

Sähköautojen latausinfrastruktuurin riittävyys Suomessa

Tiivistelmä

Tutkimuksemme tavoitteena on selvittää, miten latausinfrastruktuuri mahdollistaa sähköautojen käyttöä. Teimme tapaustutkimuksen simuloimalla valtatie 4 liikennettä. Java-ohjelmointikielellä toteuttamamme simulointimalli tarvitsee lähtöaineistona 4-tien varrella olevat latauspisteet latauskartta.fi-nettisivustolta, Traficomin tilastot ajoneuvotietokannasta sekä Väyläviraston tarjoamasta liikennemääräkartasta saadut 4-tien liikennetilastot. Ohjelmoimme myös tietohakuja varten Javalla ohjelman, joka etsi ajoneuvotietokannasta kaikki Suomessa rekisteröidyt sähköautot malleittain.

Ajoneuvot lähtevät seitsemästä mahdollisesta lähtöpaikasta (Helsinki, Lahti, Jyväskylä, Oulu, Kemi, Rovaniemi, Utsjoki) ja voivat päätyä simuloinnissa johonkin jäljellejäävästä kuudesta mahdolliseen tavoitepisteeseen. Autoilijoiden on välillä käytävä latauspisteillä lataamassa autojaan, jolloin osa latauspisteistä tulee varatuksi. Jos lähistöllä ei ole vapaita latauspisteitä, autoilijoiden on jonotettava jonkin latauspisteen luona. Autoilla on 9 mahdollista tilaa: "Valtatiellä", "Matkalla valtatielle", "Matkalla valtatieltä", "Matkalla laturille", "Matkalla laturilta", "Latautumassa", "Odottamassa", "Akku loppunut" ja "Perillä". Simuloinnissa käytetty aika-askel oli 10 sekuntia. Ohjelma tulostaa simulaation tulokset csv-tiedostoihin.

Simuloinnissa varioimme sähköautojen lukumäärää ja kuinka samanaikaisesti autot lähtevät. Samanaikaisuutta kuvaava suure on autojen lähtöaikojen keskihajonta. Autojen lukumäärä vaihteli 50:stä 1800:n askelvälillä 50 autoa. Samanaikaisuusparametrin eli lähtöaikojen keskihajonnan vaihtelu oli 1 tunnista 36 tuntiin 1 tunnin askelilla. Simulointitulokset on laskettu kullakin lähtöarvoryhmällä 50 kertaa, koska malli sisälsi satunnaisuutta. Tuloksina käytetään näiden 50 samoilla lähtöarvoilla mutta eri satunnaisluvuilla saatujen tulosten keskiarvoa. Simuloimme yhteensä 106 000 kertaa ja tulosten yhteenlaskettu tiedostokoko oli yli 20 GB. Ohjelmoimme tulosten analysointiin kolmannen Java-ohjelman, joka jäsenteli tulostiedostojen sisällöt taulukkolaskentaa varten.

Sähköautojen tämänhetkistä osuutta liikennevirrassa vastaavassa simulaatiossa sähköautoja on 100. Jos autojen lähtöajan keskihajonta simulointimallissa oli 6 tuntia, noin 0,3 % kaikista autoista ja noin 1,3 % yli 200 km ajaneista autoista joutui odottamaan. Autot käyttävät keskimäärin 62 % ajastaan ajamiseen ja 38 % ajastaan auton lataamiseen. Autot joutuivat enimmillään odottamaan noin 5 minuuttia.

Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän tavoitteena oli noin 70 kertaistaa sähköautojen osuus autokannasta. Jos simuloitujen sähköautojen lukumäärä on 7000 ja autojen lähtöajan keskihajonta on 1 tunti, autot käyttävät kesällä keskimäärin 30 % matkaan kuluvasta ajasta odottamiseen, 26 % lataamiseen ja 44 % ajamiseen. Nykylatauskapasiteetilla autot joutuvat enimmillään odottamaan noin 7 vuorokautta. Latausinfrastruktuuria onkin lisättävä suhteessa kasvavaan sähköautokantaan.

Sisältö

Tiivistelmä.....	2
1. Johdanto.....	4
2. Aineisto ja menetelmät.....	4
2.1 Sähköautojen simulointi.....	4
2.1.1 Mallin toimintaperiaate.....	4
2.1.2 Autojen logiikka.....	6
2.1.3 Huomiot mallinnuksessa.....	7
2.2 Simulointimallin lähtöaineisto.....	8
2.2.1 Sähköauton latauspisteet.....	8
2.2.2 Ajoneuvotietokannan erittely.....	9
2.2.3 Sähköautojen tekniset tiedot.....	9
2.2.4 Liikenteen määrä valtatiellä 4.....	9
2.3 Simulointi.....	9
3 Tulokset.....	10
3.1 Latauspisteellä odottavien autojen lukumäärä.....	10
3.2 Jonotusajat.....	12
3.3 Pitkän matkan ajaneet autot.....	13
3.4 Tien osien vertailua.....	14
3.5 Tilanne talvella.....	14
3.6 Nykytilanne ja tulevaisuus.....	16
4 Johtopäätökset.....	18
5 Kiitokset.....	18
6 Lähteet.....	19

1. Johdanto

Sähköautot voivat vähentää matkustamisesta seuraavia hiilidioksidipäästöjä huomattavasti.[1] Viidesosa Suomen hiilidioksidipäästöistä on peräisin liikenteestä,[2] minkä vuoksi ilmastonmuutoksen torjumisen kannalta olisi tärkeää vähentää etenkin liikenteestä tulevia hiilidioksidipäästöjä.

Suomen vuoden 2019 hallitusohjelmassa sanotaan, että Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä.[3] Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän loppuraportin mukaan tämän tavoitteen saavuttaminen vaatisi, että Suomen uudeksi sähköautotavoitteeksi asetettaisiin jopa 600 000–700 000 täyssähköautoa vuoteen 2030 mennessä.[4]

Sähköautojen vaikutusta liikenteeseen on tutkittu ennenkin. Esimerkiksi Tao Wangin, Tie-Qiao Tangin, Hai-Jun Huangin ja Xiaobo Qun tutkimusryhmä on tutkinut sähköautojen vaikutusta aamuruuhkaan kaupungeissa.[5]

US Department of Energy on tutkinut, kuinka suuri latausinfrastruktuuri Yhdysvalloissa tarvitaan tukemaan yhdysvaltalaisia sähkö- ja hybridautoja.[6] Tutkimuksen mukaan yli 50 000 ihmisen kaupungeissa tarvitaan noin 1,5 latauspistettä tuhatta autoa kohden ja alle 50 000 ihmisen kaupungeissa 2,2 latauspistettä tuhatta sähköautoa kohden.

Sähköautojen latauspisteitä on ennenkin mallinnettu. Muun muassa S. Bae and A. Kwasinski ovat mallintaneet valtatie vieressä olevaa sähköauton latauspistettä.[7] Lisäksi Ari Räisänen on opinnäytetyössään kartoittanut sähköautojen latauspisteiden lisäysten tarpeita Senaatti-kiinteistöjen hallinnoimissa kiinteistöissä.[8]

Tutkimuksemme tavoitteena on selvittää, miten latausinfrastruktuuri mahdollistaa sähköautojen käyttöä.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Sähköautojen simulointi

2.1.1 Mallin toimintaperiaate

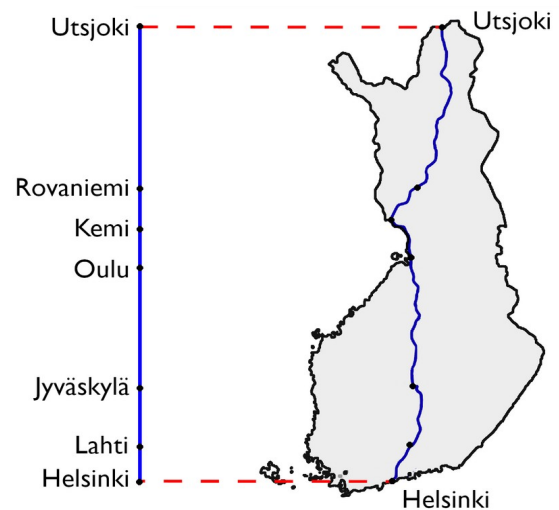
Rakensimme tietokonemallin 4-valtatie liikenteestä. Malli perustuu eri mallisten sähköautojen liikkumiseen valtatiellä, jonka varrella on latauspisteitä. Autoilijoiden on välillä käytävä latauspisteillä lataamassa autojaan, jolloin osa latauspisteistä tulee varatuksi. Jos lähistöllä ei ole vapaita latauspisteitä, autoilijoiden on jonotettava jonkin latauspisteen luona. Tiellä liikkuvien autojen mallit on saatu ajoneuvotietokannan tilastoista,[9] ja liikenteen määrä tiellä on arvioitu liikennetilastojen perusteella.

