



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Pasi Haimi

Nykyaikaisen sähköauton akku

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

1.10.2020

Tekijä Otsikko	Pasi Haimi Nykyaikaisen sähköauton akku
Sivumäärä Aika	30 sivua + 1 liite 1.10.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaaja	Lehtori Vesa Linja-aho
Insinööriyön tavoitteena oli tarkastella nykyaikaisten sähköautojen akkutekniikkaa ja -kemioita sekä samalla tutustua akkujen lataustekniikoihin ja standardeihin. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Työssä kerättiin tietoa eri lähteistä, joita yhdistelemällä saatiin tietoa akkutekniikan kehityksestä, kestävydestä sekä eri akkukemioiden eduista ja haitoista. Aluksi tarkasteltiin sähköautojen ja sähköauton akun historiaa. Lisäksi selvitettiin sähköautojen eri lataustekniikat, -tavat sekä -standardit. Työssä syvennyttiin tarkemmin neljään erilaiseen akkukemiaan, jotka ovat olleet yleisimpiä nykyaikaisissa sähköautoissa. Tarkastelluista akkukemioista kolme olivat litiumioniakkuja (LMO-, NCM- ja NCA-kemia), jotka ovat tällä hetkellä käytetyimpiä kemioita sähköautojen akustoissa. Näiden akkukemioiden perusteella tutkittiin kolmen eri akkukemiaa käyttävän pitkäikäisen sähköajoneuvon akkujen heikentymistä eri lähteiden perusteella. Insinööriyön tuloksena saatiin kattava selvitys eri akkukemioiden hyödyistä ja haitoista sekä niiden kehityksestä ja tulevaisuudesta. NCA-kemia on tällä hetkellä kehittyneintä akkutekniikan saralla, mutta myös NCM-kemian käyttö kasvaa voimakkaasti. Näiden kemioiden välillä ei havaittu eroa akun heikkenemisessä, mutta suurin vaikutus akun pitkäikäisyyteen todettiin olevan akuston aktiivisella lämmönhallinnalla.	
Avainsanat	Sähköauto, latausstandardi, litiumioniakku, akun heikkeneminen

Author Title	Pasi Haimi Modern Electric Vehicle Battery
Number of Pages Date	30 pages + 1 appendix 1 Oct 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructor	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
The aim of the Bachelor's thesis was to study the battery technology and chemistry of modern electric cars, and at the same time to get acquainted with the aspects of battery charging technologies and standards. This thesis is a literature review of the subject. Information was collected from various sources, which were then combined to provide data on the development of battery technology, its durability, and the advantages and disadvantages of different battery chemistries. First, the history of electric vehicles and electric vehicles' batteries was examined. In addition, the different charging technologies, methods and standards for electric vehicles were then investigated. This thesis studied four different battery chemistries, which have been the most common in modern electric vehicles. Of all the different battery chemistries examined, three were lithium-ion-based batteries (LMO, NCM, and NCA chemistry), which are currently the most widely used chemistries in electric vehicle batteries. Degradation of these three battery chemistries in three different electric vehicle models was examined based on different data sources. As a result of this Bachelor's thesis there is now a comprehensive information package on the advantages and disadvantages of different battery chemistries, as well as a study of the development of battery chemistries in the future. As a key finding of this study a link between the battery thermal management and the degradation of the batteries was found.	
Keywords	Electric vehicle, charging standard, Lithium-ion battery, battery degradation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköauton historiaa	2
2.1	Sähköauton keksiminen	2
2.2	Sähköauton ensimmäinen aikakausi	3
2.3	Sähköauton toinen tuleminen	3
2.4	Sähköauton viimeistä edellinen kausi	4
3	Yleisimpiä akkutyppejä sähköautoissa	4
3.1	Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)	4
3.2	Litiumioniakku	5
3.2.1	LMO-kemia sekä LMO-sekoitus	6
3.2.2	NCM-kemia	6
3.2.3	NCA-kemia	7
4	Akkuvalmistajia	8
5	Sähköauton lataus ja akunhallintajärjestelmä	9
5.1	Yleistä	9
5.2	Lataustavat	10
5.3	Latausjärjestelmät	11
5.3.1	MENNEKES (IEC 62196-2 Tyyppi 2)	11
5.3.2	J1772 (IEC 62196-2 Tyyppi 1)	13
5.3.3	CCS1 JA CCS2 (IEC 62196-3 EE JA FF)	14
5.3.4	CHAdeMO (IEC 62196-3 AA)	15
5.3.5	Muita latausjärjestelmiä	16
6	Akun heikkeneminen	17
6.1	Nissan Leaf	18
6.2	Renault Zoe	20
6.3	Tesla Model S	21

7	Akkutekniikan tulevaisuus	24
8	Johtopäätökset / lopuksi	24
	Lähteet	27
	Liitteet	
	Liite 1. Renaultin akun heikkenemisen data CanZe-ohjelmalla	

Lyhenteet

NiMH	Nikkeli-metallihydridi.
Li-ion	Litiumioni. Nykyaikainen sähköauton akku perustuu litiumionin liikkeeseen anodin ja katodin välillä.
OBC	On-Board-Charger. Auton sisäinen latauslaite.
SOH	State Of Health. Akun kunnon ilmaisin prosentteina.
LMO	Litium-mangaanioksidi. Akkukemia.
LNO	Litium-nikkelioksidi. Akkukemia.
NCM	(Litium)-nikkeli-koboltti-mangaani(oksidi). Akkukemia.
NCA	(Litium)-nikkeli-koboltti-alumiini(oksidi). Akkukemia.
CCS1	Combined Charging System 1. DC-latausliitin yhdistettynä tyyppi 1 latausliittimeen.
CCS2	Combined Charging System 2. DC-latausliitin yhdistettynä tyyppi 2 latausliittimeen.

1 Johdanto

2020-luvulle siirryttäessä sähköautojen osuus henkilöautomarkkinoilla on suuressa kasvussa. Nykyaikaisia sähköautoja voidaan sanoa olleen markkinoilla kymmenisen vuotta. Tässä ajassa on saatu paljon kokemuksia sähköauton kalleimman komponentin, ajokun kestävydestä. Kilpailun kiristyessä ovat akkukemiat sekä niiden ominaisuudet monin paikoin salaista tietoa, toisin sanoen sähköauton valmistajien jakama tieto akuista on vähäistä. Akun heikkeneminen on sähköauton toimintamatkan lisäksi kuluttajien suurin huoli. Varsinkin käytettyjen autojen kaupassa on akun heikkeneminen otettava huomioon niin ostajan kuin myyjänkin.

Akkujen kehittyessä myös akun lataustavat sekä latausnopeudet kehittyvät suurin harppauksin. Jotta kansalliset sekä maailmanlaajuiset latausverkostot saadaan kattamaan kasvava tarve sähköauton pikalataukseen, on lataustapoja ja -liittimiä standardisoitu.

Tässä insinööriyössä tarkastellaan sähköautojen akkuja ennen, nyt ja tulevaisuudessa sekä niiden lataustekniikoita- ja standardeja 2020-luvulle siirryttäessä. Tavoitteena on nitoa vuosikymmenen vaihteen akkutekniikat ja -kemiat sekä lataustekniikat yksiin kansiin. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan kolmen pitkäikäisen sähköautomallin akkukemioita, niiden kehitystä, hyviä ja huonoja puolia sekä jäähdytysjärjestelmiä.

2 Sähköauton historiaa

2.1 Sähköauton keksiminen

Sähköauton historia ulottuu 1800-luvulle. 1821 Michael Faraday keksi ensimmäisen sähkömoottorin prototyypin. Seuraavalla vuosikymmenellä useampi keksijä kehitti sähköauton. Lähteen mukaan ensimmäisenä sähköauton keksijänä pidetään skotlantilaista Robert Andersonia, amerikkalaista Thomas Davenportia, alankomaalaista Sibrandus Stratinghia, saksalaista Christopher Beckeriä tai unkarilaista Ányos Jedlikiä. Vuonna 1881 Gustave Trouvé esitteli ensimmäisen täysimittaisen sähköauton (kuva 1), mutta ensimmäisenä varsinaisena sähköautona pidetään saksalaisen keksijän Andreas Flockenin vuonna 1888 suunnittelemaa The Flocken Electrowagenia (kuva 2). [1; 2]



Kuva 1. Gustave Trouvé'n kolmipyörä [3].

Alkuun sähköautojen prototyypeissä käytettiin akkuina galvaanisia kennoja, joita ei voinut ladata. Ensimmäisissä varsinaisissa sähköautoissa käytettiin ranskalaisen fyysikon Gaston Plantén vuonna 1859 keksimää lyijyakkua. Kyseinen akku oli ensimmäinen uudelleenladattava akku. [4]



Kuva 2. Andreas Flocken vaimoineen Der Flocken Electrowagenissa vuonna 1903 [5].

2.2 Sähköauton ensimmäinen aikakausi

1900-luvun vaihteessa sähköautot yleistyivät varsinkin kaupunkien sisäisessä liikenteessä, kuten takseina Lontoossa ja New Yorkissa. Sähköautojen kasvu tyrehtyi Fordin polttomoottorisen T-mallin massatuotantoon, joka alensi valmistuskustannuksia ja toi ne tavallisen kansalaisen ulottuville. Vuonna 1912 polttomoottorisen auton sai 650 dollarilla, kun taas sähköauto maksoi 1750 dollaria. Samana vuonna Charles Kettering esitteli sähkökäyttöisen käynnistysmoottorin polttomoottoriautolle, mikä oli viimeinen isku sähköautoille. [1]

2.3 Sähköauton toinen tuleminen

1960-luvun loppupuolella ja 1970-luvun alussa Yhdysvalloissa öljynhinnan noustessa ja polttoainejakelun katkosten vuoksi alettiin kehittämään vaihtoehtoisilla polttoaineilla toimivia autoja, kuten sähköautoja. Sähköautot eivät yleistyneet alhaisen nopeuden ja rajallisen toimintamatkan vuoksi. Tyypillisesti kyseisen aikakauden sähköauton huippunopeus oli noin 70 km/h ja toimintamatra alle 70 km yhdellä latauksella. Sähköautojen akkuina käytettiin lyijyakkua [6] ja myös hopea-sinkki- sekä nikkeli-sinkkiakkuja [7].

