatavien tuloksien luotettavuutta heikentävä tekijä on selkeät yksikkövirheet, kuten esimerkiksi arvio käytetystä sammutusvedestä. PRONTO-raportissa kirjatavan vesimäärän yksikkö on kuutiometreinä ja raportin kirjaaja voi epähuomiossa merkitä käytetyn vesimäärän litroina. Tällöin raportoidun tiedon erheellisyys väärin mielletyn suureen virheen takia on tuhatkertainen. Esimerkiksi jos tavanomaisen roska-astian tulipalon sammuttamiseen kuluu sammutusvettä 200 litraa vettä ja määrä kirjataan onnettomuusraportin kenttään 200:ksi, ei 0,2:ksi, niin todellisuuden ero tilastoituvaan tietoon on hyvin merkittävä.

Yhdysvalloissa tapahtuneiden onnettomuuksien raporttien luotettavuutta arvioitaessa on mielestäni huomionarvoista, että NTSB:n data on pelastuslaitoksien ulkopuolisen valtiohallintoon itsenäisenä toimijana kuuluvan tahon tuottamaa. Siihen nojautuen oletan, että tarkoituksenmukaista onnettomuuk-

siin liittyvien seikkojen muokkaamista ei esiinny ja data on luetettavaa, tarpeeksi hyvin tutkittua ja tarkastettua. Käytännössä Yhdysvalloissa tyypillisimpien onnettomuustyyppien tapausmäärät ovat niin suuria, että toistuvat laiminlyömiset tai todellisuudesta poikkeavat kirjaamiset onnettomuuksiin vaikuttavista tekijöistä olisivat havaittavissa. Tässä opinnäytetyössäni käyttämieni julkaisujen ollessa julkisia, on niiden sisältöä voinut arvioida mikä tahansa taho.

7 SÄHKÖAUTON AKKUPALON SAMMUTTAMINEN

Tässä luvussa esittelen sähköauton akkupalon sammuttamiseen tai lämpökarkaamisen hallintaan kehitettyjä eri menetelmiä. Esitellessäni eri menetelmiä tuon myös esiin arvioitani eri menetelmien hyödyistä ja haitoista. Ennen itse sammutusmenetelmien esittelyä olen kirjannut asiat, jotka tilannepaikalla tulee huomioida tilannepaikan- tai pelastustoimen johtajan toteuttaman kohteen tiedustelun yhteydessä. Tiedustelusta saatavan tiedon merkitys on erittäin suuri, koska sen tuottaman kokonaiskuvan perusteella pelastustoiminnan johtaja kääntää toteutettavan toimintataktiikan.

Pelastustoiminnan taktisten yleisperiaatteiden mukaisesti kaikissa onnettomuus-, pelastus- ja tulipalotilanteissa on ensisijaisena tehtävänä pelastaa vaarassa olevat ihmiset, omaisuus ja muut arvot. Tässä luvussa painotan kuitenkin autopaloissa toteutettavaa toimintaa sammutus-/jäähdytys- ja jälkitoimenpidekeskeisesti.

7.1 Tunnistaminen

Autopalotehtävissä tiedustelun yhteydessä tulee pyrkiä selvittämään, minkä käyttövoimatyyppin auto on kyseessä. Jos käyttövoiman selvittäminen on palosta johtuvien olosuhteiden takia mahdotonta, tulee se pyrkiä selvittämään mahdollisimman nopeasti sammuttamisen yhteydessä tai sen jälkeen. Jos käyttövoimatyyppiä ei voida selvittää auton omistajalta eikä asia selviä auton ulkoisista piirteistä tai merkinnöistä, voidaan auton käyttövoimatiedot sekä keskeisten käyttövoimaan ja turvallisuuteen liittyvät tekijät selvittää joko rekisteritunnuksen tai auton merkin ja mallin perusteella pelastuslaitoksen käytössä olevien tietojärjestelmien (Crash Recovery System ja vastaavat järjestelmät) avulla. Pelastuslaitoksien tilannekeskuksilla tulee olla valmius selvittää eri autonvalmistajien laatimat ohjeet pelastustyöntekijöille onnettomuustilanteissa.

Auton tiedustelun yhteydessä tulee myös hyödyntää lämpökameraa, jolla voidaan paikallistaa kuumimmat kohdat autosta. Sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa haasteen sammutus- ja pelastustoimintaan tuo nimenomaan akku. Jos sähköautossa oleva palo on jossain muualla kuin akussa, sammutusmenetelmät eivät eroa polttomootorikäyttöisen auton paloon verrattuna. Akuston aiheuttamaan lisäväärään liittyvät haasteet tulevat vasta, jos akku on reagoanut tulipaloon ja lämpökarkaaminen on alkanut. Pelastustoiminnan johtajan saatua tiedon auton käyttövoimatyyppistä, auton voimalinjan rakenteesta ja mahdollisesta lämmön noususta akustoissa on sammutus- ja jälkitoimenpiteitä selkeämpi johtaa.

Suosalo (2020, 30) on listannut opinnäytetyössään eri tutkimuksista esiin tulleita ilmiöitä ja piirteitä, joista on pääteltävissä, että kyseessä on sähköauton akkupalo tai akustossa on alkanut lämpökarkaaminen:

- lämpötilan nousu akustossa, vaikka ulospäin näkyvä liekkipalo on sammutettu

- suhahtavat tai paukahtavat äänet (syntyvät akkukennojen sisällä olevien kaasujen purkautuessa, kun akun rakenne pettää paineen noustessa)
- kaasujen vapautumisesta seuraava valkoinen savu
- kipinöiden purkautuminen
- tulipalosta aiheutuvat heitteet
- akun turpoaminen.

Edellä olevan listauksen mukaisia merkkejä akkupalosta tai lämpökarkaamisesta oli havaittu kaikissa autopaloissa, joita NTSB:n raportin onnettomuustutkimustuloksissa oli käsitelty. Asia on selvinnyt kattavissa onnettomuuden jälkeisissä tutkimuksissa. Suomessa tapahtuneista tilanteista viidessä tapauksessa oli PRONTO-kirjausten perusteella todennäköistä tai varmaa, että kyseessä oli joko litiumioniakun palaminen tai akustossa käynnissä ollut lämpökarkaaminen.

7.2 Autopalon sijainnin huomioiminen

Autopalossa on tärkeää huomioida, missä auto palaa ja onko mahdollista, että palo voisi levitä ympäristöönsä joko toisiin lähellä oleviin ajoneuvoihin, rakenteisiin tai muuhun palavaksi kelpaavaksi, kuten maastoon. Autopalon ollessa maanalaisissa tiloissa, kuten pysäköintilaitoksissa tai tietunneleissa, muuttuu mikä tahansa ajoneuvopalo selkeästi haasteellisemmaksi kuin autopalon sijaitessa avoimilla tieosuuksilla tai parkkipaikoilla. Maanalaisissa tiloissa sammutus- ja pelastustoimenpiteiden taktiikan toteuttamisessa tulee käyttää hyväkseen rakenteellisia palonehkäisyratkaisuja sekä rakennuksille ja erilaisille rakennetuille tiloille vaadittujen paloturvallisuusteknisten laitteiden toiminnallisia ominaisuuksia. Kunnallistekniikkaan liittyvät sammutusvesirakenteet tai luonnonveden käyttömahdollisuudet lisävesiselvityksissä tulee selvittää, jos tehtävän alkuvaiheessa on oletettavaa, että pelastuslaitoksen mukanaan kuljettava sammutus- tai jäähdytysvesi ei riitä.

Autopalosta aiheutuvien erittäin myrkyllisten savukaasujen aiheuttama vaaratekijä huomioidaan jo tiedusteluvaiheessa. Tilannepaikan eristäminen riittävän suurelta alueelta ehkäisee sivullisten altistumista palosta aiheutuville savukaasuille. Rakennetuissa tiloissa savun ohjaamiseen tarkoitettujen paloteknisten laitteiden käytöllä varmistetaan kohteessa olevien ihmisten poistuminen savutonta poistumisreittiä pitkin sekä parannetaan pelastustoiminnan edellytyksiä mahdollisimman nopeasti toteutettavalle sammutustyölle savuttoman hyökkäysreitit kautta.

Pelastustoiminnan johtajan on myös arvioitava mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, ovatko sammutusjätevesien sekä muiden autosta valuvien ympäristölle vahingollisten aineiden torjuntatoimenpiteet toteutettavissa ja saavutetaanko toiminnalla merkittävää hyötyä. Käytännössä maailmalta ei ole raportoitu tapauksista, joissa sähköauton sammutusvedet olisivat aiheuttaneet ympäristövahinkoja tai

vedenpuhdistusprosessin ongelmia (Linja-aho 2022, 101). Jos pelastustoiminnan johtaja päätyy toteuttamaan viemäriverkostoon tai maaperään valuneiden haitallisten aineiden torjunta- ja keräystoimenpiteitä, on toimenpiteet aloitettava mahdollisimman nopeasti. Tilanteesta tulee tiedottaa alueen vesi- ja viemärilaitosta sekä ELY-keskusta, jos ympäristöhaitat ovat paikallista laajempia. Tällöin pelastustoiminnan johtaja sopii jatkotorjuntatoimenpiteistä edellä mainittujen yhteistyötahojen kanssa. Olen perehtynyt enemmän sammutus- ja jäähdytysjätevesien huomioimiseen luvussa 7.6.