Merkitsimme mallinnettavalle 4-valtatielle yhteensä 7 päätepistettä suurimpien kaupunkien kohdille: Helsinkiin, Lahteen, Jyväskylään, Ouluun, Kemiin, Rovaniemelle ja Utsjoelle. Kaupunkien etäisyydet toisistaan määritettiin kaupunkia vastaavien poistumisliittymien perusteella Google Mapsin avulla. 4-valtatie alkaa Helsingistä Lahdenväylän liittymästä 1 ja loppuu Utsjoelle Utsjoentien ja seututie 970 risteykseen.

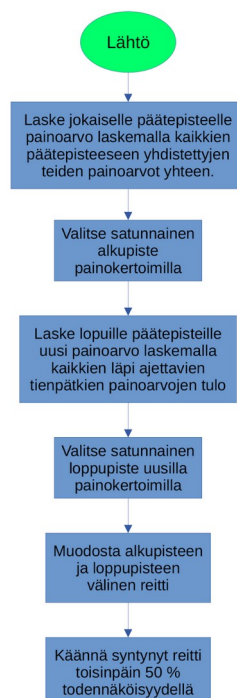
Mallinsimme tietä osissa. Valtatie katkaistiin valittujen päätepisteiden kohdalta, jolloin muodostui kuusi tien osaa suurimpien kaupunkien välille. Mallissa luodaan 4-tiellä kulkeville autoille reitti, joka koostuu yhdestä tai useammasta tien osasta. Jokaiselle reitille on kirjattu kuljettavan matkan pituus sekä kyseisellä reitillä olevat sähköautonlatauspisteet.

Simulaation alussa luodaan haluttu määrä sähköautoja, joille luodaan satunnaisesti reitti. Se määritetään valitsemalla autolle lähtö- ja maalipiste siten, että jokaisen tienpätkän automäärät vastaavat Väyläviraston tarjoaman liikennemääräkartan automääriä.[10]

Määritimme jokaiselle tien osalle painoarvon sen perusteella, paljonko autoja tiellä keskimäärin ajaa päivittäin. Jokaiselle päätepisteelle lasketaan teiden painoarvojen perusteella oma painoarvo summaamalla kaikkien päätepisteeseen yhdistettyjen teiden painoarvot yhteen. Autot luodaan normaali jakauman mukaisesti, jolloin autojen lähtöajan keskihajonta kuvaa, kuinka samanaikaisesti autot lähtevät liikkeelle. Autojen luomiseen käytetty algoritmi on kuvattu kuvan 2 vuokaaviossa.



Kuva 1: Havainnollistava kuva E75-tien yksinkertaistamisesta.



Kuva 2: Vuokaavio autojen luomiseen käytetystä algoritmista.

Simulaatiota ajetaan 10 sekunnin pituisilla aika-askeleilla, jolloin autojen liikettä simuloidaan 10 sekunnin tarkkuudella. Visualisoimme mallia Javan Swing-käyttöliittymäkirjastolla. Visualisaation tavoitteena oli havainnollistaa mallin toimintaa ja helpottaa sen rakentamista.

2.1.2 Autojen logiikka

Autoilla on 9 mahdollista tilaa: “Valtatiellä”, “Matkalla valtatielle”, “Matkalla valtatieltä”, “Matkalla laturille”, “Matkalla laturilta”, “Latautumassa”, “Odottamassa”, “Akku loppunut” ja “Perillä”. Autojen logiikka on toteutettu siirtämällä autoja tilasta toiseen silloin, kun tietyt ehdot toteutuvat. Autojen logiikkaa on havainnollistettu vuokaaviolla kuvassa 3.

Kullekin latauspisteelle lasketaan hyvyyspisteet, joiden perusteella autot määrittävät, mille latauspisteelle ne menevät. Vertaamalla näitä hyvyyspisteitä autot voivat myös määrittää, kannattaako niiden esimerkiksi jäädä jonottamaan nykyiselle latauspisteelle mieluummin kuin ajaa seuraavalle. Auton on tuettava ainakin yhtä laturilta löytyvää laturityyppiä mennäkseen laturille. Mallissa oletetaan, että autoilijan on mahdollista saada selville latauspisteeltä löytyvät laturityypit ja se, paljonko jonoa latauspisteellä on. Autot valitsevat latauspisteen kuvan 4 vuokaavion prosessin mukaisesti ja määrittävät, kannattaako niiden jonottaa, kuvan 5 vuokaavion prosessin mukaisesti.

Hyvyyspisteet perustuvat latauspisteellä jonotettavan ajan minimointiin. Arviota täydennetään latauspisteen etäisyyteen ja ruokamahdollisuuksiin perustuvilla aikasakoilla.

$$p = t + t_k \cdot \frac{j}{2 \cdot n} + \min\left(\frac{(s - 0,7 s_{\max})^2}{s_{\max}^2} \cdot 12,5 h; 1,125 h\right) + k, \text{ jossa}$$

t on auton arvioitu latausaika latauspisteellä

t_k on keskimääräisen auton arvioitu latausaika latauspisteellä

j on latauspisteellä jonottavien autojen lukumäärä

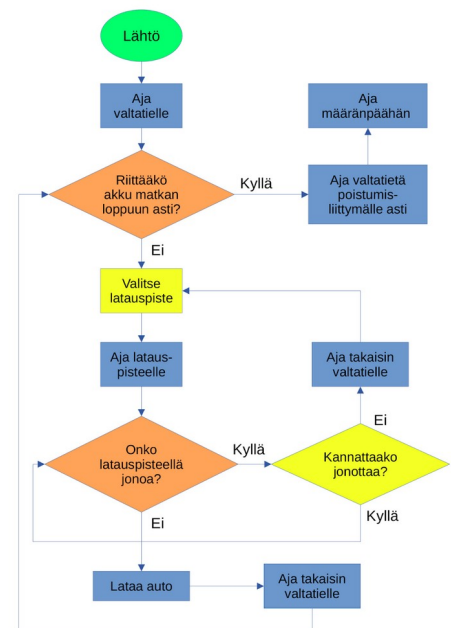
n on latauspisteen latureiden lukumäärä

s on auton nykyinen etäisyys latauspisteestä

s_{\max} on auton maksimikantama

k on aikasakko, jos autoilijalla on nälkä ja latauspisteellä ei ole ravintolaa tai kauppaa, koska tällöin autoilija joutuu käymään syömässä jossain muualla. Aikasakko k on 0,5 tuntia ja muulloin se on 0 tuntia.

Ensimmäinen termi t kuvaa auton lataukseen kuluvaa aikaa. Toinen termi $t_k \cdot \frac{j}{2 \cdot n}$ kuvaa jonotusaikaa, kun latauspisteellä on j autoa jonossa ja n kappaletta latureita.

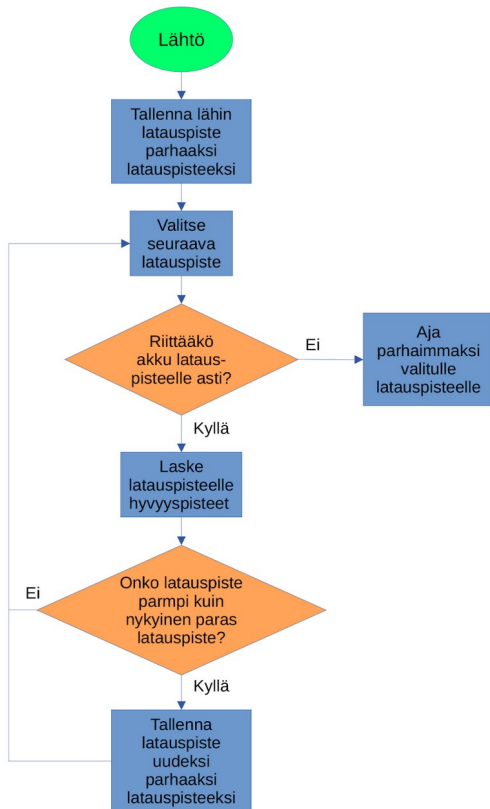


Kuva 3: Autojen logiikkaa havainnollistava vuokaavio

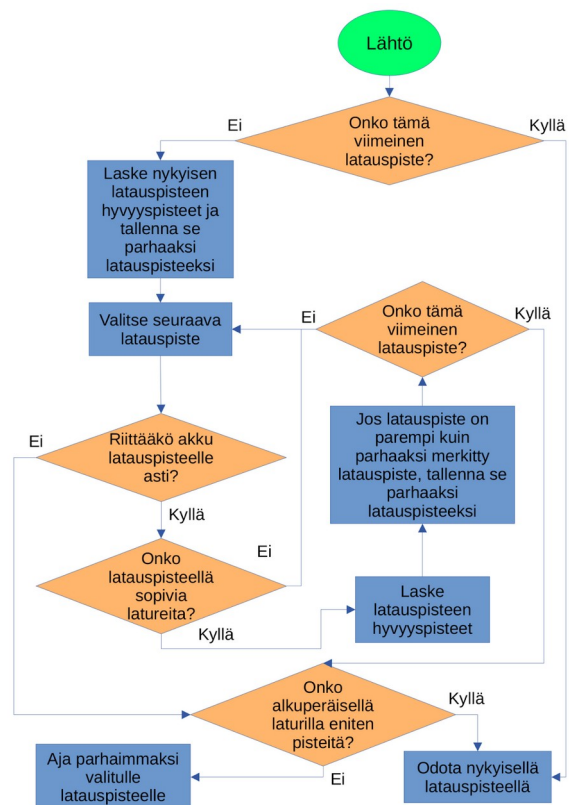
Kysyimme sähköautoa ajavalta opettajalta, milloin sähköauto kannattaa ladata: kun akku on noin 30 % täynnä. Jotta simuloidut autoilijat pyrkisivät lataamaan akkunsaa tällä kohdalla, luodaan aikasakko, jonka avulla latauspistettä valitaan.

$$\min\left(\frac{(s-0,7 s_{\max})^2}{s_{\max}^2} \cdot 12,5 h; 1,125 h\right)$$

Valittu toisen asteen kaava antaa aikasakoksi 0 tuntia, kun akun lataus on 30 %. Se ei perustu mihinkään tutkimustulokseen vaan on tekijöiden heuristinen arvio sähköautoilijan optimointiperusteesta. Aikasakko on rajattu maksimissaan noin yhteen tuntiin ja 8 minuuttiin.



