

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2018

Juho Taavetinkangas

ULKOILMAN LÄMPÖTILAN VAIKUTUS SÄHKÖBUSSIN ENERGIANKULUTUKSEEN

Juho Taavetinkangas

ULKOILMAN LÄMPÖTILAN VAIKUTUS SÄHKÖBUSSIN ENERGIANKULUTUKSEEN

Joukkoliikenne on tällä hetkellä puhutteleva aihe Turussa. Vaihtoehtoja runkobussilinjaston malleista ja suuria matkustajamääriä vetävien linjojen toteutustavoista on selvitetty laajasti. Kaupunkien tavoitteet päästöjen vähentämiseksi edellyttävät rohkeita muutoksia liikennejärjestelmään ja sen myötä vaihtoehtoisten käyttövoimaratkaisujen käyttöönottoa julkisessa liikenteessä.

Pohjoisen ilmasto- ja keliolosuhteet nousevat usein esiin arkipäiväisessä keskustelussa puhuttaessa sähköstä vaihtoehtoisena käyttövoimana. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia sähköbussia ympäröivän ulkoilman lämpötilan vaikutusta sähköbussin energiakulutukseen koko auton, sekä yksittäisten korkeajännitteellä toimivien kuluttajien osalta. Työ oli ennen kaikkea tilastollinen tutkimus, johon liittyvät menetelmät tarjoavat oivallisen tavan analysoida eri muuttujien vaikutusta kulutukseen.

Tutkimus tehtiin keräämällä kulutustieto ja lämpötila erikseen jokaiselta kuudelta autolta ja kuluttajalta. Näytteet otettiin harkinnanvaraisesti tulosten luotettavuuden parantamiseksi. Harkinnanvaraisuudella tarkoitetaan arvojen huomioimista ainoastaan kokonaan ajettujen linjapäivien osalta, jolloin esimerkiksi huoltopäivien korkeat keskikulutukset eivät vääristä lopputulosta. Tietoja kerättiin noin 17 kuukauden ajalta jokaisen auton käyttöönottopäivästä vuoden 2018 helmikuun loppuun, jolloin eri lämpötiloja saatiin kerättyä mahdollisimman kattavasti.

Muutosta havaittiin erityisesti tasajännitemuuntimen, ilmalämpöpumpun ja ajomoottorin kulutuksessa. Toisaalta ohjaustehostimen ja paineilmakompressorin kulutukset eivät vaikuttaneet olevan lainkaan yhteydessä lämpötilan muutokseen.

ASIASANAT:

energiankulutus, lämpötila, joukkoliikenne, sähköautot, tilastotutkimus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

2018 | 41 pages, 2 in appendices

Juho Taavetinkangas

THE EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE CONSUMPTION OF ELECTRIC BUSES

Public transport is currently one of the most discussed topics in Turku. Different options have been compared to find a solution to execute a functional arterial bus route network. Light rail and bus rapid transit systems have also been discussed. Cities have to change their traffic systems in order to reach the goals in reducing emissions. This also includes considering the usage of new fuels in public transport.

The Nordic climate and weather conditions often emerge when discussing electric vehicles. The objective of this thesis is to research how ambient temperature impacts the energy consumption of electric buses. The single high voltage devices were investigated along with overall consumption. This thesis is a statistical analysis, which offers great tools to compare the effect of different variables.

The research was conducted by collecting data from six buses and from each singular high voltage device. Since many values were inaccurate because of low quantity of daily kilometers, the reliability was improved by using a discretionary sample method. Data was collected from the first day of the operation to the end of February 2018.

The impact of ambient temperature was striking in case of a DCDC-converter, heat pump and drive motor. In case of power steering and an air compressor the impact was not notable.

KEYWORDS:

energy consumption, temperature, public transport, electric vehicles, statistical analysis

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 SÄHKÖBUSSILIIKENNE TURUSSA	10
2.1 Sähköbussi	11
2.2 Ajoreitti	12
2.3 Latausasemat	12
2.3.1 Varikkolataus	13
2.3.2 Päätepysäkkilataus	13
3 TILASTOLLISEEN TUTKIMUKSEEN LIITTYVÄT KÄSITTEET	14
3.1 Tunnusluvut	14
3.1.1 Keskiarvo, mediaani ja keskihajonta	14
3.1.2 Fraktiilit ja desilli	14
3.2 Järkevyytarkastelu ja hajontakuvio	15
3.3 Korrelaatio	16
3.4 Regressio	17
4 TUTKIMUSKOHTEET	18
4.1 Moottori	18
4.2 Ilmalämpöpumppu	19
4.3 Ohjaustehostin	20
4.4 Paineilmakompressori	20
4.5 Tasajännitemuunnin	21
5 TUTKIMUSMENETELMÄ	22
5.1 Aineiston kerääminen	23
5.1.1 Keskipulutuksen selvittäminen	23
5.1.2 Lämpötilatieto	25
5.2 Lämpötilan vaikutus energiankulutukseen	26
6 TULOSTEN ESITYS	27
6.1 Ilmalämpöpumppu	28
6.2 Ajomoottori	29

6.3 Tasajännitemuunnin	30
6.4 Ohjaustehostin	31
6.5 Paineilmakompressori	32
7 POHDINTAA JA PÄÄTELMÄT	35
8 YHTEENVETO	39
LÄHTEET	40

LIITTEET

Liite 1. Sähköbussin tekniset tiedot.

KAAVAT

Kaava 1. Pearsonin korrelaatiokerroin (Keinänen n.d.).	16
Kaava 2. Regressiosuoran yhtälön parametrien laskenta.	17
Kaava 3. Korjattu keskikulutus.	25
Kaava 4. Newtonin vastuslaki ilmanvastusvoiman määrittämiseen.	36
Kaava 5. Ilman tiheys (Shelquist Engineering 2016).	37

KUVAT

Kuva 1. Linkker 13 -sähköbussi Turussa kesällä 2017. (kuva: Ville Markuksela)	12
Kuva 2. Virroitin laskeutumassa bussin katolle sataman pikalatausasemalla.	13
Kuva 3. Tilastollisen riippuvuuden selvittämisen vaiheet. (Mukaiillen: Holopainen & Pulkkinen 2012, 248)	15
Kuva 4. Visedon PowerDRUM XSe -kestomagneettitahtikoneen periaatekuva (Visedo Oy 2017b, 17).	18
Kuva 5. Lämpöpumpun periaatekuva.	19

KUVIOT

Kuvio 1. Työhypoteesina toiminut graafi.	22
Kuvio 2. Järkevyystarkastelu yhden auton osalta.	22
Kuvio 3. Autojen päiväsuoritteet pistekaaviossa.	24
Kuvio 4. Laturilta ladatun energian keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.	27

Kuvio 5. Ilmalämpöpumpun keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.	28
Kuvio 6. Ajomoottorin keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.	29
Kuvio 7. Tasajännitemuuntimen keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.	30
Kuvio 8. Ohjaustehostimen keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.	31
Kuvio 9. Ohjaustehostimen järkevyytarkastelun hajontakuvio, jossa keskikulutus yhden auton osalta ajan funktiona.	32
Kuvio 10. Paineilmakompressorin keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.	33

TAULUKOT

Taulukko 1. Sähköbussien tunnistetiedot ja aloituspäivämäärät.	11
Taulukko 2. Tutkimusta varten Wapicen IoT-Ticket -palvelussa käytetyt tietueet.	23
Taulukko 3. Kuvioon 4 liittyvät tunnusluvut.	27
Taulukko 4. Kuvioon 5 liittyvät tunnusluvut.	28
Taulukko 5. Kuvioon 6 liittyvät tunnusluvut.	29
Taulukko 6. Kuvioon 7 liittyvät tunnusluvut.	31
Taulukko 7. Kuvioon 10 liittyvät tunnusluvut.	33
Taulukko 8. Tulosten vertailu.	35
Taulukko 9. Ilman tiheys ja ilmanvastusvoima eri lämpötiloilla.	37
Taulukko 10. Ilmanvastusvoiman kasvu ajomoottorin tutkimusaineiston lämpötilatietojen mukaan.	38

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

°C	Celsiusaste, lämpötilan yksikkö.
CCS	Combined Charging System -latausstandardi
eFÖLI	Sähköisen bussiliikenteen käynnistämishanke
M3-luokka	Ajoneuvoluokka, johon kuuluvat massaltaan yli 5000 kg painoiset linja-autot.
N	Newton, voiman yksikkö.
NTP	Normaalin lämpötilan ja paineen olosuhteet.
T	Temperature, lämpötilan suureen tunnus.
TEKES	Innovaatorahoituskeskus, Suomen valtion virasto.
UITP	Kansainvälinen joukkoliikenneliitto
V	Voltti, jännitteen yksikkö.
W	Watti, tehon yksikkö.
Wh	Wattitunti, energiamäärän yksikkö.

1 JOHDANTO

Öljymarkkinoiden muuttuessa jatkuvasti epävakammiksi on sähköbussien tuotanto kiihtynyt kymmenen viime vuoden aikana nopeasti. Tähän ovat pitkälti syynä valtakunnalliset energiapolitiikat ja pyrkimykset tyydyttää enemmän ympäristön vaatimuksia kuin kaupallisten tahojen näkökulmia. Euroopassa kehityskaari alkoi 1990-luvun lopulla, kun ensimmäiset pienet sähköajoneuvot otettiin käyttöön Italian joukkoliikenteessä. Näiden mini- ja midibussien kehitys johti operointiin 12 metrisellä täyssähköbussilla Pekingin olympialaisissa vuonna 2008. Sähköbussien toimintasäde oli vain 75 km, mutta autojen osoitettua luotettavuutensa, esiteltiin vuonna 2010 vastaavan kokoinen sähköbussi, jonka toimintasäteeksi luvattiin jopa 300 kilometriä. (ZeEUS 2016, 6.)

Kansainvälinen joukkoliikenneliitto, UITP, on todennut julkisen liikenteen eri toimijoiden olevan voimakkaasti kiinnostuneita sähköbussien kehitystyöstä tulevaisuudessa. Vuonna 2013 sähköbussit käsittivät vain 1,2 % Euroopan bussikannasta. Tiedusteltaessa liikennöitsijöiden ja joukkoliikenneviranomaisten tulevaisuuden suunnitelmia, tutkimukset osoittavat, että yli 40 % vastaajista on halukkaita siirtymään sähköisiin liikkumiskäytäntöihin ja pääasiassa juurikin hybridi- ja täyssähköbusseihin. (ZeEUS 2016, 6.)

Euroopan markkina-alue on johtava vyöhyke sähköbussien tutkimus- ja kehitystyössä, mutta suurimmat bussien ja akkujen tuottajat löytyvät Aasian ja Tyynenmeren alueelta. Vuonna 2015 maailman sähköbussikaluston arvioitiin käsittävän 173 000 sähköbussia, joista yli 170 000 operoi Kiinassa. Pelkästään Shenzhenin kaupungissa näistä liikennöi lähes 5000 bussia ja kaupungin yli 16000:n bussin kanta on tarkoitus muuttaa täyssähköbusseiksi. Kiinan liikenneministeriö tarjoaa valtionapua ja verohelpotusta vähäpäästöisten bussien valmistajille ja esimerkiksi vuonna 2016 ostetuille busseille valtionapua sai 81 600 dollaria bussia kohden. Kiina on ollut yksi harvoja tahoja maailmassa, joka on oma-aloitteisesti ryhtynyt hillitsemään päästöjä ottamalla käyttöön sähkökäyttöisiä busseja. Latausinfra on kuitenkin monessa maassa heikolla tasolla ja se hidastaa sähköbussien yleistymistä. (ZeEUS 2016, 7.)

Kansainvälinen joukkoliikenneliitto, UITP, on laatinut muutamille Euroopan kaupungeille strategian sähköbussien käyttöönottoon lähivuosina. Siitä käy ilmi, että 19 liikennöitsijää ja joukkoliikenneviranomaista noin 25:ssä kaupungissa on julkaissut suunnitelmansa vuoteen 2020 asti. Siihen mennessä liikenteessä pitäisi olla yli 2500 sähköbussia, joka kattaa kuusi prosenttia ko. kaupunkien 40000:n bussin kannasta. 18:lla kaupungilla on

strategia vuoteen 2025 asti, johon mennessä ne odottavat liikenteessä olevan yli 6100 sähköbussia, kattaen 43 % koko bussikannasta. Bussivalmistajien keskuudessa on toimeenpantu kvalitatiivisempi markkina-analyysi, jonka mukaan Eurooppaan suunnattujen sähköbussien tuotannon pitäisi saavuttaa huippunsa vuosien 2018 ja 2020 välillä. (ZeEUS 2016, 11.)

