

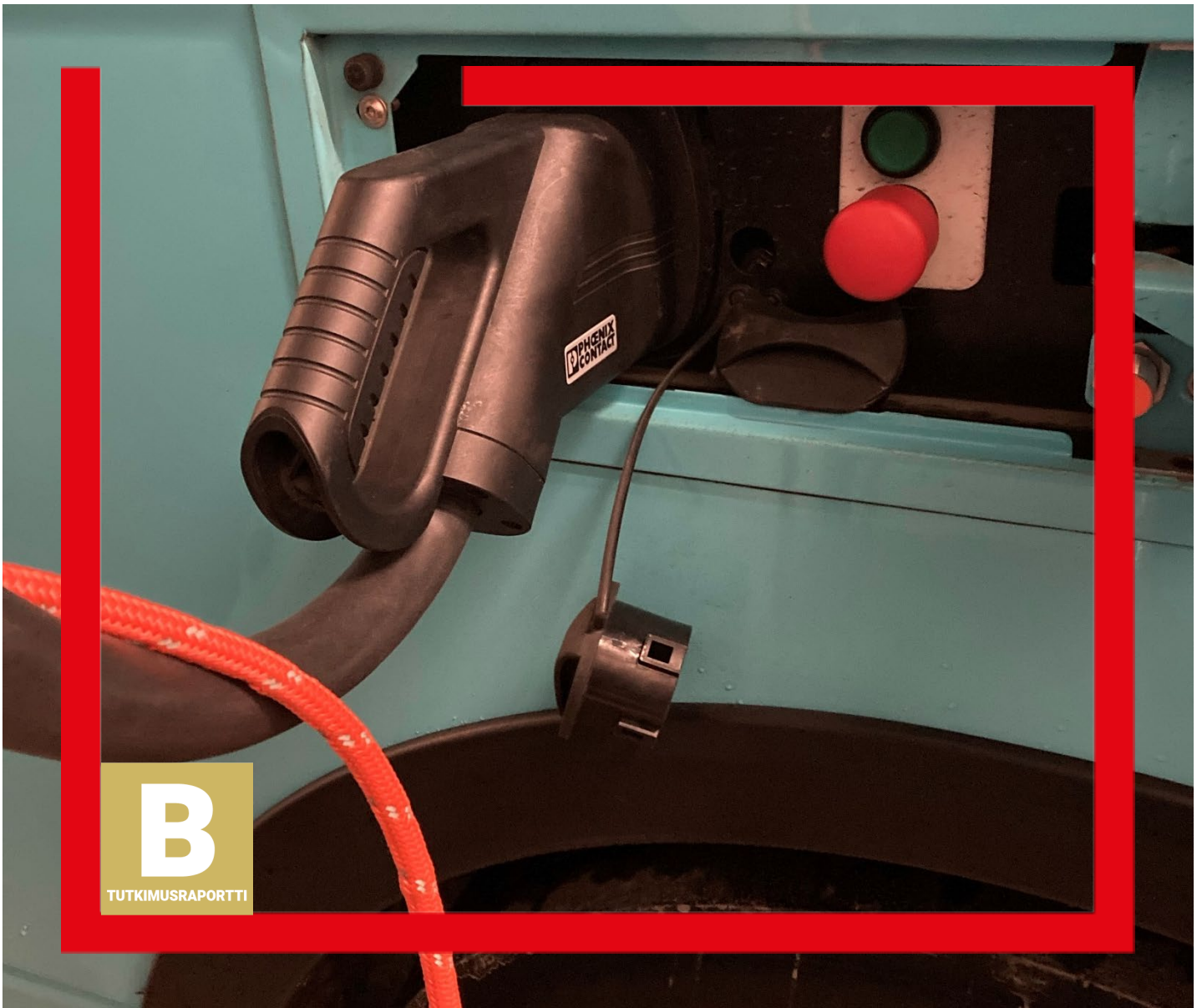


PELASTUSOPISTO

Uudet energiamuodot liikennevälineissä ja energiavarastoissa

Sammutustaktiikka ja -tekniikka

Marko Hassinen





PELASTUSOPISTO

Uudet energiamuodot liikenne- välineissä ja energiavarastoissa

Sammutustaktiikka ja -tekniikka

Marko Hassinen



PELASTUSOPISTO

Pelastusopisto

PL 1122

70821 Kuopio

www.pelastusopisto.fi

Pelastusopiston julkaisu

Pelastusopiston julkaisu B-sarja: Tutkimusraportit

2/2022

ISBN 978-952-7217-68-9 (pdf)

ISSN 2342-9313 (pdf)



Pelastusopisto

Marko Hassinen

Uudet energiamuodot liikennevälineissä ja energiavarastoissa – Sammutustaktiikka ja -tekniikka

Tutkimusraportti, 42 sivua, 1 liite

Joulukuu 2022

Tiivistelmä

Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda perusteet ajoneuvopalojen sammutustekniikalle käyttövoiman muuttuessa perinteisestä polttomoottoritekniikasta uusiutuviin energiamuotoihin. Ilmaston muutos ja hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteet edistävät ajoneuvojen käyttövoimassa tapahtuvaa muutosta ja muutosnopeus on suuri. Käyttövoiman muutos vaatii uusia tekniikoita, joilla palava ajoneuvo voidaan sammuttaa. Muutos on ollut niin nopea, että uusiin haasteisiin ei ole ehditty mukautua, joten työtä sopivien tekniikoiden löytämiseksi tehdään jatkuvasti. Uusien tekniikoiden myötä syntyy myös uusia taktisia vaihtoehtoja.

Huoneistopalojen sammutustekniikassa on myös käynnissä muutos, jota ajavat henkilöstön ikääntyminen, resurssien pieneneminen ja sammuttajien altistuminen syöpävaarallisille aineille. Samat muutosvoimat vaikuttavat myös ajoneuvopalojen sammuttamisessa, jossa altistumista voidaan vähentää sekä taktisilla, että teknisillä menettelyillä.

Sähköautojen akkupalot ovat verraten harvinaisia, huomattavasti harvinaisempia kuin polttomoottoriautojen palot. Ongelmallista sähköauton akkupalosta tekee sen totutusta täysin poikkeava palokäyttäytyminen ja ongelmallinen sammuttaminen. Yhtä oikeaa ja muita parempaa tekniikkaa tähän tehtävään ei vielä ole löydetty, jos koskaan löydetäänkään. Olennaista on osata valita olemassa olevista taktisista ja teknisistä vaihtoehtoista tilanteeseen sopivin. Tämä julkaisu pyrkii antamaan riittävät taustatiedot näiden valintojen tekemiseen.



Emergency Services Academy Finland

Marko Hassinen

Energy transition in vehicles and energy storages – Firefighting tactics ja techniques

Research report, 42 pages, 1 attachment

December 2022

Abstract

This research publication aims at laying grounds for vehicle fire extinguishing techniques in evolving energy transition in transport. Renewable energy is replacing internal combustion engines at a speed unforeseen in the past. Climate change and carbon emission reduction goals drive the energy transition, and the speed of the change is fast. Traditional methodology for putting out vehicle fires are no longer adequate as the fire behavior of the new energy vehicles differs from what the fire service is used to. The energy transition has been so fast that the adaptation to these new challenges has not kept up with the change and there is a lot of work to be done to tie up that gap. New methodology is developed all the time, and with new methodology also new tactical options are possible.

Energy transition is not the only driver for changes in fire extinguishing methodologies. Compartment firefighting is also changing with the adaptation of new tactical paradigms, such as the quadrant model. Fire crews are aging and the physical nature of offensive interior attack with smoke diving needs alternative methods. Smoke diving is exposing firefighters to carcinogenic substances, and other hazards. The same exposure could and should be avoided with putting out vehicle fires.

Electric vehicle battery fires are rare, much more so than with internal combustion engine vehicles. What makes these fires stand out is their very different behavior and difficulty. As new methods for these fires have been developed, the one silver bullet is yet to be found. It may be that such one perfect solution will never be found. The essential skill is to master a set of both tactical and technical measures and pick the one best suitable for the situation at hand. A key element and a driving force of this publication is to give the reader sufficient knowledge to make those decisions.

ABI/INFORM: Vehicle fire, Electric vehicle, Gas vehicle, Extinguishing technique



Alkusanat

Tämä selvitystyö ja raportti on osa Pelastusopiston hanketta Sammutustekniikka Rakennus- ja liikennevälinepaloissa. Hanketta rahoitti Palosuojelurahasto, jonka tuki on mahdollistanut myös tämän julkaisun tekemisen. Kiitos tästä tuesta Palosuojelurahastolle.

Haluan myös kiittää Kuopion Liikenne Oy:tä sekä K-Auto Oy:n Kuopion toimipistettä mahdollisuudesta keskustella sähköajoneuvotekniikan asiantuntijoiden kanssa ja tutustua sähköajoneuvoihin pintaa syvemmillä.

Kiitos kuuluu myös Pekka Toivaselle ja Timo Laatikaiselle Pelastusopistolta sekä palomestari Anna Eskeliselle Pohjois-Savon pelastuslaitokselta ja ruiskumestari Janne Luoma-aholle Keski-Suomen pelastuslaitokselta avusta erinäisten avointen kysymysten selvittelyssä.

Erityisen kiitoksen haluan esittää edellä mainitun hankkeen projektipäällikölle Ismo Hutulle työn kommentoinnista, kirittämisestä ja sparrauksesta sekä Iiro Wennbergille Pirkanmaan pelastuslaitokselta työn kommentoinnista ja erittäin arvokkaasta asiantuntija-avusta.

Suonenjoella 12.12.2022

Marko Hassinen



Sisällys

1	Johdanto	7
2	Litium-ioniakkuteknologia	8
2.1	Akun hallintajärjestelmä (BMS, Battery Management System)	10
2.2	Terminen karkaaminen (Thermal runaway)	11
2.3	Akkukemian ja varaustilan (SOC %) vaikutus palokäyttäytymiseen	12
2.4	Akkupalon sammuttaminen	13
2.5	Suuret energiavarastot	15
3	Akkuteknologia liikenteen käyttövoimana	18
3.1	Sähköautot ja ladattavat hybridit	18
3.2	Joukkoliikenne	20
3.3	Sähköajoneuvojen palokäyttäytyminen	21
3.4	Sähköturvallisuus käsiteltäessä ajoneuvoja	22
4	Kaasuautot	25
5	Sammutustaktiikan ja -tekniikan valinta	26
5.1	Tiedon hankinta	26
5.2	Akkupalon tunnistaminen	28
5.3	Sammutustaktiset valinnat	29
5.4	Ulkoinen jäähdyttäminen	31
5.4.1	Ulkoinen jäähdytys ajoneuvoa kallistamalla	31
5.4.2	Alustasprinkleri	32
5.4.3	Varsisammutin	32
5.5	Läpäisevät menetelmät	33
5.5.1	Suihkuputki Murer	33
5.5.2	Battery Extinguishing System Technology	33
5.5.3	AVL Stingray One	34
5.5.4	Sammutinleikkuri	34
5.6	Upotusmenetelmät	35
5.7	Kontit	35
5.8	Sammutuspeitteet	36
5.9	Yhteenvedo menetelmistä	37
5.9.1	Ajoneuvoihin rakennetut sammutusjärjestelmät	38
5.10	Sammuttamisen työturvallisuus	38



6	Yhteenveto	40
7	Suosituksset	42
	Lähteet	43
	Liitteet	46



1 Johdanto

Liikennevälineiden käyttövoiman vaihtoehdot lisääntyvät kiihtyvällä tahdilla yhteiskunnan pyrkiessä vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Fossiiliset polttoaineet ovat suuri tekijä ilmaston lämpenemisessä ja siksi fossiilisten polttoaineiden käyttöä pyritään aktiivisesti vähentämään. Tämä näkyy liikenteessä siten, että yhä useampi ajoneuvo käyttää jotain uusiutuvaa energiamuotoa. Siinä, missä polttomootoriajoneuvot ovat pelastustoimelle tuttuja ja niiden kanssa toimiminen arkipäivää, uusia energiamuotoja käyttävät ajoneuvot pitävät sisällään paljon uutta teknologiaa. Tämä uusi teknologia tuo mukanaan haasteita, jotka pelastustoimessa täytyy ymmärtää, jotta pelastustoiminta olisi tehokasta ja työskentely turvallista.

Uusiutuvan energian käyttöä pyritään luonnollisesti lisäämään myös muualla kuin liikenteessä ja sähköntuotanto on tällä hetkellä muuttumassa nopeasti uusiutuvaan tuotantoon, kuten tuuli- ja aurinkovoimaan. Näiden energiamuotojen suuri haaste on tuotannon ja kulutuksen synkronoinnissa. Koska kulutus ja tuotanto eivät ajallisesti välttämättä osu kohdalleen, on energiaa pystyttävä varastoimaan. Sähkön varastoiminen akkujärjestelmiin on yksi tapa tasata kulutus- ja tuotantohuippujen eroja.

Tämän raportin tavoite on luoda katsaus tällä hetkellä käytössä olevan ajoneuvokannan uusia energiamuotoja hyödyntävien ajoneuvojen tekniikkaan ja sen merkitykseen pelastustoimelle. Näin ollen raportti keskittyy kaasu- ja sähköajoneuvoihin, painottuen vahvasti jälkimmäiseen. Vety on jätetty pois tarkastelusta, koska vetyautoja ei raportin kirjoitushetkellä pysty Suomessa tankkaamaan, joten niiden palotkin ovat hyvin epätodennäköinen tapahtuma. Sähköautojen osalta painopiste on korkeajänniteakun palotapahtumassa, koska palokäyttäytyminen muutoin noudattelee polttomootoriautoista tuttua palamista. Samalla raportissa käsitellään energiavarastoihin, lähinnä Litium-ioniakkuteknologiaan liittyviä pelastustoiminnan haasteita.



2 Litium-ioniakkuteknologia

Nykyisissä Litium-ioni akustoissa on varsin paljon energiaa pakattuna suhteellisen pieneen tilaan. Polttotesteissä on havaittu, että palaessaan tämän energian vapautuminen tuottaa korkeita lämpötiloja ja pitkiä liekkisuihkuja, jotka helposti sytyttävät muita materiaaleja ja rakenteita. Erityisesti sylinteriakkujen sisään myös muodostuu painetta, joka purkautuu räjähdysten omaisesti, aiheuttaen palavia heitteitä, jopa parin kymmenen metrin etäisyydelle. Kuluttajatuotteissa riskejä voi vähentää huomattavasti ohjeen mukaisella käytöllä sekä valvotulla latauksella. Suuritehoisia akkulaitteita, kuten tasapainoskooterit, ei tulisi ladata asuintiloissa lainkaan.

Suuremmassa mittakaavassa akkujen ja akustojen paloturvallisuus tulee vastaan suurissa akustoissa, joita käytetään liikennevälineissä ja uusiutuvan energian varastoinnissa. Uusiutuvia energiamuotoja, kuten vaikkapa aurinkoenergiaa on varsin vaikea tuottaa tarvetta vastaavalla tavalla, vaan energian kulutuksen ja tuotannon huippukohdat usein sattuvat ajallisesti siten, että energiaa on tarve varastoida.

Sekä liikennevälineissä että energian varastoinnissa akustot ovat sekä kooltaan että energiamäärältään aivan toista luokkaa kuin kuluttajaelektronikassa. Fortumin Järvenpäähän rakentamassa energiavarastossa, nimeltään Batcave, on 2 megawatin nimellisteho ja energiaa varastoituna 1 megawattitunnin verran (Fortum 2017). Yksittäisiä kennoja kyseisessä akustossa on noin 6600. Tällaisissa akustoissa sekä akkujen rakenne (akkukemia) että niiden käyttöä säätelevä elektronikka ovat turvallisuuden kannalta ratkaisevassa asemassa.

Litium akkuja on periaatteellisesti kahta tyyppiä, ladattavia akkuja (secondary lithium battery) ja ei ladattavia paristoja (primary lithium battery). Tässä raportissa käsitellään vain ladattavia akkuja, mutta on syytä huomioda, että litium paristojen palossa kyseessä on metallipalo, jossa vettä ei sovi käyttää sammutteena. Litium paristoissa anodimateriaali on litium metallia. Näissä paloissa sopiva sammute on jokin metallipalosammute, esimerkiksi D-luokan sammute tai vaikkapa kuiva hiekka tai sementti.

Akut voidaan jakaa rakenteen mukaan sylinteriakkuihin, prismaattisiin ja pussikennoakkuihin. Pussikennoakkuja (Kuva 1 A) käytetään mm. energiavarastoissa ja sähköautojen akustoissa. Sylinterikennoakkuja (Kuva 1 B) puolestaan käytetään muun muassa kulutuselektronikassa, sähköpotkulaidoissa ja -polkupyörissä sekä erilaisissa akkutyökaluissa. Sähköautoista Tesla käyttää sylinterikennoja akustoissaan. Prismaattisia akkuja (Kuva 1C) löytyy mm. matkapuhelimista ja kameroista, mutta myös korkeajänniteajoneuvoista.

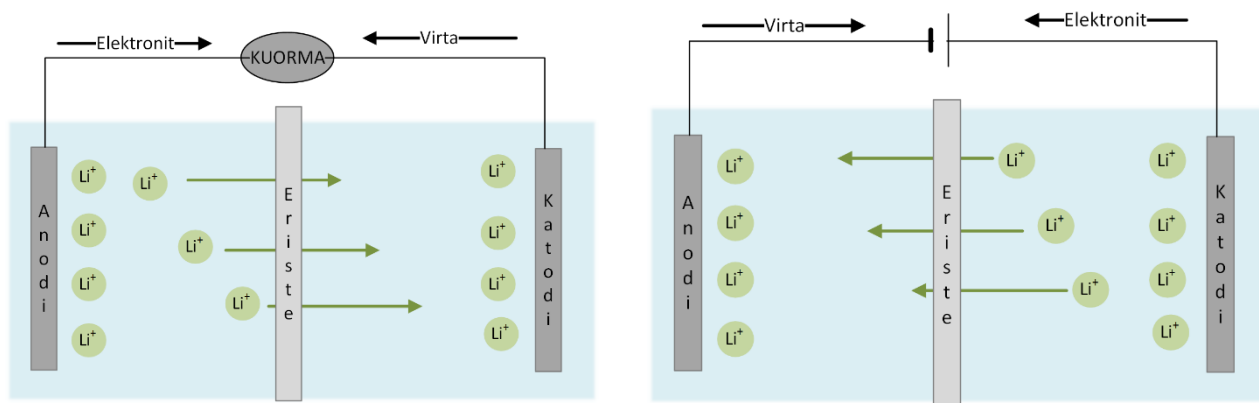


Kuva 1. Pussikkenno, sylinterikkenno ja prismaattinen akku

Ladattavat litium akut (litium-ioni ja litium-polymeeri) koostuvat anodista (negatiivinen elektrodi), katodista (positiivinen elektrodi) sekä elektrolyyttiliuoksesta. Anodi on yleisimmin kupariytiminen grafiitti ja katodin materiaali vaihtelee, olleen yleensä alumiiniytiminen litiumin, mangaanin, koboltin tai rautafosfaatin oksidi. Testeissä pääosin käytetyssä NMC (nikkeli-mangaani-koboltti) kemiassa katodin materiaali on nikkeli-mangaani-kobolttioksidi $\text{Li}(\text{Ni}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33})\text{O}_2$.

