



Eemi Laurell

Täyssähköautojen ajoakkujen kestoikä tutkimus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

5.11.2021

Tiivistelmä

Tekijä: Eemi Laurell
Otsikko: Täyssähköautojen ajoakkujen kestoikä tutkimus
Sivumäärä: 21 sivua + 1 liite
Aika: 5.11.2021

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Ajoneuvojen jälkimarkkinointi
Ohjaajat: Tekninen johtaja Jouko Sohlberg, AKL
Lehtori Pasi Kovanen

Insinööriyössä tutkittiin Autoalan Keskusliiton (AKL) toimeksiannosta täyssähköautojen ajoakkujen odotettavissa olevaa kestoikää normaalikäytössä. Akun kuntoa selvitettiin muiden arvojen avulla siinä tapauksessa, ettei SOH-arvoa olisi ilmaistu tarpeeksi selkeästi. Akun ikääntymisen syitä pohdittiin akunhallintajärjestelmän antamia arvoja tutkimalla. Lisäksi selvitettiin kemioiltaan erilaisten akkujen kestoikäeroja.

Työ toteutettiin keräämällä satunnaisesti valittujen käytettyjen autojen itsediagnostiikasta tietoja kahta monimerkkitesteriä käyttäen. Nämä testerit olivat Launch X-431 PRO sekä Bosch-kokonaisuus, joka koostuu DCU 220 -tietokoneesta, KTS 560 -diagnostiikkatyökalusta ja ESI[tronic] 2.0 Online -ohjelmistosta. Näin saatiin kerättyä akunhallintajärjestelmän antama akun kuntoarvio (SOH) ja monia muita arvoja. Työtä varten etsittiin lähinnä pääkaupunkiseudun autoliikkeistä mahdollisimman vanhoja ja paljon ajettuja täyssähköautoja. Tämän lisäksi sähköautoilijoita kutsuttiin suoraan Metropolian autolaboratorioon luettamaan autojensa tietoja tutkimusta varten. Aineistoa haettiin myös internetistä. Teslan osalta oltiin täysin ulkopuolisen tiedon varassa, koska käytössä olleilla laitteilla ei voitu lukea Teslan diagnostiikkaa.

Insinööriyön tuloksena saatiin melko kattavan otoksen perusteella muodostettua arvio täyssähköautojen akkujen kestoikästä ja siihen eniten vaikuttavista seikoista. Testereillä saatiin luettua SOH-arvo monista sellaisista automalleista, joita autoliikkeissä oli. Käytettävissä olleista arvoista oli pääteltävissä akkujen iän olevan selkeimmin niiden kuntoon vaikuttava asia. Toisaalta myös akun kemiallinen rakenne vaikuttaa kestoikään. Kolmesta yleisesti käytetystä akkukemiasta LMO:n havaittiin ikääntyvän nopeimmin, mutta myös Nissan Leafin 30 kWh:n akut saattavat olla alttiita nopealle ikääntymiselle. Aineiston perusteella noin kymmenen vuotta vanha täyssähköauto on voinut menettää noin neljänneksen alkuperäisestä akkukapasiteetistaan. Akun purkaminen aivan tyhjäksi ja lataaminen aivan täyteen ovat ajoneuvon käytön aikana tapahtuvia asioita, jotka vaikuttavat akun kestoikään kielteisesti.

Avainsanat: täyssähköauto, ajoakku, akun kestoikä, litiumakku, akkukemia

Abstract

Author: Eemi Laurell
Title: Lifetime Study of Electric Car Traction Batteries
Number of Pages: 21 pages + 1 appendix
Date: 5 November 2021

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: After Sales Auto Engineering
Instructors: Jouko Sohlberg, Technical Director, AKL
Pasi Kovanen, Senior Lecturer

In this Bachelor's thesis, the lifetime of electric car traction batteries under normal circumstances was studied. The thesis was commissioned by The Finnish Central Organisation for Motor Trades and Repairs (AKL). The members of the organisation were given advice concerning liability for errors which is highly topical at the time of electric vehicle generalisation. In addition to lifetime, reasons behind battery cell aging and differences between battery chemistries were considered.

In this thesis, measured values from the battery management system using two multi-brand testers were collected. These testers were Launch X-431 PRO and a Bosch unit, which is comprised of a DCU 220 computer, a KTS 560 diagnostics tool and the ESI[tronic] 2.0 Online software. The thesis began by visiting used car dealerships mainly in the Helsinki metropolitan area. This was followed by directly inviting electric car drivers to the laboratory of automotive engineering of Metropolia University of Applied Sciences to have diagnostic data read from their vehicles. This in turn was followed by a second visit to the dealerships, and finally, online data was examined. Online data could not be verified; however, the data were very extensive and considered important electric car models.

A reasonable number of electric cars were examined and based on the analysis it was possible to estimate the lifetime of traction batteries and the reasons affecting it. It was found that the age of the battery is the main cause of aging, but the battery chemistry also has an effect. Out of the three most used chemistries LMO seemed to be the most sensitive. However, the 30 kWh batteries of Nissan Leaf may also be prone to aging quickly. It was found that an electric car approximately ten years of age may have lost about one fourth of its battery capacity. Discharging the battery all the way down and charging it fully seems to have a negative effect on battery lifetime.

Keywords: Electric Car, Traction Battery, Battery Lifetime, Lithium-Ion Battery, Battery Chemistry

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Akut	2
2.1	Lataustavat	2
2.2	Kemiat	3
2.2.1	NMC	4
2.2.2	NCA	5
2.2.3	LMO	6
2.3	Kennon ikääntyminen	6
2.4	Akunhallintajärjestelmät	7
3	Tutkimustyö	8
3.1	Tiedon kerääminen	8
3.2	Tiedonkeruun tulokset	12
4	Yhteenveto	18
	Lähteet	20

Liitteet

Liite 1: Tutkimusta varten kerättyjen täyssähköautojen tiedot

Lyhenteet

- BMS: *Battery Management System*. Akunhallintajärjestelmä, joka ohjaa ajoakun toimintaa.
- LMO: Litiumakkukemia, jossa katodi koostuu litium-mangaanioksidista.
- NCA: Litiumakkukemia, jossa katodi koostuu litium-nikkeli-koboltti-aluminioksidista.
- NMC: Litiumakkukemia, jossa katodi koostuu litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidista.
- SEI: *Solid Electrolyte Interphase*. Kerros, joka muodostuu anodin pinnalle, kun akku ladataan ensimmäisen kerran.
- SOC: *State of Charge*. Akunhallintajärjestelmän arvio akun varaustilasta.
- SOH: *State of Health*. Akunhallintajärjestelmän arvio akun kunnosta.

1 Johdanto

Insinööriyön toimeksiantaja oli Autoalan Keskusliitto. Ajatus työn taustalla oli parantaa yleistä käsitystä normaalikäytössä olevien täyssähköautojen ajoakkujen kestoiästä.

Insinööriyön tavoitteena oli selvittää täyssähköautojen ajoakkujen odotettavissa olevaa kestoikää keräämällä tietoja testerillä diagnostiikkaliitännän kautta. Ajoakun kunnosta kertoo akunhallintajärjestelmän antama laskennallinen SOH-arvo (state of health), joka ilmaistaan prosentteina. Akunhallintajärjestelmän arviota akun kunnosta ei kuitenkaan aina ilmaista niin, että pelkästään sen perusteella voisi muodostaa riittävän tarkkaa kuvaa akun todellisesta kunnosta. Työssä selvitettiin, mitä muita arvoja voidaan käyttää akun kunnan arvioimiseen. Lisäksi tavoitteena oli tutkia muun muassa lataustavan ja -olosuhteiden vaikutusta akkujen kestoikään. Työssä pohditaan myös kemioiltaan erilaisten ajoakkujen kestoikäeroja.

Työssä tehtiin tilastollinen otos useita vuosia käytössä olleista täyssähköautoista. Tämän perusteella voitiin päätellä akun kunnan kehittymistä auton iän, ajomäärän ja akun lataus-purkusyklien funktiona. Näin kyettiin muodostamaan ennuste ajoakkujen odotettavissa olevasta kestoiästä. Lopputuloksena on saada suuntaa antavaa tietoa täyssähköauton ostoa harkitseville tai myynnin ja huollon parissa työskenteleville. Työssä kerättiin tietoja seuraavista automalleista: BMW i3, Nissan Leaf ja e-NV200, Jaguar I-Pace, Hyundai Ioniq Electric ja Kona Electric, Volkswagen e-Golf ja e-up! sekä Tesla Model S ja Model X.

2 Akut

2.1 Lataustavat

Sähköautoja voidaan ladata neljällä standardoidulla lataustavalla. Lataustavoissa 1–3 auton sisäiselle laturille syötetään vaihtovirtaa, kun taas lataustavassa 4 ulkoinen latauslaite syöttää auton akustoon suoraan tasavirtaa.

Lataustavan 1 käyttö voidaan käytännössä rajata kevyiden sähköajoneuvojen lataukseen enintään 16 ampeerin vaihtovirralla. Tavallisesta maadoitetusta kotitalouspistorasiasta eli sukopistorasiasta suositellaan kuitenkin lataamaan enintään kahdeksan ampeerin virralla.

Lataustapa 2 eroaa edellisestä latausjohdon suojalaitekoteloon sisäänrakennettujen latauksen ohjaustoimintojen ja vikavirtasuojan osalta. Pistorasiarakenteen enimmäisvirtasuositus on sama kahdeksan ampeeria. Liitäntä sähköverkkoon lataustavoissa 1 ja 2 tapahtuu kytketyillä standardin mukaisiin vaihtovirtapistorasioihin.

