



Miska Penttinen

Sähköautojen litiumioniakkujen luonnollinen kuluminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

17.4.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Miska Penttinen
Otsikko: Sähköautojen litiumioniakkujen luonnollinen kuluminen
Sivumäärä: 34 sivua + 3 liitettä
Aika: 17.4.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka
Ohjaajat: Toimitusjohtaja Juha Seppälä, Diagno Finland Oy
Tekninen johtaja Jouko Sohlberg, AKL
Lehtori Pasi Kovanen

Tässä insinöörityössä selvitettiin sähköautojen korkeajänniteakkujen kapasiteetin alenemaa luonnollisen kulumisen seurauksena. Työssä selvitettiin, mitä käytetyn auton korkeajänniteakun kunnolta voidaan kohtuudella olettaa. Työn tavoitteena oli lisätä yleistä tietämystä korkeajänniteakkujen kulumisesta.

Tutkimuksessa mitattiin 45 sähköauton akun SOH-arvo. Testatuista autoista 22 oli täyssähköautoja ja 23 ladattavia hybridautoja. Testausmenetelmiä oli kaksi: todelliseen kapasiteetin mittaamiseen perustuva testi sekä BMS-järjestelmän mitta-arvoista luettava pikatesti.

Mittaustulokset kirjattiin ja niitä verrattiin arvioon iän sekä ajomäärän mukaan. Mitattujen tulosten perusteella tehtiin regressioanalyysi. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että korkeajänniteakkujen kapasiteetti alenee odotetusti. Mittaustulosten mukaan ladattavien hybridautojen korkeajänniteakut kuluvat nopeammin kuin täyssähköautojen akut. Arvioitaessa kuluneisuutta iän ja ajomäärän mukaan regressioanalyysin enustekaavioita voidaan pitää oletuksena siitä, mitä voidaan kohtuudella olettaa. Virhemarginaalina voidaan pitää 5–7:ää prosenttiyksikköä.

Avainsanat: sähköauto, ladattava hybridauto, korkeajänniteakku, litiumioniakku, kapasiteetti, käytetty auto, kuluminen, takuu, virhevastuu

Abstract

Author:	Miska Penttinen
Title:	Electric Vehicle Li-Ion Batteries Normal Wearing
Number of Pages:	34 pages + 3 appendices
Date:	17 April 2023
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Automotive Engineering
Professional Major:	Automotive Electronics Engineering
Supervisors:	Juha Seppälä, Managing Director, Diagno Finland Oy Jouko Sohlberg, Technical Director, AKL Pasi Kovanen, Senior Lecturer

In this thesis, the decrease of the capacity of the high-voltage batteries of electric vehicles as a result of normal wear was investigated. The thesis was commissioned by Diagno Finland Oy and The Finnish Central Organisation for Motor Trades and Repairs (AKL). The thesis investigated what can reasonably be assumed from the condition of a used car's high-voltage battery. The aim of the work was to increase general knowledge regarding the wear and aging of high-voltage batteries in vehicle use.

In the investigate part, the SOH value of 45 electric vehicle batteries was measured. Out of the tested vehicles, 22 were fully electric vehicles (EV) and 23 were plug-in hybrid vehicles (PHEV). There were two testing methods. A test based on real capacity measurement and a quick test that reads the measured values of the BMS system.

The measurement results were recorded and compared to the estimation based on the age and mileage. Based on the measured results, a regression analysis was performed. The results of the study indicated that the capacity of high-voltage batteries decreases as expected. According to the measurement results, the high-voltage batteries of plug-in hybrid vehicles wear out faster than the batteries of fully electric vehicles. When evaluating wear and aging according to age and mileage, the regression analysis prediction charts can be considered as an assumption of what can be reasonably assumed by age and mileage. The margin of error can be considered 5–7 percentage points.

Keywords: electric car, electric vehicle, EV, plug-in hybrid, PHEV, high-voltage battery, Lithium-ion battery, capacity, used car, wearing, warranty, guaranty, State of Health, SOH

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköautokanta Suomessa	2
3	Autokaupan virhevastuu	5
4	Akkuihin liittyvät toiminnallisuudet	7
4.1	Akun yleinen rakenne ja toiminta	7
4.2	Korkeajänniteakut	7
4.3	Battery Management System BMS	7
4.4	Lataustavat	8
5	Yleiset akkutyypit sähköautoissa	8
5.1	Yleistä	8
5.2	Litium-rautafosfaatti LFP	9
5.3	Litium-mangaanioksidi LMO	10
5.4	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi NMC	10
5.5	Litium-nikkeli-alumiinioksidi NCA	10
5.6	Litium-titanaatti LTO	11
6	Li-ioniakkujen vaurioituminen	11
6.1	Sisäiset vauriot	11
6.2	Ulkoisen tekijän aiheuttamat vauriot	12
6.3	Syväpurkautuminen	12
6.4	Ylilataaminen	12
7	Varastointi ja säilytys	13
8	Akkujen kuluminen	13
8.1	Yleistä	13
8.2	Syklinen kuluminen	14
8.3	State of Health SOH	15
8.4	Pikalatauksen vaikutus akkujen kulumiseen	15
8.5	Teoreettinen elinkaari	16

9	Tutkimus SOH-arvon kehittymisestä iän ja ajomäärän suhteen	19
9.1	Yleistä	19
9.2	Tulosten analysointi ja luotettavuus	19
9.3	Akkujen kuluminen iän mukaan	20
9.4	Akkujen kuluminen ajomäärän mukaan	25
10	Yhteenveto ja päätelmät	29
11	Jatkokehityskohteet	31
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1: Tutkitut autot	
	Liite 2: Regressioanalyysin yhteenveto ja tulostus	
	Liite 3: Ennustekaaviot	

Lyhenteet

BMS: *Battery Management System*. Akunhallinnan ohjainlaite.

DOD: *Depth of Discharge*. Akun purkutaso.

EV: *Electric Vehicle*. Täyssähköauto.

PHEV: *Plug-in Hybrid Vehicle*. Ladattava hybridauto.

SOC: *State of Charge*. Akun varaustaso.

SOH: *State of Health*. Akun kunnon tila.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä selvitettiin sähköautojen akkukapasiteetin alenemaa luonnollisen kulumisen seurauksena. Työn tilaajina olivat Diagno Finland Oy sekä Autoalan keskusliitto AKL.

Ajoneuvokanta sähköistyy voimakkaasti. Vuoden 2022 joulukuussa Suomen tie liikenteessä oli noin 150 000 sähköautoa, joista noin 45 000 oli ensirekisteröity tai tuotu käytettynä Suomeen vuonna 2021. Autoalan toimijoiden on pystyttävä jakamaan sähköautoihin liittyvää luotettavaa ja tutkittua tietoa. Työn tavoitteena oli selvittää, miten akkujen SOH-arvo kehittyy iän ja ajomäärän suhteen. Tutkimuksella pyrittiin arvioimaan, mitä SOH-arvolta voidaan kohtuudella olettaa. Tutkimuksella ja sen tuloksilla lisätään yleistä tietämystä sähköautojen akkujen ikääntymisestä sekä ikääntymisen vaikutuksesta mm. auton toimintamatkaan.

Automaahantuoja, jälleenmyyjät ja erityisesti vaihtoautoliikkeet ovat haastavassa tilanteessa, sillä kuluttajien oletukset akkujen kestävydestä eivät välttämättä ole todenmukaisia. Oletetun elinkaaren kannalta on ymmärrettävä, milloin akun kapasiteetin ja SOH-arvon alenema on luonnollista kulumista ja milloin kyse on virheestä tuotteessa.

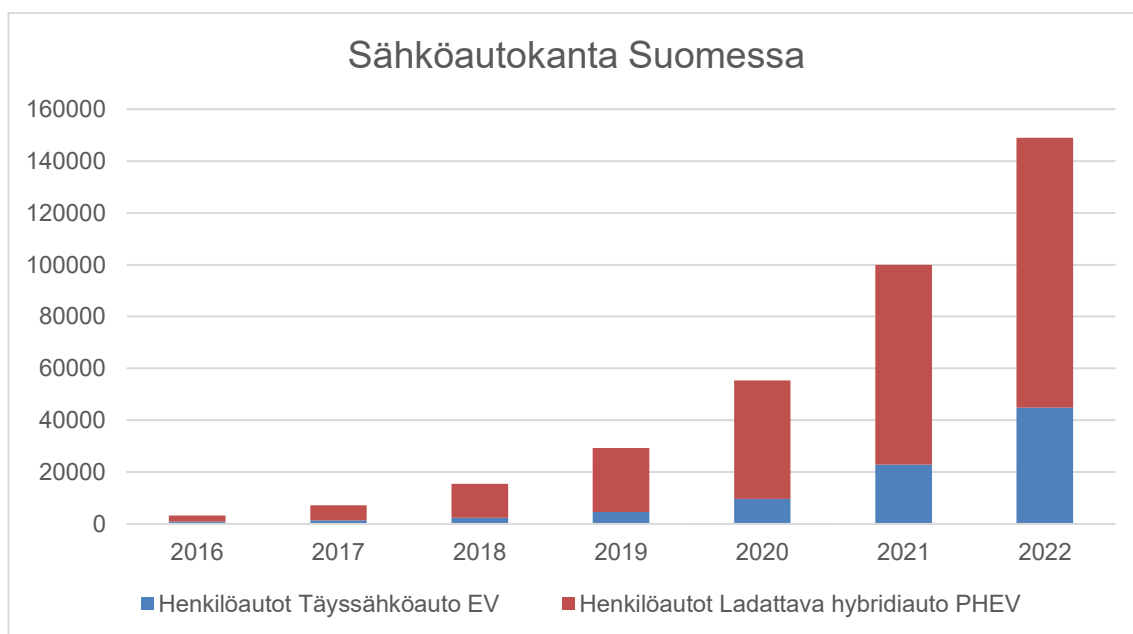
Työn alussa kerrotaan sähköautokannan kehittymisestä. Sen jälkeen kuvataan autokaupan virhevastuun käytänteitä. Virhevastuun periaatteet on tiedostettava arvioitaessa tuotteen kuntoa. Lisäksi teoriaosiossa tarkastellaan sähköautojen korkeajänniteakkuja sekä niiden kulumiseen vaikuttavia tekijöitä. Kulumisesta määritettiin matemaattisesti teoreettinen malli, jota käytettiin arviona tutkittujen akkujen kulumisesta.

Tutkimuksessa selvitettiin luonnollisen kulumisen aiheuttamaa akun kapasiteetin alenemaa iän ja ajomäärän suhteen täyssähköautoissa ja ladattavissa hybridi-autoissa. Tutkimuksessa analysoitiin mitattua tietoa sähköautojen akkujen

SOH-arvosta. Mitatuista arvoista tehtiin regressioanalyysi, jonka perusteella tehtiin ennustekaaviot SOH-arvon kehittymisestä iän ja ajomäärän suhteen.

2 Sähköautokanta Suomessa

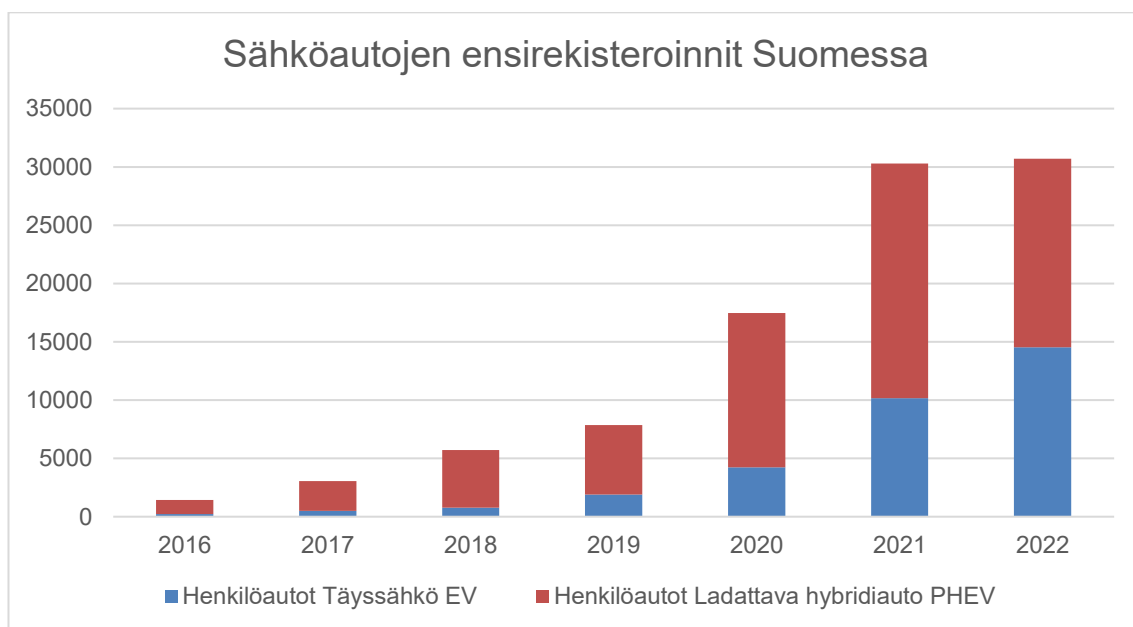
Sähköautokannan kasvu on ollut voimakasta Suomessa vuodesta 2018 lähtien. Määrällisesti eniten sähköautoja on ladattavina hybridiautoina. Täyssähköautojen määrä on noussut voimakkaasti vuosina 2020–2022 (Liikennekäytössä olevat henkilöautot käyttövoimittain 2023). Suomessa liikennekäytössä sähköautoja oli joulukuussa 2022 lähes 150 000 kappaletta, joista noin 105 000 on ladattavia hybridiautoja ja noin 45 000 on täyssähköautoja. (Kuva 1.)



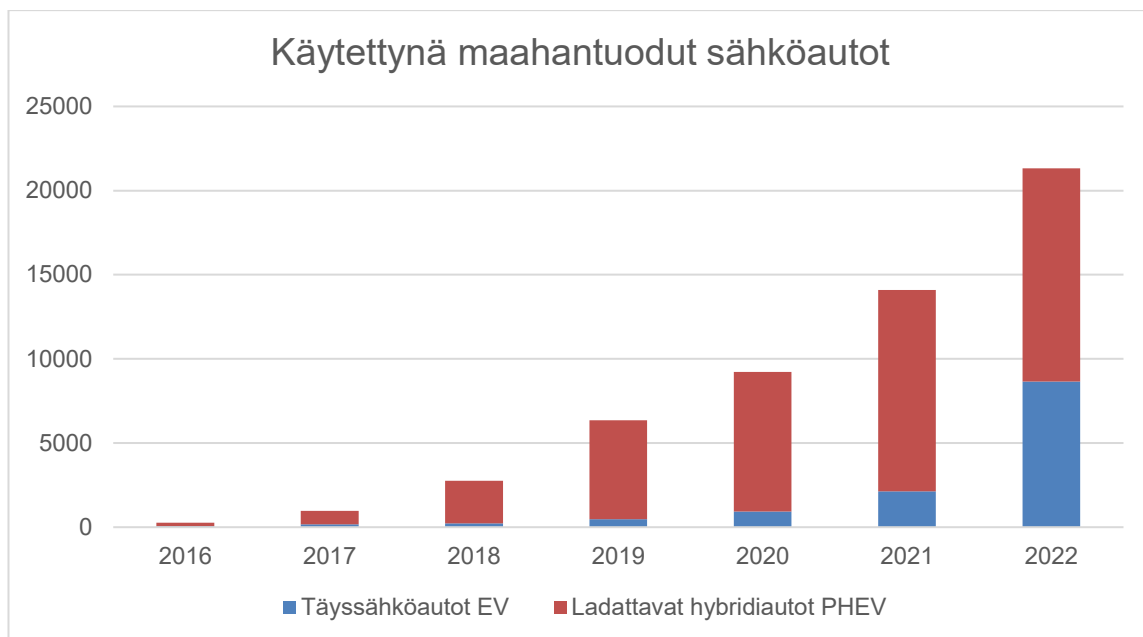
Kuva 1. Sähköautokannan kehitys Suomessa 2010–2022 (Liikennekäytössä olevat henkilöautot 31.12. muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima ja Vuosi 2023).