Elektrolyytti koostuu liuotinaineesta ja johdesuolasta, joka yleisimmin on litiumheksafluorofosfaattia (LiPF_6). Muita käytettyjä suoloja ovat litiumhexafluoroarsenaattimonohydraatti LiAsF_6 , litiumperklooraatti LiClO_4 , sekä litiumtetrafluoroboraatti LiBF_4 (Hallikainen 2017). Liuotinaineita on useita, yleensä karbonaatteja kuten etyleenikarbonaatti (EC), dietyylikarbonaatti (DEC), dimetyylikarbonaatti (DMC), propyleenikarbonaatti (PC) tai etyyylimetyylikarbonaatti (EMC). Näiden liuottimien ominaisuudet ovat osaltaan vaikuttamassa akkujen paloturvallisuuteen.

Toimintaperiaate Litium-ioni akuissa on kaikissa sama, anodilta litium ioni (Li^+) siirtyy akun purkauksessa katodille ja varauksen yhteydessä päinvastaiseen suuntaan (Kuva 2). Purkautuessaan litium luovuttaa elektronin katodille ja siirtyy elektrolyytin kautta anodille, jossa se saa elektroninsa takaisin. Virtapiirissä elektronit siirtyvät katodilta anodille.



Kuva 2. Litium-ioniakun kuormitus ja lataus

2.1 Akun hallintajärjestelmä (BMS, Battery Management System)

Litium-ioniakun kennot ovat herkkiä ääriämpötiloille ja niiden lataamisen tulee olla koordinoitua. Kennojen lataaminen matalassa lämpötilassa lyhentää niiden käyttöikää ja liian korkea lämpötila altistaa akun palolle. Akunhallintajärjestelmän (Kuva 3) vastuulla on säädellä akun kennojen lataamista ja purkamista siten, että lämpötilat ja virrat pysyvät annettujen raja-arvojen sisällä. Akunhallintajärjestelmä (myös termiä suojapiiri käytetään) saattaa olla akun sijaan myös laturissa, minkä vuoksi akkuja ei saa ladata muilla, kuin kyseiselle akkutyypille tarkoitetulla laturilla.



Kuva 3. Purettu kannettavan tietokoneen akku, akunhallintajärjestelmä merkitty nuolella.

2.2 Terminen karkaaminen (Thermal runaway)

Litium-ioni kennon terminen karkaaminen, eli thermal runaway syntyy, kun akustossa oleva kenno saavuttaa tietyn, akkukemialle ominaisen lämpötilan, kennon sisäinen rakenne rikkoutuu tai kennoa ylliladataan. Terminen karkaaminen on reaktiosarja, joka yleensä johtaa kennon sisäisen paineen kasvuun, elektrolyyttien kaasuuntumiseen ja kennon repeämiseen. Riippuen akkukemiasta ja latausasteesta, repeytyvästä kennosta purkaantunut kaasu syttyy palamaan lyhytkestoisin liekkisuihkuina. Tietyn vaiheen ylitettyään reaktio ei pysähdy, vaan jatkuu eksotermisten reaktioiden ketjuna.



Kuva 4. Kaasujen purkautuminen akkukennosta

Terminen karkaaminen on ketjureaktio, jossa reaktion eri vaiheiden tapahtumat kasvattavat kennon sisäistä lämpötilaa ja painetta aikaansaaden reaktion seuraavan vaiheen. Palotapahtuma, liekkipalo, on tämän kemiallisen ketjureaktion yksi osa ja saat-
taa jäädä kokonaan puuttumaan. Etenkin kennon varausasteen ollessa matala, on täysin mahdollista, että liekkipaloa ei synny lainkaan.

Terminen karkaaminen

Itsestään etenevä, monivaiheinen reaktio

Tuottaa lämpöä, happea ja palavia kaasuja

Tietyn pisteen ylitettyään, ei enää pystytä pysäyttämään

Alkusysäyksen voi antaa lämmön nousu, kennon yllilataaminen tai fyysikaalinen vaurio

Reaktioiden aikana kennon sisäinen paine kasvaa ja jossain vaiheessa akun rakenteet pettävät, jolloin kuumat palamiskelpoiset kaasut, reaktioissa syntynyt happi sekä elektrolyytti vapautuvat. Usein tämä tapahtuu siten, että ensiksi kennosta vapautuu kaasuja (venting, Kuva 4) ja myöhemmässä vaiheessa liekkejä (Kuva 5).

Alkuvaiheessa vapautuvat kaasut eivät yleensä näy paljaalla silmällä, mutta ne voi nähdä lämpökameralla (Kuva 4). Alkuvaiheen kaasut pystyy myös havaitsemaan sensorein, kun sensori on riittävän lähellä kennoja.

Usein hieman ennen kaasujen vapautumista kennosta kuulu napsahtava ääni rakenteen pettäessä. Sylinteriakut pidättävät kasvavaa painetta verraten hyvin. Testeissä havaittiin, että niiden rakenteen pettäessä saattaa syntyä kauaskin lentäviä heitteitä, kun kenno pääsee irtoamaan akusta. Palavat heitteen luonnollisesti levittävät paloa nopeasti.



Kuva 5. Termisen karkaamisen liekkipalovaihe lämpökameralla kuvattuna



2.3 Akkukemian ja varaustilan (SOC %) vaikutus palokäyttäytymiseen

Akkujen paloturvallisuuteen vaikuttaa huomattavasti sekä käytetty elektrolyytti, että katodissa käytetty metallioksidi. Tätä yhdistelmää kutsutaan akkukemiaksi. Erilaisilla akkukemioilla on erilaisia ominaisuuksia muun muassa sen suhteen, paljonko energiaa akku pystyy varastoimaan. Varauskykyä kuvataan yleensä painon suhteessa Wh/kg. Tavanomaiset kemiat pystyvät varastoimaan 120-150 wattituntia kiloa kohden. Yleisimmät akkukemiat ja niiden ominaisuuksia on summattu taulukkoon 1. (Battery University).

Taulukko 1. Erilaisia Litium-ioni akkujen kemioita

Nimi	LCO	LNO	NCA	NMC	LMO	LFP
Katodin materiaali	Litium koboltti oksidi	Litium nikkeli oksidi	Litium nikkeli koboltti alumiini oksidi	Litium nikkeli mangaani alumiini oksidi	Litium mangaani oksidi	Litium rauta-fosfaatti
Katodikemia	LiCoO ₂	LiNiO ₂	Li(Ni _{0,85} Co _{0,1} Al _{0,05})O ₂	Li(Ni _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33})O ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
Anodi	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti
Kennojännite	3,7 - 3,9 V	3,6 V	3,65 V	3,8 - 4,0 V	4,0 V	3,3 V
Energiatiheys	160 Wh/kg	150 Wh/kg	130 Wh/kg	170 Wh/kg	120 Wh/kg	130 Wh/kg

Monissa käyttötarkoituksissa akun kokoa ja painoa on tarve rajoittaa, joten valinta kohdistuu akkukemioihin, joiden energiatiheys on suurin. Nämä kemiat ovat kuitenkin myös riskialttiimpia paloturvallisuuden näkökulmasta. Tehdyissä testeissä LFP kemia todettiin varsin turvalliseksi, eikä yllälaatuksellaan saatu pussikennoja syttymään. NMC kemian akut syttyivät varsin voimakkaasti ja palotapahtuma oli verraten raju.

Myös akun varausasteella (SOC, State of Charge) on merkitystä palon voimakkuuteen. Tehdyissä testeissä havaittiin, että mitä täydemmäksi kenno on ladattu, sitä voimakkaampia ovat palamisessa tapahtuvat reaktiot. Tämä on sinänsä varsin loogista, kun ajatellaan, että akun lataaminen on energian syöttämistä akkuun ja purkautuneesta akusta energiaa on otettu ulos.

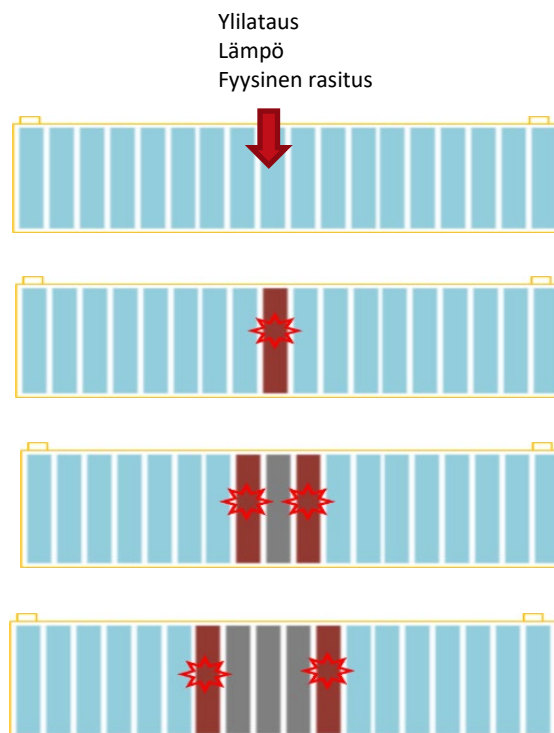
Rahtilentokoneiden ruumassa on yleensä inertointi, jonka tarkoituksena on estää palaminen ja siten suojata sekä rahtia että eritoten lentokonetta palotapahtumilta. FAA (Federal Aviation Administration) teki testejä, joissa selvitettiin Litium-ioni akkujen lämpökarkaamisesta syntyviä palavia kaasuja sekä edellä mainitun inertoinnin toimivuutta. Tehdyissä testeissä selkeästi havaittiin, että akun varausaste vaikuttaa sekä syntyvien kaasujen määrään, että niiden syttymisherkyyteen. Mitä korkeampi varausaste oli, sitä kevyempiä molekyylipainoltaan syntyneet kaasut olivat. Varausasteen ollessa korkea syntyi huomattavasti enemmän mm. häkää (CO) ja vetyä (H₂) jotka molemmat ovat erittäin herkästi syttyviä. (FAA 2016)

2.4 Akkupalon sammuttaminen

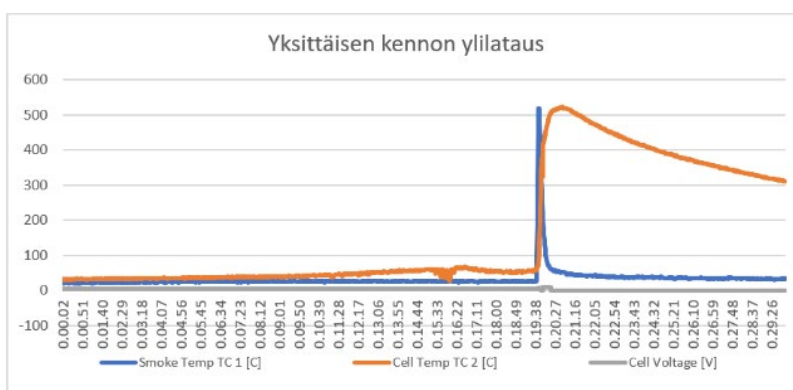
Yksittäisen kennon tapauksessa reaktio on hyvin nopea ja siihen on käytännössä mahdotonta reagoida sammutusmielessä, ellei sammutustoimintaa ole jo aloitettu ennen palovaihetta. Muutaman sekunnin kestävän aktiivisen palovaiheen jälkeen palokuorma on yleensä vain kennon kuorissa tai itse laitteessa, johon akku kuuluu. Kuluttajatuotteissa on hyvin runsaasti yksikennoisia akkuja, joiden osalta akkua voidaan pitää palon aiheuttajana, mutta sammutustoiminta kohdentuu akkupalon mahdollisesti sytyttämään muuhun materiaaliin. Tässä artikkelissa ei yksittäisen kennon paloja käsitellä enempää, vaan keskitytään useammasta kennosta koostuviin akustoihin.

Käytännössä akku muodostuu useasta kennosta. Akusta itsestään lähtevä terminen karkaus alkaa lähes poikkeuksetta yhdestä kennosta. Poikkeuksen muodostaa tilanne, jossa jostain syystä useampi kenno joko mekaanisesti vaurioituu tai lämpenee yhdenaikaisesti. Vaurioituminen voi syntyä ulkoisen iskun, kuten vaikkapa törmäyksen tai räjähdys, johdosta. Vastaavasti lämpeneminen voisi tulla kyseeseen tilanteessa, jossa akusto joutuu alttiiksi tulipalon tuottamalle lämmölle.

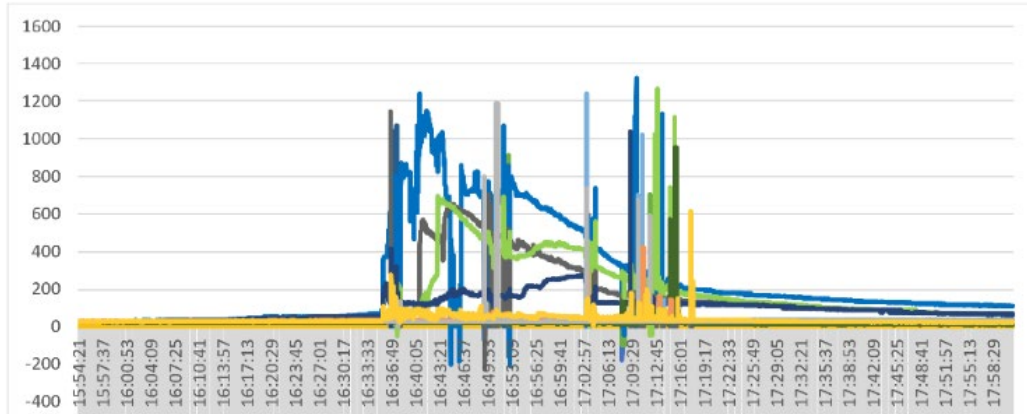
Suuremman akuston termien karkauksen tarkastelussa olennaista onkin kiinnittää huomiota prosessin etenemiseen akussa tai akustossa. Yhdestä kennosta alkava prosessi lämmittää viereisiä kennoja siinä määrin, että prosessi alkaa myös niissä (Kuva 6). Kuvasta 7 nähdään kennon pinnan lämpenevän yli 500 asteeseen, joka on varsin riittävä aikaansaamaan prosessin käynnistymisen viereisessä kennossa, kun muistetaan, että kennon lämpeneminen noin kahdeksaan kymmeneen asteeseen on riittävä termisen karkauksen käynnistymiseen.



Kuva 6. Termisen karkaamisen eteneminen akussa



Kuva 7. Kennon ja savukaasujen lämpötilat kennon palossa



Kuva 8. Suuren akkumoduulin polttokokeen lämpötiläkäyrät

Useista kennoista muodostuvassa akussa yhdestä kennosta alkanut prosessi leviää akun muihin kennoihin, ellei sitä pystytä estämään. Kuvassa 8 on yhden testin lämpötiläkäyrästä. Akustoon on yhtä kennoa ylilataamalla tuotettu terminen karkaus, joka etenee akustossa kennosta toiseen. Akustossa on kennojen välissä K-tyyppin termopareja, joiden lukemia tarkkailemalla voidaan havaita, miten lämpötila nousee akuston eri osissa ajan funktiona. Kuvassa nähtävät piikit merkkavat kyseisen termoparin vieressä olleen akkukennon termisen karkauksen liekkivaihetta, eli reaktio etenee akussa omaa nopeuttaan, kunnes kennot loppuvat kesken.

Akun sammuttaminen käsisammuttimin tai sammutuspeitteellä (Kuva 9) todettiin käytännössä mahdottomaksi Tukesin tekemissä testeissä. Käsisammuttimen purkausaika on etenkin litium-ioniakuille tarkoitetuissa sammuttimissa niin pitkä, että sammuttaja altistuu huomattavasti myrkyllisille kaasuille sekä vaarallisille heitteille ja pistoliekeille. Tavanomaiset sammutuspeitteet puolestaan eivät kestä palavasta akusta syntyviä pistoliekkejä vaan palavat puhki käytännössä välittömästi. Lupaavia tuloksia on saatu tätä sammutustarkoitusta varten



Kuva 9. Sammutuspeite akkupalossa. Kuva: Tukes suunnitellusta, muotoon ommellusta monikerroksisesta rajoituspeitteestä.

Käytännössä kennot akussa ovat niin tiukkaan pakattu, että kennojen väliin on vaikea saada jäähdyttävää sammutetta ja lisähaasteen jäähdyttämiseen tuo akun kuorirakenne. Tämän vuoksi suurempia akustoja suunniteltaessa olisi pyrittävä osastoimaan akun kennorakennetta siten, että termisen karkaamisen eteneminen pystytään jäähdyttämällä pysäyttämään osastoivan rakenteen kohdalta. Tällaiset osastoivat rakenteet ovat olennaisen tärkeä osa suurten energiavarastojen rakkeihin sijoitettujen akustojen paloturvallisuutta.



