

Ella-Maria Kortelahti

SÄHKÖAUTOJEN YLEISTYMISEN VAIKUTUS SÄHKÖNTUOTANTOON SUOMESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Ella-Maria Kortelahti: Sähköautojen yleistymisen vaikutus sähköntuotantoon Suomessa
The impact of the spread of electric cars on electricity generation in Finland
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Huhtikuu 2022

Liikenne sähköistyy kasvihuonepäästöjen vähennystavoitteiden myötä. Tässä kandidaatin-työssä tutkitaan sähköautojen yleistymisen vaikutusta Suomen sähköntuotantoon ja pohditaan, millaiset toimenpiteet sähköjärjestelmän näkökulmasta edistäisivät henkilöautoliikenteen laajempaa sähköistymistä.

Sähköautot, jotka voidaan jakaa hybridi- ja täyssähköautoihin, kuluttavat sähköenergiaa keskimäärin 20 kWh/100 km. Ajokilometrien lisäksi kokonaissähköntarpeeseen vaikuttavat esimerkiksi ilmanvastus, auton lämmitystarve sekä sähköverkon siirtohäviöt. Tällä hetkellä Suomen autokannassa on 22 000 täyssähköautoa ja 77 000 hybridi-autoa. Valtioneuvoston Fossiilittoman liikenteen tiekartassa on asetettu tavoitteeksi yhteensä 700 000 sähköautoa vuonna 2030, jolloin pikalatauspisteitä löytyisi 3500–7000 ja yölatauspisteitä 350 000–700 000 täyssähköautolle. Päästötön liikenne vuonna 2045 vaatisi noin 2 miljoonaa täyssähköautoa ja 500 000 hybridi-autoa.

Suomessa tuotettiin 69 TWh sähköä vuonna 2021. Käyttöhuipun sähköteho oli 14 592 MW ja vuoden 2019 teoreettinen sähköntuotantokapasiteetti 17 600 MW. Tuotanto koostuu pääosin ydinvoimasta, vesivoimasta, biomassaenergiasta ja tuulivoimasta, joiden lisäksi sähköenergianlähteenä käytetään maakaasua, kivihilltä, turvetta, jätettä, aurinkovoimaa ja öljyä. Noin 20 % sähkönkulutuksesta katetaan tuontisähköllä. Uusiutuvan energian osuus sähköntuotannosta on yli puolet, mutta siihen vaikuttavat vuosittaiset sademäärät ja muut sääolosuhteet sekä metsäteollisuuden tuotantosuhdanteet. Etenkin tuulivoimakapasiteetti kasvaa vauhdikkaasti. Uusiutuvan energian yleistymisen lisää sähköjärjestelmän joustavuuden tarvetta. Sähköautojen kohdalla kulutusjouston merkitys näkyy ajoakun latauksen vaikutuksessa sähköverkon tasapainoon. Ilman kuormanhallintaa autokannan lataus voi aiheuttaa verkon ylikuormittumista, mutta optimoidussa järjestelmässä sähköautot ja uusiutuva sähköntuotanto tukevat toisiaan: lataaminen yöllä tasaa sähkön kokonaiskysyntää, kun yhteiskunnan muu sähkönkulutus on vähäistä.

Jos sähköautojen ja latauspisteiden lukumäärät kasvavat tavoitteiden mukaisesti, sähköautot tarvitsevat 1516 GWh sähköenergiaa vuonna 2030 ja 5755 GWh vuonna 2045. Mikäli noin 3 miljoonan henkilöauton autokanta sähköistyisi kokonaan, arvo voisi olla jopa 7200 GWh. Nämä tarkoittavat tämänhetkisestä sähköntuotannosta merkittäviä osuuksia: 2,2 %, 8,3 % ja 10,4 %. Lataustehoa tarvitaan samanaikaisesti latauksessa olevien autojen pikalataukseen 700 MW ja 4000 MW vuosina 2030 ja 2045 sekä yölataukseen 2590 MW ja 14 800 MW. Sähköistyneimmässä skenaariossa luvut olisivat 600 GW ja 22 200 MW, joita 17 600 MW:n sähköntuotantokapasiteetti ei mahdollistaisi. Vähenevästä fossiilisten polttoaineiden tuotannosta ei juurikaan vapaudu sähköenergiaa liikenteen käytettäväksi, sillä biopolttoainetuotanto lisääntyy.

Toimenpiteitä sähköautojen laajemman yleistymisen mahdollistamiseksi ovat sähkön kulutus- huippujen tasaaminen esimerkiksi lataustehojen säätelyn avulla, energiavarastojen kehittäminen ja integrointi osaksi sähköjärjestelmää sekä energiatehokkuuden parantaminen niin sähkön tuotannossa, jakelussa kuin ajoneuvotekniikassakin. Näiden lisäksi on syytä suunnitella uutta sähköntuotantokapasiteettia. Uusiutuviin energianlähteisiin perustuvien tuotantomuotojen painottaminen uusissa projekteissa on ehdotonta, sillä niiden rooli päästöjen vähentämisessä on kiistaton.

Lähitulevaisuudessa konkretisoituvia hankkeita ovat Olkiluoto 3:n kaupallisen sähköntuotannon alkaminen kesällä 2022, uusi tuulivoimakapasiteetti sekä suunnitteilla oleva Pyhäsalmen kai-voksen energiavarastona toimiva pumppuvoimala. Sähköautojen akutkin mahdollistavat energian varastoinnin niin sanotulla *vehicle-to-grid*-tekniikalla ja usean tutkimuksen mukaan sähköautojen yleistymisen parantaa sähköntuotantojärjestelmän joustavuutta.

Avainsanat: sähköauto, sähköntuotanto, sähköinen liikenne, kulutusjousto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖAUTOJEN SÄHKÖNKULUTUS JA LUKUMÄÄRÄ	3
2.1 Hybridiautot.....	3
2.2 Täyssähköautot.....	3
2.3 Kokonaissähkönkulutus	4
2.4 Sähköautojen lukumäärä	5
3. SÄHKÖNTUOTANNON TILA.....	7
3.1 Sähköntuotannon nykyinen rakenne	7
3.2 Kulutusjousto	8
4. SÄHKÖAUTOJEN KOKONAISSÄHKÖNTARVE.....	10
4.1 Tulokset	10
4.2 Tulosten pohdinta	12
5. TOIMENPITEITÄ HAASTEISIIN VASTAAMISEKSI	14
5.1 Kulutushuippujen tasaaminen	14
5.2 Energiavarastot.....	15
5.3 Energiatehokkuus	16
5.4 Sähköntuotantojärjestelmän kehittäminen.....	16
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	19
LÄHTEET	21
LIITE 1: LASKENTA.....	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>ADT</i>	ajokilometrit vuodessa, <i>annual distance travelled</i>
<i>BEV</i>	täyssähköauto, <i>battery electric vehicle</i>
<i>C</i>	sähkönkulutus, <i>consumption</i> (kWh/100 km)
<i>CO₂-ekv.</i>	hiilidioksidiekvivalentti
<i>E</i>	sähköenergia (kWh)
<i>P_{pika}</i>	pikalatauksen sähköteho (kW)
<i>P_{yö}</i>	yölatauksen sähköteho (kW)
<i>PHEV</i>	ladattava hybridauto, <i>plug-in hybrid electric vehicle</i>