2.4 Sähköauton viimeistä edellinen kausi

1990-luvun alussa Yhdysvalloissa, varsinkin Kalifornian osavaltiossa, herättiin polttomoottoriautojen pakokaasupäästöjen haitallisuuteen. Vuoden 1990 muutos ilmansaastelakiin (Clean Air Act) ja vuoden 1992 energiapolitiikkalain hyväksyminen määräivät myyntikiintiöt nollapäästöisille ajoneuvoille. General Motors toi vuonna 1996 markkinoille EV1-täyssähköautomallin. Kyseistä autoa sai vain leasingsopimuksella. Monet muut autovalmistajat alkoivat valmistaa jo tuotannossa olevien automallien sähköversioita, kuten Toyota RAV4 EV. Akkuina 1990–2000-luvun vaihteen sähköautoissa käytettiin lyijyakua (GM EV1 1. sukupolvi) sekä NiMH-akkuja (esimerkiksi GM EV1 2. sukupolvi sekä Toyota RAV4 EV).

3 Yleisimpiä akkutyyppejä sähköautoissa

3.1 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)

Nikkeli-metallihydridiakkujen kehitystyö alkoi 1970-luvulla ja vuonna 1989 NiMH-akku saatiin kuluttajamarkkinoille. Akkua kehitettiin nikkeli-kadmiumakun (NiCd) korvaajaksi käyttökohteinaan pienet, uudelleenladattavat akut.

1990-luvun alussa kaupunkialueiden ilmansaastehuolien vuoksi sähköautojen ja -akkujen kehitys kasvoi voimakkaasti. NiMH-akun energiatiheys sekä tilavuudessa että painokiloa kohden, oli huomattavasti suurempi kuin nikkelikadmiumakussa ja tämä johti siihen, että NiMH-akkutyyppi yleistyi sähköajoneuvojen sähköenergian varastointiin sähkökemiallisessa muodossa. NiMH-akkuja on käytetty vuosituhatien alkupuolella General Motorsin valmistamissa EV1- sekä S-10-sähköautomalleissa sekä esimerkiksi Toyotan valmistamissa hybridisähköautoissa.

NiMH akun kemiaa

Nikkeli-metallihydridiakun positiivisena aktiivimateriaalina käytetään nikkelioksidihydroksidia. Negatiivisena aktiivimateriaalina toimii vety metallihydridimuodossa. Metallihydridin metalliseoksina käytetään yleensä kahta tyyppiä, joko lantaani-nikkelipohjaista AB5-

tai titaanista ja zirkoniumista koostettua AB₂-tyyppiä. Elektrolyytin pääkomponentti on kaliumhydroksidi. [8, s. 843.]

3.2 Litiumioniakku

Litiumioniakku tuli markkinoille 1991 Sonyn valmistamana. Ensimmäinen sarjatuotantosähköauto, joka käytti litiumioniakkua, oli Tesla Motorsin valmistama Roadster. Se tuli markkinoille vuonna 2008 ja oli myös ensimmäinen sähköauto, jonka toimintamatka ylitti 200 mailia (320 km). 2020-luvulle siirryttäessä on litiumioniakku selvästi suosituin tekniikka kuluttajille myytävissä sähköajoneuvoissa.

Litiumioniakun positiivisena elektrodina toimii litium-metallioksidi (useita eri metalliseoksia markkinoilla) sekä negatiivisena elektrodina yleensä grafiitti. Taulukossa 1 on esitelty litiumioniakkukemioita.

Taulukko 1. Luettelo erilaisista litiumioniakkukemioista [9].

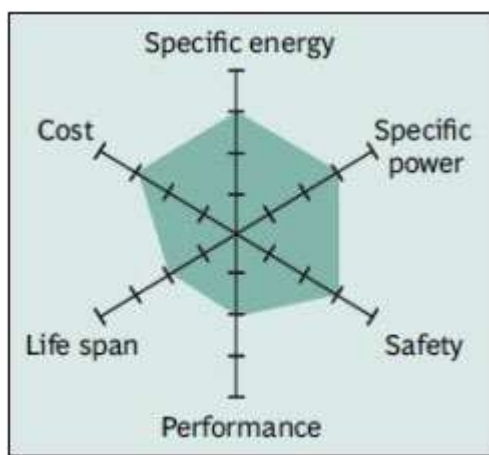
Kemia	Nimi	Kemiallinen kaava	Energiatiheys Wh/kg	Lämpökarkaamisen (°C)
LCO	Litium-kobolttioksidi	LiCoO ₂	150–200	150
LMO	Litium-mangaanioksidi	LiMn ₂ O ₄	100–150	250
NCM	Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi	LiNiMnCoO ₂	150–220	210
LFP	Litium-rautafosfaatti	LiFePO ₄	90–120	270
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-aluminioksidi	LiNiCoAlO ₂	200–260	150
LTO	Litium-titanaatti	Li ₂ TiO ₃	50–80	Ei karkaa (hiilivapaa) [10]

Tällä hetkellä yleisin akkutyyppi kuluttajille myytävissä sähköautoissa on litiumioniakku. Litiumioniakuista eniten käytetään NCM- ja NCA-kemian akkuja.

3.2.1 LMO-kemia sekä LMO-sekoitus

LMO-akun katodi muodostuu litium-mangaanioksidista (LiMn_2O_4) ja anodi on grafiittia. Akun nimellinen kennojännite on 3,7 V ja toiminta-alue 3,0–4,2 V. Energiatiheys on 100–150 Wh.

Akkukemian hyviä puolia ovat turvallisuus sekä korkea hetkittäinen virranluovutuskyky. Huonoina puolina matala energiatiheys sekä lyhyt käyttöikä. Nämä on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kuvaajassa puhtaan LMO-akun ominaisuudet [9].

LMO-akkukemialla on käytetty Nissan Leafin ensimmäisen sukupolven akkupaketissa (24 kWh, valmistaja AESC). Joidenkin lähteiden perusteella kyseessä on LMO- ja LNO-kemioiden sekoitus, joka pohjaa LMO-kemiaan. [11; 12]

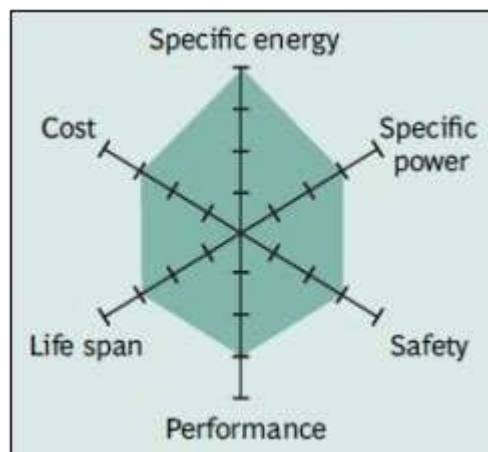
LMO-akkuja on myös parannettu yhdistämällä LMO- ja NCM-kemialla, jolla saadaan molempien kemioiden hyviä puolia yhdistettyä, kuten LMO:n hetkittäinen virranluovutuskyky sekä NCM:n energiatiheys. [9]

3.2.2 NCM-kemia

NCM-akkukemia pohjautuu nikkeliin, kobolttiin sekä mangaanin kombinaatioon. Katodityyppi on litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi, jonka kemiallinen kaava on $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$. Kaavassa x, y ja z kertovat nikkeliin, kobolttiin ja mangaanin suhteen toisiinsa

nähdessä ($x + y + z = 1$). Aiemmin yleisin NCM-yhdiste oli NCM111 ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$), jossa nikkeliä, kobolttia ja mangaania oli yhtä paljon. Kobolttin korkean hinnan vuoksi ovat akkuvalmistajat pyrkineet kasvattamaan nikkelin osuutta yhdisteessä. Nykyään yleisimmät yhdisteet ovat NCM523 (Ni 50 %, Co 20 %, Mn 30 %) sekä NCM622 (Ni 60 %, Co 20 %, Mn 20 %) [13, s. 13]. Uusin yhdiste NCM811 nousee kovaa vauhtia suosituimmaksi NCM-yhdisteeksi. Syyskuussa 2019 Kiinan markkinoille valmistettujen sähköautojen akuista 18 % oli NCM811-kemian akkuja (laskettuna akkujen kapasiteetin perusteella). Maailmanlaajuisesti kyseisen kemian akkujen tuotantomäärät ovat kasvussa ja osuuden ollessa 7 %, odotetaan sen yleistyvän vuonna 2020 Euroopassa sekä Pohjois-Amerikassa. [14]

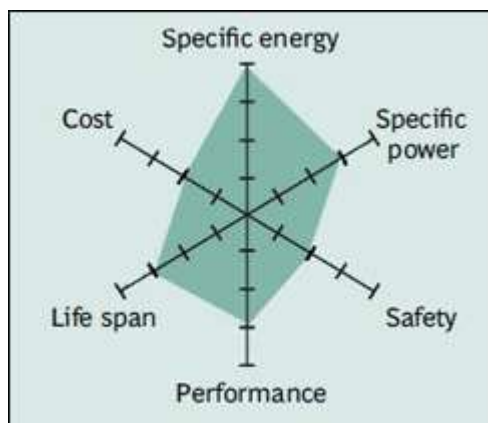
NCM-kemian hyvinä puolina pidetään korkeaa energiatiheyttä 150–220 Wh/kg ja hetkelistä virranluovutuskykyä. Kuten alla olevasta NCM-kemian kuvaajasta (kuva 4) voi päätellä, ovat kyseisen akkukemian ominaisuudet hyvät joka saralla.



Kuva 4. NCM-kemian ominaisuudet säteittäisessä kaaviossa [9].

3.2.3 NCA-kemia

Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi-akkukemia (LiNiCoAlO_2), eli lyhyemmin NCA-kemia toinen suurista litiumionin liikkeeseen perustuvista tekniikoista tällä hetkellä sähköajoneuvomarkkinoilla. NCA-akku kehitettiin vuonna 1999 jatkona litium-nikkelioksidille. Katodiin lisättiin alumiinia vakauttamaan kennoa. Koboltti kasvattaa kennon energianvarastointikykyä. Kuvassa 5 on esitelty NCA-kemian ominaisuuksia.



Kuva 5. Säteiläinen kaavio NCA-kemian ominaisuuksista [9].

NCA-kennon nimellisjännite on 3,6 V jännitteen vaihdellessa välillä 3,0 V – 4,2 V. Kemian etuina ovat korkea energiatiheys 200–260 Wh/kg sekä pitkä käyttöikä. Huonoina puolina pidetään turvallisuutta alhaisen lämpökarkaamislämpötilan vuoksi, korkeaa hintaa sekä koboltin epäeettistä tuotantoa. Nikkelin määrää kennoissa on saatu kasvatettua koboltin kustannuksella.

