



Ronja Pankakoski

Sähköajoneuvon energiankulutus akun eri varaustasoilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

5.5.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Ronja Pankakoski
Otsikko: Sähköajoneuvon energiankulutus akun eri varaustasoilla
Sivumäärä: 26 sivua + 1 liite
Aika: 5.5.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat: Lehtori Pasi Kovanen

Insinööriyössä selvitettiin sähköauton akun varaustason vaikutusta energian kulutukseen vakionopeudella vakiokuormaa vasten ajettaessa. Selvitys tehtiin mittaamalla vuoden 2012 Nissan LEAF -täyssähköautoa, jonka LMO-korkeajänniteakun jäljellä oleva kapasiteetti on noin 64 %. Mitattuja ajosyklejä tehtiin kolme.

Työssä mitattiin ajoneuvon ilmoittamia arvoja sähköiseltä voimalinjalta käyttäen Launch X431 -diagnoosityökalua. Ajoneuvon kuormitus tapahtui Rototestin dynamometreillä. Jokaisella mittauksella akku purettiin 95 % SoC:sta noin 20 % SoC:iin. Energiankulutusta ja akun ominaisuuksia arvioitiin vertaamalla mitattuja arvoja toisiinsa.

Akun varaustason lasku johti energiankulutuksen pieneen laskuun. Sitä ei kuitenkaan voi pitää merkittävänä mitattavan ajoneuvon kunto ja käyttötarkoitus huomioiden. Merkittävämpiä muutoksia oli kuitenkin huomattavissa ajoneuvon työperiaatteen eli toteutuneen tehontuoton muutoksessa akun jännitteen laskiessa.

Energiankulutuksen muutoksen syitä ei tämän insinööriyön mittauksilla saatu selville. Tämän insinööriyön tuloksia ei tule soveltaa muihin kuin työssä mitattua akkua vastaaviin LMO-akkuihin.

Avainsanat: Ajoneuvotekniikka, sähkö, sähköajoneuvo, energiankulutus, sähköinen voimansiirto, LMO-akku

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Ronja Pankakoski
Title: Changes in Energy Consumption in Different States of Charge in Electric Vehicles
Number of Pages: 26 pages + 1 appendices
Date: 5 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Technology
Professional Major: Automotive Designing
Supervisors: Pasi Kovanen, M. Eng., Senior Lecturer

This thesis in engineering investigated the effect of the state of charge of the battery on the energy consumption of an electric vehicle. The investigation was carried out by measuring a 2012 Nissan LEAF. A fully electric vehicle, whose remaining capacity of the high-voltage LMO battery was about 64%. Three driving cycles were measured. Driving cycles were executed at constant speed against a constant load.

The values reported by the vehicle's electric powertrain were measured using a Launch X431 diagnostic tool. Rototest dynamometers were used to provide a constant driving resistance. At each measurement, the battery was discharged from 95% SoC to about 20% SoC. The energy consumption and battery properties were evaluated by comparing the measured values with each other.

A decrease in the battery's state of charge led to a slight decrease in energy consumption. However, this decrease cannot be considered significant, considering the condition and purpose of the measured vehicle. More significant changes were observed when the vehicle's operating principle changed as the battery voltage decreased.

The causes of the changes in energy consumption were not determined in this engineering thesis. The results of the present thesis should not be applied to other than LMO batteries that correlate with the one used in this study.

Keywords: EV, Electric Vehicle, Energy Consumption, LMO battery, Electric Powertrain

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköinen voimansiirto Nissan LEAFissa ja sähköisen voimalinjan testaaminen	3
2.1	Voimalinjan yleiskuvaus	3
2.2	Litium-mangaanioksidiakku	3
2.3	Huomioitavat seikat mitattavassa ajoneuvossa	5
2.4	Dynamometrin käyttö voimalinjan testauksessa	5
2.5	Datan keräys ja mittausepävarmuus	6
3	Mittausten suoritus	7
4	Mittaustulokset	9
4.1	Ensimmäinen mittaus	9
4.2	Toinen mittaus	12
4.3	Kolmas mittaus	15
5	Tulosten analysointi	21
6	Johtopäätökset	24
	Lähteet	25
	Liitteet	
	Liite 1: Matlab-skripti	

Lyhenteet

- SoC: *State of Charge*. Sähköajoneuvon akun laskennallinen varaustaso.
- SoH: *State of Health*. Sähköajoneuvon akuston laskennallinen jäljellä oleva kapasiteetti prosentteina alkuperäisestä.
- WLTP: *Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure*. Kansainvälinen päästömittausstandardi.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä selvitetään, mitä vaikutusta sähköajoneuvon akun varaustasolla on sähköajoneuvon energiankulutukseen eli muuttuko sähköajoneuvon energiankulutus akun varaustason laskiessa. Aihevalintaan johti kiinnostus aikaisempaan aiheesta tehtyyn tutkimukseen sekä se, ettei kysymykseen ole löytynyt vastausta.

Insinööriyön tilaajana toimi Metropolia Ammattikorkeakoulu ja tutkimus suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa ja laitteilla. Insinööriyössä keskitytään nimenomaan akulta saatavaan dataan vakiokuormitustilanteessa. Tarkoituksena oli selvittää, muuttuko energian kulutus akun varaustason muuttuessa. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin kaikki voimalinjaan kuulumattomat energiankuluttajat sekä ympäristötekijät.

Insinööriyön tavoitteena on selvittää sähköauton akun varaustason vaikutukset sen energiankulutukseen ja syyt mahdollisiin muutoksiin. Merkityksellinen hyöty selvityksestä saadaan suunniteltaessa ajoneuvojen energiatehokkaimpia käyttötapoja. Voiko esimerkiksi sähköajoneuvon käyttäjä, henkilö tai ryhmä, tarvittaessa tehostaa toimintaansa omatoimisesti rajaamalla käytettävää varaustasoa? Sähköajoneuvojen lataukselle löytyy lataukseen liittyviä valmistaja- ja autokohdaisia ohjeita sekä suosituksia. Suurin osa valmistajista suosittelee esimerkiksi lataamaan akkua maksimissaan 80 % ja välttämään ajamasta akkua liian tyhjäksi, sillä näiden toimien on todettu vaikuttavan negatiivisesti akun kulumiseen.

Mittaukset suoritettiin mittaamalla akun virtaa ja jännitettä kuormitettaessa ajoneuvoa akun täydestä varaustasosta lähes tyhjäksi. Mitattavana ajoneuvona toimi Metropolia Ammattikorkeakoulun vuoden 2012 Nissan LEAF, jota kuormitettiin napadynamometrillä yhtäjaksoisesti valitun varauksen alueella. Mittaustarkkuutta ja tutkimustuloksia arvioitaessa oli huomioitava kohdeajoneuvon ikä ja kunto. Valittu ajoneuvo on varustettu alkuperäisellä akkupaketilla, joka on elinkaarensa lopussa. Tutkittavan ajoneuvon akun SoH eli State of Health oli arvioitu olevan 64 % alkuperäisestä kapasiteetistaan. Tutkimus ei välttämättä

sovellu tulkittavaksi yleispäteväksi tiedoksi uudempien ja parempikuntoisten sähköajonevojen energiankulutusikäytymisestä.

2 Sähköinen voimansiirto Nissan LEAFissa ja sähköisen voimalinjan testaaminen

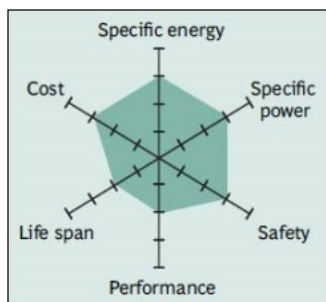
Tässä luvussa käsitellään mitattavan ajoneuvon sähköisen voimansiirron ominaisuuksia, valitun mittausmenetelmän toimintaperiaatetta sekä mittaus- ja analysointikäytäntöjen soveltuvuutta aiheeseen.

2.1 Voimalinjan yleiskuvaus

Nissan LEAFin 1. sukupolven eli ZE0:n voimalinja koostuu yhdestä korkeajännite-LMO-akusta, jonka kapasiteetti uutena on 24 kWh, josta on käytettävissä 22 kWh. Akun nimellisjännite on 360 voltia. Uuden auton toimintamatkaksi ilmoitetaan 199 km. Akun lisäksi voimalinjaan kuuluu 109 hevosvoiman vieras-magnetoitu tahtimoottori, invertteri, DC/DC-muunnin ja alennusvaihte.

2.2 Litium-mangaanioksidiaakku

Nissan LEAFin korkeajännite akku on akkukemialtaan Litium-mangaanioksidi eli LMO-akku (2011 Nissan Leaf - VIN 0356 - Advanced Vehicle Testing - Baseline Testing Results 2014). LMO-akkukemia kaupallistettiin ensimmäisen kerran 90-luvun puolessavälissä. Akkukemian suurin vahvuus on sen turvallisuus. Litium-mangaanioksidilla on korkea lämmönkestävyys, joka alentaa paloriskiä. Matalan sisäisen resistanssin ansiosta akun pitäisi kestää 20–30 ampeerin purkuvirtaa kokematta suurta lämpötilan nousua, eli lämpöhäviöt pysyvät vähäisinä. LMO-akkukemian heikkous on sen huono ikääntyminen. (BU-205: Types of Lithium-ion 2021.) Kuvassa 1 on esitettyä LMO-akun ominaisuuksia.



Kuva 1. LMO-akun vahvuudet ja heikkoudet hämähäkkikaavio (BU-205: Types of Lithium-ion 2021).

Ominaisuuksiensa takia tänä päivänä on harvinaisempaa nähdä puhtaasti LMO-akkukemialla toimivia järjestelmiä. Usein litium-mangaanioksidikemia yhdistetään litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidikemiaan, lyhyemmin NMC:hen. LMO-akkuja on kuitenkin käytetty akkutyökaluissa, lääketieteen työvälineissä sekä sähkövoimalinjoissa.

Taulukossa 1 on koottuna Nissan LEAFin LMO-akun ominaisuuksia.

Taulukko 1. LMO-akkukemian ominaisuuksia (BU-205: Types of Lithium-ion 2021).