1. JOHDANTO

Liikenteen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen pienentäminen on yksi tavoite ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi ja fossiilisten luonnonvarojen käytön vähentämiseksi. Euroopan parlamentin hyväksymän lakiesityksen mukaan vuoteen 2030 mennessä henkilöautojen päästöjen tulee vähentyä 37,5 %, pakettiautojen päästöjen 31 % ja uusien rekkojen päästöjen 30 % vuoden 2019 tasosta [1]. Liikenne- ja viestintäministeriö on julkaissut Fossiilitoman liikenteen tiekartan [2], jossa määritellään Suomen tavoitteiksi vähentää liikenteen kasvihuonepäästöjä 50 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä sekä saavuttaa kokonaan päästötön taso vuonna 2045 [2, s. 7–8]. Yksi keino vastata näihin tavoitteisiin on kasvattaa sähköautojen osuutta autokannasta.

Sähköenergialla kulkevat autot ovat viime vuosina herättäneet yhä laajempaa kiinnostusta, ja akkuteknologian kehittyessä ne ovat tulleet koko ajan realistisemmaksi vaihtoehdoksi perinteisen polttoaineajoneuvon rinnalla. Sähköautojen määrä onkin kasvanut huomattavasti ilmastotavoitteisiin liittyvien päästövähennystoimien yhtenä seurauksena [3, s. 3]. Kuluttajaystävällisen kustannuskehityksen lisäksi käyttövoiman laajempi yleistyminen vaatii muutoksia infrastruktuurissa - sähköautoja varten tarvitaan sujuva latausverkko, joka kattaa niin huoltoasemat, työpaikat kuin kotitaloudetkin. Monista kiinteistöistä löytyy lohkolämmitinliitynnät, joita voidaan teoriassa käyttää sähköautojen lataamiseen [4, s. 227], mutta kokonaisjärjestelmässä riittää vielä kehitettävää. Esimerkiksi maanteiden varsilla ei tällä hetkellä ole yhtä kattavia mahdollisuuksia sähköauton lataamiseen kuin bensiinin tai dieselin tankkaamiseen.

Latausinfrastruktuurin lisäksi tärkeä huomioon otettava seikka sähköistä liikennettä kehitettäessä on sähköön lisääntynyt kysyntä sekä tämän vaikutukset sähköön tuotanto- ja jakelujärjestelmään. Haasteena ovat etenkin hetkellisesti korkeat kysyntäpiikit, sillä sähköautoja ladataan usein työpäivän jälkeen. Sähköjärjestelmää ja käytön sujuvuutta tarkasteltaessa mainittava asia on myös uusiutuvien energianlähteiden käytön yleistyminen. Kun esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoiman osuus sähköntuotannossa kasvaa, joustavuuden tarve sähkönkäytössä lisääntyy [5].

Tämän tutkimuksen tavoite on selvittää, miten sähköautojen yleistyminen vaikuttaa Suomen sähköntuotantoon. Tarkoituksena on perehtyä siihen, mitä seurauksia sähköautojen lataustarpeilla on Suomen energijärjestelmälle – mahdollistaako nykyinen sähköntuotantokapasiteetti laajemman liikenteen sähköistymisen ja jos ei, millaiset toimenpiteet

voisivat ratkaista asian. Tarkastelun kohteena ovat ensisijaisesti henkilöautot. Tarkoitus on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten sähköajoneuvojen yleistyminen vaikuttaa sähköntuotantoon Suomessa?

1.1 Millainen sähköajoneuvojen sähköenergian tarve on?

1.2 Millainen Suomen sähköntuotannon tila ja rakenne on nyt?

1.3 Mihin asti nykyinen energiajärjestelmä mahdollistaa tieliikenteen sähköistymisen?

2. Millaisia keinoja sähköntuotannon näkökulmasta tarvitaan laajemman tieliikenteen sähköistymisen mahdollistamiseksi?

2.1 Millaisia toimenpiteitä tulisi tehdä sähköntuotantojärjestelmän kehittämiseksi?

Luvuissa 2 ja 3 esitellään aiheeseen liittyvää taustatietoa: ensimmäisessä kuvataan lyhyesti erilaisten sähköautojen sähkönkulutus ja lukumäärä tulevaisuuden kehitysnäkymineen sekä esitellään aiempaa aiheeseen liittyvää tutkimusta, jälkimmäisessä tarkastellaan sähköntuotannon rakennetta Suomessa sekä kulutusjoustoja. Tuloksia käsitellään luvussa 4, jossa esitetään arvioitu kokonaissähköntarve mahdollisimman sähköistetylle tieliikenteelle. Luvussa 5 pohditaan toimenpiteitä mahdollisiin haasteisiin vastauksiksi: käsiteltävät aiheet ovat kulutushuippujen tasaaminen, energiavarastot, energiatehokkuus sekä sähköntuotantojärjestelmän kehittäminen. Lopuksi kootaan tutkimuksen pääkohdat yhteenvedoksi ja tehdään johtopäätökset luvussa 6.

2. SÄHKÖAUTOJEN SÄHKÖNKULUTUS JA LUKUMÄÄRÄ

Sähköenergiaa käyttövoimanaan hyödyntävät autot voidaan jakaa hybridautoihin ja täyssähköautoihin. Näiden perustoimintaperiaatteita ja sähkönkulutusta tarkastellaan seuraavissa alaluvuissa, kuten myös sähköautojen lukumäärää Suomessa sekä aiempaa tutkimusta sähköautojen kokonaiskulutuksesta.