Rekisteröintilastojen (kuvat 2 ja 3) mukaan sähköautokanta on kasvanut vuositasolla Suomeen ensirekisteröityjen ja käytettynä maahantuotujen autojen myötä. Ladattavien hybridiautojen osuus on toistaiseksi enemmistö rekisteröidyistä sähköautoista. Ensirekisteröinneissä näkyy tasaantuminen vuoden 2022 kohdalla viivästyneiden autojen toimitusten vuoksi. Toimitusvaikeudet

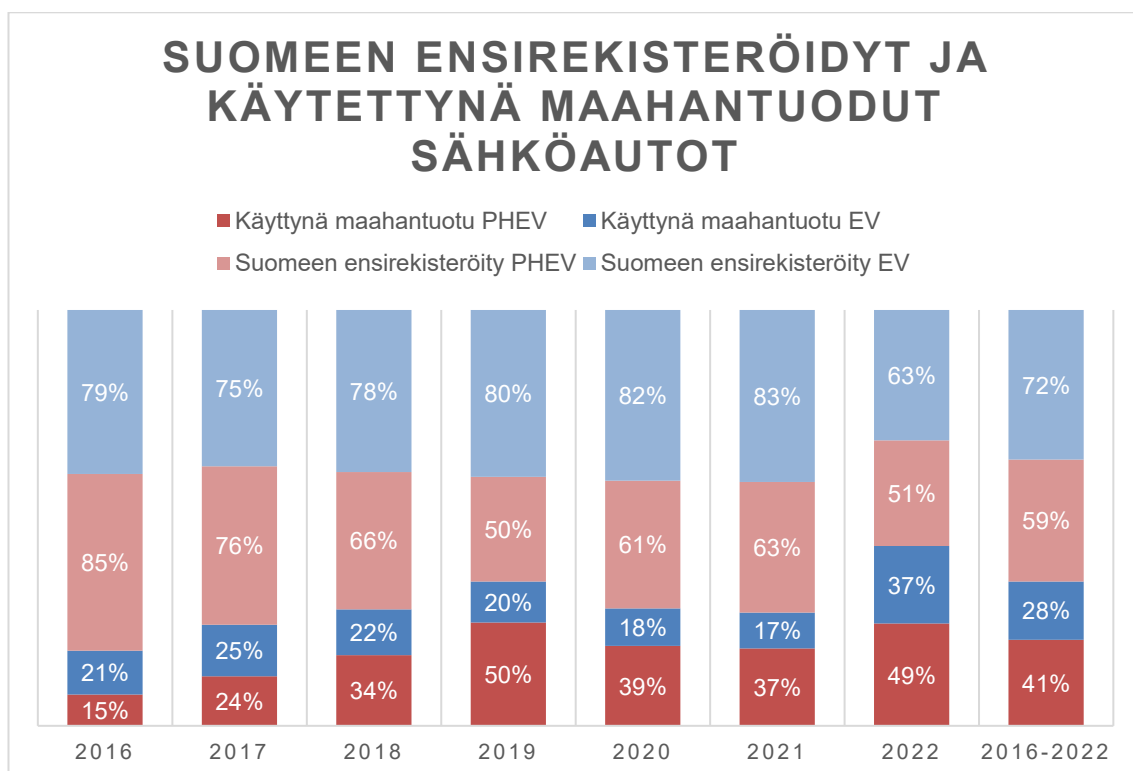
johtuvat mm. globaalin komponenttipulasta. Käytettynä maahantuotujen sähköautojen määrän kasvu on jatkunut myös vuonna 2022. Käytettynä maahantuotuja autoja on noin kolmannes sähköautokannasta (kuva 4). Käytettynä maahantuotujen täyssähköautojen osuus rekisteröinneistä vuonna 2022 oli 37 %. Ladattavien hybridautojen vastaava osuus oli 49 %. (Henkilöautojen ensirekisteröinnit muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima, Kuukausi ja Vuosi 2023; Käytettynä maahantuodut ajoneuvot muuttujina Ajoneuvoluokka, Käyttövoima, Käyttö ja Kuukausi 2023; Henkilöautojen ensirekisteröinnit muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima, Kuukausi ja Vuosi 2023; Käytettynä maahantuodut ajoneuvot muuttujina Ajoneuvoluokka, Käyttövoima, Käyttö ja Kuukausi 2023.)



Kuva 2. Ensirekisteröidyt sähköautot Suomessa vuosittain 2016–2022 (Henkilöautojen ensirekisteröinnit muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima, Kuukausi ja Vuosi 2023).



Kuva 3. Käytettynä maahantuodut sähköautot vuosittain 2016–2022 (Käytettynä maahantuodut ajoneuvot muuttujina Ajoneuvoluokka, Käyttövoima, Käyttö ja Kuukausi 2023).



Kuva 4. Suomeen ensirekisteröityjen ja käytettynä maahantuotujen sähköautojen osuus sähköautokannasta 2016–2022 (Henkilöautojen ensirekisteröinnit)

muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima, Kuukausi ja Vuosi 2023; Käytettynä maahantuodut ajoneuvot muuttujina Ajoneuvoluokka, Käyttövoima, Käyttö ja Kuukausi 2023).

3 Autokaupan virhevastuu

Autokaupan reklamaatiotilanteissa sovelletaan kuluttajansuojalakia autokaupan ja yksityishenkilön välisissä kaupoissa sekä kauppalakia yritysten välisissä kaupoissa. Kuluttajansuojalain 5. luvun 12. §:n mukaan auton tulee soveltua niihin käyttötarkoituksiin, joihin samantyyppistä autoa yleensä käytetään. Sen tulee vastata kyseiseltä automallilta yleisesti odotettavaa tavanomaista laatua, kestävyyttä ja muita ominaisuuksia, joita ostaja voi kohtuudella olettaa, kun otetaan huomioon tiedot, jotka myyjä on esittänyt tavaraa markkinoitaessa tai muuten ennen kaupan tekoa. Autossa katsotaan olevan kuluttajansuojalain 5. luvun 13. § mukainen virhe, jos auto ei vastaa 12. §:n vaatimuksia tai se ei ominaisuuksiltaan ole sopimuksen mukainen. Autossa katsotaan olevan virhe, jos siinä ilmenee tekninen vika, se ei kestävyydeltään ja muuten vastaa sitä, mitä kuluttajalla on autolta perusteltua aiheutta olettaa, se on huonommassa kunnossa kuin auton ikä, ajomäärä tai hinta antaa aiheutta olettaa tai siinä on takuun piiriin kuuluva vika. (Laki kuluttajansuojalain muuttamisesta 2021; Uuden auton virhe; Käytetyn auton virhe.)

Takuu on valmistajan tai maahantuojan myöntämä veloitukseton turva, jonka aikana esiintyvät virheet korjataan asiakkaalle veloituksetta. Takuukorjaukset eivät ole ennalta ehkäiseviä huoltotoimenpiteitä. Takuu ei kata käyttäjäperäisiä tai luonnollisesta kulumisesta aiheutuvia virheitä. Takuun päättymisen ei välttämättä poista myyjän vastuuta virheellisestä tuotteesta. Virhevastuullisen tahon osoittamisen kannalta olennainen tieto on auton omistushistoria. Onko auto ensimmäisellä omistajalla, vai myyty käytettynä? Onko auto ensirekisteröity Suomeen vai tuotu käytettynä maahan? Vastuutahot autokaupassa on esitetty taulukossa 1. Virhevastuussa voivat olla autoliike, maahantuoja tai valmistaja. Käytetyn auton kaupassa virhevastuussa on kuluttajansuojalain mukaan auton myyjäliike. Jos myydyssä autossa takuu on voimassa, virhevastuu jakautuu takuunmyöntäjien kesken.

Myyjäliike ei ole virhevastuussa käytetyssä autossa olevasta viasta eikä ostaja voi vedota virheeseen, jos viasta tai ominaisuudesta on kerrottu ennen kaupan tekoa esimerkiksi kirjallisesti kauppasopimuksessa, vian syynä on ulkoinen vaurio, tai huollon laiminlyönti tai vika johtuu luonnollisesta normaalista kulumisesta. (Autokaupan ja korjausten vastuutahot.)

Taulukko 1. Vastuutahot autokaupassa (Autokaupan ja korjausten vastuutahot).

	Uusi auto	Käytetty auto liik- keestä	Käytetty auto yk- sityishenkilöltä
Kuluttajansuoja- lainmukainen vir- hevastuu	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Autoliike ✓ Maahan- tuoja ✓ Valmistaja 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Autoliike 	
Takuu	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Autoliike ✓ Maahan- tuoja ✓ Valmistaja 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Autoliike ✓ Maahan- tuoja ✓ Valmistaja 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maahan- tuoja ✓ Valmistaja
Myyjäliikkeen an- tama takuu	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Autoliike 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Autoliike 	
Kaupan yhtey- dessä sovittu eril- linen lisäturva / vakuutus	<ul style="list-style-type: none"> ✓ (Autoliike) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Muu taho (esim. va- kuutusyhtiö) 	

4 Akkuihin liittyvät toiminnallisuudet

4.1 Akun yleinen rakenne ja toiminta

Akku on sähkökemiallinen energiavarasto, jonka toiminta perustuu potentiaalieroihin elektrodien välillä. Akut koostuvat positiivisesta elektrodista katodista, negatiivisesta elektrodista anodista, väliaineesta elektrolyytistä ja elektrodien välillä olevasta erottimesta. Kun akkua varataan ionit siirtyvät katodin aktiiviselta materiaaalilta anodin aktiiviselle materiaaalille. Erotin estää elektrodien toisiinsa osumisen, mutta sallii ionien siirtymisen. Akkua purettaessa ionit kulkevat päinvastaiseen suuntaan. Kapasiteetti kuvaa akusta saatavan energian määrää. Akut luokitellaan ja nimetään yleensä niiden elektrodimateriaalin perusteella. (Akut 2020.)

4.2 Korkeajänniteakut

Sähköauton korkeajänniteakut koostuvat matalajännitteisistä, alle 60 V:n moduuleista. Moduulien määrä on valmistajakohtainen. Moduulien sisällä on yksittäisiä kennoja, joiden nimellisjännite on tavallisesti litium-ioniakuissa (Li-ion) noin 3,2–3,8 V sekä nikkeli-metallihydridiakuissa (NiMH) 1,2 V. Korkeajänniteakun kokonaisjännite on noin 200–800 V. Korkeajännitepiiri on suljettu 2-johdinjärjestelmä. Se on yhteydessä ajoneuvon 12 V:n järjestelmään vain BMS-järjestelmän kommunikaation kautta. (Thaler & Watzenig 2014: 22.)

4.3 Battery Management System BMS

Sähköauton käytön kannalta tärkein komponentti on akunhallinnan ohjainlaite BMS (Battery Management System). Ohjainlaitteen pääominaisuuksia ovat elektroniikan ja lämmönhallinta, diagnoositoiminnot, eristysvastuksen seuranta ja kommunikointi ajoneuvon muiden järjestelmien kanssa. Elektroniikanhallintajärjestelmä koostuu kennojen balansoinnista, latauksen hallinnasta ja useista akun tilaan liittyvistä tiedoista, kuten järjestelmän kokonais- ja kennojännitteestä, kokonaisvirrasta ja varaus sekä purkutilasta. Lämmönhallintajärjestelmä

mittaa ja säätää akun lämpötilaa. Eristysvastusmittaus vertaa eristysvastusta korkeajännitepiiriin ja ajoneuvon välillä. (Thaler & Watzenig 2014: 5.) BMS ei edellytä käyttäjältä toimenpiteitä, ja sen ohjelmisto sekä toiminnallisuudet ovat valmistajakohtaisia.

4.4 Lataustavat

Sähköautojen lataamisesta annetaan erityisvaatimuksia standardissa SFS 6000-7-722. SESKOn asiantuntijaryhmä on laatinut suosituksen SK 69-1:2021 täydentämään standardia. Lataustapoja on neljä. Lataustapa 1 on kevyiden sähköajoneuvojen lataus. Tämä lataustapa on tarkoitettu kevyen pienitehoisen ajoneuvon, mm. sähköskootterin, lataukseen 230 V:n kotitalouspistorasiasta. Lataustapa 1 ei sovellu autokäyttöön. Lataustapa 2 on hidas lataus. Tämä lataustapa on tarkoitettu sähköajoneuvon lataukseen, jos lataustavan 3 mukaista pistorasiaa ei ole käytettävissä. Lataustapa 3 on peruslataus. Tämä on suositeltavin sähköajoneuvon lataustapa. Lataustapa 4 on tehollataus. Tällä lataustavalla akustoon syötetään tasasähköä suurella virralla auton ulkopuolisesta tasasähkölaturista. Tehollatauksesta käytetään myös nimitystä pikalataus. (Sähköajoneuvojen lataussuositus 2021.)

5 Yleiset akkutyypit sähköautoissa

5.1 Yleistä

Täyssähköautojen ja ladattavien hybridiautojen yleisimpiä akkuja ovat Li-ioniakut, joita useimmat autovalmistajat käyttävät. Itselataavissa hybridiautoissa yleisiä ovat nikkeli-metallihydridiakut, joita mm. Toyota käyttää. (Pollard 2022.) Ajoneuvokäytössä uusi kiinteäelektrolyyttinen akku (Solid State Battery) on energiatihedeltään perinteistä Li-ioniakkua parempi. Sen etuna on myös paloturvallisuus. (Moore-Coyler 2022). Li-ioniakut esiteltiin markkinoille 1990, ja ne yleistyivät nopeasti ajoneuvokäytössä 2000-luvulla. Li-ioniakun nimelliskennojännite on tyypillisesti 3,2 ja 3,8 V:n välillä. Taulukossa 2 esitetään tarkemmin eri Li-ioniakkujen ominaisuuksia. Li-ioniakkujen hyvä ominaisuus on pieni

itsepurkautumiskyky. Varastoitujen Li-ioniakkujen kapasiteetin purkautuminen on vain noin 1–5 % kuukaudessa. Li-ioniakut voidaan jakaa alalajeihin niiden elektrodimateriaalien perusteella. (Warner 2015: 75–77.)

Taulukko 2. Litium-ioniakkujen ominaisuuksia (Warner 2015: 77).

	Litium-ioniakut				
Kemiallinen kuvaus	LFP	LMO	LTO	NCA	NMC
Energia (Wh / kg)	80–130	105–120	70	80–220	140–180
Energiatehous (Wh / l)	220–250	250–265	130	210–600	325
Teho (W / kg)	1400–2400	1000	750	1500–1900	500–3000
Tehotehous (W / l)	4500	2000	1400	4000–5000	6500
Syklinen ikä	1000–2400	> 500	> 4000	> 1000	1000–4000
Kennojännite (V)	3,2–3,3	3,8	2,2–2,3	3,6	3,6–3,7
Itsepurkautuminen (% / kk)	< 1 %	5 %	2–10 %	2–10 %	1 %
Kustannus per kWh (\$)	400–1200	400–900	600–2000	600–1000	500–900
Käyttölämpötila (°C)	-20–60	-20–60	-40–55	-20–60	-20–55

5.2 Litium-rautafosfaatti LFP

LFP-akun katodi koostuu litium-rautafosfaattista. Nimelliskennojännite on 3,2–3,3 V. LFP-akkujen ennustetaan lisääntyvän ajoneuvokäytössä, sillä LFP-akuilla on korkea tehokyky ja suhteellisen alhainen hinta (Gupta 2020). LFP-akut soveltuvat hyvin raskaaseen ajoneuvokalustoon; kuitenkin mm. Hyundai käyttää

tai tulee käyttämään LFP-akkuja myös henkilöautomalleissa (NCM, NCA vai LFP: akkukatodien sota käydään kolmen kemian välillä 2022). LFP-akuilla on hyvä kyky ottaa vastaan ja luovuttaa energiaa. LFP on turvallisempi akkukemia kuin muut Li-ionikemiat. (Warner 2015: 79; BU-205: Types of Lithium-ion 2021.)

5.3 Litium-mangaanioksidi LMO

LMO-akun katodi koostuu litium-mangaanioksidista. Nimelliskennojännite on 3,8 V. Sillä on korkea gravimetrinen energiatiheys ja hyvä teho. LMO-akun syklinen kesto lyhyempi on verrattuna muihin Li-ioniakkuihin, joten LMO-akkukemia ei ole ajoneuvosovelluksissa suosittu. (Warner 2015: 80; BU-205: Types of Lithium-ion 2021.)

5.4 Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi NMC

NMC-akun katodi koostuu litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidista. Joskus akkukemia ilmaista myös muodossa NCM. Nimelliskennojännite on 3,6–3,7 V. NMC-akut ovat tällä hetkellä yleisin akkukemia ajoneuvokäytössä, sillä niillä on korkeampi gravimetrinen energiatiheys ja korkeampi jännite kuin esimerkiksi LFP-akuilla. NMC-akkuja käyttävät mm. Mercedes-Benz ja Nissan (Man 2022). (Warner 2015: 79; BU-205: Types of Lithium-ion 2021.)

5.5 Litium-nikkeli-alumiinioksidi NCA

NCA-akun katodi koostuu litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidista. NCA-akku on ominaisuuksiltaan samakaltainen kuin NMC-akku. Nimelliskennojännite on 3,6 V. NCA-akkujen syklinen kesto on hyvä. Tesla Model S, Model Y, Model X ja Model 3 -merkkisissä autoissa on varustetason mukaan NMC- tai NCA-akku. (BU-205: Types of Lithium-ion 2021.)

5.6 Litium-titanaatti LTO

LTO-akun anodi koostuu litium-titanaatista. Sen käyttölämpötila-alue soveltuu alhaisempiin lämpötiloihin, kuin muiden Li-ioniakkujen. LTO-akun tehotiheys on korkea, vaikkakin sen nimellisjännite on noin 2,2–2,3 V. Syklinen kesto on erinomainen. LTO-akkujen valmistuskustannukset ovat korkeammat kuin NMC- tai LFP-akkujen, joten LTO-akkujen käyttö ajoneuvokäytössä on vähäistä. (Warner 2015: 80; BU-205: Types of Lithium-ion 2021.)