Kuva 4: Latauspisteen valitsemista havainnollistava vuokaavio



Kuva 5: Autojen odottamislogiikkaa havainnollistava vuokaavio.

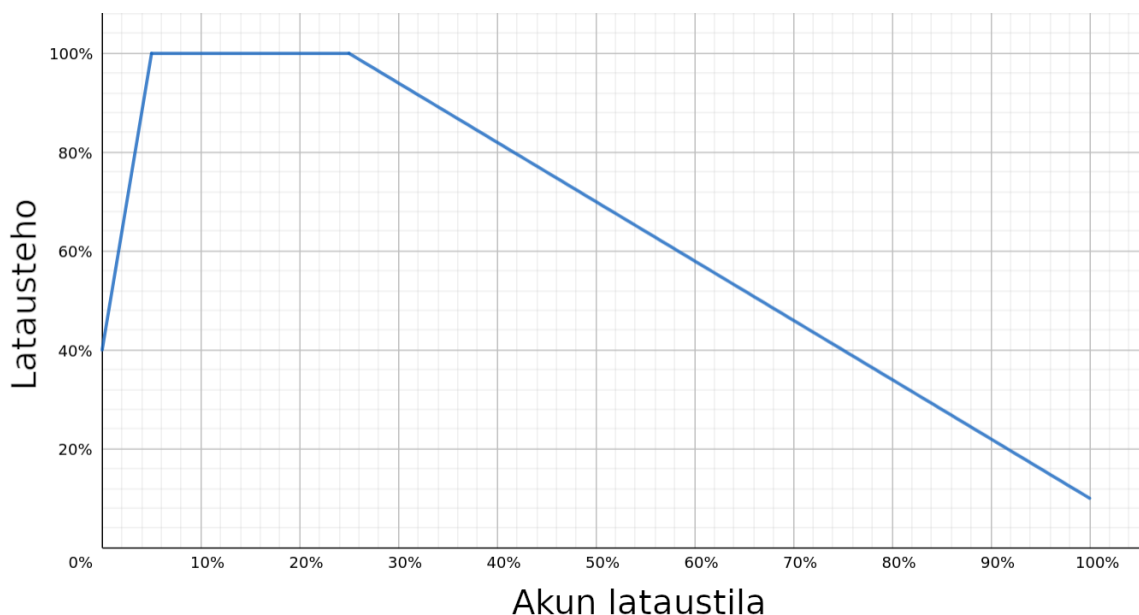
2.1.3 Huomiot mallinnuksessa

Koska kaupungit eivät ole pistemäisiä, autoille määrätään matkan alussa ja lopussa jokin ajettava etäisyys valtatieltä. Tämä etäisyys määritetään satunnaisesti 0 ja 30 kilometrin väliltä. Mallissa on otettu huomioon myös autoilijoiden halu käydä ruokailemassa. Mallissa otetaan aikaa siitä, milloin autoilijat viimeksi ruokailevat. Se vaikuttaa siihen, minkä latauspisteen he valitsevat.

Talvella auton sähkönkulutus voi olla jopa 50–60 % suurempi kuin kesällä.[11] Kesäolosuhteet oletetaan mallissa täydellisiksi, mutta talvella autojen lataustehoa pienennetään mallissa 50 %:lla ja ajamisen sähkönkulutusta suurennetaan 50 %:lla.

Mallissa ei oteta huomioon nopeuden tai sään vaikutusta ilmanvastukseen ja sähkönkulutukseen. Mallissa ei myöskään oteta huomioon latauksen hinnan vaikutusta autojen latauspisteiden valintaan. Lisäksi mallissa oletetaan kaikki latauspisteet toimiviksi.

Auton latausteho riippuu siitä, kuinka täynnä sen akku on lataushetkellä. Arvioimme lataustehon funktiota yleistämällä insideevs.com-nettisivulta löytyviä oikeiden autojen lataustehon käyriä.[12][13][14] Kun auton akku on tyhjä, sen latausteho on 40 % maksimitehosta. Kun auton akku on 5–25 % täynnä, se lataa maksimiteholla, ja kun auton akku on täynnä, sen latausteho on 10 % maksimitehosta.



Kuva 6: Auton latausteho akun lataustilan funktiona.

2.2 Simulointimallin lähtöaineisto

Simulointimalli tarvitsee lähtöaineistona 4-tien varrella olevat latauspisteet, tilastoja ajoneuvotietokannasta sekä 4-tien liikennetilastoja.

2.2.1 Sähköautonlatauspisteet

Valtatien 4 varrella olevat latauspisteet saimme Sähköautoilijat Ry:n tarjoamasta latauskartta.fi -nettisivustolta.[15] Sähköautoilijat Ry on kuluttajajärjestö, jonka tehtävänä on valvoa sähköautoilijoiden etua ja edistää sähköisen liikenteen yleistymistä.[16]

Keräsimme latauskartta.fi -nettisivustolta kaikki 4-tien varrella olevat latauspisteet Libreoffice Calc -taulukkolaskentaohjelmaan. Latauspiste on valtatievarrella, jos sen etäisyys valtatiestä on alle 5 kilometriä. Maksimietäisyys valtatiestä on asetettu riittävän suureksi, jotta autoilijat voivat tarvittaessa käydä lataamassa autoaan kauempanakin. Latauspisteiden etäisyys valtatiestä määrittelimme mittaamalla Google Maps:n avulla latauspisteiden ja valtatievarren lähimmän liittymän välinen etäisyys.

Loimme yhteensä 6 Libreoffice Calc -tiedostoa, jotka kuvasivat valittujen päätepisteiden välistä tietä. Tiedostoihin kirjjasimme jokaisen kahden kaupungin välisellä tiellä olevat latauspisteet. Jos

latauspisteessä oli erilaisia latureita, kirjasimme saman latauspisteen useamman kerran kaikille erilaisille latureille. Latauspisteistä kirjasimme seuraavat asiat:

- Latauspisteen etäisyys latauspistettä lähimpänä olevasta valtatien liittymästä
- Liittymän etäisyys matkan alkupisteestä
- Latauspisteen laturin tyyppi
- Latauspisteen laturin teho
- Samanlaisten laturien lukumäärä latauspisteellä
- Onko latauspisteen luona ruokakauppaa
- Onko latauspisteen luona ravintolaa
- Onko latauspiste tarkoitettu pelkästään jonkun yrityksen asiakkaille (Tätä tietoa ei käytetty)

Keräsimme latauspisteet 4.10.2021 - 10.10.2021 välillä.

2.2.2 Ajoneuvotietokannan erittely

Ajoneuvotietokannan tilastot saimme Traficomien nettisivuilta taulukkolaskentaohjelmaan kerättynä. [9] Tilastoon oli kirjattu Suomessa rekisteröityjen, sähkömoottoria käyttävien autojen määrä malleittain. Ohjelmoimme Java -ohjelmointikielellä ohjelman, joka etsi ajoneuvotietokannasta kaikki Suomessa rekisteröidyt sähköautot malleittain.

Tallensimme ensin taulukon CSV -formaattiin ohjelman jäsennettäväksi. Ohjelma kävi läpi kaikki automallit. Jokaisen automallin kohdalla tarkistettiin, onko auto sähköauto ja jos on, montako autoa on Suomessa rekisteröity.

2.2.3 Sähköautojen tekniset tiedot

Mallissa tarvittiin sähköautoista seuraavat tiedot: akun kapasiteetti, ajotehokkuus, minkälaisia latureita se tukee sekä kuinka suurella teholla autot pystyivät suurimmillaan lataamaan tasa- ja vaihtovirralla. Ohjelmoimme Java-ohjelmointikielellä web scraper -ohjelman, joka haki automaattisesti halutut tiedot pod-point.com-nettisivulta.[17] Ohjelmassa käytettiin Selenium -kirjastoa.