2.1 Hybridautot

Hybridautoja on kahdenlaisia: ei-ladattavia ja ladattavia. Ei-ladattavat käyttävät pääasiallisena voimanlähteenään polttoainetta, mutta pienen akun ja sähkömoottorin avulla voidaan kerätä jarrutusenergia talteen hyödynnettäväksi esimerkiksi kiihdytyksissä. Polttoaineen kulutusta voidaan vähentää myös lataamalla akkua polttomoottorin avulla, sillä näin nostetaan auton hyötysuhdetta. Ei-ladattavien hybridautojen akkukapasiteetti on yleensä noin 1 kWh. [3, s. 12–14]

Ladattavien hybridautojen akkua voidaan ladata polttomoottorin lisäksi kiinteästä sähköverkosta, mikä vähentää polttoaineen kulutusta. Lisäksi niissä on ei-ladattavia hybridejä tehokkaampi moottori ja suurempi akku, joten niillä pystyy ajamaan pidempiä matkoja, yleensä 20–50 km, pelkästään sähköllä. Akkukapasiteetti ladattavissa hybridautoissa on yleensä noin 10 kWh. [3, s. 12–14] Latausteho on yleensä korkeintaan 3,7 kW, vaikka joillakin ladattavilla hybridautomalleilla jopa 10 kW latausteho voi olla mahdollinen [3, s. 20].

2.2 Täyssähköautot

Täyssähköautoissa on polttomoottorin sijaan sähkömoottori – nelivetoisissa kummallakin akselilla omansa – sekä ajoakku energianlähteenä. Akkujen valmistuskustannukset ovat jatkuvasti laskeneet; 2010-luvun alussa keskimääräinen täyssähköauton akku oli kapasiteetiltaan 20–25 kWh, kun tällä hetkellä vastaava arvo on jo 20–100 kWh. [3, s. 11, 14] Tyypillisin vaihtosähkölatausteho on 7,4 kW, mutta joillakin autoilla 22 kW:n tai jopa 43 kW:n latausteho on mahdollinen. Tasasähkölatauksen teho on yleensä yli 50 kW aina 100 kW:iin ja tulevaisuudessa jopa 250 tai 350 kW:iin asti. [3, s. 20] [6]

Sähköauton kuluttama sähköenergian määrä riippuu muun muassa ajotavasta, ilmanvastuksesta ja sääolosuhteista. Moottoriteillä ajonopeuden ollessa noin 120 km/h ilman-

vastus on merkittävästi suurempi kuin maantieajossa nopeudella 80 km/h, sillä ilmanvastus voimistuu nopeuden kasvaessa. Tyypillinen sähkönkulutuksen vaihteluväli on 10–30 kWh sadalla kilometrillä. Yhdellä latauskerralla nykyaikaisella sähköautolla pystyy ajamaan siis 50–500 km:n matkan. [3, s. 15] Keskimääräisenä kulutuksena käytetään arvoa 20 kWh/100 km.

2.3 Kokonaissähkönkulutus

Liikenteen osuus energian loppukäytöstä on Suomessa noin 17 % [7] [8]. Vuonna 2020 tästä oli sähköä 840 GWh, josta 114 GWh kulutettiin tieliikenteessä [9].

Skotlannissa tehdyn tutkimuksen [10] mukaan kaikkien alueella käytössä olevien kevyiden polttomoottoriajoneuvojen korvaaminen sähköisillä lisäisi sähkön vuotuista kysyntää noin 4000 GWh. Tarvittavan autokohtaisen sähkön määrän E laskemiseen voidaan käyttää kaavaa

$$E = C \cdot ADT, \quad (1)$$

jossa C (*consumption*, kWh/100 km) on keskimääräinen sähkönkulutus ja ADT (*annual distance travelled*, km) ajokilometrit vuodessa. Suomalaiset ajavat keskimäärin 32,3 km vuorokaudessa [11], mikä tarkoittaa 11 790 km vuodessa. Ladattavan hybridi-auton sähköinen toimintamatka on 20–50 km [9, s. 14], mikä kattaa vuorokauden ajokilometreistä noin 62–100 %. Hybridi-autolla ajettaessa sähköisiä kilometrejä voidaan siis arvioida tulevan 7300–11 790 vuodessa. Energiaa kuluu liikkumisen lisäksi todellisuudessa myös auton lämmittämiseen [3, s. 11–12], [10]. Kyseisessä tutkimuksessa lämmitysenergian tarpeeksi on laskettu 5,36 kW, kun ajonopeudella 97 km/h ja yhden celsiusasteen lämpötilassa on huomioitu lämpöhäviöt auton ikkunoiden ja rungon läpi. [10]

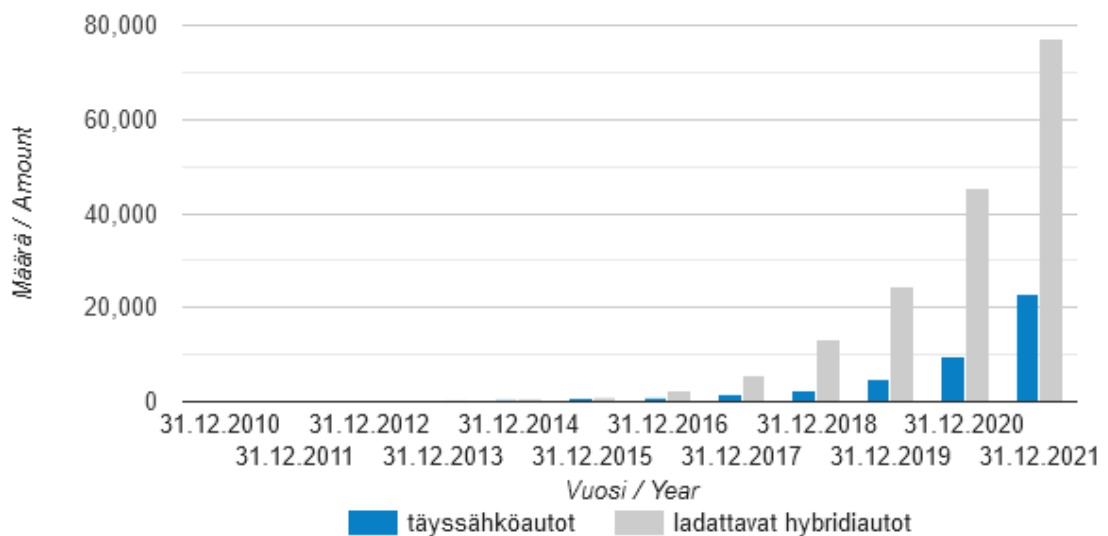
Energiahäviöitä tapahtuu myös sähkön siirtoverkossa. Suomessa kantaverkon siirtohäviöt ovat noin 1,5 % [12]. Skotlannissa siirtohäviö eli *grid loss* on 17 %, minkä takia sähköautoja varten tuotettu todellinen energiantarve on 1,17-kertainen kaavalla (1) laskettuun arvoon verrattuna [10]. Korhosen et al. [3, s. 15] mukaan alaluvussa 2.2 mainitut auton kulutuslukemat sisältävät lataustapahtuman häviöt, mutta tämä sähköverkosta otettu energiamäärä ei ole sama kuin sähköverkkoon syötetty määrä. Yhtä sähköautoa kohti tarvitaan sähköenergiaa Suomen siirtoverkkoon tuotettuna siis

$$E_{tod} = 1,015 \cdot E, \quad (2)$$

jossa E on kaavalla (1) laskettu sähköauton kuluttama energia.