Litium-mangaanioksidi eli LiMn_2O_4	
Energiatiheys	100–150 Wh/kg
Jännite	3,7 V (3,8 V) nominaali, tyypillinen kennokohtainen toiminta-alue 3,0–4,2 V/kenno
C-arvo	Ladatessa tyypillisesti 0,7–1 C Purkaessa 1–10 C, erityistapauksessa jopa 30 C pulssiluontoisesti
Elinkaari	300–700 sykliä käyttötapa huomioiden

2.3 Huomioitavat seikat mitattavassa ajoneuvossa

Mitattava ajoneuvo on ollut vaihtelevassa käytössä yli kymmenen vuotta. Litiumioniakkujen ikääntymisen vaikutuksia akkujen energiatehokkuuteen ja toimintaan on tutkittu, ja tutkimukset ovat osoittaneet akkujen hyötysuhteen ja kapasiteetin laskevan ajan kuluessa. Akun kulumiseen vaikuttaa muun muassa akun ikä, käyttösyklien määrä ja laatu sekä käyttöympäristössä vallitsevat olosuhteet kuten lämpötila. (Yang ym. 2018.) Käyttösyklillä tarkoitetaan akun lataamista ja purkamista kerran. Myös sillä, kuinka täyteen akku ladataan ja kuinka tyhjäksi se ajetaan ja missä ajassa, on vaikutusta akun kulumiseen. Ajoneuvovalmistajilla on ajoneuvo- ja akkukohtaisia suosituksia latauksesta. Monesti suositellaan esimerkiksi, ettei akkua ladata yli 80 - 90 %. (How to Charge a Nissan LEAF: Charging Time, Costs & Options 2022; Model S Owner's Manual 2023; Owner's Manual ID. 4 2020.)

Nissan LEAFissa käytettävän ominaiskapasiteetiltaan 24 kilowattitunnin akun energiankulutuksen voidaan olettaa olevan yli 10 prosenttia korkeampi kuin uutena, silloin kun akun kapasiteettia on jäljellä alle 70 prosenttia alkuperäisestä (Yang ym. 2018).

Huomioiden edellä mainitut seikat voidaan olettaa insinööriyössä suoritettujen mittaustulosten eroavan uuden vastaavan ajoneuvon tuloksista.

2.4 Dynamometrin käyttö voimalinjan testauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoululla on erilaisten ajoneuvojen testaamisen rakennettu olosuhdelaboratorio. Laboratorion varustukseen kuuluu Rototestin valmistamat tarkkaan ammattikäyttöön soveltuva 460 kW:n tehoinen nelivedolle soveltuva dynamometri. Dynamometrejä voidaan käyttää työkaluna mitattaessa moottoreita, voimansiirtoa, ajoneuvon suorituskykyä ja hyötysuhdetta. Dynamometrin käyttö mahdollistaa ajoneuvon kuormittamisen paikallaan. Rototest kutsuu tätä ominaisuutta itse nimellä Road-to-lab eli Tieltä laboratorioon. Rototest

AB markkinoi dynamometritestausta aika- ja kustannustehokkuutta edistävänä työkaluna. (General powertrain.)

Insinööriyön mittausten tekeminen kuormittamalla ajoneuvoa dynamometrillä mahdollisti turvallisen ja ympäristön olosuhteista riippumattoman tiedonkeruun. Dynamometrillä saadaan asetettua tasainen ajovastus. Mittaukset suoritetaan sisätiloissa, jolloin esimerkiksi ilmankosteus ja lämpötila eivät pääse vaikuttamaan mittaustuloksiin. Eikä mittausta tarvitse tehdä liikenteessä ajaessa. Roto-testin käyttöliittymään kuuluu oma ohjelma ajodatan taltioimiseen testin ajalta.

2.5 Datan keräys ja mittausepävarmuus

Ajoneuvon akusta ja sähköisestä voimansiirrosta datankeruu suoritettiin käyttämällä Launch X431 -mittaustyökalua. Launchille vaihtoehtoisia mittaustyövälineitä voisivat olla esimerkiksi suoraan väylästä mittaaminen tai toinen OBD-portin välityksellä kommunikoiva sähköautodiagnoosityökalu Leaf Spy Pro. Launch valikoitui mittaustyökaluksi helpon saatavuutensa ja aikaisemman käyttökokemuksen perusteella.

Mittaustarkkuudessa tulee huomioida sellaiset haasteet, joita ei tällaisessa tutkimuksessa ja mittaamisessa pystytä rajaamaan pois. Suurimpia haasteita voivat olla mahdolliset tiedonkeruuongelmat, joissa dataa jäisi puuttumaan tai se olisi korruptoitunutta esimerkiksi yhteysvirheen vuoksi. Sähköauton akku lämpenee akkua purkaessa ja ladatessa. Mikäli akun lämpötila ei ole kaikissa mittauksissa sama, tulokset eivät ole verrattavissa toisiinsa. Suurin haaste mittaepävarmuuden eliminoimisessa on ihmisen tekemät virheet mittauksen aikana. Ajoneuvon toimintaa ja testejä ohjataan manuaalisesti, jolloin täydellisestä toistettavuudesta tulee mahdotonta.

Mittauksia voidaan kuitenkin pitää kohtuullisen luotettavina, sillä mitattavien arvojen paikkansa pitävyyttä on helppo verrata jo olemassa oleviin mittaustuloksiin samoista arvoista.

3 Mittausten suoritus

Insinööriyössä mitattiin Nissan LEAF -täyssähköauton energiankulutusta vakio-
pyöräkuormalla sekä vaihtuvilla kuormilla. Tavoitteena oli selvittää, onko akun
varaustasolla vaikutusta energiankulutukseen. Mittaukset suoritettiin Rototest-
napadynamometrillä. Valittu mittaustapa on hyvä, sillä napadynamometrillä pys-
tytään simuloimaan todellisten ajovastusten kaltaisia tilanteita hallitussa ympä-
ristössä, mikä puolestaan mahdollistaa hyvän mittatarkkuuden. Dynamometri-
lan lämpötilaa pystytään tarvittaessa säätämään ja näin kompensoimaan mit-
tauksessa syntynyttä lämpöä, jolloin lämpötilavaihteluiden vaikutukset mittaus-
tuloksiin vähenevät.

Mittausta varten dynamometriin asetetaan vakioajovastukset ja mitattavaa ajo-
neuvoa ajetaan niitä vastaan tasanopeudella vakionopeudensäädintä apuna
käyttäen. Kuvailtu toimintamalli vähentää huomattavasti mittavirheen mahdolli-
suutta. Napoihin kiinnitettäviä dynamometrejä voidaan käyttää myös esimerkiksi
WLTP-syklien ajamiseen, ajoneuvon tehon ja momentin selvittämiseen ja mo-
neen muuhun. Peruseriaatteena näissä perinteisemmissä käyttötavoissa on
kuittenkin ajoneuvon voimalinjan manuaalinen käyttö, jolle on määritetty sallitut
toleranssit. Valitun mittaustavan haasteena on nimenomaan ajovastusten ja liik-
kumiseen tarvittavan tehon vakioiminen

Mittausdatan keräämiseksi tehtiin kolme mittausta 95 %:n varauksesta noin 20
%:n varaukseen, joista kahdessa ensimmäisessä ajovastukset asetettiin 15
kW:iin. Ajovastus toteutettiin ajamalla vakionopeudella vakiovastusta vastaan.
Mitattu pyöräteho vaihteli 14,9 kW:n ja 16,1 kW:n välillä, mikä voi johtua vaki-
onopeudensäätimen käytöstä ja sen vaikutuksesta invertterin vääntömomentti-
pyynnön laskentaan. Mittauksen aikana kerättiin tietoa Launch X431:llä, joka on
ajoneuvokäyttöön suunniteltu älykäs diagnostiikkatyökalu. Kommunikaatio ajo-
neuvon ja diagnostiikkatyökalun välillä tapahtuu OBD-porttiin kytkettävän lähet-
timen kautta. Rototest-dynamometreiltä tieto pyörätehosta kerättiin Rototestin
Dynovision- ja DatMon-ohjelmilla.

Ennen varsinaisia neljännessä luvussa esitettyjä mittauksia suoritettiin koemittaus. Koemittauksessa ajoneuvon SoC oli alle 70 %. Koemittauksessa haettiin ajonopeus, jolla pyöräkuorma on oikea, sekä kerättiin esimerkkidataa sekä Rototest-ohjelmista ja Launch X431:itä, jota käytettiin hyödyksi Matlab-skriptien suunnittelussa. Koemittauksen tuloksia ei esitellä tässä insinööriyössä.

Kahden ensimmäisen mittauksen aikana seurattiin myös ajoneuvon itse ilmoittamaa energiankulutusta, joka oli 0,2 kWh kilometrillä. Luvussa 4 esitettyjen tulosten mukaan todellinen energiankulutus kahdella ensimmäisellä mittauksella oli noin 0,21 kWh kilometrillä. Kolmannella mittauksella keskimääräinen kulutus oli 0,27 kilowattituntia kilometrillä.