4 Akkuvalmistajia

Sähköautojen akkumarkkinoiden suurimmat tekijät löytyvät Aasiasta. Suurin litiumioniakkujen valmistaja on korealainen LG Chem, joka toimittaa akkuja usealle automerkille. LG Chemillä on tehtaita Etelä-Koreassa, Kiinassa, Puolassa ja Yhdysvalloissa. Seuraavaksi suurin akkuvalmistaja on kiinalainen Contemporary Amperex Technology Co. (CATL), jonka akkuja käyttävät useat, varsinkin eurooppalaiset autonvalmistajat. Seuraavaksi suurimmat ovat kiinalainen BYD, joka valmistaa akkuja oman tuotemerkinsä sähköautoihin, sekä Panasonic, jonka suurin asiakas on Tesla. Myös Tesla kuuluu akkuvalmistajien joukkoon ja on viidennellä sijalla Gigafactory 1 -akkutehtaansa ansiosta. Muita suuria akkuvalmistajia ovat mm. Samsung, AESC ja SK Innovation. Alla olevassa taulukossa 2 on viisi suurinta akkuvalmistajaa vuodelta 2019.

Taulukko 2. Viisi suurinta sähköajoneuvojen akkuvalmistajaa vuonna 2019 [15].

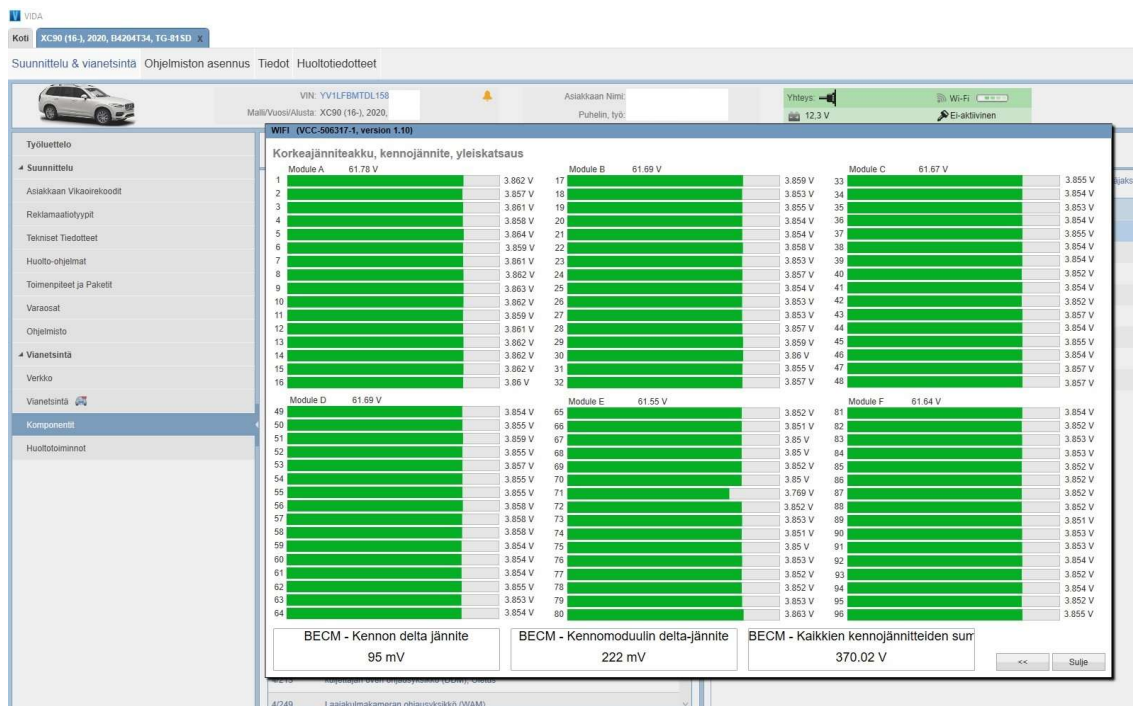
Akkuvalmistaja	Ajoneuvon valmistaja	Valmistuskapasiteetti GWh
LG Chem	GM, Ford, Renault, Volvo, Hyundai, Tesla, Vw	51
CATL	BMW, VW, MB, Volvo, Toyota, Honda	39
BYD	BYD	26
Panasonic	Tesla	26
Tesla	Tesla	22

5 Sähköauton lataus ja akunhallintajärjestelmä

5.1 Yleistä

Akkua ladataan aina tasavirralla. Jos auton ulkopuolinen latausasema syöttää vain vaihtovirtaa, hoitaa auton sisäinen laturi (OBC) tasasuuntaamisen. Litiumioniakun lataus vaatii tarkkaa latausjännitteen hallintaa, sillä liian korkea latausjännite huonontaa akun kestoikää sekä saattaa johtaa akkukennon lämpökarkaamiseen. Akkukennon kapasiteetti huonontuu myös kennojännitteen laskiessa alle kahteen volttiin. Litiumioniakkukennoilla on sisäänrakennettu turvapiiri, joka suojelee akkukennoa katkaisemalla mekaanisesti latauksen tai latauksen purkautumisen yli- tai alijännitetapauksissa.

Akun hallintajärjestelmä seuraa jokaisen kennon jännitettä ja varaustasoa yksilöllisesti. Alla on kuva, jossa Volvo XC90:n akkukennojen jännitettä seurataan reaaliaikaisesti (kuva 6).



Kuva 6. Kennojännitteet Volvo XC90 -lataushybridissä. Kenno numero 71 on viallinen. Kyseisessä tapauksessa koko akkupaketti jouduttiin vaihtamaan. Kuvakaappaus Volvon huoltojärjestelmästä (VIDA).

5.2 Lataustavat

Sähköajoneuvojen lataustapoja on neljä. Lataustavalla 1 tarkoitetaan pienitehoisten sähköajoneuvojen (esim. sähköpolkupyörät ja -scooterit) 230 V:n vaihtosähkölatausta tavallisesta kotitalouden pistorasiasta. Pistorasian on oltava suojattu 30 mA:n vikavirtasuojalla.

Lataustapa 2 (hidas lataus) pitää sisällään 230 V:n vaihtosähkölatauksen kotitalouspistorasiasta sähköautolle. Standardin SFS-EN 62752 mukaisesti pitkäaikainen latausvirta on rajoitettava 8 ampeeriin. Latausjohdossa on oltava ohjaus- ja suojalaiteyksikkö, joka pitää käyttäessä tukea niin, ettei pistorasiaan kohdistu räsytystä. Lataustapa 2 sisältää myös latauksen teollisuuspistorasiasta.

Peruslataus eli lataustapa 3 on suositeltavin sähköajoneuvojen lataustapa. Tässä lataustavassa auton sisäistä laturia (OBC) syötetään vaihtosähköllä sähköautoon kuuluvalla

latausjohdolla standardin SFS-EN 62196-2 mukaisesta pistorasiasta. Ladattaessa pistokytkimet lukittuvat vastakappaleisiinsa ja latausaseman sekä ajoneuvon välillä kulkee latauskommunikaatio. Näillä varmistetaan turvallinen sähköauton lataus.

Lataustapa 4 on tasavirtalataus. Sitä kutsutaan myös teho- tai pikalataukseksi. Latausasemien tarjoamat lataustehot pikalatauksessa vaihtelevat 22 kW:sta jopa 350 kW:iin. [16]

5.3 Latausjärjestelmät

Latauspistokestandardeja on maailmalla useita. Eurooppaan valmistetuissa autoissa on yleisesti käytössä Type 2 (MENNEKES) vaihtovirtalataukseen sekä CCS2 tai CHAdeMO tasavirtalataukseen. Kuvassa 4 yleisimmät latauspistokkeet.

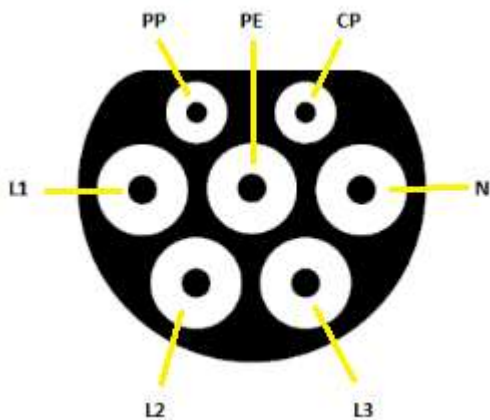


Kuva 7. Latauspistokkeiden mallit ja standardit maailmalla [17].

5.3.1 MENNEKES (IEC 62196-2 Tyyppi 2)

Euroopan komissio valitsi lataustyyppi 2 -standardin viralliseksi latausliittimeksi Euroopan unionissa tammikuussa 2013. Latausliitin on tarkoitettu vaihtovirtalataukseen, mutta pienin muutoksin Tesla tarjoaa saman liittimen kautta myös tasavirtalatausta Model S- sekä Model X -malleihinsa Euroopassa.

Tyyppin 2 latauspistokkeessa voidaan käyttää enintään 480 V:n kolmivaiheista 63 A:n tai 250 V:n yksivaiheista 70 A:n latausvirtaa. Useissa nykyaikaisissa hybridisähköautoissa auton sisäinen laturi rajoittaa kuitenkin lataustehon 3,7 kW:iin. Sähköautoissa vaihtovirtalatauksessa latausteho nousee jopa 22 kW:iin (kolmivaihevirta) [18]. Standardin mukainen pistokytin pitää sisällään seitsemän kontaktipintaa. Kuvassa 8 on pistokkeen napajärjestys.



Kuva 8. Tyyppin 2 latauspistokkeen napajärjestys, urosliitin ajoneuvossa.

Taulukossa 3 on esitelty tarkemmin kytkennät.

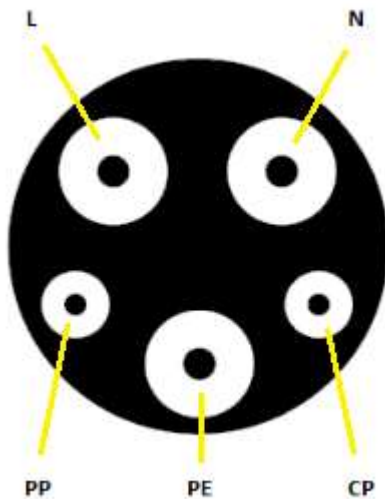
Taulukko 3. Tyyppin 2 latauspistokkeen kontaktipinnat [19].

Napa	Selitys
PP	Proximity Pilot, lataussignaali
PE	Protective Earth, suojamaadoitus
CP	Control Pilot, latauksen aikainen virran ohjaus
N	Nolla
L1	Vaihe 1
L2	Vaihe 2
L3	Vaihe 3

Proximity Pilot -signaalilla latausasema tunnistaa ajoneuvon kytkennän latauskaapeliin, varmistetaan latauspistokkeen lukittuminen sekä aktivoidaan ajonesto. Latausvirran maksimiarvo rajoitetaan PP- ja PE-johtimien väliseen resistanssiin perustuen. Control Pilot -signaalilla ohjataan latauksen aloitusta, lopetusta sekä latauksen aikaista latausvirran säätelyä. PE-johdin on suojamaadoitus. Virransyöttöön ovat navat N (nolla) sekä L1-L3 (vaiheet 1-3). [19, s. 12; 20, s. 48.]