7.3 Akkupalon sammuttaminen tai akun lämpökarkaamisen hallinta jäähdyttämällä

Jos kyseessä on akustossa syntynyt palo, voidaan olettaa, että tilanne on pitkäkestoinen ja itse palotapahtuma on kiivas. Liekkipalon aiheuttama lämpötila on korkea, jolloin myös palon leviämisen riski on suuri. Vedenkulutus tulee olemaan suurta, johtuen akkupaketin lämpöä eristävistä suojarakenteista. (Luo ym. 2018, 2.)

Tämän hetken tietojen perusteella sähköautojen akkupalojen sammuttaminen tai akustossa syntyneen lämpökarkaamisen hallinta tulee toteuttaa toiminnalla, jonka tavoitteena on akuston jäähdytys. Akuston vedellä jäähdyttämiseen tähtäävät toimenpiteet kyetään aloittamaan tilannepaikalla välittömästi pelastuslaitoksen päivittäistoiminnassa käytössä olevilla resursseilla. Viitaten toteutuneisiin toimintatapoihin ja niiden tehokkuuteen sekä huomioimalla päivittäistoiminnassa käytössä olevat resurssit on työjohtoselvityksenä toteutettu autopalon sammutus tai akuston jäähdytys selkein alkutoimenpide, jolla on näyttöön perustuva vaikuttavuus.

Akkupalon sammuttamiseen ja jäähdyttämiseen tähtääviä toimenpiteitä on tutkimuksen perustella toteutettu seuraavanlaisesti:

Työjohtoselvitys

Työjohtoselvityksessä sammuttava tai jäähdyttävä vesi suihkutetaan palavaan tai kuumaan kohteeseen sammutusauton kalustosta tehdyllä työjohtoselvityksellä. Työjohtoselvitys koostuu sammutusauton pumpulta selvitetyistä paloletkusta, jonka päässä on suihkuputki. Sammutus- tai jäähdytysvesi otetaan sammutusauton omasta säiliöstä tai lisävesilähteestä (vesihuoltoverkoston sammutusvesirakenteesta tai luonnonvedestä).

Työjohtoselvityksellä sammuttaminen on perinteisin pelastuslaitoksien toteuttamista autopalojen sammutusmenetelmistä (Kuva 17). Sammutus- tai jäähdytysveden saaminen akkupalon tai lämpökarkaamisen tarkkaan sijaintiin akkupaketissa on haasteellista, jolloin suurilla vesimäärillä kompensoidaan toimintatavan hidasta vaikutusta. Työjohtoselvityksellä toteutettavan sammutus- ja jäähdytystoimenpiteen sammutusjätevesimäärä sähköauton akkupaloissa tai lämpökarkaamisen jäähdyttämisessä on suuri, mutta veden kontaminaation aste on vähäistä.



Kuva 17. Pelastaja sammuttaa Lake Forestissa 2017 autotalliin törmännyttä sähköautoa (Orange County Sheriff's Department).

Toimintatavan hyvät puolet:

- toimintatapa on helppo toteuttaa, koska toiminta on rutiininomaista ja tarvittava kalusto löytyy kaikista pelastuslaitoksista
- työjohtoselvitys voidaan toteuttaa nopeasti
- autonvalmistajat suosittelevat tätä toimintatapaa.

Toimintatavan huonot puolet:

- akuston rakenteiden ulkopuolelta toteutettu jäähdytys on hidasta riippuen akun rakenteen (akkukemia, kennotyyppi, akun jäähdytysjärjestelmä) mukaan
- käytettävä jäähdytysvesimäärä on suuri
- sammutusjätevesiä ei saada kerättyä talteen.

Alustasprinkleri

Alustasprinkleri on sähköauton alle asetettava sprinklerisuuttimilla varustettu kehikko, jolla suihkutaan jäähdytysvettä suurella vesimäärällä laaja-alaisesti auton alustaan (Kuva 18).



Kuva 18. Alustasprinklerin märkätestaus (Helander).

Toimintatavan hyvät puolet:

- korkeajänniteakun jäähdytyksessä ei tarvitse altistaa pelastajia haitallisille savu- ja palokaasuille alustasprinklerin asettamisen jälkeen
- alustasprinklerin käyttö onnistuu yhden yksikön voimin.

Toimintatavan huonot puolet:

- akuston rakenteiden ulkopuolelta toteutettu jäähdytys on hidasta riippuen akun rakenteen (akkukemia, kennotyyppi, akun jäähdytysjärjestelmä) mukaan
- käytettävä jäähdytysvesimäärä on suuri
- sammutusjätevesiä ei saada kerättyä talteen.

Sammutuskontti

Sammutuskontti on lavakalustona siirrettävä vesitiivis avattavalla päälikannella varustettu konttirakenne, johon sähköauto voidaan siirtää nosturilla (Kuva 19).



Kuva 19. Harjoitustilanteessa toteutettu auton laskeminen konttiin, jossa on vettä (Lettojärvi).

Toimintatavan hyvät puolet:

- estää tehokkaasti palon leviämisen
- sammutus- ja jäähdytysvedet on mahdollista kerätä talteen ja toimittaa jatkokäsittelyyn

Toimintatavan huonot puolet:

- hankintahinta on korkea
- vie paljon tilaa
- toimintatavan myötä kaikki akkukennot ovat oikosulkuvaarassa, mikä muodostaa riskin uudelleensyöttymiselle veden poistamisen jälkeen
- konttiin kerääntyvä sammutus-/jäähdytysjätevesi saastuu merkittävästi päästessään tunkeutumaan vaurioituneisiin akkukennoihin. Tämän takia sammutuskontin vesi muuttuu ongelmajätteenä, jota ei voi päästää luontoon sellaisenaan vaan on toimitettava jatkokäsittelyyn
- jatkokäsittelyyn toimitettavan ongelmajätteen käsittely toimintaan erikoistuneessa laitoksessa on kallista
- palon syttymissyyn selvittäminen palontutkinnassa on mahdotonta tapauksen jälkeen
- toimintatavan toteuttaminen mahdotonta kaikissa tilanteissa, kuten maanalaisissa pysäköintilaitoksissa, joissa kontin saaminen tilannepaikan läheisyyteen ja auton siirto konttiin ei onnistu ahtauden takia.

Akkupaketin suoja- ja eristysrakenteet rikkovat toimenpiteet

Rakenteita rikkovissa toimenpiteissä puretaan tai lävistetään sähköauton akkupakettia suojaavia rakenteita, jotta jäähdytysvettä saataisiin suoraan akkukennoille. Akkupaketin läpäisyyn perustuvissa menetelmissä tulee huomioida toiminnan riskialttius ja toiminnan tehokkuuden kyseenalaisuus.

Toimintatavan hyvät puolet:

- jäähdytysvesi saadaan suoraan vaurioituneille kennoille, joissa lämpökarkaaminen on käynnissä
- käytettävä jäähdytysvesimäärä vähäisempää kuin akkujen ulkoapäin toteutetussa jäähdytyksessä.

Toimintatavan huonot puolet:

- korkeajänniteakkujen rakenteita rikkovat toimenpiteet ovat riskialttiita
- akku voi vaurioitua vahingoittumattomasta kohdasta aiheuttaen lisävaaraa

- akuston sisällä oleva vesi muodostaa riskin palon leviämislle ehjiin akkukennoihin
- autovalmistajien ohjeissa ei suositella akkupaketin rikkomista.

7.4 Muita akkupalojen sammuttamiseen ja jäähdyttämiseen kehitettyjä menetelmiä

Tähän lukuun olen kerännyt akkupalojen sammuttamiseksi kehitettyjä toimintatapoja tai menetelmiä, joita toistaiseksi ei ole käytetty Suomessa PRONTO-selosteiden perusteella.

Sammutuspeite

Sammutuspeite on tilannepaikalla käytettävä suurikokoinen ja materiaaliltaan erityisesti autopalon liekkipalon tukahduttamisen tarkoitettu peite (Kuva 20).



Kuva 20. Koko auton peittävä sammutuspeite (Asia Pacific Fire).

Toimintatavan hyvät puolet:

- autopalon leviämistä (viereisiin autoihin, rakenteisiin tai materiaan) saadaan hidastettua
- toimintatapa on yksinkertainen ja nopeasti toteutettavissa.

Toimintatavan huonot puolet:

- hankintahinta on korkea
- käytönjälkeinen huolto kyseenalaista, välineen kertakäyttöisyys?
- tiivis sammutuspeite voi muodostaa syttymis-/räjähtämiskelpoisen seoksen akkupalosta syntyvistä savukaasuista muodostaen riskin tilannepaikalla oleville sammuttajille

- akkupalo muodostaa palaessaan happea, jolloin sammutuspeitteen tavanomaisessa tulipalossa tukahduttava vaikutus ei sammuta akkupaloa
- tavanomainen autopalon tukahduttamiseen tarkoitetun sammutuspeitteen kesto akkupalon aiheuttamaa liekkiä vastaan on heikko.

