



SYNTEETTISELLÄ DIESELILLÄ KULKEVAN DIESELAUTON JA SÄHKÖAUTON HIILIJALANJÄLJEN VERTAILU

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2023

Lauri Voutilainen

Tarkastaja(t): Professori Risto Soukka

Tutkijaopettaja Sanni Väisänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Ympäristötekniikka

Lauri Voutilainen

Synteettisellä dieselillä kulkevan dieselauton ja sähköauton hiilijalanjäljen vertailu

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2023

35 sivua, 03 kuvaa, 11 taulukkoa ja 00 liitettä

Tarkastaja(t): Professori Risto Soukka ja Tutkijaopettaja Sanni Väisänen

Avainsanat: synteettinen diesel, sähköauto, hiilijalanjälki, päästöt, vertailu

Tämän työn tarkoituksena on tutkia ja vertailla synteettisellä dieselillä kulkevien autojen sekä sähköautojen kasviuonekaasupäästöjä. Työssä pyritään vastaamaan siihen, kummalla vaihtoehdoista on pienempi hiilijalanjälki koko elinkaaren aikana. Työssä vertailtiin neljää polttomootoriautoa neljään sähköautoon. Vertailu jaettiin kolmeen auton elinkaaren vaiheeseen: valmistus, käyttövaihe ja elinkaaren loppuvaihe. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena tukeutuen aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin ja löydettyjen tietojen perusteella laskettiin eri vaihtoehtojen hiilijalanjäljet.

Työssä havaittiin sähköautojen valmistuksessa syntyvien päästöjen olevan lähes aina suurempia verrattuna polttomootoriautoihin. Käyttövaiheessa tulokset vaihtelivat hyvin paljon riippuen synteettisen dieselin hiilijalanjäljestä. Työssä käytettiin kolmea eri hiilijalanjälkeä synteettiselle dieselille ja näiden pohjalta tehtiin kolme skenaariota. Ensimmäisessä skenaariossa dieselautoilla oli moninkertainen hiilijalanjälki 300 000 km ajon jälkeen verrattuna sähköautoihin. Toisessa skenaariossa dieselautoilla oli vielä sähköautoja korkeampi hiilijalanjälki. Kolmannessa skenaariossa dieselautojen ja sähköautojen päästöt olivat keskimäärin yhtä suuria 300 000 km ajon jälkeen. Voidaankin todeta, että selkeästi parempaa vaihtoehtoa ei voida selvästi sanoa sähkö- ja dieselautojen välillä. Dieselautoilla on mahdollisuus olla vähäpäästöisempiä tai samalla tasolla sähköautojen kanssa sillä edellytyksellä, että synteettisen dieselin hiilijalanjälki saataisiin tarpeeksi pieneksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Environmental Technology

Lauri Voutilainen

Comparison of the carbon footprint of a diesel car running on synthetic diesel and an electric car

Bachelor's thesis

2023

35 pages, 03 figures, 11 tables and 00 appendices

Examiners: Professor Risto Soukka and Associate professor Sanni Väisänen

Keywords: synthetic diesel, electric car, carbon footprint, comparison

The purpose of this study is to compare the carbon footprint of cars running on synthetic diesel and electric cars. The study aims to answer which of the alternatives has a smaller carbon footprint during the entire life cycle. The study compared four combustion engine cars to four electric cars. The comparison was divided into three phases of a car's life cycle: manufacturing, use phase and end of life phase. The study was carried out as a literature review of previously conducted studies, and based on the information found, the carbon footprints of different alternatives were calculated.

In this study, it was found that the emissions generated in the manufacturing of electric cars are almost always higher compared to combustion engine cars. During the operating phase, the results varied greatly depending on the carbon footprint of the synthetic diesel. Three different carbon footprints for synthetic diesel were used in the work, and three scenarios were created based on these. In the first scenario, diesel cars had a multiple times larger carbon footprint after 300,000 km of driving compared to electric cars. In the second scenario, diesel cars still had a bigger carbon footprint in comparison to electric vehicles. In the third scenario, the emissions of diesel cars and electric cars were on average the same after 300,000 km of driving. It can be stated that a better option cannot be clearly stated between electric and diesel cars. Diesel cars have a possibility of having lower emissions or at least the same level as electric cars, provided that the carbon footprint of synthetic diesel is made small enough.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

K_h	Käyttövaiheen hiilijalanjälki	[tCO ₂ e/auto]
$H_{\text{valmistus}}$	Auton valmistuksen hiilijalanjälki	[tCO ₂ e/auto]
S_h	Sähkön hiilijalanjälki	[gCO ₂ e/kWh]
S_k	Sähkön kulutus	[kWh/km]
K	Kuljettu matka	[km]
P_k	Polttoaineen kulutus	[L/km]
P_t	Polttoaineen tiheys	[kg/L]
P_{a_h}	Polttoaineen hiilijalanjälki	[gCO ₂ e/kg]
P_{l_a}	Polttoaineen lämpöarvo	[MJ/kg]
$CO_{2_{pk}}$	CO ₂ oletuspäästökerroin	[gCO ₂ e/MJ]

Lyhenteet

NCM	Nikkeli-koboltti-mangaani (Nickel-cobalt-manganese)
NCA	Nikkeli-koboltti-alumiini (Nickel-cobalt-aluminum)
LFP	Litium-rauta-fosfaatti (Lithium-iron-phosphate)
SOEC	Kiinteäoksidielektolysaattorikenno (Solid oxide electrolyzer cell)
POX	Osittainen hapettuminen (Partial oxidation)
ATR	Autoterminen reformointi (Autothermal reforming)
CO ₂ e	Hiilidioksidiekvivalentti
t	Tuhat (1000)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1. Johdanto.....	6
2. Katsaus käytettyihin teknologioihin.....	8
2.1. Fisher-Tropsch synteesi	8
2.1.1. Hiilen lähteet.....	8
2.1.2. Vedyn lähteet	9
3. Auton valmistuksen hiilijalanjälki.....	11
3.1.1. sähköauto	12
3.2. Sähköauton akku	14
4. Käyttövaiheen hiilijalanjälki	16
4.1. Synteettinen diesel	16
4.2. Sähkö.....	17
4.3. Muut päästöt.....	18
5. Elinkaaren loppuvaiheen hiilidioksidipäästöt.....	19
6. Tulokset	20
6.1. Alkutiedot ja laskenta.....	20
6.2. Auton valmistuksessa syntyvä hiilijalanjälki	22
6.3. Auton hiilijalanjälki käyttövaiheessa.	24
7. Johtopäätökset	29
Lähteet	31

1. Johdanto

Autot ovat tärkeä osa nyky-yhteiskuntaa. Ilman autoja liikkuminen paikasta toiseen sekä raaka-aineiden ja tuotteiden kuljettaminen olisi hitaampaa ja monimutkaisempaa. Tämän takia autoja onkin maailmassa paljon. Suomessa oli vuoden 2021 lopussa rekisterissä noin 3,7 miljoonaa henkilöautoa, joista noin 2,8 oli liikennekäytössä. Jos huomioidaan kaikki ajoneuvot, oli niitä rekisterissä noin 7 miljoonaa ja liikennekäytössä 5,2 miljoonaa. (Tilastokeskus 2021) Melkein jokaista suomalaista kohden on siis yksi auto.

Jatkuvan käytön takia autoilusta syntyy paljon hiilidioksidipäästöjä. Vuonna 2021 Suomen autokannasta noin 97 % oli bensa- tai dieselmotorisia, jotka aiheuttavat ajettaessa jatkuvasti päästöjä. Autokantaa pyritään muuttamaan vähäpäästöisemmäksi sähköistämällä sitä, ja sähköautot ovatkin yleistyneet viime vuosien aikana. Suomessa sähköautokanta kasvoi 136 %:a vuosina 2020–2021 (Tilastokeskus, 2021). Kuitenkin sähköautojen osuus on vielä pieni polttomoottoriin verrattuna. Täyssähköautoja oli vuoden 2021 lopussa vain noin 22 000 eli noin 0,6 % kaikista rekisteröidyistä autoista (Tilastokeskus, 2021).

Ympäristöystävällisempään autoiluun ollaan jatkuvasti kehittämässä uusia vaihtoehtoja, joista yksi on tuottaa synteettistä dieseliä. Synteettisellä dieselillä pyritään vähentämään dieselautojen hiilidioksidipäästöjä valmistamalla diesel vähäpäästöisesti tai jopa hiilineutraalisti. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen hiilineutraalilla sähköllä tai synteettisillä polttoaineilla olisi toteutuessaan erittäin iso askel ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Ilmastonmuutos on yksi suurimmista kriiseistä, joka ihmiskuntaa kohtaa, jos sitä ei kyetä pysäyttämään. Autoilun osuus koko maailman hiilipäästöistä onkin noin 16 %, ja siksi olisi tärkeää tutkia erilaisia ratkaisuja tähän (Ourworldindata, 2022).

Tässä työssä keskitytään vertailemaan sähköauton ja synteettisellä polttoaineella kulkevan dieselauton aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. Työssä tutustutaan aikaisempien tutkimusten ja artikkelien pohjalta aiheeseen ja vertaillaan artikkeleiden tuloksia. Löydetyn tiedon perusteella suoritetaan tarvittaessa yksinkertaisia laskuja, jotta hiilijalanjälkeä voidaan verrata eri polttoaineen ja auton osalta. Vertailua tehdään ensin autojen valmistamisesta aiheutuvan hiilijalanjäljen osalta ja lopuksi vertaillaan sähkön ja synteettisen dieselin aiheuttamaa

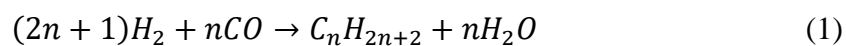
hiilijalanjälkeä. Lopuksi pyritään vastaamaan siihen, kummalla vaihtoehdoista on pienempi hiilijalanjälki, kuinka paljon eroa vaihtoehdoilla on sekä siihen mistä mahdollinen ero syntyy.