Lataustapa 3 on kiinteään vaihtovirtaverkkoon kytketystä syöttöjärjestelmästä ajoneuvon latauslaitteeseen erityisellä latausjohdolla kytkettävä, ohjaustoiminoilla varustettu latausjärjestelmä. Tämä on sähköautojen suositeltavin lataustapa, ja tyypillisesti käytössä esimerkiksi kauppakeskusten pysäköintitiloissa ja yhä yleisemmin myös yksityiskäytössä kotilatausasemana.

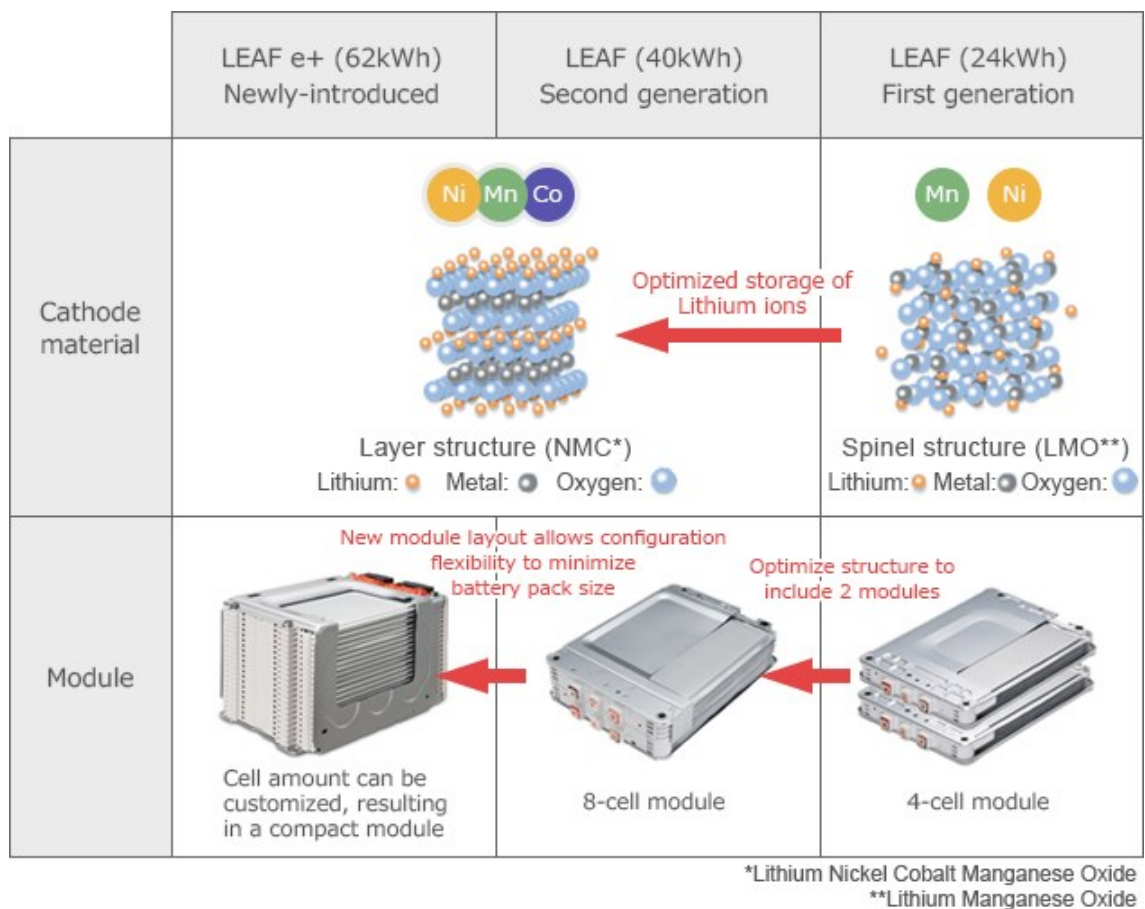
Lataustapa 4 eroaa edellisistä, sillä se syöttää ajoneuvon tasavirtaa ajoneuvon ulkopuolisesta latausasemasta mahdollistaen suuremman lataustehon. Näitä teholatausasemia hyödynnetään erityisesti pitkän matkan ajossa toimintamatkan jatkamiseksi ajotauon aikana esimerkiksi huoltoasemilla.

Tasavirralla latausteho voi olla yli 150 kilowattia, joten lataustapaa 4 kutsutaan usein pikalataukseksi. On tosin olemassa myös pienitehoisia 20 kilowatin tasavirtalatureita. Hidaslataus-termillä voidaan perustellusti viitata ainoastaan sähköauton lataamiseen tavallisesta maadoitetusta kotitalouspistorasiasta eli

sukupistorasiasta. 2010-luvun alussa pikalatausta oli lataaminen tasavirralla 50 kilowatin teholla. 2020-luvulla joidenkin sähköautojen akkujen kapasiteetti on niin suuri, että maksimilatausteho voi olla jopa 270 kilowattia. (Sähköautosa-nasto 2021.)

2.2 Kemat

Litiumakut eroavat toisistaan kemialliselta rakenteeltaan. Eri kemat nimetään pääsääntöisesti katodin koostumuksen mukaan. (Zubi ym. 2018: 295.) Insinöö- rityössä tarkastelun kohteena olleissa automalleissa käytettyjä akkukemioita ovat litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC), litium-nikkeli-koboltti-alumiini- oksidi (NCA) ja litium-mangaanioksidi (LMO), joista NCA on käytössä ainoas- taan Teslassa ja LMO Nissanin alkuperäisessä 24 kWh:n akussa (Electric vehi- cle lithium-ion battery). Kuva 1 havainnollistaa Nissan Leafien akkuja.

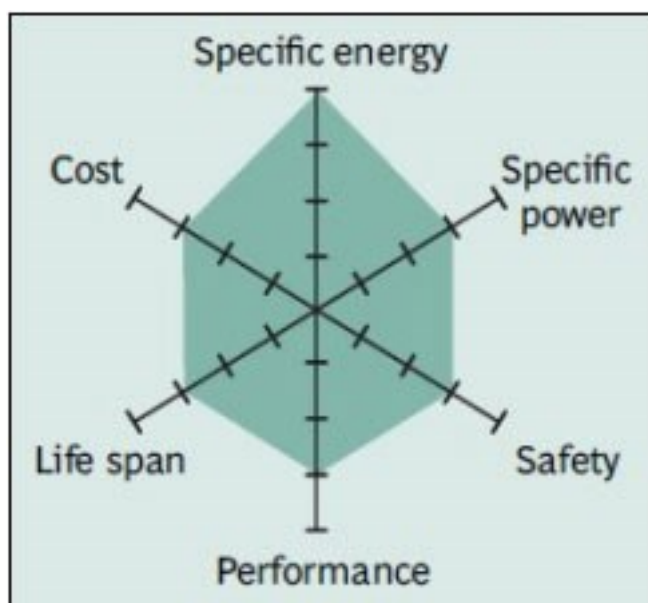


Kuva 1. Nissan Leafien akut (Electric vehicle lithium-ion battery).

Ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tullut litiumakkukemia oli litium-kobolttiok-
sidi (LCO), joka ei ole saanut kannatusta autoteollisuudessa. LMO-akuissa on
LCO:ta parempi syklikestävyys, minkä lisäksi ne ovat turvallisempia. Kuitenkin
myöhemmin tulleissa NCA- ja NMC-kemioissa on LMO:ta parempi energiati-
heys. NMC:n energiatiheys on matalampi kuin NCA:ssa, mutta syklikestävyys
puolestaan parempi. (Zubi ym. 2018: 296–300.)

2.2.1 NMC

Kuva 2 havainnollistaa NMC-kemiaa. NMC on tasainen suoriutuja ja on täten
suosituimpia litiumakkukemioita. Aktiivisten aineiden nikkelin, mangaanin ja ko-
boltin sekoitussuhdetta voidaan muunnella erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltu-
vien akkujen tuottamiseksi. NMC:ssä tärkeää on nikkelin ja mangaanin yhdis-
telmä, jolla saadaan kummankin hyviä puolia käyttöön: nikkeliillä on korkea omi-
naisenergia, mutta se on epävakaa; mangaani puolestaan muodostaa spinelli-
rakenteen, jolla on matala sisäinen resistanssi, mutta myös matala ominais-
energia. NMC:tä käytetään myös LMO-akuissa parantamaan ominaisenergiaa
ja syklikestoa.



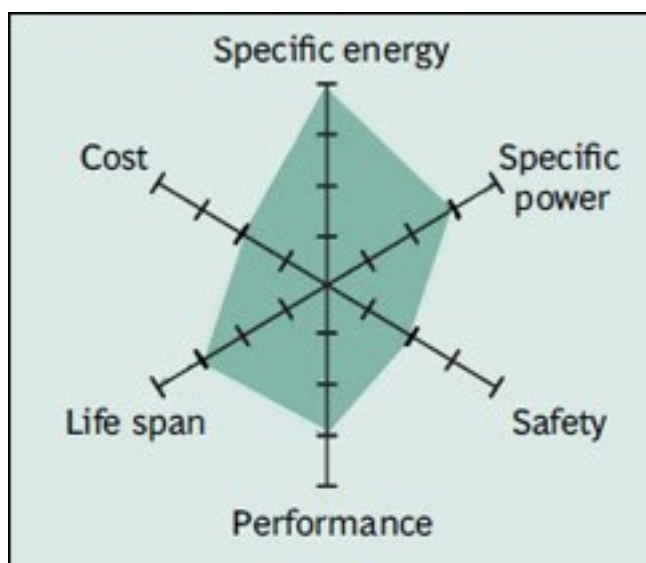
Kuva 2. NMC:n ominaisuudet (BU-205: Types of Lithium-ion 2019).

Katodin koostumuksessa on esimerkiksi kolmannes kutakin metallia: nikkeliä, mangaania ja kobolttia. Koboltin korkean hinnan vuoksi kuitenkin nikkelin osuutta katodeissa nostetaan koboltin kustannuksella. Nikkelikennoilla on kobolttikennoja korkeampi energiatiheys ja parempi syklikesto, mutta niiden jännite on hieman alhaisempi. (BU-205: Types of Lithium-ion 2019.)