Kevyiden liikennevälineiden, kuten sähköskoottereiden ja -polkupyörien akut ovat osoittautuneet maailmalla ongelmallisiksi ja niiden palot ovat huomattavan yleisiä, esimerkiksi sähköautoihin verrattuna. New Yorkissa syttyi Litium-ioniakun sytyttämä tulipalo lähes joka toinen päivä ja näissä paloissa kuoli vuonna 2022 marraskuuhun mennessä 6 ja loukkaantui 140 henkilöä (The New York Times 2022, Schuerman 2022). Keskisuuri akku palaa hyvin voimakkaasti ja levittää palon nopeasti ympäristöönsä heitteiden ja pistoliekkien vaikutuksesta. Alkuvuonna 2022 Vancouverin pelastuslaitos kertoi Litium-ioniakkujen olleen palokuolemien suurin syy (Vancouver Fire Rescue Services 2022). Helsingissä marraskuussa 2022 tapahtuneessa palossa asukas oli loukkaantunut kannettuaan palamaan syttyneen sähköpotkulaudan itse ulos (Taleva 2022). Erityisen huolestuttava suuntaus on ladata ja säilyttää akkukäyttöisiä kevyitä liikennevälineitä asunnon eteisessä, jolloin akkupalo saattaa tukkia asunnon ainoan uloskäynnin. Muun muassa Kiinteistöliitto suosittelee akkujen lataamista asuinhuoneistossa ja toteaa, että pyörävarastossa lataamisesta tulisi taloyhtiön päättää erikseen (Lindberg 2022). Akkuja pitäisi ladata valvotusti, mutta kun polkupyörän akun lataaminen tyhjästä täyteen vie monta tuntia, saattaa valvonta olla usein puutteellista. Asunnossa lataamiseen liittyy paloturvallisuusriskin ohella varsin korkea henkilöturvallisuusriski.

2.5 Suuret energiavarastot

Vähähiiliseen energian tuotantoon siirtyminen on luonut mittavan kapasiteetin vaihtelevalla teholla toimivia tuotantolaitoksia. Esimerkkeinä näistä ovat tuulivoima ja aurinkovoima, joiden tuotantokapasiteetti vaihtelee vahvasti sääolosuhteiden myötä. Jotta tällainen energia olisi hyödynnettävissä järkevällä hyötysuhteella, on energiaa tarve varastoida tuotantohuippujen aikaan.



Tällä hetkellä akkuteknologiaan perustuvat energiavarastot (Kuva 10) ovat yleinen tapa toteuttaa tuotanto- ja kulutushuippujen tasausta. Energiavarastoja rakennetaan myös turvaamaan sähkön saantia (Palomaa 2021) häiriötilanteissa. Energiavarastoja on suunniteltu rakennettavan myös käytöstä poistetuista sähköautojen akustoista (Degerman 2022). Aurinkoenergian yleistyessä energiavarastoja on alkanut tulla myös pientaloihin, eikä näidenkään osalta tulipaloilta ole välttytty (Enkhardt 2022).

Fortumin Järvenpään rakentamassa energiavarastossa, nimeltään Batcave (kuva 10), on 2 megawatin nimellisteho ja energiaa varastoituna 1 megawattitunnin verran (Fortum 2017). Yksittäisiä kennoja kyseisessä akustossa on noin 6600. Tällaisissa akustoissa sekä akkujen rakenne (akkukemia) että niiden käyttöä säätelevä elektroniikka ovat turvallisuuden kannalta ratkaisevassa asemassa.

Fortumin akkuhuone on varustettu automaattisella paloilmoinilaitteistolla, typpi-inertoinnilla ja huoneen lämpötilan näyttävällä mittarilla, joka voidaan lukea ulkoa käsin. Myös inertointi voidaan lau- kaista akkuhuoneen ulkopuolelta.



Akkujen kennot sisältävät moduulit on yleisimmin sijoitettu räkkeihin ja niissä on moduulikohtainen jäähdytys (Kuva 11). Yksittäisen akkumoduulin kennot ovat yleensä niin tiiviisti pakattu, että termisen karkaamisen leviämistä kennosta toiseen on hyvin vaikea estää edes aktiivisilla sammutustoimenpiteillä. Merenkulussa sammutusjärjestelmän hyväksymiskriteeri on ollut moduulitason tapahtumassa, eli reaktio ei saa edetä seuraavaan moduuliin. Sen moduulin kennot, josta reaktio alkoi saavat tuhoutua.

Energiavarastojen akkupalotapahtumat ovat varsin haasteellisia tehtäviä ja niihin liittyy tavanomaisesta poikkeavia riskejä räjähdysvaaran ja korkeiden jännitteiden vuoksi.

Akkupaloissa vapautuu palavia kaasuja, kuten metaania, etaania, propaania ja butaania (Laitinen ym. 2017). Lisäksi vapautuu elektrolyytissä käytettäviä etyyli metyyli karbonaattia, dietyylikarbonaattia sekä dimetyylikarbonaattia. Nämä kaikki ovat syttyviä tai herkästi syttyviä kaasuja. Hiilimonoksidi, jota myös vapautuu termisessä karkaamisessa, on erittäin herkästi syttyvä kaasu ja sen ilmaseos on räjähtävä (Työterveyslaitos 2022).

Suuri osa palavista kaasuista palaa akkupalon yhteydessä. Vapautuvien kaasujen syttyminen vaatii syttymiskelpoisen seoksen lisäksi riittävän lämpötilan ja joissain tilanteissa on mahdollista, että kaasut eivät syty palamaan. Etenkin tilanteessa, jossa kennojen latausaste on matala, voi tilaan kertyä vaarallinen määrä syttyviä kaasuja. Tällaisten tilanteiden välttäminen on turvallisuuden kannalta ensiarvoisen tärkeää, koska on täysin mahdollista, että tilaan syntyy syttymiskelpoinen ilmakaasuseos. Jos osa kaasuista on palanut, mutta hapen saanti on rajoittanut palamista, tilaan menevä sammuttaja voi tuoda mukanaan riittävän määrän hapetta, jolloin voi syntyä räjähtävä ilmakaasuseos (Kuva 12). Toisaalta on myös mahdollista, että kaasuja tilaan kertyy alkuvaiheessa, mutta reaktion tuottama lämpö ei riitä sytyttämään kaasuseosta tai seos on liian laiha syttyäkseen. Reaktion jatkuessa kaasuseos muuttuu rikkaammaksi ja voi humautua saavutettuaan alemman syttymisrajan. Koska reaktio etenee kennosta toiseen, on siinä luontaisesti hetkiä, jolloin lämpötila nousee ja jossain vaiheessa riittää sytyttämään kaasuseoksen.

Suurten energiavarastojen paloja on raportoitu useita (EPRI 2022). Myös pelastushenkilökunnan loukkaantumisiin johtaneita humahduksia sammutustyön yhteydessä on raportoitu, kuten Arizonan palo vuonna 2020 (Randazzo 2020).



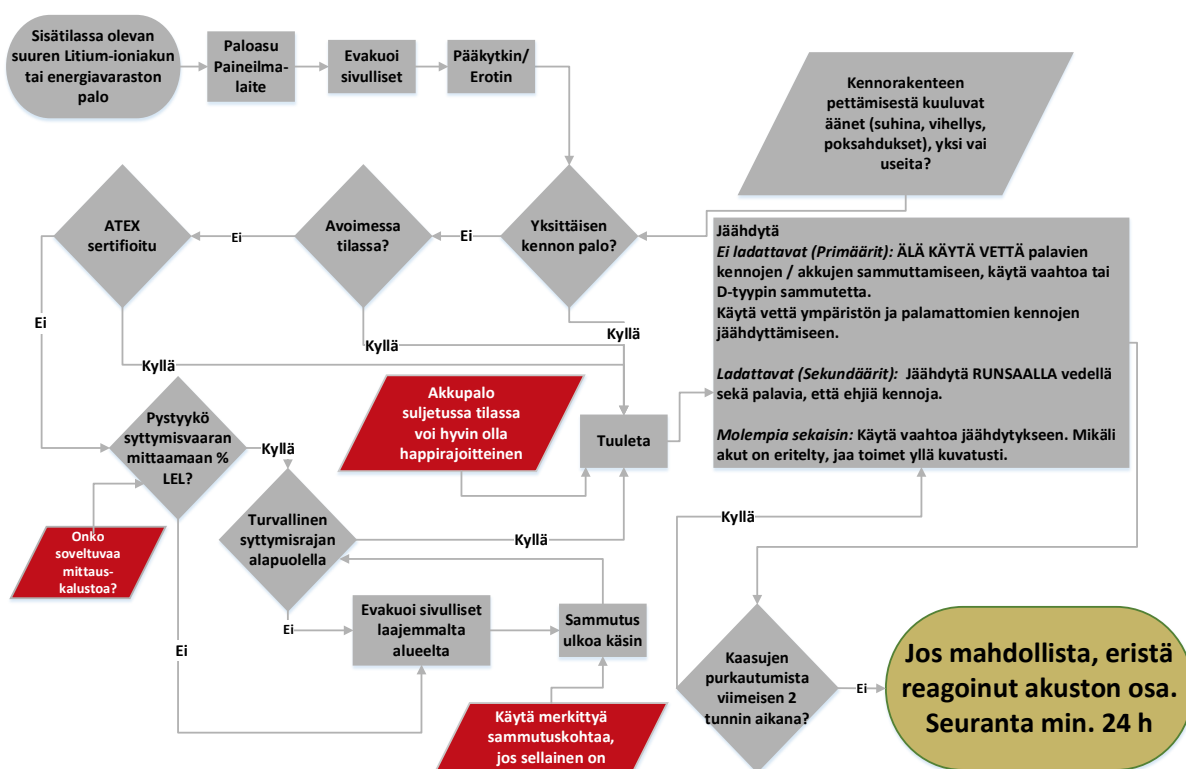
Kuva 11. Energiavaraston akkuhuoneen akkuräkit



Kuva 12. Sähköauton palosta syntynyt räjähdys Kanadassa (CBC News)

Energiavarastojen turvallisuudessa on havaittavissa haasteita, joihin pelastustoimen nykyinen varautuminen ei pysty täysimittaisesti vastaamaan.

Pelastustoimi tarvitsee kenttätöön tueksi ohjeistuksen, miten Litium-ioni tai Litium (metalli) akkujen kanssa tulisi menetellä palotilanteessa. Kuvassa 13 on tehty tämänhetkisen tiedon varassa vuokaavio-muotoinen päätöspuu valittavalle strategialle. Tavoitteena on varmistua tilan turvallisuudesta ensisijaisesti ja vasta sen jälkeen ryhtyä sammutustoimiin. Vuokaavio on alun perin tehty Fire Safety & Science (Hassinen 2018) konferenssin esitelmää varten ja sitä on muokattu useaan otteeseen tiedon lisääntyessä. Vuokaavio soveltuu tilanteisiin, joissa palotapahtuma on joko energiavarastossa tai tilassa, jossa muusta syystä varastoidaan suuria määriä litium akkuja.



Kuva 13. Akkupalon sammuttamisen taktisten päätösten tukiranka

Olennaista sammutustyössä on tiedustelu ja tilannekuva, jotta pystytään tekemään turvallisia toimenpiteitä. Akun terminen karkaaminen tuottaa ääniä kennojen avautuessa, tämä on yksi tärkeimpiä ulkoa tehtäviä havaintoja, josta akun tilaa pystyy arvioimaan. Joskus on turvallisinta aloittaa sammutustoimet ulkoa käsin (hyökkäävä ulkoa sammuttaminen). Kontin kyseessä ollessa seinämä joudutaan lävistämään ja ongelmana tässä lähestymistavassa on oikean läpäisykohdan löytäminen. Tämän vuoksi energiavarastoihin tulisi merkitä ulkoa sammuttamisen läpäisykohta siten, että läpäisy ei aiheuta lisäongelmia akustossa, sammuttaminen on tehokasta ja turvallista.

3 Akkuteknologia liikenteen käyttövoimana

Sähköautojen ja ladattavien hybridien akusto ja toimintaperiaate ovat siinä määrin samankaltaisia, että niitä tässä käsitellään yhdessä. Itse teknologiaan ei ole tämän julkaisun osalta tarve syventyä muutoin kuin sammutustekniikan ja sähköturvallisuuden osalta, joten yleisesitys jää muun tutustumisen varaan.

3.1 Sähköautot ja ladattavat hybridit

Sähköauton akku on hyvin suojattu ulkopuoliselta vauriolta. Suojaus on vahva etenkin alapuolella, jotta ajoneuvon pohjaan osuvat iskut eivät vahingoita akkuja. Kuvassa 14 olevassa ladattavan hybridin akussa akun pohja on vahvaa alumiinirakennetta. Akun päälle tuleva kansi on huomattavasti ohuempi.

Akkujen lämpötilan on oltava tietyllä lämpötila-alueella. Jos lämpötila on liian alhainen, kennoja on lämmitettävä. Liian kylmiä kennoja ei kannata ladata, koska se lyhentää niiden käyttöikää huomattavasti. Vastaavasti kennot lämpenevät käytettäessä, jolloin niitä on tarve jäähdyttää. Tämän vuoksi akustossa on joko ilmajäähdytys tai vesi-glykoli seos, joka on nykyään yleisempi. Kuvassa 14 näkyy punaisella ympyröitynä lämmitys/jäähdytysletkujen paikat.

Ladattavat hybridit ovat pääsääntöisesti automalleja, joista on myös täysin polttomoottoriversio saatavilla. Näissä akku on lisätty aiemmin suunniteltuun korirakenteeseen. Vastaavasti lähtökohtaisesti sähköautoiksi suunnitelluissa ajoneuvoissa akkurakenne on usein osa ajoneuvon kantavaa korirakennetta. Molemmissa tapauksissa akku pyritään painonsa vuoksi sijoittamaan mahdollisimman alas, jotta painopiste saadaan ajoneuvon ajo-ominaisuuksille edulliseksi.

Korkeajänniteakun sijainti, samoin kuin erottimien käyttökytkimet on merkitty pelastuskortteihin, joista kuvassa 15 Teslan S-mallin kuva pelastustyöntekijän oppaasta sekä ote pelastuskortista. Kuvasta nähdään akun olevan käytännössä koko ajoneuvon pohjan kokoinen. Tesla on julkaissut mallikohtaiset pelastajan oppaat, jotka ovat saatavilla myös suomeksi.

Termisessä karkaamisessa akun sisäinen paine nousee, minkä vuoksi akussa on purkuaukot tai vastaava muu valmistajan päättämä menetelmä paineen purkamiseen. Akusta purkautuva, mahdollisesti palava kaasu purkautuu näiden aukkojen kautta. Aukkojen sijainti siis säätelee suoraviivaisesti, missä



Kuva 14. Ladattavan hybridin akku osittain purettuna



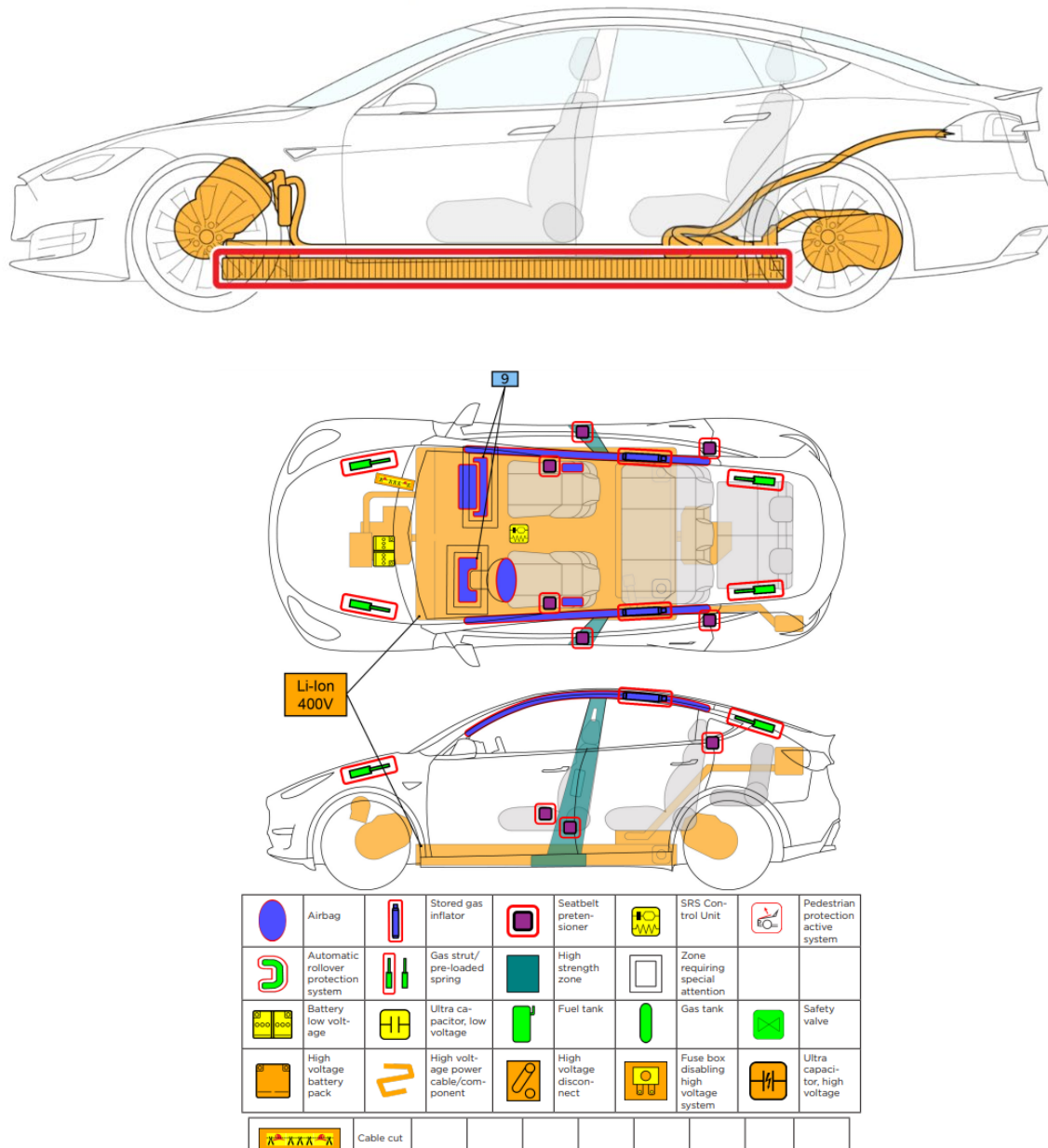
liekkipalo havaitaan. Teslassa aukot ovat ajoneuvon pohjassa, joten palo näkyy pohjan alta purkautuvana pistoliekkinä. Näiden sijaintia ei yleensä ole merkitty pelastuskortteihin, eikä tiedon löytäminen ole helppoa. Teslan osalta tieto löytyy patenteista (Herron et al. 2012, Mardall et al, 2012).