2.2.4 Liikenteen määrä valtatiellä 4

Valtatien 4 liikennetilastot keräsimme Väyläviraston tarjoamasta liikennemääräkartasta.[10] Valitsimme liikennekartalta jokaisen tienpätkän sen välimatkan, jossa kulki keskimäärin vähiten autoja vuorokaudessa. Vertaamalla tienpätkien automääriä saimme teille suhdeluvut.

2.3 Simulointi

Simuloinnissa varioimme kahta eri parametria, jotka olivat tiellä ajavien sähköautojen lukumäärä ja autojen lähtöaikojen keskihajonta, joka kuvaa kuinka samanaikaisesti autot lähtevät liikkeelle. Ajoimme simulaatiota 50 auton välein aina 1800 autoon asti kesäolosuhteissa ja 1100 autoon asti

talviolosuhteissa. Muutimme autojen lähtemisen keskihajontaa tunnilla aina 36 tuntiin saakka ja jokaisen parametrin yhdistelmää toistettiin 50 kertaa.

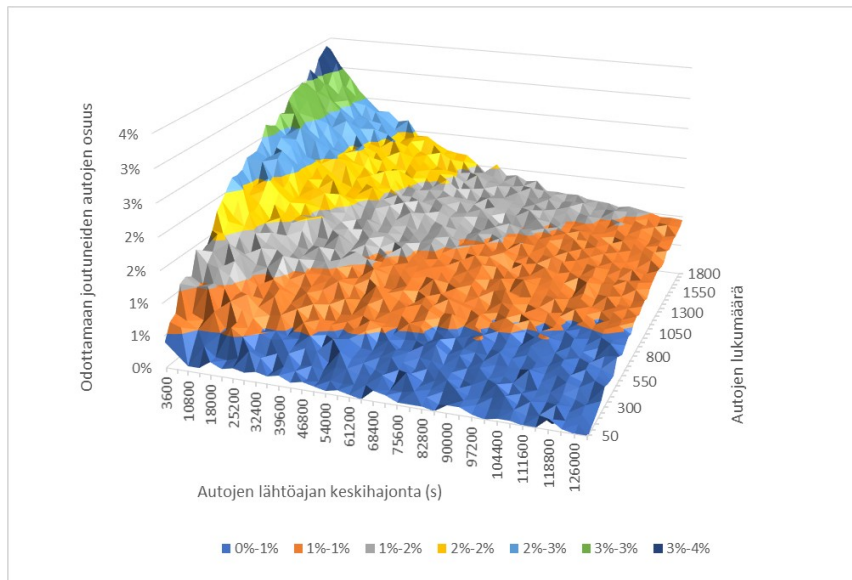
Tutkimme, kestäisikö nykyinen latausinfrastruktuuri Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän asettaman 600 000–700 000 sähköauton sähköautotavoitetta. Traficom ajoneuvokannan mukaan Suomeen oli rekisteröity 19.1.2021 mennessä 9697 sähköautoa. Henkilöautoja oli yhteensä rekisteröity 2 748 448, jolloin sähköautojen osuus oli noin 0,352 %. Arvioimme paikkatieto.vaylapilvi.fi -sivun tietojen perusteella, että 4-tiellä ajaisi päivittäin ainakin 30000 autoa valitsemiemme päätepisteiden välillä. Näistä 30000 autosta noin 100 autoa on ajoneuvokannan perusteella sähköautoja. Jos Suomen sähköautokanta kasvaisi 9697 sähköautosta 650 000, arvioimme, että uusi 4-tiellä päivittäin ajavien sähköautojen lukumäärä olisi noin 7000. Simuloimme 100 sähköautolla 500 kertaa kesällä ja 500 kertaa talvella ja 7000 sähköautolla 400 kertaa kesällä ja 200 kertaa talvella. Sähköautojen lähtöajan keskihajonta oli 1 tunti.

Ajoimme simulaatiota yhteensä 106 000 kertaa ja tulosten yhteenlaskettu tiedostokoko oli yli 20 GB. Ohjelma tulostaa simulaation tulokset csv-tiedostoihin. Ohjelmoimme toisen Java-ohjelman, joka jäsenteli tiedostojen sisällöt helpommin analysoitaviin tiedostoihin, joita pystyimme myöhemmin tutkimaan taulukkolaskentaohjelmalla.

3 Tulokset

3.1 Latauspisteellä odottavien autojen lukumäärä

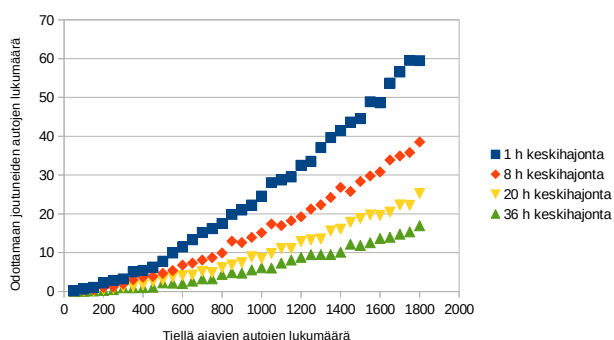
Tarkastellaan latauspisteillä jonottavien autojen lukumäärää liikkeelle lähteiden autojen lukumäärän sekä autojen lähtöajan samanaikaisuuden funktiona. Autojen oletetaan lähtevän liikkeelle noudattaen normaalijakaumaa, jolloin samanaikaisuutta kuvaava suure on autojen lähtöajan keskihajonta. Simulointitulokset on laskettu kullakin lähtöarvoryhmällä 50 kertaa ja kuvioissa on esitetty näiden 50 satunnaisuutta sisältävän simuloinnin keskiarvo. Tämän vuoksi keskiarvoihinkin on jäänyt vielä satunnaisuutta.



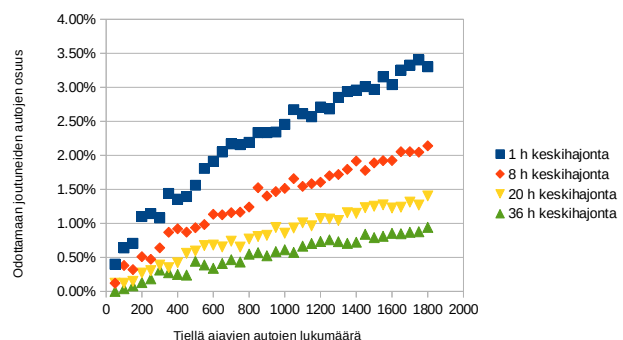
Kuva 7: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus tiellä ajavien autojen lukumäärän ja autojen lähtöajan keskihajonnan funktiona.

Tiellä ajavien autojen lukumäärän kasvaessa laturia jonottavien autojen lukumäärä kasvaa. Kun 95 % autoista lähti alle 4 tunnissa (lähtöajan keskihajonta 1 tunti) latauspisteellä jonottavien autojen lukumäärä ylitti 10 autoa noin 600 auton jälkeen. Kun autojen lähtöajan keskihajonta on 8 tuntia, odottavien autojen lukumäärä ylitti 10 autoa noin 800 auton kohdalla, ja kun autojen lähtöajan keskihajonta on 20 tuntia, odottavien autojen lukumäärä ylitti 10 autoa noin 1100 auton jälkeen. Autojen lähtöajan keskihajonnan ollessa 36 tuntia (tasainen liikennekuormitus) laturia jonottavien autojen lukumäärä ylitti 10 autoa noin 1400 auton kohdalla.

Kun koko tiellä ajavien sähköautojen lukumäärä oli 1000 ja autojen lähtöajan keskihajonta oli 1 tunti, noin 2,5 % tiellä ajavista autoista joutui odottamaan päästäkseen latauspisteelle, ja autojen lähtöajan hajonnan ollessa 8 tuntia noin 1,5 % tiellä ajavista autoista joutui odottamaan päästäkseen latauspisteelle. 1000 autolla noin 1 % tiellä ajavista autoista joutui odottamaan latauspisteellä 20 tunnin keskihajonnalla ja noin 0,5 % tiellä ajavista autoista joutui odottamaan latauspisteellä 36 tunnin keskihajonnalla.

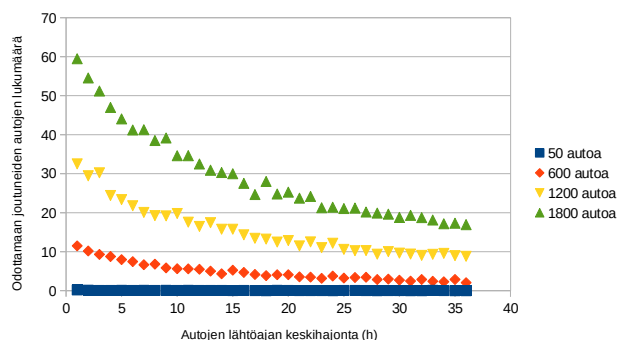


Kuva 8: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen lukumäärä tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona.