Nykyisin tuotannossa on NMC811-kemia, joka tarkoittaa, että koboltin osuus katodista on 10 %. Yksi akkukemia ei yksinään pysty tänä päivänä täyttämään kaikkien eri sovellusten vaatimuksia, joten nykyiset koboltittomat kemiat (esim. LMO ja litiumrautafosfaatti eli LFP) eivät voi suoraan korvata kaikkia kobolttia sisältäviä kemioita. Koboltin kysyntä tulee kasvamaan tulevaisuudessa silti kasvamaan sen osuuden pienenemisestä huolimatta, ja tuotantomäärät kasvavat voimakkaasti. Koboltin osalta onkin syytä panostaa kestäviin hankintaketjuihin. (Paakinen 2020.)

2.2.2 NCA

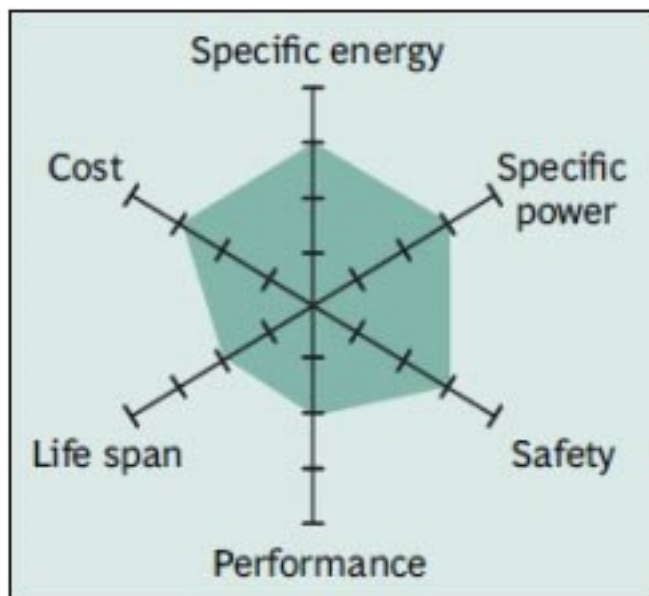
Kuva 3 havainnollistaa NCA-kemiaa. NCA muistuttaa ominaisuuksiltaan NMC:tä, joskaan sen turvallisuus ei ole aivan samaa luokkaa. Ominaisenergialtaan NCA on kuitenkin ylivoimainen.



Kuva 3. NCA:n ominaisuudet (BU-205: Types of Lithium-ion 2019).

2.2.3 LMO

Kuva 4 havainnollistaa LMO-kemiaa. Puhtaasti LMO:hon pohjaavia akkuja ei tosin enää juuri käytetä.



Kuva 4. LMO:n ominaisuudet (BU-205: Types of Lithium-ion 2019).

LMO:n spinellirakenne parantaa ionien liikkumista katodilla, mikä johtaa matalampaan sisäiseen resistanssiin. Tämän lisäksi spinelli on termisesti vakaa. (BU-205: Types of Lithium-ion 2019.)

2.3 Kennon ikääntyminen

Ikääntymiseen vaikuttavat reaktiot tapahtuvat suurimmaksi osaksi anodilla, katodilla ja elektrolyytissä. Ikääntymiseen vaikuttavat merkittävimmin SEI-kerros (solid electrolyte interphase) elektrodin ja elektrolyytin rajapinnassa, metallisen litiumin kerrostuminen, elektrodin rakenteen tuhoutuminen, elektrodin materiaalin faasimuutokset, aktiivisen materiaalin liukeneminen ja elektrolyytin hajoaminen. (Xiong ym. 2020: 2–3.)

SEI-kerros muodostuu anodille, kun akku ladataan ensimmäisen kerran, ja sen paksuus voi muuttua ajan kuluessa. SEI-kerros vaikuttaa kapasiteetin laskuun aktiivisen litiumin häviön myötä. SEI-kerroksen koostumukseen ja vakauteen vaikuttavat elektrolyytin ja elektrodin koostumus sekä ulkoiset tekijät kuten virta ja lämpötila. SEI-kerroksen paksuuntuminen on merkittävä ikääntymistekijä yli 25 °C:n lämpötilassa. Alle 25 °C:ssa puolestaan metallisen litiumin kerrostuminen aiheuttaa ongelmia, kun akkua ladataan suurella virralla. Metallisen litiumin kerrostumisen aiheuttamien turvallisuushaittojen vuoksi akunhallintajärjestelmän on ehdottomasti estettävä myös akun ylilataus. (Xiong ym. 2020: 3–5.)

Lämpötilan ohella merkittäväksi akun kemiallista rakennetta kuluttavaksi tekijäksi on osoittautunut akun syväpurkaus. Akun valmistajan antamien lämpötila- ja virtarajojen sisällä täysiä 100 %:n syklejä läpikäyneet kennot kestivät Eckerin ym. (2013: 845) tutkimuksessa 440 sykliä ennen kuin niiden kapasiteetti oli laskenut 80 %:iin alkuperäisestä. Hyvin kapealla välillä ladatut kennot kestivät jopa 8 500 täyttä sykliä.

2.4 Akunhallintajärjestelmät

Täyssähköauton ajoakun toimintaa ohjataan sisäisesti akunhallintajärjestelmän (battery management system, BMS) avulla. BMS:n tarkoitus on huolehtia akusta valvomalla kennojen jännitettä ja lämpötilaa sekä lataus- ja purkuvirran suuruutta. Mitattujen arvojen perusteella BMS kykenee laskemaan tai arvioimaan käyttäjän kannalta merkityksellisiä asioita kuten ajoakun varaustilaa (state of charge, SOC) ja kuntoa (SOH). Juuri nämä kaksi olivat työn kannalta keskeisiä.

Litiumakun varaustila määritetään epäsuorasti arvioimalla. Akun kuntoa puolestaan arvioidaan esimerkiksi lasketun todellisen kapasiteetin ja kennoresistanssin avulla.

Eri autonvalmistajien käyttämien BMS:ien yksityiskohtaisista toimintatavoista ei juuri ole saatavilla tietoja, mutta pääpiirteittäin kaikilla on kuitenkin tavoitteena

varmistaa akuston ihanteellinen lataus kulloinkin käytettävissä olevaa lataustekniikkaa hyödyntäen. BMS suojaaa akustoa syväpurkaukselta ja yllilataukselta ja varmistaa samalla akuston hyötysuhteen säilymisen riittävällä tasolla.

BMS antaa auton diagnostiikkajärjestelmään tiedon akun kunnosta. Joissakin tapauksissa auton käyttäjä pääsee tähän käsiksi tietoviihdejärjestelmän kautta. Usein tiedon näkemiseen kuitenkin vaaditaan diagnostiikkalaite. On myös mahdollista, että tietoon pääsee käsiksi ainoastaan valmistajakohtaisella testerillä huollossa.

Koska BMS hallinnoi akustoa myös vertailemalla eri kennojen arvoja, on vikatilanteessa mahdollista vaihtaa yksittäisiä vioittuneita kennoja ja näin jatkaa akuston osalta auton elinkaarta. Itse tutkittujen autojen osalta ei tullut tietoon mahdollisia akustoihin kohdistuneita korjaustoimenpiteitä eikä myöskään ilmennyt korjaustoimenpiteiden tarvetta. (Andrea 2010.)

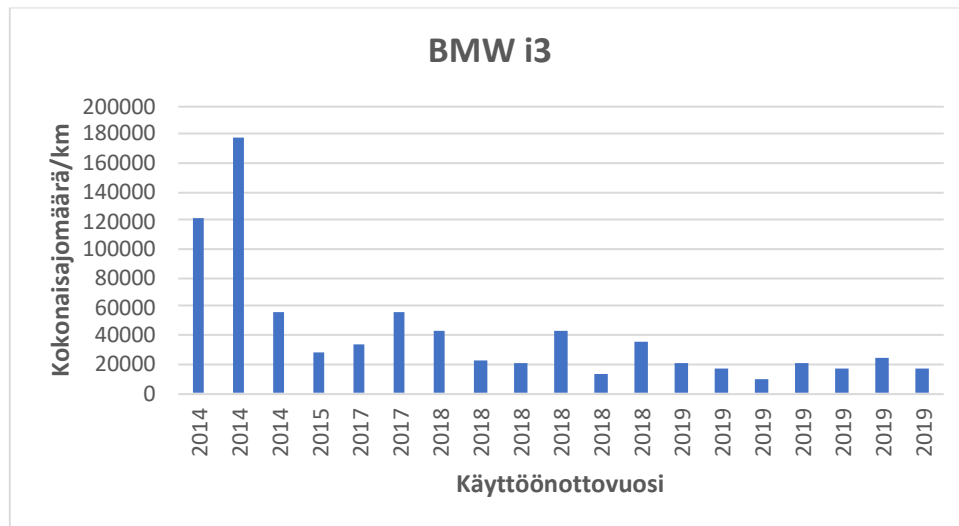
3 Tutkimustyö

3.1 Tiedon kerääminen

Insinööriyötä varten kerättiin tietoja käytetyistä täyssähköautoista käyttäen kahta monimerkkitesteriä, Launch X-431 PRO:ta sekä Bosch-kokonaisuutta, joka koostuu DCU 220 -tietokoneesta, KTS 560 -diagnostiikkatyökalusta ja ESI[tronic] 2.0 Online -ohjelmistosta. Ensisijaisena pidettiin SOH-arvoa, mutta myös muita arvoja kirjattiin ylös. Itse kerättyä tietoa kertyi noin viidestäkymmenestä autosta, jotka edustivat vaihtelevissa määrin kahdeksaa automerkkiä.