KORKEAJÄNNITEAKKU

Model S on varustettu lattiaan asennetulla, korkeajännitteisellä 400 voltin litium-ioniakulla. Korkeajänniteakku ei saa milloinkaan vaurioitua, kun ajoneuvoa nostetaan pohjasta. Pelastustyökaluja käytettäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, ettei ajoneuvon pohjapeltiin tule vaurioita. Lisätietoja ajoneuvon nostamisesta on kohdassa [Ajoneuvon nostaminen](#).

HUOMAA: Kuvassa on kaksimootorinen ajoneuvo. Ajoneuvot, joissa ei ole etuvoimansiirtoyksikköä, ovat samankaltaisia.



Kuva 15. Kuva Teslan pelastustyöntekijän oppaasta sekä pelastuskortti (Tesla 2019)

3.2 Joukkoliikenne

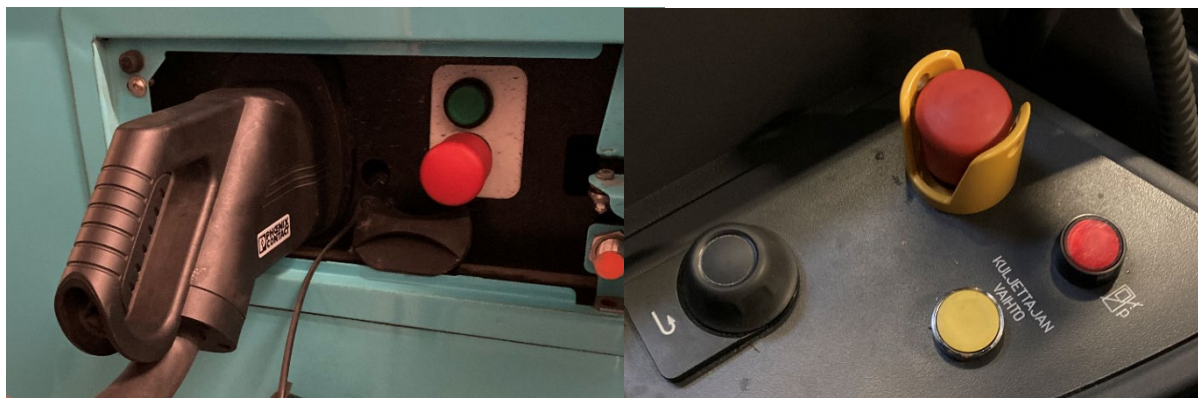
Akkuteknologia en vielä nykyisellään tarjoa sellaista toimintasädetä, että raskas liikenne suuressa mittakaavassa siirtyisi nopeasti sähköön käyttövoimaltaan. Poikkeuksen tekevät kaupunkiliikenteen bussit, joita voidaan sujuvammin ladata ajosuoritteiden välillä. Paikallisliikenteen sähköistymistä edistää säästö, joka saadaan polttoaineen hinnassa.

Sähköistyminen tavaraliikenteessä lähtee liikkeelle jakeluautoista, joilla ajetaan lyhyitä välimatkoja, pääsääntöisesti taajamissa. Sähköauto on muutoinkin omiaan taajamaajossa, jossa usein kiihdytetään ja hidastetaan, jolloin jarrutusenergia voidaan ladata takaisin akkuun.

Kuopion Liikenne käyttää VDL merkisiä busseja (VDL Citea LLE-115 Electric), joissa käytetään Litium-rautafoosfaattiakkuja. Näiden akkujen paloturvallisuus on huomattavan hyvä verrattuna useampiin muihin akkuteknologioihin.

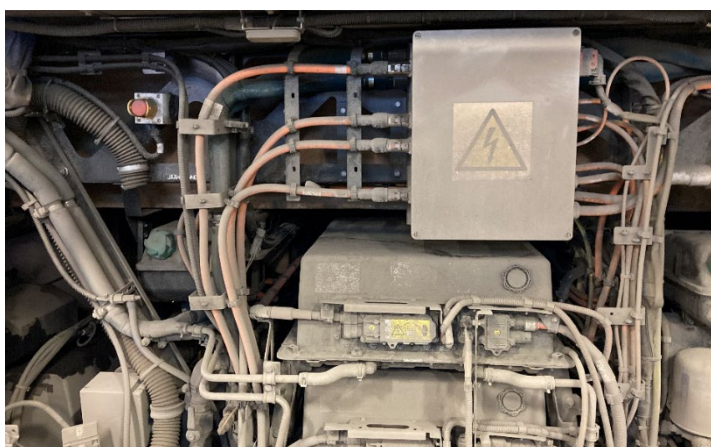


Kuva 16. Kuljettajan takana oleva akusto



Kuva 17. Ajoneuvon hätäseis katkaisimet latauspistokkeen vieressä sekä ohjaamossa

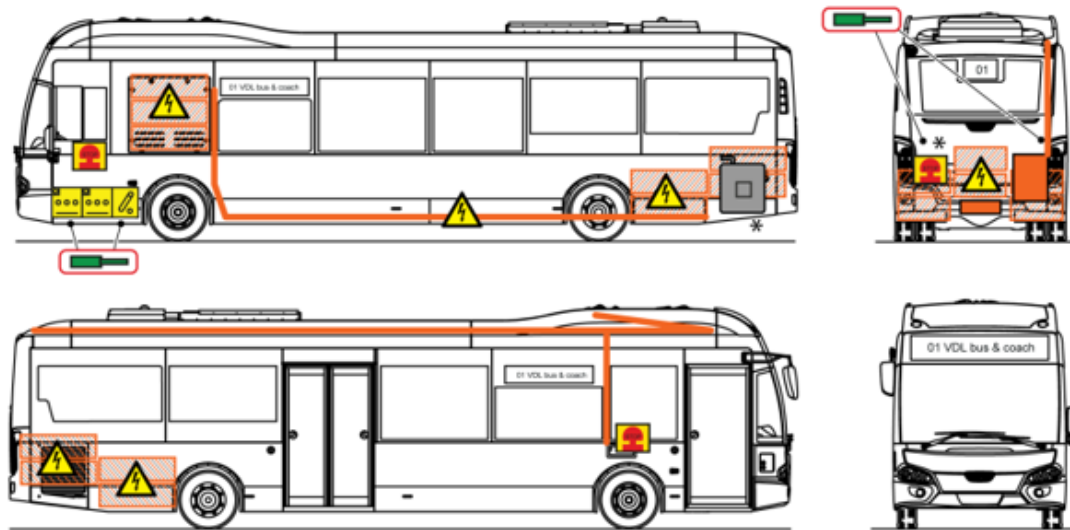
Kuopion liikenteen bussit ladataan varikolla, mutta käytössä on myös pääteasemilla tapahtuvaan lataukseen sopivia pantografeja, jossa latausvirta johdetaan bussiin sen katolle laskeutuvan latausyhteyden avulla. Latauksen yhteydessä on varauduttu ongelmiin hätäseis painikkeella latauskaapelin vieressä. Hätäseis erottaa korkeajänniteakun korkeajännitepiiristä. Toinen painike löytyy kuljettajan hallintalaitteista ja kolmas hätäseis painike löytyy bussin takaa (Kuva 18), jossa myös osa akuista sijaitsee.



Kuva 18. Bussin peräosan akusto ja korkeajännitelaitikko



VDL bussissa osa akuista on sijoitettuna kuljettajan selän takana olevaan akkutilaan (Kuva 16) ja osa bussin takaosaan (Kuva 18). Takaosassa sijaitsee myös korkeajännitelaatikko, jossa erottimet korkeajännitepiirille sijaitsevat. Huomion arvoista on, että erotin jättää akun ja korkeajännitelaatikon väliset johtimet jännitteellisiksi. Pelastuskorttia (Kuva 19) ei ainkakaan tätä kirjoitettaessa löytynyt Euro Rescue sovelluksesta, joten pelastustoimen on syytä olla aktiivinen oman alueen sähköbussien osalta. Alla oleva kortti on saatu Kuopion Liikenteeltä.



Kuva 19. Bussin (VDL Citea LLE-115 Electric) pelastuskortti

3.3 Sähköajoneuvojen palokäyttäytyminen

Sähköauton paloteho ei suuresti poikkea vastaavan polttomoottoriajoneuvon palotehosta. Ranskassa tehtyjen kokeiden (Lecocq 2014) perusteella sähköauton paloteho jäi pienemmäksi kuin vastaavan polttomoottoriauton.

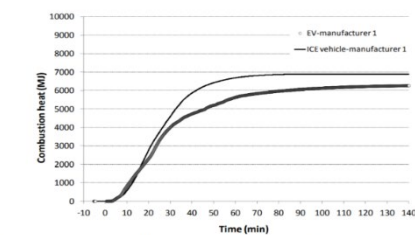


Figure 4 Comparison of the effective heat of combustion released vs. time for EV and analogous ICE vehicle tests for the car manufacturer 1

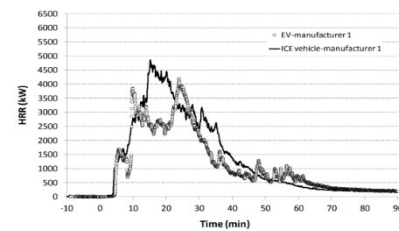
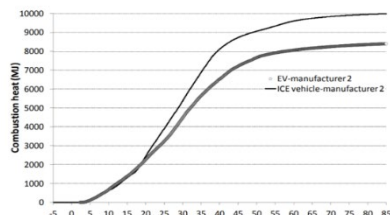
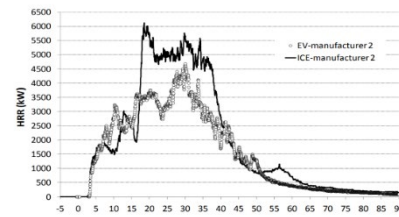


Figure 2 Comparison of the heat release rate vs. time for EV and analogous ICE vehicle tests for the car manufacturer 1



Kuva 20. Polttomoottori- ja täyssähköajoneuvojen palotehon vertailu



Kuvassa 20 on kuvattu kahden ajoneuvon polttokoe kalorimetrissä. Ajoneuvot ovat samaa merkkiä ja mallia, ainoana erona niiden käyttövoima.

Olennainen palotehoon polttomoottoriajoneuvossa vaikuttava asia on luonnollisesti polttoaineen määrä. Samalla tavoin sähköautossa akun latausaste (SOC, State Of Charge) vaikuttaa akun palamisen voimakkuuteen. Yleisesti ottaen, korkea latausaste lisää akun syttymisherkkyttä ja palon voimakkuutta. Jotkin akkukemiat eivät edes syty palamaan latausasteen ollessa matala.

Luonnollisesti käyttövoima vaikuttaa paloon vain siinä tapauksessa, että polttoaine tai korkeajänniteakku syttyy palamaan. Sähköauton palo tilanteessa, jossa korkeajänniteakku ei paloon osallistu, ei poikkea mitenkään polttomoottoriauton palosta.

Palokäyttäytymisen osalta onkin ensiarvoisen tärkeää pystyä tunnistamaan, onko ajoneuvon käyttövoimaan tarvittava energia (polttoaine tai akku) mukana palotapahtumassa. Sähköauton palon sammuttamisessa ensimmäisiä selvitettäviä asioita onkin, onko palo korkeajänniteakussa vai ajoneuvon muissa osissa (tai molemmissa).

3.4 Sähköturvallisuus käsiteltäessä ajoneuvoja

Sähköajoneuvoissa on turvallisuusmekanismia erotin, joka erottaa korkeajännitejärjestelmän korkeajänniteakusta silloin kun ajoneuvon turvajärjestelmät laukeavat liikenneonnettomuuden seurauksena. Korkeajännite-erotin voidaan myös laukaista manuaalisesti ajoneuvokohtaisella menettelyllä. Kuvassa 21 on Volkswagen ID 4 täyssähköauton sulakerasia, joka sijaitsee ajoneuvon ohjaamossa kuljettajan vasemman polven kohdalla. Yksi sulakkeista on merkitty keltaisella lipukkeella, jossa on kuvattu punainen palokypärä. Tämän sulakkeen irrottaminen laukaisee erottimen. Erotin voidaan kyseisessä ajoneuvossa laukaista myös moottoritilassa olevan kytkimen (Kuva 22) avulla ja kolmas vaihtoehto löytyy takakontista. Näiden laitteiden sijainnit on myös merkitty ajoneuvon pelastuskorttiin (Kuva 24).



Kuva 21. Korkeajännitepiiriin erottava sulake (matalajännitteinen) Volkswagen ID.4 sulaketaulussa

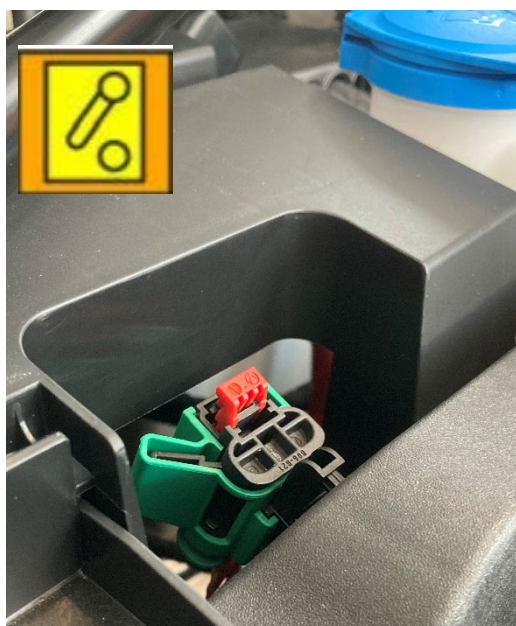


Vaikka erotin olisi erottanut korkeajännitejärjestelmän, oransseja johtoja sekä muita korkeajännitekomponentteja tulee käsitellä kuin ne olisivat jännitteelliset. Erottimet eivät ole takuuvarma menetelmä, koska on mahdollista, että erottimien kontaktipinnat "hitaantuvat" pitkäaikaisessa käytössä. Volkswagenin oppaassa korkeajännitteisten osien käsittely on kielletty siitä syystä, että erotinjärjestelmä on voinut vaurioitua onnettomuuden seurauksena, eikä sen toimivuutta pystytä takaamaan.

Toinen tapa, jota käytetään korkeajänniteakun erottamisessa on katkaistava silmukka, jota esimerkiksi Tesla käyttää. "Pelastustyöntekijöiden katkaisusilmukan katkaisu estää korkeajännitejärjestelmän virransyötön korkeajänniteakun ulkopuolelle, ja SRS- ja turvatyynyjärjestelmän komponentit kytkeytyvät pois käytöstä". Silmukka on merkitty samalla tavalla palomiehen kypärällä.

Korkeajännitejärjestelmän kaapelit ovat oransseja vaikiintuneen käytännön mukaisesti. Yleisesti ottaen korkeajännitekaapelit sijoitetaan koriin niin, että ne ovat hyvin suojassa muun muassa kolaritilanteissa. Samalla niiden sijoittelu on sellainen, että koriin tehtävät pelastustyössä tarvittavat leikkaukset eivät aiheuta vaaratilanteita. Kuvassa 24 Volkswagen ID 4 pelastuskortista nähdään, että kaapelit kulkevat ajoneuvon keskellä, joten niitä varsin harvoin tarvitsee käsitellä pelastustyön yhteydessä.

Mikäli kaapelit ovat vaurioituneet tai niitä jouduttaisiin pakottavista syistä leikkaamaan, on suojauttava 1000 voltin jännitteeltä suojavarusteilla, kuten hanskoilla (kuva 23) sekä käyttäen 1000 v suojauksella varustettuja työkaluja. Kaapeleiden leikkaamista tulisi välttää viimeiseen saakka. Mikäli kaapeleissa on edelleen korkea jännite ja molemmat kaapelit leikataan samaan aikaan, syntyy oikosulku ja mahdollisesti valokaari. Tämä saattaa vaurioittaa työvälineitä, mutta ennen kaikkea on vaikea arvioida mitä vaikutuksia oikosululla on itse akulle.



Kuva 22. Volkswagen ID.4 etuosan erotuskytkin (mataajajännitteinen) ja vastaava merkintä



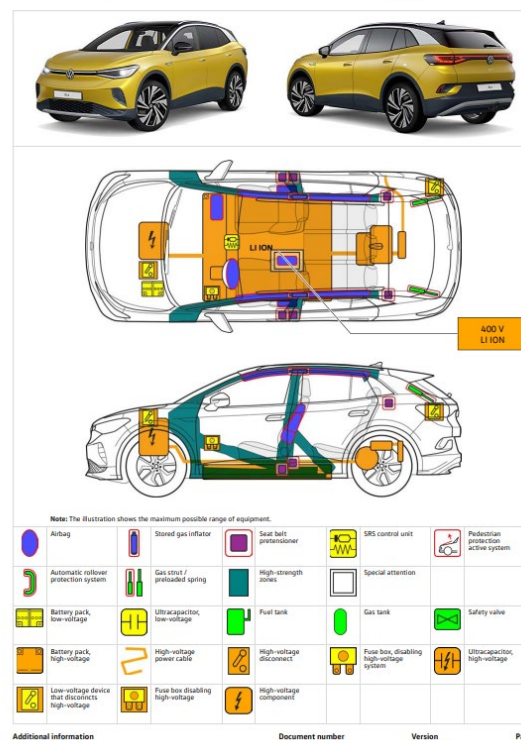
Kuva 23. Suojakäsineet korkeaa jännitettä vastaan. 1000 v, EN 60903:2003

Perinteisesti 12 tai 24 voltin tasavirta, jota ajoneuvoissa on käytetty vuosikymmeniä, on maadoitettu ajoneuvon runkoon. Tämä siis tarkoittaa sitä, että henkilö, joka koskee jännitteeseen osaan ja samalla ajoneuvon runkoon, on osana virtapiiriä. Luonnollisesti 12 voltin tasajännite ei tässä aiheuta ongelmaa eikä sitä virtapiiriin osana oleva henkilö huo-
maa.

