



# Riskit sähköajoneuvojen latauksessa

Kirjoittajat: Samppa Jenu, Jari Haavisto, Marko Paakkinen

Luottamuksellisuus: julkinen

<b>Raportin nimi</b> Riskit sähköajoneuvojen latauksessa		
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b> Helsingin Seudun Liikenne		<b>Asiakkaan viite</b>
<b>Projektin nimi</b> HOCS Tekninen tuki		<b>Projektin numero/lyhytnimi</b>
<b>Raportin laatija(t)</b> Samppa Jenu, Jari Haavisto, Marko Paakkinen		<b>Sivujen/liitesivujen lukumäärä</b> 8/-
<b>Avainsanat</b>		<b>Raportin numero</b> VTT-CR-00370-20
<b>Tiivistelmä</b> <p>Helsingin Seudun Liikenne HSL pyysi VTT:tä selvittämään sähköbussien lataukseen liittyviä riskejä ja arvioimaan sähköbussien paloriskiä liittyen lataukseen. Selvitys toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa kerättiin aineistoa saatavilla olevista lähteistä.</p> <p>Sähköbussipaloista on hyvin vähän tietoa saatavilla, koska paloja ei ole juurikaan tapahtunut. Pantografilataukseen liittyviä palotapahtumia ei tässä selvityksessä löytynyt lainkaan. Raportoiduissa paloissa syynä on ollut aiempi vaurio tai ulkoinen lähde. Selvityksessä ei löytynyt mitään syytä, miksi sähköbussin lataaminen olisi riskialttiimpaa kuin sen normaali käyttö muuten, eikä sähköajoneuvon aiheuttama palokuorma poikkeaa oleellisesti polttomootorikäytöstä.</p>		
<b>Luottamuksellisuus</b>	julkinen	
<b>Espoo 14.4.2020</b> <b>Laatija</b>	<b>Tarkastaja</b>	<b>Hyväksyjä</b>
Samppa Jenu	Mikko Pihlatie	Johannes Hyrynen
<b>VTT:n yhteystiedot</b>		
<b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b> Tilaaaja, VTT		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

## Sisällysluettelo

---

Sisällysluettelo .....	2
1. Johdanto.....	3
2. Tavoite.....	3
3. Menetelmät.....	3
4. Taustaa.....	3
4.1 Litiumioniakut.....	3
4.2 Sähköajoneuvojen lataaminen.....	4
4.2.1. Lataustapa 1 – kevyiden ajoneuvojen lataaminen.....	4
4.2.2. Lataustapa 2 – hidaslataus.....	4
4.2.3. Lataustapa 3 – peruslataus.....	5
4.2.4. Lataustapa 4 – tasasähkölataus.....	5
4.2.5. Sähköbussien lataaminen.....	5
5. Tulokset.....	6
5.1 Sähköajoneuvopalojen yleisimmät syttymissyyt.....	6
5.2 Sähköajoneuvopalon riski latauksen aikana.....	6
5.3 Sähköajoneuvojen akkujärjestelmien turvallisuusvaatimukset.....	7
5.4 Sähköajoneuvopalojen ja polttomoottoriajoneuvopalojen vertailu.....	7
6. Johtopäätökset .....	8
7. Lähdeviitteet .....	8

## 1. Johdanto

---

Helsingin Seudun Liikenne pyysi VTT:tä selvittämään sähköbussien lataukseen liittyviä riskejä ja arvioimaan sähköbussien paloriskiä liittyen lataukseen.

## 2. Tavoite

---

Työn yhtenä tavoitteena oli löytää tutkimus- ja tilastotietoa ladattavien sähköajoneuvojen ja erityisesti ladattavien sähköbussien akkupaloista ja palon syistä. Yhtenä tavoitteena oli myös selvittää perusteita sille, mitä riskejä akkujen käyttöön eri tilanteissa ja erityisesti lataukseen liittyy.