6 Li-ioniakkujen vaurioituminen

6.1 Sisäiset vauriot

Yleisin sisäinen vaurio on akun sisäisen resistanssin kasvu. Tämä ilmenee yleensä akun elinkaaren lopussa. Kun elektrolyytti on kosketuksessa elektrodien kanssa, muodostuu kiinteää SEI-kerrosta (Solid Electrolyte Interface). SEI-kerros estää ionien virtauksen elektrodien välillä. Akkujen ajallinen ja syklinen kuluminen johtuvat pääasiassa SEI-kerroksesta. SEI-kerros kasvattaa sisäistä resistanssia. Kriittisen pisteen jälkeen sisäinen resistanssi kasvaa niin suureksi, että ionit eivät enää pysty siirtymään elektrodien välillä. Korkea lämpötila ja maksimijännite nopeuttavat SEI-kerroksen muodostumista. (Arcus 2016.) Toisen sisäisen resistanssin kasvuun vaikuttava tekijä on litiumpinnoitus. Vaurio tapahtuu, kun kenno joutuu yli- tai alijännitteeseen. Alhainen lämpötila lisää litiumpinnoituksen mahdollisuutta. Tässä vauriossa litiumionit jäävät kiinni tyypillisesti anodin pinnalle. Mitä enemmän litiumia jää kiinni anodin pinnalle, sitä enemmän pinnoitusta esiintyy. Sisäisen resistanssin kasvaessa kapasiteetti alenee.

Muu sisäinen vaurio voi liittyä elektrolyytin kemialliseen hajoamiseen. Reaktio voi johtaa kaasujen kehittymiseen kennon sisällä. Kaasujen muodostuminen on eksoterminen reaktio. Reaktiossa lämpötila nousee hallitsemattomasti ja johtaa akun syttymiseen. Tilannetta kutsutaan lämpöryntäykseksi. (Thaler & Watzenig 2014: 38.) Vaurio yleensä syntyy, kun Li-ioniakkua käytetään korkeassa

lämpötilassa tai ylivarataan. Korkeissa lämpötiloissa myös erotin voi vaurioitua. Riippuen erottimen materiaalista se voi sulaa tai sen huokoset voivat alkaa tukkeutumaan. Monet kennovalmistajat lisäävät kennoihin lisäaineita, joilla pyritään estämään ennenaikaista lämpöryntäystä. Kiinteän elektrolyytin akut ovat paloturvallisempia, kuin perinteiset Li-ioniakut.

6.2 Ulkoisen tekijän aiheuttamat vauriot

Akkujen ulkoinen vaurio aiheutuu yleensä, kun akkuja käytetään jatkuvasti korkealla kuormituksella tai korkeassa lämpötilassa. Ulkoiset iskut mm. ajoneuvokolareissa saattavat vaurioittaa akkuja. Isku saattaa aiheuttaa muutoksia esimerkiksi faasirakenteeseen. Jos kolarin aiheuttama isku puhkaisee kennon metallikuoren, aiheutuu elektrolyytin nopea menetys, joka voi johtaa lämpöryntäykseen. (Warner 2015: 141–142; Rahn & Wang 2013: 17–18.)

6.3 Syväpurkautuminen

Akun jännite ei koskaan laske 0 volttiin, vaikka se olisi täysin purettu. Vaikka akun varaus (SOC) olisi 0 % ja purkusyvyys (DOD) 100 %, elektrodeilla on aktiivisia materiaaleja, jotka aiheuttavat potentiaalieron elektrodien välille. Syväpurkautumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa kennojännite laskee alle valmistajan määrittämän alarajan. Syväpurkautumisen seurauksena akku esivaurioituu aina ja sen elinkaari lyhenee. (Petrovic 2021: 23–24.) Syväpurkautuminen voi tapahtua esimerkiksi, jos akku varastoidaan liian alhaisella varauksella ja säilytyslämpötila on alhainen. Ajoneuvokäytössä BMS-järjestelmä estää käytön aikaisen syväpurkautumisen.

6.4 Ylilataaminen

Akun varaaminen liian korkealla jännitteellä aiheuttaa välittömiä fysikaalisia vaurioita akkuun ja lyhentää sen elinkaarta. Täyden akun varaaminen aiheuttaa lämpötilan nousua ja voi johtaa lämpöryntäykseen. Lämpötilan nousu

vaurioittaa akkua ja sen elinkaari lyhenee. Ajoneuvokäytössä BMS-järjestelmä estää täyden akun varaaminen.

7 Varastointi ja säilytys

Varastoinnissa tulee ottaa huomioon akkujen itsepurkautumisominaisuus. Itsepurkautumisella tarkoitetaan kapasiteetin laskua, kun akku on varastoituna ilman kuormitusta. Itsepurkautuminen vaihtelee akkutyypin välillä. Itsepurkautuminen johtuu pääasiassa termodynaamisesta epävakauksesta akun aktiivisissa massoissa ja kennokomponenteissa. Suurin osa itsepurkautumisesta johtuvasta kapasiteetin alenemisesta voidaan palauttaa varaamalla akku uudelleen. Itsepurkautumien aiheuttaa kuitenkin myös pysyvää kapasiteetin alenemaa. Jos akku on pitkään varaamatta, palautettavan kapasiteetin määrä alenee. Lämpötila vaikuttaa itsepurkautumisominaisuuteen. Korkea lämpötila kiihdyttää itsepurkautumista.

Li-ioniakkujen itsepurkautumisesta johtuva kapasiteetin alenema on tyypillisesti 1–5 % kuukaudessa. Varastoinnissa tulee huomioida SOC-arvon vaikutus kapasiteetin alenemaan. 40 %:n SOC-arvolla nimellislämpötilassa varastoitu tyypillinen Li-ioniakku säilyttää varatusta kapasiteetistaan yli 95 %, mutta 100 %:n SOC-arvolla varastoitu akku vain noin 80 %. (Petrovic 2021: 38–39, 109–110.) Varastoinnissa tulee aina ottaa huomioon valmistajan ohjeet.

8 Akkujen kuluminen

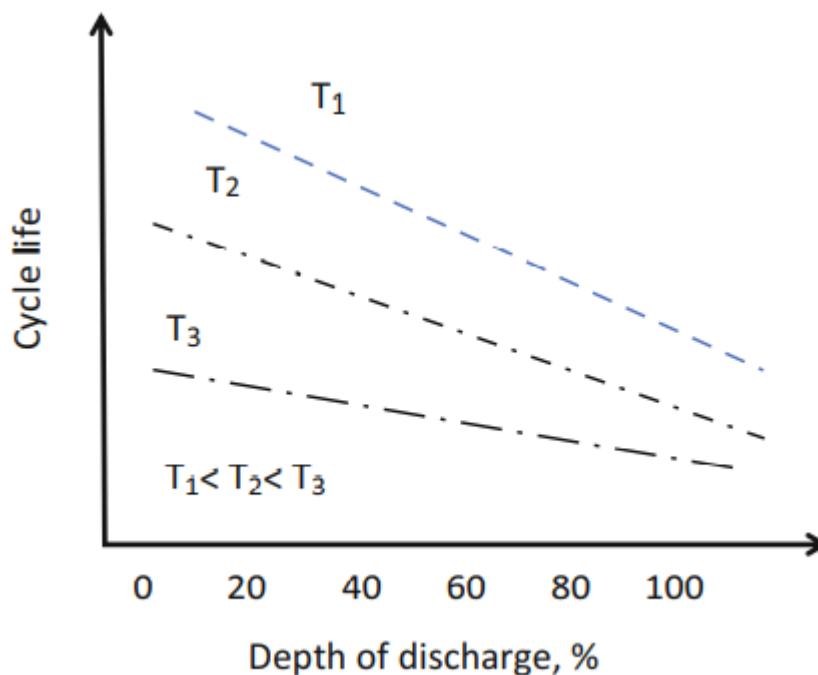
8.1 Yleistä

Akkujen kuluminen on luonnollista. Useat autovalmistajat myöntävät korkeajänniteakuille noin 8 vuoden ja 160 000 km takuun (Gillmore 2022). Takuuehtona yleensä määritetään vähimmäiskapasiteetti esimerkiksi 70 % alkuperäisestä, jonka alle kapasiteetti ei saa laskea takuuajana. Normaali pysyvä kapasiteetin alenema on noin 2–3 % vuodessa riippuen akkutyypistä (Pollard 2022). Yleensä kapasiteetin alenema on voimakkaampaa akun ensimmäisten käyttövuosien

aikana (Laurell 2022: 17). Takuuehdot on määritelty akun elinkaaren mukaan huomioiden luonnollisen kulumisen ja erilaiset käyttöolosuhteet. Li-ioniakkujen kulumiseen vaikuttaa kolme päätekijää: lämpötila, lataus- ja purkusykli sekä aika. Kulumista tapahtuu jokaisessa akkukennossa. Eroja kennojen välillä voi esiintyä.

8.2 Syklinen kuluminen

SOC (State of Charge) kuvaa akun varaustilaa. 100 % SOC tarkoittaa, että akku on täyteen varattu. 0 % SOC tarkoittaa, että akun varaus on purettu. DOD (Depth of Discharge) kuvaa, kuinka alas akun varaus on purettu. 100 % DOD tarkoittaa, että akun varaus on täysin purettu. Kun akku on täyteen varattu, DOD on 0 %. Purkusyklien määrä kuvaa syklien määrää, jolloin akun varaus on purettu täydestä tyhjään (DOD 0–100 %). Lataussyklien määrä kuvaa syklien määrää, jolloin akku on varattu tyhjästä täyteen (SOC 0–100 %). Syklinen kestoikä kuvaa syklien määrää, jolloin akun kapasiteetti on laskenut tyypillisesti alle 80 %. Syklinen kestoikä on laskennallinen arvio, joka perustuu laboratoriotesteihin vakio-olosuhteissa. Sykliseen kestoikään vaikuttavat voimakkaasti käyttölämpötila ja DOD (kuva 5). Syklinen ikä laskee lämpötilan noustessa ja DOD:n kasvaessa. (Petrovic 2021: 39–41.)



Kuva 5. DOD:n ja lämpötilan vaikutus sykliseen keston (Petrovic 2021: 41).

8.3 State of Health SOH

SOH-arvo kuvaa akun kuntoa verrattuna alkuperäiseen arvoon. Yleisesti SOH-arvo määritetään kapasiteetin alenemana. Auton toimintamatra alenee suoraan verrannollisesti suhteessa kapasiteettiin. SOH-arvo on suuntaa antava mittari akun kunnosta. Eri valmistajat painottavat SOH korjauskertoimilla eri asioita. SOH-arvo määritetään yleensä akun kapasiteetin tai sisäisen resistanssin avulla, joskus myös molempien. Sisäiseen resistanssiin vaikuttavat voimakkaasti akun ikääntymisestä johtuva SEI-kerros ja litiumpinnoitus. SOH-arvon määrittämisessä tulee ottaa huomioon mm. lämpötilan vaikutus, SOC ja purkuvirran määrä. (Sihvo 2022: 20, 67–73.)

8.4 Pikalatauksen vaikutus akkujen kulumiseen

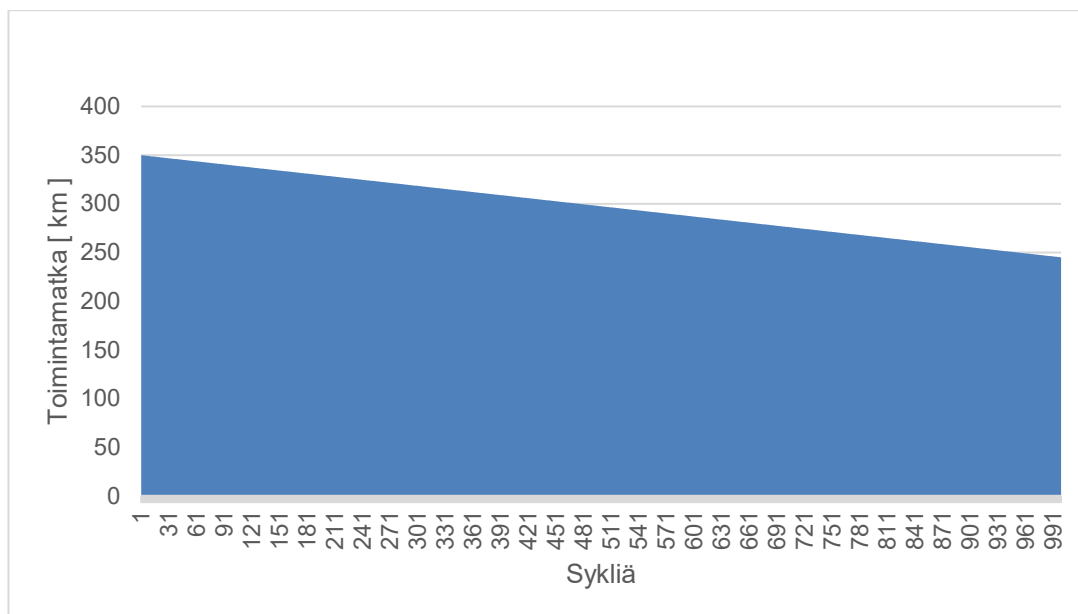
Vuonna 2022 julkaistun tutkielman mukaan pikalataus vaikuttaa SOH-arvoon heikentävästi. 200 000 km ajatussa autossa, jonka akkua on ladattu pääasiassa pikalatauksella (lataustapa 4), SOH-arvo on noin 73 %. Saman ajosuorituksen

vertailuauton, jonka akkua on ladattu pääasiassa peruslatauksella (lataustapa 3) SOH-arvo on noin 90 %. (Kalaja 2023: 59.)

8.5 Teoreettinen elinkaari

Akkujen elinkaareen ja kestoikää vaikuttavat monet eri tekijät. Käyttäjä voi pidentää käyttöikää suosimalla pääasiassa peruslatausta (lataustapa 3) sekä pitämällä akun varaustason 20–80 %:n alueella. Oletettu laskennallinen elinkaari voidaan arvioida akkutyypille suunnitellun syklisen kestoiän ja ajosuoritteen perusteella. Li-ioniakkujen syklinen kesto on akkutyypistä riippumatta keskiarvoisesti vähintään noin 1000 sykliä. Oletetun kapasiteetin aleneman ollessa 2 % vuodessa, saavutetaan 70 %:n kapasiteetti alkuperäiseen verrattuna noin 17,6 vuoden kuluttua (kaava 1). Alkuperäisen toimintamatkan ollessa 350 km, laskennallinen kesto voidaan määrittää integroimalla kuvan 6 kuvaaja kaavalla 2. Laskennalliseksi kestoksi saadaan 297 500 km. 17 vuoden käyttöiällä vuosittainen keskimääräinen ajosuorite on 17 500 km (kaava 3). SOH-arvon kehitys on arvioitu edellä määritettyjen tietojen perusteella kuvissa 7 ja 8. Laskennassa kulumisen oletetaan olevan lähes lineaarista. Laskennallisia arvioita hyödynnetään vertailuarvona tutkimusosassa.

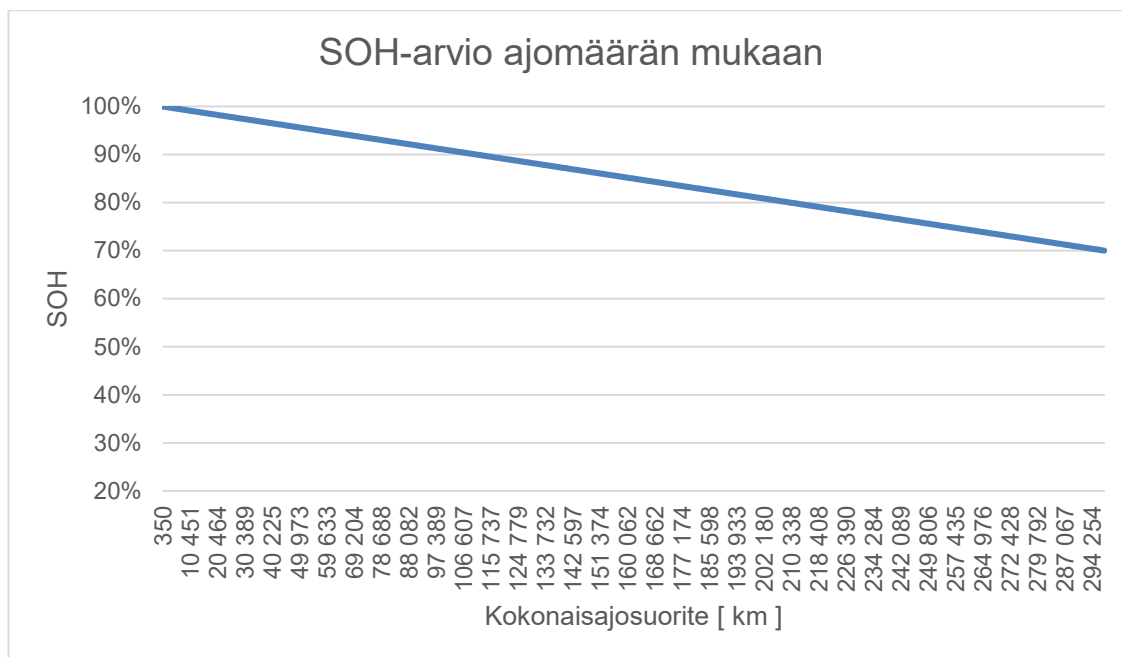
$$a = \frac{\ln 0,7}{\ln 0,98} = 17,6 \text{ v} \quad (1)$$



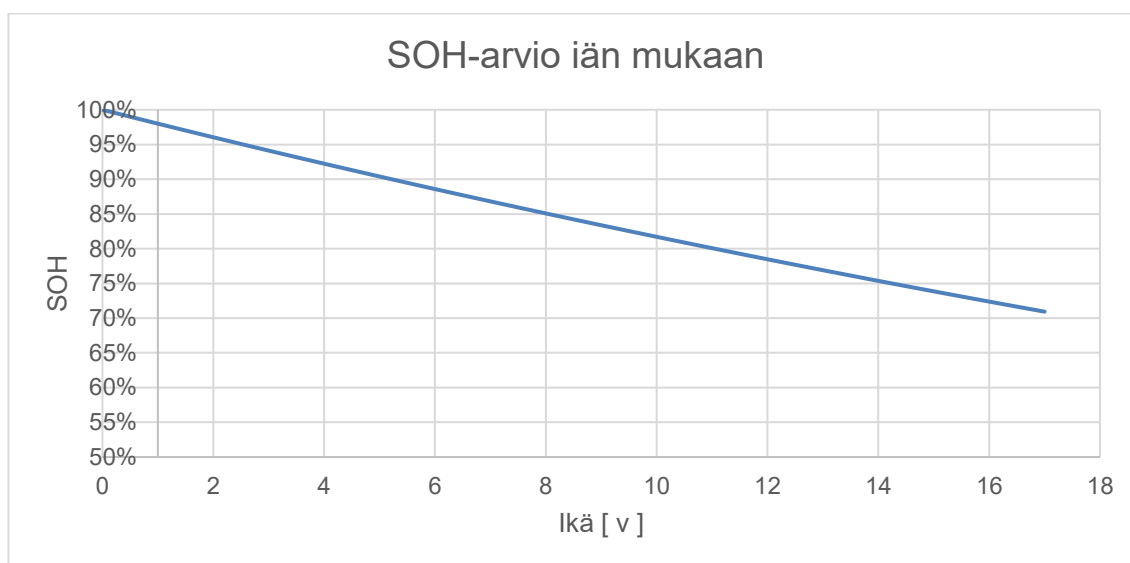
Kuva 6. Toimintamatkan alenema suhteessa syklien määrään. Kestoiäksi on määritetty 1000 sykliä.

$$245 \text{ km} \cdot 1000 + 0,5 \cdot 105 \text{ km} \cdot 1000 = 297\,500 \text{ km} \quad (2)$$

$$\frac{297\,500 \text{ km}}{17 \text{ v}} = 17\,500 \text{ km} / \text{v} \quad (3)$$



Kuva 7. Arvio SOH-arvon kehittymisestä ajosuoritteen suhteen. Arvion mukaan 70 %:n SOH-arvo saavutetaan 297 500 km:n kuluttua.