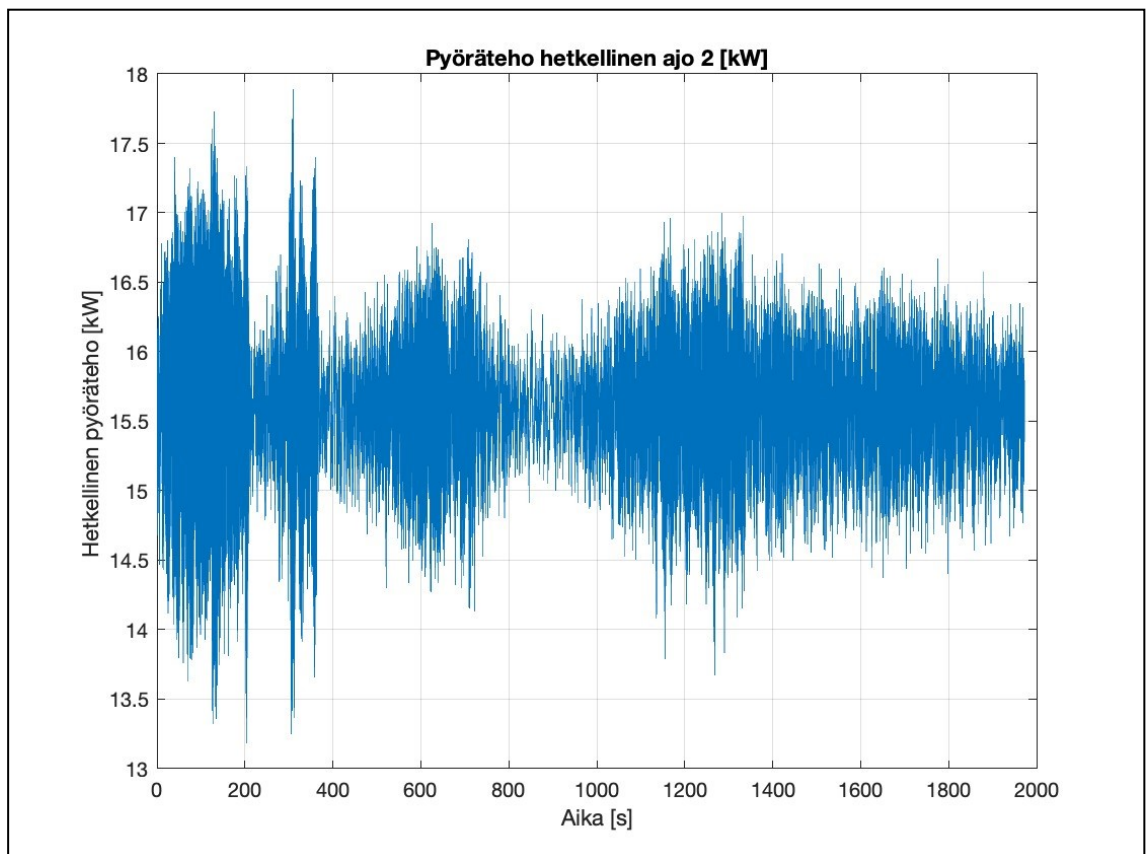
Mittausten välissä ajoneuvo ladattiin. Lataaminen tapahtui samassa olosuhtelaboratoriossa kuin dynamometrimittaukset, joten ajoneuvo sai olla kytkettynä dynamometriin myös latausten ajan. Lataus tapahtui Enston 22 kWh:n Chago Pro -latausaseman kautta (Chago Pro Sähköauton latausta luotettavasti). Latausnopeutta rajoittaa kuitenkin Nissan LEAFin 6,6 kWh:n sisäinen laturi. Mittaukset pyrittiin aloittamaan mahdollisimman nopeasti latauksen jälkeen, jotta latauksen tuottama lämpötila olisi aina sama mittauksen alussa. Tämä oli mahdollista suorittamalla vain yksi mittaus päivässä. Laturilta saatiin myös taltioitua mittaukseen käytetty energia.

4 Mittaustulokset

Tässä luvussa esitetään luvussa 3 kuvattujen mittausten tulokset. Mittauksissa kerätty data tuotiin mittausten jälkeen MathWorksin laskentaohjelmaan Matla-
biin, jossa suoritettiin kaikki laskenta (liite 1).

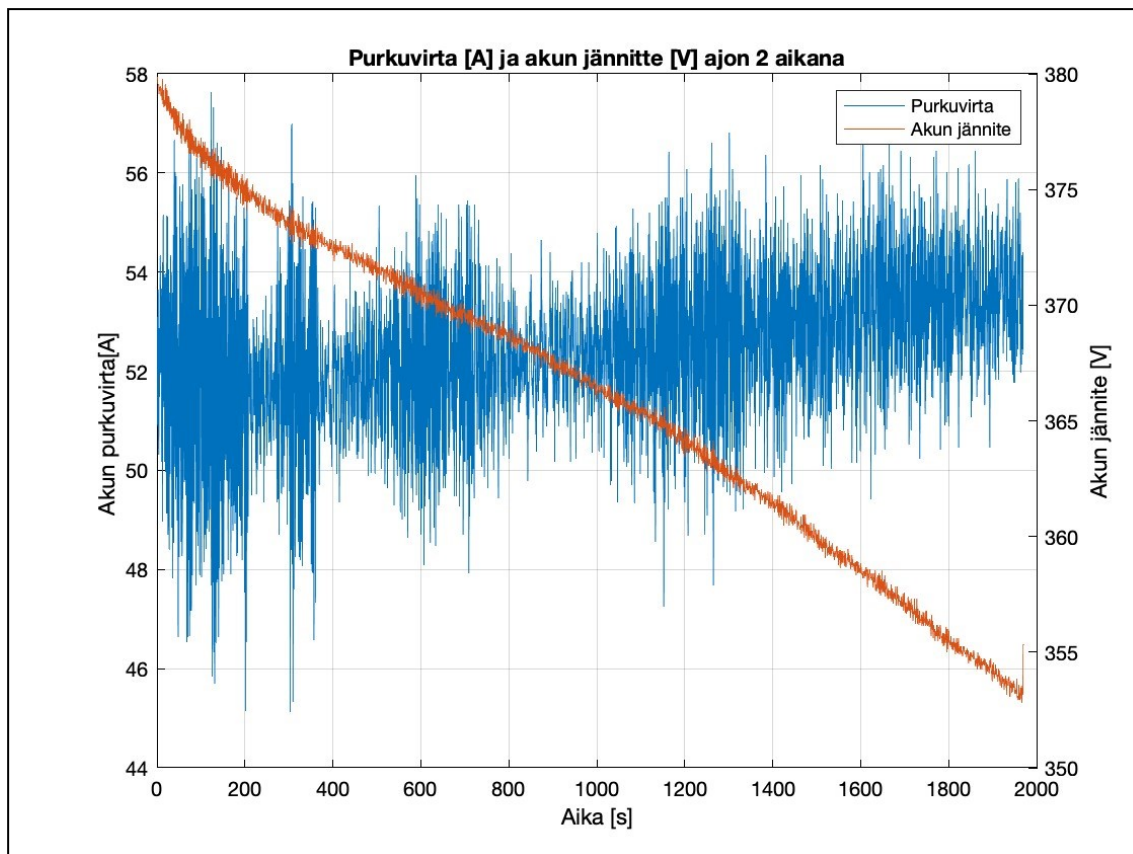
4.1 Ensimmäinen mittaus

Ensimmäisellä mittauskierroksella dataa kerättiin Launch X431:n HV BATTERY -näkömystä. HV BATTERYn kautta mitattiin korkeajänniteakun kokonaisjännitettä [V], purkuvirtaa [A], korkeinta ja matalinta kennojännitettä [mV] sekä akun lämpötilaa [°C]. Lisäksi Rototestin dynamometriltä kerättiin tieto pyörätehosta [kW] auttamaan mittatulosten tulkinnassa. Kuvassa 2 nähdään toteutunut pyöräteho ensimmäisellä mittauksella. Mittatuloksia ei ole suodatettu.



Kuva 2. Mitattu pyöräteho ensimmäisessä mittauksessa.

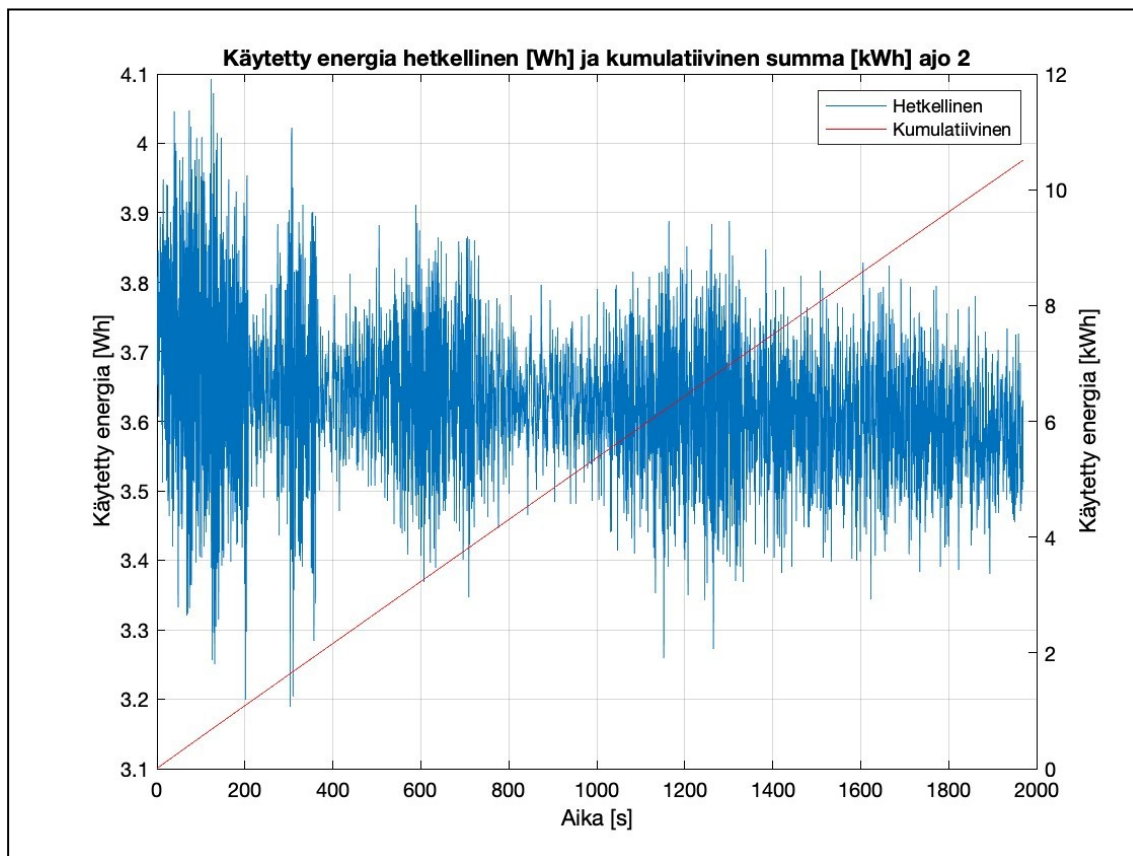
Kuvasta 2 nähdään, että toteutunut pyöräteho vaihtelee paljon. Suurimmat mitatut arvot yltävät lähes 18 kW:iin, kun taas alhaisimmillaan pyöräteho on laskenut alle 13,5 kW:n. Hajonta asettuu kuitenkin tasaisesti 15,6 kW:n kummallekin puolelle, jolloin voidaan olettaa vaihtelun johtuvan ajoneuvon tavasta ylläpitää nopeutta sykäyksittäin. Vaihtelu toistuu selkeästi myös muissa mitatuissa arvoissa, kuten purkuvirrassa (kuva 3).