2. Katsaus käytettyihin teknologioihin

Tässä kappaleessa avataan työssä tutkittavia ja relevantteja teknologioita aiheeseen liittyen. Kappaleessa esitellään Fisher-Tropsch synteesi, sekä siihen liittyviä muita tekniikoita.

2.1. Fisher-Tropsch synteesi

Synteettisten polttoaineiden valmistamiseen on monia erilaisia metodeja. Yksi näistä on Fischer-Tropsch synteesi. Fischer-Tropsch synteesissä hiilimonoksidia reagoidaan vedyn kanssa, jolloin saadaan rakennettua eripituisia hiilivetyjä. Olosuhteet synteesissä pyritään tekemään sellaisiksi, jotta reaktiossa syntyy mahdollisimman paljon pitempiä hiilivetyjä lyhyempien sijaan. Hiilivedyt rakennetaan seuraavan kaavan perusteella:



2.1.1. Hiilen lähteet

Synteettisen dieselin valmistuksessa käytettävä hiili voidaan kerätä monista eri kohteista. Hiili voidaan kerätä esimerkiksi biokaasutuotannon yhteydessä. Biokaasulaitokset tuottavat biokaasua ja hiilidioksidia toiminnassaan. Tuotettu hiilidioksidi ja voidaan ottaa talteen prosessista käytettäväksi synteettisten polttoaineiden tuotantoon. Biokaasulaitosten tuottamasta kaasusta hiilidioksidia on noin 25–55 %, joten hiilidioksidia prosentuaalisesti paljon. (Hänggi et al., 2019)

Hiilidioksidi voidaan kerätä myös suoraan ilmakehästä. Hiilidioksidia on ilmakehässä noin 400 ppm eli noin 0,04 %. Hiilidioksidin kerääminen ilmakehästä vie paljon energiaa johtuen suuresta ilmamäärästä, jota pitää käsitellä saadakseen hiilidioksidia. Hiilidioksidin keräys vaatisi noin 400 kJ/mol CO₂ lämpöenergiaa ja 80 kJ/mol CO₂ sähköenergiaa. Ilmakehästä keräämiseen verrattuna paljon tehokkaampi keino

hiilidioksidin keräämiseen on teollisuuden savukaasuvirtojen käyttö. Hiilidioksidin kerääminen savukaasuista on paljon energiatehokkaampaa johtuen hiilidioksidin suuremmasta osuudesta kaasuissa. Savukaasuista kerättäessä lämpöenergian tarpeeksi on arvioitu 160-250 kJ/mol CO₂ ja sähköenergian tarpeeksi 2-20 kJ/mol CO₂. Savukaasuista hiilidioksidia kerätessä kuluu täten noin 56–66 % vähemmän energiaa verrattuna ilmakehästä kerätessä. (Hänggi et al., 2019).

2.1.2. Vedyn lähteet

Synteettisten polttoaineiden valmistamiseen tarvittava vety voidaan valmistaa monilla eri metodeilla. Käytetyimpiä metodeja ovat hiilivetyjen reformointi ja elektrolyysi. Hiilivetyjen reformoinnissa käytetään pääasiassa kolmea eri tekniikkaa: Höyryreformointi, osittainen hapettaminen eli POX (partial oxidation) ja autoterminen reformointi eli ATR (autothermal reforming).

Höyryreformoinnissa hiilivedyt reagoivat veden kanssa muodostaen hiilimonoksidia ja vetyä. Höyryreformointi on hyvä keino vedyn tuottoon sen suuren vety/hiilimonoksidin suhteen takia joka on noin 3:1. Prosessi ei tarvitse myöskään happea reaktiossa ja prosessilämpötilat ovat matalia. Suurin haittapuoli höyryreformoinnissa on sen tuottamat päästöt, jotka ovat edellämaituista prosesseista korkeimmat. (Holladay et al. 2008, 246)

Osittaisessa hapettumisessa eli POX prosessissa hiilivedyistä muodostetaan vetyä hapettamalla niitä. Käytännössä hiilivetyjä poltetaan hapen kanssa, jolloin reaktiossa muodostuu hiilimonoksidia ja vetyä. Prosessin vety/hiilimonoksidin tuottosuhde on höyryreformointia pienempi ja on noin 1-2:1. Tämä prosessi onkin suhdeluvun perusteella hyvä vaihtoehto käytettäväksi synteettisten polttoaineiden valmistamisessa Fisher-Tropsch menetelmällä. Autoterminen reformointi eli ATR prosessi on hyvin samanlainen kuin POX prosessi, sillä se sisältyy ATR prosessiin. Suurin ero prosessien välillä on ATR prosessissa käytettävä pienempi paine. Sekä POX ja ATR prosesseissa tulee käyttää hapenerotinta, jotta reaktoriin saadaan syötettyä puhdasta happea. Tällä pyritään välttämään tuotetun kaasun kontaminoituminen tyrellä. (Holladay et al. 2008, 246)

Tarvittava vety voidaan tuottaa myös elektrolyysillä. Elektrolyysissä vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkön avulla. Käytetyimpiä elektrolyysi tekniikoita on alkaali-elektrolyysi, protoninvaihtoelektrolyysi ja SOEC eli kiinteäoksidi elektrolyysi.

Alkaalielektrolyysilaitteisto koostuu elektrodeista joita erottaa huokoinen materiaali. Elektrolyytinä toimii vesipitoinen kaliumhydroksidi tai natriumhydroksidiliuos. Katodimateriaalina käytetään yleensä nikkeliä jossa on katalyyttinen pinnoite. Anodina käytetään puolestaan nikkeli- tai kuparimetallia jotka on pinnoitettu esimerkiksi mangaani- volframi- tai rutheniumoksidilla. Alkaalielektrolyysillä saavutetaan noin 50–60 % hyötysuhde. Elektrolyysissä vesi reagoi anodilla ja katodilla muodostaen vetyä ja happea. Vesi reagoi ensin katodilla muodostaen vetyä ja OH⁻ ioneja. OH⁻ ionit reagoivat tämän jälkeen anodilla muodostaen happea ja vettä. (Holladay et al. 2008, 255) Reaktiot tapahtuvat seuraavilla tavoilla:

Anodi:



Katodi:



Kokonaisreaktio:



Protoninvaihtoelektrolyysissä elektrodeja erottaa Nafion kalvo joka toimii myös kaasujen-erottimena. Protoninvaihtoelektrolyysissä vesi tuodaan aluksi anodille, jossa se hajoaa vapauttaen happea ja protoneita. Protonit kulkevat Nafion kalvon lävitse katodille, jossa ne reagoivat katalyytin avulla muodostaen vetyä. Protoninvaihtoelektrolyysillä voidaan saavuttaa alkaalielektrolyysiä parempi hyötysuhde, joka on noin 55–70 %. (Holladay et al. 2008, 255) Protoninvaihtoelektrolyysin reaktiot anodilla ja katodilla tapahtuvat näin:

Anodi:



Katodi



Kiinteäoksidi elektrolyysi toimii samalla periaatteella kuin polttokenno, mutta päinvastaiseen suuntaan. SOEC:ssa osa veden hajottamiseen tarvittavasta sähköenergiasta korvataan lämpöenergialla. Korvaamalla osa energiasta lämmöllä saadaan pienennettyä häviöitä elektrolyysissä kasvattaen siten hyötysuhdetta. SOEC:n muita etuja on kiinteän elektrolyytin käyttö ja sen materiaalin tuomat edut. Elektrolyytti ei ole syövyttävää verrattuna alkalielektrolyysissä käytettyyn kalium- tai natriumhydroksidiin. SOEC:lla päästään jopa 85–90 % hyötysuhteisiin sähkön osalta, mutta kun tarvittava lämpö huomioidaan putoaa hyötysuhde 60 % luokkaan. (Holladay et al. 2008, 255–256)

3. Auton valmistuksen hiilijalanjälki

Uusien autojen valmistus aiheuttaa suuria hiilidioksidipäästöjä. Valmistamisen hiilijalanjälki alkaa raaka-aineiden hankkimisesta. Raaka-aineita voidaan joutua louhimaan maaperästä ja jalostamaan tarvittavaksi materiaaliksi, aiheuttaen hiilidioksidipäästöjä. Kaikkea ei kuitenkaan tarvitse louhia, sillä esimerkiksi alumiinia ja rautaa, joita käytetään auton valmistuksessa, saadaan helposti kierrätysmateriaalina. Alumiinia käytetään erittäin paljon ja sitä on helppo kierrättää sen ominaisuuksien takia. Raaka-aineiden hankinnan jälkeen ne täytyy kuljettaa tehtaaseen, jossa autot valmistetaan. Kuljetusprosessista voi aiheutua valmistuspaikan mukaan vaihtelevia päästöjä. Mitä kauempaa raaka-aineita joudutaan kuljetta-
maan sitä suuremmat päästöt kuljetuksesta syntyvät.

Autojen valmistuksen päästöt vaihtelevat pääasiassa käytettyjen materiaalien määrän sekä valmistuksessa käytetyn tekniikan mukaan. Suurimmassa osassa tapauksista mitä painavampi ja kookkaampi auto on, sitä enemmän valmistuksessa tarvitaan raaka-aineita ja sitä enemmän hiilidioksidia valmistuksessa syntyy. Otetaan esimerkiksi D-segmenttiin kuuluva Audin A4 ja F-segmenttiin kuuluva A8 mallin polttomoottoriauto. Audin A4 mallin polttomoottoriauton valmistuksessa syntyy noin 6,8 t CO₂e päästöjä, kun taas Audin A8 mallin tapauksessa valmistuksessa syntyy noin 12,5 t CO₂e päästöjä (Audi, The new Audi A4 Life cycle assesment, 2015; Audi, The new Audi A8 the life cycle assesment, 2018). Samanlaisiin

arvoihin päästään myös muiden autonvalmistajien osalta. Volkswagen ilmoitti vuonna 2019 julkaistussa dokumentissa ”Climate protection and decarbonisation”, että vuonna 2015 keskiarvo valmistettujen autojen tuottamille päästöille on noin 6,5 tCO₂e. Tässä on mukana kaikki Volkswagenin valmistamat mallit, joten mukana on bensiini- ja dieselautoja sekä mahdollisesti joitain sähköautoja.