Suomen liikenne alkoi alkuvuodesta 2016, kun ensimmäinen pikaladattava sähköbussi aloitti operoinnin Espoon sisäisellä linjalla Tapiola – Friisilä (Yle 2015). Vuoden 2018 keväällä sähköbussit liikennöivät Espoon lisäksi Tampereella, Helsingissä ja Turussa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään Turussa liikennöiviin sähköbusseihin, jotka liikennöivät kaupungin sisäisellä Satama – Lentoasema -reitillä.

Turku on asettanut tavoitteensa vuodelle 2040, johon mennessä kaupungin tulisi olla täysin hiilineutraali. Tällöin kasvihuonepäästöjen tulisi olla pienemmän kuin vuosittaiset hiilinielut. Tavoitetta kohti edetään kunnianhimoisilla ilmasto- ja ympäristöpolitiikan toimenpiteillä. Liikkumisjärjestelmä on toiseksi merkittävin päästöjen aiheuttaja, joten sähköisen joukkoliikenteen kehittäminen sähköbussilinjoineen ja latausinfraoineen on merkittävä tekijä tavoitteen toteuttamiseksi. (Turun kaupunki n.d..)

Pohjoismainen ilmasto ja vaikeat keliolosuhteet vaikuttavat olevan arkisessa keskustelussa vahvasti esillä olevia käsitteitä sähköbusseista keskusteltaessa. Tämän työn tavoitteena on tutkia ympäröivän ilman lämpötilan vaikutusta sähköbussin energiankulutukseen ja faktoittaa näkemyksiä ilmaston vaikutuksesta. Tavoitteena on myös helpottaa käyttökustannusten selvittämistä tulevaisuudessa. Opinnäytetyö on ennen kaikkea tilastollinen tutkimus, joka osaltaan täydentää eFÖLI -projektin tutkimustuloksia. Tilastolliset menetelmät ovat eFÖLI:n kaltaisissa kehityshankkeissa oivallisia välineitä ennustettaessa tulevaisuutta, tai tutkittaessa eri ilmiöiden vaikutusta eri muuttujiin.

2 SÄHKÖBUSSILIIKENNE TURUSSA

Sähköbussien hankinta on Turussa toteutettu osana TEKES-rahoitteista eFÖLI-hanketta. Sähköbussikaluston hankinnan lisäksi tulee operoitava linja sopeuttaa uudenmalliselle sähköbussiliikenteelle sopivaksi, toteuttaa latausinfra, luoda asianmukainen toimintamalli, sekä toteuttaa uuden tyyppiset palvelusopimukset. (Aho 2018, 9.)

Turun seudullisen joukkoliikenteen kehittämisvaihtoehtoja on tarkasteltu laajahkossa selvityksessä vuonna 2009. Pääasiallisina vaihtoehtoina raportissa on esitetty pikaraitiotien rakentamista tai tukeutumista busseilla toteutettavaan runkolinjastojärjestelmään, jota täydennetään täydentävillä linjoilla. Syksyllä 2009 on tehty päätös, että Turun joukkoliikennejärjestelmäksi valitaan runkobussijärjestelmä. (Turun kaupunginvaltuusto 2009.)

Turun kaupunginhallitus hyväksyi kesällä 2015 sähköbussipilottihankkeen aloittamisen linjalla 1. Diplomityönä tilatun kartoituksen perusteella muita sopivia linjoja olisivat olleet linjat 3, 4, 18 ja 30. Vaihtoehtoista linja 4 on lakkautettu, linjoilla 3 ja 30 on käytössä jo valmiiksi ympäristöystävällisempi hybridikalusto ja linja 18 on laajuutensa puolesta liian riskialtis. (Turun kaupunginhallitus 2015.) Hanke on osa Turun kaupungin strategista tavoitetta olla hiilineutraali vuonna 2040. Tavoitteena on myös määrätietoisesti lisätä sähköisen kaluston osuutta julkisessa liikenteessä. Sähköbussihankinnan kokonaisarvo latausjärjestelmineen on noin 3,8 miljoonaa euroa, jonka toteuttamiseen Työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt investointitukea noin miljoona euroa. (Föli 2016.)

Linjaa 1 koskeva liikennöintisopimus LS-Liikennelinjat Oy:n kanssa umpeutui 30.9.2016. Koska liikennöintikokemuksia sähköbusseilla ei vielä ollut, tehtiin riskien minimoimiseksi päätös liikennöintisopimuksen solmimisesta kaupungin tytäryhtiön Turun Kaupunkiliikenne Oy:n kanssa. Yhtiöllä on myös entuudestaan kokemusta mm. hybridikaluston käytöstä liikenteessä ja sen käyttöönoton yhteydessä toteutetun tutkimushankkeen läpivienistä. (Turun kaupunginhallitus 2015.)

Turun ammattikorkeakoulu toteuttaa osana eFÖLI-hanketta tutkimustyökokonaisuuden, jolla pyritään mm. varmistamaan sähköbussien toteutunut energiankulutus, sekä kehittämään menetelmiä bussien, latausjärjestelmien ja avoimien web-rajapintojen lähettämän datan hyödyntämiseksi tulevia kalustoratkaisuja ajatellen. Kokonaisuudessa tarkastellaan myös kuljettajakoulutuksen vaikutusta liikennöinnin kokonaistaloudellisuuteen,

sekä liikenteen luotettavuutta ja todellisia käyttökustannuksia suhteessa dieselkalustoon. Tavoitteena on tunnistaa tekniset ja operatiiviset ongelmat sähköbussiliikenteen vakiinnuttamiseksi ja laajentamiseksi, sekä laatia ratkaisuehdotuksia näihin kysymyksiin. (Aho 2018, 9.)

2.1 Sähköbussi

Sähköbussiliikenne alkoi Turussa lokakuussa 2016, kun ensimmäinen kuudesta sähköbussista tuli liikenteeseen. Sähköbussien toimittajaksi valikoitui vuonna 2015 käynnistyneen tarjouskilpailun tuloksena suomalainen Linkker Oy. Yhtiö erottui kilpailijoista selkeimmin bussien huolenpitosopimuksen hinnan osalta. (Aho 2018, 5.) Autot aloittivat liikennöinnin vaiheittain siten, että viimeisenä tullut auto aloitti liikennöinnin toukokuussa 2017. Liikennöinnin aloituspäivämäärät ja autojen tunnistetiedot on listattu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Sähköbussien tunnistetiedot ja aloituspäivämäärät.

Auton tunnus tutkimuksissa	Auton kylkinumero	Rekisteritunnus	Liikenteessä alkaen
11	35	XNV-835	3.10.2016
12	36	XNV-836	18.11.2016
13	38	NKS-338	28.2.2017
14	39	NKS-339	29.3.2017
15	37	NKS-337	21.1.2017
16	40	NKS-340	10.5.2017

Turussa operoivat sähköbussit ovat Linkker 13 -mallisia kaupunkilinja-autoja, joissa on 44 istumapaikkaa ja 33 seisomapaikkaa. Niiden pituus on 12,88 metriä ja akseliväli 6,76 metriä. Pituudeltaan autot ovat normaalin kaksiakselisen kaupunkibussin kokoluokkaa. Aiemmin linjalla 1 on liikennöity 15-metrisillä teliautoilla, mutta hankintahetkellä sellaisia ei ollut saatavilla täyssähköversiona (Aho 2018, 7). Auton omamassa on 9900 kg. Bussi saa käyttövoimansa kokonaan 700 V jännitteellä toimivasta litiumtitanaattioksidiaakusta, jonka kapasiteetti on 55 kWh. (Linkker 2016a, 2.) Ajoneuvon tarkemmat tekniset tiedot ovat taulukoituna liitteessä 1.



Kuva 1. Linkker 13 -sähköbussi Turussa kesällä 2017. (kuva: Ville Markuksela)

2.2 Ajoreitti

Sähköbussit operoivat ainoastaan Sataman ja Lentoaseman välisellä reitillä, jonka linjapituus on 12,6 km (ZeEUS 2016, 35). Laivojen saapumis- ja lähtöaikoina liikennöidään myös Sataman ja Kauppatorin välisiä lisävuoroja, joilla käytetään kuitenkin ensisijaisesti dieselkalustoa sähköbussien ajaessa niille suunniteltuja autokiertoja. Lisäksi muutama päivittäinen vuoro ajetaan lentokentän rahtiterminaalin kautta lentoasemalta lähdeettäessä. Kaikkia linjaosuuksia ajetaan linjanumerolla 1.

2.3 Latausasemat

Latausasemia on linjan molemmilla pääteasemilla sekä operaattorin varikolla. Sähköverkosta saatava vaihtosähkö tasataan ajoakkuja varten laturiin sijoitetun tasasuuntaajan avulla. Latureiden ylläpidosta ja huollosta vastaa Turku Energia Oy. Latureiden toimintaa voi seurata reaaliajassa tietokoneen internetiselaimella käytettävän Virta -järjestelmän avulla.

2.3.1 Varikkolataus

Linja-autojen hidaslataus toteutetaan operaattorin varikkoalueella Rieskalähteentiellä. Hidaslataus on suunniteltu toteutumaan yöaikaan autojen seistessä varikolla, jolloin akut ladataan täyteen (Turun kaupunki 2016). Latausteho on säädettävissä 22 kW:n ja 50 kW:n välillä ja lataus tapahtuu sähköhenkilöautoistakin tutun CCS-pistokkeen kautta (Aho 2018, 8). Akun lataus tyhjästä täyteen 22 kW:n latausteholla kestää noin kolme tuntia (Linkker 2016a, 10). Latauksen aikana tulee ajovirran olla kytkettynä. Mikäli varikkoseisokin aikana käytetään 24 voltin järjestelmään kytkettyjä laitteita, tulee järjestelmä kytkeä lataukseen. Bussia ei ole mahdollista käynnistää ilman ulkoista virtalähdettä, jos 24 voltin järjestelmän varaustila on liian matala. (Linkker 2016a, 11.)

2.3.2 Päätepysäkkilataus

Linjan molemmilla pääteasemilla olevilla pikalatausasemilla suoritetaan bussien pikalataus, joka kestää noin viisi minuuttia. Tänä aikana akun varaustasoa saadaan nostettua yli 20 prosenttia. Pikalatausaseman teho on 300 kW ja akun lataaminen tyhjästä täyteen kestää pikalatauksella noin 15-20 minuuttia. Bussi on ajettava pysäkillä oikeaan kohtaan, jotta latauslaitteesta laskeutuva virroitin kohdistuu oikein bussin katolla oleviin kontaktorikiskoihin. (Linkker 2016a, 10.)



Kuva 2. Virroitin laskeutumassa bussin katolle sataman pikalatausasemalla.

3 TILASTOLLISEEN TUTKIMUKSEEN LIITTYVÄT KÄSITTEET

3.1 Tunnusluvut

3.1.1 Keskiarvo, mediaani ja keskihajonta

Jakauman keskimäärää voidaan kuvata mm. aritmeettisen keskiarvon ja mediaanin avulla (Tilastokeskus n.d.). Mediaani on järjestetyn havaintoaineiston keskimäinen havainto. Jos havaintoarvoja on parillinen määrä, on mediaani kahden keskimmäisen luvun keskiarvo. Tässä työssä esitetyt keskiarvot ovat aritmeettisiä keskiarvoja, jolla tarkoitetaan havaintoarvojen summan ja havaintojen lukumäärän osamäärää. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 80-83.) Jos keskiarvo ja mediaani poikkeavat selvästi toisistaan, niin mediaani on yleensä paremmin jakauman keskikohtaa kuvaava luku (Taanila 2017).

Mediaani ja keskiarvo ovat keskilukuja, jotka kuvaavat jakaumaa osuvasti tai vähemmän osuvasti sen mukaan, minkälainen jakauma on. Joskus keskiarvo on satunnainen piste, joka löytyy laajalle levinneiden havaintojen keskeltä oikeastaan vain matemaattisin keinoin eikä se kerro kovinkaan paljon jakaumasta. (Tilastokeskus n.d.)

Jotta keskiarvon merkityksen voisi ymmärtää, on tunnettava jakauman hajonta. Keskihajonta kertoo, miten keskittyneitä havainnot ovat, eli miten kaukana havainnot keskimäärin ovat keskiarvosta. Mitä suurempi keskimääräinen etäisyys on, sitä vähemmän keskittynyt jakauma on. (Tilastokeskus n.d.)