2.4 Sähköautojen lukumäärä

Sähköautojen lukumäärä on kasvanut huomattavasti viime vuosina. Kuvasta 1 nähdään, että vuoden 2015 jälkeen sekä ladattavat hybridautot että täyssähköautot ovat yleistyneet Suomessa nopeasti. Vuoden 2021 aikana täyssähköautojen lukumäärä yli kaksinkertaistui nouden vajaasta 10 000 autosta noin 22 000 autoon. Samalla käytössä olevien hybridautojen määrä kasvoi noin 45 000 autosta noin 77 000 autoon. Toistaiseksi hybridautot ovat siis olleet kokonaismäärällisesti suosittumia, mutta täyssähköautojen kasvavasta suosiosta kertoo niiden suhteellisen lisääntymisen suuruus.



Kuva 1. Liikennekäytössä olevien ladattavien henkilöautojen määrä. [13]

Fossiilittoman liikenteen tiekartassa on asetettu tavoitteeksi lisätä sähköautojen osuutta Suomen autokannassa siten, että vuonna 2030 sähköisiä henkilöautoja on 700 000, pakettiautoja 45 000 ja raskaan kaluston ajoneuvoja 4600, joista kahdesta ensimmäisestä ainakin puolet on täyssähköautoja. Tavoitteen realistisuutta tukee arvio hintakehityksestä, jonka mukaan sähköautojen hinnat laskevat polttomoottoriautojen tasolle vuoteen 2025 mennessä. [2, s. 21–23] Latauspisteitä on tarkoitus lisätä niin, että julkisia pikalatausasemia löytyisi ainakin yksi sataa täyssähköautoa kohti vuonna 2030. Yön ajaksi jokaisen täyssähköauton tulisi päästä latauspisteeseen. [2, s. 15] Tämä tarkoittaa, että yhteensä 3500–7000 auton olisi mahdollista olla yhtä aikaa pikalatauksessa ja 350 000–700 000 auton yönaikaisessa latauksessa.

Vuoden 2045 tavoitteeksi on määritelty liikenteen päästöjen poistaminen kokonaan. Tämä vaatii Fossiilittoman liikenteen tiekartan mukaan esimerkiksi 2 miljoonaa täyssähköautoa sekä puoli miljoonaa kaasuautoa ja ladattavaa hybridautoa. [2, s. 49] Mikäli

latauspisteitä lisätään samassa suhteessa kuin vuoden 2030 tavoitteissa, 23 vuoden kulluttua pitäisi pystyä lataamaan yhtäaikaaisesti 20 000 täyssähköautoa pikalatauksessa ja 2 miljoonaa yölatauksessa. Sähkönjakeluinfrastruktuuri on Suomessa hyväkuntoinen ja kestää Korhosen et al. mukaan ainakin miljoona sähköautoa [3, s. 16], mutta 2 miljoonan tavoite edellyttää todennäköisesti jakeluverkon kehittämistä. Henkilöautojen lisäksi sähkökäyttöisten kuorma- ja etenkin linja-autojen osuus kasvaa, syrjäyttämättä dieselkäyttöisiä raskasajoneuvoja kuitenkaan kokonaan [2, s. 49].

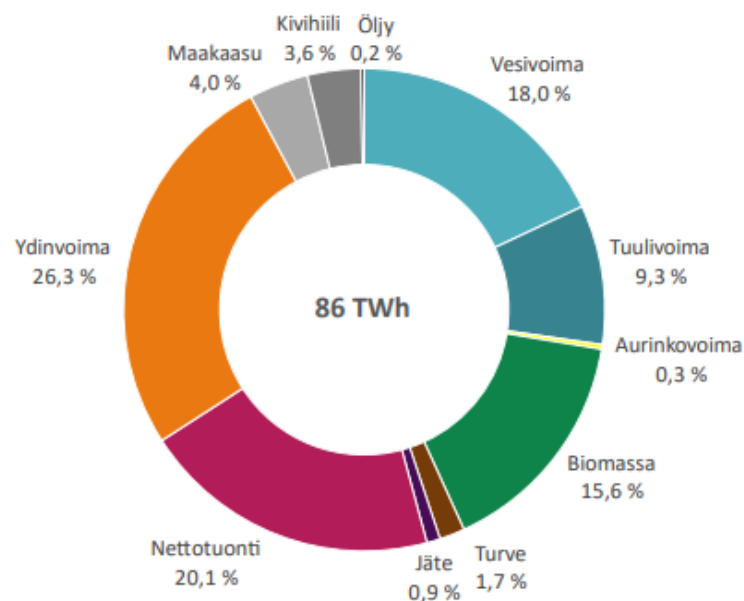
Autokannan sataprosenttinen sähköistyminen ei ole realistista, sillä kuten Fossiilittoman liikenteen tiekartassa [2, s. 14–15] todetaan, liikenteen suuri energiantarve vaatii useita uusiutuvia käyttövoimia – sähkö, biopolttoaineet sekä vety – rinnakkain. Vertailun vuoksi tällaista skenaariota tarkastellaan luvussa 4, olettaen, että tämänhetkinen henkilöautojen lukumäärä 2 770 000 [14] nousisi tulevaisuudessa noin 3 miljoonaan autoon. Vaikka väestö huomattavasti lisääntyisi, mikä ei ole todennäköistä [15], kaupungistuminen ja kehittyvä joukkoliikenne puoltavat sitä, että autokanta tuskin kasvaa merkittävästi enempää.

3. SÄHKÖNTUOTANNON TILA

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan Suomen sähköntuotannon rakennetta sekä kulutusjoustoja ja sen liittymistä sähköautoihin.