## 3. Menetelmät

---

Selvitys toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa kerättiin aineistoa saatavilla olevista aiheita käsittelevistä tieteellisistä julkaisuista, alan konferenssijulkaisuista, tutkimuslaitosten raporteista sekä olennaisista standardeista.

## 4. Taustaa

---

### 4.1 Litiumioniakut

Valtaosa kaikista ladattavista akuista on nykyään litiumioniakkuja sellaisissa sovelluksissa, joissa syviä lataus-purkusykliä kertyy paljon. Lyijyhappoakkuja käytetään edelleen yleisesti muun muassa polttomoottorien käynnistysakkuina, varavoima-akkuina sekä sähkötrukeissa, pinoamisnostimissa ja vastaavissa laitteissa.

Litiumioniakut voidaan jakaa niiden sisältämien materiaalien mukaan useisiin eri tyypeihin, mutta kaikissa tyypeissä kemiallinen ja fysikaalinen toimintaperiaate on samankaltainen. Kaiken tyyppiset litiumioniakut ovat turvallisia käyttää niiden kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista riippuvien jännite-, virta ja lämpötilarajojen sisällä ja näitä suureita onkin valvottava jatkuvasti. Useista kennoista koostuvissa akustoissa kaikkia kennoja on valvottava ja tätä tehtävää hoitaa tyypillisesti akunhallintajärjestelmä (BMS, Battery Management System).

Litiumioniakkujen turvallisuus huolettaa, koska ne voivat alkaa kuumentua hallitsemattomasti, jos niitä käytetään väärin tai vaurioitetaan mekaanisesti. Kuumentuminen voi johtaa akun syttymiseen ja voimakkaaseen palamiseen, mistä syntyy myrkyllisiä palokaasuja. Akun syttyminen todennäköisesti johtaa myös akun sisältävän laitteen syttymiseen ja palo voi levitä maastoon tai rakennukseen, jonka sisällä tai lähellä laite on.

Kaikille litiumioniakuille yhteisten ominaisuuksien johdosta ei ole turvallisuuden kannalta oleellista, käytetäänkö akku esimerkiksi puhelimessa, kannettavassa tietokoneessa, sähköavusteisessa polkupyörässä, sähköautossa vai sähköbussissa. Oleellista on sen sijaan akun suojapiirin tai BMS:n toiminta ja oikeanlaisen laturin käyttö. Sähköautojen ja -bussien lataus on standardoitu niin, että niiden akku ei voi vahingoittaa käyttämällä vääränlaista laturia.

Litiumioniakkuja on useaa eri tyyppiä riippuen niissä käytetyistä katodi- ja anodimateriaaleista. Yleisimmät katodi- ja anodimateriaalit on listattu taulukossa 1. Käytetyt materiaalit vaikuttavat suuresti litiumioniakun ominaisuuksiin. Vuoden 2020 alussa HSL:n liikenteessä on kolmella erityyppisellä akulla varustettuja sähköbussseja: NMC – grafiitti, NMC – LTO ja LFP – grafiitti.

*Taulukko 1. Litiumioniakkujen yleisimmät materiaalit.*

Katodimateriaaleja	Anodimateriaaleja
LCO (LiCoO <sub>2</sub> )	grafiitti
NCA (LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub> )	grafiitti + lisäaineet
NMC (LiNixCoyMnzO <sub>2</sub> )	litiumtitanaatti, LTO (Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )
LMO (LiMnO <sub>2</sub> )	
LFP (LiFePO <sub>4</sub> )	

Litiumioniakkujen paloturvallisuutta käsiteltäessä keskeinen ilmiö on akkukennossa tietyn lämpötilan ylityttyä käynnistyvä ketjureaktio, jossa eksotermiset reaktiot ruokkivat itseään ja kenno kuumenee hallitsemattomasti (thermal runaway). Akkukennon lämpötilan noustessa reaktiot alkavat vaiheittain: ensin anodilla (noin 90°C), sitten katodilla (noin 140°C) ja lopulta eksotermisen reaktio katodilla kiihtyy (noin 180°C) ja kenno kuumenee hallitsemattomasti, ellei sitä jäähdytetä tehokkaasti (RISE 2019, Välisalo 2019).