3.1.2 Fraktiilit ja desiili

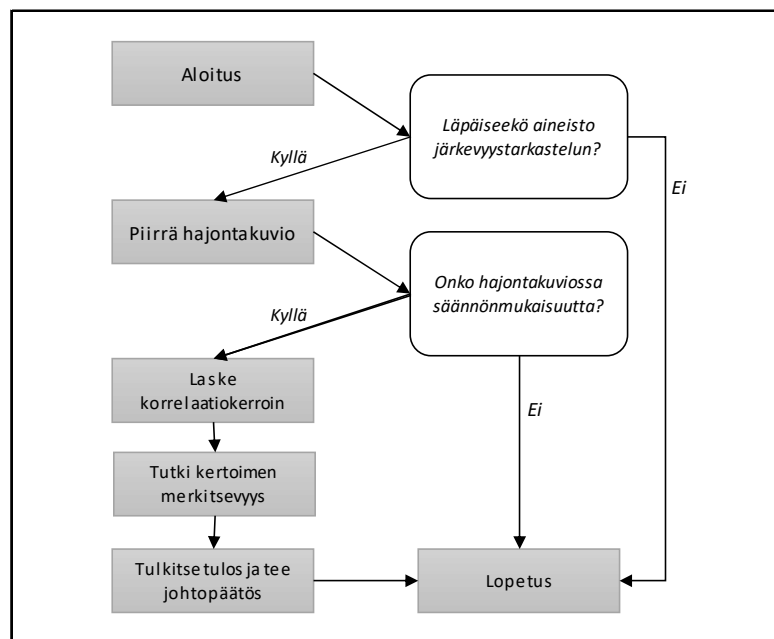
Fraktiilit ovat muuttujan jakauman kohtia, joiden alapuolelle jää tietty osa havainnoista (Tilastokeskus n.d.). Esimerkiksi edellisessä kohdassa esitelty mediaani on fraktiili, jonka alapuolelle jää 50 % havainnoista. Desiili on fraktiili, joka jakaa aineiston kymmeneen osaan. Tässä työssä esiintyvät käsitteet ”alin desiili” ja ”ylin desiili” tarkoittavat 10 % ja 90 % kohdalle sijoittuvia fraktiileja. Keskikulutusta ilmoitettaessa käsite ”Ka, alin desiili

(T)” tarkoittaa lämpötilan perusteella järjestetyn aineiston 10 % fraktiilin alle jäävän keskikulutusten joukon keskiarvoa ja vastaavasti ”Ka, ylin desiili (T)” 90 % fraktiilin yläpuolelle jäävän joukon keskiarvoa.

3.2 Järkevyystarkastelu ja hajontakuviot

Kahden muuttujan välistä tilastollista riippuvuutta tarkastellaan käytännössä siten, että aikaisempien havaintojen perusteella luodaan työhypoteesi, eli oletus mahdollisesta riippuvuudesta. Sen jälkeen kerätään tarvittava tilastoaineisto ja lopuksi testataan työhypoteesi. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 228.)

Muuttujien välisen yhteyden tutkiminen aloitetaan järkevyystarkastelulla, jossa tarkasteltavien muuttujien arvot sijoitetaan koordinaatistoon hajontakuviot aikaansaamiseksi. Havaintokuvioista selviää, muodostavatko pisteet jossain määrin säännöllisen pistejoukon. Kuvioista käy ilmi myös yhteyden voimakkuus, muoto ja suunta. Ennen hajontakuviot laatimista on järkevää pohtia, onko tarkasteltavilla muuttujilla mitään mielekästä mahdollisuutta olla yhteydessä toisiinsa. Jos vastaus on kielteinen, tilastoaineiston muu tarkastelu on tässä kohtaa turhaa. Toisaalta tarkastelua kannattaa jatkaa, ellei ole mitään loogista estettä sille, että muuttujilla voisi olla jokin yhteys toisiinsa. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 228-229.)



Kuva 3. Tilastollisen riippuvuuden selvittämisen vaiheet. (Mukaihen: Holopainen & Pulkkinen 2012, 248)

3.3 Korrelaatio

Muuttujien välisen yhteyden voimakkuutta voidaan mitata matemaattisesti korrelaatiokertoimen avulla. Korrelaatiokertoimia on useita ja tarkoituksenmukaisen kertoimen valinta riippuu muuttujien mitta-asteikosta. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 233.) Tämän tutkimuksen laskenta on suoritettu Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla, jossa korrelaatiokerroin lasketaan kaavassa 1 esitetyllä Pearsonin menetelmällä.

$$r = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}, \text{ missä}$$

r = korrelaatiokerroin

x_i, y_i = muuttujien havaintoarvot

n = otoskoko.

Kaava 1. Pearsonin korrelaatiokerroin (Keinänen n.d.).

Kertoimen etumerkki kertoo arvojen suunnan muutoksessa. Kun kerroin on negatiivinen, Y-akselin arvot yleisesti pienenevät X-akselin arvon kasvaessa. Kertoimen ollessa positiivinen Y-akselin arvot vastaavasti kasvavat. Arvon ollessa lähellä ykköstä, muuttujien välillä on voimakas positiivinen lineaarinen yhteys ja Pearsonin korrelaatiokertoimen arvo 1 saavutetaankin silloin, kun kaikki hajontakuvioiden pisteet sijaitsevat samalla suoralla. Etumerkki osoittaa siis yhteyden suunnan ja itseisarvo riippuvuuden voimakkuuden. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 234.) Arvon ollessa lähellä nollaa, muuttujien välillä ei ole lineaarista yhteyttä. Arvon ollessa lähellä lukua -0,5 tai 0,5 on yhteys edelleen melko heikko, mutta mahdollisesti silti tärkeä. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 245-246.)

Korrelaatiokertoimen tulkinnassa pitää olla varovainen, koska etenkin pienissä aineistoissa suurikaan itseisarvo ei takaa muuttujien välillä vallitsevaa syy-seuraussuhdetta. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 245-246.) Tämän tutkielman graafisissa esityksissä ilmoitettu arvo R^2 on selityskerroin, joka on Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö. Tämä kertoo prosentteina paljonko selittävä muuttuja selittää selitettävän muuttujan varianssista (Menetelmäopetuksen tietovaranto 2004).

3.4 Regressio

Kun tilastollinen riippuvuus on havaittu, ryhdytään selvittämään muuttujien mahdollista syy-yhteyttä. Kuten luvussa 3.1 todettiin, pelkkä riippuvuus ei vielä takaa tekijöiden keskinäistä vaikutusta. Regressioanalyysin päämääränä on löytää muuttujien välillä mahdollisesti vallitseva yhteys ja kuvata sitä matemaattisen mallin avulla. Jos muuttujia on vain kaksi, kutsutaan x-muuttujaa selittäväksi ja y-muuttujaa selitettäväksi muuttujaksi. (Holopainen & Pulkkinen 2012, 261.)

Kahden muuttujan riippuvuutta kuvaava matemaattinen malli on lauseke, jonka avulla voidaan laskea toisen muuttujan arvoja ensimmäisen muuttujan arvojen perusteella. Suoraviivaista riippuvuutta kuvaavasta mallista käytetään yleisesti nimeä lineaarinen regressiomalli ja mallina käytettävää suoraa kutsutaan regressiosuoraksi. (Taanila 2016.) Pistejoukkoon sovitettun regressiosuoran yhtälön lauseke on muotoa $y = b_1x + b_0$, jonka vakiot, eli parametrit saadaan pienimmän neliösumman menetelmän avulla kaavan 2 mukaisesti (Holopainen & Pulkkinen 2012, 261).

$$b_1 = \frac{n * \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b_0 = y_{avg} - b_1 x_{avg} , \text{ missä}$$

b_1 = Regressiosuoran kulmakerroin

b_0 = Yhtälön vakioarvo

n = otoskoko

x_{avg} = x-muuttujan arvojen keskiarvo

y_{avg} = y-muuttujan arvojen keskiarvo.

Kaava 2. Regressiosuoran yhtälön parametrien laskenta.

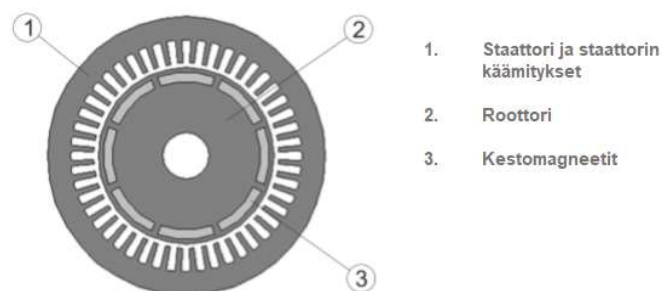
4 TUTKIMUSKOHTEET

Lämpötilan vaikutusta kulutukseen tutkittiin kokonaiskeskikulutuksen lisäksi erikseen jokaisen korkeajännitteellä toimivan kuluttajan osalta. Tässä luvussa esitellään näiden laitteiden toimintaperiaatteita vain siltä osin, kuin se tutkielman aihepiirin kannalta on katsottu aiheelliseksi.

4.1 Moottori

Linkker 13 -sähköbussseissa käytetään ajomoottorina Visedon valmistamaa Powerdrum XSe -kestomagneettitahtikonetta, jonka tuottama maksimiteho on 180 kW (Linkker Oy 2016a; Visedo Oy 2017a). Koneen toiminta perustuu synkronireluktanssiavusteiseen kestopagneettitoteutukseen, jonka etuja perinteiseen induktiomoottoriin on mm. parempi hyötysuhde koko nopeusalueella ja kyky tuottaa momenttia korkeammilla kierros- luvuilla (Visedo Oy 2017b, 17).

Kestomagneettitahtikoneen staattori koostuu staattorikäänitystä varten uritetusta levy- paketista, joka on kiinnitetty teräsrunkoon. Staattorin rakenne muistuttaa läheisesti teol- lisuuden sovelluksista tuttua epätahtimoottorin staattoria. (Hietalahti 2011, 112.) Virran- syöttö staattorin käämeille aiheuttaa pyörivän magneettikentän, joka kääntyessään pyö- rittää roottoriin kiinnitettyjä kestopagneetteja. Kestomagneetit ovat avonapamallisia, jo- ten ne on sulautettu roottorin rakenteeseen. Tämä ratkaisu tekee koneesta mekaanisesti vakaamman ja mahdollistaa operoinnin suuremmilla pyörintänopeuksilla. Synkro- noidussa kestopagneetikoneessa roottoriakselin pyöriminen on synkronoitu jännitteen- syötön taajuuden kanssa, jota ohjataan erillisellä vaihtosuuntaajalla. (Visedo Oy 2017b, 17.)



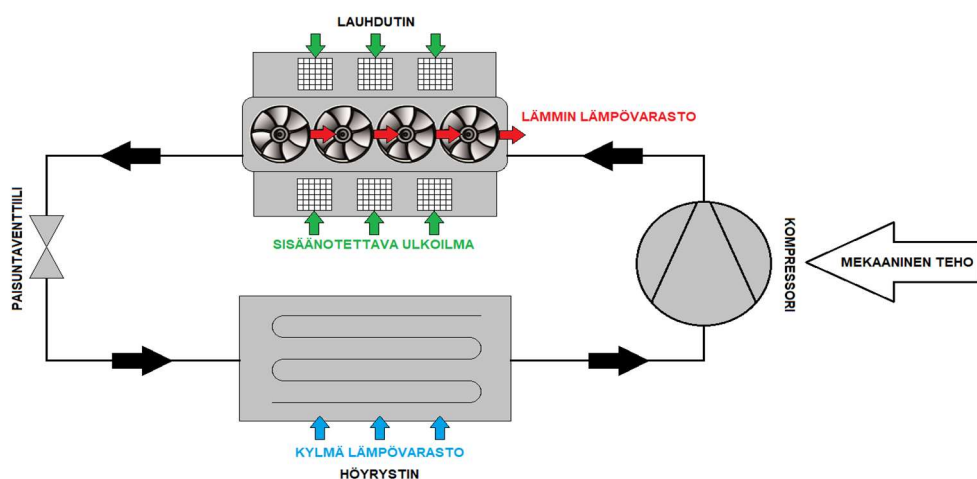
Kuva 4. Visedon PowerDRUM XSe -kestomagneettitahtikoneen periaatekuva (Visedo Oy 2017b, 17).

4.2 Ilmalämpöpumppu

Linkker-sähköbussseissa sisätiloja lämmitetään sähkötoiminen Eberspächer AC136 -ilma-
lämpöpumppu, joka myös jäähdyttää sisäilmaa. AC136-kattoyksikön lämmitysteho 0
°C:n lämpötilassa on 15 kW ja jäähdytysteho +30 °C:n lämpötilassa niin ikään 15 kW.
Sisätilojen patterikiertoa lämmitetään lisäksi dieselkäyttöinen Eberspächer-lisälämmitin,
jonka teho on 24 kW. (Linkker Oy 2016b.)