3.1 Sähköntuotannon nykyinen rakenne

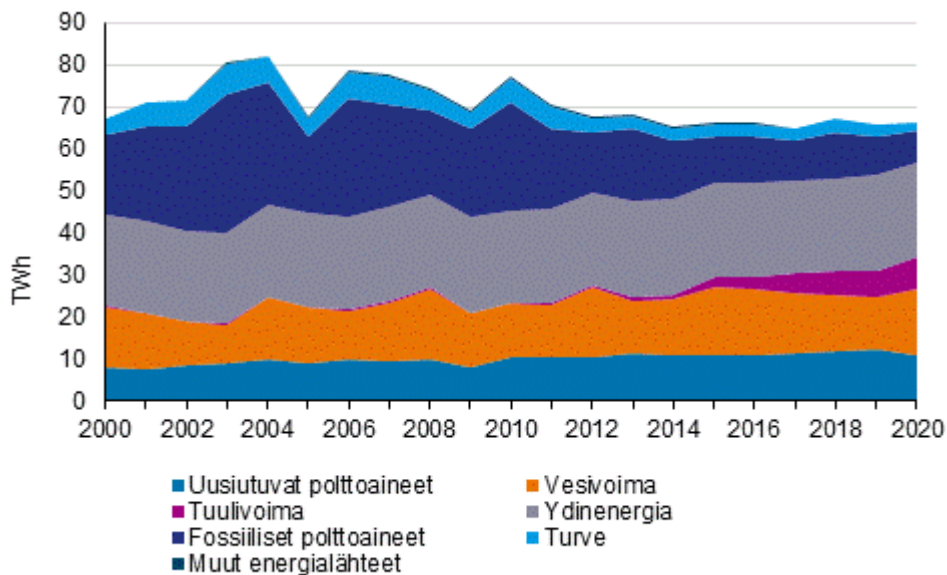
Suomessa tuotettiin 69 TWh ja kulutettiin 86 TWh sähköä vuonna 2021. Käyttöhuipun sähköteho eli suurin hetkellisesti tarvittu sähkömäärä oli 14 592 MW. [16] Kulutetun ja tuotetun sähkön erotus eli 20 % kokonaiskulutuksesta katettiin tuontisähköllä, jota ostetaan Pohjoismaista, Venäjältä ja Virosta [17]. Teoreettinen sähköntuotantokapasiteetti oli 17 600 MW vuonna 2019, mutta kulutushuippujen aikaan talvella arvioitiin olevan käytettävissä vain 11 900 MW. Nettotuotannon kapasiteetti on noin 5200 MW. [18] Kuvassa 2 on esitetty nettotuotannon lisäksi energianlähteet, joista tuotanto koostuu.



Kuva 2. Sähkön tuotanto energialähteittäin ja nettotuonti 2021. [16]

Suomessa sähköä tuotetaan pääasiassa ydinvoimalla, vesivoimalla, biomassalla ja tuulivoimalla. Fossiilista polttoaineista maakaasua, kivihiiltä ja öljyä käytetään yhteensä noin 8 % kokonaistuotannon määrästä. Lisäksi sähköenergian lähteitä ovat turve, jäte ja aurinkovoima. Uusiutuvat energianlähteet kattoivat vuosina 2020 [17] ja 2021 [16] yli

puolet tuotetusta sähköstä. Viime vuosien kehitys energianlähteiden suhteissa on esitetty kuvassa 3, josta nähdään, että etenkin tuulivoima on huomattavasti lisääntynyt. [16] [17]



Kuva 3. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2000–2020. [17]

Vesivoiman osuus sähkön kulutuksesta vaihtelee vesivoiman määrään vaikuttavan sadannan mukaan [16] [17] [19] [20, s. 10]. Kuivana vuotena vesivoimaa on siis käytettävissä vähemmän kuin parempana sadevuotena. Uusiutuvan energian osuuteen vaikuttavat myös metsäteollisuuden tuotantosuhdanteet, joiden mukaan puuperäisen energiantuotannon määrä mukautuu [20, s. 10]. Tuuli- ja aurinkovoiman hyödyntämismahdollisuuksiin vaikuttavat luonnollisesti sääolosuhteet. Tämän vuoksi energianlähteiden suhteet eivät ole vakioita, vaikka olemassa olevien voimalaitosten – joita tällä hetkellä on noin 400 [19] – puolesta sähkön tuotantokapasiteetti pysyisikin samana.

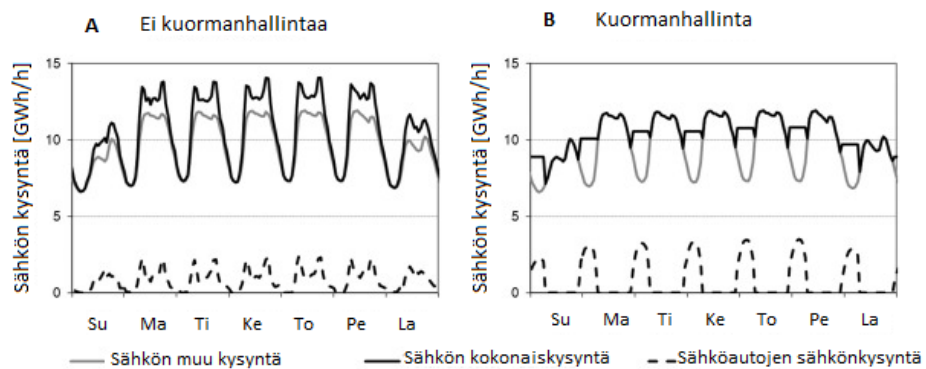
3.2 Kulutusjousto

Kulutusjousto tarkoittaa sähkön kulutuksen mukautumista sähköntuotannon vaihteluihin [5]. Mikäli sähkön kysyntä on suurempaa kuin sähkön määrä, jonka voimalaitokset pystyvät kyseisellä hetkellä sähköverkkoon syöttämään, verkko ylikuormittuu. Vastaavasti kaikki tietyllä hetkellä tuotettu sähkö pitää joko käyttää tai varastoida. Sähköverkon tasapainoa voidaan ylläpitää säätövoimalla [19], johon lukeutuvat esimerkiksi varavoimalaitokset ja muu säätösähkökapasiteetti, kuten joustavat teollisuuden prosessit. [21] [22] Suomen yhteistyö pohjoismaisten sähkömarkkinoiden kanssa [4, s. 194–195] [19] [23]

[24] tehostaa huoltovarmuutta ja helpottaa tuotannon ja kysynnän vaihteluiden tasaimista.

Riski sähköverkon ylikuormitusilanteelle voi tulla esimerkiksi silloin, jos suurta määrää sähköautoja ladataan samanaikaisesti. Lataaminen heti käytön jälkeen – tyypillisesti työpäivän päätteeksi – aiheuttaa todennäköisesti sähkön ylikysyntää, sillä sähköntarve on iltpäivisin muutenkin korkealla [25]. Ongelmia voidaan ehkäistä älykkäällä sähköverkoteknologialla, joka mahdollistaa autojen priorisoinnin lataustarpeen mukaan ja latauksen tehon säätelyn [10] [26].