Alla olevaan taulukkoon on kerättyä kaikkien tutkimuksessa käytettyjen polttomoottoriautojen valmistamisesta syntyneet päästöt sekä lueteltu mistä tiedot on löydetty

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytettyjen polttomoottoriautojen valmistuksen hiilijalanjäljet.

Auto	Valmistuksessa syntyneet hiilidioksidipäästöt (tCO₂e/auto)	Lähde
Audi A4	6,8	Audi, The new Audi A4 Life Cycle Assessment, 2015
Audi A8	12,5	Audi, The new Audi A8 Life Cycle Assessment, 2018
Volkswagen Golf	6,5	Volkswagen, Climate protection and decarbonisation
Ford Focus	20,73	Balpreet Kukreja, Life Cycle Analysis of Electric Vehicles, 2018

3.1.1. sähköauto

Sähköauton ja dieselauton suurimpia eroja rakenteellisesti on polttomoottorin ja polttoainesäiliön puuttuminen sähköautosta. Sähköautossa nämä on korvattu sähkömoottorilla ja akustolla, joka antaa voimaa moottoreille. Sähköautossa voi olla monta sähkömoottoria. Esimerkiksi Tesla model S sähköautossa on kaksi sähkömoottoria, joista toinen tuottaa voimaa etupyörille ja toinen takapyörille. Kahden moottorin käyttö mahdollistaa etu- ja takapyöräs-
 tön ohjauksen toisista erillään lisäten pitoa tiellä. (Tesla) Auton rakenne myös yksinkertaistuu, kun voimansiirto tapahtuu vain kahden renkaan välillä verrattessa yksimoottoriseen

rakenteeseen. Sähköauto on myös energiankäytöltään tehokkaampi polttomoottoriautoon verrattuna. Sähköautoihin ladattavasta verkkovirrasta noin 77 % muuntuu voimaksi pyöriin, kun taas polttomoottoriautoissa tämä hyötysuhde on noin 12–30 % (U.S Department of Energy).

Teslan julkaisemassa dokumentissa ”Impact Report 2021” on laskettuna Tesla model 3 sähköauton aiheuttamat keskimääräiset elinkaari päästöt. Dokumentissa on ilmoitettu päästöt Yhdysvaltain, Euroopan ja Kiinan alueelle. Päästötiedot on jaettu maantieteellisen alueen lisäksi käyttötavan mukaan pienempiin osiin. Päästöt on ilmoitettu aurinkovoimalla ladatessa ja yksityiskäytössä, aurinkovoimalla ladatessa ja kimppakyydillä kulkiessa, verkkovirralla ladattaessa ja yksityiskäytössä sekä verkkovirralla ladatessa ja kimppakyydillä kulkiessa.

Taulukko 2. Tesla Model 3 aiheuttama hiilijalanjälki (Tesla, Impact report 2021).

Toimituspainotettu Euroopan keskiarvo

Model 3 kimppakyyti (Aurinkovoimalla ladattu)	31	0	31
Model 3 yksityiskäyttö (aurinkovoimalla ladattu)	100	0	100
Model 3 kimppakyyti (verkkovirralla ladattu)	12	48	60
Model 3 yksityiskäyttö (verkkovirralla ladattu)	81	48	130
Keskiarvo keskikokoinen polttomoottorillinen luksusauto	63	417	480

Käytetään tässä tutkimuksessa arvoa, joka on annettu yksityiskäytössä ja verkkovirralla ladattaessa EU alueella. Tällöin Tesla model 3:n keskimääräiset elinkaari päästöt ovat 130 gCO_{2e}/mi eli noin 81gCO_{2e}/km. Tässä arvossa on huomioitu myös auton käyttövaiheessa syntyneet päästöt. Käytetään sen sijasta taulukosta samasta kohdasta löytyvää arvoa 81 gCO_{2e}/mi (50,3 gCO_{2e}/km), koska tässä arvossa on ainoastaan auton valmistuksesta aiheutuvat päästöt sekä kuljetus Eurooppaan huomioituna. Tutkimuksessa huomioidaan käyttövaiheessa kulutetun polttoaineen vaikutukset ja ne löytyvät kappaleesta 6. Lasketaan

taulukosta saadun arvon avulla monta tonnia hiilidioksidiekvivalenttia Tesla model 3 valmistuksessa syntyy. Teslan mukaan laskettaessa keskimääräistä elinkaaripäästöä on oletettu, että autolla ajetaan 150 000 mailia eli noin 241 000 kilometriä. Hiilidioksidipäästö saadaan laskettua kertomalla kuljettu mailimäärä päästökertoimella. Tesla model 3 valmistuksen hiilidioksidiekvivalenttipäästöiksi saadaan täten noin 12,15 tCO_{2e}.

Alla olevaan taulukkoon on koottuna tässä työssä käytettyjen sähköautojen valmistuksesta johtuvat päästöt sekä lähteet, josta tiedot on löydetty.

Taulukko 3. Sähköautojen valmistuksessa syntyvä hiilijalanjälki.

Auto	Valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt (tCO_{2ekv})	Lähde
Tesla Model 3	12,15	Tesla, Impact Report 2021
Tesla Model S	14,02	Kimmo Klemola, Life-Cycle impacts of Tesla Model S 85 and Volkswagen Passat, 2016
Nissan LEAF	9,67	Pete Poovanna et al, Environmental Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Canada
Volkswagen id.3	13,7	Volkswagen, Carbon footprint of the Electric Vehicle, 2021

3.2. Sähköauton akku

Akusto on sähköauton painavin ja eniten päästöjä aiheuttava osa auton valmistuksessa. Noin 35–41 % sähköauton hiilijalanjäljestä syntyy akun valmistuksessa (Hawkins et al, 2013). Suuri osuus koko auton hiilijalanjäljestä johtuu monista energiaintensiivisistä prosesseista, joita akkujen valmistuksessa käytetään. Akkujen valmistus on samanaikaisesti keskittynyt

maihin, joissa sähköä tuotetaan paljon fossiilisilla polttoaineilla. Suurimpia sähköauton akkujen valmistajia olivat vuonna 2022: CATL, LG energy Solutions, BYD ja Panasonic, joiden yhteenlaskettu markkinaosuus sähköautojen akkutuotannosta on 70 % (visualcapitalist, 2020). Kyseiset yritykset toimivat Kiinassa, Koreassa ja Japanissa, joissa sähköntuotannon hiilijalanjälki on suuri, nostaten akkujen hiilijalanjälkeä.

Käytetyin akkutyypin sähköautoissa on litiumioniakku. Litiumakku on suosittu akkutyypin, koska sen energiamäärä per massayksikkö on korkea, akun hyötysuhde on korkea ja se toimii myös korkeissa lämpötiloissa sekä purkautuu itsestään hitaasti. (US Department of Energy) Litiumakkuja on monia erilaisia, mutta sähköautoissa käytetyimpiä ovat NCM (nickel-cobalt-manganese), NCA (nickel-cobalt-aluminum) ja LFP (lithium iron phosphate). NCM akuissa käytetään katodissa nikkeliä, kobolttia ja mangaania, kun taas NCA akuissa mangaanin sijaan käytetään alumiinia. NCM ja NCA akuilla saadaan korkea energiatiheys ja tätä akkutyypin onkin käytetty esimerkiksi Teslan pitkän matkan malleissa. LFP akku on puolestaan energiatihedeltään hieman matalampi, mutta siinä ei ole kobolttia tai nikkeliä. Eri valmistusmateriaalien takia LFP akku onkin halvempi vaihtoehto NCM ja NCA akkuihin verrattuna. Tesla vaihtoikin vuonna 2021 LFP akkuihin muun muassa hinnan ja eettisyyden takia. (ArenaEV,2022; Tagray;Recurrent,2022) Tässä työssä oletetaan akkujen valmistuksessa syntyvien päästöjen sisältyvän autojen valmistuksessa syntyviin päästöihin (taulukko 3).

4. Käyttövaiheen hiilijalanjälki

Auton käyttövaiheesta syntyvät hiilidioksidipäästöt vaihtelevat paljon käytetyn energianlähteen mukaan sekä sen valmistusmenetelmän mukaan. Tässä kappaleessa avataan käyttövaiheessa syntyvää hiilijalanjälkeä käytetyn kulkuvoiman osalta sekä muiden yksittäisten päästöjen osalta.

4.1. Synteettinen diesel

Synteettinen diesel on dieseliä, jota valmistetaan erilaisista hiiltä sisältävistä raaka-aineista ja vedystä. Sitä valmistetaan esimerkiksi maakaasusta, hiilestä ja biomassasta. Hiili voidaan kerätä myös ilmakehästä hiilidioksin muodossa. Hiilen lisäksi synteettisen dieselin valmistuksessa tarvitaan vetyä, joka saadaan elektrolyysillä vedestä.

Synteettisten dieselin hiilijalanjäljet ovat löydetyn tiedon perusteella hyvin vaihtelevia. Hiilijalanjälki oli löydetyn tiedon perusteella pienimmillään noin $9\text{gCO}_2\text{e/MJ}$ ja suurimmillaan noin $165\text{gCO}_2\text{e/MJ}$. Erittäin suuri vaihtelu johtuu eri skenaarioista, joissa synteettistä polttoainetta valmistetaan sekä mahdollisista eroista laskennassa. Synteettisten polttoaineiden hiilijalanjälki on vahvasti riippuvainen valmistusmetodista sekä valmistuksessa käytetyn sähkön hiilijalanjäljestä (Shrestha.P 2020, 51–52,55: Neste, Reduced emissions).