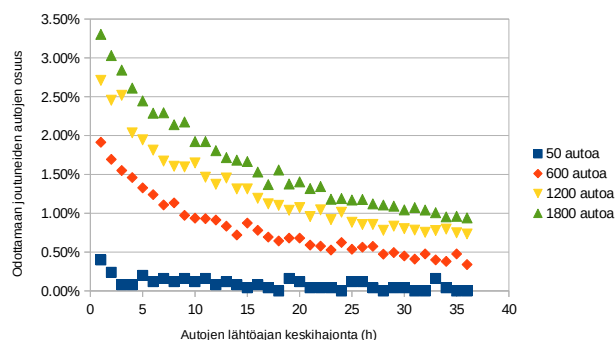


Kuva 9: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus tiellä ajavien autojen lukumäärän ja autojen lähtöajan keskihajonnan funktiona.

Kun autot lähtevät laajemmalla aikavälillä eli mallissa autojen lähtöaikojen keskihajonta kasvaa, laturia jonottavien autojen lukumäärä laskee. Kun keskihajonta oli 6 tuntia ja tiellä ajavien autojen lukumäärä oli 600, noin 8 autoa (1,2 %) joutui keskimäärin odottamaan laturilla. Ajavien autojen lukumäärän ollessa 1200 noin 20 autoa (1,8 %) joutui keskimäärin odottamaan ja tiellä ajavien autojen lukumäärän ollessa 1800 noin 40 autoa (2,6 %) joutui keskimäärin odottamaan. Ajavien autojen lukumäärän ollessa 50, autojen ei lähtökohtaisesti tarvinnut odottaa.

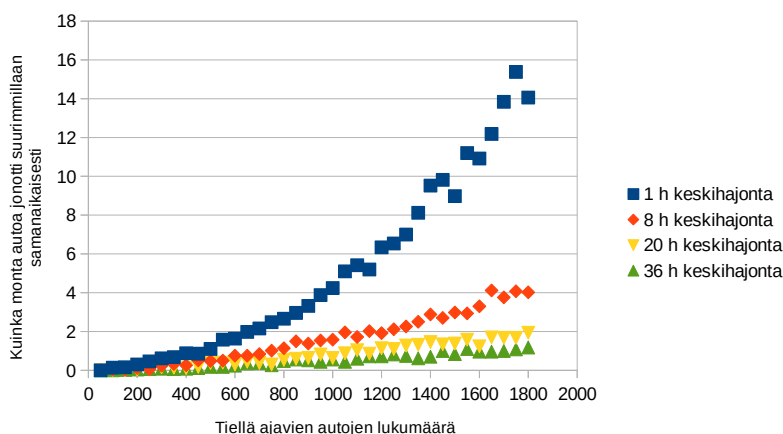


Kuva 10: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen lukumäärä lähtöaikojen keskihajonnan funktiona.



Kuva 11: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus autojen lähtöaikojen keskihajonnan funktiona.

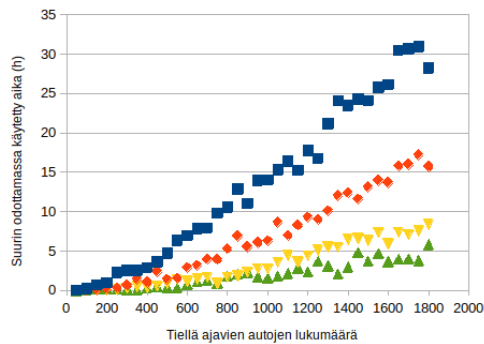
Tarkastellaan tilannetta, kun tiellä ajavien autojen lukumäärä oli 1000. Jos 95 % autoista lähti vajaan 4 tunnissa (lähtöajan keskihajonta 1 tunti), koko tiellä jonotti samanaikaisesti suurimmillaan noin 4 autoa. Jos autot lähtivät harvaan (lähtöajan keskihajonta 8 tuntia) samanaikaisesti jonotti suurimmillaan noin 2 autoa. Kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 36 tuntia (tasainen liikennekuormitus), tiellä samanaikaisesti jonotti suurimmillaan alle 1 auto.



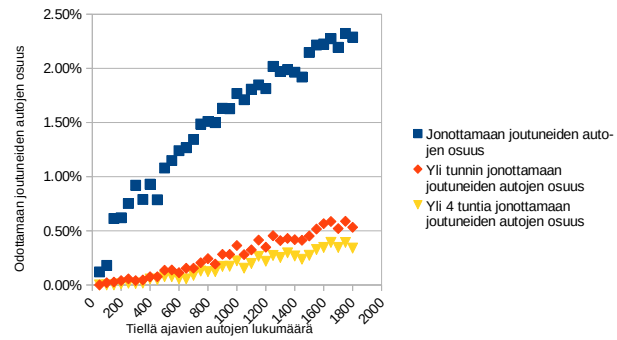
Kuva 12: Jonottavien autojen lukumäärän maksimi tielle lähtevien autojen lukumäärän funktiona.

3.2 Jonotusajat

Kun tiellä ajavien autojen lukumäärä oli 1000 ja 95 % autoista lähti alle 4 tunnissa (lähtöajan keskihajonta 1 tunti), suurin odotusaika oli noin 16 tuntia. Autojen lähtöajan hajonnan ollessa 8 tuntia suurin jonotusaika oli noin 10 tuntia ja lähtöajan hajonnan ollessa 36 tuntia (tasainen liikennekuormitus) suurin jonotusaika oli noin 3 tuntia.



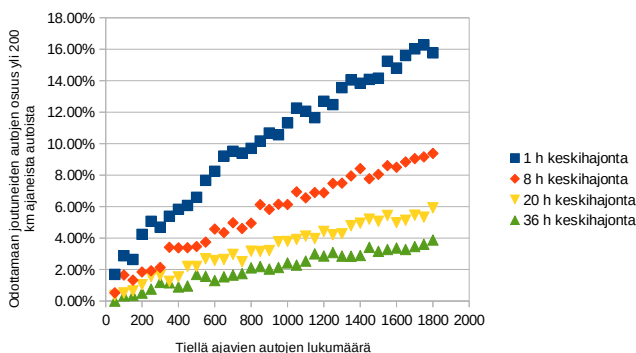
Kuva 13: Toistojen suurimpien latauspisteelle jonotusaikojen keskiarvo autojen lukumäärän funktiona.



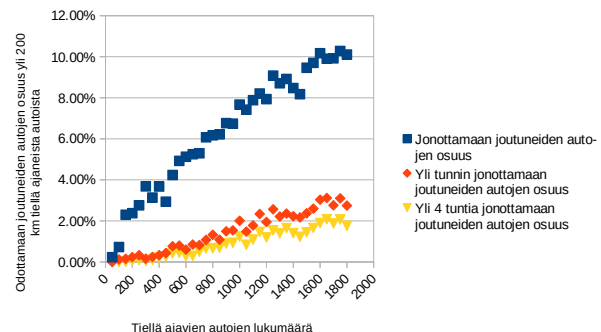
Kuva 14: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun lähtöaikojen keskihajonta oli 6 tuntia.

3.3 Pitkän matkan ajaneet autot

Kun autojen lukumäärä oli 1000 ja 95 % autoista lähti alle 4 tunnissa (lähtöajan keskihajonta 1 tunti) noin 11 % yli 200 km ajaneista autoista joutui odottamaan. Autojen lähtöajan keskihajonnan ollessa 8 tuntia noin 6 % yli 200 km ajaneista autoista joutui odottamaan ja kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 20 tuntia, noin 4 % yli 200 km ajaneista autoista joutui odottamaan. Kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 36 tuntia (tasainen liikennekuormitus) ja autojen lukumäärä oli 1000, noin 2 % yli 200 km ajaneista autoista joutui odottamaan. Kaikissa tapauksissa suurin osa odottamaan joutuineista autoista odotti alle tunnin.

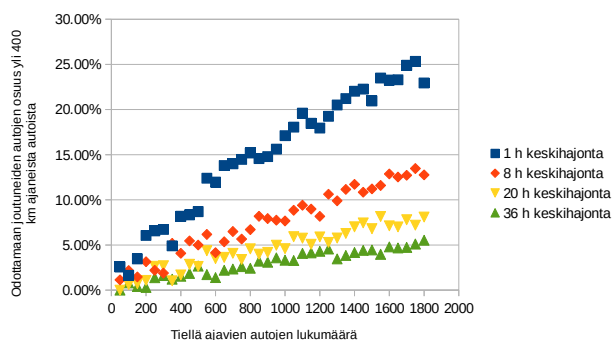


Kuva 15: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus yli 200 km ajaneista autoista tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona.

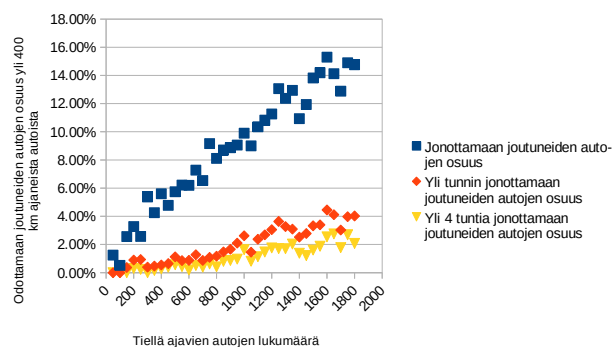


Kuva 16: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus yli 200 km ajaneista autoista tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöaikojen keskihajonta oli 6 tuntia.