Kuva 8. Arvio SOH-arvon alenemisesta iän mukaan. Arvion mukaan 70 %:n SOH-arvo saavutetaan noin 17 vuoden kuluttua.

9 Tutkimus SOH-arvon kehittymisestä iän ja ajomäärän suhteen

9.1 Yleistä

Tutkimuksessa selvitettiin 22 täyssähköauton ja 23 ladattavan hybridauton SOH-arvo. Yleisin akkukemia oli NMC. Tutkittujen autojen ikä oli 1–9 vuotta ja kokonaisajosuorite oli välillä 4 500–380 000 km. Tutkimustulokset on listattu taulukkoon liitteessä 1. Valitut autot olivat pääosin vaihtautoliikkeiden myynnissä olevia vaihtautoja.

SOH-arvo mitattiin AVILOO-testilaitteella. Testausmenetelmiä oli kaksi. Todelliseen kapasiteetin mittaamiseen perustuva PREMIUM-testi sekä Flash-pikatesti. PREMIUM-testissä korkeajänniteakun varaus puretaan kerran ajamalla täydestä varauksesta yleensä 10 % varaukseen. Tiedyt täyssähköautot ajetaan kuitenkin 5 %:n varaukseen ja esimerkiksi Mitsubishi Outlander PHEV ladattava hybridauto ajettiin 30 %:n varaukseen. Ladattavien hybridautojen PREMIUM-testiajo suoritettiin yhden ajosyklin aikana. Täyssähköautojen PREMIUM-testiajo suoritettiin useamman ajosyklin aikana. Flash-pikatestin SOH-arvo perustuu akunhallinnan ohjainlaitteen mitta-arvoihin ja on valmistajakohtainen. PREMIUM-testin osuus tutkituista ladattavista hybridautoista oli 58,3 % ja täyssähköautoista 59,1 %.

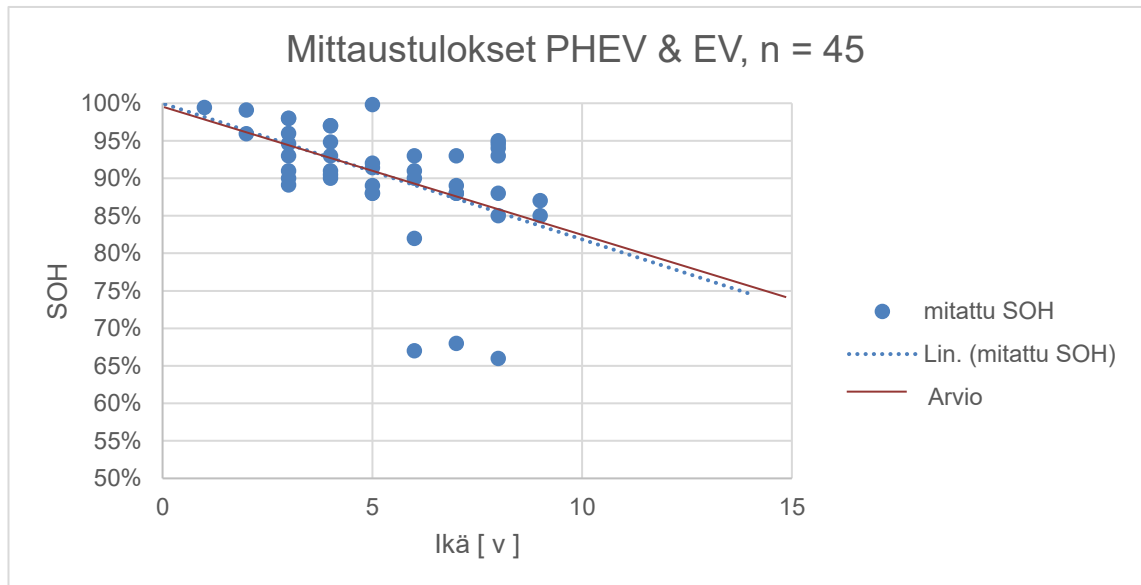
9.2 Tulosten analysointi ja luotettavuus

Mittaustulokset analysoitiin iän sekä ajomäärän mukaan. Tuloksia tarkasteltiin yhteisenä otantana ladattavista hybridautoista ja täyssähköautoista sekä jaettuna käyttövoiman mukaiseen kategoriaan. Tuloksia verrattiin teoreettiseen laskennalliseen arvioon. Mitattujen arvojen perusteella tehtiin regressioanalyysi, jonka selittäviksi tekijöiksi määritettiin käyttövoima, ikä, ajomäärä sekä arviot SOH-arvosta iän ja ajomäärän suhteen. Regressioanalyysi on menetelmä, jossa tutkitaan yhden tai useamman selittävän muuttujan yhteyttä selitettävään muuttujaan. Regressioanalyysin tulokset on kirjattu liitteeseen 2.

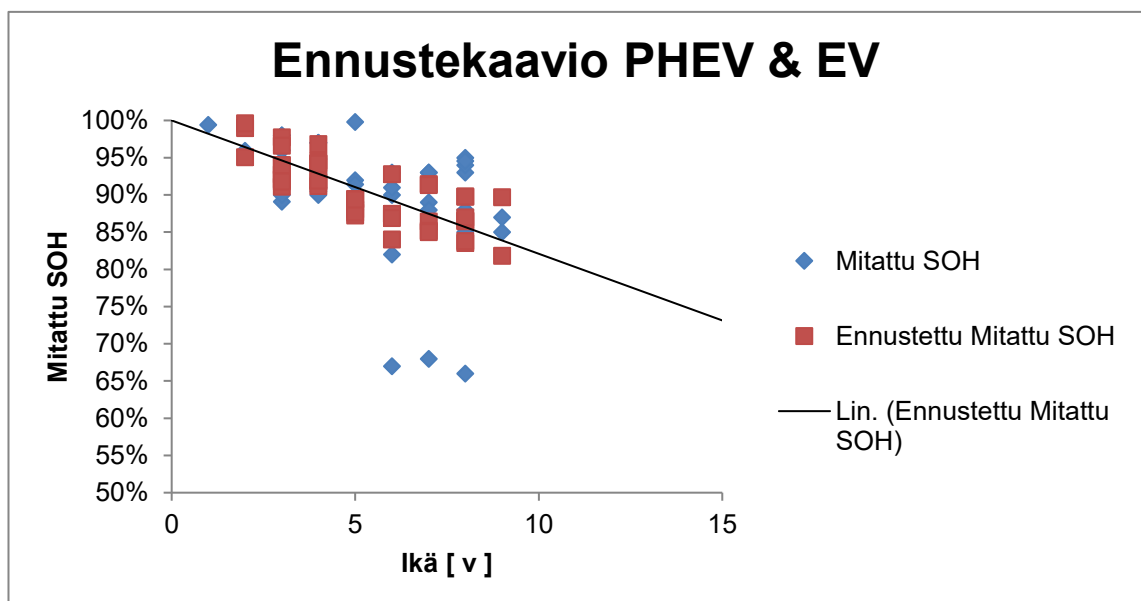
Regressioanalyysistä luotujen mallien ennusteiden luotettavuus on hyvä, kun otetaan huomioon keskihajonnan vaihteluväli. Luotettavuustasoksi määritettiin 95 %. Täyssähköautojen ja ladattavat hybridautojen ennustetuista arvoista 97,0 % vastaavat mitattuja arvoja. Keskivirhe ennustetun ja mitatun välillä on 6,4 prosenttiyksikköä. Ladattavat hybridautojen ennustetuista arvoista 93,8 % vastaavat mitattuja arvoja. Keskivirhe ennustetun ja mitatun välillä on 7,1 prosenttiyksikköä. Täyssähköautojen ennustetuista arvoista 93,4 % vastaavat mitattuja arvoja. Keskivirhe ennustetun ja mitatun välillä on 3,6 prosenttiyksikköä.

9.3 Akkujen kulumisen iän mukaan

Täyssähköautojen ja ladattavien hybridautojen keskihajonta arvioituun SOH-arvoon iän mukaan on 6,65 prosenttiyksikköä. Arvio, mittaustulokset sekä mitattujen arvojen perusteella lineaarisesti sovitettu suuntaviiva näkyvät kuvassa 9. Suuntaviiva vastaa erittäin hyvin arviota SOH-arvon kehittymisestä. Kolme mittaustulosta poikkeaa merkittävästi keskiarvosta, joten näissä voidaan olettaa olevan akkuvaurio. Korjattu keskihajonta, jossa vaurioituneet poikkeavat akut on poistettu mittaustuloksista, on 4,02 prosenttiyksikköä. Mitattujen tulosten perusteella tehdyn regressioanalyysin mukaan SOH-arvon ennustetaan laskevan 70 prosenttiin noin 15 vuoden kuluessa (kuva 10). Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %. Ennusteen perusteena oleva mittausdata sisältää myös mahdollisesti vaurioituneet akut.



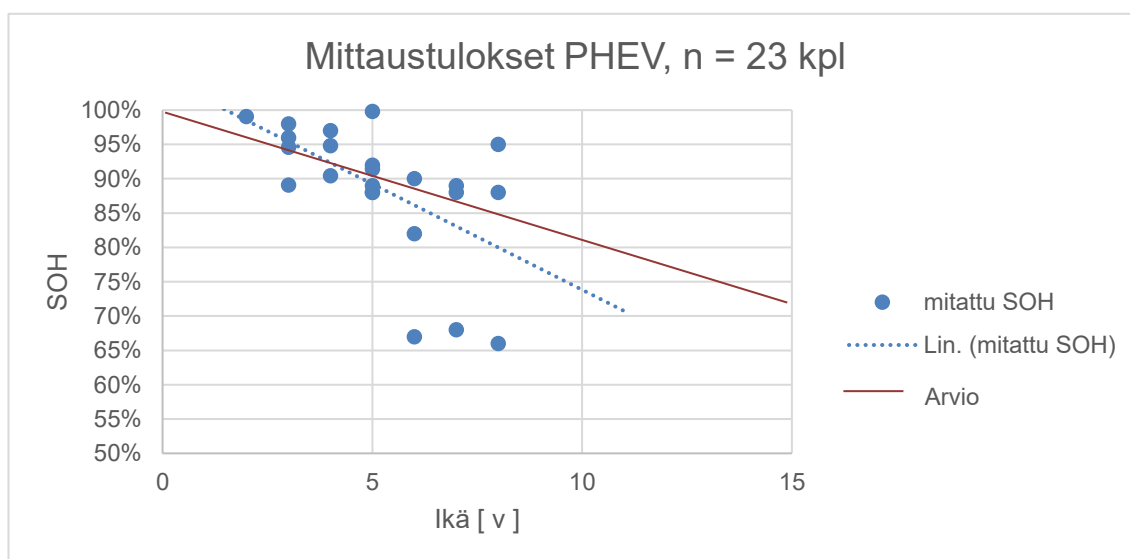
Kuva 9. Mitattu SOH-arvo ladattavista hybridiautoista ja täyssähköautoista.



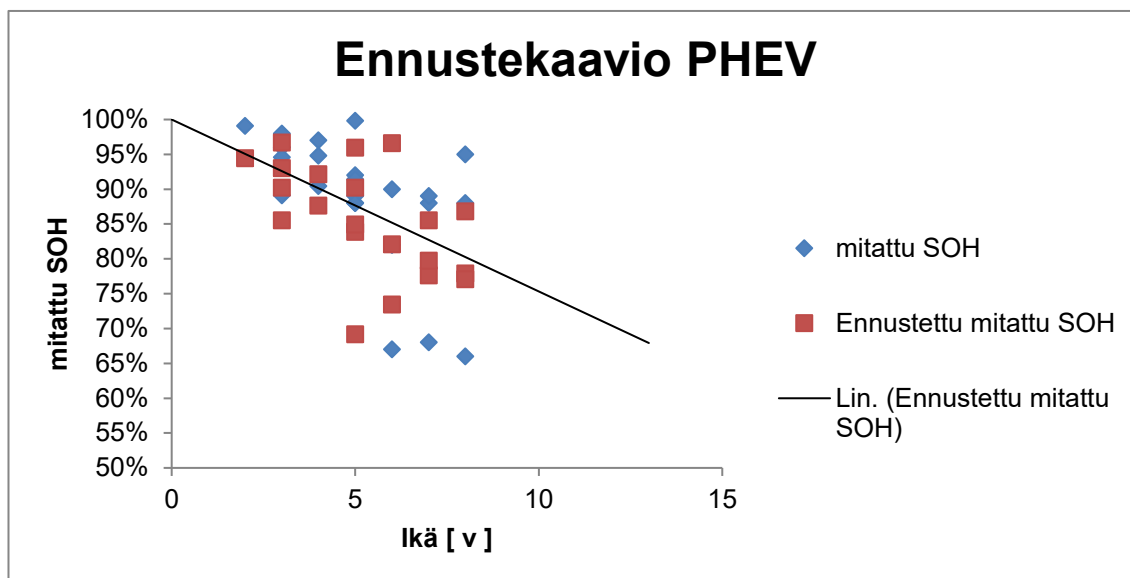
Kuva 10. Regressioanalyysiin perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen ja täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ikä.

Testatuista ladattavista hybridiautoista SOH-arvo vastasi pääosin hyvin arvioitua. Arvio, mittaustulokset sekä mitattujen arvojen perusteella lineaarisesti

sovitettu suuntaviiva näkyvät kuvassa 11. Mittaustulosten perusteella ladattavien hybridiautojen akkujen kuluminen on voimakkaampaa kuin arvioitu kuluminen. Keskihajonta arvioituun SOH-arvoon iän perusteella on 8,01 prosenttiyksikköä. Testatuista autoista kolme ladattavaa hybridiautoa poikkeaa merkittävästi laskennallisesta arviosta sekä keskiarvosta. Poikkeavat autot ovat BMW 330e, Mercedes-Benz GLC 350e ja Mitsubishi Outlander PHEV. Näiden akkujen voidaan olettaa kuluneen normaalia voimakkaammin todennäköisesti akkuvaurion vuoksi. Kun tuloksista suodatetaan suuret poikkeamat, joissa todennäköisesti on akkuvaurio, keskihajonta on 4,07 prosenttiyksikköä. Mitattujen tulosten perusteella tehdyn regressioanalyysin mukaan SOH-arvon ennustetaan laskevan 70 prosenttiin noin 12 vuoden kuluessa (kuva 12). Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %. Ennusteen perusteena oleva mittaustulokset sisältää myös mahdollisesti vaurioituneet akut.