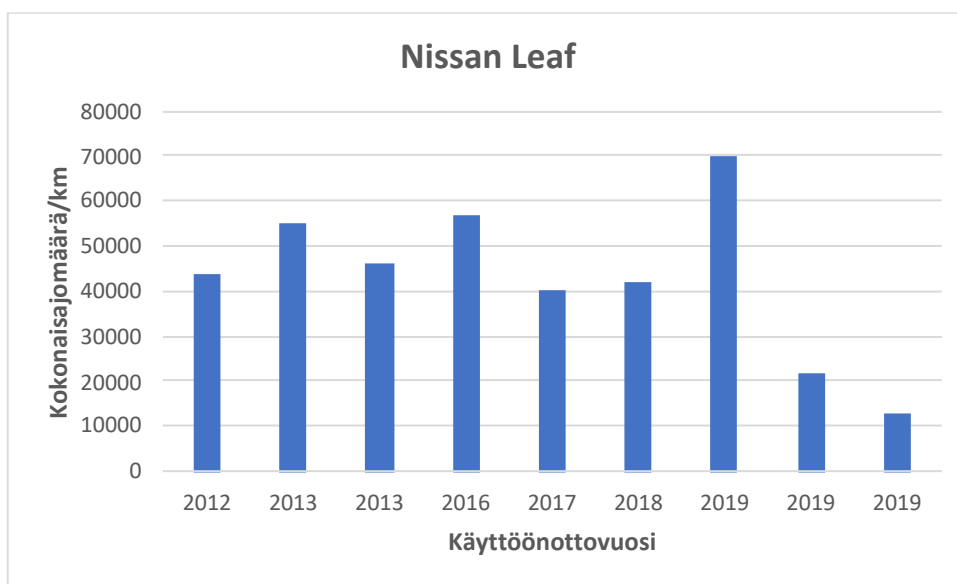
Tutkimukseen valittiin mahdollisimman vanhat ja paljon ajetut täyssähköautot. Useimmissa tapauksissa autot etsittiin internetistä autoliikkeiden vaihtoautohaun kautta. Ennen paikan päälle menoa oltiin yleensä vielä puhelimitse yhteydessä kulloinkin kyseessä olleeseen liikkeeseen. Yhtä lukuun ottamatta kaikki autoliikkeet sijaittivat pääkaupunkiseudulla.

Tutkituin automalli oli BMW i3, joita oli noin kolmannes kaikista autoista. Kyseisestä mallista kyettiin lisäksi lukemaan paljon tietoja molemmilla käytössä olleilla testereillä. BMW i3:n ajokilometrimäärät jakoutuivat 9 000 ja 178 000 välille ollen keskimäärin noin 41 000. Käyttöönottovuodet jakoutuivat välille 2014–2019. Kuvassa 5 on kaavio BMW i3:n ajomäärien suhteesta käyttöönottovuosiin.



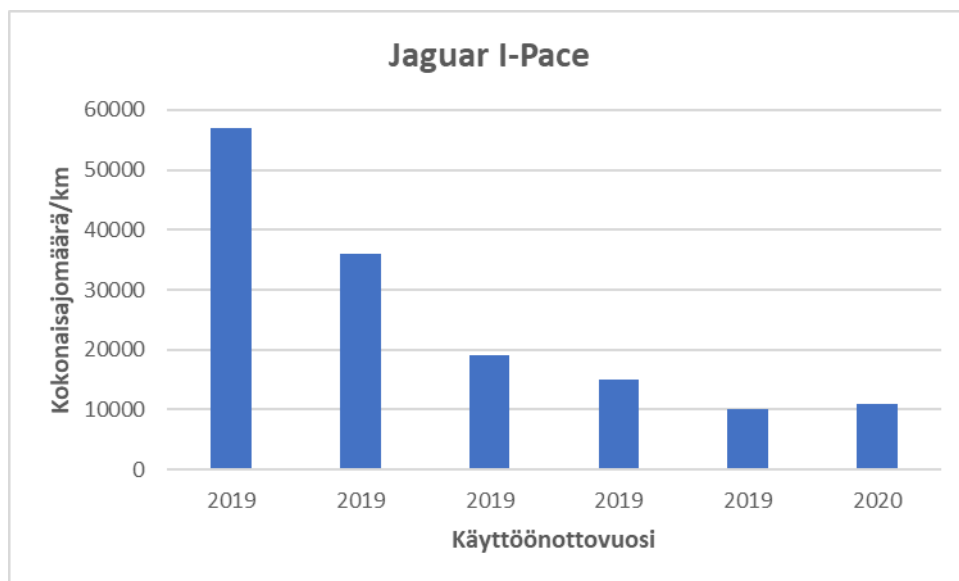
Kuva 5. BMW i3:n ajomäärät käyttöönottovuosittain.

Toiseksi eniten oli Nissan Leafejä, joiden ajokilometrimäärät olivat välillä 13 000 ja 70 000 ja keskimäärin noin 43 200. Käyttöönottovuodet jakoutuivat välille 2012–2019. Kuvassa 6 on kaavio Nissan Leafien ajomäärien suhteesta käyttöönottovuosiin.



Kuva 6. Nissan Leafien ajomäärät käyttöönottovuosittain.

Kolmantena mittaustulosten saatavuuden kannalta merkittävänä mainittakoon Jaguar I-Pace, josta käytettävissä olleilla testereillä saatiin selkeitä vertailuarvoja toisin kuin loppuista mitatuista autoista. Huomioitavaa tosin on, että kyseiset autot oli otettu käyttöön vuosina 2019 ja 2020. Ajokilometrimäärät olivat kuitenkin välillä 10 000 ja 57 000 ollen keskimäärin noin 24 700 ja siten hyvinkin vertailukelpoisia Leafien arvojen kanssa. Muista tutkituista malleista ei ole tarpeen mainita yksittäisiä tuloksia, mutta ne on huomioitu saatujen arvojen osalta arvioinnissa. Kuvassa 7 on kaavio Jaguar I-Pace:ien ajomäärien suhteesta käyttöönottovuosiin.



Kuva 7. Jaguar I-Pace:ien ajomäärät käyttöönottovuosittain.

SOH-arvo saatiin luettua BMW:n lisäksi muun muassa Nissan Leafistä ja Hyundaiain malleista, mutta ei esimerkiksi Volkswagenin malleista. Mielenkiintoista oli, että kaikista Nissaneista SOH-arvoa ei saatu luettua. Lisäksi kaikki Hyundaiain iästä ja ajomäärästä riippumatta antoivat SOH-arvoksi täydet sata prosenttia, kuten myös yksi tutkittu Kia e-Niro valmistajakohtaisella testerillä. Jaguar I-Pace puolestaan ilmoitti SOH-arvon erikseen sekä kapasiteetin että tehon osalta.

Itse kerätyn aineiston lisäksi tarkasteltiin autonomistajien keräämää sekä internetistä haettua aineistoa. Ulkopuolisten keräämät aineistot päätettiin sisällyttää tutkimukseen niiden merkittävän laajuuden vuoksi huolimatta siitä, että tietoja ei voitu todentaa. Lisäksi niissä käsiteltiin tutkimuksen kannalta hyvin merkittäviä automalleja.

Tutkimuksen alussa käytettyjä täyssähköautoja etsittiin autoliikkeiden vaihtoautohalleista pääkaupunkiseudulla. Näin saatiin kahdeksasta liikkeestä yhteensä 30 auton tiedot. Seuraavaksi otettiin internetin kautta yhteyttä sähköautoilijoihin, joita pyydettiin käymään Metropolian autolaboratoriolla autojen tietojen luke- mista varten. Tätä kautta saatiin kuuden auton tiedot. Sen jälkeen otosta vielä täydennettiin tekemällä uusi kierros vaihtoautohalleissa, minkä tuloksena saatiin

13 auton tiedot. Lopuksi tutustuttiin kansainvälisiin aineistoihin internetissä sekä suomalaisten Nissan-kuljettajien itse keräämään aineistoon.

Nissan-kuljettajien kokemukset saatiin Facebook-ryhmästä, johon oli keväällä 2021 kerätty noin kolmenkymmenen auton tiedot. Joukossa oli eri-ikäisiä autoja, joiden ajomäärät vaihtelivat. Otos sisälsi LMO- ja NMC-akuilla varustettuja Leafejä ja e-NV200:ia. Lisäksi Nissanin 24 ja 30 kWh:n akkujen kestoikäeroja pohdittiin Myallin ym. (2018) tutkimuksessa, jonka otos koostui lähes kolmestasadasta Leafistä.

Käytössä olleilla laitteilla ei voitu lukea Teslan diagnostiikkaa, mutta Teslan NCA-akkujen ikääntymisestä saatiin osviittaa niin ikään ulkomaisesta tutkimuksesta. Aineisto sisälsi satojen Tesla Model S- ja Model X -mallien akkujen kuntotietoa autoista ympäri maailmaa. (Lambert 2016; Lambert 2018.)