Johtuen synteettisen dieselin hiilijalanjäljelle julkaistujen lukujen suuresta vaihtelusta on hyvin hankala määritellä synteettiselle dieselille jotain tiettyä hiilijalanjälkeä. Työssä verrataan tämän johdosta kolmea eri hiilijalanjälkeä, joista löydettiin dokumentointia ja tutkitaan kuinka näiden väliset erot vaikuttavat dieselauton hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa käytetään Nesteen verkkosivuilta löytyvää artikkelia ”Reduced emissions” josta löydetään Nesteen MY Renewable Dieselin hiilijalanjäljen. Nesteen mukaan MY Renewable Dieselin hiilijalanjälki on $9\text{gCO}_2\text{e/MJ}$, joka on 90 % vähemmän verrattuna Nesteen fossiilisista valmistettuun dieseliin. Toinen lähde on Pallav Shresthan (2022,51–52) tekemä maisterintyötä ”Carbon footprint comparison between traditional diesel and synthetic diesel production

pathways”, josta saadaan synteettisen dieselin hiilijalanjälkeksi 80–165 gCO₂e/MJ. Kolmantena lähteenä käytetään Bergerson et al. tekemää tutkimusta ”A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fisher-Tropsch fuel production”, josta saamme synteettisen dieselin hiilijalanjälkeksi 29 gCO₂e/MJ.

4.2. Sähkö

Sähköauton käytön aikaiset hiilidioksidipäästöt voivat olla hyvinkin pienet. Käyttövaiheessa päästöt syntyvät pääosin auton käyttämästä energiasta. Päästöt sähköauton käytön osalta riippuvatkin siitä, miten auton käyttämä sähkö on tuotettu.

Kun sähkö tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä, on sen hiilijalanjälki lähellä nollaa. Suomen tuulivoimayhdistyksen mukaan tuulivoimasta syntyy hiilidioksidipäästöjä noin 10 g/kWh. Aurinkovoimalla tuotetun sähkön hiilijalanjälkeksi on arvioitu noin 40 g/kWh (NREL, 2012). Uusiutuvien energialähteiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt syntyvät pääasiassa rakennusvaiheessa ja energiantuottovaihe on päästötön. Sähköauton käyttövaiheen hiilijalanjälki voi periaatteessa täten olla lähellä nollaa sähkön alkuperän mukaan.

Verkkovirrasta ladattaessa sähkön hiilijalanjälki vaihtelee. Sähkön päästökertoimet vaihtelevat jokaisen sähköntuottajan välillä ja erot voivat olla suuretkin. Sähköntuottajien päästökertoimet muuttuvat eri sähkönvalmistusmenetelmien käytön johdosta. Esimerkiksi Vattenfallin vuonna 2021 myymä sähköstä 33,67 % oli tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä, 45,16 % ydinvoimalla ja 21,17 % fossiilisilla sekä turpeella. Samalla sähkön keskimääräiset hiilidioksidipäästöt olivat noin 119,90 g/kWh, yhtiön julkaisemien tietojen perusteella. (Vattenfall, 2021) Savon Voimalla vastaava päästökerroin oli yhtiön mukaan vuonna 2021 199,5 g/kWh. Savon Voiman sähköstä 63 % tuotettiin CHP:lla, 21% vesivoimalla, 15 % ydinvoimalla ja 3 % tuulivoimalla. (Savon Voima ympäristöraportti, 2021) Kokonaisuudessaan Suomessa kulutetun sähkön hiilijalanjälki oli vuonna 2021 noin 91 gCO₂e/kWh ja vuonna 2022 noin 60 gCO₂e/kWh (Fingrid, 2023). Tässä työssä käytetään sähkön hiilijalanjälkenä Fingridin ilmoittamaa 60 gCO₂e/kWh.

4.3. Muut päästöt

Auton käyttövaiheen aikana tulee todennäköisesti erilaisia muita päästölähteitä pelkän polttoaineen lisäksi. Autoa joudutaan huoltamaan käyttöaikana jollain tavalla ja näistä huolloista syntyy päästöjä. Toimia jota auton omistaja joutuu tekemään auton käyttöaikana voi olla esimerkiksi moottoriöljyn vaihto, renkaiden vaihto, jarrupalojen vaihto, jäähdytysnesteen lisääminen tai valojen vaihto. Jokaisella huoltotoimenpiteellä on oma hiilijalanjälki joka koostuu vähintään uuden osan valmistuksen päästöistä ja kuljetuksesta. Kun näitä huoltotoimenpiteitä suoritetaan elinkaaren aikana monia kertoja, voi auton hiilijalanjälki kasvaa tuhansilla hiiliekvivalenttikiloilla.

Sähköautossa jää osa polttomoottoriautojen tyypillisistä huoltotoimenpiteistä pois, kuten esimerkiksi moottoriöljyn tai suodattimien vaihto. Niiden tilalle tulee kuitenkin sähköauton omia huoltotoimenpiteitä. Huoltotoimista yksi suurimmista on auton akuston vaihto. Akuston voi joutua vaihtamaan sähköauton vanhetessa, johtuen akun huonontuneesta kyvystä pitää latausta. Akun vaihto lisää auton hiilijalanjälkeä paljon, johtuen akkujen valmistamisessa syntyvistä päästöistä. Akun päästöt vastasivat 35–40 % sähköauton valmistuksen päästöistä, joten akun vaihto todennäköisesti lisää päästöjä samassa suhteessa.

5. Elinkaaren loppuvaiheen hiilidioksidipäästöt

Auton elinkaaren loppuvaiheen hiilidioksidipäästöt koostuvat auton materiaalien kierrätyksestä sekä loppusijoituksesta. Suurin osa auton valmistukseen käytetyistä materiaaleista voidaan kierrättää ja käyttää uusiin tuotteisiin. Autoissa käytetyt metallit kuten teräs ja alumiini pystytään kierrättämään lähes kokonaan. Sähköautojen akusto on myös pääosin kierrätettävissä.

Elinkaarensa loppuvaiheeseen tulleiden autojen kierrättämien on tärkeää hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Kierrättämällä autot voidaan niiden sisältämät metallit, kuten alumiini ja teräs uusiokäyttää uusissa tuotteissa, vähentäen uuden metallin tarvetta. Metallien kierrättäminen synnyttää noin 58 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä, verrattuna siihen jos sama määrä valmistettaisiin neitseellisestä materiaalista (ISRI, Ferrous).

Tässä työssä käytetään elinkaaren loppuvaiheen hiilidioksidipäästöinä keskiarvoa joka laskettiin Kimmo Klemolan ”Life-Cycle impacts of Tesla Model S85 and Volkswagen Passat” dokumentin sivulta 19 löytyviä arvoja käyttämällä sekä Volkswagenin ”Carbon Footprint of Electric Vehicle” nettijulkaisusta löytyvää arvoa käyttämällä. Elinkaaren loppuvaiheen päästöiksi saatiin näin 0,18 tCO_{2e}.

Taulukko 4. Elinkaaren loppuvaiheen hiilidioksidipäästöt.

Auto	Päästöt	Keskiarvo	Lähde
Passat 2.0 TDI NExBTL	0,141	0,18 t CO _{2e}	Klemola Kimmo, Life-Cycle impacts of Tesla Model S85 and Volkswagen Passat, 2016, 19
Passat 2.0 TDI NExBTL (waste)	0,141		
Passat 1.4 TSI bensa	0,143		
Volkswagen ID.3	0,3		Volkswagen, Carbon footprint of Electric Vehicle.
Passat 1.4 TSI flexi-fuel	0,143		Klemola Kimmo, Life-Cycle impacts of Tesla Model S85 and Volkswagen Passat, 2016, 19
Tesla Model S 85	0,202		

6. Tulokset

6.1. Alkutiedot ja laskenta

Auton hiilijalanjäljen oletetaan tässä työssä koostuvan auton valmistuksessa syntyvistä päästöistä, käyttövaiheen päästöistä ja elinkaaren loppuvaiheen päästöistä. Autojen valmistuksessa syntyvät päästöt olivat työssä jo aikaisemmin taulukoituna (ks. Taulukko 1 ja taulukko 2) ja näitä arvoja käytettiin laskennassa.

Käyttövaiheen hiilijalanjäljen laskemiseen tarvitaan tietoja autoista. Sähköautoille tarvitaan tieto siitä, paljonko ne kuluttavat sähköä kilometriä kohden. Dieselautoille tarvitaan polttoaineen kulutuksen kilometriä kohden, polttoaineen tiheys ja polttoaineen lämpöarvo. Käytetään tilastokeskuksen ”polttoaineluokitus 2023” dokumentista löytyvää arvoa dieselin tiheydestä (0,803 t/m³) ja lämpöarvosta (42,9 GJ/t). Edellä mainitut arvot ovat työssä muunnettu eri sopiviin yksiköihin (0,803 Kg/l ja (42,9 MJ/kg). Autojen kulutukseen liittyvät arvot on koottuna alle taulukkoon.

Taulukko 5. Autojen kulutukseen liittyvät arvot.