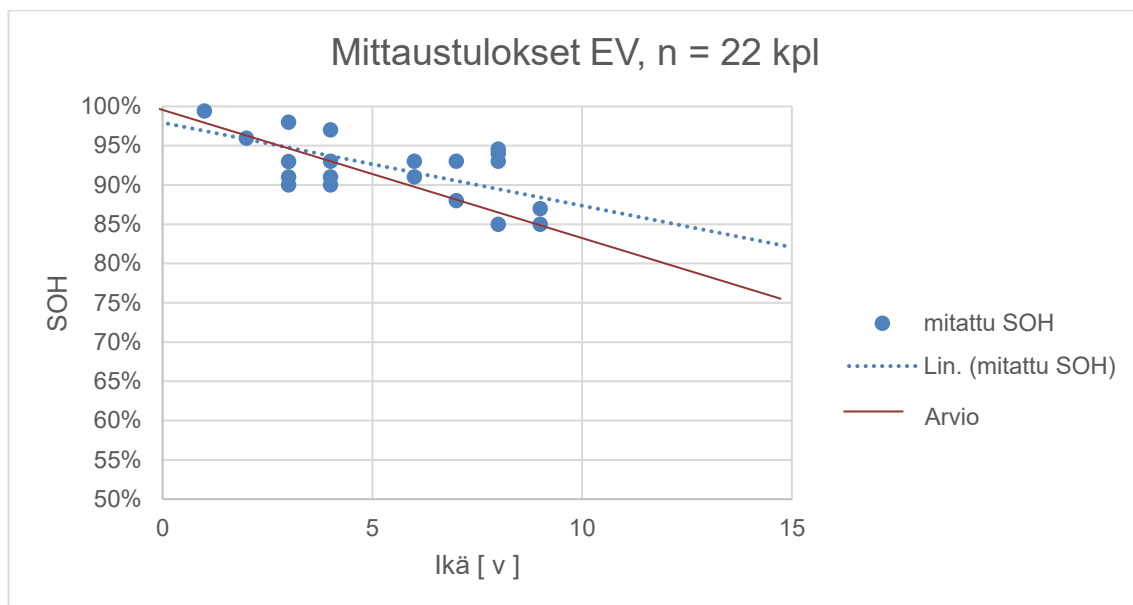


Kuva 11. Mitattu SOH-arvo ladattavista hybridiautoista.

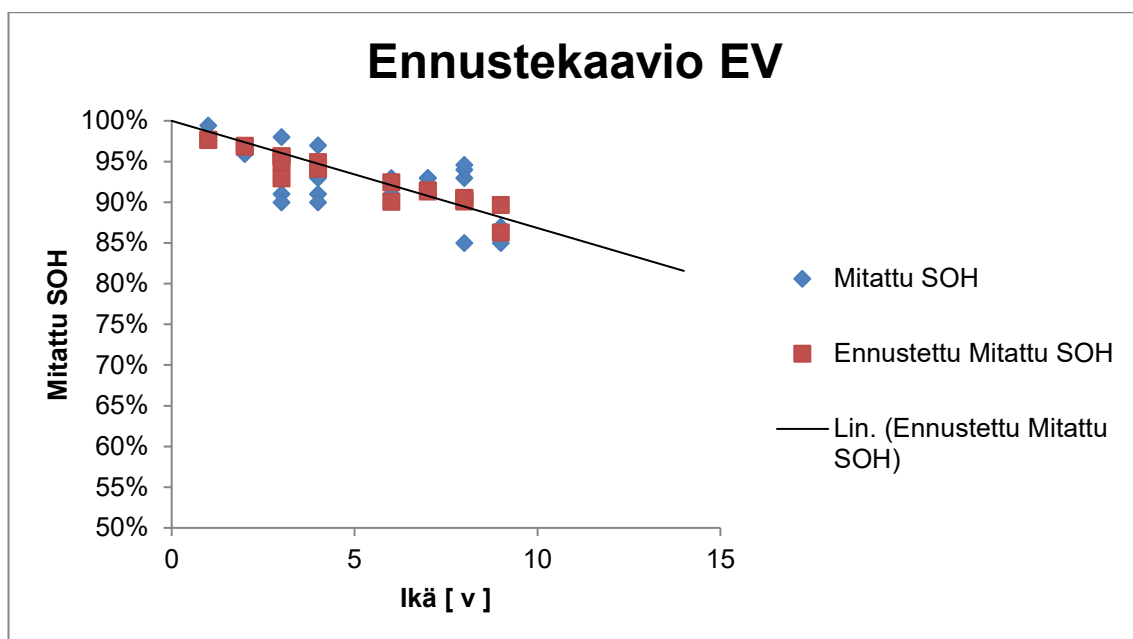


Kuva 12. Regressioanalyysiin perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ikä.

Testattujen täyssähköautojen akkujen kulumisen noudattaa arvioitua kulumista hyvin. Keskihajonta arvioituun SOH-arvoon iän perusteella on 3,87 prosenttiyksikköä. Arvio, mittaustulokset sekä mitattujen arvojen perusteella lineaarisesti sovitettu suuntaviiva näkyvät kuvassa 13. Mittaustulosten perusteella todellinen kuluminen on hitaampaa, kuin arvioitu kuluminen. Mitattujen tulosten perusteella tehdyn regressioanalyysin mukaan täyssähköautojen SOH-arvon ennustetaan olevan 80 prosenttia 15 vuoden kuluttua (kuva 14). Lineaarisesti sovitun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



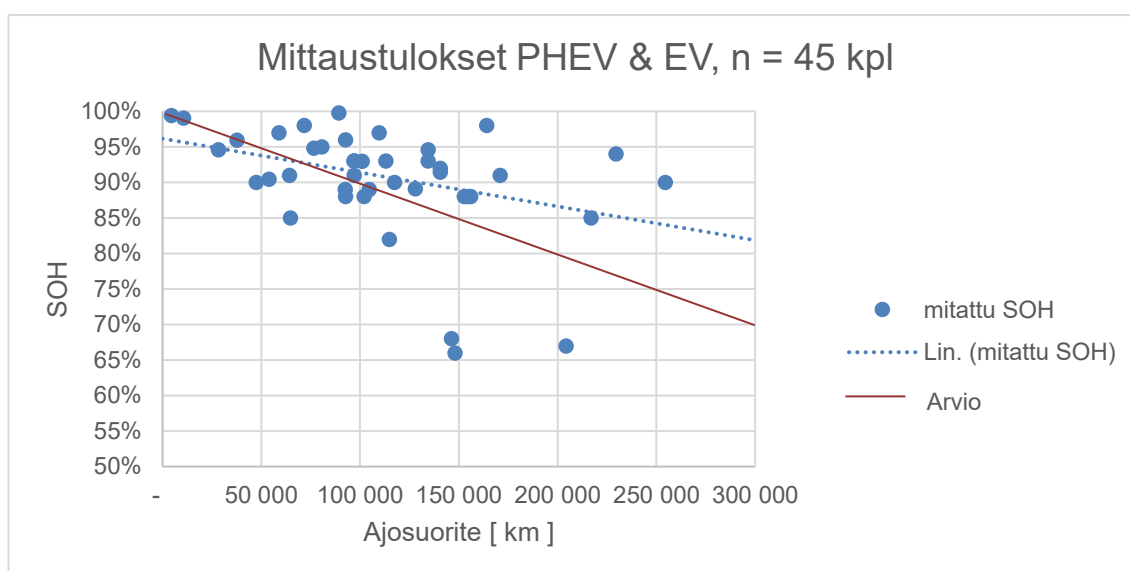
Kuva 13. Mitattu SOH-arvo täyssähköautoista.



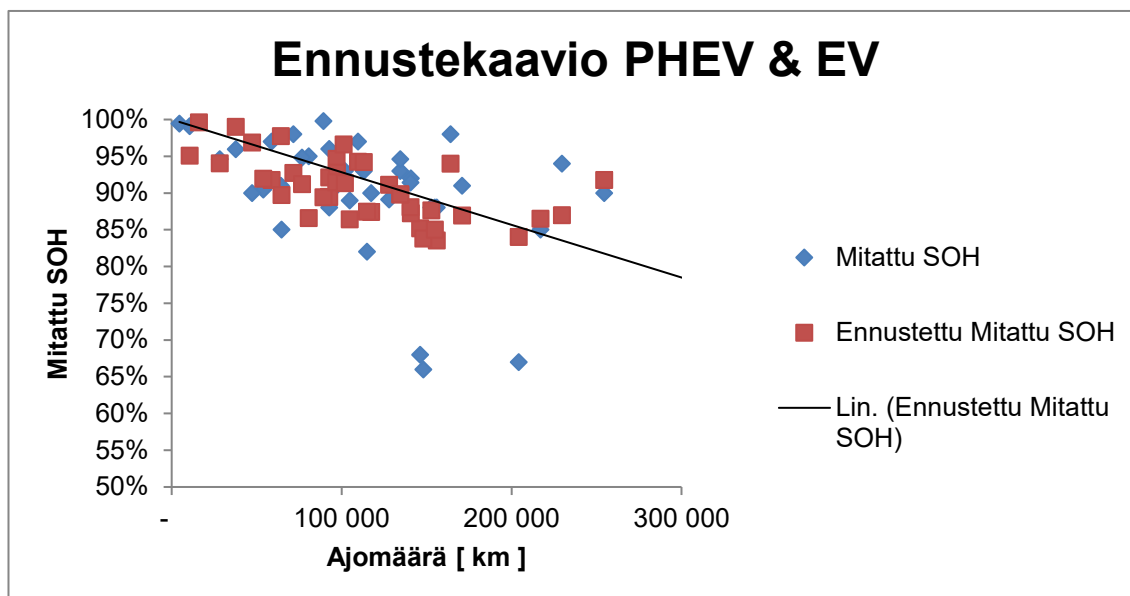
Kuva 14. Regressioanalyysiin perustuva ennuste täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävä tekijänä auton ikä.

9.4 Akkujen kuluminen ajomäärän mukaan

Täyssähköautojen ja ladattavien hybridi-autojen keskihajonta arvioituun SOH-arvoon ajomäärän mukaan on 7,26 prosenttiyksikköä. Arvio, mittaustulokset sekä mitattujen arvojen perusteella lineaarisesti sovitettu suuntaviiva näkyvät kuvassa 15. Todellinen kuluminen vaikuttaa olevan vähäisempää, kuin arvioitu kuluminen. Mahdollisesti vaurioituneiden akkujen suodatuksen jälkeen korjattu keskihajonta SOH-arvioon ajomäärän mukaan on 5,37 prosenttiyksikköä. Mitattujen tulosten perusteella tehdyn regressioanalyysin mukaan SOH-arvon ennustetaan olevan noin 76 prosenttia 300 000 km ajomäärässä (kuva 16). Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %. Ennusteen perusteena oleva mittausdata sisältää myös mahdollisesti vaurioituneet akut.

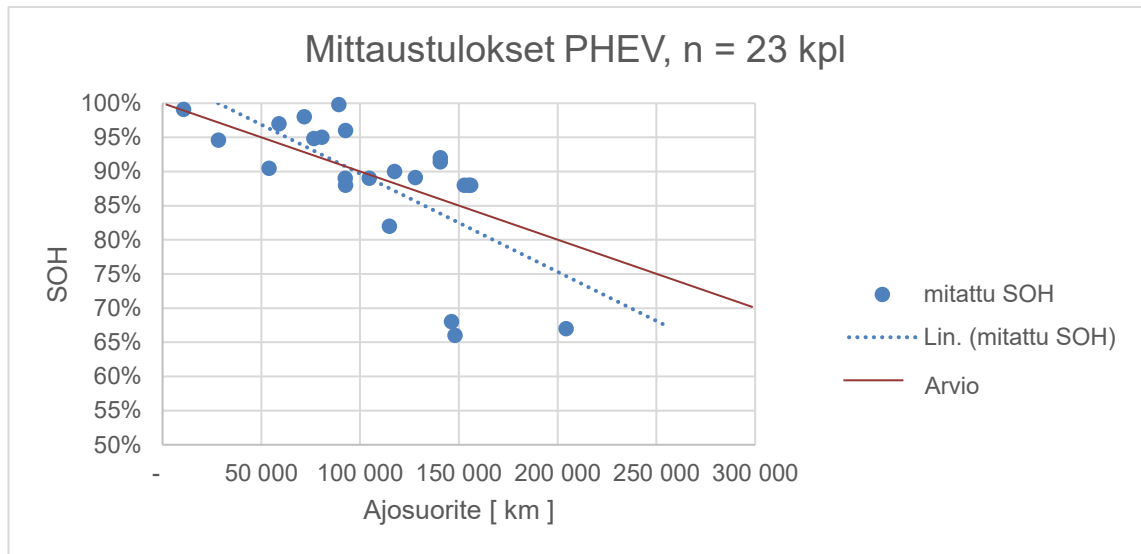


Kuva 15. Mitattu SOH-arvo ladattavista hybridi-autoista ja täyssähköautoista.

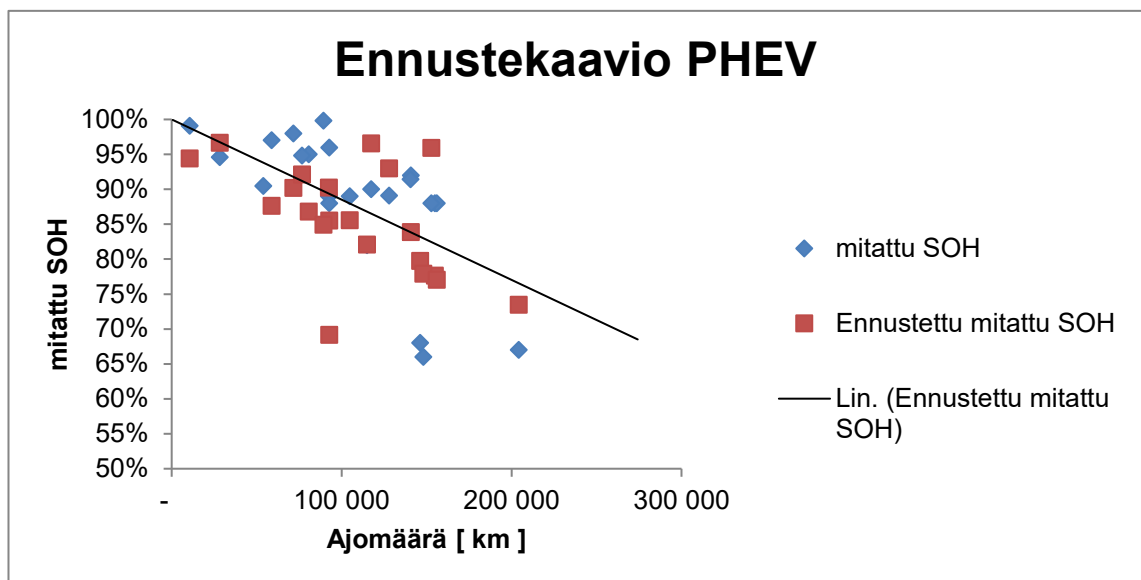


Kuva 16. Regressioanalyysiin perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen ja täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ajomäärä.

Testatuista ladattavista hybridiautosta SOH-arvo vastasi pääosin hyvin arvioitua. Arvio, mittaustulokset sekä mitattujen arvojen perusteella lineaarisesti sovitettu suuntaviiva näkyvät kuvassa 17. Testatuista autoista kolme ladattavaa hybridiautoa poikkeaa merkittävästi laskennallisesta tuloksesta sekä keskiarvosta. Ladattavien hybridiautojen keskihajonta arvioituun SOH-arvoon ajomäärän perusteella on 7,46 prosenttiyksikköä. Todellinen kuluminen mittausten perusteella on hieman voimakkaampaa kuin arvioitu kuluminen. Kun tuloksista suodatetaan suuret poikkeamat, joissa todennäköisesti on akkuvaurio, keskihajonta on 3,91 prosenttiyksikköä. Mitattujen tulosten perusteella tehdyn regressioanalyysin mukaan SOH-arvon ennustetaan laskevan 70 prosenttiin noin 270 000 km:n ajomäärässä (kuva 18). Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %. Ennusteen perusteena oleva mittausdata sisältää myös vaurioituneet akut.



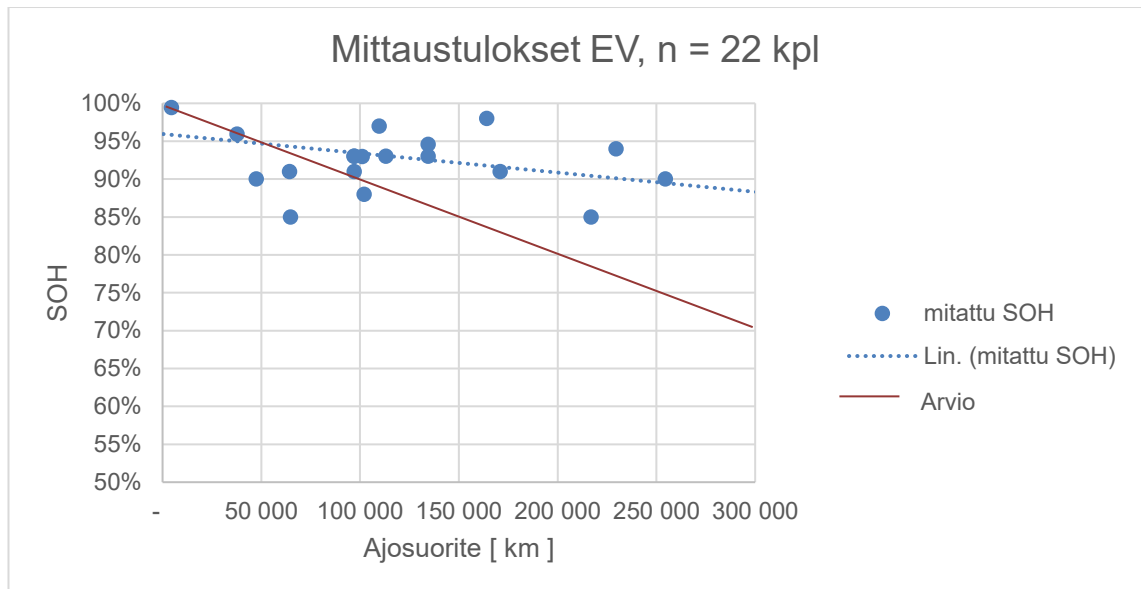
Kuva 17. Mitattu SOH-arvo ladattavista hybridiautoista.