Kun autojen lukumäärä oli 1000 ja 95 % autoista lähti alle 4 tunnissa (lähtöajan keskihajonta 1 tunti), noin 16 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan. Autojen lähtöajan keskihajonnan ollessa 8 tuntia noin 8 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan. Kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 36 tuntia (tasainen liikennekuormitus) ja autojen lukumäärä oli 1000, noin 3 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan.



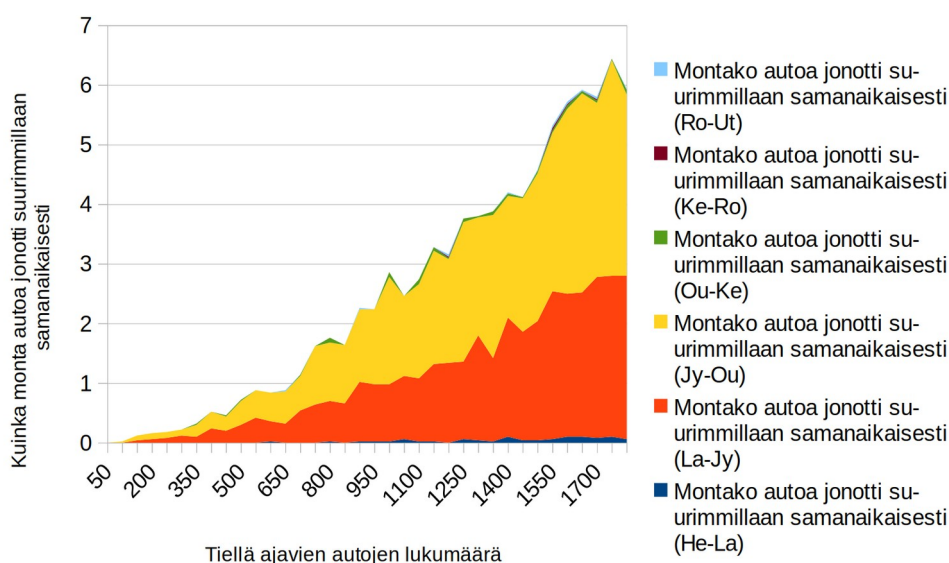
Kuva 17: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus yli 400 km ajaneista autoista tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona.



Kuva 18: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus yli 400 km ajaneista autoista tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun lähtöaikojen keskihajonta oli 6 tuntia.

3.4 Tien osien vertailua

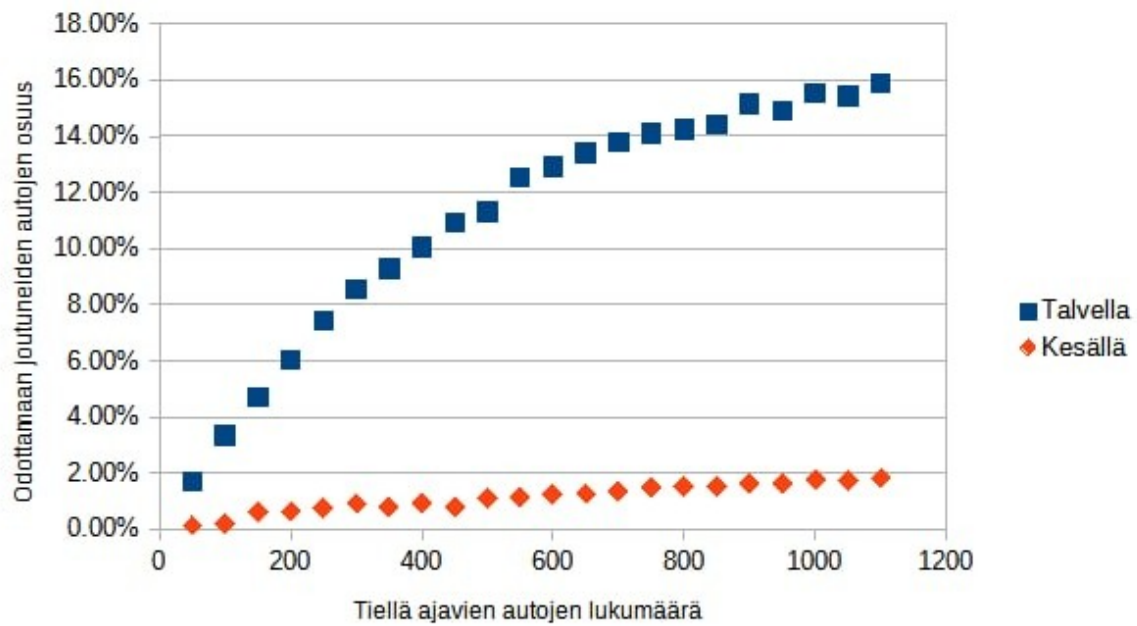
Toiset tien osat ruuhkautuivat nopeammin kuin toiset. Helsingistä Lahteen, Kemistä Rovaniemelle, Oulusta Kemiin ja Rovaniemeltä Utsjoelle menevät tiet eivät ruuhkautuneet juuri lainkaan. Kun tiellä ajavien autojen lukumäärän oli 1000 ja autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia, sekä Lahti-Jyväskylä välillä että Jyväskylä-Oulu välillä suurimmillaan samanaikaisesti odottavien autojen keskiarvo oli noin 1.



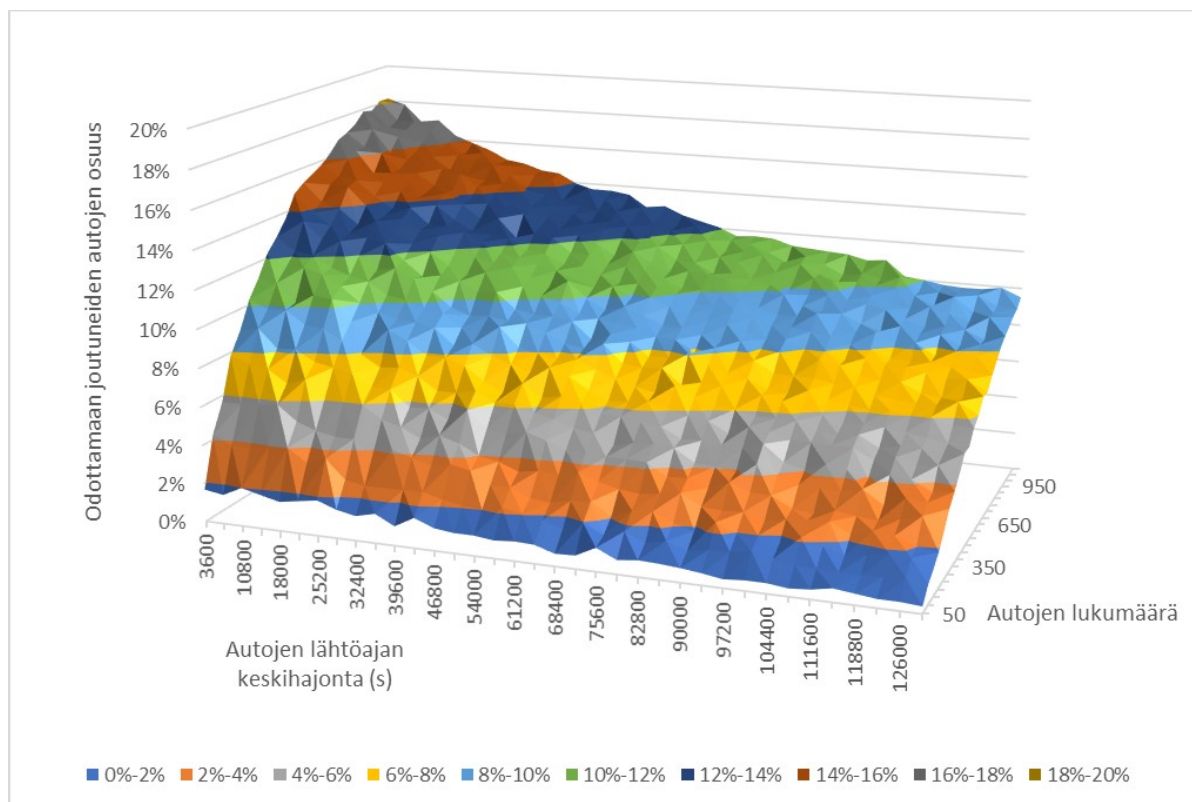
Kuva 19: Jonottavien autojen lukumäärän maksimi tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia.