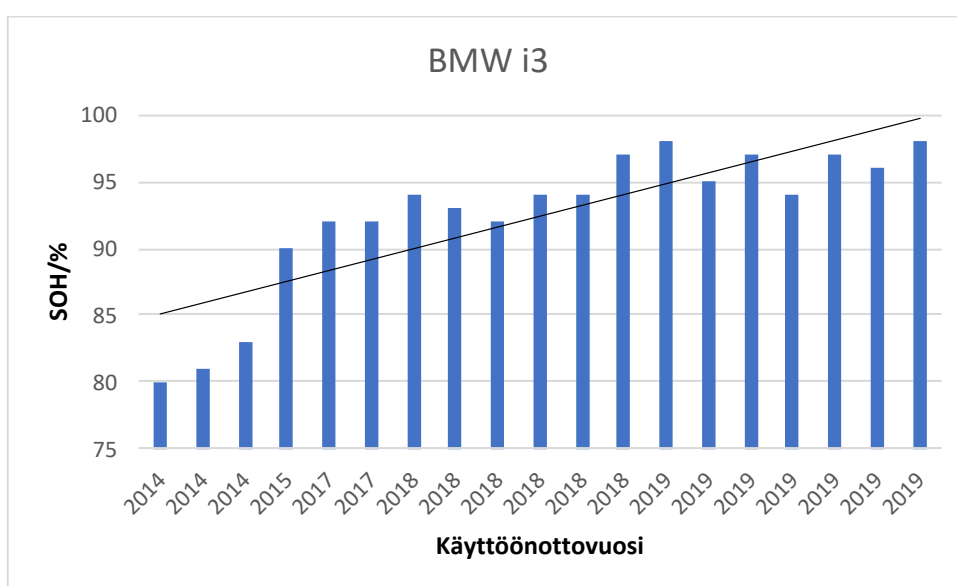
3.2 Tiedonkeruun tulokset

Ajoneuvojen käytön mittarina käytetään ensisijaisesti matkamittarin kilometrilukeman osoittamaa ajomäärää, joka ei kuitenkaan yksilöllisistä käyttöolosuhteista johtuen suoraan kerro tosiasiallista kulumisvaikutusta eri rakenteiden osiin. Täyssähköautojen kohdalla vertailuarvoissa merkitykselliseksi muodostuu ajomäärään oleellisesti liittyvien latauskertojen määrä eriteltynä erilaisilla lataustavoilla. Tutkittujen autojen aineistosta saatiin rajoitetusti tietoa latauskertojen määristä. Tiedonkeruun aineisto on käyttöönottovuosien mukaan ryhmiteltyinä taulukkoina liitteessä 1.

Tutkituilla autoilla oli matkamittaritietojen mukaan ajettu 9 000–178 000 kilometriä. Näillä ajomäärillä ei ollut merkittäviä muutoksia akkujen kuntoa ilmaisevissa arvoissa. Esimerkiksi vanhimmissa Nissan Leafeissä SOH-arvo oli 70 prosentin suuruusluokkaa, kun taas uudemmissa se saattoi olla lähes sata, vaikka ajomäärä olisikin ollut suurempi. Lisäksi kolmessa saman vuosimallin BMW i3:ssa oli lähes identtiset SOH-arvot, vaikka yhdessä kilometrit olivat kolminkertaiset toiseen verrattuna.

Tutkimustulosten vertailuarvoista ei kyetty vetämään johtopäätöksiä käyttöolosuhteista, kuten akkujen latausten kestoista tai ulkolämpötiloista. Pikalatausten määrä oli kuitenkin selvitetävissä Jaguareissa ja Nissaneissa. Kaikissa Jaguareissa pikalatauslaskuri näytti tosin nolaa. Pikalatausmäärillä ei havaittu olevan vaikutusta kyseisten autojen akkujen kuntoa ilmaisevissa arvoissa. Esimerkiksi eräässä toisen sukupolven Nissan Leafissä oli moninkertainen määrä pikalatauksia toiseen yksilöön verrattuna, mutta SOH-arvo oli molemmissa autoissa käytännössä sama.

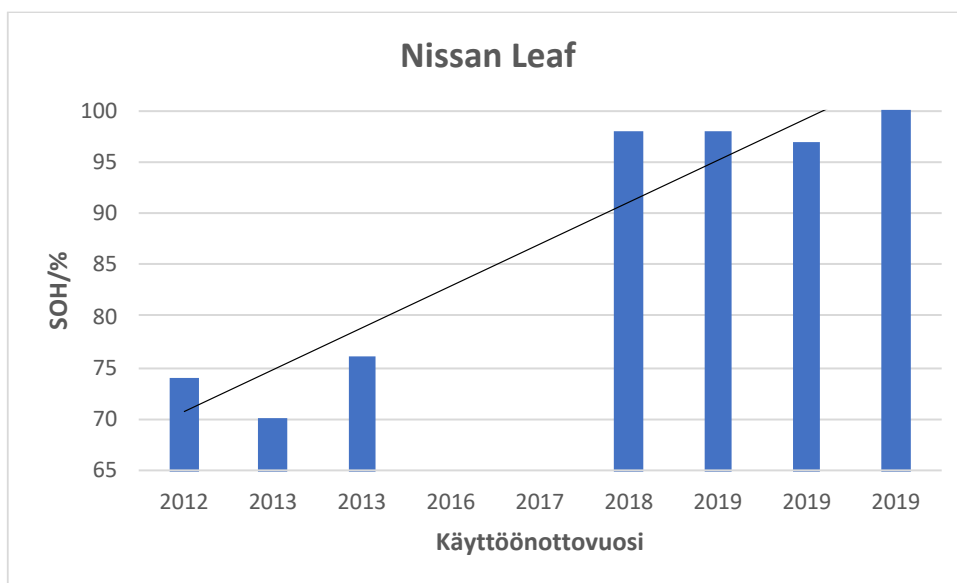
Tutkittujen autojen käyttöönottovuosista tehdyn määrittelyn perusteella oli ero vanhimman ja uusimman akuston välillä kahdeksan vuotta. Kyseisen ikäkauman sisällä oli selkeimmin havaittavissa erot akkujen kuntoa ilmaisevissa arvoissa. Kuvassa 8 on kaavio tutkituimman automallin, BMW i3:n SOH-arvojen suhteesta käyttöönottovuosiin.



Kuva 8. BMW i3:n SOH-arvot käyttöönottovuosittain.

Kuvassa 9 on kaavio Nissan Leafien SOH-arvojen suhteesta käyttöönottovuosiin. 30 kWh:n NMC-akuilla varustetuista vuosien 2016 ja 2017 malleista ei saatu käytössä olleilla testereillä SOH-arvoja luettua, mutta kyseisten autojen mittaristoissa oli kuitenkin nähtävissä akkujen kuntoa osoittavat palkistot.

Vuoden 2016 autosta oli yksi palkki sammunut, mikä tarkoittaa, että sen SOH-arvo oli korkeintaan noin 80 %.



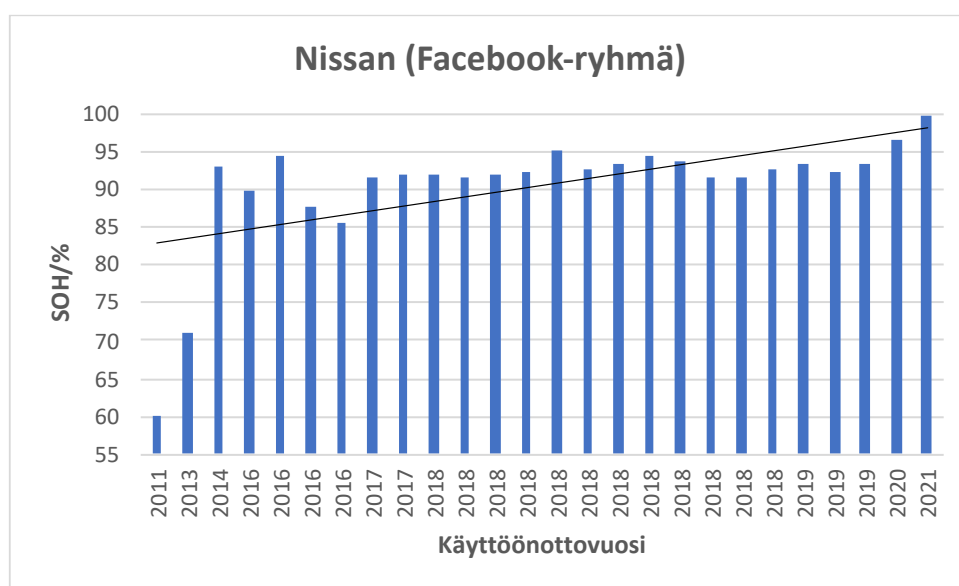
Kuva 9. Nissan Leafien SOH-arvot käyttöönottovuosittain.

LMO-akuilla varustetuissa Leafeissä havaittiin olevan kaikkein heikoimmassa kunnossa olevat akut, mutta nämä autot olivat myös vanhimpia. Akkujen kuntoa osoittavien palkistojen mukaan 30 kWh:n NMC-akuilla varustettujen autojen SOH-arvot eivät välttämättä ole paljon parempia. Ulkomaisessa tutkimuksessa todettiin Leafin 30 kWh:n akkujen ikääntyvän 24 kWh:n akkuja nopeammin. Yhdeksi syyksi epäiltiin sitä, että 30 kWh:n akut ovat pidemmän aikaa korkeammissa lämpötiloissa muun muassa suuremman mahdollisen pikalatausvirran myötä. Lisäksi 30 kWh:n akuilla varustetuissa Leafeissä ei ole mahdollista asettaa automaattista latauksen keskeytystä 80 prosentin varaustilaan, joten akut ovat myös pidemmän aikaa korkeammissa varaustiloissa. (Myall ym. 2018: 8–9.)