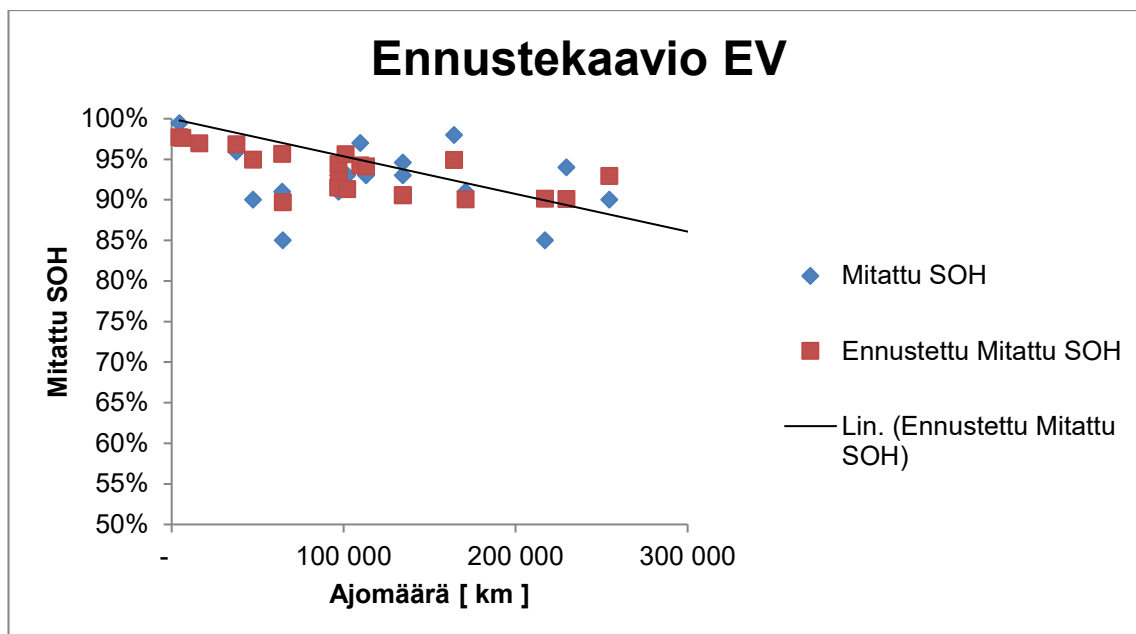
Kuva 18. Regressioanalyysiin perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ajomäärä.

Testattujen täyssähköautojen akkujen kuluminen on vähäisempää kuin arvioitu kuluminen. Arvio, mittaustulokset sekä mitattujen arvojen perusteella lineaarisesti sovitettu suuntaviiva näkyvät kuvassa 19. Keskihajonta arvioituun SOH-

arvoon ajomäärän perusteella on 6,29 prosenttiyksikköä. Mitattujen tulosten perusteella tehdyn regressioanalyysin mukaan SOH-arvon ennustetaan olevan 85 prosenttia 300 000 km:n ajomäärässä (kuva 20). Lineaarisesti sovitetun suunta-
viivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



Kuva 19. Mitattu SOH-arvo täyssähköautoista.



Kuva 20. Regressioanalyysiin perustuva ennuste täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ajomäärä.

10 Yhteenveto ja päätelmät

Autokanta sähköistyy voimakkaasti. Määrällisesti sähköautoja on eniten ladattavina hybridiautoina. Käytettynä maahantuotujen autojen osuus on kolmannes sähköautokannasta. Sähköautojen energiavarastona on korkeajänniteakku. Korkeajänniteakku on tyypillisesti Li-ioniakku, jonka akkukemia on NMC, NCA tai LFP. Sähköauton käytön kannalta tärkein komponentti on akunhallinnanohjainlaite BMS. BMS monitoroi ja ohjaa akun parametrejä. Sähköajoneuvojen akkujen lataustapoja on neljä, joista kolme soveltuvat sähköautoille. Soveltuvat lataustavat ovat hidas lataus (lataustapa 2), peruslataus (lataustapa 3) ja tehollataus (lataustapa 4).

SOH-arvo kuvaa akun kuntoilaa verrattuna alkuperäiseen arvoon. Tyypillisesti SOH-arvo määritetään kapasiteetin alenemana. Jäljellä oleva kapasiteetti on verrannollinen auton toimintamatkaan. Li-ioniakkujen normaali kapasiteetin alenema on noin 2–3 % vuodessa. Kapasiteetti alenee pääasiassa SEI-kerroksen

ja litiumpinnoituksen vuoksi, jotka kasvattavat sisäistä resistanssia. Kulumista kiihdyttävät korkea lämpötila, syväpurkaukset, yllilataaminen ja pikalataus.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että akkujen kapasiteetti alenee. Kapasiteetin alenema on voimakkaampaa ladattavissa hybridautoissa, kuin täyssähköautoissa. Tuloksissa on kuitenkin huomioitava, että ladattavien hybridautojen mittaustulokset sisältävät kolme mahdollisesti vaurioitunutta akkua, joiden kulumista ei voida pitää normaalina kulumisena. Kapasiteetin vuosittainen alenema vaikuttaa noudattavan teoreettista mallia paremmin, kuin ajomäärään perustuva arvio. Otannan 45 autoa havainnollistavat kulumista ajan sekä ajosuoritteen mukaan. Suurempi otanta antaisi luotettavamman kuvan kulumisen voimakkuudesta. Lisäksi hajonta olisi todennäköisesti suurempaa. Toisaalta tuloksia voidaan pitää luotettavana otantana tällä hetkellä myynnissä olevista sähköautoista. Saatujen mittaustulosten perusteella voidaan tunnistaa viallinen akku, mikäli sen SOH-arvo poikkeaa merkittävästi keskiarvosta. Kuluneisuutta arvioitaessa iän ja ajomäärän mukaan regressioanalyysin ennustekaavioita voidaan pitää oletuksena siitä mitä voidaan kohtuudella olettaa. Virhemarginaalina voidaan pitää 5–7 prosenttiyksikköä. Ennustekaaviot on esitetty suuremmassa koossa liitteessä 3.

Akkujen kulumisessa on eroja. Ainoa luotettava keino selvittää akun kapasiteetin kunto on mitata sen SOH-arvo. SOH-arvo voidaan mitata mitta-arvona akunhallinnanohjainlaitteelta tai luotettavammalla tavalla akusta saatavan kapasiteetin mukaan. Ohjainlaitteelta luettu tieto on valmistajakohtainen eikä ole vertailukelpoinen.

Korkeajänniteakku on erittäin kallis komponentti ja sen kuluneisuus vaikuttaa käytetyn auton hinnoitteluun. Vaihtoautoliiketoiminnalle suositellaan mitatun SOH-arvon kirjaamista osto- ja kauppasopimukseen. Testausmenetelmä tulee kirjata tulosten luotettavuuden ja vertailukelpoisuuden vuoksi. Kun SOH-arvo on selvitetty, voidaan sitä verrata keskiarvoon ja arvioida kuluneisuutta iän ja ajomäärän mukaan. Kauppasopimukseen kirjattu SOH-arvo tukee kuluttajansuojalain 5. luvun 12. § 1. momentin kohtaa tavarantoiminnan sopimuksenmukaisuudesta.

11 Jatkokehityskohteet

Tässä tutkimuksessa selvitettiin luonnollisen kulumisena aiheuttamaa kapasiteetin alenemaa: mitä voidaan kohtuudella olettaa käytetyn auton akun kunnosta. Tutkimuksessa havaittiin joitakin keskiarvosta poikkeavia tuloksia. Jatko-tutkimuksena voitaisiin selvittää paremmin selittäviä tekijöitä voimakkaammalle kulumiselle ajoneuvokäytössä historiatietojen perusteella. Lisäksi voitaisiin selvittää suuren rasituksen esimerkiksi taksikäytön vaikutusta akkujen kestävyys-teen.

Tutkimuksen mittausmenetelmiä oli kaksi. Akunhallinnan ohjainlaitteelta luettava valmistajakohtainen SOH-arvo sekä todelliseen kapasiteetin mittaamiseen perustuva mittaus. Valmistajakohtaisten SOH-arvojen vertailukelpoisuus on heikko eroavien korjauskertoimien ja laskentatavan takia. Jatkokehityskohteena voitaisiin selvittää testausmenetelmien välisiä eroja sekä luotettavuutta. Lisäksi voitaisiin selvittää kuormituksen vaikutusta todellisen kapasiteetin mittaukseen perustuvassa menetelmässä.

Tutkittavia autoja haettaessa vaihtoautoliikkeistä kysyttiin sanallisesti myyjien arviota akkujen kunnosta ennen testin aloittamista. Tietämys oli pääosin heikkoa eikä vastannut mittaustuloksia. Sähköautojen yleistyessä kuluttajien oletukset ja automyyjien tietämys esimerkiksi kapasiteetin alenemisesta kannattaisi selvittää. Lisäksi kannattaisi selvittää, millaisia ratkaisuja autoliikkeet ovat tehneet mahdollisissa reklamaatiotilanteissa, jolloin tuote ei ole vastannut asiakkaan oletuksia.

Monet valmistajat ja takuuehdot määrittävät SOH-arvon alarajaksi noin 70 prosenttia. Ladattavien hybridautojen ja lyhyen toimintamatkan sähköautoissa 30 % alenema on merkittävä. Pitkän toimintamatkan sähköautoissa, joissa toimintamatka uutena on jopa yli 400 km, on vielä 70 % kapasiteetilla toimintamatkaltaan kohtuullinen. Jatkotutkimuksena voitaisiin selvittää, miten alhainen SOH-arvo on auton käytön ja turvallisuuden kannalta vielä käyttökelpoinen.

Korkeajänniteakkujen vaihtaminen uuteen on kallista. Yksittäisen viallisen kennon tai moduulin vaikutus akun kokonaiskapasiteettiin voi olla merkittävä. Osa valmistajista sallii kustannustehokkaan akkujen kunnostuksen yksittäisen viallisen moduulin tai kennon vaihdolla. Korjauksen vaikutus akun kokonaiskapasiteettiin ja SOH-arvoon voitaisiin selvittää jatkokehityskohteena.

Lähteet

Akut. 2020. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut>. 4.8.2020. Luettu 3.1.2023.

Arcus, Christopher. 2016. Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last?. Verkkoaineisto. <<https://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-life-time-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>>. 31.5.2016. Luettu 30.12.2022.

Autokaupan ja korjausten vastuutahot. Verkkoaineisto. Kilpailu- ja kuluttajavirasto. <<https://www.kkv.fi/kuluttaja-asiat/autot-ja-pysakointi/autojen-huollot-ja-korjaukset/autokaupan-ja-korjausten-vastuutahot/>>. Luettu 16.11.2022.

BU-205: Types of Lithium-ion. 2021. Verkkoaineisto. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>. 22.10.2021. Luettu 10.2.2023.

Henkilöautojen ensirekisteröinnit muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima, Kuukausi ja Vuosi. 2023. Tilastohaku. Traficom. <https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Ensirekisteroinnit/010_ensirek_tau_101.px/table/tableViewLayout1/>. 6.3.2023. Luettu 2.4.2023.

Kalaja, Kalle. 2023. Tutkittua dataa ajoakuista Pikalataus heikentää kapasiteettia. Suomen autolehti 1/2023, s. 59.

Käytetyn auton virhe. Verkkoaineisto. Kilpailu- ja kuluttajavirasto. <<https://www.kkv.fi/kuluttaja-asiat/autot-ja-pysakointi/kaytetyt-autot/kaytetyn-auton-virhe/>>. Luettu 16.11.2022.

Käytettynä maahantuodut ajoneuvot muuttujina Ajoneuvoluokka, Käyttövoima, Käyttö ja Kuukausi. 2023. Tilastohaku. Traficom. <https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Kaytettyna_maahantuodut/010_yksmaah_tau_101.px/table/tableViewLayout1/>. 6.3.2023. Luettu 2.4.2023.

Laki kuluttajansuojalain muuttamisesta. 2021. 1242/22.12.2021.

Liikennekäytössä olevat henkilöautot käyttövoimittain. 2023. Verkkoaineisto. <<https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikennekaytossa-olevat-henkiloautot-kayttovoimittain>>. 31.1.2023. Luettu 2.4.2023.

Liikennekäytössä olevat henkilöautot 31.12. muuttujina Maakunta, Merkki, Käyttövoima ja Vuosi. 2023. Tilastohaku. Traficom. <https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot/030_kanta_tau_103.px/table/tableViewLayout1/>. 9.1.2023. Luettu 2.4.2023.

Man, Henry. 2022. What are LFP, NMC, NCA Batteries in Electric Cars?. Verkkoaineisto. <<https://zecar.com/resources/what-are-lfp-nmc-nca-batteries-in-electric-cars>>. 18.7.2022. Luettu 2.1.2023.

Moore-Coyler, Roland. 2022. What is a solid state battery? The new tech explained. Verkkoaineisto. <<https://www.carmagazine.co.uk/electric/solid-state-battery-ev/>>. 17.6.2022. Luettu 2.1.2023.

NCM, NCA vai LFP: akkukatodien sota käydään kolmen kemian välillä. 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.kriittisetmateriaalit.fi/ncm-nca-vai-lfp-akkukatodien-sota-kaydaan-kolmen-kemian-valilla/>>. 19.1.2022. Luettu 10.2.2023.

Perdantis, Malcom R. 2011. Battery Manufacturing and Electric and Hybrid Vehicles. E-kirja. Nova Science Puplicher.

Petrovic, Slobodan. 2021. Battery Technology Chrash Course. E-kirja. Springer.

Pollard, Tim. 2022. Electric car batteries: everything you need to know. Verkkoaineisto. <https://www.carmagazine.co.uk/electric/ev-car-battery-capacity-tech/?itm_source=Biblio&itm_medium=Biblio-footer-1&itm_campaign=Biblio-related>. 6.12.2022. Luettu 2.1.2023.

Rahn, Christopher D & Wang, Chao-Yang. 2013. Battery Systems Engineering. E-kirja. John Wiley & Sons.

Sihvo, Jussi. 2021. SOH Estimation of Li-Ion Batteries Based on Broadband Impedance Measurements and Equivalent Circuit Model Analysis. Väitöskirja. Tampere: Tampere University.

Sähköajoneuvojen lataussuositus. 2021. Helsinki: SESKO ry.

Thaler, Alexander & Watzenig, Daniel. 2014. Automotive Battery Technology. E-kirja. Springer.

Uuden auton virhe. Verkkoaineisto. Kilpailu- ja kuluttajavirasto.
<<https://www.kkv.fi/kuluttaja-asiat/autot-ja-pysakointi/uudet-autot/uuden-auton-virhe/>>. Luettu 16.11.2022.

Warner, John T. 2015. The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology. E-kirja. Elsevier Science & Technology.