Sähköauton 400 voltin tai korkeampi jännite luonnollisesti muuttaa tilanteen ja siitä on mahdollista saada hengenvaarallinen sähköisku. Sähköauton korkeajännite ei ole koskaan maadoitettu runkoon, vaan on asennettu niin sanotusti kelluvaksi. Sähkölaitteiden johdotuksessa on siten aina kaksi kaapelia, joista toinen on plus (meno) ja toinen miinus (paluu). Tämän takia korkeajännitepiiristä voi saada sähköiskun vain, jos päätyy osaksi piiriä, jossa on kosketuksissa molempiin kaapeleihin. Mikäli kaapelit paljastuisivat esimerkiksi palon seurauksena, niiden joutuminen oikosulkuun laukaisee akussa olevan sulakkeen. Mikäli on syytä epäillä korkeajännitekaapeleiden vaurioitumista tai muutoin halutaan varmistua ajoneuvon osien jännitteettömyydestä, voidaan jännite mitata yleismittarilla, joka on CAT III (600 V) luokituksen täyttävä. Teslan korkeajännite on 400 V, joten edellä mainitulla mittarilla tämä voidaan mitata. On syytä vielä mainita, että induktiokynät näyttävät jännitettä ainoastaan vaihtovirralla, joten niitä ei voi käyttää sähköajoneuvojen sähköjännitteiden toteamiseen.



Volkswagen ID.4
SUV, as of 2020



Kuva 24. Pelastuskortti, Volkswagen ID.4

4 Kaasuautot

Kaasuautot kevyessä liikenteessä käyttävät puristettua metaania (CNG, Compressed Natural Gas) joka on joko fossiilista tai biotuotantoa. Kaasuautot ovat yleensä pienellä bensiinisäiliöllä varustettuja ja kaikki Suomessa myytävät kaasuautot ovat näitä niin sanottuja bi-fuel malleja. Tätä kirjoitettaessa myydyin kaasuautomalli Suomessa oli Skoda Octavia, joten sitä on käytetty esimerkkinä. (Gasum 2022)

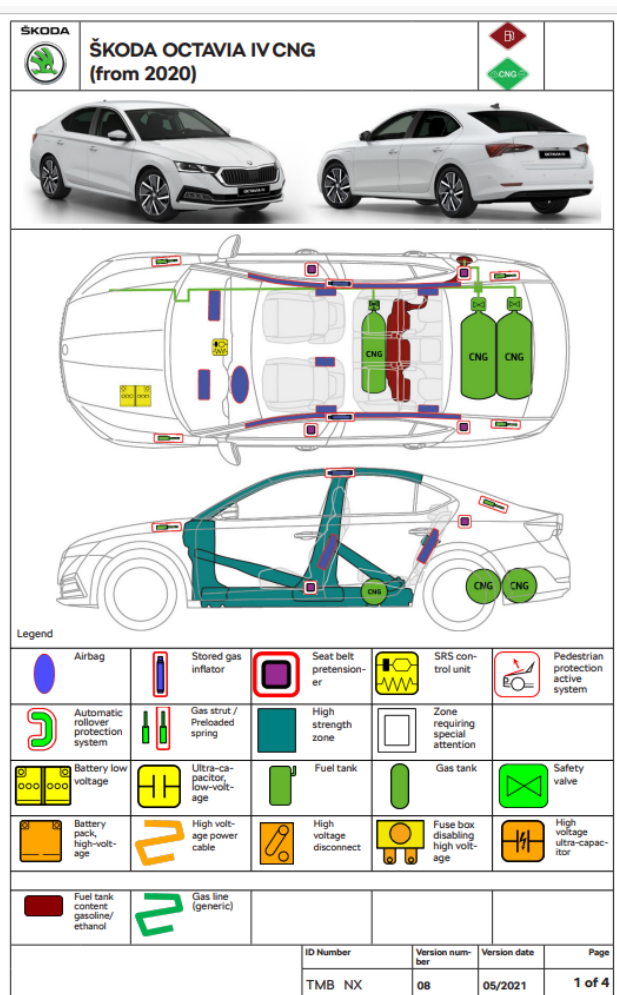
Kaasujärjestelmässä on varoventtiileitä siltä varalta, että kaasujärjestelmän paine nousee yli turvallisen rajan tai lämpötila nousee liian korkeaksi. Tällöin kaasua purkautuu venttiiliin kautta ajoneuvon ulkopuolelle. Kaasulinjan vuodon varalta järjestelmässä on virtauksen rajoitin. (Vainio 2021). Kaasusäiliöissä on myös manuaalisesti suljettava venttiilit (Skoda 2022). Manuaaliventtiilejä ei ole tarkoitettu käytettäväksi pelastustoiminnassa.

Kaasusäiliöt on merkitty pelastuskorttiin samoin kuin varoventtiilien paikat (Kuva 25). Kaasujärjestelmän merkinnät ovat vihreät, polttoainesäiliö (bensiini/etanoli) on merkitty tumman punaisella (Taulukko 2).

Taulukko 2. Kaasuauton pelastuskortin olennaiset selitykset

	Fuel tank content gasoline/ethanol	Polttoainesäiliö
	Gas tank	Bensiini/Etanoli
	Safety valve	Kaasusäiliö
	Gas line (generic)	Turvaventtiili
		Kaasulinjasto

Palotapahtumassa, jossa kaasusäiliön kaasu ei pala, toimitaan kuten polttomoottoriauton palossa. Työturvallisuudessa on huomioitava, että varoventtiilit voivat aueta paineen tai lämpötilan nousun vuoksi milloin tahansa. Järjestelmästä purkautuvan, palavan kaasun kanssa menetellään kuten muissakin kaasupaloissa. Palamaton kaasu on huomattavasti palavaa vaarallisempaa, joten kaasun annetaan palaa ja suojataan ympäristöä. Kaasuautoa vedellä sammutettaessa tulee huolehtia, ettei turvaventtiileitä kastella.



Kuva 25. Skoda Octavia pelastuskortti



5 Sammutustaktiikan ja -tekniikan valinta

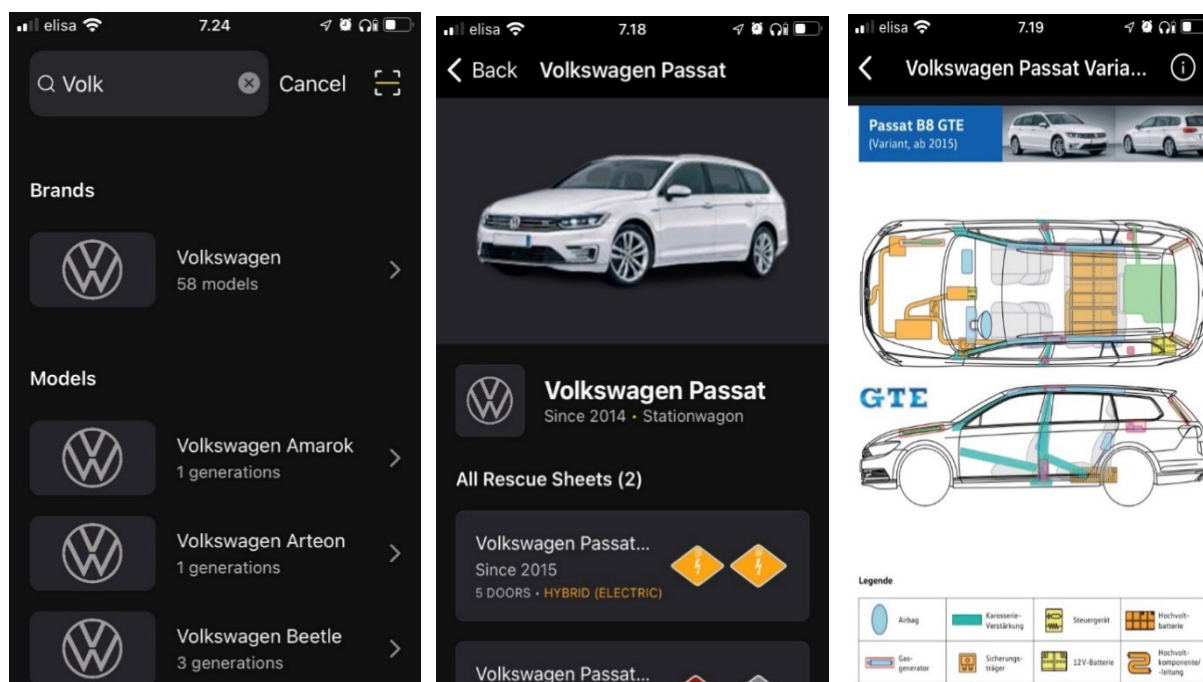
Ajoneuvojen uudet energiamuodot tuovat mukanaan erilaisia huomioon otettavia tekijöitä sammutettaessa tällaisen ajoneuvon paloa. Jotta näihin tekijöihin voidaan varautua, tulee niiden olla tiedossa ja toisaalta olla menettely tunnistaa ajoneuvon käyttövoima.

Tässä kappaleessa käsitellään vain uusien energiamuotojen ajoneuvoja, koska perinteisten polttomoottoriajoneuvojen osalta palon sammuttamisen oletetaan olevan lukijalle tuttua. Suurimman eron aiempaan muodostaa sähköauton akkupalo, joten sisältö keskittyy pääosin akkupalon sammuttamiseen

5.1 Tiedon hankinta

Perusta sammutustaktiikan ja -tekniikan valinnalle syntyy tiedustelusta ja saaduista ennakkotiedoista. Ajoneuvon käyttövoiman selvittäminen ei välttämättä ole yksinkertainen asia, etenkin kun ajoneuvo palaa tai on liikenneonnettomuudessa pahoin vaurioitunut. Ulkoisia tunnusmerkkejä on kuitenkin yleensä saatavilla. Polttomoottoriautossa on pääsääntöisesti selkeästi tunnistettavat pakoputket, toki kyseessä voi olla ladattava hybridi.

Siniset tai sinisävyiset logot sekä sähköautoon (EV, electric vehicle) tai ladattavaan hybridiin (PHEV, Plug-in hybrid vehicle) viittaavat tekstit antavat aiheen epäillä, että kyseessä on sähköauto tai ladattava hybridi. Myös keulan jäähdytysäleikön puuttuminen (yhtenäinen keulapaneeli) on selkeä indikaatio sähköajoneuvosta. Lopullinen tunnistus on kuitenkin syytä tehdä mallimerkinnän mukaan.

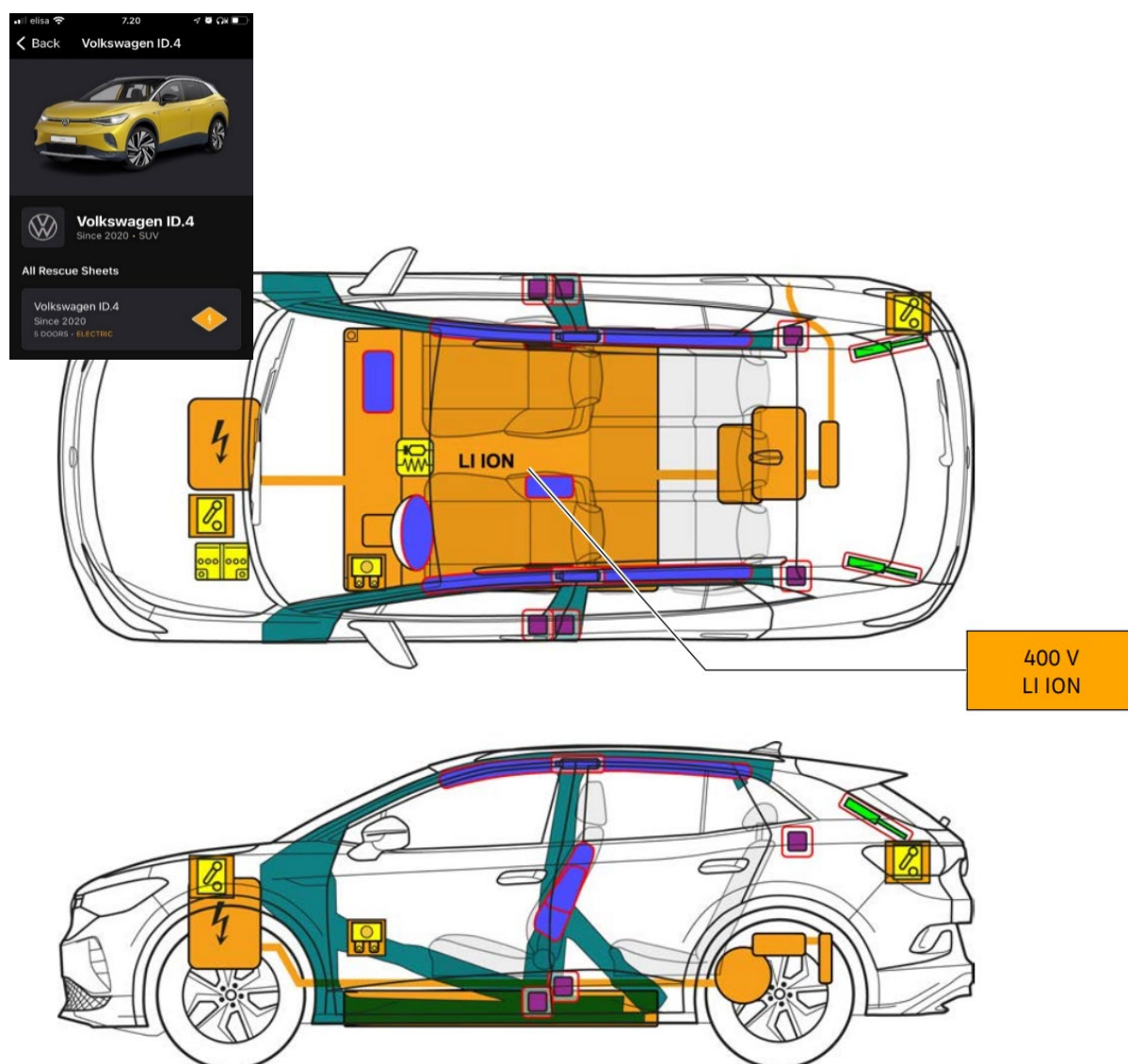


Kuva 26. Volkswagen Passat ladattavan hybridin haku Euro Rescue sovelluksesta ja pelastuskortti



Jos ajoneuvon rekisteritunnus on tiedossa, saadaan sen perusteella tarkka merkki ja malli tietoon. Jos muuta tietolähdettä ei satu olemaan tarjolla, ainakin varaosakauppiaiden nettisivuilta pystyy haun tekemään. Mallimerkintä löytyy usein myös itse ajoneuvosta. Merkin ja mallin perusteella ajoneuvon käyttövoimavaihtoehtoja voi olla useita. Hyvä tiedon lähde on puhelimeen tai muuhun mobiililaitteeseen ladattava Euro Rescue sovellus. Esimerkiksi Volkswagenin Passat ladattava hybridi löytyy hakeamalla Passat ja sieltä hybrid electric malli (Kuva 25). Muutamilla valmistajilla autosta (esimerkiksi latauspaikan kannen sisäpinnalta) löytyy QR koodi, jonka sovelluksella voi lukea ja saada pelastuskortin siten suoraan sovellukseen.

Pelastuskortti näyttää suurjännitekomponenttien sijainnit, sekä mm. korkealujuusteräksiset osat ja turvalaitteet. Suomen myydyin täyssähköauto vuonna 2021 oli Volkswagenin ID.4 (Nordig Plug 2022). Kuvassa 27 on ID.4 pelastuskortti (Volkswagen 2022) sekä taulukossa 3 merkintöjen selitykset suomennettuina.



Kuva 27. Volkswagen ID.4 pelastuskortti



Taulukko 3. Pelastuskortin merkinnät suomennettuina

	Battery pack, high-voltage	Korkeajänniteakusto
	Low-voltage device that disconnects high-voltage	Matalajännitteinen erotin, jolla korkeajännite voidaan katkaista
	High-voltage power cable	Korkeajännitekaapeli
	Fuse box disabling high-voltage	Korkeajännitteen katkaiseva sulake
	High-voltage component	Korkeajännitekomponentti
	Ultracapacitor, high-voltage	Korkeajännitekondensaattori (energian varaaja)

5.2 Akkupalon tunnistaminen

Sähköauton palossa on olennaista tunnistaa ja erottaa akkupalo ja muu ajoneuvon palo. Silloin, kun akku ei osallistu paloon, sammutetaan sähköauto samalla tavalla kuin polttomoottoriautokin. Alla kaksi videota (Kuva 28), joissa molemmissa palaa Tesla sähköauto, mutta kyseessä on ohjaamon palo, ei akkupalo.



Kuva 28. Teslan paloja. Lähteet www.20min.ch (vasen) ja youtube.com (oikea)

Akun palaessa palokäyttäytyminen on erilaista. Termisessä karkaamisessa palavat kaasut purkautuvat voimakkaasti akun paineentasausaukoista tai muusta valmistajan suunnittelemaasta ylipainemekanismista, jollainen akkupaketissa tulee EU vaatimusten mukaan olla (UNECE). Yleisesti tämä tuottaa kohtuullisen voimakkaan suhinan, jonka kyllä pystyy kuulemaan. Mikäli akku ei ole aktiivisessa palovaiheessa, saattaa akusta kuulua napsahdavia ääniä kennojen avautuessa. Nämä eivät ole aina



yltä voimakkaita kuin purkautumisesta syntyvä suhina ja saattavat siten peittyä muun äänen alle aktiivisessa palovaiheessa. Alla pari videota samaisen ajoneuvon (Tesla) akkupalosta. Teslassa akku muodostaa ajoneuvon pohjarakenteen ja akusta vapautuvat kaasut purkautuvat auton alle (Kuva 29).



Kuva 29. Teslan akkupaloja Shanghaissa ([vasen](#)) ja Kaliforniassa ([oikea](#)). Kuvien lähde youtube.com

Yleisen kokemuksen mukaan akkupalo leviää muuhun ajoneuvoon kohtuullisen hitaasti ja muusta ajoneuvosta akkuun vielä hitaammin. Stavangerin suurehkon pysäköintihallin palon tutkinnassa ei havaittu viitteitä, että sähköautojen akut olisivat syttyneet palamaan (RISE 2020). Itse akkuja ei kuitenkaan tarkemmin tutkittu palon jälkeen (Mikalsen 2022). Pelastuslaitoksen paikalle saapuessa voi siten olla kyse pelkästään akkupalosta, joka ei vielä ole levinnyt muualle ajoneuvoon tai ajoneuvopalosta, joka ei vielä ole levinnyt akkuun.