Kuva 3. Akun jännite ja purkuvirta ensimmäisessä mittauksessa.

Yllä olevasta kuvaajasta (kuva 3) nähdään akun purkuvirta (sininen viiva), kulloisellakin ajan hetkellä sekä akun jännitteen kehitys ajan suhteen (oranssi viiva). Mitatuista arvoista havaitsemme, että jännitteen laskiessa akusta puretun virran määrän tulee nousta, jotta tehon tuotto pysyisi vakiona, ohmin lain mukaisesti (Hietalahti ym. 2006: 16–19). Akun jännite oli mittauksen alussa noin 379,5 V ja mittauksen päätteeksi laski noin 353 V:iin. Purkuvirta vaihteli mittauksen aikana 45 ja 57,5 A:n välillä. Mittauksen alkupään suurimmat virtapiikit

olivat jopa suurempia kuin matalammalla akun jännitteellä esiintyvä virrankulutus. Purkuvirran, akun jännitteen ja kuluneen ajan avulla pystytään laskemaan energiankulutus ensimmäisen mittauksen aikana. Tämä on esitetty kuvassa 4.



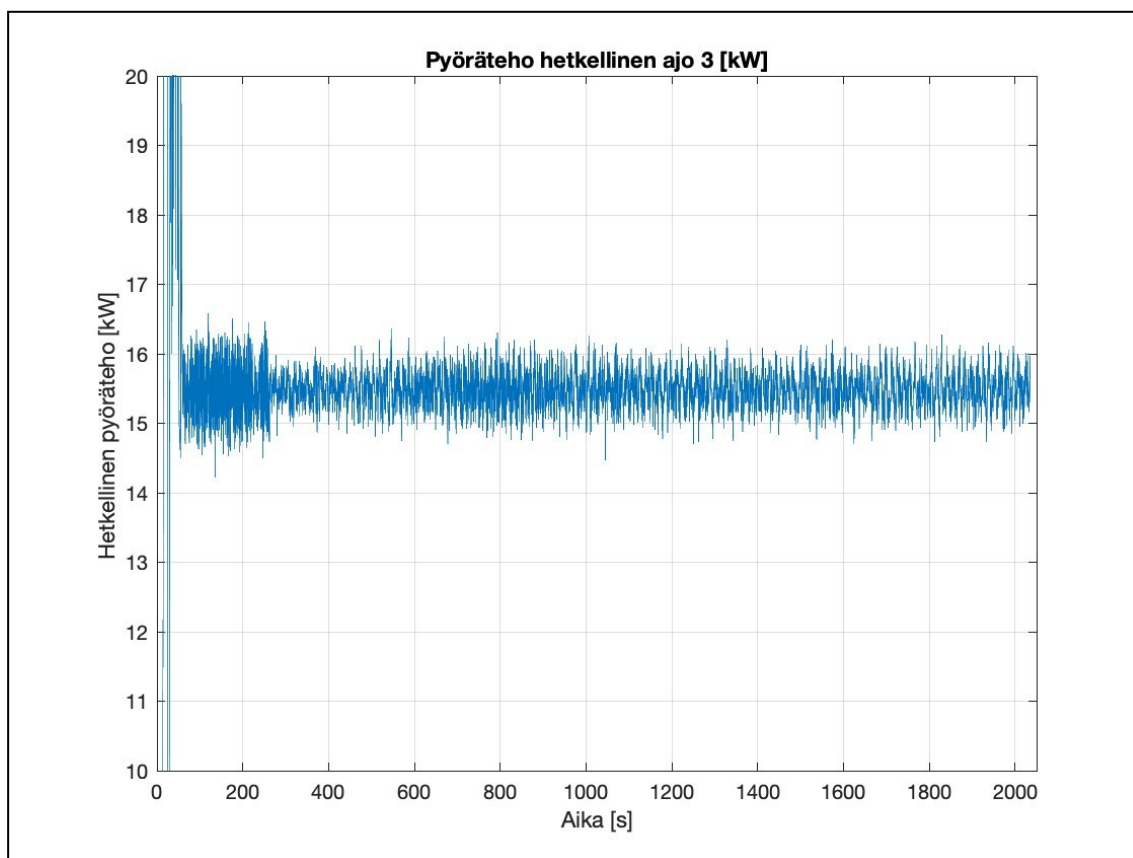
Kuva 4. Energiankulutus ensimmäisessä mittauksessa.

Kuvassa 4 olevasta kuvaajasta nähdään laskettu hetkellinen energiankulutus wattitunneissa (sininen viiva) ja mittauksen aikana kulunut kokonaisenergia kuluisellakin ajan hetkellä kilowattitunneissa (oranssi viiva). Hetkellinen energiankulutus mittauksen alussa on keskimäärin 3,6 Wh ja mittauksen lopulla se on laskenut hieman alle 3,6 Wh:n. Kokonaisuudessaan mittauksen aikana kului 10,52 kWh:n verran energiaa.

4.2 Toinen mittaus

Toisella mittauskerralla data kerättiin Launch X431:n EV/HEV-näkymästä, jolloin päästiin taltioimaan SoC sekä prosentteina että jäljellä olevana energiana [Wh]. Lisäksi saatiin arvot akun kokonaisjännitteelle ja purkuvirralle, mutta mitattu data oli hyvin erilaista kuin HV BATTERY -näkymässä. Syynä epäjohtomukaisuuteen voisi olla esimerkiksi se, että tiedot ovat ajoneuvon energiankulutuslaskennan kautta purettavat arvot, eivätkä suora tulos akun anturidatasta, joka saadaan HV BATTERY-näkymästä

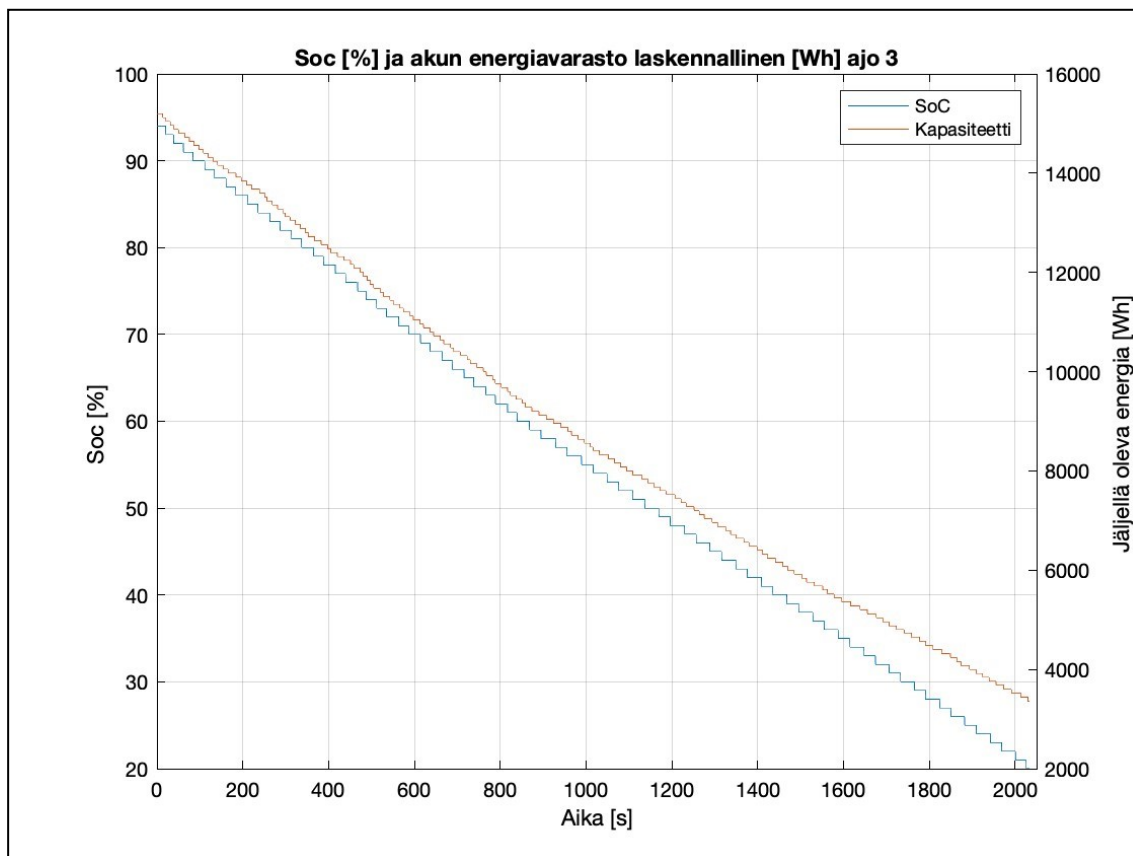
Toinen mittaus toteutettiin samalla tavalla kuin ensimmäinen mittaus, jotta SoC-arvot olisivat tarvittaessa verrattavissa ensimmäisen mittauksen energian kulu-
tukseen. Toisella mittauksella kuitenkin kerättiin mittadataa myös kiihdytyksen aikana, kun taas ensimmäinen mittaus aloitettiin vasta kun haluttu pyöräteho oli saavutettu tasanopeudella. Kiihdytys näkyy kuvassa 5 ensimmäisen 70 sekun-
nin aikana pyörätehon rajuna vaihteluna.



Kuva 5. Mitattu pyöräteho toisessa mittauksessa.

Kuvassa 5 näkyy dynamometriltä kerätty tieto pyörätehosta. Kuvaajan y-akselia on rajattu tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi. Toisessa kuten ensimmäisesäkin mittauksessa pyöräteho asettuu keskimäärin 15,5 kW:n paikkeille ja hie- man sen yli. Kuvaajasta on huomattavissa pyörätehon vaihtelun taajuuden muutos 200 sekunnin jälkeen, mikä tukee aikaisemmin tehtyä oletusta pyöräte- hon vaihtelun johtumisesta ajoneuvon omasta nopeudensäätelytavasta.