5.3.2 J1772 (IEC 62196-2 Tyyppi 1)

IEC 62196-2 -standardin mukainen latausliitin J1772 on käytössä Pohjois-Amerikassa sekä Japanissa. Liittimessä on viisi napaa, ja se on suunniteltu 120 V:n tai 240 V:n 1-vaihe sähköjärjestelmiin. Standardin mukaisesti kontaktipinnat sekä kommunikaatio ovat samanlaiset kuin tyyppin 2 latausliittimessä, pois lukien vaiheet 2 ja 3. Kuvassa 6 on kuvattu latauspistokkeen napajärjestys.



Kuva 9. Tyyppin 1 latauspistokkeen napajärjestys, urosliitin ajoneuvossa.

Taulukossa 4 on lueteltu pistokkeen kontaktipinnat.

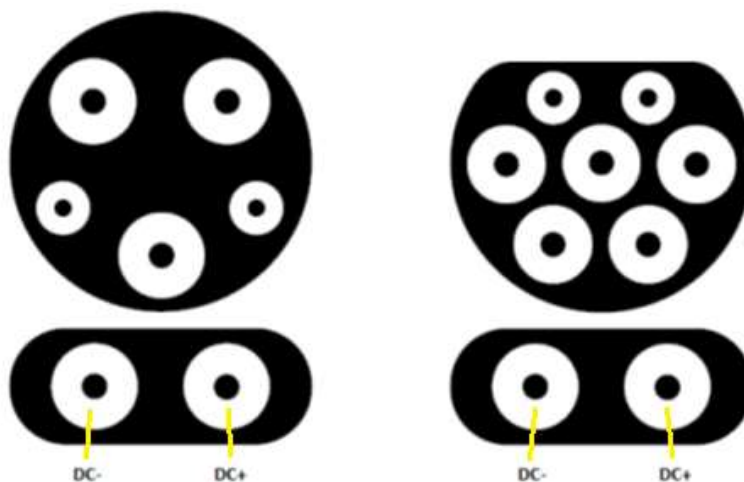
Taulukko 4. Tyypin 1 latauspistokkeen kontaktipinnat [20, s. 19].

Napa	Selitys
PP	Proximity Pilot, lataussignaali
PE	Protective Earth, suojamaadoitus
CP	Control Pilot, latauksen aikainen virran ohjaus
N	Nolla
L	Vaihe

Euroopassakin on vielä joissain automalleissa käytössä tyypin 1 latausliitin, kuten vanhemmissa Nissan Leaf -malleissa ja vielä uusissa Mitsubishi Outlander -PHEV-sähköhybrideissä.

5.3.3 CCS1 JA CCS2 (IEC 62196-3 EE JA FF)

Combined Charging System 1 ja 2 ovat latausliittimien tyyppi 1 ja 2 laajennuksia. Näillä laajennuksilla voidaan ladata tasavirralla suoraan akkua ohi auton oman OBC:n tekniikkaa tukevissa autoissa. CCS1- ja -2-latausliittimissä on kaksi tasavirtakontaktipintaa yllä esiteltujen kontaktipintojen lisäksi. Latausaseman puoleisessa pistotulpassa on viisi kontaktipintaa (PP, CP, PE sekä DC- ja DC+). Alla olevassa kuvassa 10 on CCS1 sekä CCS2 DC-navat urosliittimessä eli auton puolella.



Kuva 10. CCS1- ja CCS2-latausliittimet.

Tällä hetkellä standardin mukaiset latausasemat tarjoavat jopa 350 kW:n lataustehoa. Automalleista Porsche Taycan ottaa vastaan jopa 270 kW:n lataustehon [21] ja Tesla Model 3 Long Range Dual Motor 250 kW:n lataustehon [22].

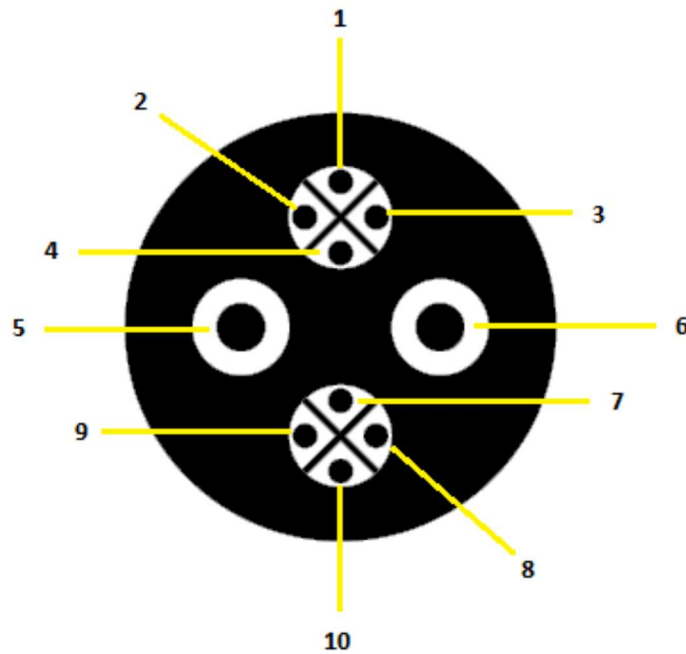
5.3.4 CHAdeMO (IEC 62196-3 AA)

CHAdeMO on tasavirtalatausjärjestelmä. Vuonna 2010 viiden suuren japanilaisen autovalmistajan ehdottamana hyväksyttiin sen kansainväliseksi standardiksi. Latausjärjestelmä kilpailee pikalatauksessa CCS1/2:n sekä Teslan Superchargerin kanssa.

Latausliitin koostuu yhdeksästä kontaktipinnasta, jotka lueteltu tarkemmin taulukossa 5. Alla myös kuva napojen asettelusta liittimessä (kuva 11).

Taulukko 5. CHAdeMO-pistokkeen kontaktipinnat [23].

Napa	Selitys
1	Ground
2	Charge sequence signal 1
3	N/A
4	Vehicle charge permission
5	Power supply -
6	Power supply +
7	Connector proximity detection
8	CAN-H
9	CAN-L
10	Charge sequence signal 2



Kuva 11. CHAdeMO-liittimen napajärjestys, auton puoli.

CHAdeMO-latausjärjestelmän maksimi latausteho on 120 kW latausvirran ollessa 200 A ja latausjännitteen 600 V. Tällä hetkellä moni latausasema tarjoaa kuitenkin vain 50 kW:n lataustehoa. CHAdeMO 2.0 -protokolla esiteltiin 2018, jonka maksimilatausteho on 400 kW. Latausvirran ollessa 400 A, tarvitsevat latauskaapelit nestejäähdytyksen [24]. CHAdeMO 3.0 (ChaoJi) tähtää tulevaisuudessa jopa 900 kW:n lataustehoon [25].

5.3.5 Muita latausjärjestelmiä

Tesla on käyttänyt Supercharger-latausjärjestelmää ympäri maailman. Supercharger on pikalatausjärjestelmä, ja kyseinen latausliitin on käytössä vain vanhemmissa Teslan valmistamissa autoissa. Kiinassa on käytössä oma GB/T 20234.2-2011 -standardin mukainen latausjärjestelmä.

6 Akun heikkeneminen

Nykyaikaisia sähköautoja voidaan sanoa olleen markkinoilla kohta kymmenen vuotta. Tässä ajassa on saatu tarpeeksi dataa akkujen ajan- sekä kilometrien kestosta. Litiumioniakun ikääntymiseen vaikuttaa moni asia:

- kennojännitteen lataaminen liian korkeaksi
- kennojännitteen laskeminen liian matalaksi
- akun purku-varauskerta eli sykli
- lämpötila.

Kennojänniteitä voidaan helposti seurata ja säätää elektronisesti sekä lämpötilaa optimoida aktiivisella akuston jäähdytyksellä ja lämmityksellä. Se, mikä eniten kiinnostaa kuluttajaa (varsinkin käytetyn sähköauton ostajaa), on akun syklinen kestoikä. Eri akkukemioilla on erilaiset sykliset kestoiät, ja yleisimmissä kemioissa ne vaihtelevat NCA-akun 500:sta NCM-akun jopa 2000:een. Sykliä kesto voidaan parantaa esimerkiksi rajoittamalla akkukennojen maksimijännitettä. LMO-, NCA- sekä NCM-akkukennon maksimijännite on 4,2 V, ja alentamalla ohjelmallisesti maksijännitettä 0,1 V, voidaan syklien kesto kaksinkertaistaa. Yhdellä syklillä tarkoitetaan akun koko kapasiteetin kuluttamista ja sen täyteen lataamista. Esimerkkinä sähköauton täysi akku ajetaan 50 %:iin ja ladataan taas täyteen, on mennyt 0,5 sykliä. Kun sama toistetaan, on tuloksena täysi sykli. [26]

Nissan Leaf (valmistus alkanut vuonna 2010), Tesla Model S (2012) sekä Renault Zoe (2012) ovat pitkäikäisimpiä sekä eniten myytyjä nykyaikaisia täyssähköautomalleja. Seuraavaksi tarkastellaan saatavilla olevaa dataa akun heikkenemisestä todellisessa käytössä pitkältä aikaväliltä.

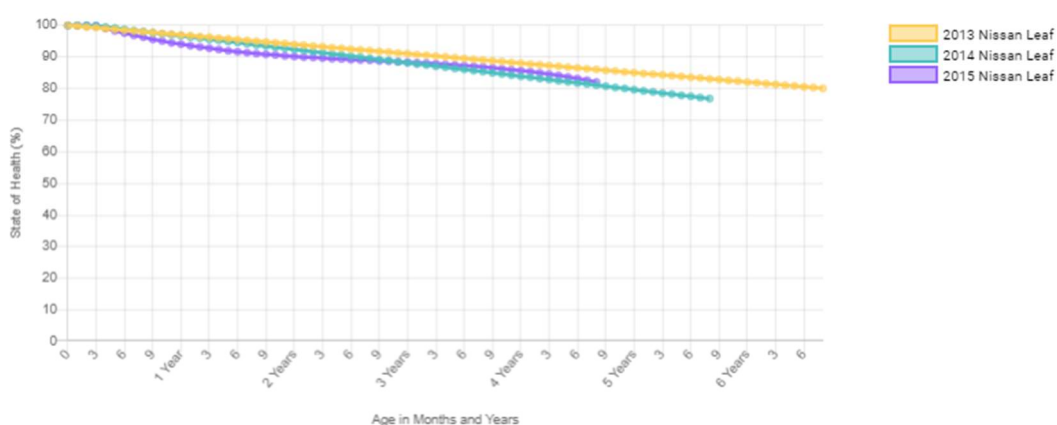
6.1 Nissan Leaf

Nissan Leafia on valmistettu vuodesta 2010. Alkuun auton sai 24 kilowattitunnin akustolla, jonka kennot ovat tyypiltään särmiön mallisia ja pakattu foliopusseihin. Leafin ensimmäinen akku perustuu LMO-akkukemiaan eli katodina toimii litiummangaanioksidi ja anodina grafiitti. Akusto koostuu 48 akkumoduulista, joissa jokaisessa on neljä akkukennoa. Akkukennoista kaksi on sarjaan- ja kaksi rinnankytkettyä. Akkumoduulit ovat kytetty sarjaan. Yhden kennon nimellisjännite on 3,75 V ja maksimijännite 4,2 V. Koko akuston nimellisjännite $U = 3,75 \text{ V} * 2 * 48 = 360 \text{ V}$.