Monitoimisammutuspeite

Monitoimisammutuspeitteessä on yhdistetty sähköauton akkupalon kestäväällä materiaalilla eristäminen, vedellä jäähdyttäminen ja savukaasujen suodattaminen yhdellä tuotteella (Kuva 21). Tiivistysmekaniikka muodostaa peitteen alaosaan kaasutiivin, ja palossa vapautuvat höyryt voidaan ohjata hallitusti suodatinjärjestelmään. Peittoon yhdistetyt suuttimet suihkuttavat vettä, joka jäähdyttää ajoneuvoa ja sitoo myrkyllisiä kaasuja. (Pelastusalan ammattilainen.)



Kuva 21. Monitoimisammutuspeite koekäytössä (Hassinen)

Toimintatavan hyvät puolet:

- palon leviämistä hidastava vaikutus
- auton yläpuolisten osien jäähdytys peitteeseen integroidulla vesisuihkujärjestelmällä
- peitteen tiivistyminen maata vasten peitteen helmaan kerääntyvän veden ansiosta, jolloin savukaasut ja sammutusjätevedet kerääntyvät peitteen sisään
- savukaasujen suodatustoiminto
- käyttö yhdessä auton alustan jäähdyttämiseen soveltuvan suihkutusjärjestelmän kanssa.

Toimintatavan huonot puolet:

- jäähdytysveden kerääntyessä peitteen sisään kaikki akkukennot ovat oikosulkuvaarassa, mikä muodostaa riskin uudelleensyttymiselle veden poistamisen jälkeen
- peitteen sisään kerääntyvä sammutus-/jäähdytysjätevesi saastuu merkittävästi päästessään tunkeutumaan vaurioituneisiin akkukennoihin. Tämän vuoksi vesi muuttuu ongelmajätteeksi, jota ei voi päästää luontoon sellaisenaan vaan on toimitettava jatkokäsittelyyn
- jatkokäsittelyyn toimitettavan ongelmajätteen käsittely toimintaan erikoistuneessa laitoksessa on kallista
- palon syytymissyyn selvittäminen palontutkinnassa vaikeutuu tai on mahdotonta peitteen käytön jälkeen.

Jännitesuojatut akkupaketin lävistävät menetelmät

Sähköauton akkupaketin lävistävissä menetelmissä suojarakenteet rikotaan mekaanisella välineellä pistomaisesti, jotta jäähdytysvettä saataisiin suoraan akkukennoille (Kuva 22). Akkupaketin läpäisyyden perustuvissa menetelmissä tulee huomioida toiminnan riskialttius ja toiminnan tehokkuuden kyseenalaisuus.



Kuva 22. Auton alustan lävistävä ja lävistysreiästä akkua paineistetulla vedellä jäähdyttävä BEST-järjestelmä (Rosenbauer).

Toimintatavan hyvät puolet:

- jäähdytysvaikutus saadaan suoraan palavaan akkupaketin sisään, jolloin jäähdytysvaikutus on tehokkaampi
- käytettävä jäähdytysvesimäärä on suhteessa pienempi kuin akkupaketin ulkopäin toteutettu jäähdyttäminen

Toimintatavan huonot puolet

- on kallis erikoistyökalu
- akkupaketin sisällä oleva vesi muodostaa riskin ehjien akkukennojen oikosululle ja uudelleensyttymiselle
- autovalmistajien ohjeissa ei suositella akkupaketin lävistämistä.

Sammutusaltaan rakentaminen auton ympärille

Tilannepaikalla rakennettava pohjaton kaukalomainen allastava rakenne, joka siirretään liekkipalolta sammutetun auton ympärille (Kuva 23). Sammutusallas tiivistyy alahelmoistaan maata vasten niin, että altaaseen siirrettävä jäähdytysvesi kerääntyy altaan sisälle.



Kuva 23. Tilannepaikalla kasattu sammutusallas on asennettu auton ympärille, jonka jälkeen allas täytetään vedellä (Palosuojelurahasto).

Toimintavan hyvät puolet:

- voidaan toteuttaa ahtaissa tiloissa
- altaan täyttöön käytettävä jäähdytysvesimäärä on suhteessa pienempi kuin akkupaketin liekkipalon sammuttamisen jälkeinen ulkopäin toteutettava suihkuttava jäähdyttäminen
- sammutus- ja jäähdytysvedet ovat mahdollista kerätä talteen ja toimittaa jatkokäsittelyyn.

Toimintatavan huonot puolet:

- sähköauton akkupalo tulee olla sammutettu, jotta sammutusallas voidaan siirtää auton ympärille

- yllättäen uudelleensyttyvä akkupalo on riski auton välittömässä läheisyydessä allasta rakentavalle tai paikalleen asentavalle pelastushenkilöstölle sekä allastusmateriaalille
- erittäin saastuneen sammutusjäteveden jatkokäsittely on ongelmallista
- palon syttymissyyn selvittäminen palontutkinnassa vaikeutuu tai on mahdotonta tapauksen jälkeen.

7.5 Akkupalosta syntyvät haitalliset yhdisteet ja niiden huomioiminen

Sähköautojen tulipaloissa pelastushenkilöstön työturvallisuuteen liittyvät tekijät ovat monelta osin samoja kuin tavanomaisen polttomoottorikäyttöisen auton tulipaloissakin. Kaikissa tulipaloissa syntyy hengenvaarallisen myrkyllisiä kaasuja, joista tunnetuin lienee hiilidioksidi eli häkä (Linja-aho 2022, 103). Autopaloissa syntyvät savukaasut sisältävät hiilimonoksidin lisäksi runsaasti muita erittäin myrkyllisiä kemiallisia yhdisteitä, joiden haittavaikutukset ihmiselle ovat tappavat. Sähköauton akkupaketin palaessa tai akustossa oleva lämpökarkaamisen takia akkukennoissa esiintyy vikaantumisprosesseja. Niissä muodostuu hyvin myrkyllisiä kaasuja, jotka ovat turvallisuusuhka. (Santasalo 2021, 22.)

Käytetyn akkukemian mukaan seuraavia myrkyllisiä aineita ja yhdisteitä voi vapautua litiumioniakun palosta (Gaia Consulting Oy 2019, 11):

- litiumkobaltiitti, litiumheksafluorofosfaatti, dietyylikarbonaatti, etyleenikarbonaatti, propyleenikarbonaatti, alumiini, kupari, polyvinyylideenifluoridi ja bifenyylä
- CO, CO₂, karbonaatit, bentseeni, tolueni, styreeni, bifenyylä, akroleiini
- fluorideista vetyfluoridi (HF), fosforyylifluoridi ja fosforipentafluoridi. Erityisesti vetyfluoridi on potentiaalisesti hengenvaarallinen (palossa vapautuu 20 – 200 mg/Wh; IDLH = 24 mg/m³ http 15 min = 2,4 mg/m³ , AEGL-3 (30 min) = 51 mg/m³)
- vetykloridi HCl.

Keskeisin ja vaarallisin lämpökarkaamisessa vapautuva myrkyllinen kemiallinen yhdiste on vetyfluoridi (fluorivety, HF). Yli 5 ppm:n (4 mg/m³) fluorivedyn pitoisuudet ilmassa aiheuttavat silmien ja hengitysteiden ärsytystä. Suuret pitoisuudet aiheuttavat vaikeita, tuskallisia vammoja iholla, silmissä ja limakalvoilla. Kasvoilla ilmenee herkästi ärsytystä ja punoitusta. Höyryt voivat aiheuttaa hengitysteiden syöpymiä ja keuhkopöhön. Lisäksi usein esiintyy sydämen rytmihäiriöitä. Lyhyt altistuminen 50–250 ppm:n (42–210 mg/m³) pitoisuuksille on vaarallista. (Gaia Consulting Oy 2019, 11.)

Research Institutes of Sweden AB (RISE) on tutkinut Ruotsin pelastustoimen käytössä olevien sammutusasujen suojauskykyä fluorivetyä vastaan. Testissä oli kaksi asukokonaisuutta. Näissä toinen oli normaalikäytössä ollut Viking Gore®-tex sammutusasu, jonka alla oli Bragen *flame smoke college* -

väljasu. Toinen sammutusasukokonaisuus koostui uudesta käyttämättömästä Viking Gore®-tex sammutusasusta ja merinovillasta tehdystä urheilukerrastosta. (MSB 2018, 8.) Testistä saatujen tuloksien perusteella molemmat sammutusasukokonaisuudet antoivat hyvän suojan erittäin korkeina pitoisuuksina olevaa fluorivetyä vastaan. Testiraportissa mainittiin, että sammutustyöntekijöiden tietoisuus sähköautojen akkupaloista vapautuvan fluorivedyn merkittävästä haitallisuudesta voi aiheuttaa epäröintiä ja viivästyä sammutustoimenpiteiden toteuttamisessa tilannepaikalla. Tämä voi johtaa palon leviämiseen, joka vähentää uudelleenkäytettäväksi kelpaavan materiaalin säästymistä ja nostaa vakuutuskuluja. (Willstrand ym. 2020, 3.)