Tutkimuksessa epäillään 30 kWh:n akkujen NMC-kemian olevan mahdollisesti herkempi korkean lämpötilan aiheuttamalle ikääntymiselle. Jos näiden akkujen lämpötila nousee enemmän latauksen aikana, se voisi aiheuttaa niiden

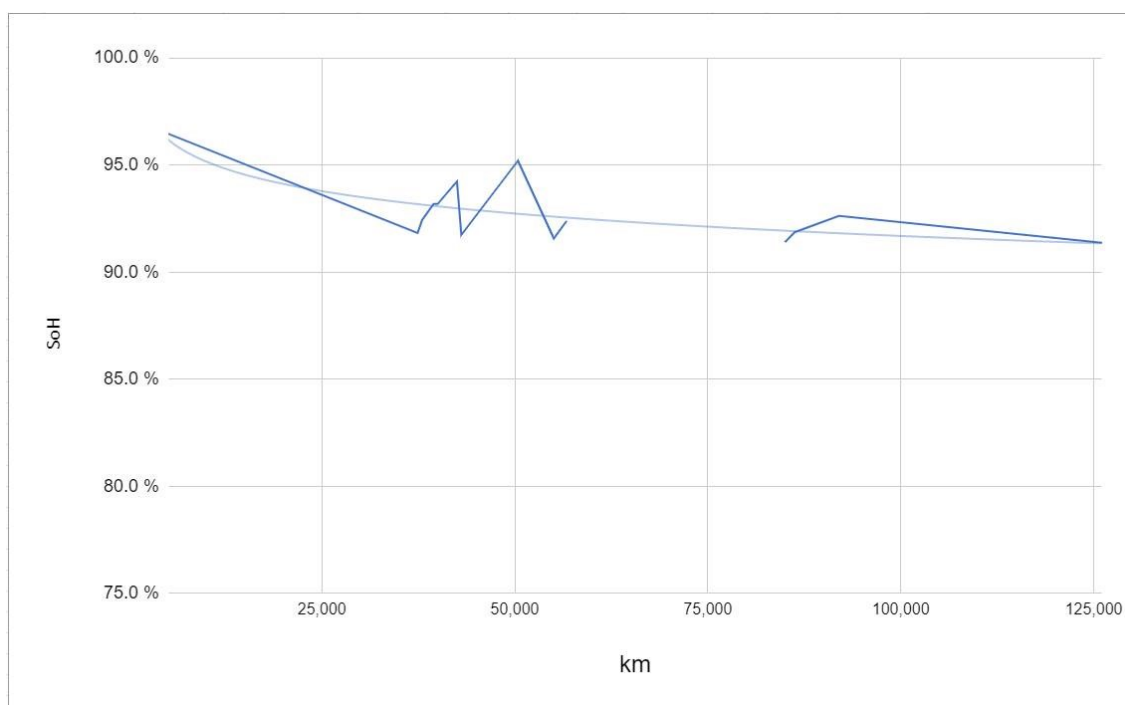
nopeampaa ikääntymistä, sillä akkujen lämmönhallinta ei ole Leafeissä yhtä edistyksellistä kuin monien muiden valmistajien autoissa. (Myall ym. 2018: 10.)

Kuvassa 10 on kaavio Facebook-ryhmän Nissanien SOH-arvoista suhteessa käyttöönottovuosiin, josta on nähtävissä samansuuntainen tulos kuin itse tehdyssä tutkimuksessa. Tässä kuitenkin 30 kWh:n NMC-akuilla varustetuissa Leafeissä vaikuttaa olevan hyväkuntoiset akut. Vuonna 2016 käyttöönotetuissa heikoimmalla, noin 85 prosentin SOH-arvolla oleva auto on e-NV200 24 kWh:n LMO-akulla. Muut saman ikäiset ovat Leafejä 30 kWh:n NMC-akulla. Huomionarvoinen on myös vuonna 2014 käyttöönotettu Leaf 24 kWh:n LMO-akulla, jonka SOH-arvo 93 prosenttia 93 000 kilometriä ajatussa autossa herättää epäilyksen kirjausvirheestä tai mahdollisesta akkuun kohdistuneesta korjaustoimenpiteestä.



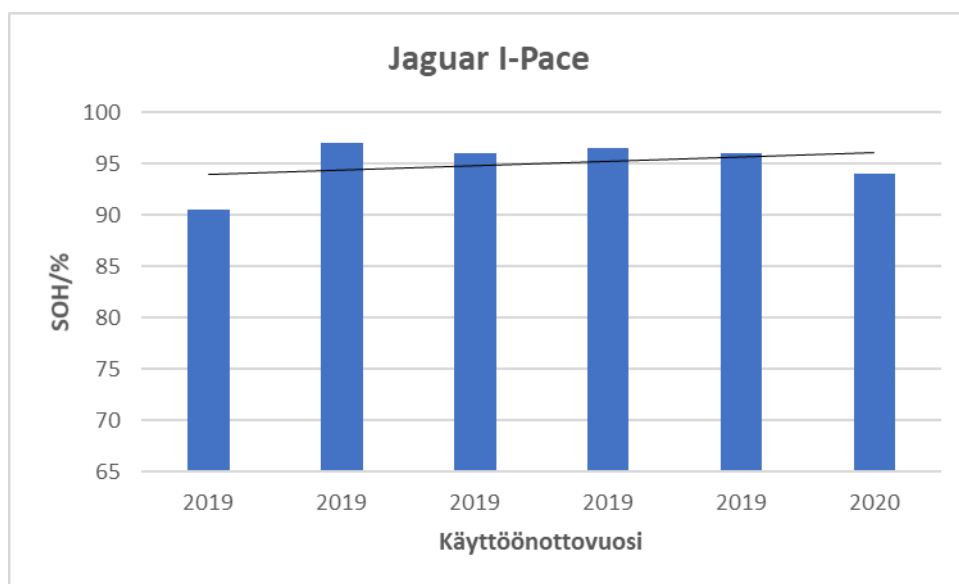
Kuva 10. Facebook-ryhmän Nissanien SOH-arvot käyttöönottovuosittain (Nissan-sähköautoilijat 2021).

Facebook-ryhmässä oli 15 auton otos 40 kWh:n NMC-akuilla varustetuista Nisaneista. Kaikissa näissä SOH-arvo oli pysynyt yli 90 prosentissa, vaikka yhdellä autoista oli ajettu jo 126 000 kilometriä, kuten kuvassa 11 on esitetty. (Nissan-sähköautoilijat 2021.)



Kuva 11. Facebook-ryhmän 40 kWh:n Nissanien SOH-arvot ajokilometreittäin (Nissan-sähköautoilijat 2021).

Kuvassa 12 on kaavio Jaguar I-Pace:ien SOH-arvojen suhteesta käyttöönotto-vuosiin. Huomionarvoista on, että vaikka vuonna 2019 käyttöönotettujen SOH-arvot ovat melko yhdenmukaisia, yhden auton SOH-arvo on yli viisi prosenttia pienempi muihin samanikäisiin verrattuna. Myös vuoden 2020 mallin reilut kaksi prosenttia pienempi arvo saattaisi selittyä esimerkiksi latausolosuhteiden erilaisuuksilla.



Kuva 12. Jaguar I-Pace:ien SOH-arvot käyttöönottovuosittain.

Koska Teslojen tietoja ei kyetty itse lukemaan, tulkittiin ulkomaista aineistoa, johon on viitattu uutissivusto Electrekissä. Aineiston perusteella Teslan NCA-akut tarjoavat kolmen vuoden iässä pääsääntöisesti yli 90 prosenttia täydestä toimintamatkasta. Jopa 250 000 kilometriä ajettujen autojen akut ovat yhtä lailla yli 90-prosenttisessa kunnossa. Teslan akkujen kapasiteetti näyttää laskevan melko nopeasti noin viisi prosenttia, minkä jälkeen kapasiteetin lasku hidastuu. Aineiston kokoajat tutkivat yleisestä kuntotasosta poikkeavien akkujen päivittäistä syklin syvyyttä ja pikalatausten määriä, mutta näillä ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta akkujen ikääntymiseen. Niin ajomäärän, iän kuin syklimäärän suhde jäljellä olevaan toimintamatkaan on sama, joten akun iän voidaan Teslankin tapauksessa olettaa olevan merkittävin ikääntymiseen vaikuttava asia. (Lambert 2016; Lambert 2018.)

4 Yhteenveto

Insinööri työ oli luonteeltaan tutkimus- ja selvitystyö, jossa tutkittiin käytettyjen täyssähköautojen akkujen kuntoa suhteessa käyttöikään ja ajomäärään. Sähköautojen voimakkaan yleistymisen aikana Autoalan Keskusliiton jäsenyritykset saavat insinööri työstä ohjeistusta muun muassa virhevastuukysymyksistä. Työssä esitettiin aivan uusi näkökulma asiaan tilastollisen analyysin muodossa. Vertailuarvoja koottiin ensisijaisesti Bosch- ja Launch-monimerkkitestereillä, mutta myös autojen omista informaatiojärjestelmistä. Lisäksi hyödynnettiin käyttäjien tallentamaa materiaalia internetissä.

Koska nykyaikaisia litiumakuilla varustettuja täyssähköautoja on ollut käytännössä tarjolla vasta Nissan Leafin, BMW i3:n ja Tesla Model S:n tultua markkinoille, olivat nämä mallit luonnollisesti myös parhaiten edustettuna käytettyjen täyssähköautojen tarjonnassa. Täyssähköautojen ajoakkujen kestoikä tutkimuksessa suurimmaksi haasteeksi osoittautuikin riittävän paljon ajettujen ja vanhojen ajoneuvojen saaminen tutkimuksen kohteiksi.

Jaguar I-Pace:ien kohdalla riittävän vanhojen yksilöiden puuttuminen vaikutti siten, että SOH-arvojen hajonnan välillä 90–97 % ei voitu osoittaa johtuvan eroista autojen käyttöönottovuosissa tai ajomäärissä. Erot saattoivat johtua esimerkiksi latausolosuhteista tai pikalatausten määrästä, mutta niistä ei ollut tallennettua tietoa saatavilla. Tutkimukseen tavoitellun Tesla Model S:n ongelma puolestaan oli se, että vaikka käytettynä kyseisiä autoja oli runsaasti, käytössä olleilla laitteilla ei päästy käsiksi niiden tietoihin. Näin ollen turvauduttiin täysin ulkoisiin lähteisiin.