Toisessa mittauksessa kerättiin myös akun jännitteen ja purkuvirran arvoja, mutta mittausnäkyvän takia mitatut arvot olivat valmiiksi suodatettuja. Suodate- tuista arvoista tehtyjä kuvaajia ei esitellä tässä insinööriyössä, sillä niiden tulkit- seminen ei ole luotettavaa. Energian kulutuksen voi kuitenkin nähdä kuvan 6 kuvaajasta.



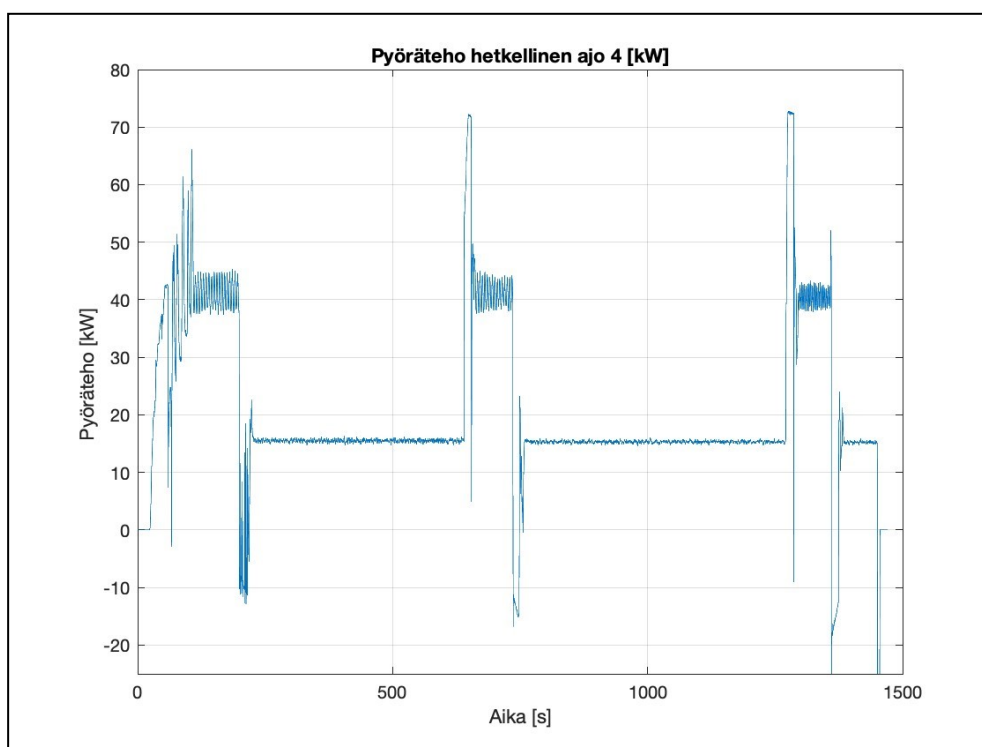
Kuva 6. *State of Health* ja jäljellä oleva energiavarasto toisen mittauksen aikana.

Kuvassa 6 on esitetty ajoneuvon SoC:n eli akun varaustason muutos ajan suhteen (sininen viiva) ja akun energiavaraston hupeneminen (oranssi viiva). Kuvasta huomataan, että kumpikin viivoista loivenee tuhannen sekunnin jälkeen hieman, mikä viittaisi siihen, että energiaa kuluu hitaammin, vaikka ajoneuvoa kuormitetaan edelleen samalla tavalla.

Ensimmäisen ja toisen mittauksen arvojen tarkoitus oli myös olla vertailukelpoisia keskenään, jolloin tietoja voitaisiin esittää päällekkäin. Vertailukelpoisuutta pyrittiin edistämään ajamalla molemmat mittaukset heti latauksen jälkeen, jolloin akun lämpötila olisi mittauksen alkaessa sama. Tässä tapauksessa lämpötila oli 25 °C. Kokonaisenergiavarasto ja purkuvirta tiedettäessä voidaan laskea, että 1C kyseessä olevalla akulla on 40 Ah / 60 min. Akun purkaminen on silloin tapahtunut ensimmäisessä ja toisessa mittauksessa noin 1,3 C:n tahdilla.

4.3 Kolmas mittaus

Kolmas mittaus suoritettiin samalla SoC-välillä kuin ensimmäinen ja toinen mittaus. Kolmannessa mittauksessa oli kuitenkin tarkoitus selvittää akun sisäisiä vastuksia eli resistanssia. Mittauksessa purettiin akkua pääasiassa 15 kW:n vakiovastuksella, mutta SoC:n kohdalla 78 %, 51 % ja 29 % pyöräteho nostettiin noin minuutin ajaksi 40 kW:n suuruisiksi (kuva 7).



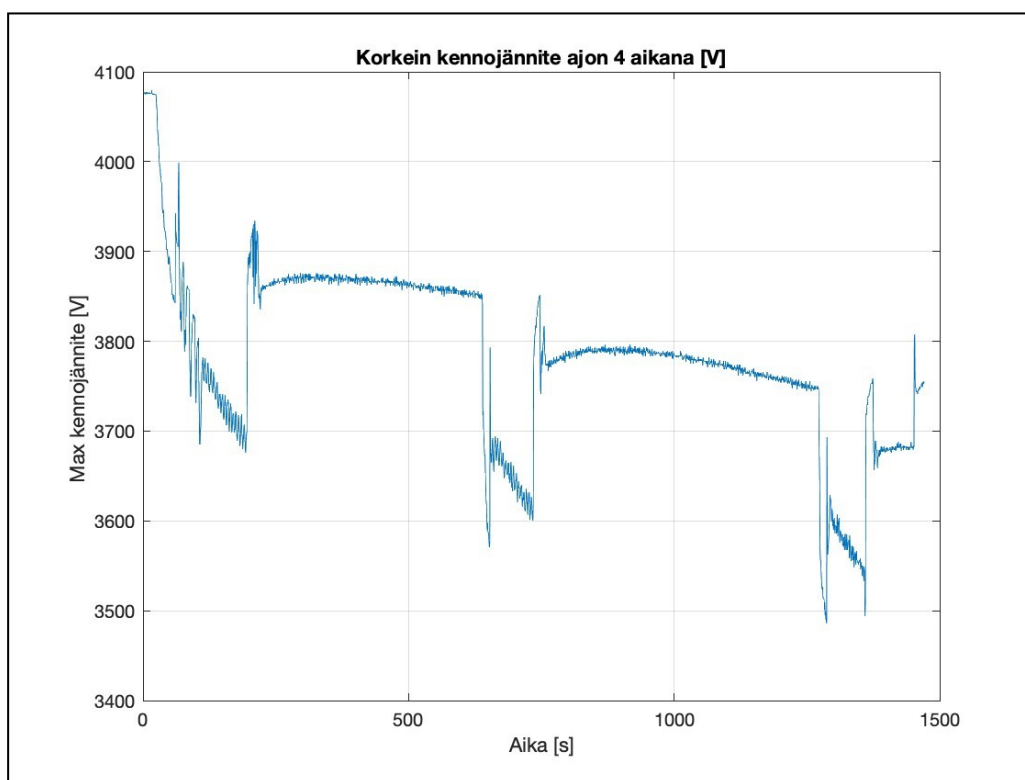
Kuva 7. Mitattu pyöräteho kolmannessa mittauksessa.

Kuvan 7 kuvaajassa nähdään kuormituksen muutoksen hetket pyöräkuorman vaihtuessa kolmesti noin 40 kW:n ja 15 kW:n välillä. Mittausaika lyheni kahteen edelliseen mittaukseen verrattuna noin 25 % kuormituksen ollessa keskimäärin suurempaa. Suuremmalla pyöräteholla huomataan, että toteutunut teho asettuu laajemmalle vaihteluvälille. Siinä missä matalammalla kuormituksella vaihteluväli on suurimmillaan kolmen kilowatin luokkaa, suurella kuormituksella vaihtelu tapahtuu viiden ja kymmenen kilowatin haarukassa.

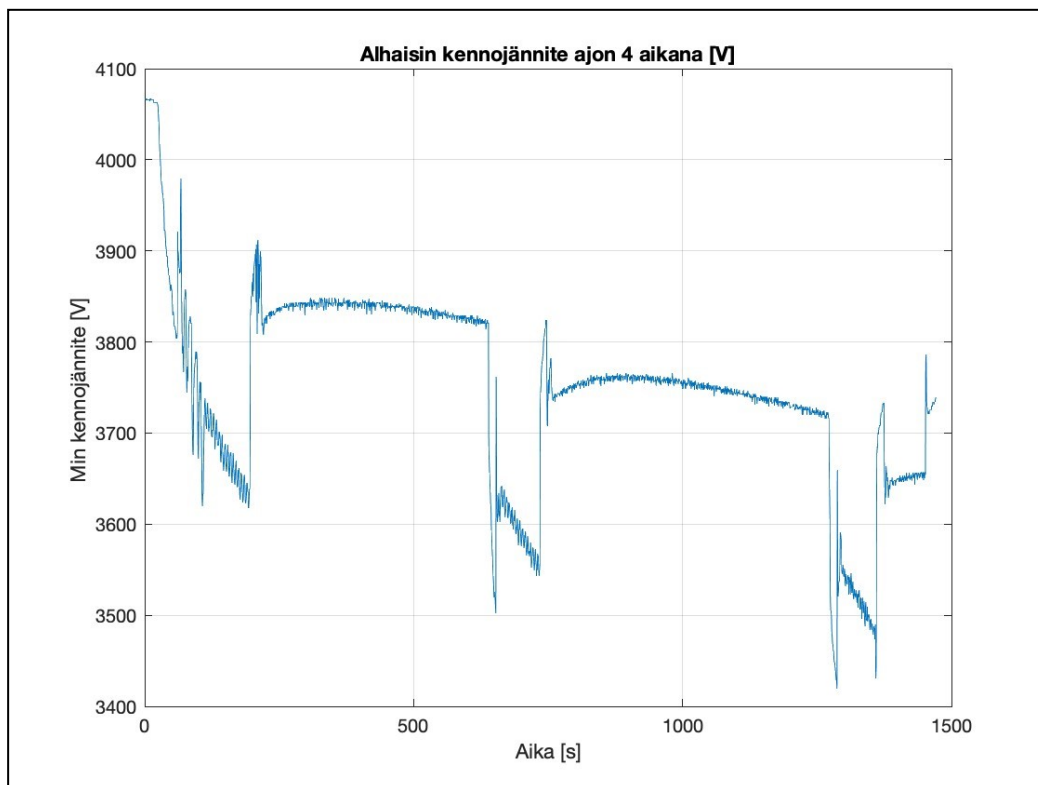
Kennojen sisäinen resistanssi R_s akun eri varaustasoilla voidaan laskea kuvien 8 ja 9 arvoja hyödyntäen seuraavalla kaavalla (Hietalahti ym. 2006: 36–37):

$$R_s = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}$$

Kuvien 8 ja 9 kuvaajissa on esitettyä korkein ja matalin kennojännite kulloisellakin ajan hetkellä. Näitä arvoja ja kuvassa 10 esitettyä purkuvirtaa hyödyntämällä voidaan laskea mittauksen hetkellä matalimman jo korkeimman kennojännitteen omaavan kennon sisäinen resistanssi. Edellä mainitut resistanssit on esitetty taulukossa 2.