Edellä mainittuun tutkimukseen viitaten on perusteltua, että sähköautojen akkupalon sammutus- ja jäähdytystoimenpiteet ovat toteutettavissa työturvallisuus huomioon ottaen käyttämällä tavanomaista sammutusainetta sekä paineilmalaitetta. Akkupalojen sammuttamisessa olleiden sammutusvarusteiden ja kaluston käytön jälkeisessä huollossa tulee noudattaa erityistä huomiota työtapoihin, että niihin kerääntynyt lika ja hiukkaset eivät pääse leviämään sammutusauton sisälle paluumatkan aikana ja sen myötä pelastusasemien sisätiloihin. Tilannepaikalle tulee olla kootusti toteutettu keräys likaisille materiaaleille. Likainen materiaali toimitetaan puhdistettaviksi tiiviissä kuljetusastioissa siten, etteivät kuljetusastioiden sisältö pysty kontaminoimaan ympäristöään.

7.6 Sammutus- ja jäähdytysjätevesien huomioiminen

Pelastuslaitoksien toteuttamissa autopalojen sammuttamisissa syntyy väistämättä aina jätevetä, joka tilanteen mukaan on luokiteltavissa ympäristölle lievästi haitallisesta erittäin haitalliseksi. Varsinkin sähköautojen sammutusjätevedeen liittyy kaksijakoista problematiikkaa, koska eri toimenpiteiden myötä myös veden kontaminoitumisen aste on eri luokkaa. Sähköautojen akkupalojen sammuttamisessa tai lämpökarkaamisen hallinnassa syntyvän jäteveden kontaminaation asteeseen vaikuttaa merkittävästi se, kuinka paljon sammutus-/jäähdytysvesi on suoraan kosketuksissa akkumateriaalien kanssa. Sähköauton akkupakettia suojaavia rakenteita jäähdyttävässä vesisuihkuvalussa jäähdytysvettä ei pääse tunkeutumaan tehokkaasti akun sisälle, jolloin myös haluttu jäähdytysvaikutus saavutetaan hitaammin. Tällöin auton rakenteilta pois valuvan veden kontaminoitumisaste on lievempi.

Tavanomaisista sammutustoimenpiteistä syntyneiden sammutusjätevesien vaikutuksia ympäristöön tutkittiin norjalaisten Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) ja Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) sekä RISEn tutkijoiden toimesta vuonna 2020 tammikuussa Norjan Stavangerissa sattuneen pysäköintilaitoksen tulipalon (Kuva 24) jälkeen suoritetussa onnettomuuspaikkatutkinnassa. RISE laati tutkinnasta raportin *Evaluation of fire in Stavanger airport car park 7 January 2020*.



Kuva 24. Stavangerin lentokentän parkkihalli 7 tulipalon jälkeen. (Nordic Unmanned)

Tutkinnan yhtenä tavoitteena oli arvioida sähköajoneuvojen vaikutusta tulipalon laajuuteen ja selvittää, olivatko akkupaketit osallisena palon kehittymisessä. Tulipalon laajuus ja epätietoisuus osallisena olleiden sähköautojen osuudesta tulipalon kehittymiseen saivat suuren huomion mediassa, mikä osaltaan myös vaikutti tutkinnan tarpeellisuuteen. Myytyjen sähköautojen osuus Norjan automarkkinoilla maaliskuussa 2020 oli 50 %. (RISE 2020b, 75.) Palaneeseen autohalliin mahtui noin 3000 ajoneuvoa, joista tulipalossa epäillään palaneen ainakin 300.

Tutkinnan tuloksissa tuodaan esiin, että yksittäisten autopalojen voimakkuudet ja kestot antoivat viitteitä siitä, etteivät parkkihallissa olleiden sähköautojen akkupaketit olleet osallisina tulipalossa. Tulipalon ympäristövaikutuksien tutkinnassa läheisten vesistöjen vesinäytteiden analyyseissä ei löytynyt litiumia ja koboltin pitoisuudet analyyseissä olivat alhaiset. Tämä viittaa siihen, että palaneiden sähköautojen akut eivät olleet aiheuttaneet läheisten vesistöjen pilaantumista. Yksityiskohtaisempia tietoja mahdollisista sähköautojen akkujen osallisuudesta tulipaloon olisi ollut selvitettävissä vain raivamalla esiin palaneiden autojen akut ja tutkimalla ne perinpohjaisesti. Toimenpidettä ei kuitenkaan ollut toteutettu tutkinnan laatimisen yhteydessä. (RISE 2020b, 76.)

Veteen upotettavissa menetelmissä veden jäähdytysvaikutus on taas merkittävästi tehokkaampi, mutta myös vaurioituneen akkupaketin rakenteisiin tunkeutuva vesi kontaminoituu tehokkaammin akkumateriaaleista. Jäähdytysveden kontaminoituminen tehostuu entisestään, kun autoa seisotetaan vedessä pitkiäkin aikoja (> 24 h). Samalla myös sähköauton selkeästi kallein osa eli koko akku muuttuu käyttökelvottomaksi ja tekee palontutkinnasta mahdotonta. Pahimmassa tapauksessa sähköauton veteen upotus aiheuttaa vielä lisävaaraa uudelleensyttymisen riskin takia. Tämän takia useat autonvalmistajat kieltävät yksiselitteisesti sähköauton upottamisen veteen laatimissaan onnettomuusohjeissaan.

7.7 Hallittu poltto

Kuten olen luvussa 7.2 maininnut, tulee pelastustoiminnan johtajan arvioida tilannepaikan tiedustelun yhteydessä autopalotehtävillä ympäristöön liittyvät tekijät sekä ajoneuvon käyttövoimatyyppi. Syrjäisellä metsätiellä palavan auton vaarallisuus on aivan erilainen kuin vilkkaassa kauppakeskuksen parkkihallissa. Mikäli korkeajänniteakun savukaasuista ei ole haittaa ihmisille, on ympäristöystävällisin tapa antaa auton palaa hallitusti siten, ettei palo pääse leviämään. Jos taas korkeajänniteakku palaa kohteessa, jossa savukaasuista on haittaa sivullisille, tulee palo sammuttaa ja palokaasut ohjata pois päin ihmisistä (Mäki 2021, 59).

Sähköautojen tulipaloissa yhtenä vaihtoehtona autopalon sammuttamisen sijaan on antaa auton palaa hallitusti loppuun. Toimintatapa on perusteltua tilanteissa, joissa sammutustoiminepiteillä ei saavuteta merkittävää hyötyä verrattuna auton palokuorman loppuun palamisessa. Toteutettavilla sammutustoimenpiteillä saavutettavia hyötyjä ovat

- ihmisen pelastaminen
- omaisuuden tai muun arvon pelastaminen tai vaaraa aiheuttavan tilanteen ehkäisy
- palon leviämisen estäminen
- muun lisävahingon estäminen
- imagotappion ehkäisy.

Jos pelastustoiminnan johtaja arvioi, että edellä mainitut tekijät eivät vaadi tilannepaikalla sammutustoimenpiteitä, voidaan aktiivisesta sammuttamisesta pitäytyä. Vaikka pelastustoiminnan johtaja päätyisi pitäytymään autopalon sammuttamisesta, tulee tilannepaikalla kuitenkin johtaa tilannetta siten, että hallittu poltto saa edetä rauhassa ja valvotusti. Alue tulee eristää, jotta aktiivisesta palosta ei aiheudu vaaraa ympäristölleen. Tilannepaikalla olevalla pelastusmuodostelmalla on oltava välitön sammutusvalmius, jolla reagoidaan tilanteeseen, joka voisi johtaa palotapahtuman laajentumiseen.

Toimintatavan hyvät puolet:

- on osittain ympäristöystävällisempi vaihtoehto, kun sammutusjätevesiä ei synny
- loppuun palanut akku ei aiheuta lisävaaraa
- pelastushenkilöstö ei altistu tarpeettomasti haitallisille yhdistelle.

Toimintatavan huonot puolet:

- palo- ja savukaasut aiheuttavat vaaraa ympäristölleen. Menetelmän toteuttaminen taajama-alueilla kyseenalaista
- akun koon ja varaustason mukaan palotapahtuma voi kestää useita tunteja, jolloin tilannepaikalla olevat pelastustoimen resurssit eivät ole hälytettävissä muille tehtäville
- kokonaan palaneen auton palonsyöntutkinta vaikeutuu tai on mahdotonta.

8 POHDINTA

8.1 Tutkimustulosten hyödyntäminen

Olen käsitellyt sähköautoille tapahtuneita onnettomuustilanteita opinnäytetyölle asetettuun laajuuteen nähden kattavasti. Tämän perusteella olen pystynyt nostamaan esiin tiettyjä yleispäteviä ilmiöitä, joita myös muualla toteutetuissa tutkimuksissa on esiintynyt. Käsittelemiäni tapauksia lukumäärällisesti oli kuitenkin rajallinen määrä, mikä aiheuttaa sen, että tulosten yleistettävyyden on rajallista. Näkisin kuitenkin, että käsiteltyjen tapausten ja viitekehyksen teoretietiedon pohjalta olen pystynyt esittämään perustellun arvion erilaisten soveltuvien sammutus- ja jäähdytysmenetelmien hyvistä ja huonoista puolista.