Sähköautot ja uusiutuva sähköntuotanto voivat tukea toisiaan, kuten Alankomaiden sähköverkosta tehty tutkimus [25] osoittaa. Esimerkiksi tuulivoiman integrointi sähköverkkoon voi aiheuttaa haasteita, sillä tuulivoimalat tuottavat sähköä tuulisella säällä, eikä niiden irrottaminen verkosta matalamman kysynnän aikana ole kannattavaa. Siksi kasvava tuulivoimakapasiteetti aiheuttaa yhä enemmän tilanteita, jolloin tuotettua sähköä täytyy ohjata energiavarastoihin tai myydä ulkomaille. Yöaika, jolloin muu sähkönkulutus vähenee, onkin otollista aikaa sähköautojen lataamiseen. Näin sähköautojen akut varastoivat mahdollisen ylimääräisen sähköä, mikä tasaa kokonaiskysyntää. Kuva 4 havainnollistaa sähköautojen vaikutusta sähkön kysyntään ilman kuormanhallintaa ja sen kanssa.



Kuva 4. Sähköverkon kuormanhallinnan vaikutus sähkökysyntään. Muokattu lähteestä [25].

Vasemmalla (A) sähköverkon kuormanhallintaa ei ole, mikä nostaa käyttöhuippuja, kun taas oikealla (B) sähköautot ladataan kuormanhallinnan avulla öisin ja näin tasataan verkon kokonaiskuormitusta. Bellekomin tutkimuksen [25] mukaan Alankomaiden vuoden 2020 sähköjärjestelmä kestää miljoona öisin ladattavaa sähköautoa ja 10 GW tuulivoimaa.

4. SÄHKÖAUTOJEN KOKONAISÄHKÖNTARVE

Saadut tulokset esitetään alaluvussa 4.1. Tämän jälkeen seuraa alaluku 4.2, jossa pohditaan tulosten merkitystä.

4.1 Tulokset

Sähköautojen kokonaissähköntarpeen arvioimiseksi tehty laskelma on liitteessä 1. Laskennassa käytetyt lähtöarvot ja välitulokset on esitetty taulukossa 1. Sähköauton keskimääräisenä kulutuksena käytetään arvoa $C = 20$ kWh/100 km ja vuoden sähköisinä ajokilometreinä täyssähköautoille (lyhenne BEV tulee sanoista *battery electric vehicle*) arvoa $ADT_{BEV} = 11\,790$ km ja ladattaville hybridi-autoille luvussa 2.3 mainitun välin 7300–11 790 keskiarvoa $ADT_{PHEV} = 9545$ km (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicle*). Autokohtainen sähköenergia saadaan kaavalla (1). Kun huomioidaan vielä sähköverkon siirtohäviöt, voidaan kaavalla (2) laskea yhden sähköauton vaatima todellinen energia.

Taulukko 1: Laskennan lähtöarvoja ja välituloksia (perusteltu lähteineen luvussa 2). BEV tarkoittaa täyssähköautoa (battery electric vehicle) ja PHEV ladattavaa hybridi-autoa (plug-in electric vehicle).

Sähköauton keskimääräinen kulutus	C	20 kWh/100km	
Ajokilometrit vuorokaudessa		32,3 km	
Ajokilometrit vuodessa (täyssähkö)	ADT_{BEV}	11790 km	
Sähköiset ajokilometrit hybridillä vähintään		7300 km	
Sähköiset ajokilometrit hybridillä enintään		11790 km	
Sähköiset ajokilometrit hybridillä vuodessa n.	ADT_{PHEV}	9545 km	
Autokohtainen sähköenergia (täyssähkö)	E_{BEV}	2358 kWh	Kaava (1)
Sähköverkon siirtohäviö		1,5 %	
Autokohtainen tuotettava sähkö (täyssähkö)	$E_{tod,BEV}$	2393 kWh	Kaava (2)
Autokohtainen sähköenergia (hybridi)	E_{PHEV}	1909 kWh	Kaava (1)
Autokohtainen tuotettava sähkö (hybridi)	$E_{tod,PHEV}$	1938 kWh	Kaava (2)
Täyssähköauton pikalatausteho vähintään		50 kW	
Täyssähköauton pikalatausteho enintään		350 kW	
Täyssähköauton pikalatausteho keskimäärin	P_{pika}	200 kW	
Täyssähköauton hidaslatausteho	$P_{yö}$	7,4 kW	

Keskeiset tulokset löytyvät taulukosta 2, johon on koottu sähköautojen lukumäärät vuosina 2022, 2030, 2045 sekä jonakin tulevaisuuden vuotena x perustuen luvussa 2.4 kuvattuihin nykytilanteeseen ja tavoitteisiin. Näiden lisäksi on esitetty samanaikaisesti latauksessa olevien sähköautojen määrä kyseisinä vuosina ja laskettu kokonaislataustehon tarve sekä pika- että yölataukselle olettaen, että pikalatausasemilla käytetään keskimääräistä lataustehoa 200 kW ja öisin alhaisempaa tehoa 7,4 kW. Varsinkin pikalataustehon keskimääräinen arvo on vain suuntaa antava, sillä tällä hetkellä suuritehoinen 350 kW:n lataus on harvinaista, kun taas tulevaisuudessa vastaavat tehot todennäköisesti yleistyvät [3, s. 20] [6] alhaisempaan 50 kW:n lataustehoon nähden. Tuotettavan sähköenergian E_{tod} avulla on laskettu sähköautojen lukumääriä vastaavat kokonaisenergiatarpeet.

Taulukko 2: Sähköautojen sähköntarve nyt ja tulevaisuuden skenaarioissa. Vuosi x kuvaa tulevaisuuden vuotta, jolloin henkilöautokanta olisi sähköistynyt täysin. Lähtöarvot lähteineen perusteltu luvussa 2.