Leafin seuraava, kapasiteetiltaan 6 kWh edeltäjäänsä suurempi akku perustui NCM-kemiaan tai NCM-LMO-sekoitukseen. Varmaa tietoa kyseisen akun kemiasta ei ole saatavilla. 30 kWh akku tuli markkinoille vuosimallin 2016 Leafiin.

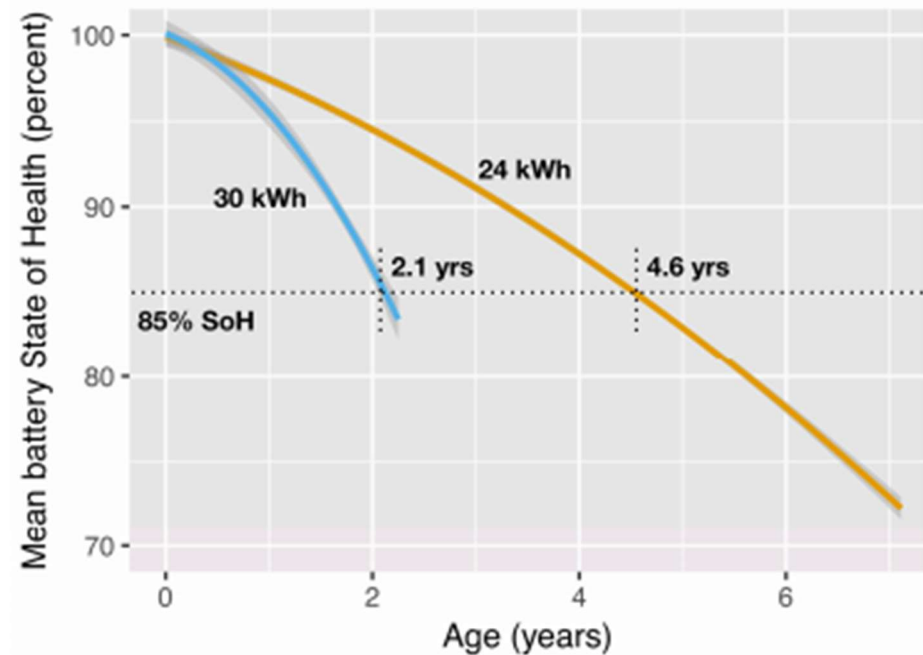
Toisen sukupolven Nissan Leafin (vm 2018–) akun kapasiteetti kasvoi 40 kWh:iin ja vuonna 2019 jo 62 kWh:iin. Näissä akuissa akkukemiana on NCM523. [27]

Leafin ensimmäisen akun (24 kWh) heikkenemisestä on paljon materiaalia. Amerikkalaisen Geotab Inc. yrityksen ylläpitämä EV Battery Degradation Comparison Tool näyttää vuosimallin 2013 Leafin akkujen huonontuneen keskimäärin 80,1 %:iin vajaassa seitsemässä vuodessa alla olevan kuvaajan (kuva 12) perusteella. Vuosimallien 2014 ja 2015 kuvaajat näyttävät lähes samanlaisilta lyhyemmällä aikavälillä. [28]



Kuva 12. Vuosimallien 2013–2015 Leafin akun heikkeneminen (SOH). EV Battery Degradation Comparison Tool. [28]

Vuonna 2016 markkinoille tulleen Leafin 30 kWh:n akun on raportoitu heikkenevän ennenaikaisesti. EV Battery Degradation Comparison Toolin perusteella tätä ei ole havaittavissa (kuva 13), mutta esimerkiksi Uudessa-Seelannissa on havaittu nimenomaan 30 kWh:n akun heikkenevän jopa yli 10 % vuodessa. Tutkimuksen otanta oli 283 autoa, joista 82 oli 30 kWh:n akulla ja 201 autoa 24 kWh:n akulla. Akun kunnon (SOH) mittauksia tutkimuksessa oli 1382.



Kuva 13. Leafin 24 kWh- ja 30 kWh-akustojen heikkeneminen Uudessa-Seelannissa tehdyn tutkimuksen mukaan [29].

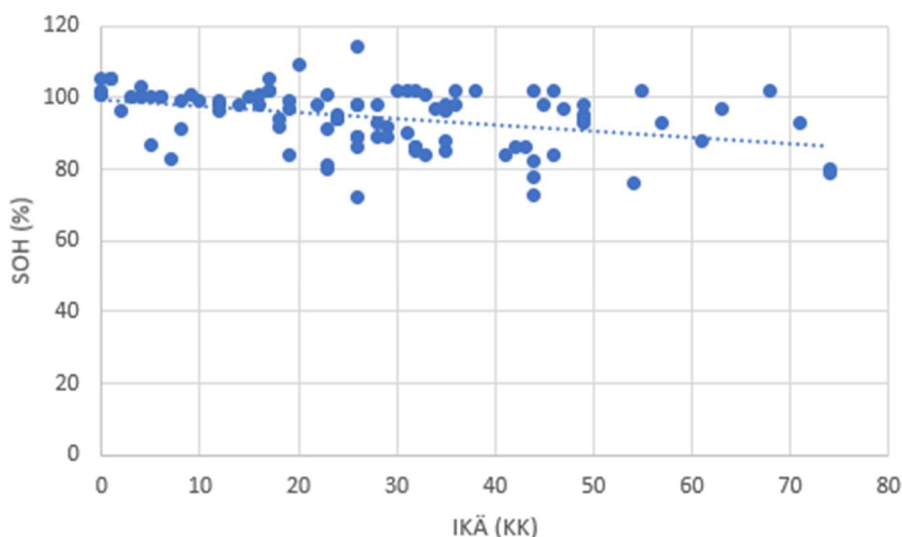
Tutkimukseen osallistuneissa autoissa oli useita käytettyinä Englannista ja Japanista tuotuja autoja. Varsinkin osassa Japanista tuoduissa havaittiin jyrkkä SOH:n lasku. Tämä epäillään johtuneen autojen lataamisesta pääasiallisesti pikalatauksella. Myös pitkällä varastointiajalla lämpimissä olosuhteissa ja säilytyksen korkealla varaustasolla uskotaan vaikuttaneen ennenaikaiseen akun heikkenemiseen. [29]

Nissan Leafin akustolla ei ole aktiivista jäähdytysjärjestelmää. Autossa on passiivinen ilmajäähdytys eli käytännössä akkua voidaan jäähdyttää vain ajossa.

6.2 Renault Zoe

Renault Zoe saatiin kuluttajamarkkinoille joulukuussa 2012. Zoe on myydyin eurooppalainen täyssähköauto. Auto tuli markkinoille 22 kWh:n akustolla. Akkukemiasta ei ole saatavilla varmaa tietoa, mutta joidenkin lähteiden mukaan kyseessä on NCM-LMO-sekoitus. Akku koostuu 192 kennosta, joiden kapasiteetti on 36 Ah. Akusto on ilmajäähdytteinen.

Akun heikkenemisestä on vähän saatavilla olevaa tietoa. Avoimen lähdekoodin perustuvan CanZe-ohjelmiston avulla Renault Zoen, Kangoo ZE:n sekä Fluence ZE:n käyttäjät ovat voineet seurata akun kuntoa älypuhelinsovelluksella. CanZen kehittäjät ovat koonneet nettisivuilleen käyttäjien itse ilmoittamia tietoja Renaultin sähköautojen akkujen kunnosta. Data sisältää tällä hetkellä 100 mittausta, joista 90 on Zoe-mallisten sähköautojen. [30] Alla kuva 14 kuvaajasta, jossa näkyy auton SOH ikään verrattuna.



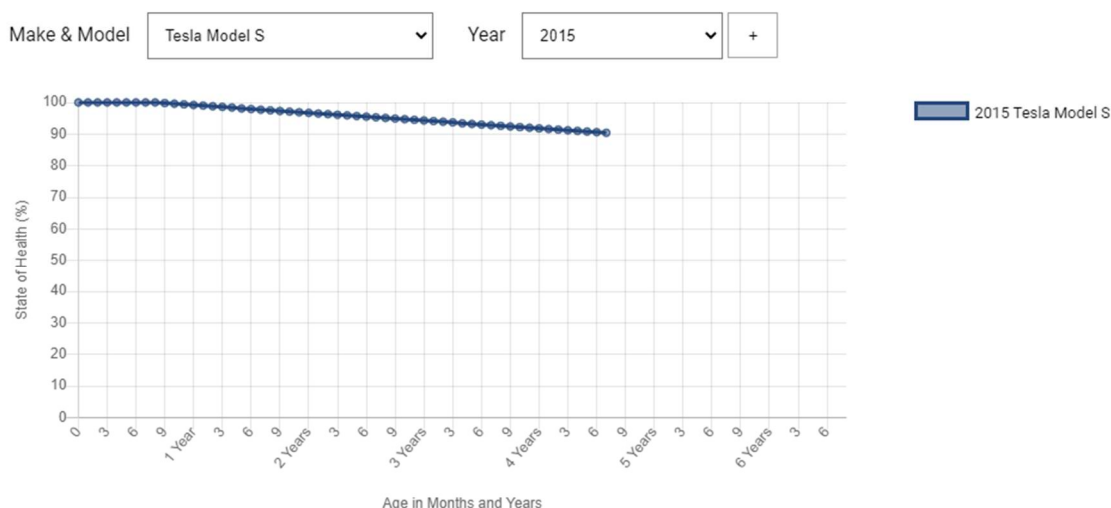
Kuva 14. Renaultin sähköautojen käyttäjien CanZe-ohjelmalla tarkastamien SOH-arvojen piste-kaavio. Kuvaajan arvot liitteessä 1. [30]

Kuvaajasta voidaan päätellä keskimäärin akun kunnon heikkenemisen lähenevän 80 prosenttia akun iän lähestyessä seitsemää vuotta.