Kuva 8. Korkein mitattu kennojännite kolmannen mittauksen aikana.



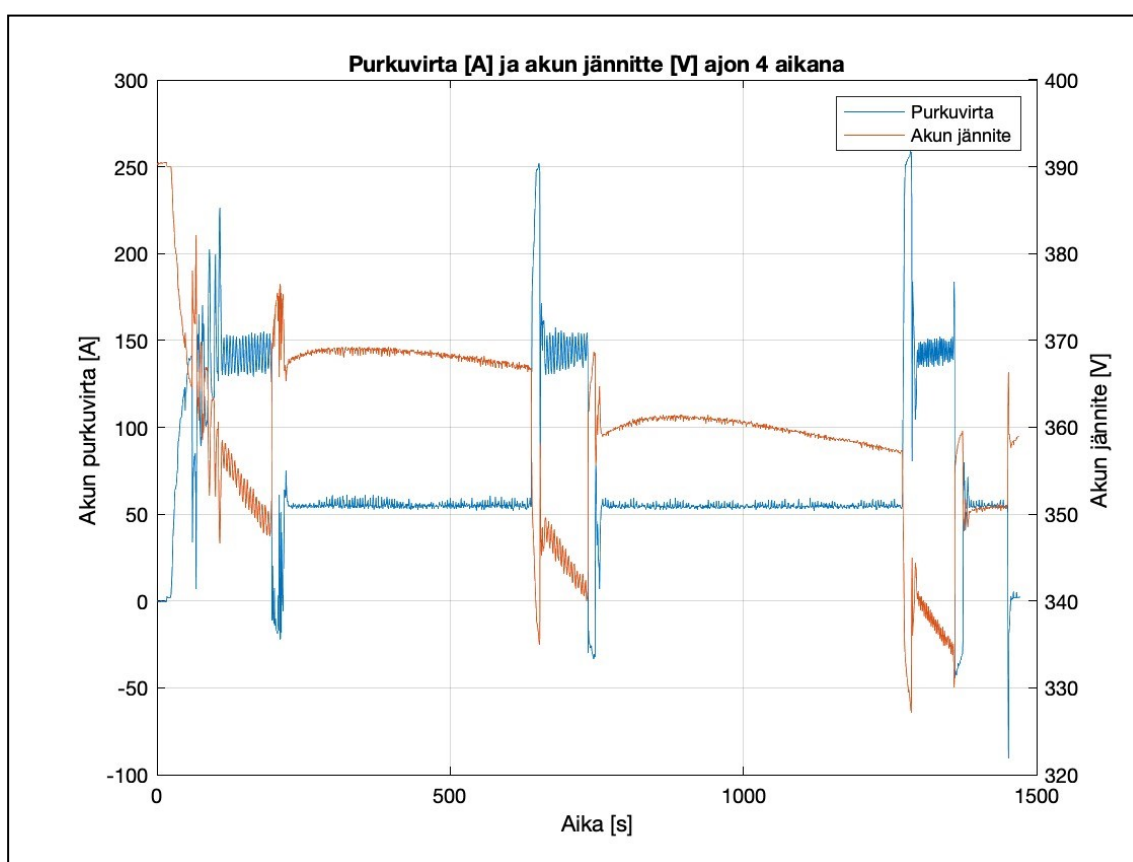
Kuva 9. Alhaisin mitattu kennojännite kolmannen mittauksen aikana.

Taulukko 2. Kennon sisäiset resistanssit eri SoC-arvoilla.

SoC [%]	Maksimijännitteen omaavan kennon sisäinen resistanssi [mΩ]	Minimijännitteen omaavan kennon sisäinen resistanssi [mΩ]
78	1,899	2,131
51	1,735	1,976
29	1,587	1,891

Taulukosta 2 huomataan, että kennojen sisäinen resistanssi laskee akun vaarustason laskiessa. Korkeimman arvon on jopa 2,131 m Ω ja alin arvo 1,587 m Ω . Vaikka laskennassa on käytetty kulloisellakin hetkellä korkeinta ja matalinta kennojännitettä, voidaan olettaa kyseessä olevan paras ja huonoin kenno. Matalampi sisäinen resistanssi tarkoittaa parempaa energiatehokkuutta (Geantil 2021). Kennojen sisäisten resistanssien erot viittaavat siihen, että sisäiset resistanssit ovat kasvaneet akun ikääntyessä.

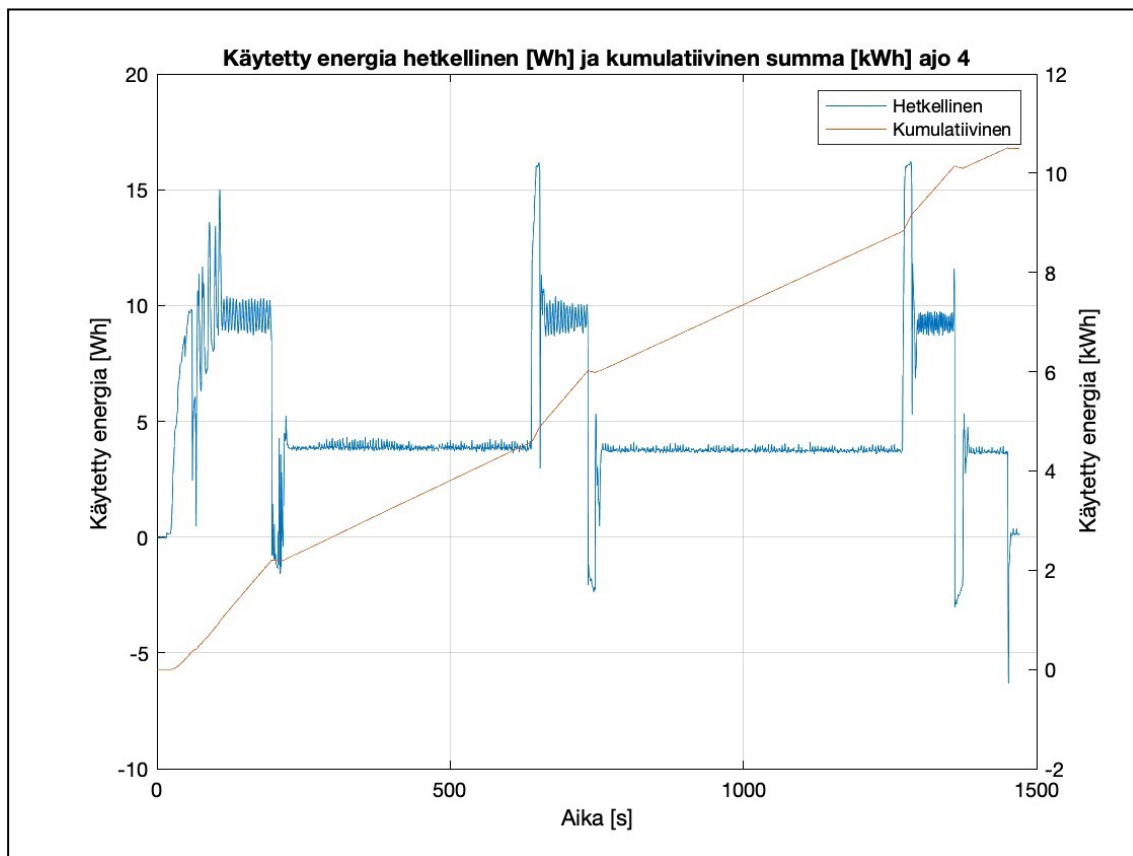
Kuvassa 10 on esitettyä aikaisemmin mainittu purkuvirta ja akun jännite.



Kuva 10. Akun jännite ja purkuvirta kolmannessa mittauksessa.

Yllä olevasta kuvaajasta nähdään, kuinka akuston jännite lähtee suuremmilla kuormituksilla jyrkempään laskuun kuin matalammilla. Jännite kuitenkin palautuu jonkin verran, kun kuormitusta pienennetään. Purkuvirrassa muutokset ovat vaikeammin havaittavissa. Suurella kuormituksella purkuvirran käyrä kuitenkin

mukailee pyörätehon (kuva 7) mukaista vaihtelua. Kuten ensimmäisessäkin mittauksessa, kuvassa kymmenen nähtäviä arvoja on hyödynnetty energian kulutuksen laskemiseen (kuva 11).



Kuva 11. Energian kulutus kolmannessa mittauksessa.

Kolmannessa mittauksessa saavutettiin selkeästi suurin hetkellinen energian kulutus (kuva 11) suurempien kuormien ansiosta. Silti voidaan huomata, että energian kulutuksen trendi on laskeva mittauksen loppua kohden. Kokonaisuudessaan energiaa kului kolmannella mittauksella 10,51 kWh.

Taulukossa 3 verrataan mittauksen aikana käytettyä energiaa mittauksen jälkeen lataamiseen kuluneeseen energiaan.