Pohjoisesta ilmastosta johtuen erityisesti auton sisätilojen lämmittämiseen kuluvan ener-
gian osuus on huomionarvoista. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö
siirtyy itsestään vain korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpöpumppu mahdol-
listaa lämpöenergian siirtämisen korkeammalle lämpötilatasolle, mutta siirto ei voi tapah-
tua ilman työtä. (Inkinen & Tuohi 2003, 462.)

Lämpöpumpun pääosat ovat kompressorin, lauhdutin, paisuntaventtiili ja höyrystin. Kyl-
mäaine kiertää kylmähöyryprosessissa suljettuna kiertona. Kun kylmäaine höyrystyy
kompressorin imupuolen paineessa, siihen sitoutuu höyrystymislämpö ympärillä ole-
vasta lämpövarastosta. Kompressorin nostaa höyryn painetasoa, jolloin höyryn lämpötila
nousee työaineen höyrynpainekäyrän edellyttämällä tavalla. Lauhduttimessa höyry ti-
ivistyy nesteeksi eli lauhtuu ja höyrystymislämpö vapautuu lauhduttimen ympäristöön.
Paineen alennus tapahtuu paisuntaventtiilissä, joka palauttaa kylmäaineen höyrysti-
missä vallitsevaan tilaan. Kierron kuluessa höyrystimeen palaavan nesteen lämpötila
on noussut muutaman celsiusasteen verran. (Inkinen & Tuohi 2003, 463.)



Kuva 5. Lämpöpumpun periaatekuva.

Jäähdytysprosessissa kylmäaine siirtyy kaasumaisessa tilassa höyrystimeltä kompressoriin. Kompressorissa puristuksen aikana kaasuuntuneen kylmäaineen lämpötila ja paine kasvavat, jonka jälkeen se johdetaan lauhduttimeen. Lämpö vapautetaan ulkoilmaan jäähdytysripojen kautta lauhduttimen tuulettimilla. Lämmön poistuttua kylmäaine kondensoituu ja muuttuu nestemäiseksi. Lauhdutin työntää nestemäisen kylmäaineen useiden komponenttien läpi kuivaimeen, josta se virtaa tarkastuslasin kautta paisuntaventtiilille. (Eberspächer 2014, 9.)

Paisuntaventtiin tehtävä on kontrolloida höyrystimeen virtaavan nestemäisen kylmäaineen määrää ja pitää höyrystimen paine muuttumattomana optimaalisen jäähdytyksen aikaansaamiseksi. Kylmäaine jaetaan tasaisesti höyrystimeen syöttämällä sitä jakolaitteen ja ruiskutusputkien avulla erillisiin höyrystinkennoihin. Höyrystintuulettimet siirtävät lämmintä ilmaa autosta järjestelmään höyrystinripojen kautta, jolloin ilma vapauttaa osan sen lämmöstä kylmäaineeseen, joka jäähdyttää sisäilmaa matalapaineen aiheuttaman höyrystymisen alkamisen vuoksi. Tämä prosessi toistuu taukoamatta. (Eberspächer 2014, 9.)

4.3 Ohjaustehostin

Ohjauksella siirretään kuljettajan ohjauspyörällä tekemät kääntöliikkeet auton ohjattavien pyörien kääntöliikkeiksi. M3-luokan linja-auton tulee saavuttaa ehjällä ohjainlaitteella, enintään 200 N:n ohjausvoimalla 12 metrin kääntösäde neljässä sekunnissa. (Robert Bosch GmbH 2003, 702.)

Ohjaustehostin on Linkker 13 -sähköbussin ainoa hydraulikalla toimiva komponentti ja sen sähköistämistä on viety eteenpäin mm. opinnäytetyötoimeksiannolla. Sähköisen ohjaustehostuksen etuja olisivat kevyempi rakenne, säätömahdollisuudet sekä tulevaisuudessa tuki mahdollisille automaattisille ohjaustoimenpiteille. (Ruohonen 2017, 13.)

4.4 Paineilmakompressori

Kompressori on paineilmajärjestelmän komponentti, jonka tehtävä on tuottaa paineilma järjestelmään. M3-luokan linja-autoissa paineilmalla toimivat pääsääntöisesti jarrut ja jousitus. Ilman tuottaminen on Linkker 13 -sähköbussissa toteutettu Mattein valmistamalla sähkökäyttöisellä paineilmakompressorilla (Linkker Oy 2016b).

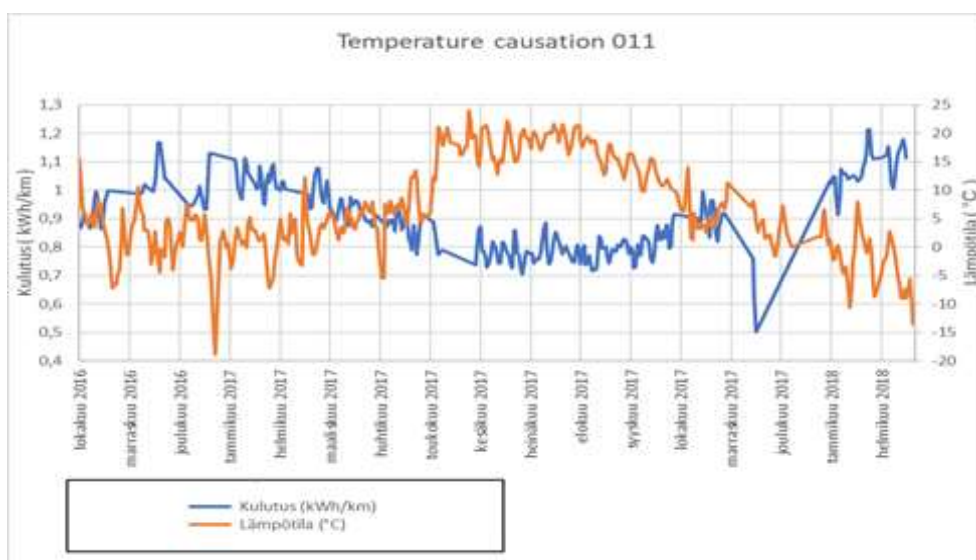
4.5 Tasajännitemuunnin

Koska linja-autossa on myös matalajännitteellä (24 V) toimivia laitteita, tulee jännite muuntaa niille sopivaksi. Tasajännitemuunnin on laite, joka muuntaa tasasähkön tietyltä jännitetasolta toiselle.

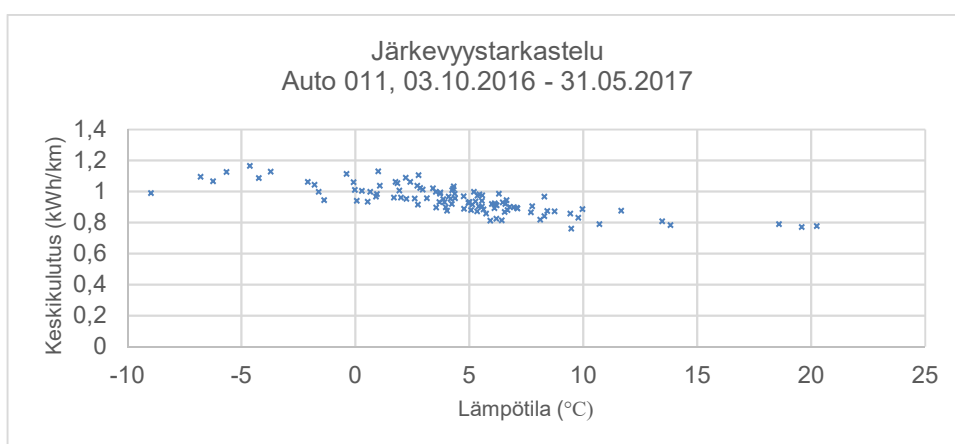
Täydellistä listaa matalajännitteellä toimivista laitteista ei ollut kirjoitushetkellä saatavilla, mutta mainittakoon niitä olevan auton kaikki muut sähkölaitteet, paitsi tässäkin työssä käsitellyt korkeajännitteellä toimivat ajomoottori, ohjaustehostin, paineilmakompressori, ilmalämpöpumppu ja tasajännitemuunnin.

5 TUTKIMUSMENETELMÄ

Työhypoteesi syntyi kirjoittajan aiemman tutkimustyön tuloksena, kun sähköbussien kes- kikulutusarvoja sijoitettiin koordinaatistoon ajan funktiona kuvion 1 mukaisesti. Tämä olisi ollut myös riittävä järkevystarkastelu, mutta ennen laajemman tutkimuksen käynnistä- mistä on tarkoituksenmukaista laatia hajontakuvio myös tutkittavien muuttujien välisen riippuvuuden havainnollistamiseksi. Järkevystarkastelu tehtiin yhden auton tiedoista (kuvio 2), jolloin lyhyehkön aikavälin keskikulutusarvot sijoitettiin koordinaatistoon läm- pötilan funktiona. Riippuvuus oli näin havaittavissa välittömästi, ja tutkimuksen jatkami- nen oli mielekästä.



Kuvio 1. Työhypoteesina toiminut graafi.



Kuvio 2. Järkevystarkastelu yhden auton osalta.

5.1 Aineiston kerääminen

Sähköbussseista on mahdollista saada reaaliaikaista sekä tietokantaan tallentunutta tietoa Wapicen IoT Ticket -alustan kautta. Palvelussa on noin 230 tietuetta, joihin lukeutuvat myös ajoneuvon kilometrikertymä (Odometer), ympäröivän ilman lämpötila (Ambient Temperature) sekä joitain energiankulutuksen arvoja. Taulukossa 2 on lueteltu tätä tutkielmaa varten käytetyt tietueet, niiden selitteet ja arvojen yksiköt.

Taulukko 2. Tutkimusta varten Wapicen IoT-Ticket -palvelussa käytetyt tietueet.

Selite	Tietueen nimi	Yksikkö
Akustoon latausasemalta ladatun energian määrä	Battery Total External Energy	kWh
Ympäröivän ilman lämpötila	Ambient Temperature	°C
Ajoneuvon kokonaiskilometrit	Odometer	km
Akun varaustaso	Battery SOC	%
Ilmalämpöpumpun käyttämä energia	Energy Heat Pump	kWh
Tasajännitemuuntimen käyttämä energia	Energy DCDC	kWh
Ajomootorin käyttämä energia	Energy Drive Motor	kWh
Paineilmakompressorin käyttämä energia	Energy Air Compressor	kWh
Ohjaustehostimen käyttämä energia	Energy Power Steering	kWh

Kaikkiin tutkimuksiin sisältyvät lähtökohtaisesti kaikki kuusi tutkittavaa autoa. Tiedot on kerätty kunkin auton käyttöönottopäivästä helmikuun 2018 loppuun. Toimitusaikataulun muutoksesta johtuen osa autoista aloitti liikennöinnin vasta keväällä 2017, joten talvikauden lämpötila-arvoja on huomattavasti vähemmän kuin muiden vuodenaikojen. Tämä voi osaltaan vähentää tulosten luotettavuutta todellisuuteen verraten. Joissain tapauksissa aineistosta on jouduttu poistamaan yksittäisten autojen tietoja poikkeavien arvojen vuoksi, mutta tutkimuksessa käytetyt autot on kuitenkin mainittu graafien otsikoissa.