Vuosi	2022	2030	2045	x	2020
Täyssähköautojen lukumäärä väh.	22000	350000	2000000	3000000	10000
Hybridisähköautojen lukumäärä	77000	350000	500000	0	45000
Täyssähköautoja pikalatauksessa		3500	20000	3000000	
Täyssähköautoja yölatauksessa		350000	2000000	3000000	
Täyssähköautojen kokonaissähköntarve (GWh)	52,7	837,6	4786,5	7179,8	23,9
Hybridiautojen kokonaissähköntarve (GWh)	149,2	678,2	968,8	0,0	87,2
Sähköntarve yhteensä (GWh)	201,8	1515,8	5755,3	7179,8	111,1
Pikalataustehon tarve (MW)		700	4000	600000	
Yölataustehon tarve (MW)		2590	14800	22200	

Kuluvan vuoden 2022 sähköautojen sähköntarve 200 GWh on huomattavasti suurempi kuin luvussa 2.3 mainittu vuoden 2020 tieliikenteessä kulutetun sähkön määrä 114 GWh [9], sillä sähköautojen määrä on kasvanut [13]. Vertailun vuoksi vuodelle 2020 laskettu sähköautojen sähköntarve 111 GWh osoittaa, että laskennassa käytetyt lähtöarvot on valittu suunnilleen oikein, vaikka epätarkkuutta varmasti esiintyykin. Arviointivirheiden lisäksi erotus arvoon 114 GWh sisältää esimerkiksi sähköisten pakettiautojen ja raskaiden ajoneuvojen kuluttaman sähköenergian.

4.2 Tulosten pohdinta

Tulosten perusteella sähköautot tarvitsisivat vuonna 2030 sähköenergiaa 1516 GWh ja vuonna 2045 jo 5755 GWh. Mikäli henkilöautokanta sähköistyisi kokonaan, arvo olisi 7180 GWh eli noin 7,2 TWh. Nämä tarkoittaisivat tällä hetkellä tuotetusta sähköstä eli 69 TWh:sta [16] osuuksia 2,2 %, 8,3 % ja 10,4 %. Esimerkiksi Olkiluodon ydinvoimalaitoksen laitosyksiköiden Olkiluoto 1:n ja Olkiluoto 2:n yhteenlaskettu sähköntuotanto vuonna 2021 oli noin 20 % Suomessa tuotetusta sähköstä [27], mihin verratessa voidaan todeta, että pelkästään sähköautojen sähköntarpeen kattamiseksi tarvittaisiin vuonna 2045 lähes yhden ydinvoimalaitosyksikön verran sähköntuotantoa. Kyse on siis merkittävästä osuudesta. Kun huomioidaan henkilöautojen lisäksi esimerkiksi muu tieliikenne ja raide-liikenne, jonka sähköntarve yleistyy junaliikenteen ohella esimerkiksi Tampereen raitiovaunun liikennöintialueen laajentuessa [28] sekä mahdollisesti myös Turun raitiotiesuunnitelmien myötä [29], todellinen liikenteen sähköntarve on tulevaisuudessa tätäkin arviota suurempi. Konsultointiyhtiö AFRY:n tekemien arvioiden mukaan liikenteen sähkönkulutus voisi olla jopa 4 TWh vuonna 2035 ja 10 TWh vuonna 2050 [30, s. 54–55]. Lukujen voidaan todeta olevan linjassa tämän työn laskelmien kanssa.

Latausasemien määrien ja lataustehojen avulla laskettujen sähkötehojen perusteella samanaikaisesti pikalatauksessa olevien sähköautojen lataamiseen tarvittaisiin sähkötehoa 700 MW vuonna 2030 ja 4000 MW vuonna 2045. Jos kaikki henkilöautot sähköistyisivät, luku voisi olla jopa 600 GW. Yönaikaisessa hidaslatauksessa vastaavat tehontarpeet olisivat 2590 MW, 14 800 MW ja 22 200 MW. Vuoden 2021 käyttöhuipun sähkötehoon 14 592 MW [16] verrattuna vuoden 2045 sähköautojen lataustehontarve aiheuttaisi jo merkittävää sähköverkon ylikuormitusta, ellei sähköä saataisi lataushetkillä jostakin lisää. Myös vuoden 2030 sähköautojen hetkellinen sähkötehon tarve voi aiheuttaa haasteita, varsinkin kylminä talviöinä tai sähköntarpeen ollessa muutenkin suuri. Teoreettisen 17 600 MW:n sähköntuotannon ja 5200 MW:n nettotuonnin [18] yhteiskapasiteetti 22 800 MW ei edes mahdollistaisi sähköistyneimmän skenaarion 600 GW:n pikalataustehon tarvetta ja öinen latausteho 22 200 MW aiheuttaisi myös kestämatöntä ylikuormitusta. Yölatauksen tehontarpeet vuosina 2030, 2045 ja x vastaisivat teoreettisesta sähköntuotantokapasiteetista osuuksia 14,7 %, 84,1 % ja 126,1 %.

Realisoituvien tehontarpeiden laskeminen on kuitenkin haastavaa, sillä vaikka lataukseen olisi latauspisteen puolesta mahdollisuus, todellisuudessa kaikki sähköautojen omistajat eivät yleensä lataa autoaan joka vuorokausi. Fossiilittoman liikenteen tiekartan mukaan noin 60 % täyssähköautoista ja 85 % hybridiautoista ladataan kotona vähintään kolme kertaa viikossa [2, s. 18]. Optimaalisessa tapauksessa sähköautokannan lataustehontarve siis tasaantuu eri vuorokausille.

Laskennan perusteella sähköautojen yleistyminen lisää sähkönkulutusta. Toisaalta sähköauton hankkiminen ja lataamisen omaksuminen osaksi arkea voi lisätä autoilijan tietoisuutta omasta energiankulutuksesta [31], mikä parhaassa tapauksessa aiheuttaa energiatehokkuutta lisääviä muutoksia toimintatapoihin kaikilla arjen osa-alueilla. Tämä on kuitenkin epäsuora seuraus ja niin yksilökohtaista, ettei voida väittää, että sähköautojen yleistyminen lisää ihmisten energiatietoisuutta ja sitä kautta vähentäisi sähkönkulutusta.

Sähköautojen yleistyessä polttoaineen tarve tieliikenteessä vähenee. Fossiilittoman liikenteen tiekartassa on mainittu tavoite vuoteen 2045 mennessä lopettaa fossiilisten liikennepolttoaineiden myynti kotimaan liikenteeseen [2, s. 47]. Polttoainetuotannosta siis vapautuu jonkin verran sähköenergiaa sähkömarkkinoille. Toisaalta biopolttoaineiden ja biokaasun kysyntä ja tuotanto lisääntyvät, joten polttoaineteollisuuden kokonaisuudessaan tarvitsema sähköenergian määrä tuskin muuttuu. Näillä muutoksilla ei siis voida olettaa olevan merkittävää vaikutusta sähköautojen tarvitseman sähkön saatavuuteen.

5. TOIMENPITEITÄ HAASTEISIIN VASTAAMISEKSI

Henkilöautoliikenteessä sähkönkulutus kasvaa, kuten luvussa 4 todettiin. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään keinoja, joilla tähän voidaan reagoida.