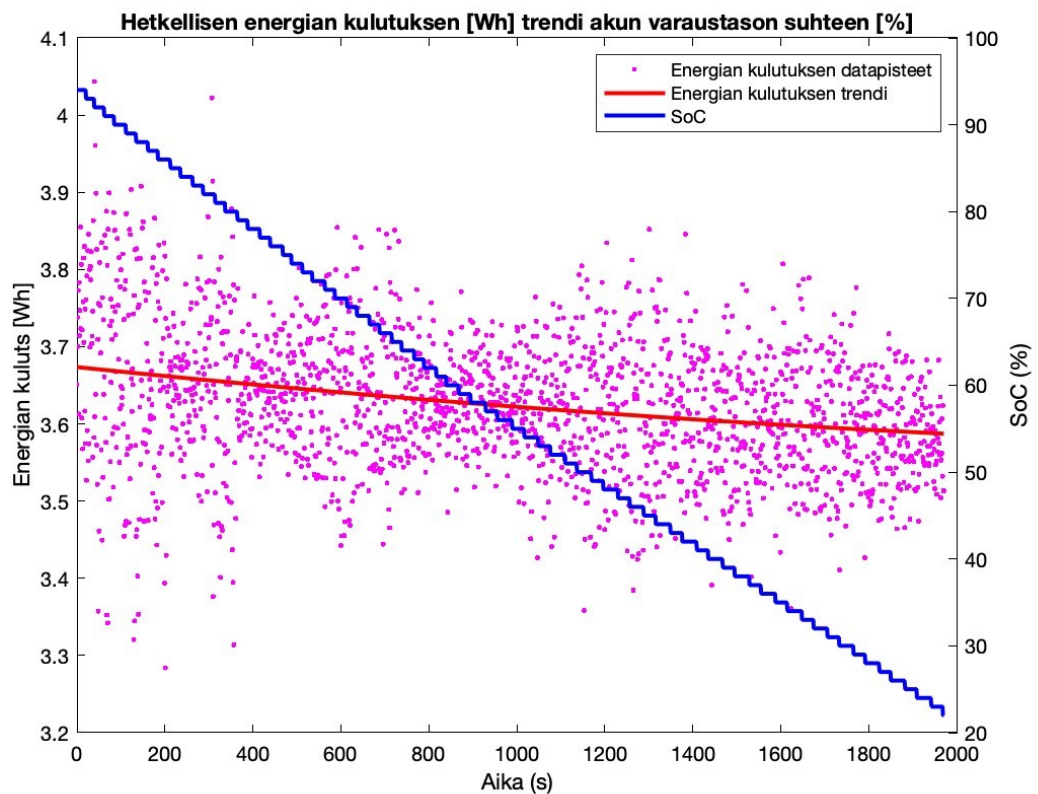
Taulukko 3. Ladatun ja puretun energian vertailu.

	Purettu [kWh]	Ladattu [kWh]
Mittaus 1	10,5200	12,98
Mittaus 2	11,1135	13,67
Mittaus 3	10,5088	13,55

Taulukon 3 vertailu ei ole kovin olennainen tutkimuskysymyksen kannalta, mutta vahvistaa väitettä akun kuluneisuuden negatiivisesta vaikutuksesta sen energia tehokkuuteen, sillä normaalit lataushäviöt eivät kata ladatun ja puretun energian välistä kuilua.

5 Tulosten analysointi

Vastaus alkuperäiseen kysymykseen ”Muuttuuko sähköajoneuvon energiankulutus akun varaustason laskiessa?” on kyllä. Luvussa 4 esitetyt mittaustulokset osoittavat selkeästi, että akun varaustason laskiessa energiankulutus laskee ainakin tässä tutkimuksessa mitatussa ajoneuvossa (kuva 12). Mutta se, miksi näin tapahtuu ei ole täysin selvää. Energian tarpeen laskua alhaisemmilla akun varaustasoilla tukee myös mittauksista laskettu kennojen sisäisen resistanssin pieneneminen SoC:n laskiessa.



Kuva 12. Hetkellinen energian kulutus ja SoC ajan suhteen.

Kuvan 12 kuvaajassa nähdään, että energian kulutuksen trendi (punainen viiva) laskee akun varaustason (sininen viiva) laskiessa. Lasku tapahtuu keskimäärin yhden desimaalin sisällä. Datapisteistä huomataan, että vaihteluväli pienenee

mittauksen loppupuolella. Tulokset voisivat olla erilaiset suuremmalla kuormalla mitattuina.

Löydetty ilmiö ei kuitenkaan vastaa tutkimuksen ennakko-oletusta siitä, että energiankulutus nousisi akun varaustason laskeutessa. Katsottaessa kuvan 6 kuvaaja huomataan, että kuormituksessa tapahtuvien vaihteluiden taajuus kasvaa akun varauksen laskeutessa. Vaikka voimalinja pystyy mittauksen loppuun asti suorittamaan pyydetyn tehtävän, tässä tapauksessa nopeuden ylläpitämisen taustasta kuormaa vasten, työtapo muuttuu akun varaustason muuttuessa.

Työtavan muutokseen voi vaikuttaa useampi eri tekijä, kuten lämpötilan muutos akussa ja muissa voimalinjan komponenteissa, akun jännitteen aleneminen ja sen myötä purkuvirran kasvu tai vaikka jokin voimalinjan ohjauksen ohjelmointi, joka säätelee voiman ulosottoa suhteessa akussa tai muualla voimalinjassa tapahtuviin muutoksiin. Pieni hyötysuhteen paraneminen voimalinjan lämmetessä voisi olla mahdollista esimerkiksi pienen lämpötilan nousun parantaessa alenuskäytön voitelua. Akun sisäisen resistanssin havaittiin laskevan mittauksen loppua kohden sekä lämpötilan noustessa. On kuitenkin mahdollista, että lämpötilan nousu voi lisätä voimalinjan johteissa ilmeneviä vastuksia, sillä johtimien resistanssi on lämpötilariippuvainen.

Tehtyjen mittausten perusteella ei pysty määrittämään ilmiön aiheuttajaa. On hyvä muistaa, ettei kaikki energiantarve tule voimalinjasta. Korkeajännite akku toimii energianlähteenä myös ajoneuvon muille järjestelmille.

Kennojen sisäisen resistanssin laskeva trendi akun varaustason laskeutessa voisi selittyä osittain lämpötilan kasvulla mittauksen edetessä. Kaikilla akuilla on jokin lämpötila, jossa akun sisäiset resistanssit ovat alhaisimmillaan. Osassa sähköautoissa on latausta varten jopa esilämmitys, jonka avulla voidaan minimoida lataus häviöitä ja saavuttaa nopeampi eli tehokkaampi lataus. Sama pätee myös toiseen suuntaan. Syy akun lämpenemiseen on resistanssin aiheuttamat lämpöhäviöt. Lämpöhäviöt eivät kuitenkaan johdu vain kennojen sisäisestä resistanssista, vaan tähän vaikuttaa myös akkujen ulkopuolinen kuorma eli tässä

tapauksessa ajoneuvon voimalinja, jolle akku toimii energianlähteenä. Akun purkamisen tehokkuus ja hyötysuhde muuttuu lämpötilan muuttuessa. Lämpötilan vaikutukset akun suorituskykyyn näkyvät myös akkujen kulumisessa (Yang ym. 2018).

6 Johtopäätökset

Viimeisessä luvussa on vedetty yhteen insinööriyön saavutukset ja arvioidaan insinööriyön toteutuksen onnistumista. Samalla arvioidaan, vastaavatko tulokset ennalta asetettuja odotuksia, ja pohditaan mahdollisia kehitysmahdollisuuksia vastaavantapaisen tutkimuksen toteutukseen tulevaisuudessa.

Mittausten avulla onnistuttiin löytämään vastaus kysymykseen ”Muuttuko ajoneuvon energian kulutus alhaisemmalla akun varaustasolla?”. Mittausten perusteella voidaan sanoa, että energiankulutus laskee alhaisemmalla varaustasolla. Mittaukset antavat myös hyödyllistä tietoa ajoneuvon kunnosta sen omistavalle taholle.

Mittaustulokset eivät vastanneet ennalta asetettuja oletuksia. Oletus oli, että energiankulutus kasvaisi akun varaustason laskiessa, sillä tämäntyyppistä ilmiötä on ollut havaittavissa sähköajoneuvoja ajettaessa normaaleissa liikenneolosuhteissa. Havainnoissa ajoneuvot ovat samalla reitillä, identtisissä olosuhteissa, ilmoittaneet toteutuneeksi energiankulutukseksi suurempia arvoja akun alhaisemmalla varaustasolla. Herääkin kysymys, vastaavatko tässä insinööriyössä saadut tulokset muiden sähköajoneuvojen käyttäytymistä.

Kuten muissakin LMO-akustolla varustettua Nissan LEAF ZE0 -ajoneuvoa käsittelevissä julkaisuissa todetaan, sanoisin, ettei tämän insinööriyön tuloksia tule soveltaa muunlaisiin ajoneuvoihin, ei välttämättä edes uudenveroisella akulla varustettuun samanlaiseen ajoneuvoon. Johtuen mittauksissa käytetyn ajoneuvoakuston kemiasta, koosta ja kunnosta mittauksien tulokset kuvaavat nimenomaan mitatun ajoneuvon toimintaa. Jos taas testattaisiin nykyaikaisempien täyssähköajoneuvojen akkuja samoin testausmenetelmin, voisivat tulokset olla erilaisia.

Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista päästä vertaamaan tässä insinööriyössä saatuja tuloksia paremmassa kunnossa olevaan vastaavaan ajoneuvoon sekä muunlaisella akkukemialla ja voimalinjalla varustettuihin sähköajoneuvoihin. Tämän insinööriyön pohjalta voisi lähteä selvittämään syitä energiankulutuksen muutoksiin.

Lähteet

BU-205: Types of Lithium-ion. 2021. Verkkoaineisto. Cadex Electronics Inc. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>. Päivitetty 22.10.2021. Luettu 25.4.2023.

Chago Pro Sähköauton latausta luotettavasti. Verkkoaineisto. Ensto Ltd. <https://www.ensto.com/files/documents/datasheet/Solutions/Chago_Pro_leaflet_fi_v01.pdf>. Luettu 25.4.2023.