Mielestäni tutkimustulosten hyödynnettävyys tulee esiin toteutuneiden sekä myös sähköautojen akkupalojen sammuttamiseen ja lämpökarkaamisen hallintaan kehitettyjen, mutta ei vielä laajamittaisessa käytössä olevien toimintamenetelmien omaksumisessa. Opinnäytetyöstä saadun tiedon perusteella onnettomuuspaikalla toimiva pelastustoiminnan johtaja voi arvioida kuhunkin tilanteeseen tarkoituksenmukaisimman toimintataktiikan ja menetelmän.

Opinnäytetyön tarjoama tieto selkeyttää myös sammutus- ja pelastustehtävässä työskentelevän yksittäisen henkilön toimintaa hänen ymmärtäessään, mihin yksittäisellä teolla ollaan pyrkimässä sähköauton sammutus- tai jäähdytystehtävän kokonaiskuvassa. Työturvallisuuden kannalta ymmärrys tilanepaikalla toteutettavien toimenpiteiden tarkoituksenmukaisuudesta hallita sähköauton akkupalon tai lämpökarkaamisen liittyviä ilmiöitä luo edellytykset tilanteen suorittamiseksi mahdollisimman turvallisesti ja tehokkaasti. Tekemiäni havaintoja voidaan hyödyntää jatkossa eri pelastuslaitoksissa, kun suunnitellaan kalustohankintoja tai toimintamalleja sähköautojen akkupaloihin tai niiden lämpökarkaamiseen hallitaan liittyvillä tehtävillä.

8.2 Jatkotutkimusaihe ja kehittämiskohteet

Selkeimpänä jatkotutkimusaiheena sähköautojen akkupaloista näkisin, että tilanteiden hallintaan soveltuvia sammutus- ja jäähdytysmenetelmiä tulisi päästä tutkimaan ja vertailemaan mahdollisimman todellisissa koeolosuhteissa. Omakohtaisen kokemuksen perusteella voin sanoa, että tieteellistä tutkimustietoa antavan tarpeeksi lähellä todellista sähköauton akkupalaa simuloivan koetilanteen toteuttaminen on ollut mahdotonta niillä resursseilla, jotka minulla on ollut käytössä. Tällöin fyysikaalisten ilmiöiden mittaamiseen perustuvaa dataa ei ole ollut saatavilla, jolloin eri toimenpiteiden todellisia vaikutuksia ei ole pystytty osoittamaan.

Näkisin myös, että yksi tarpeellinen jatkotutkimus tämän opinnäytetyön pohjalta tulisi liittyä esiteltyjen toimintamenetelmien myötä syntyvien sammutus- ja jäähdytysjätevesien kontaminaatioasteen mittaa-

miseen sekä eri menetelmien aiheuttamien sammutusjätevesien ympäristöhaittojen tarkempaan tarkasteluun. Tilannepaikalla pelastustoimintaa johtavan olisi helpompi tehdä päätös toteutettavasta menetelmästä, jos hänellä olisi parempi käsitys eri menetelmien aiheuttamista ympäristöhaitoista.

Sähköautojen akkupaloihin kehitetyt sammutuskontit sekä sammutus- ja jäähdytysveden keräävät toimintamenetelmät estävät tehokkaasti jätevesien pääsyn vapaasti ympäristöön, mutta samalla käytetty vesi kuitenkin saastuu voimakkaammin verrattuna auton rakenteita jäähdyttävän suihkun toimintaperiaatteen menetelmissä. Jäähdyttävän vesisuihkutuksen menetelmissä tilannepaikalla ympäristöön pääsevä sammutus- ja jäähdytysjätevesi ei ole niin haitallista, koska kontaminoitumista ei pääse tapahtumaan suurissa määrin.

Eri suihkuttavien menetelmien vaatimat kriittiset jäähdytysvesivirrat tulisi myös selvittää tutkimuksellisin menetelmin. Tällöin olisi mahdollista laatia karkeat ja helposti muistettavat nyrkkisäännöt, joita pelastustoiminnan johtaja voisi käyttää arvioidessaan tilannepaikalla toimintaan hälytettyjen resurssien riittävyyttä.

Pelastuslaitosten kehittämistyössä näkisin, että eri pelastusalueilla tulisi laatia suunnitelmat, kuinka sähköautojen määrän kasvun myötä tieliikenteessä yleistyviin sähköautojen autopalo- ja onnettomuustehtäviin varaudutaan. Pelastuslaitoksien varautumisessa tulee huomioida, ovatko pelastusalueiden resurssit, kalusto ja henkilöstön koulutustaso riittävällä tasolla siihen nähden, minkälaisia uusia riskejä muuttuva ajoneuvokanta tuo. Nykytilanne toteutuskelpoisista toimenpiteistä riippuu käytettävästä kalustosta ja henkilöstön osaamisesta noudattaa sovittuja toimintamalleja. Kalustohankintoja varten tulisi ensin tietää, minkälaiseksi pelastuslaitoksien operatiivisen toiminnan kehittämisen vastuhenkilöt ovat suunnitelleet eri toimintamallit sähköautojen tulipalo- ja onnettomuustilanteissa.

Pelastuslaitoksien operatiivisen osaamisen kehittämisessä tulee ensin määritellä, mikä suorituskyky sähköautojen tieliikennevälinepalo- ja -onnettomuustehtävillä eri pelastusmuodostelmilla ja sen jäsenillä tulee olla. Tämän jälkeen seuraava askel on kartoittaa henkilöstön osaaminen, jolla määritellään riittävän osaamisenhallinnan koulutustarpeet. Tämän jälkeen laadittaisiin tarpeeksi yksityiskohtainen koulutus- ja toteutussuunnitelma, jossa osallistetaan pelastuslaitoksien operatiivisen työn kaikilla johtamistasoilla olevat henkilöt. Yhteinen ymmärrys ja näkemys toteutettavasta toimintamallista sekä tavoiteltavasta tuloksesta tehtävällä edesauttaa tehokkaaseen ja työturvalliseen toimintaan. Henkilöstön osaamisen ylläpitoa varten tulee antaa koulutusta sopivin väliajoin sekä ylläpitää koulutusmateriaalia ja koulutettavat menetelmät ajantasaisina. Henkilöstön osaamisen ylläpito tulee olla johdonmukaista, suunnitelmallista ja tavoitteellista.

Sähköautoille tapahtuvien onnettomuuksien ja autopalojen välittömien sammutus- ja pelastustoimenpiteiden sekä jälkivahinkojen torjunnan jälkeen tulee tarve järjestää siirtokuljetus vaurioituneelle autolle. Tällöin useimmiten toimitaan yhteistyössä kuljetus- ja hinauspalveluja tarjoavien yritysten kanssa. Tieliikenneonnettomuudessa tai autopalossa olleiden sähköautojen siirtokuljetusta tekevien

osaaminen ja tietotaso kuljetettavan kuorman riskeistä tulee olla koulutettuna, jotta varautuminen sekä toiminta kesken kuljetuksen uudelleensyntyvän sähköauton kanssa ei aiheuta enempää vahinkoja. Vaurioautojen säilytys tulee järjestää siten, että niille on ennalta sovitut kuljetuspaikat, joissa toteutuu tarvittavat suojaetäisyydet palon leviämisen estämiseksi sekä terveyshaittojen välttämiseksi.

8.3 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön perusteella on näyttöä, että Suomessa pelastuslaitoksilla olevalla sammutuskalustolla kyetään sammuttamaan sähköauton akkupalo jäähdyttämällä akustoa runsaalla vesimäärällä. Vaikka Suomessa sähköautojen akkupaloja ei ole ollut monta, raportoiduista tehtävissä on onnistuneesti saatu sähköauton akkupalo sammutettua työjohtoselvityksellä. Sama toimintamalli on ollut toteutuskelpoinen myös Yhdysvalloissa tämän opinnäytetyön tutkimuksen perusteella.

Lahden tapauksessa tietämättömyys akustossa käynnissä olevasta lämpökarkaamisesta johti kuitenkin uudelleensyttymiseen myöhemmin, minkä seurauksena auto paloi täysin. Auton akusto oli syttynyt vielä senkin jälkeen useamman kerran, koska lämpökarkaamista ei ollut yritetty hillitä akuston jäähdyttämällä. Jos pelastuslaitoksen henkilöstöllä olisi ollut parempi tietämys tarvittavista toimenpiteistä, joista sähköauton akkupalon liekipalon sammuttamisen jälkeen tulee huolehtia, olisi tehtävä vain yksi tilastoissa olevista ajoneuvopaloista. Myös eräässä toisessa Suomessa tapahtuneessa ajoneuvopalotehtävässä sähköautossa olleen tulipalon sammuttamisen jälkeinen sähkökomponenteista lähtöisin ollut uudelleensyntyminen olisi ollut vältettävissä, jos ensimmäisen kerran kohteessa ollut pelastuslaitoksen henkilökunta olisi osannut toimia oikein auton virrattomaksi tekemisessä.

Tiedon lisäämiselle toimintamalleista sähköautojen tulipaloissa toistaiseksi erikoispiirteinä pidettävien ilmiöiden hallitsemiseksi on tarvetta. Kun tehtävämäärät tulevaisuudessa väistämättä lisääntyvät ja hyväksi todetut toimintamallit ovat hioutuneet kokemuksen myötä ja käytössä ovat tehokkaimmiksi todetut menetelmät sekä kalusto, nyt vielä erikoisuuksina pidettävät sähköautojen akkupalotehtävät ovat rutiinilla hoidettavia päivittäistehtiä.