Litiumioniakussa käytettävät materiaalit vaikuttavat akun stabiiliuteen ja siten sen käyttöön liittyvään palorisktiin. Mitä stabiilimmat materiaalit, sitä paloturvallisempi akkukemia. Katodimateriaalien stabiilius lämpötilan suhteen (thermal stability) järjestettynä stabiileimmasta epästabiileimpaan on: LFP, LMO, NCM, NCA, LCO (RISE 2019, Doughty et al. 2012). Lisäksi akun stabiiliuteen ja turvallisuuteen vaikuttaa käytössä oleva anodimateriaali: litiumtitanaatti (LTO) on huomattavasti stabiilimpi kuin yleisemmin käytössä oleva grafiitti.

## 4.2 Sähköajoneuvojen lataaminen

Sähköajoneuvojen lataamisessa on käytössä SFS-EN 61851-1 –standardissa kuvatut neljä lataustapaa (Vesa 2017).

### 4.2.1. Lataustapa 1 – kevyiden ajoneuvojen lataaminen

Lataustapa 1 tarkoittaa yksivaiheista vaihtosähkösyöttöä ajoneuville tavallisesta kotitalouspistorasiasta. Tämä lataustapa on tarkoitettu ainoastaan kevyiden ajoneuvojen lataamiseen. Suojalaitteena tässä lataustavassa toimii kotitalouspistorasian vikavirtasuoja.

### 4.2.2. Lataustapa 2 – hidaslataus

Lataustavalla 2 tarkoitetaan vaihtosähkösyöttöä tyyppillisesti tavallisesta kotitalouspistorasiasta yleensä ajoneuvon mukana toimitetulla liitäntäjohdolla, joka sisältää tarvittavat suojalaitteet latauksen turvallisuuden valvontaan. Matalan latausvirran johdosta, joka on tyyppillisesti rajoitettu 8 ampeeriin (SFS-EN 62752), lataustapa 2 ei sovellu suuren ajosuorituksen tarpeisiin, eikä ole soveltuva esimerkiksi sähköbussien käyttöön.

#### 4.2.3. Lataustapa 3 – peruslataus

Lataustapa 3 on sähköajoneuvojen peruslataustapa vaihtosähköllä. Tällöin latausvirta syötetään erillisestä latauslaitteesta, joka sisältää ajoneuvon tunnistus- ja suojalaitteet, ja ohjaa latauslaitteeseen kytketyn kaapelin jännitteiseksi vain ajoneuvon ollessa turvallisesti kytkettynä ja valmiina lataukseen. Lataustehoa rajoittaa ajoneuvon sisäänrakennettu laturi.

#### 4.2.4. Lataustapa 4 – tasasähkölataus

Lataustapa 4 tarkoittaa tasasähkölataamista ajoneuvon ulkopuolisella laturilla, puhutaan myös pikalataamisesta. Tällöin ajoneuvon akku kytkeytyy suoraan laturiin, ja ajoneuvon akunhallintajärjestelmä (BMS) ja laturi kommunikoivat keskenään joko langallisesti tai langattomasti, ja sekä ajoneuvo että laturi valvovat latausta ja latauksen turvallisuutta. Koska laturi on ajoneuvon ulkopuolella, latausteho voi olla selvästi suurempi kuin ajoneuvon sisäisellä laturilla. Henkilöautoissa suurin latausteho ovat tällä hetkellä 350 kW hyvin rajoitetulla ajoneuvovalikoimalla, mutta sähköbussissa 350 kW latausteho on nykyään jo melko tavallinen. Suurin markkinoilla oleva sähköbussien latausteho lataustavalla 4 pikaladattaessa on tällä hetkellä 600 kW. Tasasähkölatausta käytetään sähköbussissa tyypillisesti myös varikkolatauksessa, noin 50 – 100 kW tehoilla.

#### 4.2.5. Sähköbussien lataaminen

Sähköbussia ladataan tyypillisesti kahdella eri tavalla, riippuen ajoneuvon akustosta ja ajettavasta linjasta.