3.5 Tilanne talvella

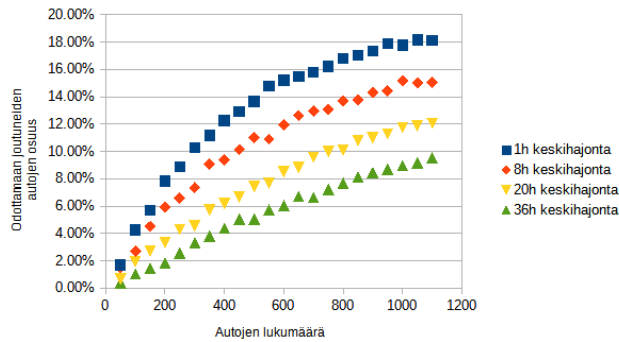
Koska talvella autojen sähkönkulutus on suurempi ja niiden latausteho on pienempi, latauspisteet tukkiutuvat talvella huomattavasti enemmän kuin kesällä. Kun autojen lukumäärä oli 1000 ja autojen lähtöaikojen keskihajonta oli 6 tuntia, latauspisteelle pääsyä joutui odottamaan kesällä noin 2 % autoista ja talvella noin 15 % autoista. Kesää vastaavat talvitulokset on esitetty kuvissa 21–28.



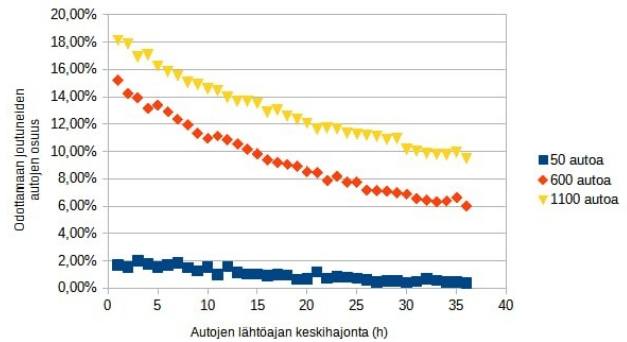
Kuva 20: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus kesällä ja talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia.



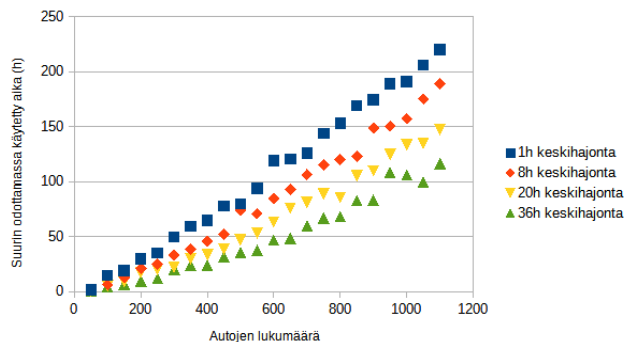
Kuva 21: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän ja autojen lähtemisen keskihajonnan funktiona.



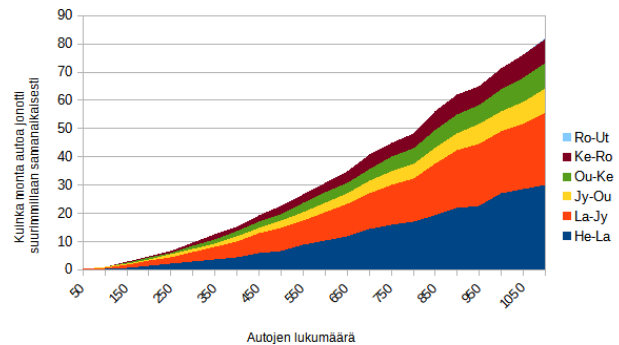
Kuva 22: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona.



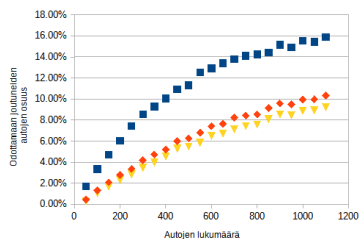
Kuva 23: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus talvella tiellä ajavien autojen lähtöajan keskihajonnan funktiona.



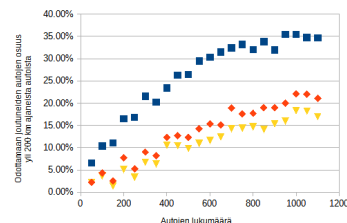
Kuva 24: Autojen suurin odottamiseen käytetty aika talvella autojen lukumäärään funktiona.



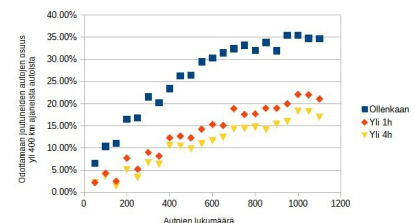
Kuva 25: Jonottavien autojen lukumäärän maksimi talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia.



Kuva 26: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia.



Kuva 27: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus yli 200 km ajaneista autoista talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia.

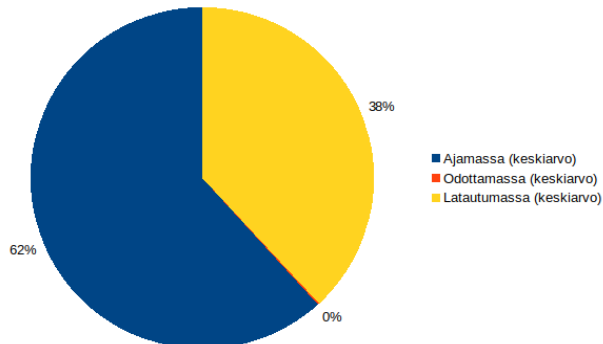


Kuva 28: Latauspisteelle pääsyä odottavien autojen osuus yli 400 km ajaneista autoista talvella tiellä ajavien autojen lukumäärän funktiona, kun autojen lähtöajan keskihajonta oli 6 tuntia.

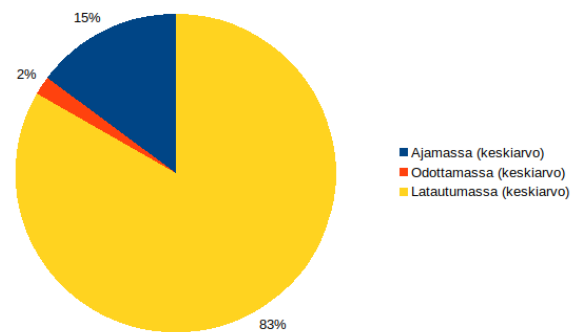
3.6 Nykytilanne ja tulevaisuus

Jos liikennevirrassa olevien sähköautojen osuus vastaa nykytilannetta, niitä on 100. Jos 95 % autoista lähti alle 4 tunnissa (lähtöajan keskihajonta 1 tunti), juuri kukaan ei joutunut odottamaan. Kesällä autot käyttävät keskimäärin 62 % ajastaan ajamiseen ja 38 % ajastaan auton lataamiseen ja talvella autot käyttävät keskimäärin 15 % ajastaan ajamiseen, 83 % ajastaan auton lataamiseen, ja 2

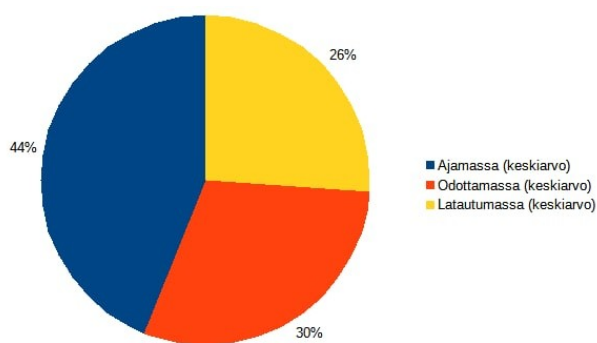
% ajastaan odottamiseen. Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän tavoitteena oli noin 70 kertaistaa sähköautojen osuus autokannasta. Jos simuloitujen sähköautojen lukumäärä on 7000 ja autojen lähtöajan keskihajonta on 1 tunti, autot käyttävät kesällä keskimäärin 30 % matkaan kuluvasta ajasta odottamiseen, 26 % lataamiseen ja 44 % ajamiseen. Talvella autot käyttävät keskimäärin 85 % ajasta odottamiseen, 12 % ajasta auton lataamiseen ja vain 2 % ajasta ajamiseen.



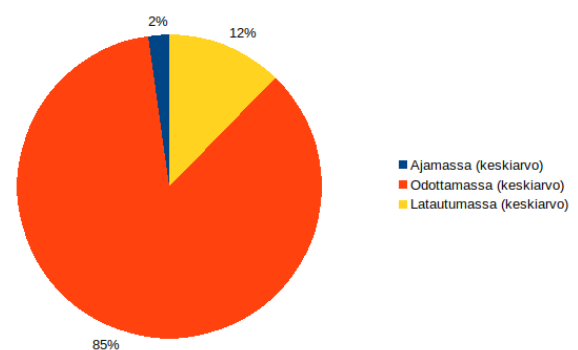
Kuva 29: Ajamiseen, odottamiseen ja auton lataamiseen kuluneen ajan osuus kesällä, kun autojen määrä on 100 ja autojen lähtöajan keskihajonta on 1 tunti.