Auto	Polttoaineen kulutus (L/100km)	Sähkön kulutus (Wh/km)	Lähde
Audi A4	4,8		Audi, The new Audi A4 Life Cycle Assessment
Audi A8	5,7		Audi, The new Audi A8 Life Cycle Assessment
Volkswagen Golf*	5,8		car-emissions.com
Ford Focus	6,1		car-emissions.com
Tesla Model 3		0,151	EV-Database.org
Tesla Model S		0,173	EV-Database.org
Nissan LEAF		0,166	EV-Database.org
Volkswagen id.3		,0166	EV-Database.org

* Keskiarvo kaikkien Golf mallien kulutuksesta

Sähköautojen osalta käyttövaiheessa hiilijalanjälki laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$K_h = H_{valmistus} + \left(\frac{S_h * S_k}{10^6} \right) * K \quad (7)$$

Jossa,

K_h =käyttövaiheen hiilijalanjälki (tCO₂e/auto)

$H_{valmistus}$ = auton valmistuksessa syntynyt hiilijalanjälki (tCO₂e/auto)

S_h = Sähkön hiilijalanjälki (gCO₂e/kWh)

S_k = Sähkön kulutus (kWh/km)

K = Kuljettu matka (km)

Dieselautojen käyttövaiheen hiilijalanjäljen laskemisessa käytettiin kahta eri kaavaa johtuen eri yksiköistä, joissa polttoaineen aiheuttamat päästöt oli ilmoitettu. Jos Dieselin hiilidioksidipäästöt on ilmoitettu yksikössä gCO₂e/MJ käytetään alla olevaa kaavaa:

$$K_h = H_{valmistus} + (P_k * P_t * CO_{2pk} * P_{la} * 1000) * K \quad (8)$$

Jossa,

K_h =käyttövaiheen hiilijalanjälki (tCO₂e/auto)

$H_{valmistus}$ = auton valmistuksessa syntynyt hiilijalanjälki (tCO₂e/auto)

P_k = polttoaineen kulutus (L/km)

P_t = polttoaineen tiheys (kg/L)

CO_{2pk} = CO₂ oletuspäästökerroin (kgCO₂e/MJ)

P_{la} = polttoaineen lämpöarvo

K = Kuljettu matka (km)

Puolestaan jos dieselin hiilidioksidipäästöt on ilmoitettu yksikössä gCO₂e/kg, käytetään alla olevaa kaavaa:

$$K_h = H_{valmistus} + (P_k * P_t * P_{a_h}) * K \quad (9)$$

Jossa,

K_h =käyttövaiheen hiilijalanjälki (tCO₂e/auto)

$H_{valmistus}$ = auton valmistuksessa syntynyt hiilijalanjälki (tCO₂e/auto)

P_k = polttoaineen kulutus (L/km)

P_t = polttoaineen tiheys (kg/L)

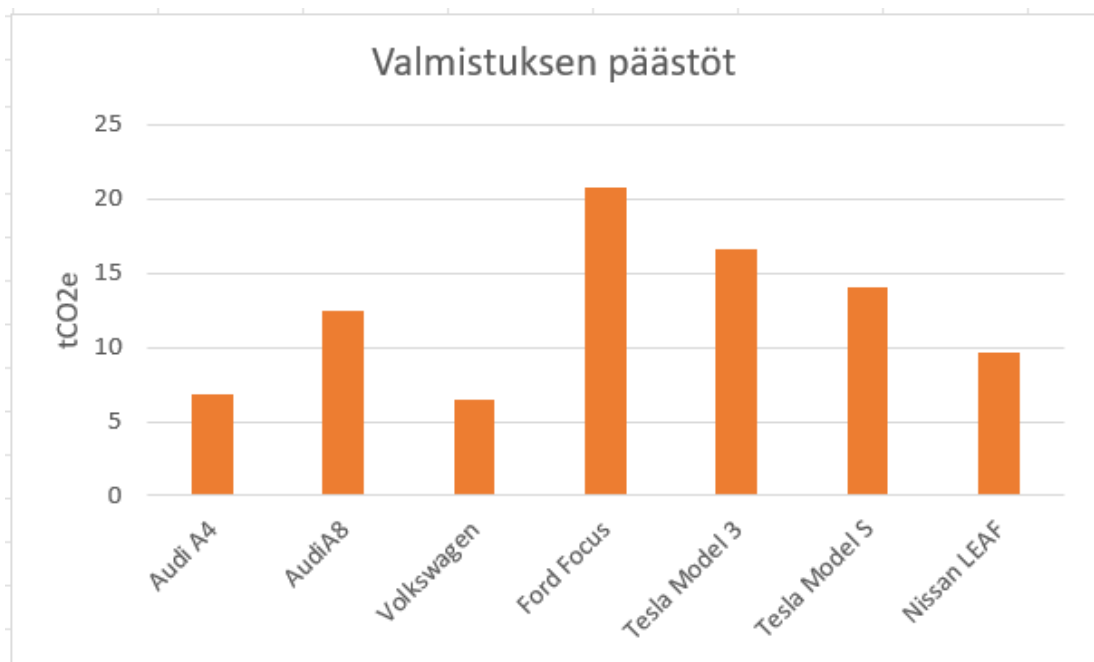
P_{a_h} = polttoaineen hiilijalanjälki (gCO₂e/kg)

K = Kuljettu matka (km)

6.2. Auton valmistuksessa syntyvä hiilijalanjälki

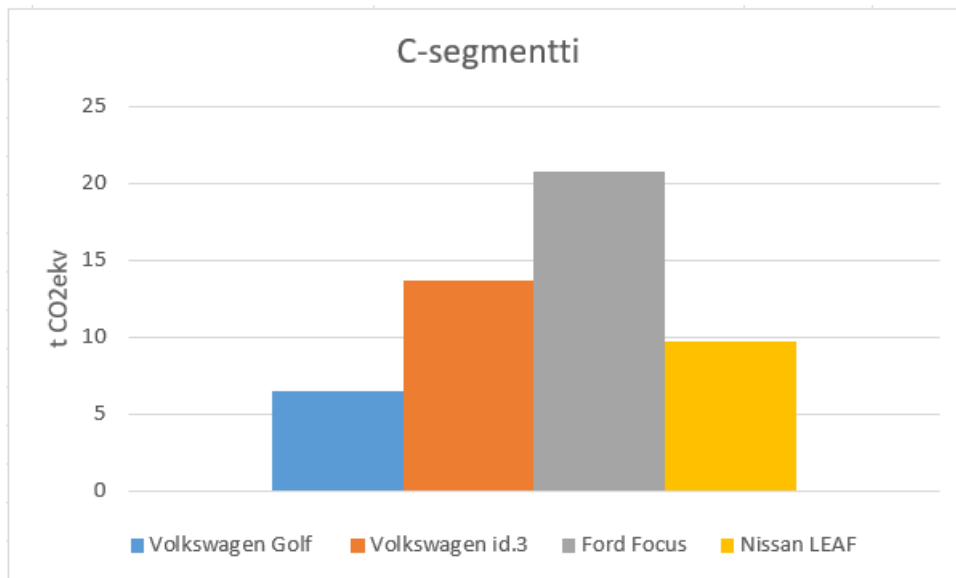
Autojen valmistuksessa syntyvä hiilijalanjälki oli hyvin samanlainen kuin aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa, joissa vertailtiin sähköauton ja polttomoottoriauton hiilijalanjälkeä. Polttomoottoriautojen hiilijalanjälki oli lähes kaikissa tapauksissa pienempi kuin saman segmentin sähköautossa. Ainoa poikkeuksen tekevä auto oli Ford Focus, jonka päästöt olivat lähdeaineiston mukaan hyvin paljon suurempi verrattuna muihin polttomoottoriautoihin. Alle on koottu kaikkien tutkimuksessa vertailtavien autojen hiilijalanjäljet taulukkomuotoon.

Taulukko 6. Tutkimuksessa vertailtujen autojen valmistuksessa syntynyt hiilijalanjälki.



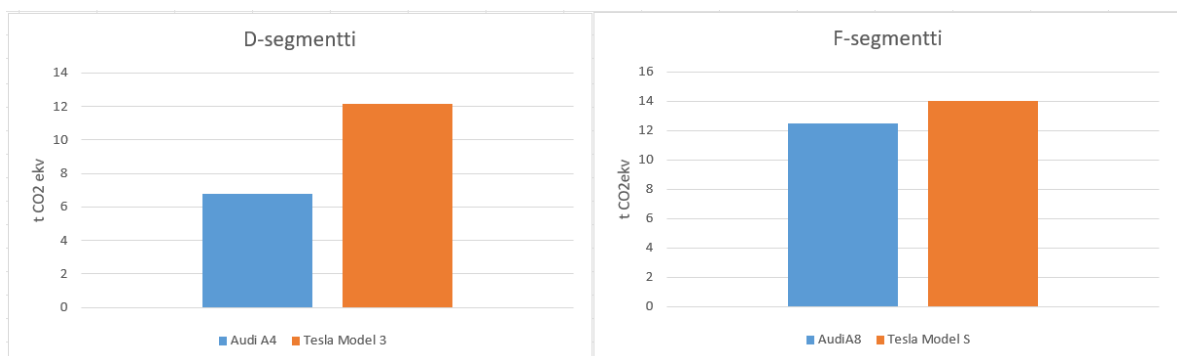
C-segmentissä Volkswagen Golfin valmistuksen hiilidioksidipäästöt olivat 6,5 t CO₂e ollen segmentin pienimmät. Golfin hiilijalanjälki on Nissan LEAF:n verratessa 49 % pienempi ja Volkswagen id.3:n verratessa 111 % pienempi. Ford Focuksen hiilijalanjälki oli 20,73 tCO₂e ja sen johdosta 214 % suurempi kuin Nissan LEAF:lla sekä 151 % suurempi kuin Volkswagen id.3:lla. Ford Focuksen valmistuksen hiilijalanjälki onkin epäilyttävän suuri verrattuna kaikkiin muihin polttomoottoriautoihin tässä tutkimuksessa. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että lähdemateriaalissa on raaka-aineiden valmistuksessa ja auton valmistuksessa käytetyn sähkön hiilijalanjälki oletettu erittäin suureksi. Kyseisessä tutkimuksessa käytettiin raaka-aineiden ja auton valmistuksessa käytetyn sähkön hiilijalanjälkenä 744 gCO₂e/kWh, joka on hyvinkin korkea. Tutkimus on tehty vuonna 2018, joten sähkön hiilijalanjälki on ollut todennäköisesti korkeampi kuin nyt. Vuonna 2021 sähköntuotanto tuotti Yhdysvalloissa noin 0,855 lbsCO₂e/kWh eli 388 gCO₂e/kWh (U.S Energy Information Administration, 2022). Sähkön pienentyneen hiilijalanjäljen johdosta on mahdollista, että Focuksen valmistushiilijalanjälki on myös pudonnut merkittävästi.

Taulukko 7. C-segmentin autojen valmistuksen hiilijalanjäljet.