5.3 Sammutustaktiset valinnat

Ajoneuvopaloihin voi hyödyntää rakennuspalojen nelikenttämallia soveltuvin osin, kuten rakennuspa-loissakin. Ajoneuvon sammuttaminen toki on yleensä ulkoa sammuttamista. Useimmiten ajoneuvo-palot sammutetaan hyökkäävällä menetelmällä. Poikkeuksen muodostavat lähinnä kaasuautojen pa-lot, joissa puolustava taktiikka on varsin perusteltu, kun ajoneuvosta purkautuu palavaa kaasua. Pe-rinteisen polttomootoriajoneuvon sammutustaktiikkana puolustava taktiikka tulee harkittavaksi suu-rempien ajoneuvojen osalta silloin, kun kuormassa on erityistä vaaraa aiheuttavaa materiaalia, kuten vaarallisia aineita.

Taktisiin valintoihin vaikuttaa luonnollisesti myös ajoneuvon sijainti ja palon vaikutus sen ympäristöön. Ajoneuvon siirtäminen ja siirron ajoittaminen ovat osa taktiikan valintaa. Siirtäminen on perusteltua, jos se pienentää palon vaikutuksia ympäristöön tai mahdollistaa paremman sammutustaktiikan valin-nan. Siirtämisen ja sammuttamisen (hyökkäävä/puolustava) koordinointi on hyvin tilannekohtaista ja perustuu kokonaisarvioon.



Sähköauton akkupalon sammuttaminen on siinä mielessä puolustavaa sammuttamista, että tavoitteena on pysäyttää termisen karkaamisen eteneminen akussa kennosta toiseen. Akkupaloa ei voi sammuttaa tukahduttamalla, koska termisessä karkaamisessa syntyy happea. Akkupalossa on keskeistä ymmärtää palon erityisluonne muihin paloihin verrattuna. Akkupalon palava aine syntyy kemiallisen reaktion seurauksena akun sisällä, mutta liekkipalo pääsääntöisesti ulkopuolella. Liekkipalossa vapautuvalla lämmöllä on varsin pieni merkitys itse palon jatkumisen suhteen, toisin kuin esimerkiksi rakennuspaloissa. Akkupaloa ei saa sammumaan liekkipaloon keskittymällä vaan jäähdytysvaikutus pitää kohdistaa akun ehjiin, palamattomiin kennoihin.

Sähköauton akun kokoluokassa jäähdytysvettä tarvitaan runsaasti, saksalaisen laskelman mukaan noin 11 m³ Teslan S-mallin sammuttamiseen (Kuva 30).

Jäähdyttämiseen on kolme perustaktiikkaa:

1. Ulkoinen jäähdytys
2. Akun kuoren läpäisevä menetelmä
3. Akun (ja ajoneuvon) upottaminen veteen

Taktiikoista ulkoinen jäähdytys on nopein ja helpoin tapa toteuttaa. Samalla se on turvallinen sammuttajille, etenkin jos käytetään menetelmää, jossa ajoneuvon läheisyydessä ei tarvitse oleskella. Akun kuoren läpäisyyn on myös menetelmiä ja sillä saadaan tehokkaampi jäähdytysvaikutus. Kääntöpuolena on menetelmän haasteellisuus ja lisääntynyt uudelleensyttymisriski. Läpäisy helposti rikkoo kennoja akun sisältä, mikä saa kyseiset kennot reagoimaan.

Upottamalla saadaan mahdollisesti parempi jäähdytysteho kuin ulkoisella jäähdyttämällä ja vesihaude sitoo palossa vapautuvia haitallisia aineita. Toisaalta siinä mahdollisesti akkuun päätyvä vesi lisää uudelleen syttymisen riskiä merkittävästi, Floridassa hurrikaani Ian jätti jälkeensä useita sähköautojen akkupaloja autojen oltua upoksissa (abcnews).

Läpäisevissä ja upottavissa menetelmissä on myös syytä huolehtia ajoneuvon hyvästä tuulettumisesta, koska akkuun päässyt vesi hajoaa hapeksi ja vedyksi (hydrolyysi) akun jännitteen vuoksi. Vedessä olevat epäpuhtaudet vaikuttavan purkautumisnopeuteen (Virtanen 2021) ja luonnollisesti myös vedyn tuottoon. Upotettu auto olisi syytä säilyttää ulkotilassa, mikä talviolosuhteissa saattaa aiheuttaa lisäongelmia. Luonnollisesti raskaan kaluston tapauksessa upottaminen ei yleensä ole realistinen vaihtoehto.



Kuva 30. Teslan akkupalon sammuttamisen vaatima vesimäärä



5.4 Ulkoinen jäähdyttäminen

Ulkoinen jäähdyttäminen on muun muassa Teslan pelastustyöntekijän oppaassa suositeltu menetelmä sammuttaa akkupalo. Pelastustyöntekijän opas mallin S Teslalle (Tesla 2019) ohjeistaa nostamaan tai kallistamaan autoa (kuva 31) jäähdyttämisen helpottamiseksi. Vastaava englanninkielinen opas erityisesti kieltää auton upottamisen akkupalon sammuttamiseksi (Tesla 2016).



Kuva 31. Teslan akun jäähdyttämistä (ABC News)

Akkupalon sammuttamisen ensimmäisenä toimenpiteenä ulkoinen jäähdyttäminen on nopein ja turvallisin menetelmä. Ulkoinen jäähdyttäminen on yleensä joka tapauksessa tarpeen riippumatta siitä, mitä menetelmää jatkossa käytetään. Yleisesti ulkoinen jäähdyttäminen tapahtuu ajoneuvon alta, koska akut ovat useimmiten ajoneuvon painopisteen vuoksi sijoitettu mahdollisimman alas. Samalla ajoneuvo on suunniteltu siten, että alustan kastuminen on tavanomaista, joten ulkoinen jäähdyttäminen ei sisällä samoja riskejä uusien ongelmien muodostumisesta, joita lävistävään ja upottavaan menetelmään sisältyy. Ulkoisen jäähdytyksen teho on hyvin paljon riippuvainen ajoneuvon pohjarakenteesta ja voi joissain automalleissa olla hyvin rajallinen.

5.4.1 Ulkoinen jäähdytys ajoneuvoa kallistamalla

Yksi tapa toteuttaa ulkoinen jäähdyttäminen on kallistaa autoa kaadonsuuntaajalla (kuva 32) tai vaikkapa levittimen avulla. Tällä tavoin akku saadaan paremmin näkyville ja sen jäähdyttäminen suihkuputkella on mahdollista. Luonnollisesti jäähdyttäminen kannattaa järjestää niin, että henkilöstö olisi tuulen yläpuolella, koska muutoin sekä altistuminen on varsin suurta ja näkyvyys huonoa.



Kuva 32. Akun jäähdyttämisen testausta Pelastusopistolla



5.4.2 Alustasprinkleri

Ajoneuvon akun jäähdyttäminen voidaan toteuttaa alustasprinklerillä (kuva 33), jossa vesi johdetaan sprinklerisuuttimilla varustettuun putkikehikkoon. Suuttimista vesi suihkuaa ajoneuvon pohjaan. Suuttimet on asetoitu niin, että kehikko mahtuu matalankin ajoneuvon alle. (Palosuojelurahasto 2021)



Kuva 33. Alustasprinkleri. Kuva: Palosuojelurahasto

Alustasprinkleristä tulee varsin mittava määrä vettä, joten sen jäähdytysteho on hyvä. Luonnollisesti jäähdyttämisen tehokuuteen vaikuttaa ajoneuvon rakenne, jolloin ajoneuvon pohjan ja itse akun välissä olevien kerrosten eristävä vaikutus heikentää ulkoa jäähdyttämisen tehoa. Alustasprinkleri on yhden pelastusyksikön voimin operoitavissa. (Helander 2022)

5.4.3 Varsisammutin

Varsisammutin on lähtökohtaisesti suunniteltu avopalona palavan ajoneuvopalon tai huoneistopalon sammuttamiseen ulkoapäin. Varsisammuttimessa on kuitenkin mukana erillinen sähköauton akkupalon jäähdyttämiseen tarkoitettu sammutusvarsi, jonka vesivirtaama on 100 l/min 4 barin paineella.



Kuva 34. Ajoneuvon akun jäähdyttämien varsisammuttimella. Kuva: Pelastusopisto

Periaate on sama kuin alustasprinklerissä, varsisammutin voidaan viedä paikalleen palavan ajoneuvon alle (Kuva 34), jonka jälkeen miehistö voi siirtyä kauemmaksi seuraamaan jäähdyttämisen tehoa.

Varsisammuttimesta on tehty myös alkusammutuslaite sähköautopaloille (Kuva 35) jossa laite asetetaan auton alle ja poistetaan tilasta.



Kuva 35. Alkusammutuslaite sähköautopaloille. Kuva: Pivaset Oy

Varsisammuttimessa ja alustasprinklerissä etuna on, että jäähdyttäminen ei sido henkilöstöä. Selvityksen jälkeen henkilöstö voi valmistautua lisätehtäviin.

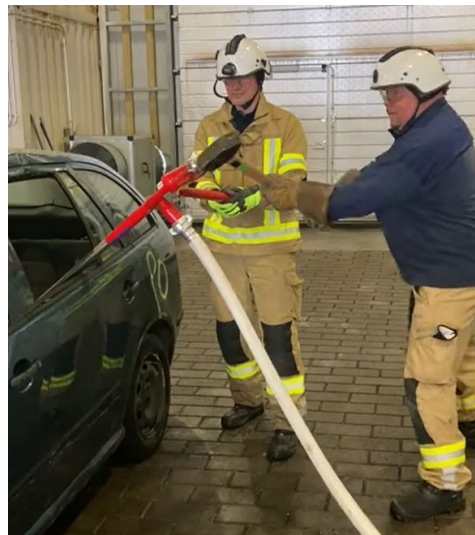


5.5 Lämpäisevät menetelmät

Ulkoista jäähdyttämistä tehokkaampi jäähdytys saadaan lämpäisemällä akun kuori ja ruiskuttamalla jäähdyttävä aine suoraan akun sisään. Tässä menetelmässä vettä kuluu huomattavasti vähemmän kuin ulkoa jäähdyttämällä. Ulkoa jäähdyttäminen on kuitenkin välttämätöntä, mikäli akku palaa jo voimakkaasti, koska muutoin työskentely ajoneuvon välittömässä läheisyydessä ei ole mahdollista.

5.5.1 Suihkuputki Murer

Saksalainen Murer on valmistanut akun kuoren läpäisyyn tarkoitetun suihkuputken (Kuva 36), jonka avulla vesi saadaan suoraan akun sisään. Putki lyödään akun kuoren läpi lekalla. Haasteellisen menetelmästä tekee se, että ajoneuvosta on pysyttävä paikallistamaan sellainen kohta, jossa akun kuori on putken ulottuvissa. Putken ohut kärkiosa on vain muutaman senttimetrin mittainen (Kuva 37), joten lävistyskohta tulee olla hyvin tiedossa. Putken kosketeltava osat on suojattu 1000 voltia eristävällä kerroksella (kuvassa 37 punainen osa). Vastaavan kaltaisen tuotteen on tuonut markkinoille myös Alankomaalainen T-ISS BV (T-ISS).



Kuva 36. Murer -putken koekäyttö. Kuva Pelastusopisto



Kuva 37. Lävistävä putki. Kuva: Murer

5.5.2 Battery Extinguishing System Technology

Rosenbauer on tuonut markkinoille laitteen nimellä BEST (Battery Extinguishing System Technology). Laitteessa on erilliset läpäisy-yksikkö ja käyttöyksikkö (Kuva 38). Läpäisy-yksikössä oleva pistin läpäisee akun kuorirakenteen, jonka jälkeen vesi suihkutetaan akun sisään. Periaate on sama kuin Murer putkessa, mutta laite on siinä mielessä käyttäjäystävällisempi, että se vaatii hyvin vähän oleskelua palavan ajoneuvon välittömässä läheisyydessä. Matalimpien ajoneuvon kohdalla ajoneuvoa joudutaan nostamaan, jotta läpäisy-yksikkö mahtuu ajoneuvon alle.



Kuva 38. Läpäisyjärjestelmä. Kuva: Rosenbauer



5.5.3 AVL Stingray One

Itävaltalainen AVL List GmbH on tuonut markkinoille Stingray nimisen tuotteen, joka asennetaan ajoneuvon sisälle. Laite tuetaan ajoneuvon kattoon (Kuva 39).

Laite lävistää akun kannen ylhäältä alaspäin suuntautuvalla pistimellä, joka saa liike-energiansa laitteessa olevasta painesäiliöstä. Laitteeseen syötetään vesi letkuliitännällä (Storz liitin kuvassa 39).

Laitteen sijoittelu ajoneuvon sisällä on luonnollisesti rajattu niihin osiin lattiaa, jotka ovat penkkien välissä. Takapenkin istuinosan pystyy yleensä varsin helposti irrottamaan, mutta etupenkkejä ei. Läpäisy tulisi pyrkiä tekemään siihen osaan akkua, jossa palo on (tiedustelu lämpökameralla). Auton penkkien ja lattiamattojen vuoksi palokohdan tiedustelu matkustamon puolelta ei ole välttämättä mahdollista.

5.5.4 Sammutinleikkuri

Akun kuori voidaan läpäistä myös sammutinleikkurilla. Cold Cut Systems AB on tehnyt koesarjan autovalmistaja Volvon kanssa ja kehittänyt uutta metodiikkaa, joka heidän (sammutinleikkurin valmistaja) kertomansa mukaan on hyvin lupaava (Cold Cut 2022). Testeissä kokeiltiin sekä pelkää vettä että AVD (Aqueous Vermiculite Dispersion) sammutusainetta. Testien perusteella pelkällä vedellä saatiin parempi sammutustulos. Testeistä ei ole löytynyt toistaiseksi kattavaa raporttia, joten on vaikea päätellä, miten testit on suoritettu ja millaisilla akuilla.

Testin perusteella on myös selvää, että sammutusleikkurin suihku tulee pystyä kohdistamaan mahdollisimman tarkasti akun reagoivaan osaan, joten lämpökameratiedustelulla ja akun rakenteen etukäteisellä tuntemisella on hyvin keskeinen rooli metodissa. Mikäli sammutusyritys sammutinleikkurilla osuu väärään kohtaan akkua, tilanne todennäköisesti pahenee entisestään ja palo leviää. Läpäisy tulee tehdä kennojen suuntaisesti, jolloin aiheutetaan vähemmän vaurioita itse läpäisyllä.

Akkupaketin pohjassa on paksu kuori, kansirakenne on huomattavasti ohuempi. Järkevä läpäisyasuunta onkin ylhäältä alas, ohjaamon tai peräkontin (ladattavat hybridit) kautta. Mikäli läpäisy tehdään pohjasta hyttiin päin, on varsin todennäköistä, että suuri osa vedestä menee akkupaketin läpi. Ajoneuvon sisäpuolelta läpäistäessä vaikuttavat aiemmin mainitut ongelmat verhoilun ja penkkien osalta, eikä peitsi välttämättä mahdu ohjaamoon halutussa asennossa. Sivulta läpäiseminen todennäköisesti rikkoo paljon kennoja ja pahentaa tilannetta.

Sammutinleikkurin käytöstä ei toistaiseksi löydy riittävästi julkaistua tutkimustietoa, että sen käyttökelpoisuudesta pystyisi saamaan varmuutta. Selkeä työhygieeninen haaste sammutusleikkuria käytettäessä on sammuttajan hyvin pitkä oleskeluaika palavan akun välittömässä läheisyydessä. Sammutinleikkurilla operoitaessa sammuttajan täytyy olla välittömän vaaran alueella koko jäähdytyksen ajan, kun esimerkiksi pistoputken voi jättää paikoilleen ja poistua kauemmaksi.



Kuva 39 AVL Stingray One. Kuva AVL.

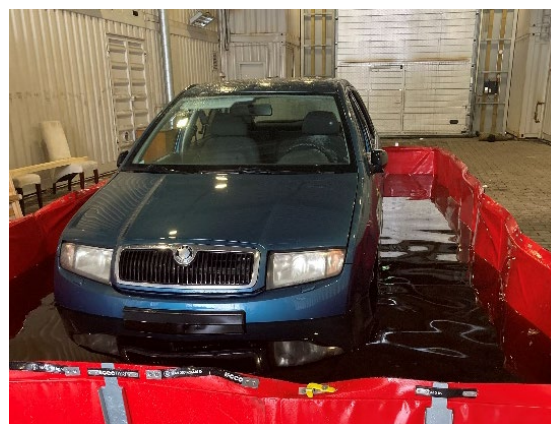


Akun jäähdyttäminen myös tarvitsee varsin paljon vettä, eikä tutkimustietoa sammutinleikkurin rajallisen vesimäärän riittävyyydestä ole vielä löytynyt.

5.6 Upotusmenetelmät

Yksi tapa pyrkiä sammuttamaan ajoneuvon akkupalon on upottaa akku tai koko ajoneuvo veteen. Kuvassa 40 on käytetty paikalleen koottavaa tilapäisallasta, johon ajoneuvo voidaan upottaa. Haasteeksi muodostuu ajoneuvon siirtäminen altaaseen. Akkupalo on saatava ensin käytännössä sammumaan siinä määrin, että akusta ei purkaannu aktiivista liekkiä. Tämän jälkeen ajoneuvo siirretään altaaseen. Vaihtoehtoisena menetelmänä allas voidaan täyttää ensin ja nostaa ajoneuvo altaaseen. Molemmissa menetelmissä sammuttajat joutuvat työskentelmään lähellä ajoneuvoa, jolloin aktiivisessa liekkivaiheessa tarvitaan ulkoista jäähdytystä tai sammuttajien suojaamista suihkuputkella.