Yleisesti ottaen pelastuslaitoksien kaikessa sammutustoiminnassa syntyvien sammutusjätevesien aiheuttamat ympäristöhaitat ovat tunnistettu ongelma ja ne tulee olla myös huomioituna pelastuslaitoksien laatimissa sammutusvesisuunnitelmissa. Käytännössä kuitenkin sammutustyön kanssa samanaikaisesti toteutettavia torjuntatoimia sammutusjätevesien hallitsemiseksi toteutetaan vähäisessä määrin pelastuslaitoksien operatiivisessa päivittäistoiminnassa. Näkisin, että tälle on olemassa yksi merkittävä syy, joka on henkilöresurssin puute. Sammutusautoissa olevan henkilöstön määrä vaihtelee 1+3 (paloesimies + kolme pelastajaa) minimivahvuuden ja 1+5 (paloesimies + viisi pelastajaa) tavoitevahvuuden välillä. Pelastusalaa yleisesti vaivaavan ja tulevaisuudessa pahenevan henkilöstöpulan takia sammutusautot toimivat hyvin usein minimivahvuudella. Minimivahvuudella operoivan sammutusauton henkilöstö riittää useasti vain tehokkaan sammutustyön toteuttamiseen tehtävillä, joiden hä-

lytysvasteet ovat etukäteen määritelty hätäkeskuksille hätäilmoituksen tekijöiden antamien lähtötietojen mukaan yhden sammutusauton tehtäväksi. Pääsääntöisesti henkilöautopalot kuuluvat tähän kategoriaan, ellei palo ole jo leviämässä ympäristöönsä tai autopaloon liittyy jonkin muu lisävaaraa aiheuttava elementti.

Täten useimmiten autopalon sammutustehtävälle hälytetään yksi sammutusauto. Jos sammutusauton vahvuus on 1+3, ei henkilöresurssi välttämättä riitä toteuttamaan välittömästi sammuttamisesta johtuvien jälkivahinkojen torjuntaa. Autopalon voimakkuuden mukaan voi tarpeeksi tehokkaiden sammutustoimenpiteiden toteuttamiseen tarvita kaksi pelastajaa, jolloin kolmas pelastaja (kuljettaja) operoi sammutusauton pumppua sekä varautuu lisävesiselvityksen käyttöönottoon paloestämiehen johtaessa sammutustehtävän toteutusta. Jos sammutusauton vahvuus on parempi kuin 1+3, on paloestämiehen mahdollista antaa käytettävälle henkilöresurssille lisävahinkojen torjuntatehtävä, mikäli se on ympäristövahinkojen estämisen kannalta välttämätöntä ja on toteutettavissa sammutusauton kalustolla. Tarvittaessa paloestämiehen on ilmoitettava hätäkeskukseen lisäresurssin hälytystarpeesta, jos tilannepaikalla olevat resurssit eivät riitä tehtävän tehokkaaseen suorittamiseen.

8.4 Oma oppiminen

Tämän opinnäytetyön laatiminen on ollut lähes koko päällystöopintojeni aikainen projekti. Aloitin opintoni tammikuussa 2020 ja tiesin jo seuraavana kesänä, mistä aihepiiristä aion opinnäytetyöni kirjoittaa. Koska aihe valikoitui jo hyvissä ajoin, helpotti se keskittymään tietyissä opinnoissa tarkemmin opinnäytetyöhön liittyvissä asioissa. Samalla valitsemani aihealue ylläpiti oppimisen halua siihen liittyvissä oppiaineissa, koska uskoin, että hyödyn koulussa jaetun tiedon omaksumisesta tulevaisuudessa.

Pelastusalan päällystötutkinnon suorittaminen monimuotototeutuksena oli sen verran tiivistä työskentelyä pelastuslaitoksella tehtävän työn ohessa, että päätin jättää opinnäytetyön lopullisen laatimisen opintosuunnitelman mukaisesti pakollisten opintojen loppuksi. Näin jälkeen päin mietittynä tein mielestäni oikean valinnan. Opintojen kuormittavuus oli suurempi, kuin olin ennakoinut.

Sähköautojen akkupalojen sammuttamisen aihepiiristä tehtävän opinnäytetyöni lopullinen aihe tarkentui lopulta vasta keväällä 2022. Alkuperäinen tarkoitukseni oli laatia kehittämishanketyyppinen opinnäytetyö Helsingin pelastuslaitoksella kehittämistämme alustasprinkleristä. Tästä aiheesta tekemässäni opinnäytetyössäni olisin tutkinut alustasprinklerin todellista käytettävyyttä ja mitannut sen toiminnallisen tehokkuuden koeolosuhteissa toteutetussa akkupalossa. Alkuperäinen aiheeni oli kuitenkin hylättävä, koska opinnäytetyön tärkeimpänä osana pitämäni koejärjestelyiden toteuttaminen osoittautui liian hankalaksi järjestää. Sain omaksuttua kuitenkin alustasprinklerin kehityskaaren ideasta-työvälineeksi aikana hyvän määrän tietoa sähköautoista ja niiden erityispiirteistä, joihin pelastuslaitoksen operatiivisen toiminnan tulisi varautua. Se edesauttoi merkittävästi tämän opinnäytetyön laatimista. Alustasprinkleriä kehittämässä olleessa työryhmässämme oli pelastustaktista ja -teknistä

osaamista sekä aihekohtaista asiantuntijuutta pelastuslaitoksemme eri henkilöstöryhmistä, ja sen ryhmän tuki sekä neuvot ovat helpottaneet, jos en ole osannut hakea tietoa tämän opinnäytetyön laatimiseksi.

Eri medioista on havaittavissa monenlaisia uhkakuvia liittyen sähköautojen akkupaloihin. Osa uhkakuvista voi olla jopa sen kaltaisia, että joissakin tapauksissa pelastustoimintaan sähköautoihin liittyvissä tulipaloissa tai onnettomuuksissa voidaan suhtautua liiallisella epävarmuudella. Tässä asiassa onneksi tieto ei lisää tuskaa, vaan toimii päinvastoin. Luotan, että pelastustoimen tietotason ja osaamisen kehittyessä mahdolliset uhkakuvat sähköautoihin liittyen lieventyvät. Ainakin minun kohdallani on käynyt niin tämän opinnäytetyön laatimisen myötä.

LÄHTEET

Asia Pacific Fire. www-dokumentti. <https://apfmag.mdmpublishing.com/safely-tackling-electric-vehicle-and-internal-combustion-engine-fires/>. 3.9.2022.

AutoinsuranceEZ. Gas vs. Electric Car Fires [2022 Findings]. www-dokumentti. <https://www.autoinsuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/>. 17.6.2022.

Bisschop, R., Willstrand, O. Amon, F. & Rosengren, M. 2019, *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*. RISE Research Institutes of Sweden.

Current EV. Pure Electrics, Extended Range EVs, Plug-In Hybrids, Hybrids –What’s the difference? www-dokumentti. https://currentev.com/page/electric_vehicles_info. 2.6.2022.

EV Volumes. www-dokumentti. <https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>. 7.6.2022.

Firehouse.com. www-dokumentti. <https://www.firehouse.com/safety-health/press-release/21206687/ntsb-report-addresses-safety-issues-related-to-lithiumion-battery-fires>. 4.6.2022.

Gaia Consultin Oy, 2019. www-dokumentti. <https://tukes.fi/documents/5470659/6372809/Teollisuuden+akkaturvallisuusopas/68c21eee-cc0f-8184-bed4-aa71e83140b1/Teollisuuden+akkaturvallisuusopas.pdf>. 31.8.2022.

IDTechEx. www-dokumentti. <https://www.idtechex.com/en/research-article/ev-fires-less-common-but-more-problematic/25749>. 11.8.2022.

Jalopnik. www-dokumentti <https://jalopnik.com/why-tesla-is-so-interested-in-cell-to-pack-batteries-1843463349>. 7.6.2022.

Kalliotiura, P. 2021. *Litiumakut ja vaihtoehtoiset akkuteknologiat*. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. Tampere

Kultanen, K. 2019. *Sähköautojen paloturvallisuus*. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Helsinki

Luo, W., Zhu, S., Gong, J. & Zhou, Z. www-dokumentti. https://www.researchgate.net/publication/322995743_Research_and_Development_of_Fire_Extinguishing_Technology_for_Power_Lithium_Batteries. 29.8.2022.

Linja-aho, V. 2022. *Litiumioniakkutekniikka*. Suomen Autoteknillinen Liitto ry. Helsinki.

Moottori.fi. www-dokumentti. <https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/mika-ihmeen-kevythybridi-pienella-sahkoistyksella-pienta-saastoa/>. 10.8.2022.

Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB), 2018. *Brandskyddskläders skyddskapacitet-materialtester med kemikalier som bildas vid bränder och termisk rusning i Li-jon batterier i e-fordon*. Totalförsvarets forskningsinstitut – FOI.

Mäki, J. 2021. *Tieliikennepelastaminen*. A-sarja: Oppimateriaali. Pelastusopisto. Kuopio.