D-segmentissä Audi A4:llä oli 79 % pienempi hiilijalanjälki verrattuna Tesla Model 3:n. Siirryttäessä F-segmenttiin erot autojen välillä ovat pienemmät kuin C- ja D-segmentissä. F-segmentin Audi A8:n valmistuksen hiilijalanjälki on enää vain 12 % pienempi verrattuna Tesla Model S:n.

Taulukko 8. D- ja F-segmentin autojen valmistuksen hiilijalanjäljet.



6.3. Auton hiilijalanjälki käyttövaiheessa.

Käyttövaiheen aikana saatiin hyvin vaihtelevia tuloksia sähköautojen ja synteettisellä dieselillä kulkevien autojen hiilijalanjäljille. Vaihtelut johtuivat synteettisten polttoaineiden

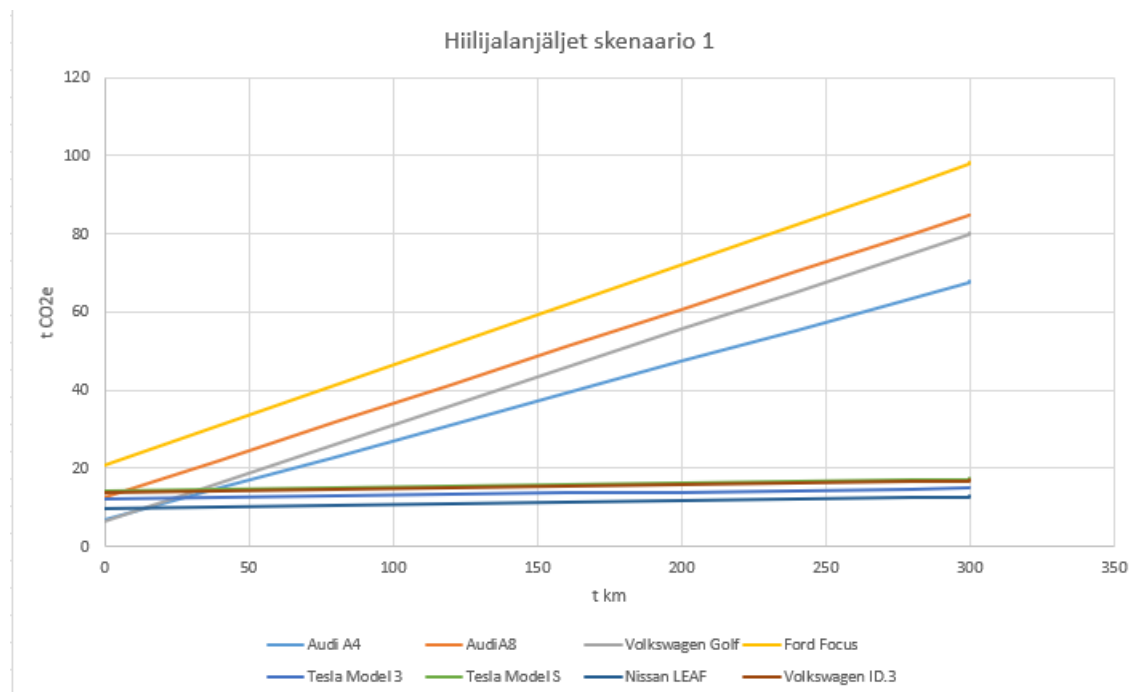
toisistaan eroavista hiilijalanjäljistä. Laskennassa käytettiin kolmea eri arvoa synteettisen dieselin hiilijalanjäljelle, jotka ovat lueteltuna alapuoleisessa taulukossa:

Taulukko 9. Työssä käytetyt dieselin hiilijalanjäljet.

Skenaario	Dieselin Hiilijalanjälki	Lähde
1*	122,5 gCO ₂ e/MJ	Pallav Shrestha, 2020, 51
2	29 gCO ₂ e/MJ	Bergerson et al, 2020
3	9 gCO ₂ e/MJ	Neste, Reduced emissions

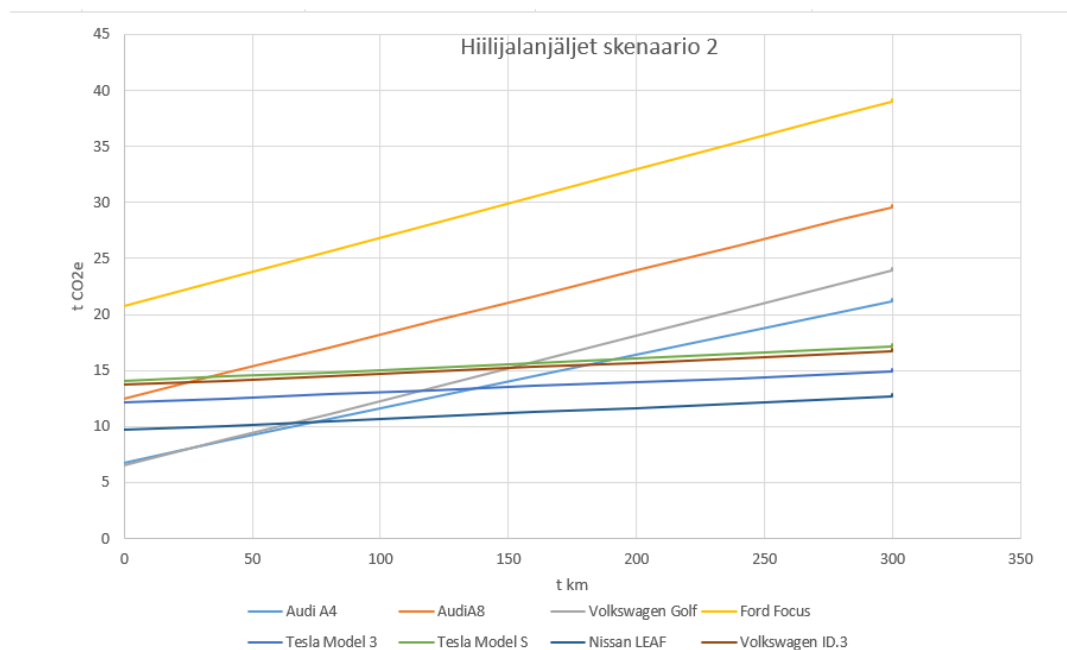
* Käytetty arvo on keskiarvo lähdeaineistosta

Käyttövaiheen hiilijalanjäljet laskettiin kappaleessa 6.1 esitetyillä kaavoilla. Dieselautojen hiilijalanjälki nousi suurimmaksi skenaariossa 1. Skenaariossa 1 huomataan, kuinka tärkeää on dieselin hiilijalanjäljen minimointi. Dieselautojen päästöt nousevat noin 4–5 kertaa suuremmiksi verrattuna sähköautoihin 300 000 kilometrin ajon aikana.



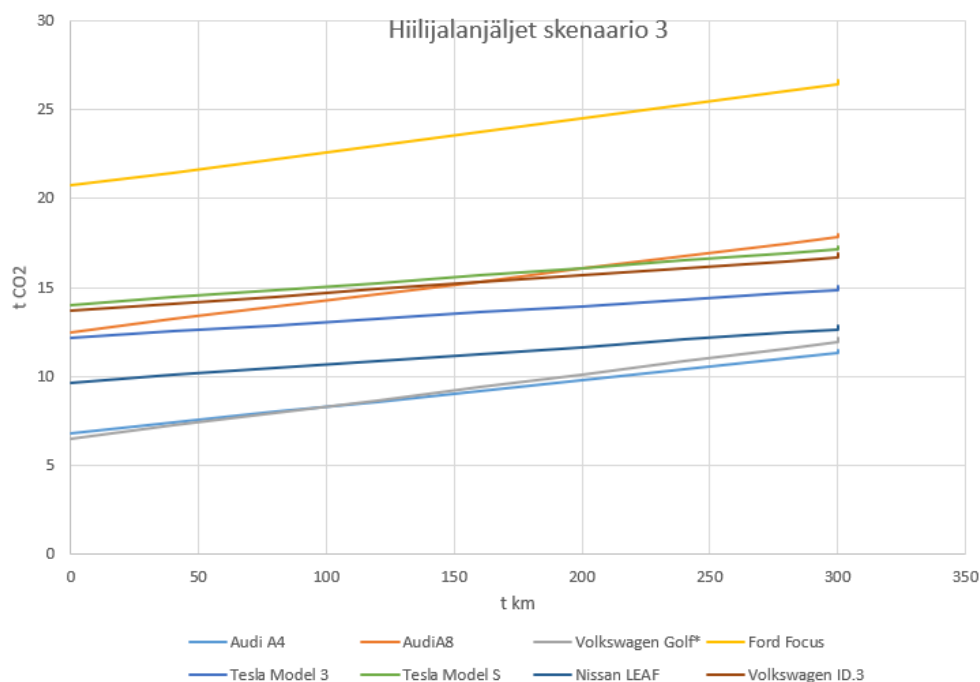
Kuva 1. Autojen hiilijalanjälki skenaariossa 1.

Skenaariossa 2 tulokset ovat tasaisempia dieselautojen ja sähköautojen välillä, johtuen dieselin pienemmästä hiilijalanjäljestä. Sähköautojen hiilijalanjäljet ovat edelleen pienempiä verrattuna dieselautoihin 300 000 km matkalla, mutta eroa autojen välillä on huomattavasti vähemmän. Ero vähäpäästöisimmän dieselauton ja korkeapäästöisimmän sähköauton hiilijalanjälkiä verrattaessa on noin 4000 kg hiilidioksidiekvivalenttia. Tesla Model S ohittaa korkeapäästöisimpänä sähköautona matalapäästöisimmän dieselauton noin 200 000 kilometrin ajon jälkeen. Audi A8 on jo noin 25 000 kilometrin ajon jälkeen suurempi hiilijalanjäljeltään kuin työssä tutkitut sähköautot, johtuen valmistuksen suuresta hiilijalanjäljestä. Audi A4:n ja Volkswagen Golfin pienempien valmistuspäästöjen takia ne ohittavat sähköautot vasta 60 000–200 000 kilometrin jälkeen. Tässä skenaariossa voidaan todeta sähköautojen olevan parempi vaihtoehto hiilijalanjäljen osalta verrattuna dieselautoihin.