Vaihtoehtona on ajoneuvon ympärille koottava allas (Kuva 41), jolloin ajoneuvoa ei tarvitse erikseen siirtää. Koottavassa altaassa ei ole pohjaa, joten se voidaan ottaa käyttöön ahtaassakin tilassa, jossa ajoneuvoa ei voi nostaa. Tämä mahdollistaa altaan käytön esimerkiksi pysäköintihallissa. Altaan kokoamisessa ajoneuvon ympärillä joudutaan työskentelemään pidempään, kuin muissa menetelmissä. (Palo-suojelurahasto 2021)



Kuva 40. Ajoneuvon upottaminen. Kuva: Pelastusopisto



Kuva 41. Koottava allas. Kuva: Pelastusopisto

5.7 Kontit

Ajoneuvo voidaan myös upottaa konttiin, jolloin tilapäisallasta ei tarvita. Kontti tarvitsee erillisen siirtoajoneuvon sekä joko vinssin tai nostokaluston ajoneuvon konttiin siirtämiseksi. Kuvan 42 kontin vesitilavuus on 19 kuutiometriä (Pelastustieto 2021). Tässä kontissa takalaita ei aukea, jolloin ajoneuvo on nostettava konttiin. Toisaalta rakenteesta on näin saatu tiiviimpi. Akun saaminen upoksiin vaatii ajoneuvon koosta riippuen, useita kuutioita vettä. Ajoneuvon ja veden yhteismassan takia konttia ei voi



Kuva 42. Siirrettävä kontti ajoneuvon sammuttamiseen Kuva: Mika Rinne, Pelastustieto



siirtää auton ollessa upotettuna (Luoma-aho 2022). Parkkihallissa tai vastaavassa sisätilassa oleva ajoneuvo on luonnollisesti ensin siirrettävä ulos. Konttia voi toki käyttää moneen muuhunkin tarkoitukseen, joten yleismallinen kontti on varsin monikäyttöinen.

Ajoneuvo on uudelleen syttymisen riski kasvaa, kun akkuun pääsee vettä, joka aiheuttaa akustossa oikosulkuja. Siirrettävän kontin tapauksessa toimintamalli on jättää ajoneuvo kahdeksi vuorokaudeksi konttiin uudelleen syttymisen ehkäisemiseksi (Pelastustieto 2021). Pakkasella toimintatapa vaatii kontin pitämistä lämpimänä, jotta kokonaisuus ei jäädy.

Tanskassa on kehitetty konttiratkaisu (Kuva 43), jossa ajoneuvoa ei upoteta, vaan jäähdyttäminen tapahtuu vesikierron avulla (Karlberg 2020). Hyvänä puolena on se, että vesi ei mene akun sisälle. Myös vesimäärän ollessa pieni, konttia voidaan kuljettaa sen ollessa käytössä.

Veden kierrätys tehostaa jäähdytysvaikutusta ja samalla vähentää jäätyksen aiheuttamien ongelmien riskiä.



Kuva 43. Sammutuskontti, jossa vettä kierrätetään. Kuva Beredskab Øst

5.8 Sammutuspeitteet

Markkinoilla on jo pitkään ollut ajoneuvopaloon tarkoitettuja sammutuspeitteitä. Näillä on käyttöä poltomoottoriajoneuvojen sammuttamisessa ja niillä voidaan hillitä palon leviämistä sekä tukahduttaa ajoneuvopalo, etenkin yhdistettynä jauhesammuttimen käyttöön. Sammutuspeite levitetään kahden sammuttajan voimin ajoneuvon päälle ja liepeet tiivistetään, jotta palo ei saa ilmaa (Kuva 44). Sammutuspeite kontaminoituu sammuttaessa vahvasti ja on käytännössä mahdotonta puhdistaa niin, että sen voisi uudelleen pakata kalustoon. Sammutuspeitteen käytöstä kaasuautojen sammuttamisessa liepee hyvin vähän kokemusta. Lähdeaineistosta ei löytynyt yhtään tapausta, jossa sammutuspeitteellä olisi sammutettu kaasuautoa. Kaasuauton turvaventtiilit aktivoituvat joko paineen tai lämpötilan noususta. Peitteen alle mahdollisesti kerääntyvä palamaton kaasu saattaa aiheuttaa vakavan työturvallisuusriskin, joten sammutuspeitteen käyttöä kaasuauton palossa voi suositella vasta, kun aiheesta saadaan lisää tietoa ja kokemusta.



Kuva 43. Ajoneuvopalon sammuttaminen sammutuspeitteellä



Akkupalon sammuttamisessa tavallisen ajoneuvon sammutuspeitteen teho on rajallinen. Peitettä voi käyttää liekkien ja savun hallintaan ja palon leviämisen estämiseen. Akkupalosta purkautuva pistoliekki on huomattavasti kuumempi, kuin tavallisessa ajoneuvopalossa ja voimakkaampi akun sisäisen paineen vaikutuksesta, joten tavallinen peite palaa helposti puhki. Akkupalo ei myöskään sammu tukahduttamalla, vaikkakin liekkipalon osuus vähenee. Näin ollen prosessi akun sisällä jatkuu ja myrkyllisiä kaasuja vapautuu edelleen. Uusi konsepti yhdistää sammutuspeitteen rajaavaan vaikutukseen jäähdyttämisen ja myrkyllisten kaasujen suodattamisen (Puranen Kaisu 2021). Peitteen (Kuva 45) vesikanavat levittävät veden ajoneuvon päälle ja savukaasut johdetaan suodatinjärjestelmään. Konseptissa ajoneuvoa jäähdytetään ulkoisesti ennen peitteen asentamista (Palosuojelurahasto 2021). Suodatinjärjestelmän puhallin alipaineistaa peitteen, jolloin syttymiskelpoisten kaasujen kerääntymisen riski pienenee. Peitteen alaosan tiivistysrakenteen tarkoitus on parantaa kaasutiiveyttä, ei niinkään kerätä sammutusvettä, eikä akkua ole tarkoitus upottaa veden alle.



Kuva 45. Suodatinratkaisun ja jäähdyttämisen yhdistävä sammutuspeite sähköautoille

5.9 Yhteenveto menetelmistä

Akun jäähdyttämisen kannalta läpäisevä menetelmä on tehokkain. Samalla se on teknisesti vaikein toteutettava. Rosenbauerin työkalu on toimiva sellaisissa ajoneuvoissa, joissa akku on pohjassa. Murerin pistosuihkuputki toimii myös muulla tavoin sijoitettujen akkujen kanssa, mutta vaatii erityisen tarkan tiedustelun ja ajoneuvon rakenteen tuntemisen. Etenkin Murerin putken käyttö vaatii ulkoisen jäähdytyksen, jos akkupalo on aktiivivaiheessa. Molemmissa tuotteissa on varsin vaikea tietää, että läpäisy on onnistunut ja osunut oikeaan kohtaan. Pistosuihkuputken käyttö vaatii pitkän oleskeluajan (putken asentaminen) ajoneuvon välittömässä läheisyydessä ja tämän takia aiheuttaa suurimman altistuksen henkilöstölle. Akun sisään laitettu vesi aiheuttaa oikosulkuja ja hydrolyysiä, josta vapautuu vetyä ja happea.

Upotusmenetelmää voi käyttää, vaikka akun sijainti ei ole tiedossa. Upottavassa menetelmässä vesi ei pääse akkuun palon aktiivivaiheessa, kun akun sisäinen paine on korkea kennojen avautuessa. Akun sisäisen paineen laskiessa vesi pääsee akun sisään. Akun sisällä oleva vesi aiheuttaa hydrolyysiä ja oikosulkuja, joten akun on oltava vesihauteessa, kunnes sen varausaste on pudonnut riittävän alas, etteivät akun kennot syty uudelleen. Tämä saattaa kestää vuorokausia ja olla haasteellista pakkaskelillä.

Tilapäisaltaan tapauksessa ajoneuvo on jätettävä pitkäksi aikaa (useampia vuorokausia) paikoilleen, mikä saattaa olla joissain ympäristöissä haasteellista. Koottavan altaan tapauksessa henkilöstö joutuu oleskelemaan ajoneuvon välittömässä läheisyydessä altaan kokoamisen vaatiman ajan. Vastaavasti siirrettävä kontti on varsin vaikea nostaa kyytiin ja kuljettaa, jos siinä on useita kuutioita vettä.



Ulkoinen jäähdytys on kolmesta menetelmästä nopein, helpoin ja turvallisin toteuttaa. Ulkoinen jäähdytys voidaan toteuttaa pienellä henkilöstöllä, eikä vaadi juurikaan oleskelua ajoneuvon läheisyydessä. Akun ja ajoneuvon kuoren välissä olevat kerrokset rajoittavat jäähdytyksen tehoa, joten ulkoisen jäähdytyksen teho on rajallinen. Toisaalta riski, että akku syttyy uudelleen, on pienempi samoin kuin hydrolyysin riski. Ulkoisessa jäähdytyksessä akun sijainnista on hyvä olla suuntaa antava tietämys.

5.9.1 Ajoneuvoihin rakennetut sammutusjärjestelmät

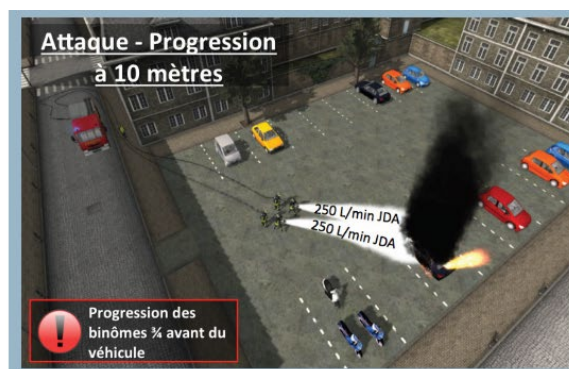
Sähköauton akussa on jäähdytysjärjestelmä, joka yleisimmin on nestekiertoinen. Akkua voitaisiin jäähdyttää tämän järjestelmän kautta myös palotilanteessa. Jo varsin kauan sitten on ehdotettu ajoneuvoon asennettavasta järjestelmästä, jonka kautta palokunta voisi syöttää jäähdyttävää sammu- tetta oman liittymän kautta. Ehdotus on poliittisesti hankala siinä suhteessa, että tällaisen järjestel- män toteuttaminen viestii asiakkaalle, että akussa on vakavasti otettava paloriski.

Hyvin viimeaikaisen uutisoinnin (Hicks 2022) perusteella Audi on jättänyt patenttihakemuksen järjes- telmästä, jossa akkumoduuleja valvotaan ja tarvittaessa moduuliin ruiskutetaan sammutetta. Järjes- telmään pystyisi myös ruiskuttamaan lisää sammu- tetta ulkoisesta lähteestä. Se, tuleeko tällainen jär-jestelmä joskus tuotantoon, jää nähtäväksi.

5.10 Sammuttamisen työturvallisuus

CTIF on laatinut ohjeistusta uusien energiamuotojen ajoneuvojen paloihin ja niiden sammuttamiseen (Gentilleau 2020). Ohjeiden mukaan oma kalusto sijoitetaan riittävän kauas palavasta ajoneuvosta ja lähestyminen tapahtuu etuviistosta (Kuva 45). Etuviisto lähestyminen on turvallisinta, koska

1. Sähköauto yleensä purkaa liekkiä suoraan eteen/taakse ja sivuille
2. Kaasuautojen turvaventtiilit purkavat kaasun taakse ja ajoneuvon alle
3. Ajoneuvo (erityisesti sähköajoneuvo) saattaa liikkua itseksensä, joten ajoneuvon edessä ja takana oleskelua on syytä välttää



Kuva 45. Kaluston sijoittaminen ja ajoneuvon lähestyminen. Kuva: CTIF

Yleisesti ottaen ajoneuvopalon sammuttamiseen suojaustasoksi riittää paloasu ja paineilmahengitys- laite. Sähköauton akkupalon sammuttamisen jälkeen varusteille on syytä tehdä tavallista parempi



puhdistus. Akkupalossa vapautuu fluorivetyä (HF), josta kosteuden kanssa muodostuu fluorivetyhappoa, kun HF sekoittuu veteen. Fluorivetyhappo on vahvasti korrosoiva (Työterveyslaitos 2022).

Akun sisällä oleva elektrolyytti on myrkyllistä (Litiumheksafluorofosfaatti) sekä sisältää helposti syttyviä liuottimia. Mikäli akku on rikkiäntunut ja sieltä vapautuu nestemäistä vuotoa tai höyryä, on tältä syytä suojautua. Yleisesti ottaen elektrolyyttiä kennossa on vähän ja suurempi vuoto vaatisi akun mit-tavan mekaanisen vaurioitumisen, mikä todennäköisesti johtaisi termiseen karkaamiseen ja akkupa-loon. Vaurioituneesta ajoneuvon akusta saattaa todennäköisemmin vuotaa jäähdytysnestettä, joka yleisimmin on veden ja glykolin seos.



6 Yhteenveto

Ajoneuvopaloista perinteiseen polttomoottoriajoneuvoon verrattuna uutta taktiikkaa ja tekniikka tarvitaan kaasu- ja sähköajoneuvojen paloihin. Kaasu on pelastustoimelle tuttu ja myös kaasupalon sammuttaminen. Yleisesti turvallisinta on antaa kaasun palaa hallitusti ja estää palon leviäminen sekä muut lisävahingot. Työturvallisuuden kannalta kuitenkin on tärkeää tunnistaa kaasuauto ja huomioida sen palossa mahdolliset kaasun purkaukset paineen tai lämpötilan nousun johdosta.

Mikäli ajoneuvon käyttövoimasta ei ole esitietoa, liekkien käyttäytyminen palotapahtumassa antaa hyvää osviittaa siitä, millaisesta ajoneuvosta on kyse. Kaasuautossa kaasu purkautuu järjestelmän turvaventtiileistä (PRD, Pressure Release Device) voimakkaasti, samoin akkupalon kaasut akun paineaukoista. Polttomoottoriauton palossa liekin käyttäytyminen noudattaa enemmän painovoimasta purkautumista. Jos kyseessä on polttomoottoriauto tai käyttövoima ei osallistu paloon, sammuttaminen tapahtuu perinteisin menetelmin.

Kaasuauton purkaus on hyvin tasainen ja paine on kova joten liekki on pitkä ja kapea. Purkautumiskohta on selkeästi havaittava. Sähköauton akusta purkautuva liekki on vähemmän säännöllinen ja paine on pienempi, joten liekki on lyhyempi. Termisen karkaamisen eteneminen akussa määrittelee, miten korkeaksi paine akun kuoren sisällä nousee.

Paikka, jossa sähköauto palaa, määrittelee paljon käytössä olevia vaihtoehtoja. Pitkän ajomatkan päässä maantien varressa palava sähköauton akku on helposti ehtinyt jo niin pitkälle, että hallitun polton vaihtoehtoa kannattaa harkita. Aktiivisilla toimenpiteillä mahdollisesti vain pitkitetään tapahtumaa.

Tässä raportissa esitellyistä menetelmistä ulkoinen jäähdytys on ainoa sammutusauton tavanomaisella nykykalustolla toteutettavissa oleva menetelmä, tosin erikoisvälineillä mentelmä on nopeampi ja tuottaa vähemmän altistuksia. Upotus- ja lävistysmenetelmät vaativat työskentelyä ajoneuvon välittömässä läheistyydessä, mikä ei todennäköisesti onnistu ilman samanaikaista ulkoista jäähdyttämistä ja sammutustoimia. Tämän vuoksi ulkoinen jäähdytys kannattaa aloittaa joka tapauksessa välittömästi. Mikäli ulkoisella jäähdytyksellä saadaan riittävä sammutusvaikutus, kannattaa ajoneuvo siirtää soveltuvaan, turvalliseen paikkaan, jossa uudelleen syttyminen ei aiheuta lisävahinkoja. Siirtoreitti tulisi suunnitella siten, että savuhaitta ympäristölle on mahdollisimman pieni, mikäli ajoneuvo syttyy uudelleen siirrettäessä. Siirto tulisi toteuttaa saattaen sammutusvalmiudessa.

Lävistävä menetelmä on todennäköisesti tehokkain kolmesta esitellystä. Samalla se vaatii tarkimman tiedustelun, jotta lävistys todella menee oikeaan kohtaan. Lävistäminen helposti rikkoo akun kennoja ja aiheuttaa oikosulkuja, joten se ainakin hetkellisesti lisää termistä karkaamista. Metelmä vaatii erikoiskalustoa.

Ajoneuvon upottamisen haasteeksi muodostuu upotetun ajoneuvon siirto, mikäli paikka ei ole sellainen, että ajoneuvon voi jättää paikoilleen useammaksi vuorokaudeksi. Erityinen pohjoisen lisä syntyy upotetun ajoneuvon jäätymisestä talviaikaan. Lienee selvää, että sähköautoa ei pidä upottaa luonnovesilähteeseen. Upotusveden kästtely on myös hoidettava ympäristö huomioiden.

Tämän sivun ajatukset sammuttamisen työnkulusta on summattu liitteen 1 kaavioon. Kaaviota luettaessa on huomioitava, että siinä lähtökohtana on sammutusyksikkö, jossa ei välttämättä ole



mitään sähköauton akkupalon sammuttamiseen tarkoitettua erikoiskalustoa. Uusien teknisten apuvälineiden ja uuden tiedon myötä kaavion esittämä työnkulku saattaa muuttua. Kaaviossa on myös pyritty ottamaan huomioon tapahtumapaikan vaikutus päätöksen tekoon. Monissa ympäristöissä ei ole mahdollista antaa ajoneuvon palaa loppuun hallitusti, vaan on pyrittävä aktiiviseen sammutustoimintaan. Kaaviossa esitetyt aikamääreet, kuten puolen tunnin mittainen ulkoinen jäähdytys perustuvat rajalliseen määrään lähdeaineistoa sähköajoneuvojen paloista ja koepoltoista. Tiedon lisääntyessä nämä saattavat luonnollisesti tarkentua.

Kevyiden sähköajoneuvojen akkupalot ovat myös vakavasti otettava riski, koska akkupalo levittää paloa erittäin tehokkaasti pistoliekkien sekä palavien heitteiden ja roiskeiden myötä.

Jo polkupyörän kokoluokan akun sammuttaminen turvallisesti ilman paloasua ja paineilmahengityslaitetta on niin riskialtista, ettei sitä voi suositella. Akkupalon alkusammutuksessa tehtävien toimenpiteiden tulisi jo olla niin nopeita, että ne voi tehdä hengistystä pidättäen tai niin kaukaa, ettei altistu myrkylliselle savulle. Maallikon toimenä voidaan ajatella ainoastaan palon leviämisen estäminen siten, että akun heitteiden ja savun vaikutusalueella ei tarvitse oleskella. Tämä voisi olla toteutettavissa edempää pikapalopostilla tai rajoituspeitteellä. Akkupalo ei tukahdu, mutta riittävän kestäväällä peitteellä voidaan estää palon leviämistä.