National Transportation Safety Board (NTSB). Safety Report. Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles. www-dokumentti. <https://www.nts.gov/safety/safety-studies/Documents/SR2001.pdf>. 10.5.2022.

Opetus.tv. www-sivusto. <https://opetus.tv/kemia/ke3/entalpia/>. 17.6.2022.

Pelastusalan ammattilainen. www-dokumentti. <https://pelastusalan.ammattilainen.fi/innovaatiopalkinnoilla-huomioita-sahkoautopalojen-tyoturvallisuudelle/>. 3.9.2022

Pelastuslaki 2011/379.

Rosenbauer. www-dokumentti. https://fescosales.com/wp-content/uploads/2022/05/22-RBA-BEST_Brochure_black-Web.pdf. 3.9.2022

RISE 2020a. www-dokumentti. https://www.ri.se/sites/default/files/2020-12/FIVE2020_Willstrand.pdf. 31.8.2022.

RISE 2020b. www-dokumentti. <https://risefr.com/media/publikasjoner/upload/2020/rise-report-2020-91-evaluation-of-fire-in-stavanger-airport-cark-park-7-january-2>. 12.9.2022

Santasalo, S. 2021. *Litiumioniakut paloturvallisuuden näkökulmasta*. Kandidaatintutkielma. Helsingin yliopisto. Helsinki.

SESKO ry, 2021. *Sähköajoneuvojen lataussuositus*. Sähkötekniikan alan kansallinen standardointijärjestö. Helsinki.

Sun, P., Bisschop, R., Niu, H. & Huang, X. 2020. *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles*. Research Centre for Fire Engineering, Hong Kong Polytechnic University. RISE Research Institutes of Sweden. Guangzhou Industrial Technology Research Institute.

Suosalo, J. 2020. *Pelastuslaitoksen varautuminen sähköautoiloihin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa*. Ylemmän ammattikorkeakoulututkimuksen opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu. Hämeenlinna

Sähköautojen lataus, Pelastusviranomaisten ajankohtaispäivät pelastustoimen laitteista. www-dokumentti. <https://tukes.fi/documents/5470659/8489681/2017+Vesa+sahkoautojen+lataus/516307d5-fc96-4117-84e4-aa9534bbe4fe/2017+Vesa+sahkoautojen+lataus.pdf>. 7.6.2022.

Sähköautot – Nyt! www-dokumentti. <http://www.sahkoautot.fi/wiki:saehkoeautomuunnoksen-akuston-valvonnan-vaatimukset>. 13.6.2022.

The Fire Protection Research Foundation. Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results. www-dokumentti. <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Electrical/EV-BatteriesPart-1.ashx>. 17.6.2022.

Tilastokeskus. www-dokumentti. https://www.stat.fi/til/mkan/2021/mkan_2021_2022-03-01_tie_001_fi.html. 27.5.2022.

Traficom. www-dokumentti. <https://liikenne fakta.fi/fi/ymparisto/henkiloautot/liikennekaytossa-olevat-henkiloautot-kayttovoimittain>. 7.6.2022.

Volkswagen AG. www-dokumentti. <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/in-brief-key-components-for-a-new-era-the-battery-system-5645>. 20.5.2022.

VTT. 2021. *Akkuteknologiat ja lataus paloturvallisuuden kannalta*. VTT:n ja Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen välisen Sähköbussien paloturvallisuus -kokouksen esittelymateriaali. 11.5.2021.

Warner, J. 2019. *Lithium-ion Battery Chemistries, A Primer*. Elsevier inc.

Willstrand, O. 2020. www-dokumentti. <https://www.ri.se/en/our-stories/a-lower-risk-of-fire-with-electric-cars>. 13.6.2022.

Willstrand, O. Bisschop, R., Blomquist, P., Temple, A. & Anderson, J. 2020. *Toxic Gases from Electric Vehicle Fires*. RISE Research Institutes of Sweden, Division Safety & Transport.

Yabe, T., Akatsu, K., Okui, N., Niikuni, T. & Kawai, T. 2012. *Efficiency Improvement of Regenerative Energy for an EV*. World Electric Vehicle Journal Vol. 5. 2012 WEVA.

Zeng, Y., Chalise, D. Lubner, D., Kaur, S. & Prasher, R. & 2021. *A review of thermal physics and management inside lithium-ion batteries for high energy density and fast charging*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA. University of California, Berkeley, California, USA.

LIITE 1

Taulukoidut tiedot PRONTO-rekisteriin vuosina 2017–2022 (toukokuu) kirjatuista autopalotehtävistä, joissa kohteena tai osallisena on ollut täyssähkö- tai hybridauto.

Liite 1, osa 1/3

Oma huomiot raportista	Ajoneuvo- tyyppi	Tilanne alussa	Alku- sammu- tus	Pelastuslaitoksen toimenpiteet tilanteen alussa	Uudel- leen- syttyminen	Pelastuslaitoksen toimenpiteet uudelleen-syttyamisen jälkeen	Lisävahinkojen torjunta- toimenpiteet	Pelastus- laitoksen käyttämä sammutusvesi (m ³)	Paloiko auton akusto?	Oliko akustossa alkanut lämpökär- kaaminen?	Pelastus- toiminnan- johtajan kuvaus syttymissyyistä
Kadun varressa ollut hybridauto syttynyt palamaan. Ei ollut latauksessa. Liekkipalo sammunut nopeasti, jonka jälkeen ajoakkaa jäähdytetty käyttämällä 4 m ³ vettä	Hybridi	Auto pysäköitynä, ei latauksessa	Ei	Sammutettu vedellä	Ei		Akuston jäähdytys vedellä	4	Ei	Epätodennäköistä	Auto syttynyt peräpäästä.
Hybridauto ollut latauksessa, jolloin alkanut savuttamaan voimakkaasti. Pelastuslaitos siirtänyt savuavan auton pois rakennuksen läheltä, jonka jälkeen auto oli syttynyt palamaan. Pelastuslaitos sammutanut auton nopeasti. Ei jälkijäähdytystä vedellä. Sytymissy tuntematon. Vettä käytetty 3 m ³	Hybridi	Auto pysäköitynä, latauksessa	Ei	Sammutusraivaus (ajoneuvon siirto), jonka jälkeen sammutus vedellä	Ei			3	Ei	Epätodennäköistä	Auto oli syttynyt palamaan todennäköisesti jostakin sähkön oikosulusta.
Hybridauto syttynyt kesken ajon. Auto tien sivuun, jolloin ei vaaraa tulipalon leviämisestä. Tämän jälkeen annettu palaa hallitusti kokonaan. Vettä käytetty 0,2 m ³	Hybridi	Syttynyt kesken ajon	Ei	Annetaan auton palaa hallitusti loppuun	Ei			0,2	Kyllä	Kyllä	
Hybridauto ollut osallisena autojen kulkutusperävaunussa alkaneessa palossa, jossa paloi yhteensä viisi autoa. Tulipalon sammuttamisen jälkeen hybridauto siirretty toisaalle ja upotettu veteen vuorokaudeksi jäähdytyksen varmistamiseksi. Vettä käytetty 26 m ³	Hybridi	Osallisena muussa tulipalossa	Ei	Sammutettu vedellä	Ei		Veteen upottaminen	26	Ei	Ei pääteltävissä onnettomuus-selosteeseen perusteella	Pyöränlaakerin lämpeneminen, joka syyti renkaan.
Hybridauto alkanut savuttamaan kesken ajon. Auto ajettu tien sivuun, jonka jälkeen syttynyt palamaan. Pelastuslaitos sammuttanut auton, jonka jälkeen auto siirretty sammutuslavalle (upotettu?). Sammutusvettä käytetty 3 m ³	Hybridi	Syttynyt kesken ajon	Ei	Sammutettu vedellä	Ei		Veteen upottaminen	3	Ei	Epätodennäköistä	Mahdollinen oikosulku takakontin käyttöakusta tai sitten sähkömoottorin vikaantuminen vasemmasta takapyörästä.
Hybridauto palaa konepellin alla. Pelastuslaitos sammuttaa palon nopeasti vedellä ja varmistaa vaahdottamalla. Akustoa jäähdytetään alustasprinklerillä, kunnes savun tai lämmön muodostumista ei ole havaittavissa. Vettä käytetty kokonaisuudessaan 5 m ³	Hybridi	Auto pysäköitynä, ei latauksessa	Ei	Sammutus vedellä, jonka jälkeen vaahdotus	Ei		Akuston jäähdytys vedellä	5	Ei	Epätodennäköistä	
Hybridauto alkanut palamaan peräkontista pysähtymisen jälkeen. Kujettaja suorittanut alkusammutuksen vesiletkulla ja kastelukannulla. Pelastuslaitoksen saapuessa kohteeseen auto sammunut ja lievä savun muodostusta. Pelastuslaitos kytkee auton käynnistysakun ja huoltokytkimen irti. Auto täysin sammunut hinauspalvelun toimittaessa auton pois. Pelastuslaitos ei käyttänyt vettä.	Hybridi	Auto pysäköitynä, ei latauksessa	Kyllä, sammuttanut palon	Ajoneuvon tarkistus ja varmistus	Ei		Ajoneuvo vIRRattomaksi / korkeajännitejärjestelmän huoltoerottimen irtikytkeminen	0	Ei	Epätodennäköistä	Hybridauton käynnistysakku syttynyt palamaan ja sytyttänyt ympärillä olevan materiaalin. (Sijaitsee peräkonttiliassa, oikea takakulma)
Pysäköidystä mopoautosta syttynyt palo levinnyt viereiseen hybridautoon. Pelastuslaitos sammuttanut autopalot käyttämällä 1,5 m ³ vettä. Sammuttamisen jälkeen hybridautosta katkaistu virrat huoltoerottimesta.	Hybridi	Osallisena muussa tulipalossa	Ei	Sammutettu vedellä	Ei		Ajoneuvo vIRRattomaksi / korkeajännitejärjestelmän huoltoerottimen irtikytkeminen	1,5	Ei	Epätodennäköistä	