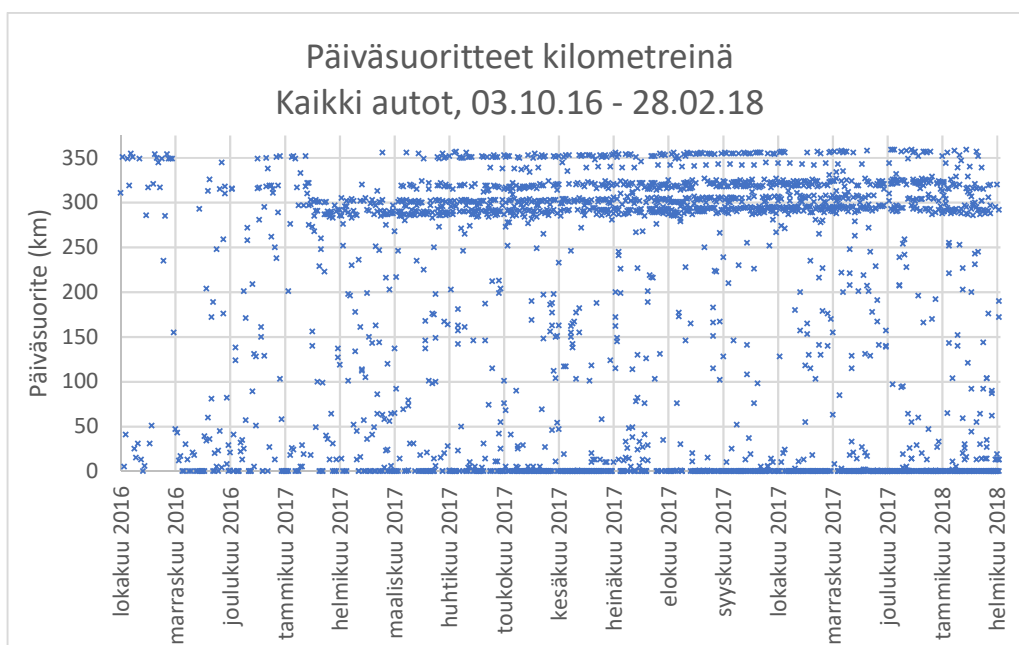
5.1.1 Keskikulutuksen selvittäminen

Energiankulutusta tutkittaessa on lähtökohtaisesti mielekkäintä käyttää latausasemilta ladatun energian määrää, jolloin tulokset heijastavat myös sähkön kustannuksia. Edellä mainittua arvoa käytettiin tutkittaessa kokonaistilannetta kaikkien autojen keskikulutuksen osalta. Yksittäisten kuluttajien kohdalla kulutusta tutkittiin suoraan kunkin laitteen kuluttaman energian määrästä. Päivittäinen kilometrikertymä saatiin Odometer-tiedosta,

ja keskkulutus on periaatteessa päiväkohtaisen kulutuksen ja kilometrikertymän osamäärä.

Kaikissa tämän työn energiankulutusta tarkastelevissa tutkimuksissa on virhearvojen minimoimiseksi käytetty harkinnanvaraista otantamenetelmää. Menetelmässä on huomioitu kulutustieto ainoastaan niiden päivien osalta, joina päivittäinen kilometrisuorite on ylittänyt 275 kilometrin rajan. Tällöin auton voidaan olettaa ajaneen onnistuneen työpäivän, sillä sähköbusseille suunniteltujen autokiertokaavioiden pienin päiväsuorite on kyseisellä tasolla.

Viime kädessä raja-arvon määritti kuitenkin tilastollinen tarkastelu (kuvio 3), josta voi huomata valtaosan ajopäivien suoritteista sijoittuvan tämän rajan yläpuolelle. Vaikka huoltopäivinä ja poikkeuskiertoa ajettaessa kilometrejä kertyykin, voi auton kulutus jäädä kilometrisuoritteeseen nähden niin suureksi, että se vääristää tuloksia. Tästä syystä laskennassa on käytetty kulutustietoa ainoastaan tämän alarajan ylittäviltä päiviltä. Vastavaa raja-arvoa on käytetty myös yksittäisten kuluttajien kulutuslaskennassa, sillä kyseisinä päivinä auto on todennäköisimmin täydessä toimintakunnossa ja mittaus tulokset ovat näin luotettavampia.



Kuvio 3. Autojen päiväsuoritteet pistekaaviossa.

Tietojen oikeellisuutta täsmennettiin myös huomioimalla ero akun varaustasossa päivän alussa ja päivän lopussa. Battery Total External Energy -tietue kerryttää kokonaismäärää, minkä vuoksi jokaisen päivän energiankulutus pitää erotella tietovarastosta. Mikäli akun varaustaso on päivän alussa pienempi kuin päivän lopussa, on energiaa tällöin ladattu akustoon enemmän kuin kulutettu. Vastaavasti tilanteen ollessa päinvastainen voidaan operointiin ajatella käytetyn edellisenä päivänä ladattua energiaa. Tilanne on huomioitu laskemalla keskikulutus kaavan 3 mukaisesti vähentämällä korjaus päivän kokonaiskulutuksesta.

$$c = \frac{E_{CORR}}{s} = \frac{E + \frac{C(SOC_{t0} - SOC_{t1})}{100}}{s}, \text{ missä}$$

c = keskikulutus (kWh/km)

E_{CORR} = korjattu ladatun energian määrä

E = päivän aikana ladattu energia

s = päivän aikana ajettu kilometrisuorite

C = akun kapasiteetti (55 kWh)

SOC_{t0} = akun varaustila prosentteina päivän alussa

SOC_{t1} = akun varaustila prosentteina päivän lopussa.

Kaava 3. Korjattu keskikulutus.

Yksittäisten kuluttajien kulutuksen ilmoitustarkkuus on kokonainen kilowattitunti, ja tiedon päivittyminen perustuu em. kokonaisluvun muuttumiseen. Kunkin laitteen lähetystaajuus perustuu näin ollen laitteen kokonaiskulutuksen suuruuteen, jolloin kulutukseltaan pienemmät laitteet lähettävät tietoa harvemmin.

5.1.2 Lämpötilatieto

Ympäröivän ilman lämpötilatieto kerättiin jokaiselta autolta erikseen. Periaatteessa liikennekenttä on niin pieni, että käyttämällä säätietopalvelujen julkaisemia keskilämpötiloja oltaisiin saatu hyvin suuntaa antava esitys. Kun täsmällisempää tietoa oli saatavilla, käytettiin luotettavuuden lisäämiseksi autokohtaista tietoa, jolloin keskilämpötila voidaan

laskea niistä arvoista, joita auto on lähettänyt virrallisena ollessaan. Toisin sanoen käytetyt keskilämpötilat vastaavat todennäköisimmin operoinnin aikana vallinnutta keskilämpötilaa. Auto lähettää lämpötilatiedon tyypillisesti 200–400 kertaa päivässä.

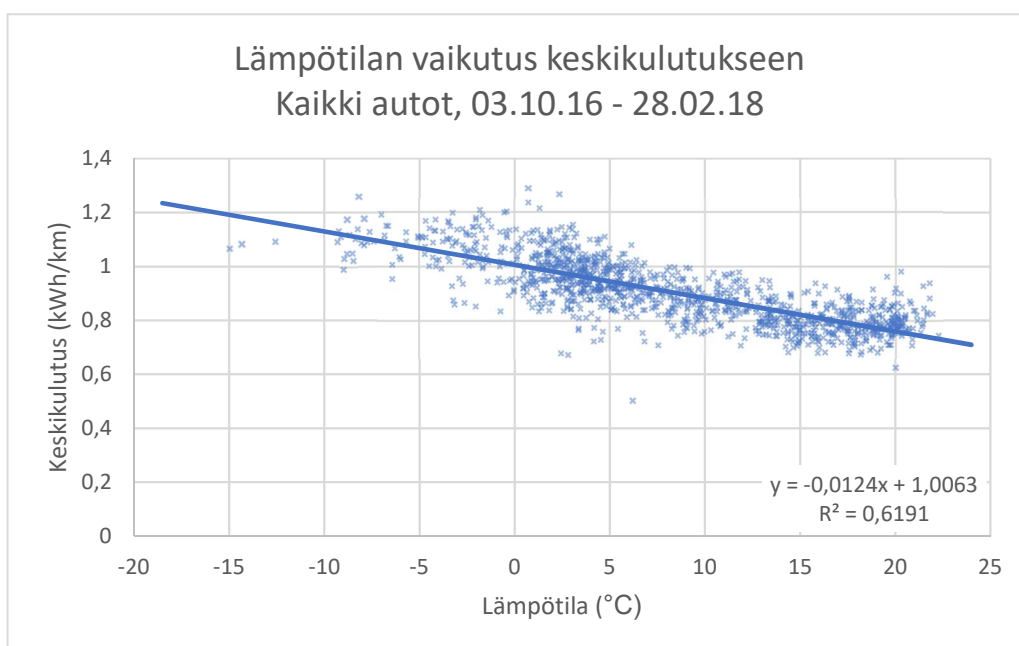
5.2 Lämpötilan vaikutus energiankulutukseen

Tutkimusaineisto järjestettiin keskilämpötilojen perusteella suuruusjärjestykseen ja kulutuksen muutosta tarkasteltiin alhaisimman lämpötilan ja alimman desiilin rajaaman joukon sekä ylimmän desiilin ja korkeimman lämpötilan rajaaman joukon keskikulutusten keskiarvojen välillä. Vastaavaa analysointimenetelmää käytettiin myös kuluttajakohtaisten tutkimusten kanssa.

Kun laskettu keskikulutus yhdistetään auton mittaustiedoista lasketun keskilämpötilan kanssa, saadaan tarvittavat tiedot hajontakuvioiden luomiseksi. Hajontakuviosta on helppo huomata visuaalisesti, mikäli yhteys em. muuttujien välillä on olemassa.

6 TULOSTEN ESITYS

Laturilta ladatun energian keskikulutuksen ja ulkolämpötilan suhde on esitetty kuviossa 4. Tutkimukseen ja analysointiin liittyvät tunnusluvut on taulukoitu hajontakuvioiden alla taulukossa 3.



Kuvio 4. Laturilta ladatun energian keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.

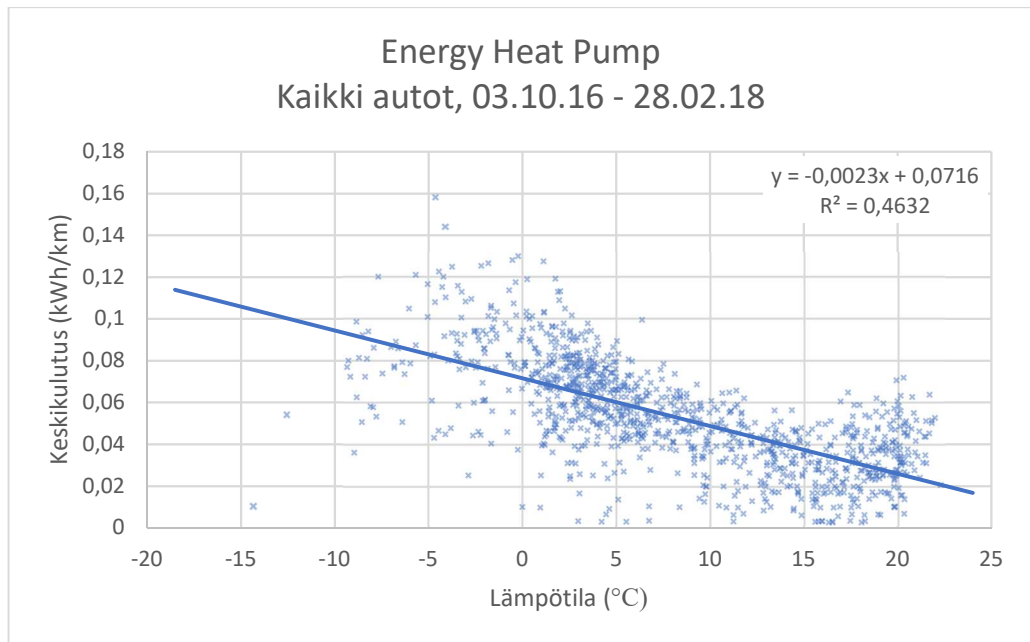
Taulukko 3. Kuvioon 4 liittyvät tunnusluvut.

Näytteen koko:	1240		
Korrelaatiokerroin:	-0,7868		
LÄMPÖTILA (T)		KESKIKULUTUS (C)	
Minimi:	-14,95 °C	Keskihajonta:	0,118 kWh/km
Alin desiili:	-0,53 °C	Keskiarvo:	0,904 kWh/km
Mediaani:	7,09 °C	Mediaani:	0,897 kWh/km
Ylin desiili:	18,86 °C	Ka, alin desiili (T):	1,070 kWh/km
Maksimi:	22,28 °C	Ka, ylin desiili (T):	0,797 kWh/km

Taulukoiduista tiedoista laskettuna keskikulutuksen kasvu ääridesiilien välillä on noin 34 %. Tämä on koko tutkimuksen kannalta oleellinen tieto, sillä tutkielman tavoitteena on selvittää lämpötilan vaikutusta kustannuksiin. Kolmanneksen muutos on merkittävä. Absoluuttiseksi eroksi saadaan 0,27 kWh/km.

6.1 Ilmalämpöpumppu

Ilmalämpöpumpun käyttämän energian keskekulutuksen ja ulkoilman keskilämpötilan suhde on esitetty kuviossa 5. Tutkimukseen ja analysointiin liittyvät tunnusluvut on taulukoitu hajontakuvion alla taulukossa 4.



Kuvio 5. Ilmalämpöpumpun keskekulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.

Taulukko 4. Kuvioon 5 liittyvät tunnusluvut.