Akkupaloon jauhesammutin on tehoton, samoin hiilidioksi. Vaahtosammuttimella voi palon leviämistä hillitä, kun sammuttaa turvallisen etäisyyden päästä. Sähköauton akkupaloon näistä ei ole merkittävää hyötyä. Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto suosittaa lämpimiin pysäköintilaitoksiin pikapalopostia (Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto 2022).

Lähestulkoon kaikki menetelmät uusien energiamuotojen sammuttamisesta perustuvat ainakin osittain oletuksiin, eikä niitä voi laittaa paremmuusjärjestykseen johtuen uuden teknologian moninaisuudesta ja nopeasta kehitymisestä. Jo erilaisia korkeajänniteakkuja teillämme liikkuvissa ajoneuvoissa on hyvin heterogeeninen valikoima ja paras sammutusmenetelmä on aina tilannekohtainen ja olosuhteiden mukaan vaihtuva. Aihe olisi oman, pelkästään uusien energiamuotojen ongelmatiikkaan paneutuvan hankkeen arvoinen, jotta tulevaisuudessa pystymme vastaamaan näihin haasteisiin, kun ne eteen tulevat.



7 Suositukset

Uusien energiamuotojen tunnistaminen on tärkeä osa tiedustelua ja kannattaa pyrkiä selvittämään jo esitietojen myötä. Hätäkeskuksen ohjeistuksessa kysytään ajoneuvon rekisterinumeroa (Laatikainen 2022) ja tämän perusteella ajoneuvon tiedot, myös käyttövoima löytyvät. Käyttövoiman voi rekisterinumeron perusteella selvittää tilannekeskus (Eskelinen 2022), jolloin matkalla oleva yksikkö voi keskittyä muihin tehtäviin. Toimintamallista olisi hyvä luoda rutiininomainen, jolloin käyttövoima olisi yleensä tiedossa ennen kohteeseen saapumista ja saapuva yksikkö voisi etukäteen varautua.

Pelastuskorttijärjestelmän tulee olla jokaisen liikenneonnettomuuteen tai ajoneuvopaloon hälytettävän yksikön käytössä. Minimissään käytössä tulee olla Euro Rescue puhelimesta tai vastaavassa päätelaitteessa, jossa on riittävä näytön koko kenttäolosuhteissa käytettäessä. Joukkoliikenteen bussien pelastuskortteja ei välttämättä löydy sovelluksista yhtä helposti kuin henkilöautojen kortit, tutustuminen paikkakunnan bussikalustoon ja bussien pelastuskorttien ajantasaisuuden varmistaminen tulisi tehdä säännöllisin väliajoin.

Sähköauton akkupaloon on syytä varautua ja sammutustoimintaa suunnitella etukäteen. Varautumisessa tulisi pohtia, mihin ajoneuvo voidaan jättää tai siirtää akuutin palovaiheen jälkeen, jotta mahdollinen uudelleen syttyminen ei aiheuta kohtuutonta riskiä tai tarpeetonta ympäristön pilaantumista. Veteen upottamista harkittaessa tapahtumapaikan luonne määrittelee, voidaanko ajoneuvo jättää paikalleen upotettuna, huomioiden ympäristö. Upottamisen tuottamalle varsin saastuneelle vedelle tulee olla ennalta sovittu käsittelymenettely.

Suuren energiavaraston palotapahtuma voi olla hyvin haasteellinen tehtävä pelastustoimelle. Energiavaraston ulkopuolella olisi hyvä olla pelastustoimelle merkittynä kohdat, joista seinämä voidaan lävistää ja energiavarastoa voidaan tehokkaasti ja turvallisesti jäähdyttää ulkopuolelta. Myös nopea paineen nousu varaston sisällä tulee ottaa huomioon ja suunnitella hallittu paineen purku. Ulkopuolelle olisi tärkeää merkitä kohdat, joista paine purkautuu, jotta sammuttajat pystyvät välttämään vaara-alueella työskentelyä.

Pienten ja erityisesti keskisuurten (polkupyörät, sähköpotkulaudat) säilytykseen ja lataukseen tulee kiinnittää nykyistä enemmän huomiota. Näiden aiheuttamat palot ovat yleistyneet hurjasti muualla maailmassa ja akkujen ikääntyminen saattaa tuoda saman trendin Suomeen. Sähköpyöräily on tervetullut ilmiö kansanterveyden ja ilmaston näkökulmasta, ja useat työpaikat tukevat sähköpyörien käyttöä työmatkalla. Akkujen lataamisen ja säilyttämisen kieltäminen pyörävarastoissa ja vastaavissa yhteisissä tiloissa voidaan perustella paloturvallisuudella, mutta akun vieminen asuntoon tai työpaikan työskentelytiloihin tuo mukanaan henkilöturvallisuusriskin ilman, että paloturvallisuus sanottavasti paranisi. Erityisesti ongelmaan tulisi puuttua rakennuksissa, joissa on paljon ihmisiä, etenkin jos heidän poistumiskykynsä on rajoitettu. Sähköpyörien ja -skoottereiden turvallinen lataus tulisi selkeästi ohjeistaa ja myös mahdollistaa työpaikoilla, erityisesti mm. kouluissa, hoitolaitoksissa, terveydenhuollon yksiköissä ja julkisissa tiloissa.



Lähteet

Fortum 2017: Pohjois-maiden suurin akku otettiin käyttöön Järven-päässä. <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>

Hallikainen V. (2017): Ajoneuvojen Li-ion akkujen palotutkimus. Opinnäytetyö. Metropolia ammattikorkeakoulu, Helsinki.

Battery University 2022: The High-power Lithium-ion. <https://batteryuniversity.com/article/the-high-power-lithium-ion>

FAA, Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical, Center Aviation Research Division (2016). Lithium Battery Thermal Runaway Vent Gas Analysis. <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC>

The New Yourk Times 2022: The Scooter Battery Peril Worries the Fire Department: [https://www-nytimes-com.cdn.ampproject.org/c/s/www.nytimes.com/2022/12/01/nyregion/lithium-ion-batteries-fires.amp.html](https://www.nytimes-com.cdn.ampproject.org/c/s/www.nytimes.com/2022/12/01/nyregion/lithium-ion-batteries-fires.amp.html)

Schuerman M. 2022: Fires from exploding e-bike batteries multiply in NYC — sometimes fatally. <https://www.npr.org/2022/10/30/1130239008/fires-from-exploding-e-bike-batteries-multiply-in-nyc-sometimes-fatally>

Taleva K. 2022: Ihminen loukkaantui sähköpotkulaudan palossa Helsingissä. <https://www.iltalehti.fi/kotimaa/a/c1ffe55d-9e9f-4218-a465-a1435179e059>

Lindberg N. 2022: Sähköpyörrien säilytys ja lataaminen taloyhtiössä. <https://www.kiinteistoliitto.fi/media/4432/sahkopyorattaloyhtiossa.pdf>

Vancouver Fire Rescue Services 2022: Twitter. Lithium Ion battery fires are the number 1 cause of fire deaths in the City of Vancouver for 2022. <https://twitter.com/VanFireRescue>

Palomaa A. 2021: Sähköverkkoja tukevien suurten akustojen käyttö lisääntyy – Ylöjärven kokeilussa sähköt on turvattu jo kolmessa myrskyssä. <https://yle.fi/uutiset/3-11763332>

Degerman R. 2022: Romu-Teslojen akuista halutaan rakentaa maanlaajuinen sähkövarasto – virtuaalinen jättiakku voisi tasata kulutuspiikkejä. <https://yle.fi/uutiset/3-12309091>

Enkhardt S. 2022: Senec remotely switches off its residential batteries after explosion in Germany. <https://www.pv-magazine.com/2022/03/10/senec-remotely-switches-off-its-residential-batteries-after-explosion-in-germany/>

Laitinen Juha, Jumpponen Mika, Heikkinen Pirjo (2017): Korkeajänniteakkukennojen ja akkujen palot, niiden sammuttaminen ja riskinhallinta. Suomen Palopäällystöliitto, Helsinki.

Työterveyslaitos 2022 a: Hiilimonoksidi. <https://www.ttl.fi/ova/hiilimonoksidi>

EPRI 2022: BESS Failure Event Database. https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database



Randazzo R. 2020: Cause of APS battery explosion that injured 9 first responders detailed in new report <https://eu.azcentral.com/story/money/business/energy/2020/07/27/aps-battery-explosion-surprise-new-report-findings/5523361002/>

Hassinen Marko 2018: A strategy for fighting lithium-ion battery fires. Fire Safety and Science conference, Arnhem, Alankomaat. <https://www.youtube.com/watch?v=1wclVfwd8mk>

Herron et al. 2012: Battery pack venting system. <https://patents.google.com/patent/US20120231306>

Mardall J et al. 2012: Battery pack directed venting system. <https://patents.google.com/patent/US8557416B2/en>

Tesla 2019: Pelastustyöntekijöiden opas. https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/2016_Model_S_Emergency_Response_Guide_fi.pdf

Lecocq A. et al 2014: Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973680/document>

Gasum 2022: Tutustu kaasuautomalleihin. <https://www.gasum.com/yksityisille/valitse-kaasu-auto/kaasuautomallit/>

Vainio Jaakko 2021: Bensiinimoottorin trifuel-konversio. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/494728/Vainio_Jaakko.pdf?sequence=2

Skoda 2022. Rescue Data Sheets. <https://www.skoda-auto.com/services/rescue-octavia>

Nordig Plug 2022: Myydyimmät sähköautot suomessa 2022. <https://nordicplug.fi/blogs/sahkoautot-ja-lataaminen-blogi/myydyimmat-sahkoautot-suomessa-2022>

UNECE 2022: Agreement Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 3.3.2022. <https://unece.org/sites/default/files/2022-07/R100r3e.pdf>

Volkswagen 2022: Rescue data. [Rettungsdaten für die Feuerwehr: Sicherheit für jedes VW Auto. \(volkswagen.de\) https://www.volkswagen.de/de/besitzer-und-nutzer/wichtige-kundeninformationen/rechtliches/rescue-data.html](https://www.volkswagen.de/de/besitzer-und-nutzer/wichtige-kundeninformationen/rechtliches/rescue-data.html)

RISE 2020: Evaluation of fire in Stavanger airport car park 7 January 2020 <https://risefr.com/media/publikasjoner/upload/2020/rise-report-2020-91-evaluation-of-fire-in-stavanger-airport-cark-park-7-january-2>

Mikalsen 2022: Dr Ragni Fjellgaard Mikalsen, RISE Fire Research AS. Sähköpostikeskustelu.

Virtanen Olli 2022: Vesiupotuksen vaikutukset korkeajänniteajoneuvon akkumoduuliin. http://info.smedu.fi/kirjasto/Kehitt%C3%A4mishankkeet/Virtanen_Olli_2022.pdf

ABC News 2022: Hurricane Ian flood damage to EVs creating ticking time bombs in Florida <https://abcnews.go.com/US/hurricane-ian-flood-damage-evs-creating-ticking-time/story?id=91795016>



Tesla 2016: Information for first and second responders. Emergency response guide https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/2016_Model_S_Emergency_Response_Guide_en.pdf

Palosuojelurahasto 2021: PSR Innovaatiopalkinto 2021 <https://www.youtube.com/watch?v=FgQZkP9r8Lk>

Helander Tarmo 2022: Sähköautojen akkupalojen sammutusmenetelmät. <https://www.the-seus.fi/handle/10024/780338>

T-ISS 2022: Water Mist Lance. <https://t-iss.com/catalogue/product/Water-Mist-Lance/?categories=12>

Pelastustieto 2021: Akustopalon sammutuslava sopii moneen käyttöön – akusto jäähtyy veden alla kaksi vuorokautta. <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/kalusto/akustopalon-sammutuslava-sopii-moneen-kayttoon-akusto-jaahtyy-veden-alla-kaksi-vuorokautta/#b512ef93>

Luoma-aho Janne 2022: Puhelinkeskustelu.

Karlberg Peter 2020: Näin sammuu viheliäinen sähköauton tulipalo – Pumppujen tuotto on 1 000 litraa minuutissa. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/nain-sammuu-viheliainen-sahkoauton-tulipalo-pumppujen-tuotto-on-1000-litraa-minuutissa/60cfd9f2-47b6-4fea-a606-b16118203824>

Puranen Kaisu 2021: Sähköautopalon myrkyt jäävät nyt sammutuspeitteeseen. <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/kalusto/sahkoautopalon-myrkyt-jaavat-nyt-sammutuspeitteeseen/#7dea73c8>

Hicks V. 2022: Audi patents a system to prevent fires in electric car batteries. <https://evspias.com/audi-patents-a-system-to-prevent-fires-in-electric-car-batteries/>

Gentilleau M. et al. 2020: Palokunnan toimintakäsikirja Ajoneuvoja koskeviin hätätilanteisiin vastaminen (Suomennos Mikko Saastamoinen) <https://godr.sdis86.net/godr/godr-sr-fi/index.html>

Työterveyslaitos 2022 b: Fluorivety ja fluorivetyhappo <https://www.ttl.fi/ova/fluorivety-ja-fluorivetyhappo>

Pelastuslaitosten kumppanuusverkosto 2022: Sähköajoneuvojen latauspisteet kiinteistöissä ja pelastustoiminnan edellytysten huomioiminen. https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2022-08/S%C3%A4hk%C3%B6autojen_latauspisteet_kiinteist%C3%B6ss%C3%A4_ja_pelastustoiminnan_edellytysten_huomioiminen.pdf

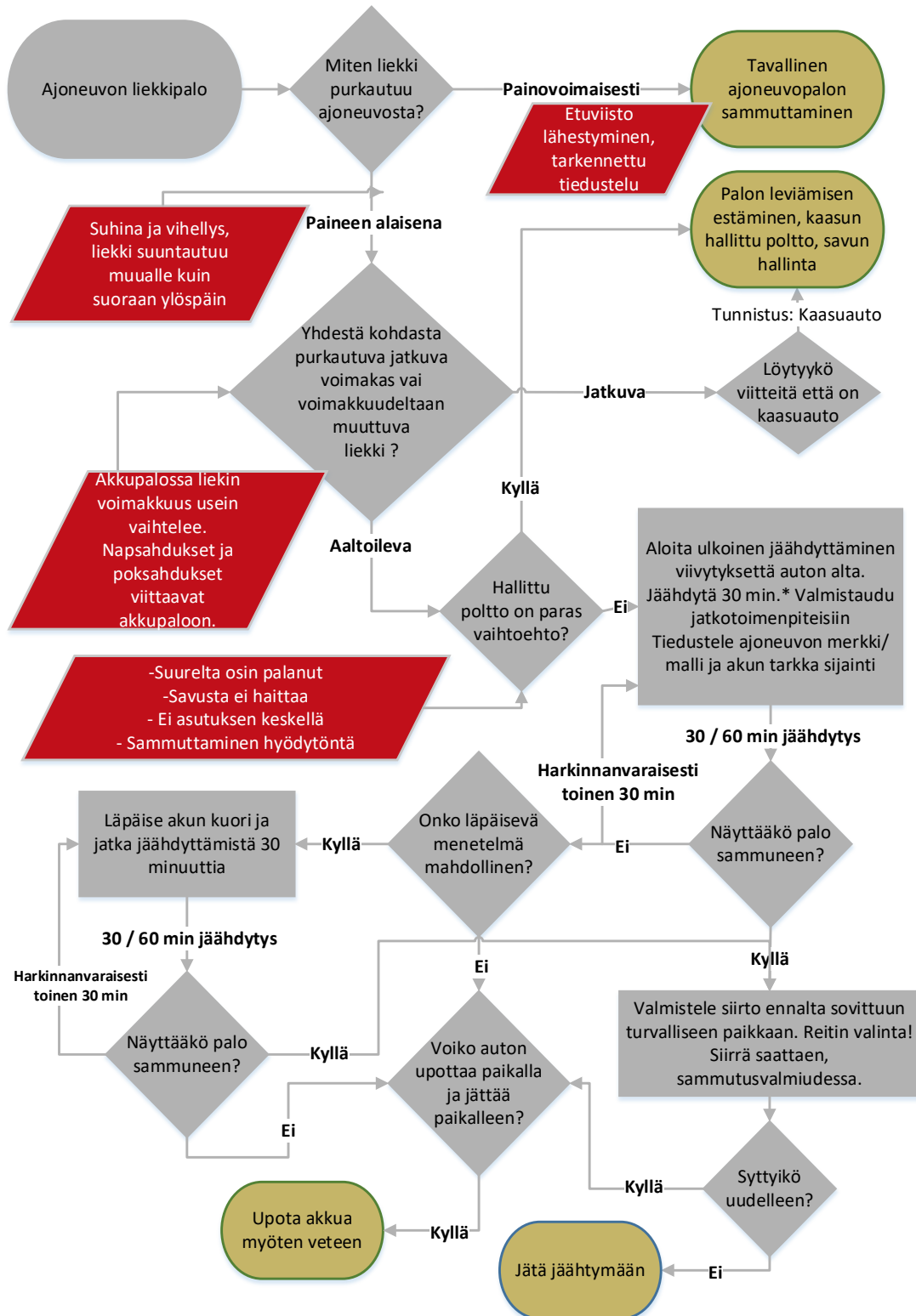
Laatikainen Timo 2022: Puhelinkeskustelu.

Eskelinen Anna 2022: Puhelinkeskustelu.



Liitteet

Liite1 Vuokaavio ajoneuvopalon sammuttamiseen tilanteessa, jossa käyttövoima ei ole tiedossa.





PELASTUSOPISTO

Tässä tutkimuksessa selvitetään perusteet ajoneuvopalojen sammutustaktiikalle ja -tekniikalle käyttövoiman muuttuessa perinteisestä polttomootoritekniikasta uusiutuviin energiamuotoihin. Erityisenä painopisteenä on sähköautot ja niiden akkupalot. Tutkimuksen tekemistä on rahoittanut Palosuojelurahasto.

ISBN 978-952-7217-68-9 (pdf)

ISSN 2342-9313 (pdf)