Liite 1, osa 2/3

Oma huomiot raportista	Ajoneuvo- tyyppi	Tilanne alussa	Alku- sammutus	Pelastuslaitoksen toimenpiteet tilanteen alussa	Uudel- leen- syttymis- nen	Pelastuslaitoksen toimenpiteet uudelleen-syttymisen jälkeen	Lisävahinkojen torjunta- toimenpiteet	Pelastus- laitoksen käyttämä sammutusvesi (m3)	Paloiko auton akusto?	Oliiko akustossa alkanut lämpökar- kaaminen?	Pelastus- toiminnan- johtajan kuvaus syttymissyystä
Hybridiauto syttynyt aiemmin päivällä kesken ajon, jolloin pelastuslaitos sammuttanut palon ja vaahdottanut konetilan. Auto ajettu tämän jälkeen toiseen sijaintiin, jonka jälkeen auto syttynyt uudestaan palaamaan konepellin alta. Pelastuslaitoksen saapuessa kohteeseen hybridiauton konepellin alla oranssissa voimavirtajohdossa valokaari ja kipinointia. Alkusammutuksessa käytetystä kasisammuttimella ei vaikutusta. Pelastuslaitos sammuttanut vedellä ja tehnyt hybridijärjestelmän virrattomaksi. Hybridijärjestelmän akusto ei vaarassa, koska sijaitsee auton takana. Käytetyn veden määrä 0,5 m3.	Hybridi	Syttynyt kesken ajon	Ei	Sammutus vedellä Lisävahinkojen estäminen vaahdottamalla	Kyllä	Uudelleensyttymisen jälkeen sivullisen toteuttamalla alkusammutuksella ei vaikutusta. Sammutus vedellä	Ajoneuvo virrattomaksi / korkeajännitejärjestelmän huoltoerottimen irtikytkeminen	0,5	Ei	Epätodennäköistä	Hybridijärjestelmä edelleen aktiivisena sammutusvaahdon haihduttua. Hybridijärjestelmä oranssi johdotus lyö valokaarta ja kipinää konepellin alla, vaikka auto näennäisesti virraton.
Hybridiauto ollut parkissa pari tuntia, jonka jälkeen havaittu auton sisältä tulevan keltaista savua. Pelastuslaitoksen saapuessa kohteeseen ei enää savunmuodostusta tai merkkejä tulipalosta ja takakontissa takavalon kohdalla sekä auton ulkopuolella havaittavissa palamisen jälkiä. Ei havaittavaa lämmön kohoamista.	Hybridi	Auto pysäköitynä, ei latauksessa	Ei	Ajoneuvon tarkistus ja varmistustehtävä	Ei			0	Ei	Epätodennäköistä	
Hybridiauto syttynyt palamaan pysäköitynä. Pelastuslaitoksen saapuessa auton rakenteet palaneet suurelta osin. Autopalo sammutettu vedellä ja varmistettu vaahdottamalla. Pelastuslaitos siirtänyt auton toiseen sijaintiin, jossa epäilty akuston termisen reaktion aiheuttama savuaminen ei aiheuttanut muuta vaaraa. Vettä käytetty 400 m3 (yksikkövirhe?)	Hybridi	Auto pysäköitynä, ei latauksessa	Ei	Sammutus vedellä, jonka jälkeen vaahdotettu	Ei		Ajoneuvon siirtäminen	0,4?	Kyllä	Kyllä	
Hybridiauton dieselmoottori sammunut ajon aikana ja ajoenergia siirtynyt akkukäytölle. Saman aikaisesti alkanut savuttamaan konepellin alta. Pelastuslaitoksen saapuessa kohteeseen palo sammunut, mutta konetilan lämmöt korkeat. Pelastuslaitos jäähdytti moottoritilaa käyttämällä 1 m3 vettä ja teki auton normaaliakun virrattomaksi.	Hybridi	Auto pysäköitynä, ei latauksessa	Ei	Moottoritilan jäähdyttäminen vedellä	Ei		Ajoneuvo virrattomaksi / korkeajännitejärjestelmän huoltoerottimen irtikytkeminen	1	Ei	Ei päätettävissä onnettomuustilanteen perusteella	Konepellin alta. Ei tarkkaa syttymissyystä.

Liite 1, osa 3/3

Oma huomiot raportista	Ajoneuvo- tyyppi	Tilanne alussa	Alku- sammu- tus	Pelastuslaitoksen toimenpiteet tilanteen alussa	Uudel- leen- syttyminen	Pelastuslaitoksen toimenpiteet uudelleen-syttymisen jälkeen	Lisävahinkojen torjunta- toimenpiteet	Pelastus- laitoksen käyttämä sammutusvesi (m3)	Paloiko auton akusto?	Oliiko akustossa alkanut lämpökar- kaaminen?	Pelastus- toiminnan- johtajan kuvaus syttymissyystä
Täyssähköauto syttynyt palamaan latauksen aikana. Latauspistoke otettu irti. Pelastuslaitoksen saapussa kohteeseen auto savuttaa runsaasti auton alta ja syttyy palamaan. Pelastuslaitos sammuttaa palon käyttämällä vettä 1 m3. Pelastuslaitoksen poistuttua kohteesta auto syttyy uudestaan ja pelastuslaitos saapuu kohteeseen. Auto palaa kokonaan. Sammuttamisesta huolimatta auto syttyy uudelleen vielä kaksi kertaa. Pelastuslaitos käyttää vettä sammuttamiseen 10 m3	Täyssähkö- auto	Auto pysäköitynä, latauksessa	Ei	Sammutettu vedellä	Kyllä	Sammutettu vedellä		11	Kyllä	Kyllä	
Hybridiauto syttynyt edellisessä päivänä kesken ajon ja johtanut auton ulosajoon. Auto oli tällöin palanut hybridijärjestelmän korkeajännitekomponenttien kohdalta. Nyt auton korkeajännitekomponentit palavat uudestaan, jonka ohikulkijat huomaavat ja sammuttavat. Pelastuslaitoksen saapussa kohteeseen palo on sammunut	Hybridi	Syttynyt kesken ajon	Ei tiedossa	Ajoneuvon tarkistus ja varmistustehtävä	Kyllä	Onnistuneet alkusammutus-toimenpiteet Ajoneuvon toteaminen vaarattomaksi		0	Ei	Epätodennäköistä	Ajoneuvon korkeajännite komponentit palovat, syy ei tiedossa
Täyssähköauto syttynyt palamaan latauksen aikana. Oltu latauksessa viikon ajan. Pelastuslaitos sammutanut auton käyttämällä vettä 2 m2. Auto palanut kokonaan.	Täyssähkö- auto	Auto pysäköitynä, latauksessa	Ei tiedossa	Sammutettu vedellä	Ei			2	Kyllä	Kyllä	Sähköauto ollut viikon latauksessa ja syttynyt palamaan. Auto tuhoutui täysin, joten tarkempaa syttymissyystä on vaikea sanoa.
Hybridiauto syttynyt palamaan moottoritilaan sen jälkeen, kun lohko- ja sisälämpimittimet olivat kytkeytyneet päälle. Pelastuslaitos sammutti palon käyttämällä vettä 1,5 m3	Hybridi	Syttynyt kesken ajon	Ei	Sammutettu vedellä	Ei			1,5	Ei	Epätodennäköistä	Mahdollisesti lohkolämpimittimestä aiheutunut palo.
Hybridiauto alkanut savuttamaan latauksen aikana. Latausasema ja kiinteistö virrattomaksi. Alkusammutuksesta ei vaikutusta. Pelastuslaitoksen saapussa kohteeseen auto palaa. Pelastuslaitos irroittaa latauskaapelin, siirtää palavan auton rakennuksen vierestä, aloittaa sammutustoimenpiteet ja irroittaa auton 12 V:n akun sekä kytkee huoltoerotimen irti. Auton rakenteita raivataan auki, jotta sammutus-/jäähdytysvettä saadaan paremmin akustoon. Auton runkoon porataan kaksi reikää, joista akustoon saadaan 4 m2 vettä. Autopalo sammuu.	Hybridi	Auto pysäköitynä, latauksessa	Kyllä, ei vaikutusta	Sammutusraivaus Sammutus vedellä	Ei		Ajoneuvo virrattomaksi / korkeajännite-järjestelmän huoltoerotimen irtikytkeminen	4	Kyllä	Kyllä	Henkilöauto alkanut savuttaa/syttynyt latauksen aikana (ladattava hybridi).