- Varikkolataaminen – bussi ladataan varikolla, silloin kun se ei ole ajossa, tyypillisesti yön aikana. Bussissa on tällöin yleensä suurikokoinen akku, ja latausteho on noin 50 – 100 kW. Lataustapana on hyvin yleisesti lataustapa 4, tosin jotkut valmistajat tarjoavat myös vaihtosähkölatausta (esimerkiksi BYD).
- Pikalataaminen – bussia voidaan ladata varikon lisäksi myös päätepysäkeillä ja terminaaleissa, kun bussi pysähtyy odottamaan seuraavaa lähtöä tai ottamaan matkustajia. Lyhyen latausajan vuoksi lataustehot ovat pikaladattaessa suurempia, yleensä välillä 150 – 450 kW. Lataustapana on tällöin aina lataustapa 4.

## 5. Tulokset

---

Litiumioniakkujen turvallisuus, erityisesti niiden paloturvallisuus käytön ja latauksen aikana, on ajankohtainen aihe, sillä litiumioniakkujen käyttö sähköautoissa ja –busseissa on yleistynyt ja tulee selvästi lisääntymään tulevaisuudessa. Litiumioniakkujen paloturvallisuus on tutkimusalana vielä melko uusi, joten sitä käsitteleviä tutkimuksia löytyy vielä varsin rajallisesti tieteellisestä kirjallisuudesta. Tuoreita tieteellisiä julkaisuja aiheesta kuitenkin löytyy, joista keskeisimpiä ovat Fire Technology -lehdessä julkaistu katsausartikkeli (Sun et al. 2020) ja ruotsalaisen RISE-tutkimuslaitoksen julkaisut (RISE 2020, RISE 2019).

### 5.1 Sähköajoneuvopalojen yleisimmät syttymissyyt

Toistaiseksi kattavia tilastoja sähköautojen ja –bussien paloista ja niiden syttymissyistä ei vielä ole saatavilla. Tiedossa olevia tapauksia on kuitenkin analysoitu ja ne voidaan luokitella viiteen ryhmään (Sun et al. 2020):

- i. Ajoneuvo syttyy pysäköinnin aikana
- ii. Ajoneuvo syttyy latauksen aikana
- iii. Kolarissa tai vastaavassa tilanteessa vahingoittunut akku syttyy heti tai viiveellä
- iv. Ajoneuvon akku syttyy lämpötilarajojen ylittymisen (thermal abuse) seurauksena
- v. Ajoneuvo ja akku syttyvät ulkoisen syyn, kuten muualta leviävän tulipalon tai tuhopolton takia.

Ajoneuvon palo latauksen aikana voi alkaa akusta, mutta syttymissyiksi on yleensä epäilty aiemmin vahingoittunutta akustoa tai viallista auton sisäistä laturia tai muuta sähköjärjestelmää (Sun et al. 2020).

Sähköbussipalojen yleisyydestä ei vielä ole luotettavaa tilastotietoa saatavilla, mutta sähköautopalojen yleisyyttä voidaan arvioida raportoitujen Teslan sähköautopalojen perusteella. Vuoden 2018 lopulla oli raportoitu 21 Teslan paloa tuolloin 300 000 – 350 000 myytyä Teslaa kohti (RISE 2019). Verrattuna polttomootoriautojen palotilastoihin Teslan palon todennäköisyys olisi noin 20 kertaa pienempi kuin polttomootoriautoilla keskimäärin. On kuitenkin huomioitava, että polttomootoriautoilla paloriski kasvaa auton ikääntyessä, kun taas tilastoja on toistaiseksi vain suhteellisen uusista Tesloista. Raportoiduista 21 Teslan palosta 10 tapahtui kolarin seurauksena (RISE 2019). Lisäksi on hyvä huomioida, että sähköbusseissa käytettävistä litiumioniakkukemioista LTO- ja LFP-akkuja pidetään selvästi turvallisempina, ja NMC-akkuja jonkin verran turvallisempina, kuin Tesloissa käytettäviä NCA-akkuja.