Tuloksia vertaillessa tuli selväksi, että autojen informaatiojärjestelmistä on saatavissa oikeansuuntaista tietoa ajoakun kunnon arvioimiseksi. Auton ilmoittama toimintamatka-arviota voidaan käyttää ajoakun kunnon arvioimiseen myös niissä autoissa, joissa BMS:n antama SOH-arvo ei ole käyttäjän luettavissa. Esimerkkinä auton lataaminen säännöllisesti kotilatausasemassa, jolloin

vuositasolla seurattuna auton ilmoittama toimintamatka-arvio ajoon lähdeettäessä lyhenee.

Tulosten perusteella voitiin päätellä ajoneuvon iän olevan merkittävin ajoakun kestoikään vaikuttava muuttuva arvo. Pohdittaessa lataus-purkusyklar lukuäärän vaikutusta voitiin olettaa syklien määrän olevan suoraan verrannollinen ajomäärään. Kuitenkaan lataus-purkusyklar tiheydestä tai kestosta ei ollut saatavilla vertailukelpoista tietoa, joten syklien määrän ei suoraan voitu osoittaa vaikuttavan akun kestoikää heikentävästi.

Ulkoisista lähteistä koottujen tutkimusten perusteella voitiin todeta myös akun lataus-purkusyklar syvyydellä olevan suuri vaikutus. Akkujen täyteen lataaminen tai käyttäminen lähes tyhjäksi lyhentää niiden käyttöikää. Lopputuloksena voitaisiinkin suositella täyssähköautojen käyttäjiä ajoittamaan akkujen lataaminen esimerkiksi varaustilan välille 20–80 %. Tämä suositus voitaisiin kaupan yhteydessä saattaa autoliikkeiden myyjien kautta tiedoksi tuleville täyssähköautojen omistajille.

Jatkotutkimuskohteena olisi tulevaisuudessa olennaista selvittää myös tämän tutkimuksen ulkopuolelle jääneiden automallien vastaavia arvoja valmistajakohdaisilla testereillä. Laajempi tiedon kerääminen autojen käyttäjiltä taas antaisi taustatietoa käyttö- ja latausolosuhteiden vaikutuksista ajoakun ikääntymiseen. Lisäksi olisi hyödyllistä tietää, ovatko Kia e-Niron ja Hyundain mallien ilmoittamat 100 %:n SOH-arvot totuudenmukaisia.

Lähteet

Andrea, Davide. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. E-kirja. Artech House.

BU-205: Types of Lithium-ion. 2019. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>. Päivitetty 10.7.2019. Luettu 11.10.2021.

Ecker, Madeleine; Nietoa, Nerea; Käbitza, Stefan; Schmalstieg, Johannes; Blankea, Holger; Warnecke, Alexander & Sauer, Dirk Uwe. 2013. Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 248 (2014), s. 839–851.

Electric vehicle lithium-ion battery. Verkkoaineisto. Nissan Motor Corporation. <https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li_ion_ev.html>. Luettu 19.9.2021.

Lambert, Fred. 2016. Tesla battery data shows path to over 500,000 miles on a single pack. Verkkoaineisto. Electrek. <<https://electrek.co/2016/11/01/tesla-battery-degradation/>>. 1.11.2016. Luettu 19.9.2021.

Lambert, Fred. 2018. Tesla battery degradation at less than 10% after over 160,000 miles, according to latest data. Verkkoaineisto. Electrek. <<https://electrek.co/2018/04/14/tesla-battery-degradation-data/>>. 14.4.2018. Luettu 19.9.2021.

Myall, Daniel; Ivanov, Dima; Larason, Walter; Nixon, Mark & Moller, Henrik. 2018. Accelerated reported battery capacity loss in 30 kWh variants of the Nissan Leaf. Verkkoaineisto. Preprints. <<https://www.preprints.org/manuscript/201803.0122/v1>>. 15.3.2018. Luettu 23.10.2021.

Nissan-sähköautoilijat. 2021. Verkkoaineisto. Facebook. <<https://www.facebook.com/groups/nissan.sahkoautoilijat/permalink/1404102669941519>>. Päivitetty 15.5.2021. Luettu 28.9.2021.

Paakkinen, Marko. 2020. Syytä optimismiin - sähköautojen akkujen tulevaisuus on vasta alussa. Verkkoaineisto. VTT. <<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/syyta-optimismiin-sahkoautojen-akkujen-tulevaisuus-vasta-alussa>>. 18.9.2020. Luettu 13.10.2021.

Sähköautosanasto. 2021. Verkkoaineisto. SESKO ry. <https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat/sahkoautosanasto>. Päivitetty 8.4.2021. Luettu 19.9.2021.

Xiong, Rui; Pan, Yue; Shen, Weixiang; Li, Hailong & Sun, Fengchun. 2020. Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews 131 (2020) 110048, s. 1–14.

Zubi, Ghassan; Dufo-López, Rodolfo; Carvalho, Monica & Pasaoglu, Guzay. 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (2018), s. 292–308.

Tutkimusta varten kerättyjen täyssähköautojen tiedot

Automalli	Vuosimalli	Ajettu km	SOH %	SOC %	Ilm. SOC/%	Jännite V	Kokonais-kapasiteetti	Kokonais-käyttöaika	Muuta diagnostiikkatietoa
Nissan Leaf	2012	44000	74						
Nissan Leaf	2013	55000	70	82,3		389			Valmistajan testerin mukaan SOH myös noin 70, akun lämpötila 20, ei toistuvasti pikaladattu? (valm.).
Nissan Leaf	2013	46000	76	76		387			Max kennojännite 4,04 ja min 4,026; coolant temp 23,5; HV battery level 14 kWh; ready count 10098; normal charge count 1555; total battery voltage 387,03; pikalatauksia: 30.
BMW i3	2014	122000	80	53,7	70,7			405,11 h	Max kennojännite 3,95 ja min 3,94; driving cycles counter 7188 (with range extender 580); operating time REx 554000 s; driven km with REx 12321,13; max SOC 77,9; min SOC 8
BMW i3	2014	178000	81	70,4	90,3		2818 Ah	490,41 h	Max kennojännite 4,046 ja min 4,04; driving cycles counter 8175 (with range extender 751); operating time REx 704000 s; driven km with REx 16124,19; purkauskapasiteettisumma 4540 Ah; max soc 79,5 min soc 8
BMW i3	2014	56000	83	49,1	59,6		2383 Ah	414,18 h	Max varaustila 81,4; min varaustila 8; purkauskapasiteettisumma 3981 Ah, sisäresistanssi 98,4 %, max kennojännite 3,922 ja min 3,919; keskimääräinen lämpötila 21,3; kennon lämpötila max 22 ja min 21; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 2876; battery temperature 22,5; temperature of the HV battery 21
BMW i3	2015	29000	90						Max kennojännite 3,947 ja min 3,943, akun lämpötila; 22, kapasiteettihäviöt 20 %, driving cycles counter; 2437 (with range extender 92), operating time; REx 33000 s, driven km with REx; 438,38, current SOC; 56,1, HV battery SOC; 69,5, overall range; 89 km (auto 86 km).
Nissan e-NV200	2015	46000		32		368			Max kennojännite 3,845 ja min 3,822; höyrystin lämpötila 13–14; coolant temp 14,25; HV battery temp 33,33 %; HV battery level 4,8 kWh; ready count 4041; normal charge count 720; pikalatauksia: 496.

Kuva 1. Tutkittuja autoja vuosilta 2012–2015.

Automalli	Vuosimalli	Ajettu km	SOH %	SOC %	Ilm. SOC/%	Jännite V	Kokonais-kapasiteetti	Kokonais-käyttöaika	Muuta diagnostiikkatietoa
Nissan Leaf	2016	57000		84,6		388			Max kennojännite 4,048 ja min 4,035; coolant temp 23; HV battery level 21,76 kWh; ready count 9664; normal charge count 1000; pikalatauksia: 66; HV battery temp 41,67 %; total battery voltage 388,01 Mittaristossa; 11/12 palkkia.
VW e-Golf	2016	20000		79	76,8	340			Max lämpötila 22 ja min 21,5; koko kennojännite 340; max kennojännite 3,868 ja min 3,853; varaustilakuri 12283,1 Ah/4047,6 kWh ja purkauskasuri -11525 Ah/-3801,5 kWh
VW e-up!	2017	9000		95,2		410			Max lämpötila 22,2 ja min 21,9; koko kennojännite 410,1; max kennojännite 4,025 ja min 4,013; varaustilakuri 4951,3 Ah/1966,4 kWh ja purkauskasuri -4920,9 Ah/-1914,1 kWh
Hyundai Ioniq Elec.	2017	51000	100	53	54,5			12,4 milj. sek.	Max ja min kennojännite 3,66
Nissan Leaf	2017	40000		71,6		378			Max kennojännite 3,945 ja min 3,93; coolant temp 27,62; HV battery level 19,52 kWh; ready count 4549; normal charge count 1188; pikalatauksia: 3; HV battery temp 50 %; total battery voltage 377,86; integrated ready time 4,7 milj. sekuntia Mittaristossa; 12/12 palkkia.
BMW i3	2017	57000	92	79,9	87,7	383	1641 Ah	374,78 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 2640 Ah, sisäresistanssi 103,1 %, max kennojännite 3,989 ja min 3,986; keskimääräinen lämpötila 25; kennon lämpötila max ja min 25; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 7222
BMW i3	2017	34000	92	88,7	99,4	394	1232 Ah	355,57 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 138 Ah, sisäresistanssi 105,3 %, max kennojännite 4,103 ja min 4,099; keskimääräinen lämpötila 26; kennon lämpötila max ja min 26; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 4011

Kuva 2. Tutkittuja autoja vuosilta 2016–2017.