6.3 Tesla Model S

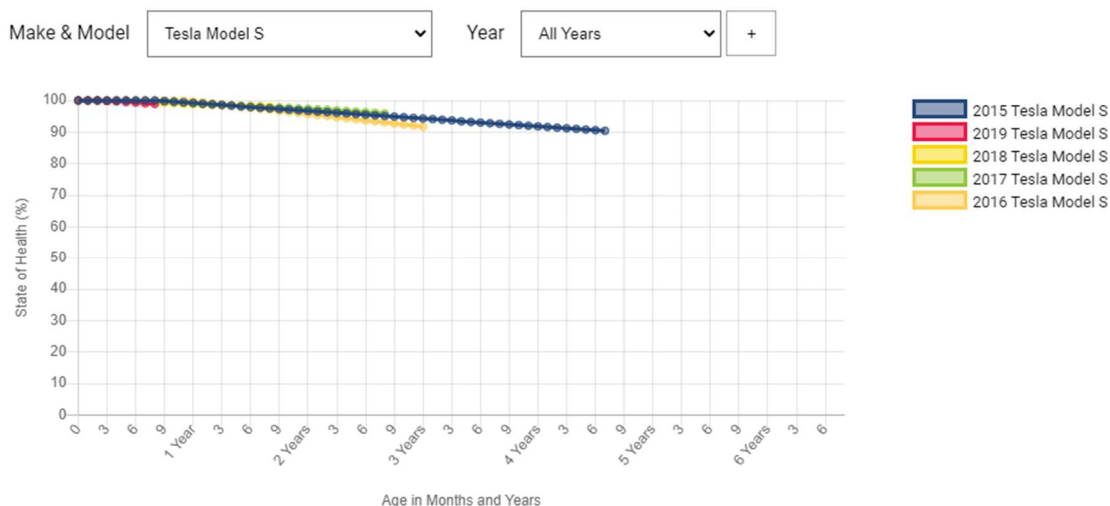
Tesla Motorsin (nykyään Tesla Inc.) valmistama Model S esiteltiin vuonna 2009. Myyntiin kyseinen malli tuli vuonna 2012. Tesla Model S:n akustoa oli alkuun saatavilla 60 kWh:n sekä 85 kWh:n kapasiteeteilla. Akkukennoina toimii Panasonicin valmistamat 18650-tyypin sylinterinmuotoiset litiumionikennot, joiden akkukemia on NCA. Kennoja 60 kWh:n akustossa on 6216 kappaletta ja 85 kWh:n akustossa 7104 kappaletta. Teslan akustoissa on aktiivinen nestekäyttöinen lämmönhallintajärjestelmä.

Tesla Model S:n ensimmäisten akkujen heikkenemisestä ei löydy juurikaan valmistajan jakamaa tietoa, mutta eri internetlähteiden mukaan akkujen heikkeneminen on ollut hidasta [31; 32]. EV Battery Degradation Comparison Toolin perusteella 2015 vuosimallin Tesla Model S:n akun heikkeneminen on ollut keskimäärin vain noin 10 % vajaan viiden vuoden aikana.



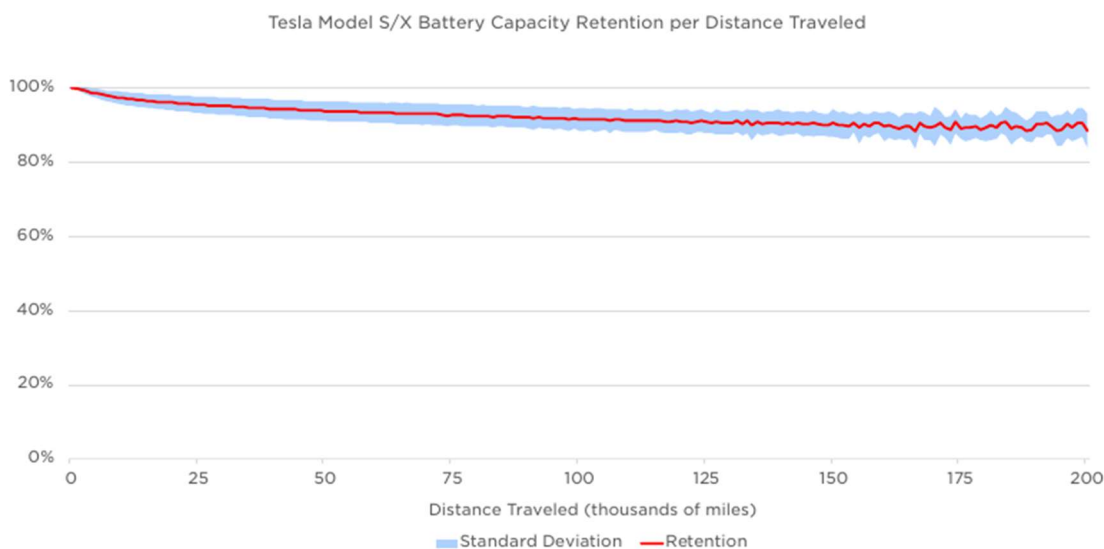
Kuva 15. EV Battery Degradation Comparison Toolin kuvaaja vuosimallin 2015 Tesla Model S:n akun heikkenemisestä. [28]

Otettaessa mukaan tarkastellun Model S:n vuosimallit 2016–2019, noudattaa kuvaaja hyvin samaa linjaa (kuva 16).



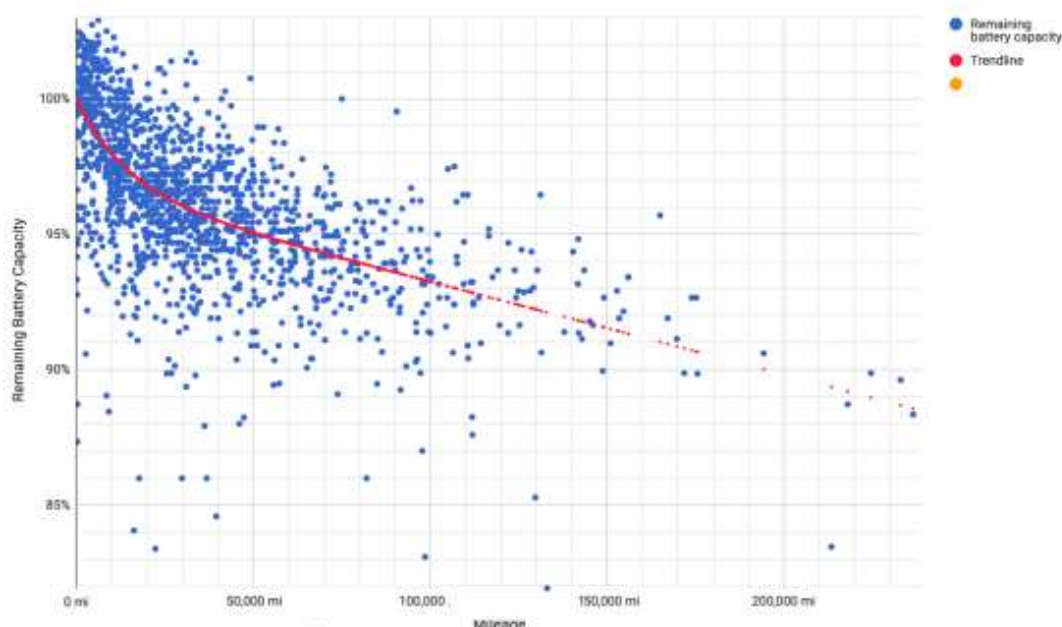
Kuva 16. EV Battery Degradation Comparison Toolin kuvaaja Model S vuosimallit 2015–2019 [28].

Teslan kesäkuussa 2020 julkaisema raportti kertoo 150 000–200 000 mailia (240 000–320 000 km) ajettujen Model S- ja Model X -mallien akkujen kapasiteetin vähentyneen vähemmän kuin 15 prosenttia. Kuvassa 17 raportin kuvaaja akun heikkenemisestä ajomäärään suhteutettuna. [33]



Kuva 17. Tesla Model S/X-mallien akun heikkeneminen ajomäärään suhteutettuna [33].

Teslan omistajien tai käyttäjien ilmoittamia akun kunnon lukemia on kerätty Tesla Motors Clubin ylläpitämällä keskustelusivustolla. Näistä luvuista koostetusta kuvaajasta (kuva 18) voidaan päätellä akun kunnon lähenevän 90 prosenttia kapasiteetista, kun kokonaisajomatka on 150 000 ja 200 000 mailin välillä. [34; 35; 36]



Kuva 18. Teslan käyttäjien ilmoittamia akun kapasiteetin arvoja. Akun kapasiteetti/ajomäärä. Tesla Motor Club. [34; 35; 36]

Kyseinen akkukysely on toteutettu niin, että täyteen latauksen jälkeen on käyttäjä ilmoittanut ajoneuvon ilmoittaman jäljellä olevan ajokilometrimäärän, ja sitä verrataan valmistajan ilmoittamaan EPA-normin mukaiseen ajomäärään. Kyselyn otanta on noin 1600 vastausta. [36]

7 Akkutekniikan tulevaisuus

Sähköauton akkutekniikan lähitulevaisuus pitää sisällään nykyisten akkukemioiden kehitystä. NCA- ja NCM-kemioiden kehityksessä tähdätään kasvattamaan nikkelin ja pienentämään koboltin osuutta.

Nykyaikaisen akun ylivoimaisesti kallein osa on koboltti. Tämä on johtanut siihen, että tutkijat kehittävät myös vaihtoehtoisia akkukemioita, jotka eivät sisällä kobolttia. Tällä tavalla sähköauton akun hinta putoaa dramaattisesti. Yksi kehitettävä kemia tulevaisuudessa on litium-rautafosfaattiakku, josta povataan jopa miljoona mailia kestäväää akkutekniikkaa. [37]

Yksi mahdollisista tulevaisuuden akkutyypeistä on SSB (Solid State Battery), jossa anodin ja katodin lisäksi myös elektrolyytti on kiinteä. Tämän takia akkukenno ei tarvitse erillistä kotelointia, joka vähentää tilantarvetta ja kasvattaa siten akun energiatihyyttä. Ongelmana on ollut anodina käytetyn kiinteän litiumin pintaan kasvava dendriitti, joka pahimmassa tapauksessa läpäisee erottimen ja aiheuttaa oikosulun. Ongelman poistamiseksi ovat Samsungin tutkijat ovat päälylstäneet litiumanodin ohuella hopea-hiilikeroxsella. [38]

Maailmalla on kehitteillä erilaisia akkuratkaisuja, joista toivotaan nykyisen litiumioniakun syrjäyttäjää. Esimerkkinä suola-akku sekä litium-ilma-akku.