### 5.2 Sähköajoneuvopalon riski latauksen aikana

RISE:n tuoreessa sähköautojen latausta parkkihalleissa käsittelevässä raportissa (RISE 2020) todetaan, että tilastotietojen ja kirjallisuuskatsauksen perusteella ei ole löytynyt merkkejä siitä, että sähköautojen lataaminen sisätiloissa lisääisi tulipalon todennäköisyyttä. Tulipaloriskien kannalta olennaista on, että käytettävät latauspisteet ovat standardien ja määräysten mukaisia.

Lataus ja erityisesti pikalataus kuormittavat ajoneuvon akkua, mutta laadukasta BMS-järjestelmää käyttäessä riskit eivät ole suurempia kuin ajon aikana (RISE 2019). Jos ajoneuvon akkua ladataan puutteellisella tai viallisella latauslaitteistolla, on kohonnut paloriski kuitenkin mahdollinen.

Moderneissa litiumioniakkujärjestelmissä on turvamekanismeja useilla eri tasoilla: kennotasolla, akkupaketin komponenteissa sekä akunhallintajärjestelmän ohjelmistossa (Välisalo 2019). Turvamekanismit aktivoituvat poikkeustilanteissa ja siten pienentävät paloriskiä esimerkiksi latauksen aikana.



Arvioitaessa erityisesti sähköbussien lataukseen liittyviä riskejä, tulee huomioida että sähköbussien lataaminen varikolla tai terminaali-alueella on huomattavasti kontrolloidumpi ympäristö verrattuna henkilöautojen lataamiseen. Latauslaitteiden väärinkäytön mahdollisuus on pieni ja latauslaitteiden kunnonvalvonta on tarkempaa kuin yksityiskäytössä.

### 5.3 Sähköajoneuvojen akkujärjestelmien turvallisuusvaatimukset

Kuten kappaleessa 5.2 mainitaan, akunhallintajärjestelmän suojaustoimintojen avulla voidaan estää akkukennojen ylilataus ja ylikuumentuminen, jotka voisivat aiheuttaa paloriskin. Sähköajoneuvojen akkujärjestelmien turvallisuudesta, sisältäen vaatimuksia akunhallintajärjestelmän sisältämille suojaustoiminnoille mm. ylilatauksen ja ylikuumentumisen varalta, säädetään sekä standardissa ISO 6469-1, että Yhdistyneiden Kansakuntien Euroopan talouskomission säännössä numero 100 (UNECE R100 Part II), jota sovelletaan myös sähköbussien tyyppihyväksynnässä.

Standardissa ISO 6469-1 (Electrically propelled road vehicles — Safety specifications — Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS)) määritellään turvallisuusvaatimukset sähköajoneuvojen akkujärjestelmille. Akunhallintajärjestelmän vaaditaan valvovan akun lämpötilaa, ja estävän ylikuumentumisen, ylilataamisen ja ylipurkamisen. Standardi määrittelee myös testausmenetelmät em. suojausten varmentamiseksi.

### 5.4 Sähköajoneuvopalojen ja polttomoottoriajoneuvopalojen vertailu

Kokonaiselle sähköajoneuvolle tehdyt polttokokeet ovat kalliita, joten niitä ei ole vielä kovin laajasti tehty. Saatavilla olevat tutkimustulokset ovat paljastaneet, että sähköajoneuvon palossa vapautuva lämpömäärä on verrattavissa polttomoottoriajoneuvon paloon, mutta myrkyllisiä kaasuja, kuten HF-kaasuja, saattaa sähköajoneuvon palaessa vapautua enemmän (Sun et al. 2020).