Kuva 2. Autojen hiilijalanjäljet skenaariossa 2.

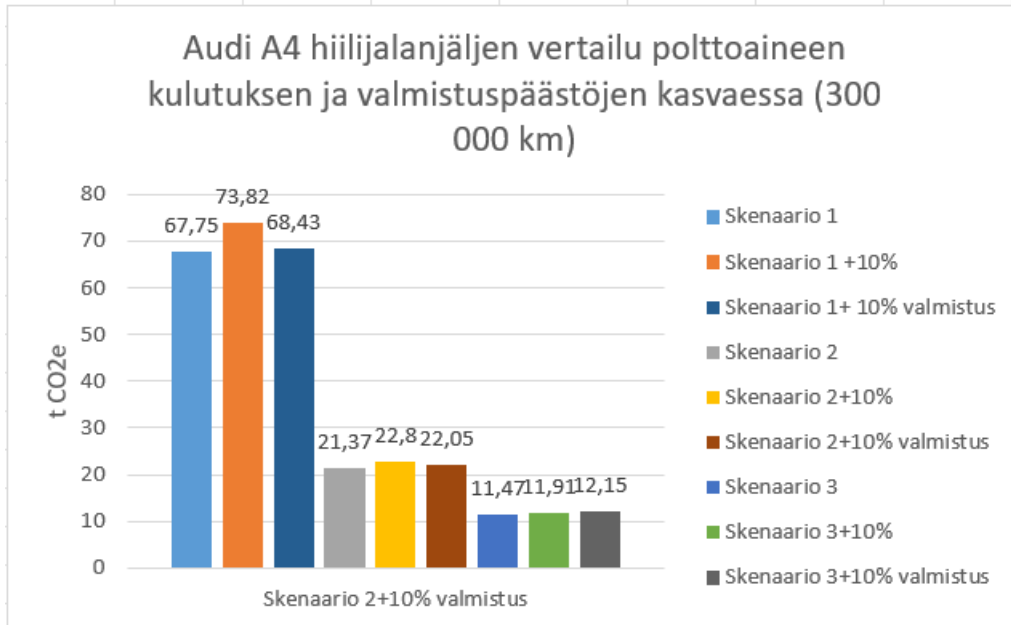
Skenaariossa 3 dieselin hiilijalanjälki on pienin. Huomattavaa on, että vaikka dieselautojen hiilijalanjälki saavuttaa sähköautoja, voi pienen dieselauton hankkiminen olla silti ympäristöystävällisempi ratkaisu jos autolla ajetaan vähän. Huomioitavaa on myös se, että erot sähkö- ja dieselautojen välillä ovat pieniä, jolloin muutokset polttoaineen kulutuksessa voivat vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Autot ryhmittyvät suhteellisen lähelle toisiaan lukuun ottamatta Ford Focusta.



Kuva 3. Autojen hiilijalanjäljet skenaariossa 3.

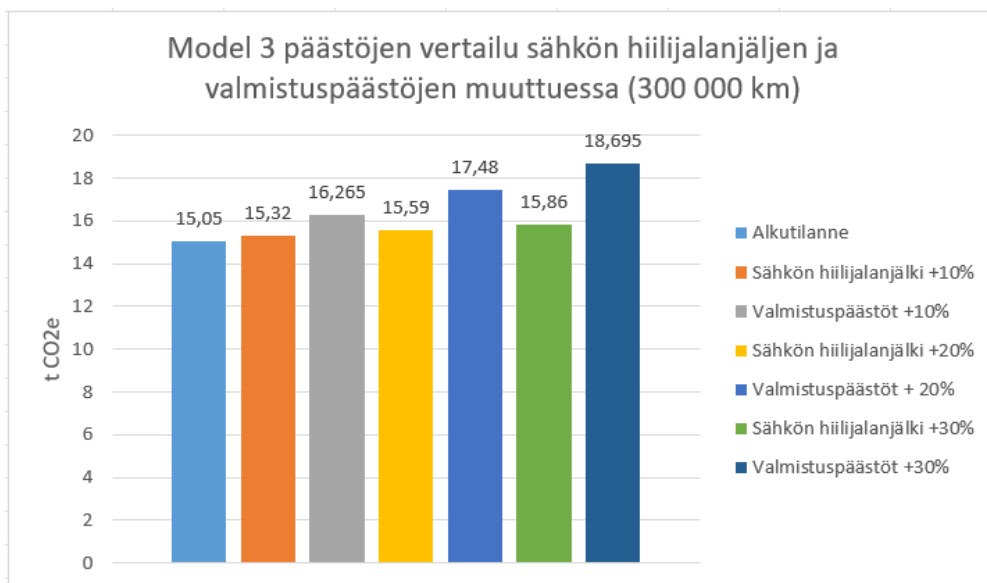
Saatuja tuloksia vertailtiin dieselautojen osalta polttoaineen kulutuksen ja valmistuksesta syntyvien päästöjen noustessa 10 prosentilla. Vertailu suoritettiin Audi A4 mallin autolla. Skenaarion 1 tapauksessa hiilijalanjälki oli 300 000 km ajon kohdalla 9 % suurempi polttoaineen kulutuksen noustessa 10 prosentilla ja 1 % suurempi valmistuspäästöjen noustessa 10 prosentilla. Skenaariossa 2 polttoaineen kulutuksen kasvaessa hiilijalanjälki kasvoi 7 % ol- len siten hieman pienempi kuin skenaariossa 1. Valmistuspäästöjen noustessa päästöt nousivat vain noin 3 %. Skenaariossa 3 polttoaineenkulutuksen noustessa nousi hiilijalanjälki 4 % ja valmistuspäästöjen noustessa 6 %. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että polttoai- neenkulutuksen kasvaminen vaikuttaa enemmän tilanteessa, jossa polttoaineen hiilidioksi- dipäästöt ovat suuret (skenaario 1). Polttoaineen hiilijalanjäljen pienentyessä tämä vaikutus kuitenkin pienenee ja valmistuksessa aiheutuvat nousut muuttuvat suuremmiksi.

Taulukko 10. Audi A4:n hiilijalanjälki polttoaineen kulutuksen ja valmistuspäästöjen muuttuessa.



Sähköautojen osalta vertailtiin sähkön hiilijalanjäljen muuttumista sekä valmistuspäästöjen muuttumista ja vertailtiin niiden suuruuksia. Vertailussa käytettiin Teslan Model 3:sta. Tuloksista nähdään, että sähköautojen osalta valmistuspäästöjen muuttuminen nostaa auton hiilijalanjälkeä enemmän kuin sähkön hiilijalanjäljen nousu.

Taulukko 11. Tesla Model 3:n hiilijalanjälki sähkön hiilijalanjäljen ja valmistuspäästöjen muuttuessa.



7. Johtopäätökset

Tulosten perusteella nähdään, että sähköautoja keskenään vertaillessa valmistamisen päästöjen vaikuttavat enemmän niiden välisiin hiilijalanjälkiin. Sähkön kulutus on sähköautojen välillä lähes samansuuruista, joten valmistusvaiheen hiilijalanjäljestä syntyy suurimmat erot niiden välillä. Samalla sähkön hiilijalanjälki on suhteellisen pieni, jolloin mahdolliset erot autojen kulutuksessa näkyvät vähemmän kuin isommalla hiilijalanjäljellä. Johtuen sähkön pienestä kulutuksesta pienet hyppäykset sähkön hiilijalanjäljessä eivät näy merkittävästi päästöissä, verrattuna synteettiseen dieseliin.

Dieselautojen osalta tulokset niiden välillä vaihtelivat verrattuna sähköautoihin. Auton valmistamisen aiheuttama hiilijalanjälki luo suurempaa eroa polttoaineen hiilijalanjäljen ollessa pienempi ja jos polttoaineen kulutuksessa on suuria eroja. Polttoaineen kulutuksen tärkeys nähdään kuvassa 2. Kuvasta huomataan, että Volkswagen Golfin ja Audi A4:n valmistuksessa syntyy lähes yhtä paljon päästöjä, mutta Golfin päästöt kasvavat elinkaaren loppuvaiheeseen mennessä paljon suuremmiksi kuin Audin. Tämä johtuu Golfin suuremmasta polttoaineenkulutuksesta. Polttomoottoriautoissa onkin siis valmistuksessa syntyvien päästöjen lisäksi tärkeää pyrkiä minimoimaan polttoaineenkulutus.

Synteettisten polttoaineiden valmistaminen on kappaleen 6 perusteella tilanteesta riippuen kannattavaa. Tietyillä valmistusmetodeilla synteettisestä dieselistä saatiin lähes hiilineutraalia ja osassa se oli paljon korkeampi. Tämä kuitenkin riippuu paljolti synteettisten polttoaineiden valmistuksessa käytetyn sähkön hiilijalanjäljestä sekä valmistusprosessin optimoinnista kuten aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu. Jos synteettisiä polttoaineita saataisiin valmistettua samalla hiilijalanjäljellä kuin esimerkiksi Nesteen MY Renewable Diesel, olisi dieselauto yhtä hyvä vaihtoehto kuin sähköauto tai jopa parempi. Dieselauton päästöt kasvaisivat vieläkin hieman sähköautoa nopeammin, mutta ero on huomattavasti pienempi. Päästöjen kasvua kompensoi dieselautojen pienemmät päästöt valmistusvaiheessa verrattuna sähköautoihin. Synteettisten polttoaineiden valmistamisesta pitäisikin toteuttaa enemmän tutkimuksia, joissa keskityttäisiin selvittämään kuinka pienellä sähkön hiilijalanjäljellä saadaan synteettisiä polttoaineita valmistettua niin, että hiilijalanjälki olisi lähellä nollaa.