8 Johtopäätökset / loppu

Suurimpia huolenaiheita sähköauton potentiaalisella ostajalla on akun kapasiteetin säilyminen. Uuden auton ostaja miettii auton jälleenmyyntiarvoa ja käytetyn sähköauton ostaja miettii, mitä tapahtuu, kun ajoakun takuu päättyy. Komponenttina akku on sähköauton kallein yksittäinen osa. Valmistajien jakamaa tietoa akkujen heikkenemisestä on heikosti saatavilla. Suurin osa maailmalta löytyvästä datasta on käyttäjien itse jakamaa tai kolmannen osapuolen keräämää tietoa. Autovalmistajien myöntämät ajoakutakuut ovat yleisesti 5–10 vuotta, yleisin takuu aika kahdeksan vuotta. Takuiden maksimikilometrimäärät ovat yleensä 160 000 kilometristä rajoittamattomiin kilometreihin. Toki joidenkin

valmistajien takuu ei kata akun heikkenemistä, joillakin se on rajattu 60—70 %:iin. [39; 40]

Akkutekniikka on tasapainottelua akun käyttöiän, valmistuskustannuksien, turvallisuuden, suorituskyvyn sekä ominaisenergian välillä. Kun jotain ominaisuuksista parannetaan, saattaa se huonontaa muita. Turvallisuuden voidaan tällä hetkellä sanoa olevan hyvällä mallilla, sähköautojen akkupaloja tapahtuu harvoin. Valmistuskustannuksia yritetään laskea esimerkiksi vähentämällä kalliin koboltin osuutta akuissa. Ominaisenergian ja energiatiheyden kehitys on akkuvalmistajilla yksi tärkeimmistä kehitysalueista, kuinka saada mahdollisimman paljon energiaa varastoitua mahdollisimman pieneen tilaan ja mahdollisimman kevyesti. Nämä vaikuttavat suuresti sähköajoneuvon kantamaan yhdellä latauksella.

Kirjallisuuskatsauksessa käsitellyistä sähköautomalleista Teslan valmistamalla Model S-mallilla on aktiivinen nestekäyttöinen ja Renault Zoella aktiivinen ilmakäyttöinen akuston lämmönhallintajärjestelmä. Akun onnistuneella lämmönhallinnalla vaikuttaa olevan suuri merkitys akun käyttöikään. Litiumioniakun kapasiteetin säilymiselle liian matala sekä liian korkeat lämpötilat ovat haitallisia. Optimaalinen akun käyttölämpötila on 15–35 °C [41]. Akun liian korkea lämpötila nopeuttaa akun heikkenemistä. Eri internetlähteiden perusteella tämän on ollut havaittavissa passiivisen ilmajäähdytyksen omaavissa Nissan Leafeissa lämpimissä ilmastoissa. Varsinaista tutkimusta ei asiasta löydy, mutta varsinkin keskustelufoorumeilla tämä on ollut todennettavissa käyttäjien omien kokemusten perusteella [42; 43]. Renault Zoessa on aktiivinen ilmajäähdytys ja internethakujen perusteella Zoen akustolla ei ole ollut heikkenemisen kanssa ongelmaa lämpimissäkään olosuhteissa.

Akkukemialla on myös merkitystä akun käyttöiälle. Teslan käyttämällä NCA-kemialla tiedetään olevan heikko syklinen kesto verrattuna esimerkiksi NCM-kemiaan. Syklistä kestoa on pidennetty rajoittamalla akkukennon maksimijännitettä ja Model S:n akun heikkeneminen on ollut vähäistä. Kun Nissan Leafin akkukemian muutoksella kasvatettiin kapasiteettia 24 kWh:sta 30 kWh:iin, maailmalla raportoitiin kyseisten akkujen heikkenevän ennenaikaisesti. Litiumioniakuille, akkukemiasta riippumatta, on haitallista tyhjäksi ajaminen ja täyteen lataaminen. Yksi mahdollinen syy Tesla Model S:n vähäiseen akun heikkenemiseen on suuri kapasiteetti (pitkä kantama), minkä takia akkua ei välttämättä

ole tarvinnut ajaa tyhjäksi ja ladata täyteen kuin satunnaisesti. Vuoden 2012 Model S 85 kWh -version 426 kilometrin kantama (EPA-normi) verrattuna vuosimallin 2011 Nissan Leafin 24 kWh -version 117 kilometriin (EPA-normi) on mahdollistanut akun lataustason pitämisen akulle suosiollisella tasolla.

Nyky aikaisten sähköautojen ensimmäisellä kuluneella vuosikymmenellä saatujen kokemusten perusteella akkujen heikkeneminen on ollut alhaisempaa kuin on pelätty. Akkutekniikan kehittyessä ja sähköautojen kannan kasvaessa, akustojen kestoiät todennäköisesti pitenevät, hinnat halpenevat, lataus nopeutuu ja ajomatka kasvaa. Sähköautot ovat tulleet jäädäkseen.

Lähteet

- 1 Timeline: History of the Electric Car. 2014. Verkkoaineisto. U.S. Department of Energy. <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Luettu 22.8.2020.
- 2 Electric car. 2020. Verkkoaineisto. Wikimedia Foundation, Inc. <https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car>. Luettu 22.8.2020.
- 3 Gustave Trouve Pioneers Electric Transport in 1881. 2018. Verkkoaineisto. UPS Battery Center Ltd. 2018. <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/gustave-trouve-electric-tricycle/>>. Luettu 23.8.2020.
- 4 History of the electric vehicle. 2020. Verkkoaineisto. Wikimedia Foundation, Inc. <https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle>. Luettu 23.8.2020.
- 5 Erstes Elektroauto der Welt kam aus Coburg. 2013. Verkkoaineisto. <<https://www.infranken.de/lk/coburg/erstes-elektroauto-der-welt-kam-aus-coburg-art-423047,4>>. Luettu 23.8.2020.
- 6 Citicar. 2020. Verkkoaineisto. Wikimedia Foundation, Inc. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Citicar>>. Luettu 23.8.2020
- 7 GM Electric Vehicles. <https://www.gmheritagecenter.com/featured/Electric_Vehicles.html>. Luettu 23.8.2020.
- 8 Linden, David & Reddy, Thomas B. 2002. Handbook of batteries, Third Edition. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- 9 BU-205: Types of Lithium-ion. 2019. Verkkoaineisto. Battery University, Cadex Electronics Inc. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 12.3.2020.
- 10 Hietaniemi, Marianna. 2015. Thermal Stability Of Chemicals Used In Lithium-Ion Batteries. Master's Thesis. University of Oulu Degree Programme for Chemistry.
- 11 Inside the battery of a Nissan Leaf. 2015. Verkkoaineisto. Qnovo Inc. <<https://qnovo.com/inside-the-battery-of-a-nissan-leaf/>> Luettu 9.8.2020.
- 12 EV / HEV Safety. 2012. Powerpoint-esitys. NISSAN MOTOR CO., LTD. <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/nissan_presentation-bob_yakushi.pptx>. Ladattu 9.8.2020.

- 13 Sähköautot ja Satakunnan teknologiametalliklusteri-selvitys. 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.prizz.fi/media/teknologiametallit/teknologiametallit-materiaalit/sahkoautot-ja-satakunnan-teknologiametalliklusteri.pdf>>. Luettu 9.8.2020.
- 14 NCM 811 Almost Account For A Fifth Of EV Li-Ion Deployment In China. 2019. Verkkoaineisto. <<https://insideevs.com/news/382356/ncm-811-ev-li-ion-deployment-china/>>. Luettu 9.8.2020.
- 15 Who is winning the global lithium ion battery arms race. 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.benchmarkminerals.com/who-is-winning-the-global-lithium-ion-battery-arms-race>>. Luettu 29.8.2020.
- 16 Sähköajoneuvojen lataussuositus. 2019. Suomen sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardointijärjestö SESKO Ry.
- 17 The Different EV Charging Connector Types. 2019. Verkkoaineisto. Enel X Inc. <<https://evcharging.enelx.com/eu/about/news/blog/552-ev-charging-connector-types>>. Luettu 29.7.2020.
- 18 Renault Pit Stop. 2019. Koulutusmateriaali. New Zoe, phase 2. Renault.
- 19 Lohilahti, Henri. 2018. Sähköautojen lataustavat ja -kytkennät. Insinööriytyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu Auto- ja kuljetustekniikka.
- 20 Falkman, Aarni. 2018. KUORMANHALLINNAN TOTEUTUS SÄHKÖAUTOJEN ÄLYKKÄISSÄ LATAUSJÄRJESTELMISSÄ. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto sähkötekniikan koulutusohjelma. <<https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158518/Diplomity%C3%B6%20Aarni%20Falkman.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Luettu 29.7.2020.
- 21 The new Taycan. 2019. PDF-esite. Porsche Finland. <<https://porsche.fi/wp-content/uploads/2019/12/Taycan-Brochure.pdf>>. Ladattu 8.8.2020.
- 22 Tesla Model 3 Long Range Dual Motor. 2020. Verkkoaineisto. EV Database. <<https://ev-database.org/car/1138/Tesla-Model-3-Long-Range-Dual-Motor>>. Luettu 8.8.2020.
- 23 Technology Overview. 2020. Verkkoaineisto. CHAdeMO Association. <<https://www.chademo.com/technology/technology-overview/>>. Luettu 6.8.2020.
- 24 CHAdeMO releases the latest version of the protocol enabling up to 400KW. 2018. Verkkoaineisto. CHAdeMO Association. <<https://www.chademo.com/chademo-releases-the-latest-version-of-the-protocol-enabling-up-to-400kw/>>. Luettu 7.8.2020.