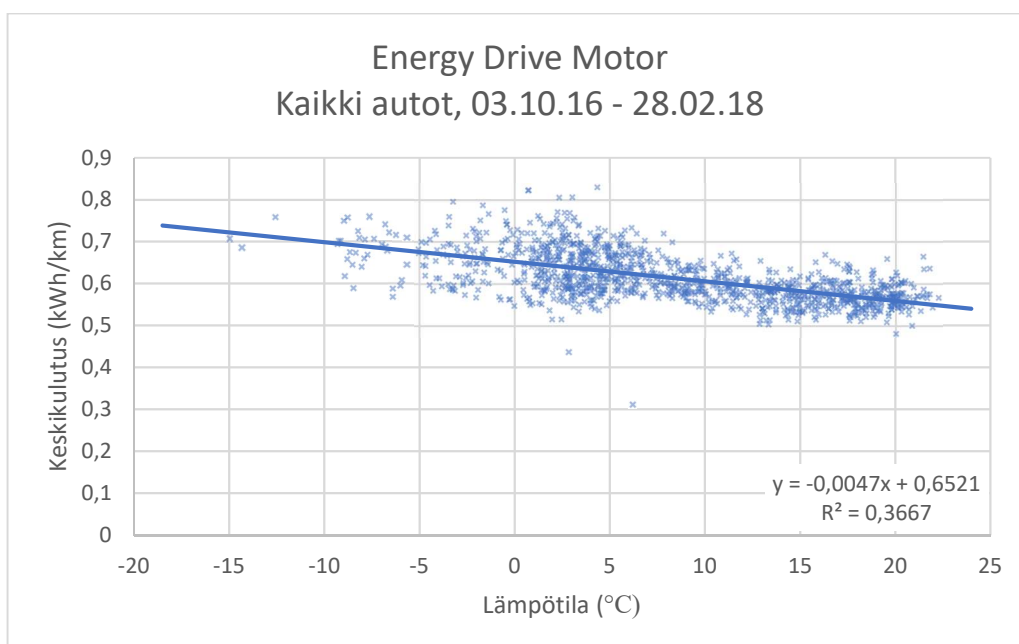
Näytteen koko:	1090		
Korrelaatiokerroin:	-0,6806		
LÄMPÖTILA (T)		KESKIKULUTUS (C)	
Minimi:	-14,32 °C	Keskihajonta:	0,025 kWh/km
Alin desiili:	-0,70 °C	Keskiarvo:	0,053 kWh/km
Mediaani:	6,46 °C	Mediaani:	0,051 kWh/km
Ylin desiili:	19,06 °C	Ka, alin desiili (T):	0,083 kWh/km
Maksimi:	22,28 °C	Ka, ylin desiili (T):	0,037 kWh/km

Tutkimuksessa havaittiin kaikkiaan 73 päivää, joina auton päiväsuorite on ylittänyt 275 kilometrin rajan, mutta joina järjestelmä on ilmoittanut ilmalämpöpumpun kulutukseksi 0 kWh. Nollatulokset sijoittuivat lämpötila-alueille, joissa lämpöpumppu muissa tapauksissa on kuluttanut energiaa. On syytä olettaa laitteen olleen tällöin epäkunnossa, joten kyseiset virhetulokset on poistettu laskennasta.

Keskihajonta on melko suuri suhteessa keskiarvoon, mutta riippuvuus on havaittavissa visuaalisesti. Kulutus laskee lämpötilan noustessa, mutta lähtee jälleen nousuun helle-rajaa lähestyttäessä, mikä kaventaa ääridesiilien keskikulutusten eroa. Koska suuruusluokka on kaikilla taulukoiduilla tunnusluvuilla pienempi kuin 0,1 kWh, on vaikutus kokonaiskulutukseen kuitenkin marginaalinen.

6.2 Ajomoottori

Ajomoottorin käyttämän energian keskikulutuksen ja ulkoilman keskilämpötilan suhde on esitetty kuviossa 6. Tutkimukseen ja analysointiin liittyvät tunnusluvut on taulukoitu hajontakuvion alla taulukossa 5.



Kuvio 6. Ajomoottorin keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.

Taulukko 5. Kuvioon 6 liittyvät tunnusluvut.

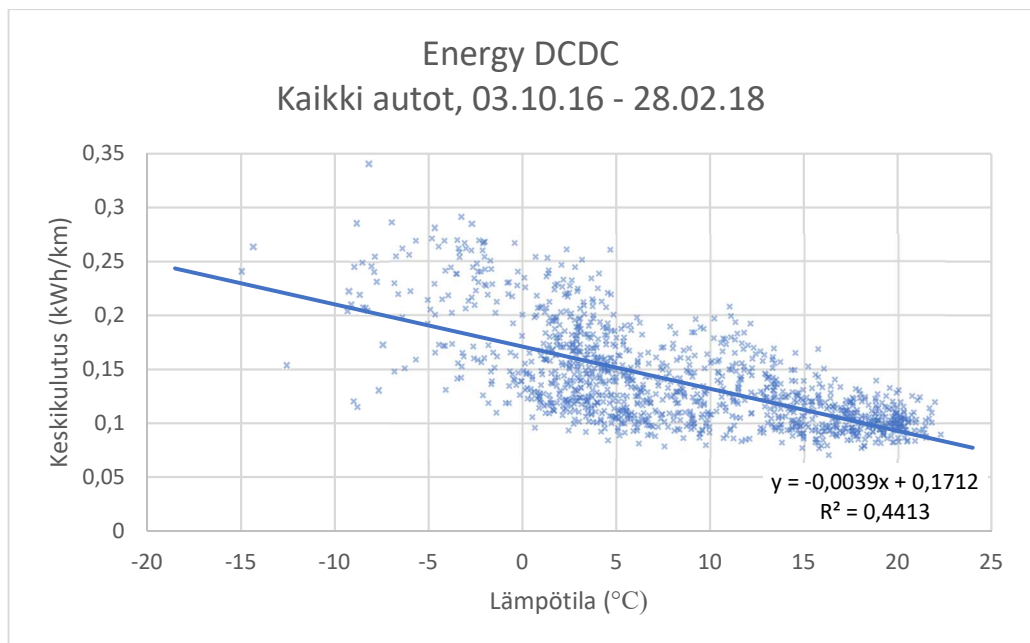
Näytteen koko:	1226		
Korrelaatiokerroin:	-0,6055		
LÄMPÖTILA (T)		KESKIKULUTUS (C)	
Minimi:	-14,95 °C	Keskihajonta:	0,058 kWh/km
Alin desiili:	-0,48 °C	Keskiarvo:	0,613 kWh/km
Mediaani:	7,20 °C	Mediaani:	0,602 kWh/km
Ylin desiili:	18,86 °C	Ka, alin desiili (T):	0,665 kWh/km
Maksimi:	22,28 °C	Ka, ylin desiili (T):	0,570 kWh/km

Ajomoottori on selkeästi kulutukseltaan tutkimuksen suurin yksittäinen laite, jolloin myös sen absoluuttinen kulutusvaihtelu on suurta. Suuresta kulutuksesta johtuen ajomoottorin kulutustiedon lähetystaajuus on vain joitain minutteja.

Kulutuksen absoluuttinen ero ääridesiilien välillä on 0,095 kWh/km, eli kasvua tapahtuu 16,67 %. Ajomoottorin tapauksessa on huomionarvoista pieni keskihajonta, joka kertoo keskiarvon luotettavuudesta sekä mahdollisesti vähäisistä kulutukseen vaikuttavista ulkoisista tekijöistä.

6.3 Tasajännitemuunnin

Tasajännitemuuntimen käyttämän energian keskimääräisen kulutuksen ja ulkoilman keskilämpötilan suhde on esitetty kuviossa 7. Tutkimukseen ja analysointiin liittyvät tunnusluvut on taulukoitu jäljempänä taulukossa 6.



Kuvio 7. Tasajännitemuuntimen keskimääräinen kulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.

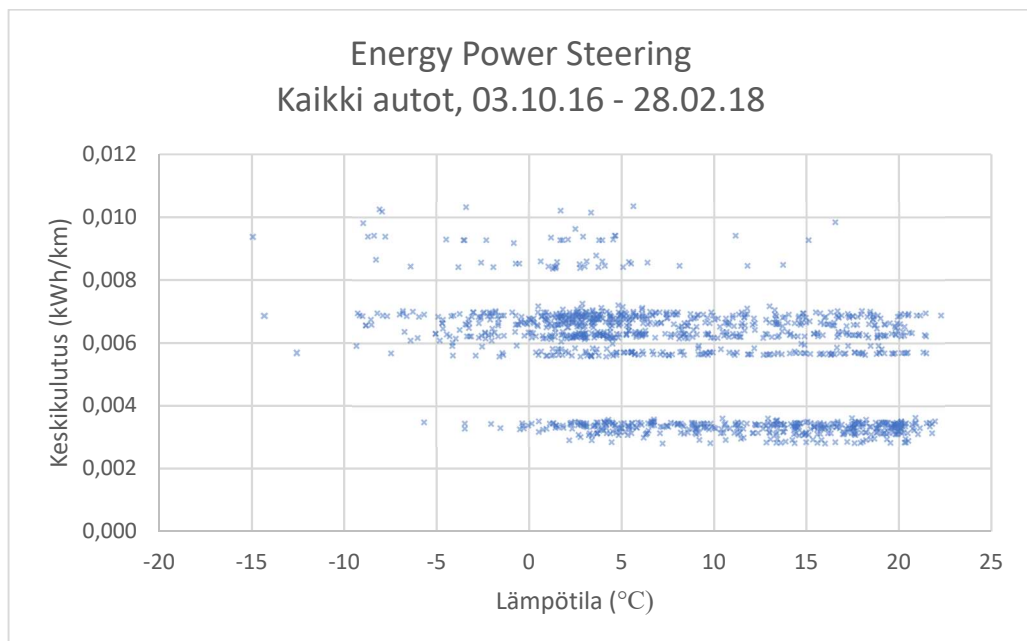
Taulukko 6. Kuvioon 7 liittyvät tunnusluvut.

Näytteen koko:	1233		
Korrelaatiokerroin:	-0,6643		
LÄMPÖTILA (T)		KESKIKULUTUS (C)	
Minimi:	-14,95 °C	Keskihajonta:	0,044 kWh/km
Alin desiili:	-0,46 °C	Keskiarvo:	0,139 kWh/km
Mediaani:	7,15 °C	Mediaani:	0,126 kWh/km
Ylin desiili:	18,86 °C	Ka, alin desiili (T):	0,209 kWh/km
Maksimi:	22,28 °C	Ka, ylin desiili (T):	0,102 kWh/km

Tasajännitemuuntimen kulutuksen ja lämpötilan välillä on selkeä riippuvuus. Absoluuttinen ero kulutuksessa ääridesiilien välillä on 0,107 kWh/km, jolloin suhteellinen keskikulutuksen kasvu on 104,9 %. Absoluuttisen eron suuruutta selittää laitteen suurehko kokonaiskulutus.

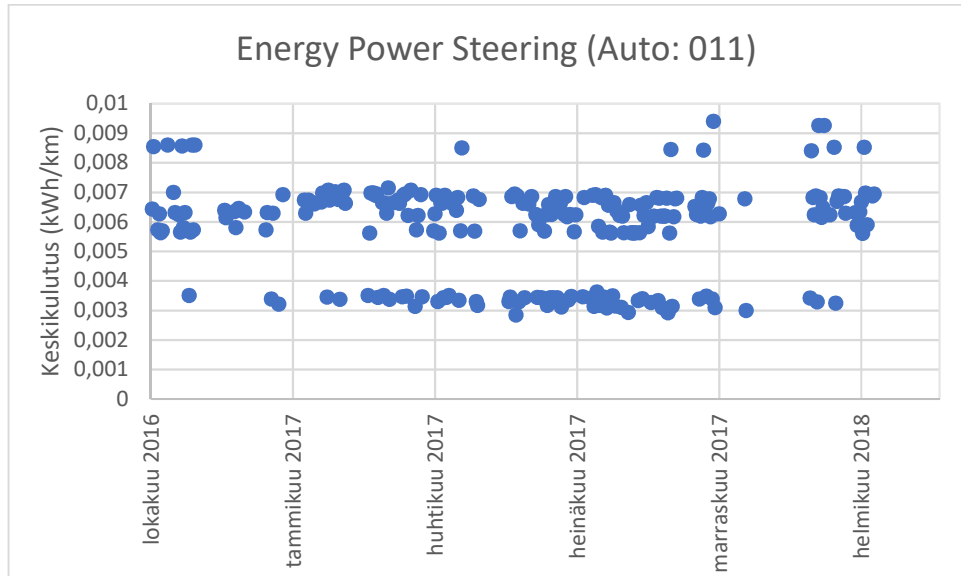
6.4 Ohjaustehostin

Ohjaustehostimen kohdalla havaittiin jo järkevyytarkastelussa monta eri kulutustasoa, joiden vaihtelu ei kuitenkaan ollut lämpötilariippuvaista. Pienestä kokonaiskulutuksesta johtuen lähetystaajuus on todella harvaa. Kuviossa 8 on esitetty ohjaustehostimen keskikulutus kaikkien autojen osalta lämpötilan funktiona.