Geantil, Peter. 2021. How internal resistance affects lift truck battery performance. Verkkoaineisto. Battery Industry. <<https://batteryindustry.tech/how-internal-resistance-affects-lift-truck-battery-performance/#:~:text=The%20lower%20the%20internal%20resistance,up%20creating%20a%20voltage%20drop>>. 17.5.2021. Luettu 1.5.2023

General powertrain. Verkkoaineisto. Rototest Ab. <<https://rototest.com/products/general-power-train/>>. Luettu 25.4.2023.

Hietalahti, Lauri; Määttänen, Kari & Tarkka, Pertti. 2006. Piirianalyysi 1. 1.-3. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy

How to Charge a Nissan LEAF: Charging Time, Costs & Options. 2022. Verkkoaineisto. Nissan North America Inc. <<https://www.nissanusa.com/experience-nissan/news-and-events/nissan-leaf-charging-101.html>>. 20.10.2022. Luettu 1.5.2023.

Model S Owner's Manual. 2023. Verkkoaineisto/ohjekirja. Tesla Inc. <https://www.tesla.com/ownersmanual/models/en_us/GUID-BEE08D47-0CE0-4BDD-83F2-9854FB3D578F.html>. 18.4.2023. Luettu 1.5.2023.

Owner's manual ID.4. 2020. Verkkoaineisto. Volkswagen AG.

<https://www.vwidtalk.com/attachments/owners-manual-id-4-10_2020-pdf.10912/>. 12.6.2020. Luettu 1.5.2023

Yang, Fan; Xie, Yuanyuan; Deng, Yelin; Yuan, Chris. 2018. Predictive modeling of battery degradation and greenhouse gas emissions from U.S. state-level electric vehicle operation. Verkkomateriaali. Springer Nature.

<<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04826-0>>. 21.6.2018. Luettu 29.4.2023

Matlab-skripti

```
close all

%Ladataan mittausdata Workspaceen
load('OppariRonjaAjoj234.mat')

%Ajo 2 (ensimmäinen varsinainen mittaus ajo)
%-----
-----

% Luodaan oikean pituinen aikajana
TimeStepajo2 = max(timesajo2)/2901 ;
Aikajanasajo2 = 0:TimeStepajo2:(2901-1)*TimeStepajo2;

%Lasketaan käytetty energia kulloisessakin mittapisteessä
Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo2 = (BatteryVoltageVajo2
.* BatteryElectricCurrentAajo2 .* TimeStepajo2 .* -
1)./3600;

%Lasketaan käytetyn energian kumulatiivinen summa, joka kuva-
vaa testisyklillä
%kulutettua energiaa kokonaisuudessaan [Ws] ja muutetaan se
muotoon [kWh]
y2 = cumsum(Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo2);
Kokonaisenergia_kWh_ajo2 = max(y2)/1000

% Lasketaan akun keskimääräinen lämpötila
data2 = [BATTERYTEMPERATURE4degreeCajo2'; BATTERYTEMPER-
TURE3degreeCajo2'; BATTERYTEMPERATURE2degreeCajo2'; BAT-
TERYTEMPERATURE1degreeCajo2'];
AverageTempCajo2rivi = mean(data2) ;
AverageTempCajo2 = AverageTempCajo2rivi' ;

figure(1)
yyaxis left;
plot(Aikajanasajo2,Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo2);
ylabel('Käytetty energia [Wh]');
hold
yyaxis right
plot(Aikajanasajo2,cumsum(Kaytetty_energia_hetkelli-
nen_Wh_Ajo2 ./ 1000),'r');
title('Käytetty energia hetkellinen [Wh] ja kumulatiivinen
summa [kWh] ajo 2');
xlabel('Aika [s]');
```

```

ylabel('Käytetty energia [kWh]');
legend('Hetkellinen','Kumulatiivinen');
grid on;
box on;

ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
ax.XAxis.Color = 'k';

figure(2)
plot(timesajo2,WheelPowerkWajo2);
title('Pyöräteho hetkellinen ajo 2 [kW]');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Hetkellinen pyöräteho [kW] ');
box on;
grid on;

figure(3)
yyaxis left;
plot(Aikajanasajo2,BatteryElectricCurrentAajo2.* -1);
ylabel('Akun purkuvirta[A] ');
hold;
yyaxis right;
plot(Aikajanasajo2,BatteryVoltageVajo2);
title('Purkuvirta [A] ja akun jännitte [V] ajon 2 aikana');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Akun jännite [V]');
legend('Purkuvirta','Akun jännite');
grid on;
box on;

ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
ax.XAxis.Color = 'k';

%Ajo 3
%-----
%-----

% Luodaan oikean pituinen aikajana
TimeStepajo3 = max(timesajo3)/4544 ;
Aikajanasajo3 = 0:TimeStepajo3:(4544-1)*TimeStepajo3;

%Lasketaan käytetty energia kulloisessakin mittapisteessä
Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo3 = (BatteryVoltageVajo3
.* BatteryElectricCurrentAajo3 .* TimeStepajo3 .* -
1)./3600;

```

```

%Lasketaan käytetyn enrgian kumulatiivinen summa, joka ku-
vaa testisyklillä
%kulutettua energiaa kokonaisuudessaan [Ws] ja muutetaan se
muotoon [kWh]
y3 = cumsum(Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo3);
Kokonaisenergia_kWh_ajo3 = max(y3)/1000

figure(4)
plot(timesajo3,WheelPowerkWajo3);
title('Pyöräteho hetkellinen ajo 3 [kW]');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Hetkellinen pyöräteho [kW] ');
xlim([0 2050]);
ylim([10 20]);
box on;
grid on;

figure(5)
yyaxis left;
plot(Aikajanasajo3,HVBATTLEVELSoCajo3);
ylabel('SoC [%] ');
hold;
yyaxis right;
plot(Aikajanasajo3,HVBATTLEVELWhajo3);
ylabel('Jäljellä oleva energia [Wh] ');
title('SoC [%] ja akun energiavarasto laskennallinen [Wh]
ajo 3');
xlabel('Aika [s]');
xlim([0 2050]);
grid on;
legend('SoC','Kapasiteetti');

ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
ax.XAxis.Color = 'k';

%Ajo 4
%-----
-----

% Luodaan oikean pituinen aikajana
TimeStepajo4 = max(timesajo4)/2139 ;
Aikajanasajo4 = 0:TimeStepajo4:(2139-1)*TimeStepajo4;

%Lasketaan käytetty energia kulloisessakin mittapisteessä
Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo4 = (BatteryVoltageVajo4
.* BatteryElectricCurrentAajo4 .* TimeStepajo4 .* -
1)./3600;

```

```
%Lasketaan käytetyn enrgian kumulatiivinen summa, joka kuva-
vaa testisyklillä
%kulutettua energiaa kokonaisuudessaan [Ws] ja muutetaan se
muotoon [kWh]
y4 = cumsum(Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo4);
Kokonaisenergia_kWh_ajo4 = max(y4)/1000
```

```
% Lasketaan akun keskimääräinen lämpötila
data4 = [BATTERYTEMPERATURE4degreeCajo4'; BATTERYTEMPER-
TURE3degreeCajo4'; BATTERYTEMPERATURE2degreeCajo4'; BAT-
TERYTEMPERATURE1degreeCajo4'];
AverageTempCajo4rivi = mean(data4) ;
AverageTempCajo4 = AverageTempCajo4rivi' ;
```

```
figure(6)
yyaxis left;
plot(Aikajanasajo4,Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo4);
ylabel('Käytetty energia [Wh] ');
hold;
yyaxis right;
plot(Aikajanasajo4,cumsum(Kaytetty_energia_hetkelli-
nen_Wh_Ajo4 ./ 1000));
title('Käytetty energia hetkellinen [Wh] ja kumulatiivinen
summa [kWh] ajo 4');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Käytetty energia [kWh]');
legend('Hetkellinen','Kumulatiivinen');
grid on;
box on;
```

```
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
ax.XAxis.Color = 'k';
```

```
figure(7)
plot(timesajo4,WheelPowerkWajo4);
title('Pyöräteho hetkellinen ajo 4 [kW]');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Pyöräteho [kW] ');
ylim([-25 80])
grid on;
box on;
```

```
figure(8)
yyaxis left;
plot(Aikajanasajo4,BatteryElectricCurrentAajo4 .* -1);
```

```
ylabel('Akun purkuvirta [A] ');
hold;
yyaxis right;
plot(Aikajanasajo4,BatteryVoltageVajo4);
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Akun jännite [V] ');
title('Purkuvirta [A] ja akun jännitte [V] ajon 4 aikana');
legend('Purkuvirta','Akun jännite');
grid on;
box on;

ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
ax.XAxis.Color = 'k';

figure(9)
plot(Aikajanasajo4,MAXIMUMCELLVOLTAGEmVajo4);
title('Korkein kennojännite ajon 4 aikana [V]');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Max kennojännite [V] ');
grid on
box on

figure(10)
plot(Aikajanasajo4,MINIMUMCELLVOLTAGEmVajo4);
title('Alhaisin kennojännite ajon 4 aikana [V]');
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Min kennojännite [V] ');
grid on
box on

% Tehdään kuvaaja energian kulutuksesta SoC suhteen ajolla2

% Tehdään kopiot olemassa olevista datoista
t1 = Aikajanasajo2;
e = Kaytetty_energia_hetkellinen_Wh_Ajo2;
t2 = Aikajanasajo3;
b = HVBATTLEVELLSocajo3;

% interpoloidaan kummatkin datasetit samalle aikajanalalle
t = linspace(0, 1971, 2000);
e_interp = interp1(t1, e, t, 'linear');
b_interp = interp1(t2, b, t, 'linear');

% Luodaan trendiviiva energian kulutukselle
p = polyfit(t, e_interp, 2);
yfit = polyval(p, t);

%Luodaan kuvaaja
```

```
figure(11)
hold on;
yyaxis left
plot(t, e_interp, 'm.', t, yfit, 'r-', 'LineWidth', 2);
ylabel('Energian kulutus [Wh]');
hold;
yyaxis right;
plot(t, b_interp, 'b-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Aika (s)');
ylabel('SoC (%)');
title('Hetkellisen energian kulutuksen [Wh] trendi akun va-
raustason suhteen [%]')
legend('Energian kulutuksen datapisteet', 'Energian kulu-
tuksen trendi', 'SoC');
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
ax.XAxis.Color = 'k';
```