Automalli	Vuosimalli	Ajettu km	SOH %	SOC %	Ilm. SOC/%	Jännite V	Kokonais-kapasiteetti	Kokonais-käyttöaika	Muuta diagnostiikkatietoa
Nissan Leaf	2018	42000	98	96		401			Max kennojännite 4,177 ja min 4,173; coolant temp 32; ready count 4106; normal charge count 935; pikalatauksia: 1
Hyundai Ioniq Elec.	2018	43000	100	87	91			10 milj. sek.	Max ja min kennojännite 4,02
VW e-Golf	2018	78000		49		326			Max lämpötila 23 ja min 22,5; koko kennojännite 325,7; max kennojännite 3,703 ja min 3,696; varaustaskuri 39335,8 Ah/13311,1 kWh ja purkauslaskuri -34558,7 Ah/-11331,6 kWh; max kennon varaustila 49,39 ja min 48,46
BMW i3	2018	22000	93	72,4	76,6	374	596 Ah	220,2 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 595 Ah, sisäresistanssi 104,3 %, max kennojännite 3,896 ja min 3,892; lämpötila 22
BMW i3	2018	20000	92	62,3	65,7	365	4061 Ah	215,51 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 874 Ah, sisäresistanssi 102,4 %, max kennojännite 3,808 ja min 3,804; keskimääräinen lämpötila 11,8; kennon lämpötila max 12 ja min 11
BMW i3	2018	44000	94	92,7	100	396	76 Ah	278,6 h	Max varaustila 93,2; min varaustila 11; purkauskapasiteettisumma 2678 Ah, sisäresistanssi 107,3 %, max kennojännite 4,13 ja min 4,124; keskimääräinen lämpötila 23; kennon lämpötila max ja min 23; kapasiteettihäviöt 20 %
BMW i3s	2018	13000	94	59,4	63	362	254 Ah	220,67 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 763 Ah, sisäresistanssi 100 %, max kennojännite 3,769 ja min 3,765; keskimääräinen lämpötila 22; kennon lämpötila max ja min 22; kapasiteettihäviöt 20 %
BMW i3	2018	36000	97	49,9	51,3	354	4281 Ah	302,04 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 1222 Ah, sisäresistanssi 98,3 %, max kennojännite 3,686 ja min 3,682; keskimääräinen lämpötila 10,2; kennon lämpötila max 11 ja min 10; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 3147
BMW i3	2018	44000	94	50,4	53,3	355	1623 Ah	289,86 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 111 Ah, sisäresistanssi 107,3 %, max kennojännite 3,698 ja min 3,694; keskimääräinen lämpötila 27,4; kennon lämpötila max 28 ja min 27; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 3340 (with REX 155); operating time REX 132000 s; driven km with REX 2964,4

Kuva 3. Tutkittuja autoja vuodelta 2018.

Automalli	Vuosimalli	Ajettu km	SOH %	SOC %	Ilm. SOC/%	Jännite V	Kokonais-kapasiteetti	Kokonais-käyttöaika	Muuta diagnostiikkatietoa
BMW i3	2019	17000	97	39,7	39,6	349	492 Ah	197,68 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 1912 Ah, sisäresistanssi 98,4 %, max kennojännite 3,635 ja min 3,632; keskimääräinen lämpötila 21,3; kennon lämpötila max 22 ja min 21; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 1917; battery temperature 22,5; temperature of the HV battery 21
BMW i3	2019	9000	97	99,5	92,3		1566 Ah	94,47 h	Max varaustila 93,8; min varaustila 10,5; akun lämpötila; 15,6
BMW i3s	2019	21000	94	76,5	84	377	4226 Ah	209,68 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 2678 Ah, sisäresistanssi 101,6 %, max kennojännite 3,935 ja min 3,931; keskimääräinen lämpötila 11,3; kennon lämpötila max 12 ja min 11; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 4195
BMW i3	2019	17000	95	92	100	401	1818 Ah	187,03 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 4293 Ah, sisäresistanssi 97,7 %, max kennojännite 4,187 ja min 4,168; keskimääräinen lämpötila 25,6; kennon lämpötila max 27 ja min 24; kapasiteettihäviöt 20 %
BMW i3	2019	20000	98	72,7	75,3	374	1377 Ah	199,39 h	Max varaustila 95,3; min varaustila 11; purkauskapasiteettisumma 3233 Ah, sisäresistanssi 97,2 %, max kennojännite 3,894 ja min 3,891; keskimääräinen lämpötila 21; kennon lämpötila max ja min 21; kapasiteettihäviöt 20 %
BMW i3	2019	24000	96	91,6	99,3	398	1525 Ah	203,09 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 851 Ah, sisäresistanssi 95,3 %, max kennojännite 4,152 ja min 4,149; keskimääräinen lämpötila 23; kennon lämpötila max ja min 23; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 2943.
BMW i3	2019	16500	98	84,1	90,4		1384 Ah	209,8 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 4588 Ah, sisäresistanssi 95,9 %, max kennojännite 4,033 ja min 4,03; keskimääräinen lämpötila 23; kennon lämpötila max 23 ja min 23; kapasiteettihäviöt 20 %; driving cycles counter 2332.
Nissan Leaf	2019	22000	97	95,9		401			Max kennojännite 4,176 ja min 4,172; HV battery temp 41,7 %; ready count 1821; normal charge count 216; pikalatauksia 35.
Nissan Leaf	2019	70000	98	23,2	14	342			Valmistajan testerin mukaan SOH myös 98; max kennojännite 3,57 ja min 3,548; akun lämpötila; 22, total distance 79092 km, ei toistuvasti pikaladattu?
Nissan Leaf	2019	13000	100	46	39	351,5			Max kennojännite 3,67 ja min 3,655; coolant temp 23; HV battery temp 41,7 %; ready count 1916; normal charge count 240; pikalatauksia 93; total distance 32510 km; total battery voltage 351,6.

Kuva 4. Tutkittuja autoja vuodelta 2019.

Automalli	Vuosimalli 2019–2020	Ajettu km	SOH %	SOC %	Ilm. SOC/%	Jännite V	Kokonais- kapasiteetti	Kokonais- käyttöaika	Muuta diagnostiikkatietoa
Jaguar I-Pace	2019	19000	96	84		431			Max SOC 84; min SOC 83; max kennojännite 3,995 ja min 3,982; keskimääräinen lämpötila 21; kennon lämpötila max 22 ja min 21; kapasiteettihäviöt 4 %; mitattu min kennokapasiteetti 95 % ja max 97 % (capacity fade; 96); pikalatauksia 0.
Jaguar I-Pace	2019	57000	90,5	85		432			Max SOC 85; min SOC 84; koko kennojännite 431; max kennojännite 4,004 ja min 3,989; kennon lämpötila max 27 ja min 26; kapasiteettihäviöt 10 %, mitattu min kennokapasiteetti 90 % ja max 91 % (capacity fade; 90,5); pikalatauksia 0.
Jaguar I-Pace	2019	36000	97	95		445			Max SOC 95; min SOC 94; koko kennojännite 444; max kennojännite 4,12 ja min 4,103; kennon lämpötila max ja min 26; kapasiteettihäviöt 3 %, mitattu min kennokapasiteetti 97 % ja max 98 %; pikalatauksia 0.
Jaguar I-Pace	2019	10000	96	49		395			Max SOC 50; min SOC 48; koko kennojännite 395; max kennojännite 3,661 ja min 3,654; kennon lämpötila max 28 ja min 27; kapasiteettihäviöt 4 %, mitattu min kennokapasiteetti 95 % ja max 97 % (capacity fade; 96); pikalatauksia 0.
Jaguar I-Pace	2019	15000	96,5	91		439			Max varaustila 91; min varaustila 86; Launchilla SOH capacity fade 96,5 ja SOH power fade 100; akun lämpötila 17; pikalatauksia 0.
Hyundai Kona Elec.	2019	70000	100	20	20,5			2,76 milj. sek.	Max ja min kennojännite 3,5
Hyundai Ioniq Elec.	2019	19000	100	82	86			4,5 milj. sek.	Max lämpötila 23 ja min 22; max ja min kennojännite 3,8.
Hyundai Ioniq Elec.	2019	22000	100	92,5	97,5			5,4 milj. sek.	Max lämpötila 22 ja min 21; max kennojännite 4,08 ja min 4,06, akun lämpötila; 21.
Kia e-Niro	2019	17000	100	59	61,5			3,9 milj. sek.	Max ja min kennojännite 3,72; max ja min lämpötila 21
Kia e-Niro	2019	13000		82,5	85			4,5 milj. sek.	Max ja min kennojännite 3,96; max ja min lämpötila 21
Kia e-Niro	2020	11000		42	43,5			2,6 milj. sek.	Max ja min kennojännite 3,62; max ja min lämpötila 21
VW e-Golf	2020	24000		99,5	94,8	360			Max lämpötila 18,5 ja min 18; koko kennojännite 360,2; max kennojännite 4,097 ja min 4,086; varauslaskuri 14199,8 Ah/4760,3 kWh ja purkauslaskuri -14111,4 Ah/-4617,4 kWh
Hyundai Kona Elec.	2020	19000	100	96	99			290 000 sek.	Max ja min kennojännite 4,1; max ja min lämpötila 21
Mini Cooper SE	2020	16000	96	71,7	73,9	378	2365 Ah	69,27 h	Max varaustila 100; min varaustila 0; purkauskapasiteettisumma 799 Ah, sisäresistanssi 96,4 %, max kennojännite 3,941 ja min 3,938; keskimääräinen lämpötila 21; kennon lämpötila max ja min 21; kapasiteettihäviöt 20 %
Jaguar I-Pace	2020	11000	94	68		414			Max SOC 68; min SOC 66; max kennojännite 3,828 ja min 3,808; keskimääräinen lämpötila 22; kennon lämpötila max 23 ja min 22; kapasiteettihäviöt 6 %, mitattu min kennokapasiteetti 93 % ja max 95 % (capacity fade; 94); pikalatauksia 0.

Kuva 5. Tutkittuja autoja vuosilta 2019–2020.