Samalla tulisi tutkia myös onko tällaisen laitoksen mahdollista toimia kannattavasti vai olisiko valmistuskustannukset niin korkeat, että valmistaminen ei kannattaisi. Jos edellä mainitut tutkimukset toteutettaisiin, pystyttäisiin paremmin toteamaan onko synteettisiin polttoaineisiin sijoittaminen hiilineutraaliuden suhteen kannattavaa vai kannattaisiko keskittyä toisiin vaihtoehtoihin.

Työssä on paljon erilaisia asioita, jotka voivat vaikuttaa tehdyn analyysin tarkkuuteen. Alkutiedot perustuvat jo tehtyihin tutkimuksiin ja artikkeleihin asioista, joten jos näissä on virheitä on samat virheet siirtyneet tähänkin työhön. Suuria vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi autonvalmistajien keräämä tieto heidän omista tuotteistaan. Esimerkiksi dieselautojen osalta polttoaineenkulutuksella on suuri merkitys tuloksiin joten vaihtelut voivat muuttaa tuloksia merkittävästi. Työssä käytettiin osittain autonvalmistajien raportoimia lukuihin valmistetuista autoista, mutta kuten aikaisemmin on nähty, valmistajat voivat vääristää raportoituja lukuja. Tämä tulee huomioida tuloksia tarkastellessa. Työssä jäi myös tiettyjä osa-alueita auton hiilijalanjäljestä hyvin pienelle huomioinnille tai jopa huomioimatta täysin. Loppusijoituksen hiilijalanjälki sekä huollon hiilijalanjälki ovat esimerkiksi sellaisia alueita, jotka jäivät tässä työssä pienelle huomiolle.

Tulosten perusteella ei voida sanoa varmuudella kummalla autovaihtoehdoista on pienempi hiilijalanjälki. Osassa tapauksista synteettisellä dieselillä kulkevalla dieselautolla oli samansuuruinen hiilijalanjälki sähköautoihin verrattaessa, kun taas osassa hiilijalanjälki oli moninkertainen sähköautoon verrattuna.

Lähteet

ArenaEV; 2022; NCM,NCA,LFP,solid-state-EV battery chemistry explained; [Verkkosivu]; [Viitattu 4.3.2023]. Saatavilla:https://www.arenaev.com/ncm_nca_lfp_solid-state_ev_battery_chemistry_explained-news-343.php

Audi, 2015, The new Audi A4 Life Cycle Assessment, [Verkkodokumentti], [Viitattu 20.2.2023]. Saatavilla:<https://www.auk-kits.co.uk/assets/documents/original/12999-AudiUK00000358ThenewAudiA4LifeCycle.pdf>

Audi, 2018, The new Audi A8 Life Cycle Assessment, [Verkkodokumentti], [Viitattu 20.2.2023]. Saatavilla:https://www.audi.com/content/dam/gbp2/company/sustainability/downloads/documents-and-policies/umweltbilanzen/en/ONLINE_Booklet_Umweltbilanzierung_Audi_A8_EN_2018.pdf

Bergerson Joule A., Liu Caroline M., McCoy Sean T., Sandhu Navjot K., A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer-Tropsch fuel production, Sustainable Energy & Fuels, 2020, [Viitattu 18.5.2023]. Saatavilla: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/se/c9se00479c>

Electric Vehicle Database, 2023, Nissan LEAF, [Verkkosivu], [Viitattu 20.2.2023]. Saatavilla: <https://ev-database.org/car/1656/Nissan-Leaf>

Electric Vehicle Database, 2023, Tesla Model 3, [Verkkosivu], [Viitattu 20.2.2023]. Saatavilla: <https://ev-database.org/car/1555/Tesla-Model-3>

Electric Vehicle Database, 2023, Tesla Model S Plaid, [Verkkosivu], [Viitattu 20.2.2023]. Saatavilla: <https://ev-database.org/car/1555/Tesla-Model-3>

Electric Vehicle Database, 2023, Volkswagen id.3 Pro, [Verkkosivu], [Viitattu 10.4.2023]. Saatavilla: <https://ev-database.org/car/1831/Volkswagen-ID3-Pro>

Fingrid, 2022, Sähköntuotannon ja -kulutuksen CO2 päästöarviot, [Verkkosivu], [Viitattu 16.2.2023]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/co2/>

fueleconomy.gov; All-Electric Vehicles; [Verkkosivu]; [Viitattu 4.3.2023]. Saatavilla: <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>

Hawkins T., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A.H., Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles, Journal of Industrial Ecology, 17, no.1:, 2012.[Verkkójulkaisu]. Saatavilla: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>

Holladay J.D, Hu, King D.L., Wang Y., 2008, An overview of hydrogen production technologies, [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2023]. Saatavilla: <https://cmapsub-lic3.ihmc.us/rid=1N3976C22-12M3P49-9V/Holladay%20et%20al.%20-%202009%20-%20An%20overview%20of%20hydrogen%20production%20technologies.pdf>

Hänggi, S., Elbert, P., Büttler, T., Cabalzar, U., Teske, S., Bach, C. and Onder, C. (2019), A review of synthetic fuels for passenger vehicles, Energy Reports, 5, pp. 555–569. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.04.007>.

Insideevs, What Batteries Are Tesla Using In Its Electric Cars.,[Verkkosivu], [Viitattu 10.3.2023]. Saatavilla: <https://insideevs.com/news/587455/batteries-tesla-using-electric-cars/>

ISRI, Ferrous, [Verkkosivu], [Viitattu 18.4.2023]. Saatavilla: <https://www.isri.org/recycled-commodities/ferrous>

Klemola Kimmo, 2016, Life-Cycle impacts of Tesla Model S85 and Volkswagen Passat, [Verkkodokumentti], [Viitattu 20.2.2023]. Saatavilla: <https://kimmoklemola.fi/data/documents/SF-comparison-USA-20160110.pdf>

Kukreja Balpreet, 2018, Life Cycle analysis of Electric Vehicles, [Verkkodokumentti], [Viitattu 25.2.2023]. Saatavilla: https://sustain.ubc.ca/sites/default/files/2018-63%20Lifecycle%20Analysis%20of%20Electric%20Vehicles_Kukreja.pdf

National Energy Technology Laboratory, 10.2.Fisher-Tropsch Synthesis, [Verkkosivu], [Viitattu 28.3.2023]. Saatavilla: <https://netl.doe.gov/research/carbon-management/energy-systems/gasification/gasifipedia/ftsynthesis>

Neste, Reduced emissions, [Verkkodokumentti], [Viitattu 5.4.2023]. Saatavilla: <https://www.neste.com/products/all-products/renewable-road-transport/reduced-emissions>

NREL, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics, [Verkkodokumentti], [Viitattu 2.3.2023]. Saatavilla: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>

Poovanna Pete, Davis Ryan, Argue Charlotte; Environmental Life Cycle assessment of Electric Vehicles in Canada; [Verkkodokumentti]; [Viitattu 25.2.2023]. Saatavilla: <https://pluginbc.ca/wp/wp-content/uploads/2018/05/Environmental-Life-Cycle-Assessment-of-Electric-Vehicles-in-Canada.pdf>

Recurrent, 2022, What kind of EV battery is in my Tesla, [Verkkosivu], [Viitattu 4.3.2023]. Saatavilla: <https://www.recurrentauto.com/research/what-kind-of-battery-is-in-my-tesla>

Ritchie Hannah, 2020, Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from, Haettu 2.2.2023 sivustolta www.ourworldindata.org. Saatavilla: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector#licence>

Shrestha Pallav, 2020, Carbon footprint comparison between traditional diesel and synthetic diesel production pathways, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Maisterintutkinto. [Viitattu 3.4.2023]. Saatavilla:https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162021/Mastersthesis_Pallav_Shrestha.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Suomen tuulivoimayhdistys, Environmental impacts of wind power, [Verkkosivu], [Viitattu 2.3.2023]. Saatavilla:<https://tuulivoimayhdistys.fi/en/wind-power-in-finland-2/wind-power-in-finland/environmental-impacts-of-wind-power>

Tagray, NMC Battery Material (LINIMNCOO₂), [Verkkosivu], [Viitattu 4.3.2023]. Saatavilla: <https://www.tagray.com/li-ion-battery/cathode-materials/nmc>

Tesla, Impact Report 2021, [Verkkodokumentti], [Viitattu 27.2.2023]. Saatavilla: https://www.tesla.com/ns_videos/2021-tesla-impact-report.pdf

Tesla, Model S premium Electric Sedan, [verkkodokumentti], [Viitattu 27.2.2023]. Saatavilla:<https://www.tesla.com/sites/default/files/tesla-model-s.pdf>

Tilastokeskus, 2022, Ajoneuvokanta kasvoi vuonna 2021, [Verkkosivu], [Viitattu 2.2.2023] Saatavilla: https://www.tilastokeskus.fi/til/mkan/2021/mkan_2021_2022-03-01_tie_001_fi.html

U.S Department of Energy, fueleconomy, [Verkkosivu]. Saatavilla : <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>

U.S. Energy Information Assosiation, 2022, How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation?, [Verkkosivu]. Saatavilla: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>

Vattenfal, Vattenfallin myymän sähkön alkuperä vuonna 2021, [Verkkosivu], [Viitattu 17.2.2023]. Saatavilla:<https://www.vattenfall.fi/vattenfall-ja-ymparisto/sahkon-alkupera/>

Visualcapitalist, 2022, The Top 10 EV Battery Manufacturers in 2022, [Verkkosivu], [Viitattu 4.3.2023]. Saatavilla: <https://www.visualcapitalist.com/the-top-10-ev-battery-manufacturers-in-2022/>

Volkswagen, Carbon Footprint of the Electric Vehicle, [Verkkosivu], [Viitattu 10.4.2023].
Saatavilla: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2021/02/e-mobility-is-already-this-much-more-climate-neutral-today.html>

Volkswagen, 2019, Climate protection and decarbonisation, [Verkkodokumentti], [Viitattu 10.3.2023]. Saatavilla: https://www.volkswagenag.com/presence/news/2019/02/01_ID_IN-SIGHTS_Sustainable_E-Mobility_Keynotes.pdf