Ranskalaisen INERIS-tutkimuslaitoksen toteuttamassa tutkimuksessa (Lecocq 2012) vertailtiin kahden eri valmistajan sähköauton sekä vastaavan kokoisten polttomoottoriautojen käyttäytymistä palotilanteessa. Polttokokeissa täyteen ladattujen sähköautojen ja täydellä dieseltankilla varustettujen polttomoottoriautojen palosta vapautuvat lämpömäärät olivat lähellä toisiaan sekä suurimman hetkellisen lämpömäärän (maximal heat release rate) että kokonaislämpömäärän osalta. Tutkimuksessa havaittiin, että sähköauton palosta ja polttomoottoriauton palosta vapautuvat palokaasut ovat muilta osin samanlaisia, mutta sähköauton palosta vapautui suurempi määrä HF-kaasuja ja toksisia kaasuja (CO, HCl).

Myös toisessa tutkimuksessa, jossa vertailtiin polttokokeissa sähköauton ja polttomoottoriauton käyttäytymistä palotilanteessa, todettiin, että sähköauton palosta ei aiheutunut suurempaa kokonaisvaaraa kuin tavanomaisen polttomoottoriauton palosta (Lam et al. 2016). RISE-tutkimuslaitoksen toteuttamassa tutkimuksessa (Bøe et al. 2018) todettiin, että kova törmäys voi aiheuttaa akkupalon, mutta toisaalta vaikka sähköauto olisi akusta riippumattomista syistä syttynyt ja täysin liekeissä, ei akku välttämättä syty palamaan.

Tutkimuksia kokonaisen sähköbussin polttokokeesta ei kirjallisuusselvityksessä löytynyt, mutta Ruotsissa on tehty polttokoe kokonaiselle hybridibussille (Andersson et al. 2016).



## 6. Johtopäätökset

---

Saatavilla olevien tilastotietojen tai kirjallisuuslähteiden perusteella ei voida sanoa, että sähköautojen tai -bussien lataaminen lisää paloriskiä verrattuna niiden muuhun normaaliin käyttöön, kunhan käytetään asianmukaisia laatureita ja noudatetaan sähköajoneuvojen ja laturien valmistajien määrittämiä ohjeistuksia. Kirjallisuushaussa ei löytynyt tietoja sähköbussien pantografilatauksen aikana syttyneistä paloista.

## 7. Lähdeviitteet

---

- (Andersson et al. 2016) Andersson, P., Brandt, J., & Willstrand, O. (2016). Full scale fire-test of an electric hybrid bus (SP Rapport). <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-28006>
- (Bøe et al. 2018) Bøe, A. S., & Reitan, N. K. (2018). Full Scale Fire Test of Electrical Vehicle. Proceedings from 5th International Conference on Fires in Vehicles-FIVE (s. 71-82).
- (Doughty et al. 2012) Doughty, D. H. (2012). Vehicle battery safety roadmap guidance (No. NREL/SR-5400-54404). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- (Lam et al. 2016) Lam, C., MacNeil, D., Kroker, R., & Loughheed, G. (2016). Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. Proceedings from 4th International Conference on Fires in Vehicles-FIVE (s. 95-106).
- (Lecocq et al. 2012) Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., & Marlair, G. (2012). Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle.
- (RISE 2020) Brandt, A. W., & Glansberg, K. (2020). Charging of electric cars in parking garages (RISE Rapport). <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-44686>
- (RISE 2019) Bisschop, R., Willstrand, O., Amon, F., & Rosenggren, M. (2019). Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles (RISE Rapport). <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-38873>
- (Sun et al. 2020) Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. Fire technology, 1-50.
- (Vesa 2017) Vesa Juha, Sähköajoneuvojen latausjärjestelmien standardointi, [https://www.sesko.fi/files/846/Sahkoajoneuvojen\\_latausjarjestelmien\\_standardointi\\_yl\\_einen.pdf](https://www.sesko.fi/files/846/Sahkoajoneuvojen_latausjarjestelmien_standardointi_yl_einen.pdf)
- (Välisalo 2019) Välisalo, T. (2019). Firefighting in case of Li-Ion battery fire in underground conditions: Literature study. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report, No. VTT-R-00066-19. <https://cris.vtt.fi/en/publications/firefighting-in-case-of-li-ion-battery-fire-in-underground-condit>