Tutkitut autot

Merkki	Malli	Vuosi-malli	Tyyppi (1=PHEV, 2=EV)	Ikä [v]	Ajo-määrä [km]	SOH arvio iän mukaan	SOH arvio ajomäärän mukaan	Mitattu SOH	Muutos arvioon (ikä)	Muutos arvioon (ajomäärä)
Audi	A3 e-tron	2015	1	8	156 535	85 %	85 %	88 %	3 %	3 %
Audi*	Q7 e-tron	2017	1	6	117 428	89 %	89 %	90 %	1 %	1 %
BMW	330e	2016	1	7	104 676	87 %	90 %	89 %	2 %	-1 %
BMW	330e	2016	1	7	146 231	87 %	86 %	68 %**	-19 %	-18 %
BMW	330e	2015	1	8	80 606	86 %	92 %	95 %	9 %	3 %
BMW	530e	2018	1	5	92 527	91 %	91 %	89 %	-2 %	-2 %
BMW	530e	2018	1	5	92 670	91 %	91 %	88 %	-3 %	-3 %
BMW*	530e	2019	1	4	58 889	93 %	94 %	97 %	4 %	3 %
Mercedes-Benz	GLC 350e	2017	1	6	204 236	88 %	81 %	67 %**	-21 %	-14 %
Mercedes-Benz*	E 300e	2020	1	3	127 885	95 %	88 %	89 %	-6 %	1 %

Merkki	Malli	Vuosi- malli	Tyyppi (1=PHEV, 2=EV)	Ikä [v]	Ajo- määrä [km]	SOH ar- vio iän mukaan	SOH arvio ajomäärän mukaan	Mitattu SOH	Muu- tos ar- vioon (ikä)	Muutos arvi- oon (ajo- määrä)
Mitsubishi	Outlander PHEV	2015	1	8	148 069	85 %	86 %	66 %**	-19 %	-20 %
Skoda*	Superb	2020	1	3	92 623	95 %	91 %	96 %	1 %	5 %
Volkswagen	Passat GTE	2018	1	5	140 665	90 %	87 %	92 %	2 %	5 %
Volkswagen	Passat GTE	2016	1	7	154 844	87 %	86 %	88 %	1 %	2 %
Volkswagen	Passat GTE	2017	1	6	114 895	89 %	89 %	82 %	-7 %	-7 %
Volkswagen*	Passat GTE	2020	1	3	28 274	95 %	97 %	95 %	0 %	-2 %
Volkswagen*	Passat GTE	2018	1	5	140 603	91 %	87 %	91 %	0 %	4 %
Volvo	XC60	2018	1	5	152 709	91 %	85 %	88 %	-3 %	3 %
Volvo	XC90 T8	2020	1	3	71 685	95 %	93 %	98 %	3 %	5 %
Volvo*	V60	2019	1	4	53 980	93 %	95 %	90 %	-3 %	-5 %

Merkki	Malli	Vuosi-malli	Tyyppi (1=PHEV, 2=EV)	Ikä [v]	Ajo-määrä [km]	SOH ar- vio iän mukaan	SOH arvio ajomäärän mukaan	Mitattu SOH	Muu- tos ar- vioon (ikä)	Muutos arvi- oon (ajo- määrä)
Volvo*	XC40	2021	1	2	10 613	96 %	99 %	99 %	3 %	0 %
Volvo*	XC60	2018	1	5	89 313	91 %	90 %	99 %	9 %	10 %
Volvo*	XC90 T8	2019	1	4	76 635	93 %	92 %	95 %	2 %	3 %
Audi	e-tron	2019	2	4	96 522	92 %	91 %	91 %	-1 %	0 %
Audi	e-tron	2020	2	3	64 205	95 %	94 %	91 %	-4 %	-3 %
Audi*	e-tron	2020	2	3	101 134	95 %	90 %	92 %	-2 %	3 %
BMW	i3	2014	2	9	64 704	83 %	94 %	85 %	2 %	-9 %
Hyundai	Ioniq 28 kWh	2017	2	6	97 194	89 %	91 %	93 %	4 %	2 %
Hyundai	Kona	2019	2	4	109 712	92 %	90 %	97 %	5 %	7 %
KIA	e-Niro	2020	2	3	164 149	94 %	85 %	98 %	4 %	13 %
Mercedes-Benz	EQC	2020	2	3	254 527	94 %	81 %	90 %	-4 %	9 %
Nissan	Leaf	2019	2	4	47 350	93 %	95 %	90 %	-3 %	-5 %
Polestar*	2	2022	2	1	4 549	98 %	100 %	99 %	1 %	-1 %

Merkki	Malli	Vuosi-malli	Tyyppi (1=PHEV, 2=EV)	Ikä [v]	Ajo-määrä [km]	SOH arvio iän mukaan	SOH arvio ajomäärän mukaan	Mitattu SOH	Muutos arvioon (ikä)	Muutos arvioon (ajomäärä)
Polestar*	2	2021	2	2	37 685	96 %	96 %	96 %	0 %	0 %
Skoda*	Enyaq iV	2022	2	1	6 221	98 %	100 %	100 %	3 %	1 %
Tesla	Model S	2015	2	8	217 002	85 %	79 %	85 %	0 %	6 %
Tesla	Model S 70	2016	2	7	96 886	87 %	91 %	93 %	6 %	2 %
Tesla	Model S 85	2015	2	8	229 581	86 %	78 %	94 %	8 %	16 %
Tesla	Model S 85	2014	2	9	379 619	84 %	70 %	87 %	3 %	17 %
Tesla	Model S P85D	2015	2	8	134 477	86 %	87 %	93 %	7 %	6 %
Tesla	Model X	2017	2	6	170 830	84 %	89 %	91 %	7 %	2 %
Tesla	Model X	2016	2	7	102 578	87 %	91 %	93 %	1 %	-3 %
Tesla*	Model S 85	2015	2	8	134 471	86 %	87 %	95 %	9 %	8 %
Volkswagen	ID.3	2019	2	4	118 504	92 %	88 %	93 %	1 %	5 %

Merkki	Malli	Vuosi- malli	Tyyppi (1=PHEV, 2=EV)	Ikä [v]	Ajo- määrä [km]	SOH ar- vio iän mukaan	SOH arvio ajomäärän mukaan	Mitattu SOH	Muu- tos ar- vioon (ikä)	Muutos arvi- oon (ajo- määrä)
Volkswagen*	ID.4	2021	2	2	16 127	96 %	98 %	101 %	5 %	3 %
*) AVILOO FLASH -pika- testi										
**) Poikkeava tulos. Akku todennäköisesti vialli- nen.										

YHTEENVETO TULOSTUS: PHEV & EV

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Kerroin R	0,997841
Korrelaatiokerroin	0,995686
Tarkistettu korrelaatiokerroin	0,970225
Keskivirhe	0,063526
Havainnot	45

ANOVA

	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>F:n tarkkuus</i>
Regressio	5	37,26065	7,452131	1846,624	3,27E-45
Jäännös	40	0,161422	0,004036		
Yhteensä	45	37,42208			

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keski- virhe</i>	<i>t Tunnus- luvut</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Alin 95 %</i>	<i>Ylin 95 %</i>
Leikkauspiste	0	#####	#####	#####	#####	#####
Tyyppi (1=PHEV, 2=EV)	0,047665	0,020074	2,374416	0,022463	0,007093	0,088236
Ikä	0,003309	0,010599	0,312165	0,756537	-0,01811	0,02473
Ajomäärä	-2E-07	4,88E-07	-0,41482	0,680487	-1,2E-06	7,84E-07
Arvio (iän mukaan)	0,834317	0,582179	1,433093	0,159601	-0,34231	2,010945
Arvio ajomäärän mukaan	0,098589	0,593063	0,166238	0,868807	-1,10004	1,297215

JÄÄNNÖSTULOSTUS

<i>Ha- vainto</i>	<i>Ennustettu Mi- tattu SOH</i>	<i>Jäännök- set</i>
1	0,835533	0,044467
2	0,874038	0,025962
3	0,864227	0,025773
4	0,851874	-0,17187
5	0,894427	-0,00443
6	0,866035	0,083965
7	0,894398	-0,0144
8	0,91757	0,05243
9	0,84024	-0,17024
10	0,911069	-0,01997
11	0,838124	-0,17812
12	0,921163	0,038637
13	0,872398	0,047602
14	0,85013	0,02987
15	0,874551	-0,05455
16	0,940101	0,005799

17	0,880754	0,033546
18	0,927372	0,052628
19	0,876332	0,003668
20	0,894092	0,103908
21	0,912007	0,036093
22	0,950682	0,040118
23	0,919549	-0,01495
24	0,946221	-0,03622
25	0,977536	-0,06754
26	0,966119	-0,03642
27	0,897169	-0,04717
28	0,942662	0,027338
29	0,927769	0,002231
30	0,940094	0,039906
31	0,91786	-0,01786
32	0,968556	-0,06856
33	1,013937	-0,01964
34	0,98991	-0,03051
35	1,013599	-0,0078
36	0,914454	0,015546
37	0,864937	-0,01494
38	0,869179	0,040821
39	0,913419	0,016581
40	0,897868	0,032132
41	0,869748	0,070252
42	0,818119	0,051881
43	0,897869	0,047931
44	0,941997	-0,012
45	0,996245	0,016055

YHTEENVETO TULOSTUS: PHEV***Regressiotunnusluvut***

Kerroin R	0,997513
Korrelaatiokerroin	0,995032
Tarkistettu korrelaatio-kerroin	0,938372
Keskivirhe	0,071073
Havainnot	23

ANOVA

	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>F:n tarkkuus</i>	
Regressio	5	18,2112	3,642241	721,0325	3,67E-19	
Jäännös	18	0,090926	0,005051			
Yhteensä	23	18,30213				
	<i>Kertoimet</i>	<i>Keski- virhe</i>	<i>t Tun- nusluvut</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Alin 95 %</i>	<i>Ylin 95 %</i>
Ikä	0,069051	0,084708	0,815163	0,425634	-0,10891	0,247015
Ajomäärä	-3,1E-06	3,62E-06	-0,86184	0,400112	-1,1E-05	4,49E-06
Arvio (iän mukaan)	4,480226	4,541708	0,986463	0,336982	-5,06155	14,022
Arvio ajomäärän mukaan	-2,45153	3,904285	-0,62791	0,53795	-10,6541	5,751068

JÄÄNNÖSTULOSTUS

<i>Ha- vainto</i>	<i>Ennustettu Mi- tattu SOH</i>	<i>Jäännök- set</i>
1	0,811043	0,108957
2	0,794956	0,085044
3	0,853626	0,036374
4	0,821864	-0,14186
5	0,795568	-0,13557
6	0,738978	-0,06898
7	0,795306	0,084694
8	0,908173	-0,01817
9	0,904041	0,045959
10	0,907726	-0,02773
11	0,965363	0,014637
12	0,86725	0,01275
13	0,86677	-0,04677
14	0,948981	0,010819
15	0,912365	-0,02126

16	0,96027	0,00973
17	0,858856	0,041144
18	0,942729	0,055271
19	0,95386	-0,00576
20	0,984819	0,005981
21	0,951091	-0,04649
22	1,002923	-0,05702
23	0,856039	0,058261

YHTEENVETO TULOSTUS: EV

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Kerroin R	0,999439
Korrelaatiokerroin	0,998877
Tarkistettu korrelaatiokerroin	0,93979
Keskivirhe	0,035533
Havainnot	22

ANOVA

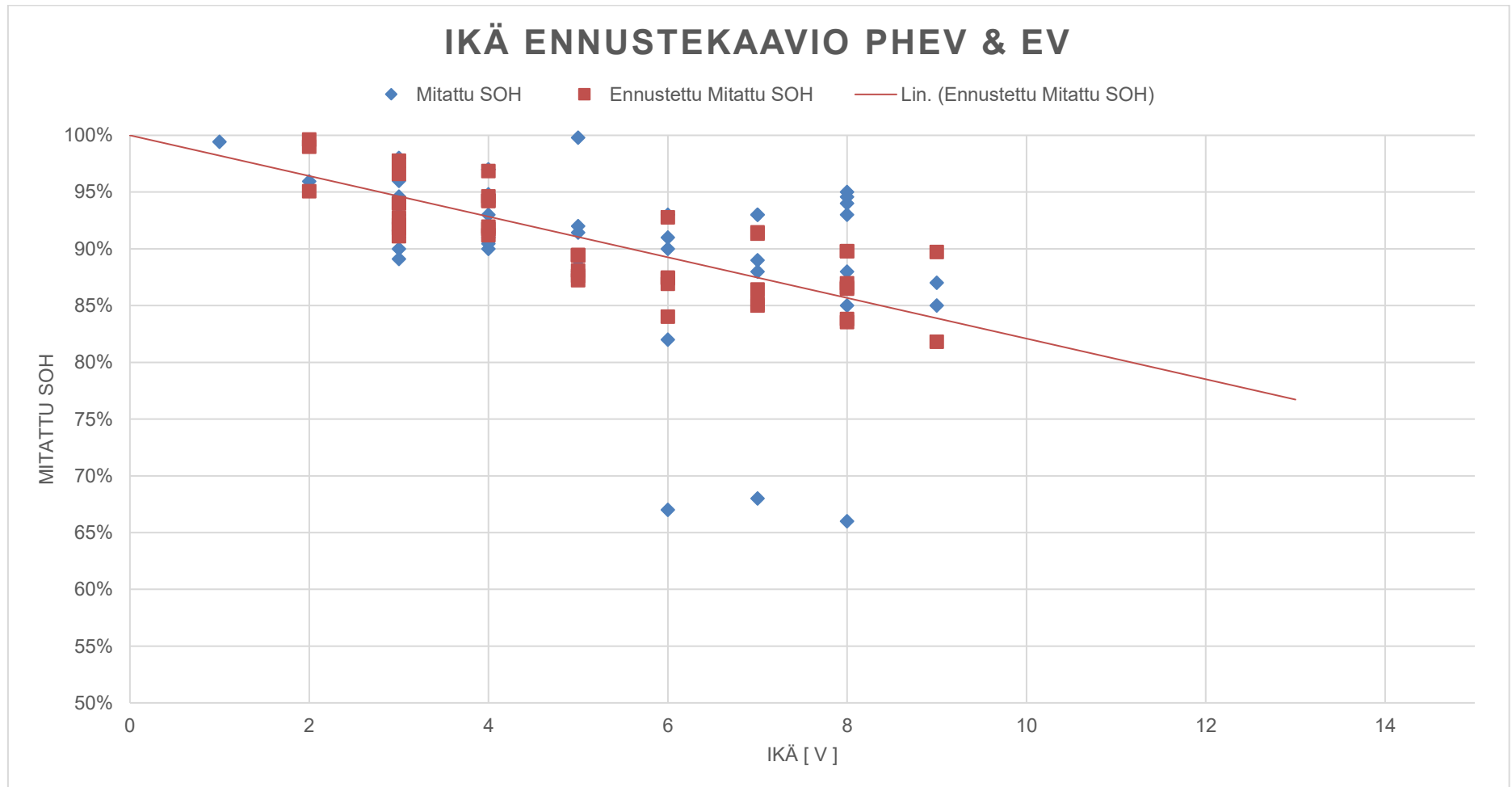
	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>F:n tarkkuus</i>
Regressio	5	19,09848	3,819696	3025,34	3,28E-23
Jäännös	17	0,021464	0,001263		
Yhteensä	22	19,11995			

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keski- virhe</i>	<i>t Tunnus- luvut</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Alin 95 %</i>	<i>Ylin 95 %</i>
Ikä	-0,00835	0,017195	-0,48575	0,633343	-0,04463	0,027926
Ajomäärä	-3,7E-07	5,88E-07	-0,62785	0,538445	-1,6E-06	8,71E-07
Arvio (iän mukaan)	0,076668	0,873047	0,087816	0,931049	-1,7653	1,918637
Arvio ajomäärän mukaan	-0,33917	0,749729	-0,45238	0,656712	-1,92096	1,242625

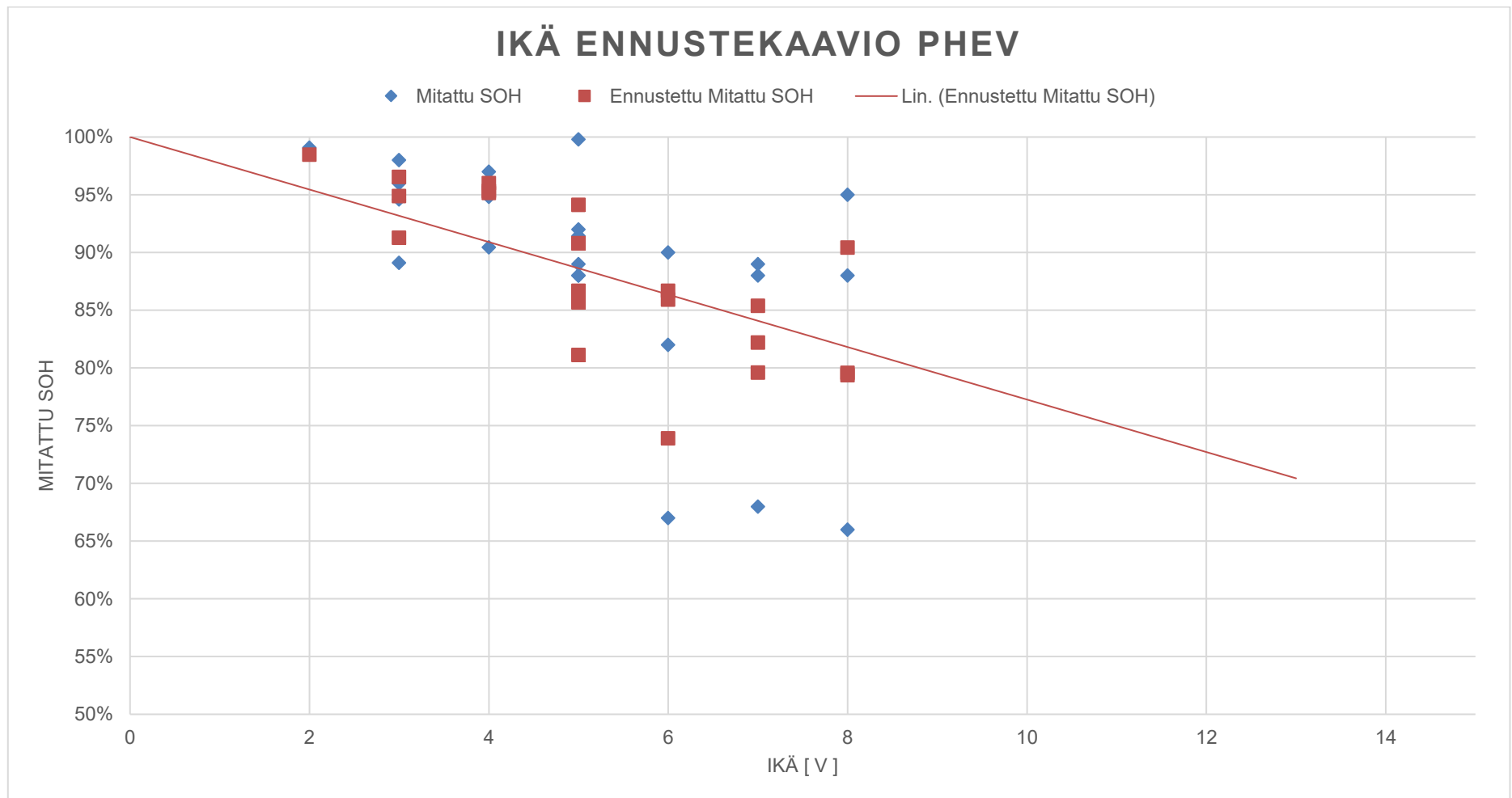
JÄÄNNÖSTULOSTUS

<i>Ha- vainto</i>	<i>Ennustettu Mi- tattu SOH</i>	<i>Jäännök- set</i>
1	0,943839	-0,03384
2	0,956416	-0,04642
3	0,956358	-0,02666
4	0,896915	-0,04692
5	0,942541	0,027459
6	0,924762	0,005238
7	0,949302	0,030698
8	0,929526	-0,02953
9	0,949356	-0,04936
10	0,97708	0,01722
11	0,968536	-0,00914
12	0,976463	0,029337
13	0,914989	0,015011
14	0,90149	-0,05149
15	0,900545	0,009455
16	0,913103	0,016897
17	0,905568	0,024432
18	0,901007	0,038993