- 25 CHAdeMO 3.0 released. 2020. Verkkoaineisto. CHAdeMO Association. <<https://www.chademo.com/chademo-3-0-released/>>. Luettu 7.8.2020.
- 26 BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries. 2019. Verkkoaineisto. Battery University, Cadex Electronics Inc. <https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries>. Luettu 30.8.2020.
- 27 Comparison of different EV batteries in 2020. 2020. Verkkoaineisto. Puhsevs.com. <<https://pushevs.com/2020/04/04/comparison-of-different-ev-batteries-in-2020>>. Luettu 16.8.2020.
- 28 EV Battery Degradation Comparison Tool. 2020. Verkkoaineisto. Geotab Inc. <<https://www.geotab.com/fleet-management-solutions/ev-battery-degradation-tool/>>. Luettu 16.8.2020.
- 29 Myall, Daniel; Ivanov, Dima; Larason, Walter; Nixon, Mark & Moller, Henrik. 2018. Accelerated reported battery capacity loss in 30 kWh variants of the Nissan Leaf. doi:10.20944/preprints201803.0122.v1.
- 30 Fisch, Bob & Meijer, Jeroen. 2020. CanZe Take a closer look at your ZOE. Verkkoaineisto. <<https://canze.fisch.lu/battery-health-status/>>. Luettu 6.9.2020.
- 31 Moloughney, Tom. 2020. If possible battery degradation is keeping you from buying a Tesla, watch this. Verkkoaineisto. InsideEVs. <<https://insideevs.com/news/405885/tesla-model-s-battery-after-146000-miles/>>. Luettu 1.10.2020.
- 32 Crider, Johnna. 2019. 7 Year Old Tesla Model S At 98% Battery Capacity Today. Verkkoaineisto. CleanTechnica. <<https://cleantechnica.com/2019/09/15/7-year-old-tesla-model-s-at-98-battery-capacity-today/>>. Luettu 1.10.2020.
- 33 Tesla Impact Report 2019. 2020. Verkkoaineisto. Tesla, Inc. <https://www.tesla.com/ns_videos/2019-tesla-impact-report.pdf>. Luettu 12.9.2020.
- 34 Steinbuch, Maarten. 2020. Tesla Model S battery degradation data. Verkkoaineisto. <<https://maartensteinbuch.com/2015/01/24/tesla-model-s-battery-degradation-data/>>. Luettu 12.9.2020.
- 35 MaxRange. 2020. Tesla Motors Club LLC. Verkkoaineisto. <<https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/maxrange.35978/>>. Luettu 12.9.2020.
- 36 Teslike, Troy. 2020. Tesla Battery Survey. Verkkoaineisto. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1c3m9wqlxPBo8ziDYVm5cHRzNCH-ZbtI_2vVhIXksX9Jc/edit#gid=657708069>. Luettu 12.9.2020.

- 37 Mullaney, Tim. 2020. Tesla and the science behind the next-generation, lower-cost, 'million-mile' electric-car battery. Verkkoaineisto. <<https://www.cnbc.com/2020/06/30/tesla-and-the-science-of-low-cost-next-gen-ev-million-mile-battery.html>>. Luettu 13.9.2020.
- 38 Samsung Presents Groundbreaking All-Solid-State Battery Technology to 'Nature Energy'. 2020. Verkkoaineisto. <<https://news.samsung.com/global/samsung-presents-groundbreaking-all-solid-state-battery-technology-to-nature-energy>>. Luettu 13.9.2020.
- 39 Gorzelany, Jim. 2019. Evaluating electric vehicle warranties. Verkkoaineisto. <<https://www.myeve.com/research/buyers-sellers-advice/evaluating-electric-vehicle-warranties>>. Luettu 13.9.2020.
- 40 Voelcker, John. 2016. Electric car battery warranties compared. Verkkoaineisto. <https://www.greencarreports.com/news/1107864_electric-car-battery-warranties-compared>. Luettu 13.9.2020.
- 41 Pesaran, Ahmad; Santhanagopalan, Shriram & Gi-Heon, Kim. 2013. Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications. Verkkoaineisto. <<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf>>. Luettu 13.9.2020.
- 42 Rall, Patrick. 2012. Nissan Leaf owners in hot climates experiencing battery problems. Verkkoaineisto. <<https://www.torquenews.com/106/nissan-leaf-owners-hot-climates-experiencing-battery-problems>>. Luettu 1.10.2020.
- 43 Capacity Loss on 2011-2012 LEAFs. 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.mynissanleaf.com/viewtopic.php?f=30&t=8802>>. Luettu 1.10.2020.

Renaultin akun heikkenemisen data CanZe-ohjelmalla

CanZe-ohjelmalla talteen otetut SOH-arvot Renaultin sähköautoista. Alkuperäiseen verkkoaineistoon on lisätty ikä kuukausina pistekaavion tekoa varten.

Nickname	Battery Health Status (%)	Purchased	Date measured	Age Months	Km (x1000)	Car
Technieq	114	2016.01	2018.03	26	10	Kangoo ZE 26kWh
Grejazi	109	2014.06	2016.02	20	19	Fluence
Henrik	105	2014.05	2015.10	17	18	Fluence
Crf	105	2015.12	2015.12	0	2	Zoe (R240)
most	105	2016.02	2016.03	1	2	Zoé (R240)
Jin Feng Goh	105	2017.02	2017.03	1	0	Zoé (R240)
Jin Feng Goh	103	2017.02	2017.06	4	12	Zoé (R240)
Fesch	102	2013.05	2017.01	44	28	Zoé
Fesch	102	2013.05	2019.01	68	60	Zoé
Berndte	102	2013.03	2015.10	31	47	Zoé
Schouf26	102	2013.03	2015.11	32	74	Zoé
mmezo	102	2014.06	2015.11	17	4	Zoé
mmezo	102	2014.06	2015.11	17	6	Zoé
ener73	102	2013.06	2015.12	30	62	Zoé
JBS-EP Tender	102	2013.03	2016.05	38	49	Zoe (Q210)
Fidelio	102	2013.03	2017.01	46	72	Zoé (Q210)
decalco	102	2013.03	2016.03	36	56	Zoe (Q210)
decalco	102	2019.03	2019.03	0	0	Zoé (Z40 R110)
Eros	102	2013.06	2018.01	55	113	Zoé (Q210)
Fivari	101	2013.12	2015.11	23	28	Zoé
Grejazi	101	2014.06	2017.03	33	40	Fluence
schussi	101	2016.07	2017.11	16	20	Zoé (R240)
Jin Feng Goh	101	2017.02	2017.11	9	24	Zoé (R240)
decalco	101	2017.02	2017.02	0	0	Zoé (Z40 R90)
Pixie	101	2018.10	2018.10	0	0	Zoe (Z40 R90)
Tor	100	2015.04	2015.10	6	12	Zoé (Q210)
Ole	100	2015.06	2015.10	4	22	Zoé

Tim	100	2015.09	2016.01	4	9	Zoé (Q210)
Jin Feng Goh	100	2017.02	2018.05	15	36	Zoé (R240)
decalco	100	2017.02	2017.08	6	15	Zoé (Z40 R90)
Pixie	100	2018.10	2019.01	3	4	Zoe (Z40 R90)
Alex	100	2019.06	2019.11	5	6	Zoe (Z40 R110)
Jimbo	99	2014.11	2015.11	12	10	Zoé
decalco	99	2017.02	2017.12	10	23	Zoé (Z40 R90)
JIN FENG GOH	99	2017.02	2018.09	19	48	Zoé (R240)
Pixie	99	2018.10	2019.06	8	9	Zoe (Z40 R90)
Sandy	98	2014.06	2015.10	16	13	Zoé
Sandy	98	2014.06	2017.06	36	28	Zoé (BMS updated)
beatus	98	2015.01	2016.03	14	10	Zoe (Q210black)
schussi	98	2016.07	2018.09	26	30	Zoé (R240)
schussi	98	2016.07	2020.08	49	49	Zoé (R240)
Jin Feng Goh	98	2017.02	2019.04	26	60	Zoé (R240)
Jin Feng Goh	98	2017.02	2019.08	28	72	Zoé (R240)
JIN FENG GOH	98	2017.02	2020.01	35	84	Zoé (R240)
Pixie	98	2018.10	2019.10	12	14	Zoe (Z40 R90)
Zuhriil	98	2017.09	2019.07	22	20	Zoe (Q210)
Peter	98	2015.11	2019.08	45	34	Zoe (R240) BMS 0854
Jesper	97	2011.11	2015.10	47		Zoé
FrancescoZOE	97	2013.10	2019.01	63	82	Zoé (Q210)
Pixie	97	2018.10	2020.05	19	14	Zoe (Z40 R90)
DompaEV	97	2017.02	2019.12	34	18	Zoe (Z40 R90)
Sandy	96	2014.06	2017.05	35	35	Zoé
THellweg	96	2015.12	2016.02	2	11	Zoe (Q210black)
bene	96	2015.10	2016.10	12	23	Zoe (R240)
Sandy	95	2014.06	2018.07	49	40	Zoé
Luis Mendes	95	2017.09	2019.09	24	29	Zoe (Z40 R90)
Andy	94	2013.10	2015.10	24	19	Zoé
Sandy	94	2014.06	2018.07	49	41	Zoé
THellweg	94	2014.08	2016.02	18	35	Zoe (Q210white)
Bruce	94	2015.05	2017.05	24	5	Zoé (Q210)
decalco	94	2017.02	2019.02	24	50	Zoé (Z40 R90)
Sandy	93	2014.06	2018.07	49	41	Zoé
Sandy	93	2014.06	2019.03	57	48	Zoé
Tho	93	2013.06	2015.10	28	25	Zoé

warpi	93	2014.03	2020.02	71	91	Zoe
Sten	92	2013.06	2015.11	29	21	Zoé
JoDa	92	2014.06	2015.12	18	27	Zoé
Jeroen	91	2013.11	2015.10	23	30	Zoé
Fer	91	2015.02	2015.10	8	18	Zoé (Q210)
Sandy	90	2014.06	2017.01	31	17	Zoé
Daniel	89	2013.08	2015.10	26	21	Zoé
Arthur	89	2013.07	2015.12	29	27	Zoé (Q210)
GertjanVB	89	2013.10	2015.12	26	44	Zoé
Tim	89	2013.09	2016.01	28	52	Zoé (Q210)
Sandy	88	2014.06	2017.05	35	26	Zoé
Gyuri	88	2012.11	2017.12	61	48	Fluence
Fer	87	2015.05	2015.10	5	12	Zoé (Q210)
cece74	86	2013.04	2015.12	32	51	Zoé
Claude	86	2013.05	2016.01	32	32	Zoé
Alexc	86	2013.12	2016.02	26	50	Zoe (R240grey)
Kai	86	2013.06	2016.12	42	54	Zoe (Q210)
FrancescoZOE	86	2013.10	2017.05	43	38	Zoé (Q210)
Sandy	85	2014.06	2017.05	35	27	Zoé
lingley	85	2013.06	2016.02	32	42	Zoe (Q210)
Rémy	84	2011.12	2015.10	46	39	Fluence
Crf	84	2015.12	2017.07	19	39	Zoe (R240)
Kai	84	2013.06	2016.03	33	45	Zoe (Q210)
Claude	84	2013.05	2016.10	41	40	Zoé
Bahrt	83	2018.08	2019.03	7	8	Zoe (R240)
Claude	82	2013.05	2017.01	44	41	Zoé
Lorenzo	81	2014.10	2016.09	23		Zoé
evzone	80	2015.06	2017.05	23	18	Zoé
mohikaner57	80	2012.06	2018.08	74	65	Fluence
Gyuri	79	2012.11	2019.01	74	70	Fluence
Ritxi	78	2012.02	2015.10	44	66	Fluence
iwi	76	2013.06	2017.12	54	19	Zoé
Peter	73	2015.11	2019.07	44	33	Zoe (R240)
Bernd	72	2014.12	2017.01	26	17	Zoé (Q210)