Kuvio 8. Ohjaustehostimen keskikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.

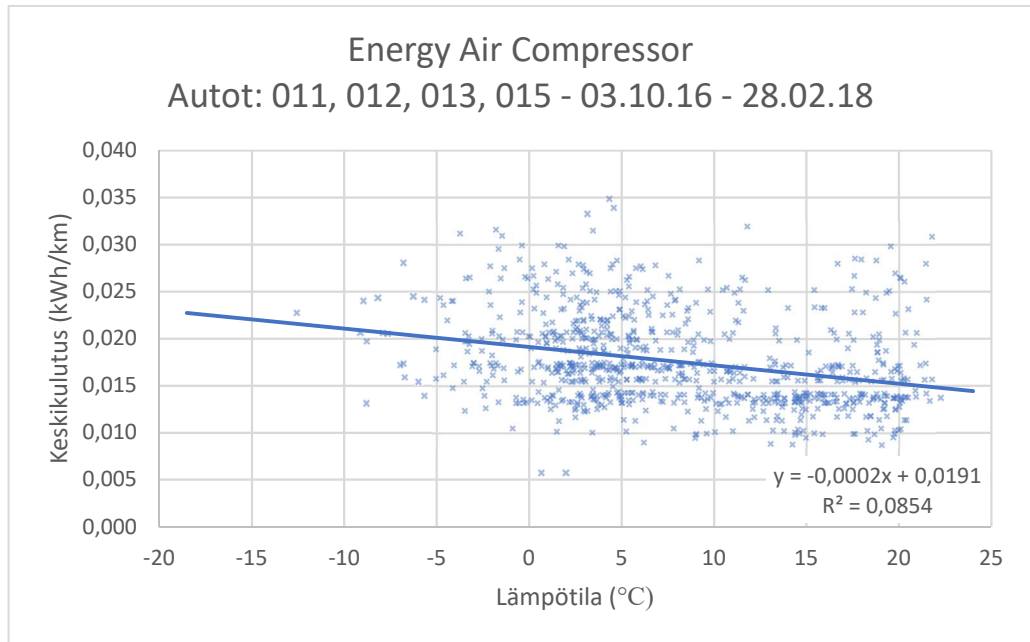
Eri kulutustasot on helppo huomata visuaalisella tarkastelulla. Järkevyystarkastelua jatkettiin tarkastelemalla jokaisen auton kulutusta ajan funktiona, jolloin hajontakuviosta voitiin nähdä, että eri kulutustasoja esiintyy vaihtelevasti koko käyttöjaksolla. Aineisto ei läpäissyt järkevyystarkastelua, joten tutkimusta ei jatkettu. Kuviossa 9 on esimerkkinä yhden auton ohjaustehostimen kulutus ajan funktiona.



Kuvio 9. Ohjaustehostimen järkevyystarkastelun hajontakuvio, jossa keskipulutus yhden auton osalta ajan funktiona.

6.5 Paineilmakompressori

Paineilmakompressorin käyttämän energian keskipulutus ja ulkoilman keskilämpötilan suhde on esitetty kuviossa 10. Tutkimukseen ja analysointiin liittyvät tunnusluvut on taulukoitu hajontakuvion alla taulukossa 7.



Kuvio 10. Paineilmakompressorin kesikulutus ulkoilman keskilämpötilan funktiona.

Taulukko 7. Kuvioon 10 liittyvät tunnusluvut.

Näytteen koko:	846		
Korrelaatiokerroin:	-0,2922		
LÄMPÖTILA (T)		KESKIKULUTUS (C)	
Minimi:	-12,55 °C	Keskihajonta:	0,005 kWh/km
Alin desiili:	-0,32 °C	Keskiarvo:	0,018 kWh/km
Mediaani:	6,42 °C	Mediaani:	0,017 kWh/km
Ylin desiili:	18,76 °C	Ka, alin desiili (T):	0,020 kWh/km
Maksimi:	22,28 °C	Ka, ylin desiili (T):	0,016 kWh/km

Paineilmakompressorin kulutuslukemista on karsittu kahden auton lähettämät tiedot. Kyseisten autojen kompressorin kulutustiedot olivat systemaattisesti 0,02 kWh/km – 0,10 kWh/km suurempia kuin neljällä muulla. Poistettujen autojen myöhäisemmistä käyttöön-ottohetkistä johtuen valtaosa arvoista ajoittui ns. lämpimälle käyttöjaksolle, mikä sai aikaan regressiosuoran nousun koko kaluston tilannetta tarkastellessa. Mainittakoon kuitenkin, että kulutuksen ja lämpötilan keskinäinen suhde oli molempien autojen yksittäis-tarkastelussa kuviossa 10 näkyvän suoran suuntainen. Tästä syystä ko. kulutuksen poik-keavaan suuruuteen ei oteta tässä tutkielmassa kantaa.

Selityskerroin ja korrelaatiokerroin ovat poikkeuksellisen matalat, eikä visuaalisesti tarkastelemallakaan voi havaita muuttujien välillä voimakasta riippuvuussuhdetta. Suhteellinen lasku ääridesiilien välillä on noin 17 %. Absoluuttinen ero on kuitenkin vain 0,0034 kWh/km, joten kompressorin merkitys on kokonaisuuden kannalta hyvin pieni. Otokoko on poistettujen autojen vuoksi huomattavasti pienempi kuin muissa tutkimuksissa.

7 POHDINTAA JA PÄÄTELMÄT

Aineistojen mediaanit ja keskiarvot olivat hyvin lähellä toisiaan, mikä osaltaan viestii harkinnanvaraisen näytteenottomenetelmän onnistumisesta.

Keskikulutus kasvoi lämpimimmältä käyttöalueelta kylmimpään 33,75 %. Suhteellisesti keskikulutus kasvoi eniten lämpöpumpun kohdalla, ja absoluuttinen kasvu oli suurinta tasajännitemuuntimella. Absoluuttinen kasvu oli voimakasta myös ajomoottorilla, jonka regressiosuoran kulmakerroin muodostui suurimmaksi. Tässä on merkille pantavaa, että regressiosuora käsittää koko aineiston, kun taas suhteellista ja absoluuttista kasvua laskettaessa on parametreinä käytetty desiilijoukkojen keskiarvoja. Tuloksia on vertailtu taulukossa 8. Korrelaatiokertoimet osoittavat lämpöpumpun, tasajännitemuuntimen, ajomoottorin ja koko auton keskikulutusten lämpötilariippuvuuden olevan merkittävää.

Taulukko 8. Tulosten vertailu.

	Keskikulutuksen kasvu (%)	Keskikulutuksen kasvu (abs.)	Kulmakerroin	Korrelaatiokerroin
Lämpöpumppu	124,32 %	0,0460 kWh/km	0,0023	-0,6806
Tasajännitemuunnin	104,90 %	0,1070 kWh/km	0,0039	-0,6643
Paineilmakompressori	20,61 %	0,0034 kWh/km	0,0002	-0,2922
Ajomoottori	16,67 %	0,0950 kWh/km	0,0047	-0,6055
Ohjaustehostin	-	-	-	-
Kokonaiskeskikulutus	34,25 %	0,2730 kWh/km	0,0124	-0,7868

Suurin absoluuttinen kulutuksen kasvu havaittiin tasajännitemuuntimella. Energiankulutus kaksinkertaistuu siirryttäessä lämpimimmältä kymmenykseltä kylmimpään ääripäähän, joka tässä tutkimuksessa tarkoittaa lähes kaikkia nollan celsiusasteen alittavia keskilämpötiloja. Tasajännitemuuntimen analysointi on vaikeaa, sillä siihen kytkettyjen laitteiden listaa ei ollut saatavilla. Suurin lämmitykseen liittyvä matalajännitteellä toimiva kuluttaja lienee lämpöpumpun ilmapuhallin (M. Ikonen, henkilökohtainen tiedonanto 16.4.2018), jonka kulutuksen lämpötilariippuvuus olisi loogista. Auton etuosassa on myös matalajännitteellä toimiva lämmitinkeno, jonka kulutus oletettavasti näkyy tasajännitemuuntimen arvoissa.

Lämpöpumpun keskikulutuksen suhteellinen kasvu oli odotettua, mutta absoluuttinen kasvu jäi melko vähäiseksi. Tulokset ovat kuitenkin ristiriidassa esimerkiksi Liikenneviraston vuonna 2018 julkaiseman selvityksen (2018, 14) kanssa, jossa sähköbussien

energiankulutuksen oletetaan kasvavan 10–50 % niiden lämmityksen seurauksena. Samassa kontekstissa tosin tuodaan esiin myös sähkönkulutuksen minimointi polttoainekäyttöisen lisälämmittimen avulla, joka tämän työn tutkimuskohteina olleissa busseissa lämmitteää sisätilojen patterivesikierron. Sisätilojen kattokanavista puhallettava lämpö tuotetaan ilmalämpöpumpulla (R. Wahlsten, henkilökohtainen tiedonanto 20.4.2018).

RekkEVIDde-hankkeen henkilöautojen energiankulutusta tutkivissa mittauksissa kulutuksen kasvu on ollut merkittävää myös polttoainekäyttöistä lisälämmittintä käytettäessä (RekkEVIDde 2013, 30). Lisälämmittimen polttoaineenkulutukseen ei tässä sähkönkulutusta tarkastelevassa tutkimuksessa oteta kantaa, mutta em. tietojen perusteella sen voi olettaa olevan suhteellisen merkittävää.

Lämpöpumpun tutkimusaineiston hajontakuviosta (kuvio 5) nähdään kulutuksen laskevan lämpötilan noustessa noin 17 celsiusasteeseen asti, jonka jälkeen se lähtee jälleen nousuun. Ilmiö johtunee lämpöpumpun jäähdytysominaisuudesta, jolloin pumppuun tuotavalla teholla pyritään sisätilojen lämmittämisen sijasta siirtämään lämpöä autosta ulkoilmaan.

Ajomoottorin suhteellinen kulutuksen kasvu oli varsin pientä, mutta absoluuttinen ero kulutuksessa on merkittävä. Moottorin tehontarve muodostuu tasaisella alustalla vakionopeutta ajettaessa häviöiden lisäksi vierintävastus- ja ilmanvastusvoimasta. Lämpötila voi vaikuttaa vierintävastusvoimaan välillisesti esimerkiksi tienpinnan lumisuuden kautta, mutta sen vaikutus kokonaisvoiman muutokseen ei ole merkittävä. Ilmanvastusvoima sen sijaan muuttuu ilman tiheyden muuttuessa ja sen määrittämiseen käytetään kaavassa 4 esitettyä Newtonin vastuslakia.

$$F_i = \frac{\rho * v^2 * A * C_v}{2}, \text{ missä}$$

ρ = ilman tiheys

v = ajonopeus

A = auton keulan poikkipinta-ala

C_v = ilmanvastuskerroin.

Kaava 4. Newtonin vastuslaki ilmanvastusvoiman määrittämiseen.

Kaavaa 4 on käytetty laskettaessa ilmanvastusvoiman muutoksia eri lämpötiloilla. Tulokset on taulukoitu taulukossa 9. Kaavassa käytetyt arvot ovat aiemmissa tutkimuksissa selvitettyjä arvoja, sillä sähköbussin tarkkoja tietoja ei kirjoitushetkellä ollut saatavilla. Poikkipinta-ala on Scanian valmistaman dieselbussin poikkipinta-ala ja ilmanvastuskerroin niin ikään eräälle dieselbussille määritelty arvo (M. Ikonen, henkilökohtainen tiedonanto 27.3.2018). Ajonopeus on linjalle ominainen keskinopeus (ZeEUS 2016, 35). Ilmanpaine on NTP-olosuhteissa vallitseva arvo.

Taulukko 9. Ilman tiheys ja ilmanvastusvoima eri lämpötiloilla.