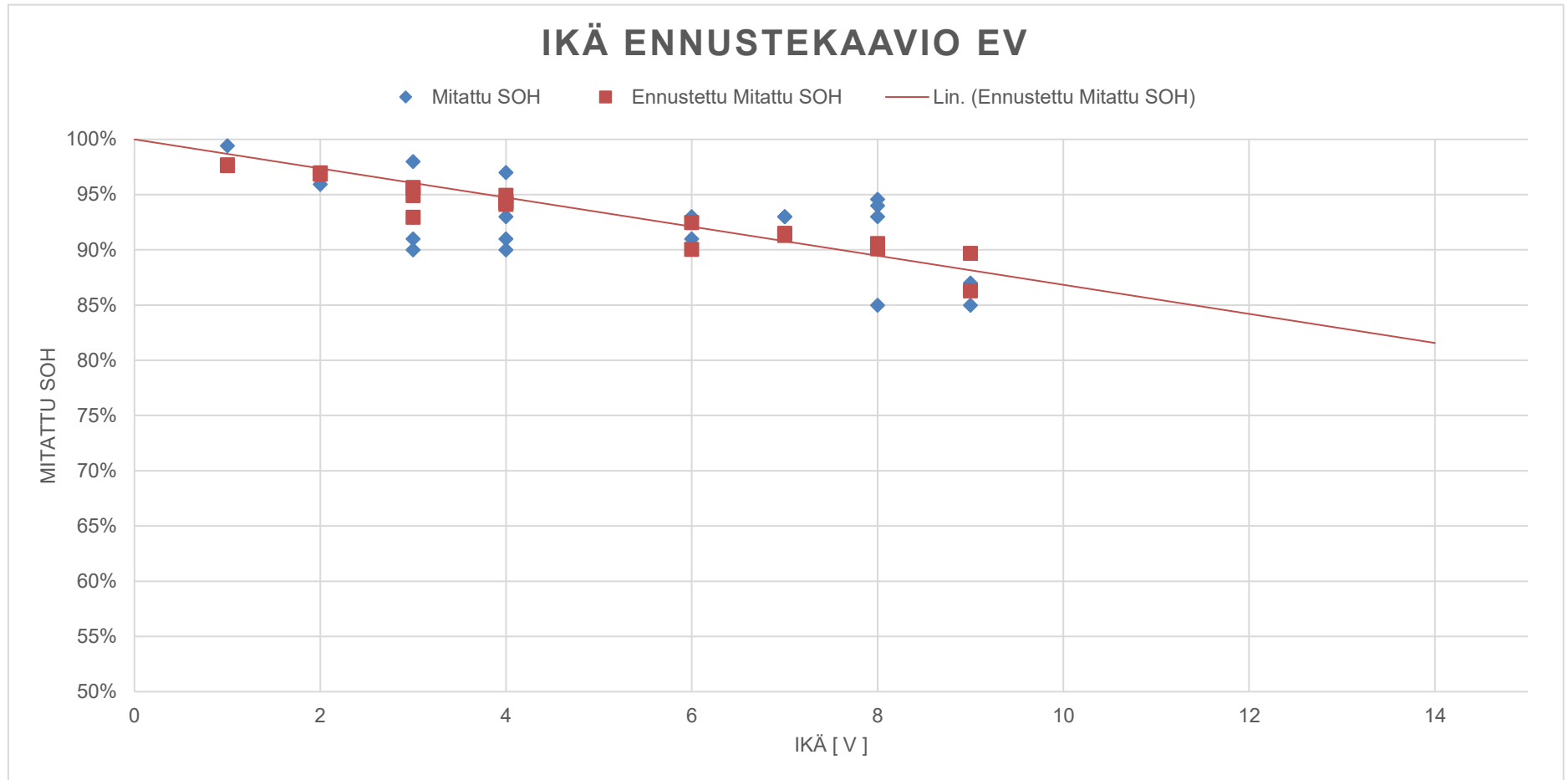
19	0,862901	0,007099
20	0,905571	0,040229
21	0,941328	-0,01133
22	0,969706	0,042594



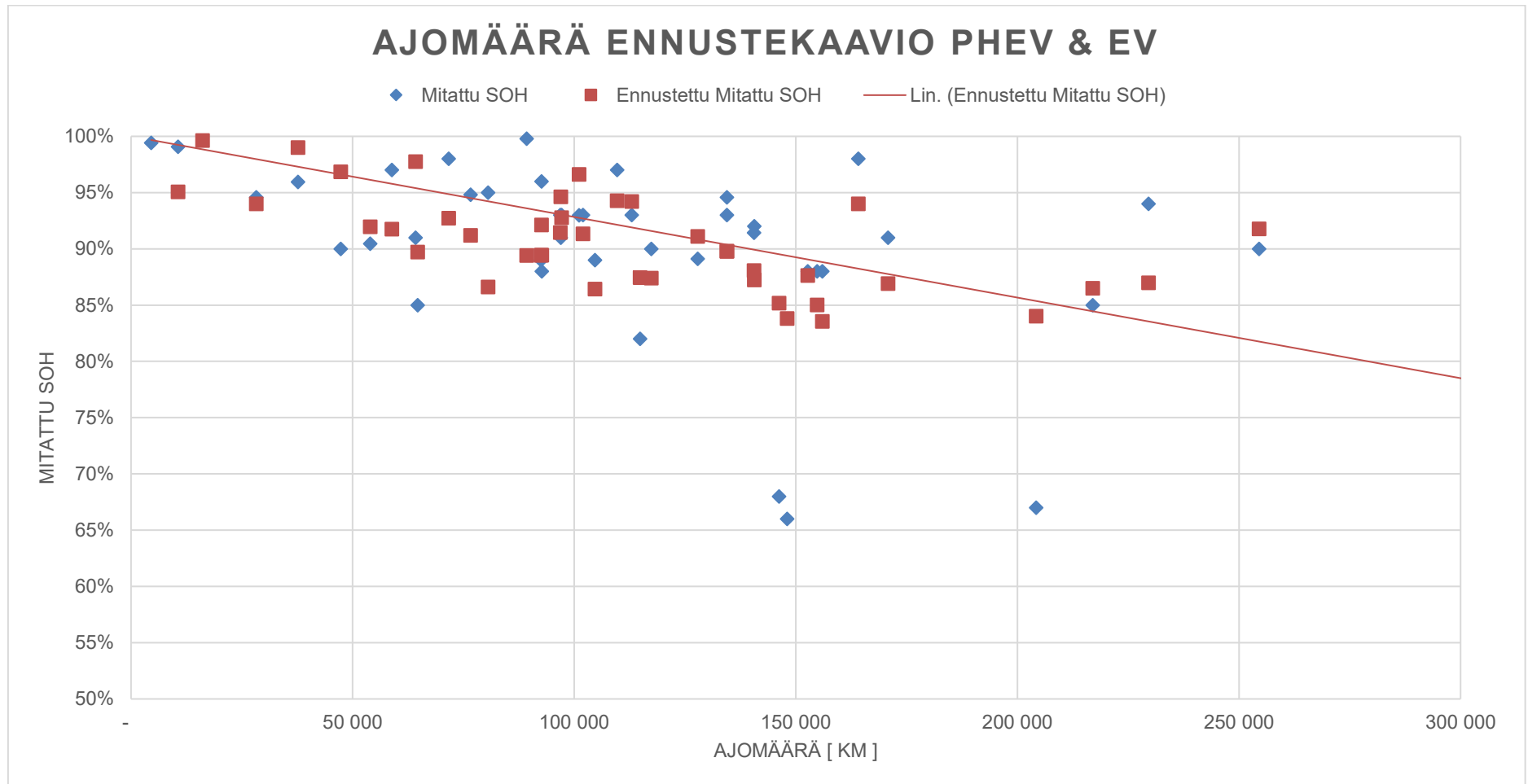
Kuva 1. Regressioanalyysiin (liite 2) perustuva ennuste ladattavien hybridi-autojen ja täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ikä. Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



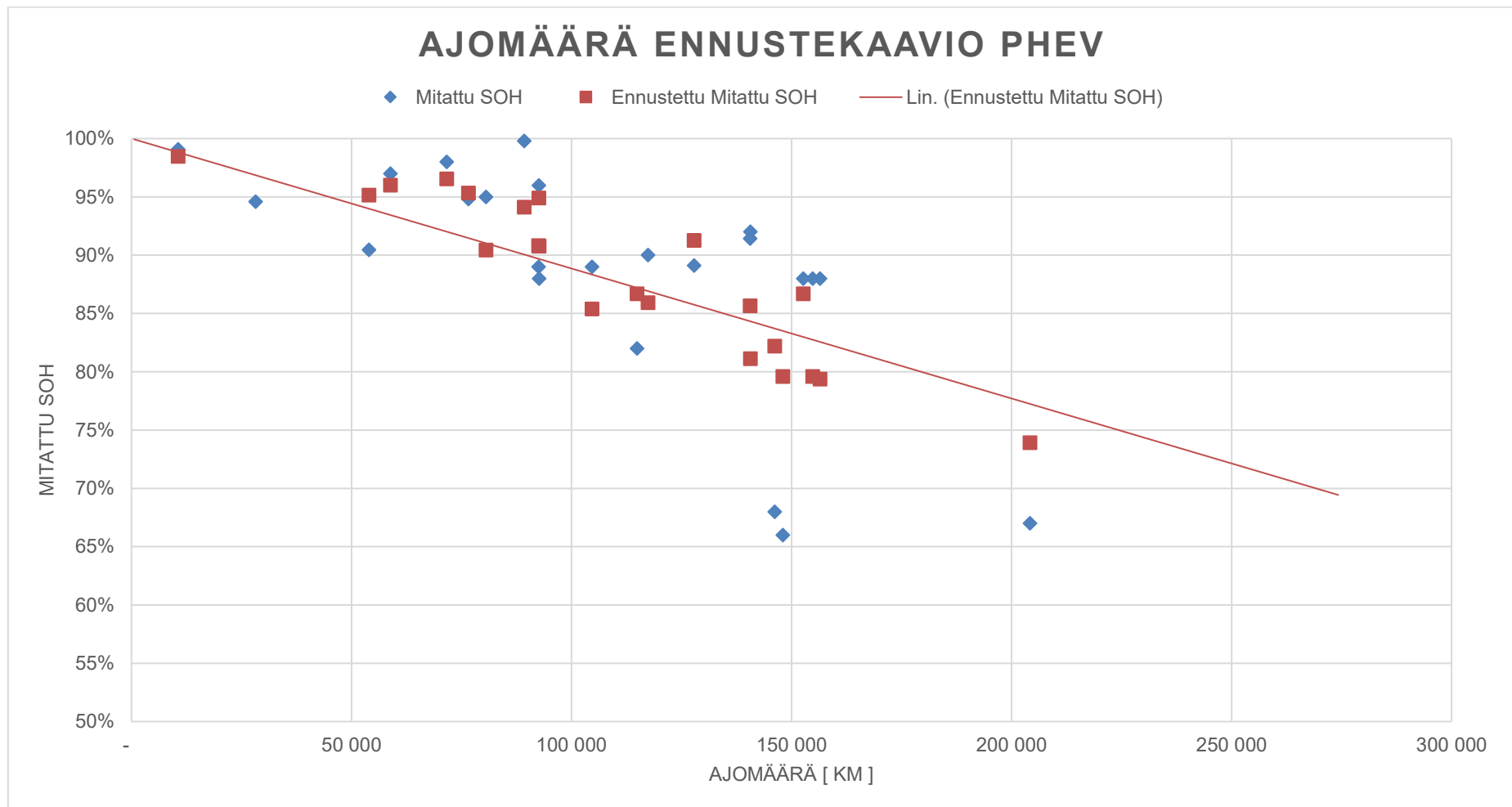
Kuva 2. Regressioanalyysiin (liite 2) perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ikä. Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



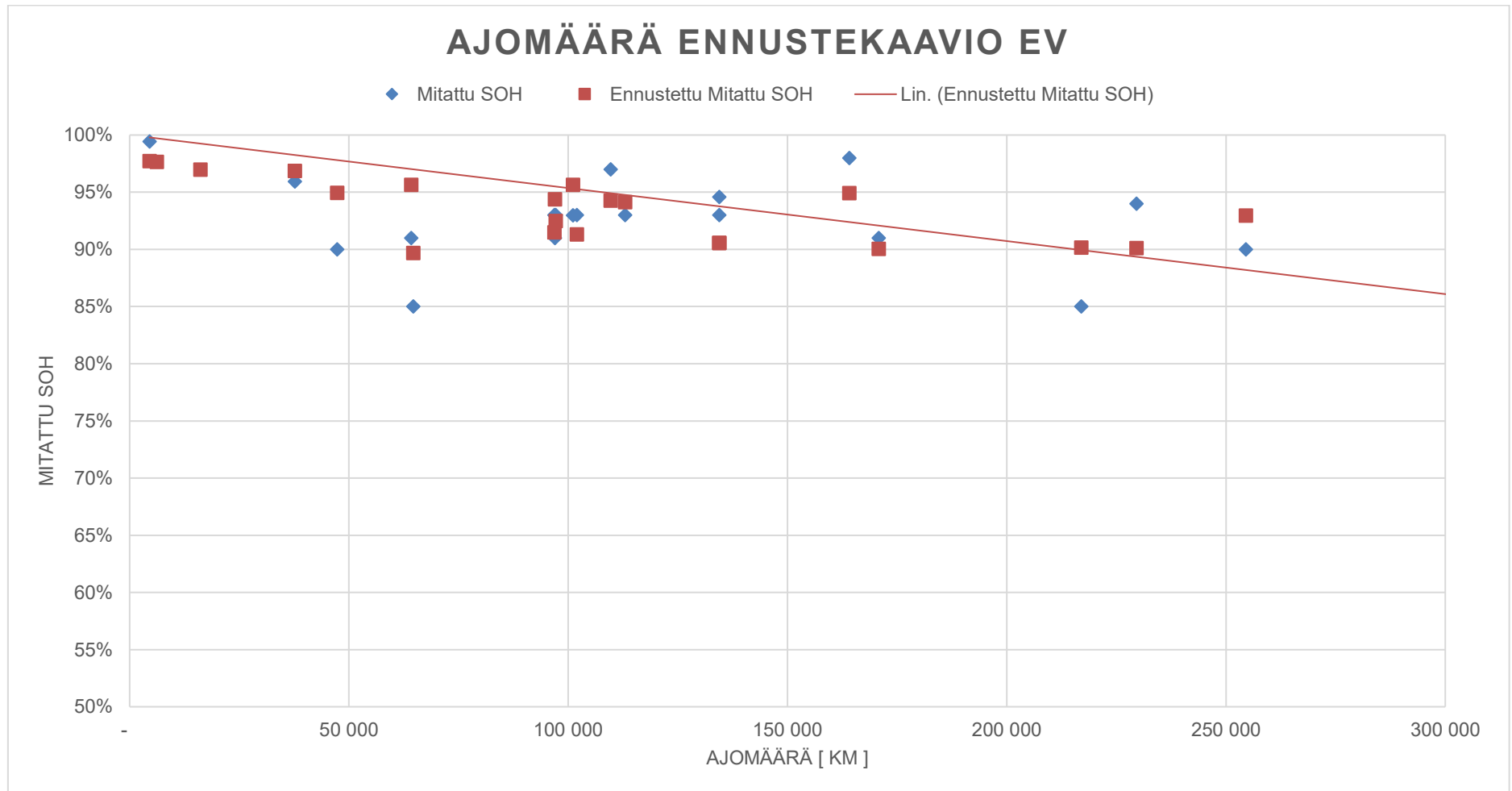
Kuva 3. Regressioanalyysiin (liite 2) perustuva ennuste täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ikä. Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



Kuva 4. Regressioanalyysiin (liite 2) perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen ja täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ajomäärä. Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



Kuva 5. Regressioanalyysiin (liite 2) perustuva ennuste ladattavien hybridiautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ajomäärä. Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.



Kuva 6. Regressioanalyysiin (liite 2) perustuva ennuste täyssähköautojen SOH-arvosta. Selittävänä tekijänä auton ajomäärä. Lineaarisesti sovitetun suuntaviivan lähtöarvoksi on asetettu SOH 100 %.