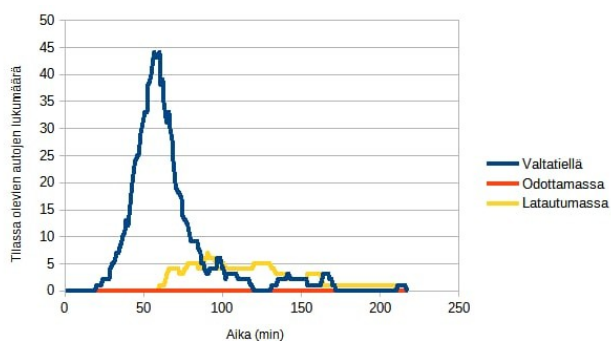
Kuva 30: Ajamiseen, odottamiseen ja auton lataamiseen kuluneen ajan osuus talvella, kun autojen määrä on 100 ja autojen lähtöajan keskihajonta on 1 tunti.



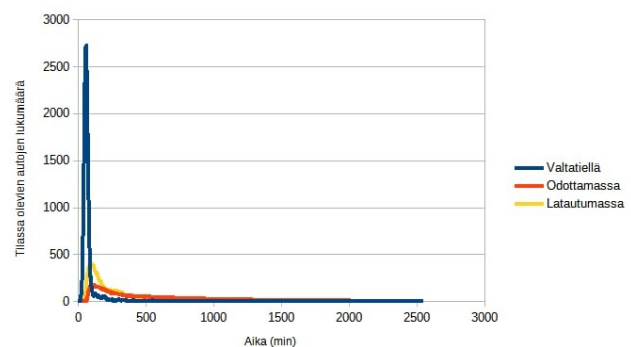
Kuva 31: Ajamiseen, odottamiseen ja auton lataamiseen kuluneen ajan osuus kesällä, kun autojen määrä on 7000 ja autojen lähtöajan keskihajonta on 1 tunti.



Kuva 32: Ajamiseen, odottamiseen ja auton lataamiseen kuluneen ajan osuus talvella, kun autojen määrä on 7000 ja autojen lähtöajan keskihajonta on 1 tunti.



Kuva 33: Tiellä olevien autojen tilat jokaisella ajanhetkellä, kun autojen lukumäärä oli 100 ja autojen lähtöajan hajonta oli 1 tunti.



Kuva 34: Tiellä olevien autojen tilat jokaisella ajanhetkellä, kun autojen lukumäärä oli 7000 ja autojen lähtöajan hajonta oli 1 tunti.

Kun autojen lukumäärä oli 100, autot joutuivat suurimmillaan odottamaan noin 11 minuuttia kesällä ja noin 11 tuntia talvella. Kun simuloitujen sähköautojen lukumäärä oli työryhmän tavoitteen mukainen 7000, autot joutuivat kesällä suurimmillaan odottamaan noin 7 vuorokautta ja talvella noin 72 vuorokautta, jos käytössä olisi sama latauskapasiteetti kuin tällä hetkellä.

Kun simuloitujen autojen lukumäärä oli 100 ja autojen lähtöajan keskihajonta oli 1 tunti, kesällä noin 0,4 % kaikista autoista ja noin 2,2 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan latauspisteelle pääsyä. Talvella noin 4,2 % kaikista autoista ja noin 10,6 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan latauspisteelle pääsyä. Kun autojen lukumäärä oli 7000, kesällä noin 4,9 % kaikista autoista ja noin 40,1 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan latauspisteelle pääsyä. Talvella noin 23,3 % kaikista autoista ja noin 47,5 % yli 400 km ajaneista autoista joutui odottamaan latauspisteelle pääsyä.

4 Johtopäätökset

Nykyisellä sähköautokannalla latausinfrastruktuuri näyttää juuri ja juuri riittävän autoilijoiden tarpeisiin kesällä. Kesällä vain hyvin pieni osa sähköautoista joutuu odottamaan vapaata latauspistettä, ja jos sähköauto joutuu odottamaan, jonotusaika on lyhyt. Simuloinnin mukaan talvella on jo ongelmia. Tiellä ajavien sähköautojen lukumäärän kasvaessa latausinfrastruktuuri loppuu nopeasti kesken. Mallimme mukaan sähköautokannan kaksinkertaistuessa jopa 15 % yli 200 km ajavista sähköautoista joutuvat talvella odottamaan pääsyä latauspisteelle. Suurimmat tukkeutumat syntyvät Lahden ja Jyväskylän välisellä tiellä.

On selvää, että sähköautojen yleistyessä latausinfrastruktuuriakin kasvatetaan. Jotta Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän asettama 600 000–700 000 sähköautotavoite voisi toteutua, nykyistä latausinfrastruktuuria on laajennettava.

Simulointi on aina yksinkertaistus todellisuudesta. Tutkimus on rajattu vain valtatielle 4. Yksittäisten ajomatkojen pituuksista ei ole ollut käytössä täsmällistä dataa vaan simuloinnissa on tehty tähän liittyviä oletuksia. Latauspisteiden valintaperusteista ei myöskään ole mitään täsmällistä dataa. Mallissa ei ole tarkasteltu liikennevirran nopeuden ja sään vaikutusta sähkönkulutukseen, latauksen hinnan vaikutusta latauspisteen valintaan, 4-tien ulkopuolisen liikenteen vaikutusta latauspisteiden käyttöön eikä sitä, kuinka usein latauspiste on toiminnassa. Jatkotutkimuksena voisi yrittää vähentää virhelähteitä ottamalla mallinnuksessa huomioon edellä mainittuja asioita. Mallista saatavia tuloksia voisi myös verrata tilastoihin latauspisteiden käytöstä ja arvioida mallin todenmukaisuutta niiden avulla. Jatkotutkimuksena mallinnettavaa tieverkostoa voisi myös laajentaa koko Suomen alueelle.

Liikenteestä peräisin olevien hiilidioksidipäästöjen minimoimisen kannalta sähköautot ovat tulevaisuudessa merkittävässä roolissa. Latausinfrastruktuuria on laajennettava suhteessa kasvavaan sähköautokantaan. Simuloinnissa saadut pisimmät odotusajat pitkillä automatkoilla rajoittavat merkittävästi autokannan sähköistymistä.

5 Kiitokset

Kiitämme ohjaajia ideointikeskusteluista ja kieliasun kommentoinnista.

6 Lähteet

- 1: Eckard Helmers & Patrick Marx, “Electric cars: technical characteristics and environmental impacts”, 2012, (Haettu 25.9.2021) <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-24-14>
- 2: Liikennefakta, “Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus”, 2021, (Haettu 31.1.2022) <https://liikennefakta.fi/fi/ymparisto/liikenteen-kasvihuonekaasupaastot-ja-energiankulutus>
- 3: Valtioneuvosto, “Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 2019”, 2019 (Haettu 3.10.2021) <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma>
- 4: Liikenne ja viestintäministeriö, “Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän loppuraportti”, 2020, (Haettu 2.10.2021) https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162508/LVM_2020_17.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- 5: Tao Wang & Tie-Qiao Tang & Hai-Jun Huang & Xiaobo Qu, “The adverse impact of electric vehicles on traffic congestion in the morning commute”, 2021, (Haettu 26.9.2021) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X2100098X>
- 6: U.S. Department of Energy, “National Plug-In Electric Vehicle Infrastructure Analysis”, 2017, (Haettu 26.9.2021) https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/09/f36/NationalPlugInElectricVehicleInfrastructureAnalysis_Sept2017.pdf
- 7: S. Bae and A. Kwasinski, "Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand", 2012, (Haettu 15.10.2021) <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5959242>
- 8: Ari Räisänen, “Sähköautojen latauspisteiden tarpeiden kartoitus Senaatti-kiinteistöissä”, 2020, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/338523/Raisanen_Ari.pdf?sequence=2
- 9: Traficom, “Ajoneuvotietokannan tilastot”, (Haettu 12.10.2021) <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>
- 10: Väylävirasto, “Liikennemääräkartat”, (Haettu 30.1.2022) <https://vayla.fi/vaylista/aineistot/kartat/liikennemaarakartat>
- 11: Sami Heikkinen, “Sähköauton talvikäyttö ja kylmyyden vaikutus ajosäteeseen”, 2018, (Haettu 30.1.2022) <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201805191845.pdf>
- 12: Insideevs, “Tesla Model S Plaid Fast Charging Results Amaze: Analysis”, (Haettu 30.1.2022) <https://insideevs.com/news/515641/tesla-models-plaid-charging-analysis/>
- 13: Insideevs, “Volkswagen ID.4 (82 kWh) In-Depth DC Fast Charging Analysis”, (Haettu 30.1.2022) <https://insideevs.com/news/492606/volkswagen-id4-82kwh-dc-fast-charging-analysis/>
- 14: Insideevs, “BMW iX3 DC Fast Charging Analysis: 150+ kW Peak, Decent Curve”, (Haettu 30.1.2022) <https://insideevs.com/news/501674/bmw-ix3-fast-charging-analysis/>
- 15: Latauskartta.fi, “Latauspisteet”, (Haettu 10.10.2021) <https://latauskartta.fi/>
- 16: Sähköautoilijat ry:n kotisivut, (Haettu 10.10.2021) <https://sahkoautoilijat.fi/>

17: Pod Point, “Electric Vehicle Guides”, (Haettu 1.2.2021) <https://pod-point.com/guides/vehicles>