T	ρ_{ilma}	F_i
25 °C	1,18 kg/m ³	215,66 N
20 °C	1,20 m ³	219,34 N
15 °C	1,23 m ³	223,15 N
10 °C	1,25 m ³	227,08 N
5 °C	1,27 m ³	231,16 N
0 °C	1,29 m ³	235,39 N
-5 °C	1,32 m ³	239,78 N
-10 °C	1,34 m ³	244,33 N
-15 °C	1,37 m ³	249,07 N
-20 °C	1,39 m ³	253,99 N
-25 °C	1,42 m ³	259,10 N

Keulan poikkipinta-ala:	7,73
Ilmanvastuskerroin:	0,47
Ajonopeus:	19

Ilman tiheys taulukossa 9 on laskettu kaavan 5 mukaisesti.

$$\rho = \frac{p}{RT}, \text{ missä}$$

ρ = ilman tiheys

p = ilman paine (NTP-olosuhteissa 101 325 Pa)

R = kaasuvakio (Kuiva ilma 287,05 J/kgK)

T = lämpötila kelvinasteina (°C + 273,15 °)

Kaava 5. Ilman tiheys (Shelquist Engineering 2016).

Taulukon 9 tuloksista voidaan huomata tarvittavan ilmanvastusvoiman kasvaneen noin 20 % lämpötilan laskiessa 50 astetta. Tarkasteltaessa Lounais-Suomen ilmastolle tyypillisempää -15-15 celsiusasteen lämpötilaväliä, vastaava kasvu on noin 12 %. Taulukossa

10 on laskettu ilmanvastusvoiman kasvu kaavan 4 mukaisesti. Sen huomataan olevan lähes 10 %.

Taulukko 10. Ilmanvastusvoiman kasvu ajomoottorin tutkimusaineiston lämpötilatietojen mukaan.

AJOMOOTTORI	Lämpötila, ka	Ilmanvastusvoima
Alin desiili	-4,18 °C	≈ 240 N
Ylin desiili	20,03 °C	≈ 219 N
	Abs. Kasvu:	≈ 21 N
	Suht. Kasvu:	9,59 %

Muutoin kun tasaisella alustalla, tai vakionopeutta ajettaessa, kokonaisajovastusvoimiin kuuluvat ilmanvastusvoiman ja vierintävastusvoiman lisäksi nousuvastusvoima ja kiihdytysvastusvoima. Kiihdytysvastusvoiman on aiemmissa tutkimuksissa todettu olevan suurin yksittäinen voimakomponentti (Ikonen Markku, henkilökohtainen tiedonanto 27.3.2018). Auton kiihdyttämiseen tarvittava energia riippuu massasta, sekä kiihdytettävästä nopeusvälistä ja se voidaan määrittää suoraan liike-energian kaavan mukaan, jossa em. parametrit ovat ainoat muuttujat (Ikonen 2013, 36). Kyseinen liike-energianlaskenta ottaa siis huomioon ainoastaan massan kiihdyttämiseen tarvittavan energian, jolloin kiihdytyksessä vallitsevat ajovastusvoimat koostuvat edellä esitetyistä ilmanvastus- ja vierintävastusvoimista (Ikonen 2013, 37). Nousuvastusvoimat pääsääntöisesti neutra-loivat toisensa linjareitin ollessa sama molempiin suuntiin.

Eri muuttujien vaikutus kulutukseen on sitä luotettavampaa, mitä pidemmältä ajanjak-solta dataa on käytettävissä. Näin ollen tulevissa tutkimuksissa olisi mielenkiintoista nähdä vastaavia esityksiä laajemmalla otoksella. Niin ikään tarkempi perehtyminen yksittäisten laitteiden, erityisesti ajomoottorin toimintaan olisi tarkoituksenmukaista. Läm-pötilavaikutuksen minimointi olisi teoriassa mahdollista, kun tekniset tekijät on selvitetty.

Käyttökustannuksiin liittyvän energiankulutustutkimuksen lisäksi olisi järkevää selvittää lämpötilan vaikutusta kaluston käyttöasteeseen. Näin ilmenisi käyttökustannusten lisäksi myös luotettavuusaspekti. Tieto on melko helposti selvitettävissä päivittäisten kilometri-suoritteiden ja lämpötiladatan avulla.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää ulkolämpötilan vaikutusta sähköbussin energiankulutukseen ja tukea samalla eFÖLI-projektin tutkimustyökokonaisuutta. Aineiston raakadatan kerääminen tehtiin Wapicen IoT-Ticket palvelusta, johon tallentuvat sähköbussien lähettämä reaaliaikainen tieto aikaleimojen kera. Sen analysointiin ja tarvittavien taustatietojen keräämiseen käytettiin lukuisia kirjallisuus- ja verkkosivulähteitä. Hajontakuviotesitysten luonti ja analysointiin liittyvä laskentatyö toteutettiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla.

Tehtyjen tutkimusten perusteella ympäröivän ilman lämpötilalla on vaikutusta sähköbussin energiankulutukseen. Auton kokonaiskeskikulutus kasvoi alimman ja korkeimman lämpötilajakson välillä 34,3 %. Korkeajännitteellä toimivien laitteiden osalta kulutus kasvoi suhteellisesti eniten ilmalämpöpumpulla keskikulutuksen kasvun ollessa 124,3 %. Absoluuttinen kulutuksen kasvu oli suurinta tasajännitemuuntimella keskikulutuksen kasvaessa yli 0,1 kWh/km. Absoluuttinen kulutuksen kasvu oli suurta myös ajomoottorilla, jolla sen todettiin olevan hieman alle 0,1 kWh/km. Suhteellinen kasvu ajomoottorin kulutuksessa oli vain 16,7 %. Lämpötilan vaikutusta ohjaustehostimen energiankulutukseen ei voitu käytetyin menetelmin osoittaa. Yhteyttä ei vaikuttaisi visuaalisen tarkastelunkaan perusteella olevan. Paineilmakompressorin energiankulutukseen lämpötilan vaikutus on vähäinen.

LÄHTEET

Aho, P. 2018. Havaintoja sähköbussijärjestelmän hankintaprosessista Turussa – Raportti. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu Oy.

Eberspächer 2014. Operating instructions – Controllers for AC systems. Viitattu 19.3.2018.

Föli 2016. Ensimmäiset sähköbussit Turkuun syksyllä. Viitattu 4.4.2018. <http://www.foli.fi/fi/ensimm%C3%A4iset-s%C3%A4hk%C3%B6bussit-turkuun-syksyll%C3%A4>

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: AMK-Kustannus Oy.

Holopainen, M. & Pulkkinen, P. 2012. Tilastolliset menetelmät. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Ikonen M. 2013. Aja taloudellisesti – Ajoneuvon, kuljettajan ja olosuhteiden vaikutus polttoaineenkulutukseen. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2003. Momentti 1 – Insinöörifysiikka. Keuruu: Otava.

Keinänen, K. n.d. Korrelaatio – luentokooste. Viitattu 10.4.2018. <http://myy.haaga-heilia.fi/~keika/kurssit/pruju5.doc>

Liikennevirasto 2018. Jatkoselvitys sähköbussien edistämiseksi suomalaisilla kaupunkiseuduilla – Toimijoiden näkemykset. Viitattu 17.4.2018. https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2018-23_jatkoselvitys_sahkobussien_web.pdf

Linkker 2016a. Kuljettajakoulutusmateriaali. Viitattu 17.2.2018.

Linkker 2016b. Linkker 13 – Data sheet. Viitattu 4.4.2018

Menetelmäopetuksen tietovaranto 2004. Korrelaatio ja riippuvuusluvut. Viitattu 25.3.2018. www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus > KvantiMOTV > Korrelaatio.

RekkEvidde 2013. Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving conditions – Project Final Report. Viitattu 17.4.2018. <http://gnf.fi/wp-content/uploads/2016/05/RekkE-Vidde.pdf>

Robert Bosch GmbH. 2003. Autoteknillinen taskukirja. Jyväskylä: Gummerus Oy.

Ruohonen, M. 2017. Linja-auton ohjaustehostuksen kehitys – Sähköistämisen edistäminen. Opin- näytetyö. Tampere: Tampereen Ammattikorkeakoulu. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201702102279>

Shelquist Engineering 2016. An Introduction to Air Density and Density Altitude Calculations. Viitattu 29.4.2018. https://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm

Taanila, A. 2016. Akin menetelmäblogi. Lineaarinen malli. Viitattu 25.3.2018. <https://tilastoapu.wordpress.com/tag/lineaarinen-regressio/>

Taanila, A. 2017. Akin menetelmäblogi. Tunnuslukuja. Viitattu 12.3.2018. <https://tilastoapu.wordpress.com/2011/10/19/tunnuslukuja>

Tilastokeskus n.d.. Tilastojen ABC. Viitattu 10.4.2018. www.tilastokeskus.fi > Tuotteet ja palvelut > Koulutus ja oppiminen > Tilastokoulu.

Turun kaupunginhallitus 2015. eFöli, sähköbussihin perustuva liikennöintiratkaisu linjalle 1. Viitattu 3.4.2018. <http://ah.turku.fi/kh/2015/0601015x/3249199.htm>

Turun kaupunginvaltuusto 2009. Turun seudun joukkoliikenne 2020 -selvitys. Viitattu 3.4.2018. <http://ah.turku.fi/kv/2009/1214018x/2209440.htm>

Turun kaupunki n.d.. Hiilineutraali Turku 2040. Viitattu 17.4.2018. <https://www.turku.fi/hiilineutraaliturku>

Turun kaupunki 2016. Fölin ensimmäiset sähköbussit tulevat liikenteeseen. Viitattu 15.2.2018. https://www.turku.fi/uutinen/2016-09-29_folin-ensimmaiset-sahkobussit-tulevat-liikenteeseen


Visedo 2017a. Linkker electric buses. Viitattu 18.3.2018. <https://visedo.com/2017/02/26/linkker-electric-buses>


Visedo 2017b. Product manual – PowerDRUM XSe. Viitattu 18.3.2018. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://visedo.com/2017/02/26/linkker-electric-buses>.

YLE 2015. Suomen ensimmäiset pikaladattavat sähköbussit Espooseen. Viitattu 17.4.2018. <https://yle.fi/uutiset/3-8519256>

ZeEUS 2016. ZeEUS eBus Report. Viitattu 1.4.2018 <http://www.zeeus.eu> > Publications.

Sähköbussin tekniset tiedot







LINKKER 13 Data sheet

Chassis		
Make	Linkker 13	Low Entry
Size	Length	12818 mm
	Width	2550 mm
	Wheel base	6750 mm
	Front overhang	2754 mm
Weight	Rear overhang	3314 mm
	Curb weight	10.100kg
	GVW	15.500kg
Capacity (exemple)	Payload	5.400kg
	Seats	38 seats + 3 flip-up seats
	Front facing seats	36 seats
	Standing passengers	42
Doors	Total capacity	80
	Door config.	1+2+1 or 2+2+1
	Door dimenisons	850mm or 1200 mm + 1200mm + 700mm
	Door type	Electric, sliding
	Door manufacturer	Tamware
Front axle	DANA NDS 56 LF	
Rear axle	DANA G150	
Tyre size	285/70 R 19,5	
Brakes	Knorr Bremse	
Body		
	Linkker LinkLight	
Type		Aluminium chassis and body
Seats		Grammer Inner City or similar. See lay-out drawing for measures
Drive line		
Electric Motor	Linkker DriveLink	
	Permanent Magnet Motor, Visedo	Max power 180 kW, max torque 8.800 Nm at rear wheels Could be increased to 10.000 Nm with rear axle ratio for hilly surroundings (max speed 80 km/h -> 60 km/h)
Drive inverter	Visedo	
Aux inverters	Visedo	

Contact and more information | www.linkkerbus.com
Tom Granvik
+358-40-5116260
tom.granvik@linkkerbus.com





VCU	Linkker LinkControl	Smooth acceleration, vibration free, jolting free, hill stand, wheel slip control etc.
Battery	Actia IM+E Capacity	Lithium Titanate Oxide 55kWh
	Recommended charging power	300kW
	Estimated cycles	15.000
	Typical propulsion consumption	Use case 1: 0.8 kWh/km on Braunschweig cycle (payload 3000 kg) Use case 2: 0.6 kWh/km on Espoo bus Line 11 (unloaded)
	Typical range	30-50km
	Charging system	Primary: 300 kW roof connected pantograph (normal or inverted) Secondary: Plug in connection. (Option for 43 kW 3-phase, 400VAC, 63A external service charger and for 3,7 kW on-board charger)
Auxiliaries		
Electric Auxiliaries	Mattei Linkker	Air Compressor Power steering
HVAC	Type	Eberspächer AC136 roof unit
	Cooling capacity	Heat pump 15 kW @ 30°C
	Heating capacity	15 kW @ 0°C
	Fuel heater (optional)	24 kW

Contact and more information | www.linkkerbus.com
 Tom Granvik
 +358-40-5116260
 tom.granvik@linkkerbus.com