5.1 Kulutushuippujen tasaaminen

Luvussa 4 esiteltyjen tulosten perusteella sähköautojen yleistyminen lisää hetkellistä sähkötehon tarvetta, mikäli kaikki autot ovat samanaikaisesti latauksessa. Sähköntuotantojärjestelmän ja sähköverkon ylikuormittumisen ehkäisemiseksi on siis tasattava näitä kulutushuippuja.

Älykäs lataus ja tehon säätely ovat jo alaluvussa 3.2 mainittuja keinoja, joilla voidaan vaikuttaa sähkön kysyntäpiikkeihin. Käytännössä nämä tarkoittavat latausjärjestelmään integroituja ohjelmia, jotka tunnistavat auton tehontarpeen ja säätelevät lataustehoa kulloisenkin sähkötilanteen mukaan. Esimerkiksi tyhjemmän akun omaava sähköauto saisi virtaa suuremmalla teholla kuin auto, jonka lataustarve ei ole yhtä akuutti. [10] [26] Toimivaksi kuormanhallinnaksi on myös havaittu sähköautojen latauksen ajoittaminen yöhön [25], jolloin yhteiskunnan muu sähkönkulutus on alhaisempi.

Latausten priorisoinnin käytännön toteutus vaatii kuitenkin pohdintaa, miten latausaikoja ohjailaan oikeudenmukaisesti. Tunnistaako latausjärjestelmä esimerkiksi hälytysajoneuvon tai auton, joka pitäisi saada ladataksi seuraavan yön matkustamista varten? Kaikkien autojen lataaminen vain öisin ei ole mahdollista esimerkiksi yötoissa käyvien näkökulmasta. Sähköautoilijoiden enemmistön latausajankohtaa voidaan ohjaila esimerkiksi sähkön hinnan reaaliaikaisella seurannalla; jos autoa ei ole pakko ladata juuri maanantain jälkeisenä yönä, sähkön kysynnän ollessa korkealla voisi tehdä päätöksen ladata auto vasta seuraavana yönä. Ikävimmässä tapauksessa tehonsäätely voi teoriassa aiheuttaa tilanteen, jossa pitkään latauksessa ollut auto ei olekaan saanut yhtään virtaa. Järjestelmän kehittämisessä on siis huomioitava päivälatausta tarvitseva kohde-ryhmä sekä muut erikoistilanteet. Hintaohjailun ja älykkään latausjärjestelmän lisäksi yksi keino vaikuttaa latausaikoihin voisi olla autokohtaiset luvat, jotka tosin aiheuttaisivat melko paljon työtä mahdollisiin hyötyihin nähden.

Kulutushuippujen tasaamisessa voidaan hyödyntää myös energiavarastoja. Niitä käsitellään seuraavassa alaluvussa.

5.2 Energiavarastot

Energiavarastojen avulla saadaan sähköntuotantoon joustavuutta, mikä on tärkeää etenkin uusiutuvien energianlähteiden yleistyessä. Toimiva energiavarastointijärjestelmä varastoi matalamman kysynnän aikana tuotetun sähkön ja mahdollistaa sen käyttöönoton suuremman kulutuksen aikana eli esimerkiksi sähköautojen lataustarpeiden vaatimissa.

Energiaa voidaan varastoida esimerkiksi pumpatun vesivoiman, paineilmavarastojen, superkondensaattoreiden sekä suprajohtavien magneettisten varastojen avulla [20, s. 92]. Myös polttoainejalostus, sähköakut ja lämpöakut ovat käytettyjä keinoja [32]. Vesivoiman pumppaus on yleinen varastointimenetelmä Euroopassa [20, s. 92], mutta Suomessa toteutukseen soveltuvat paikat ovat rajalliset. Ensimmäistä, vuosituotannoltaan noin 60–160 GWh:n pumppuvoimalaa suunnitellaan Pyhäsalmen käytöstä poistettuun kaivokseen. [30, s. 43] [33]

Useat varastointitekniikat soveltuvat vain lyhytaikaiseen energian varastointiin, mutta esimerkiksi vetyteknologian avulla voitaisiin varastoida kesällä tuotettua aurinkoenergiaa talven varalle [34]. Energiavarastojen kehittäminen ja integrointi osaksi sähköntuotantojärjestelmää ovat edellytys tulevaisuuden sähkömarkkinoille: Childin ja Breyerin tutkimuksen [35] mukaan täysin uusiutuvalle energialle perustuvassa Suomen energiajärjestelmässä 21 % sähkön kysynnästä katettaisiin varastoidulla sähköllä.

Sähköautot nähdään kulutusjoustop ja sähköjärjestelmän kannalta esimerkiksi Finnin tutkimuksessa [36] enemmän mahdollisuutena kuin ongelmana. Salokin toteaa, että sähköautojen yleistyminen mahdollisesti parantaa energian varastointimahdollisuuksia [20, s. 92]. Sähköautojen akut toimivat itsessään energiavarastoina, joita voidaan hetkittäisen sähkön ylituotannon tasaamisen lisäksi hyödyntää sähköenergian lähteenä esimerkiksi hätätilanteissa tai sähkökatkoissa [10], kuten myös arkisempien kulutushuippujen tasauksessa. Tällä niin sanotulla *vehicle-to-grid* -tekniikalla sähköautojen omistajat voivat saada taloudellista hyötyä ja pienentää omaa sähkölaskuaan [37], mikä on olennainen kannustin järjestelmän integroitumisessa käytäntöön. 100-prosenttisesti uusiutuvassa Suomen energiajärjestelmässä jopa 87 % varastoidun sähkön tarpeesta on mallinnettu katettavaksi sähköautojen akuilla [35].

5.3 Energiatehokkuus

Viinikaisen et al. mukaan tärkeä keino vastata lisääntyvään energiantarpeeseen on energiatehokas teknologia [38, s. 51]. Energiatehokkuudella voidaan säästää sähköä kulutusketjun jokaisessa vaiheessa sähkön tuotannosta siirron ja jakelun kautta ajoneuvo-tekniikkaan.

Esimerkiksi sähkön ja lämmön yhteistuotanto säästää energiaa [19] [39], sillä hukkalämpöä ei synny yhtä paljon kuin erillistuotannossa. Sähkön siirron kantaverkossa tapahtuvien energiahäviöiden määrä on Fingridin mukaan 1,2–1,4 TWh vuodessa [12], mikä on prosentuaalisesti alhainen määrä esimerkiksi Skotlannin 17 %:n siirtohäviöihin verrattuna [10]. Kun esimerkiksi sähköautojen latauspistokkeiden toiminta ja renkaiden vierintävastus on optimoitu, latauksessa tapahtuvat häviöt ja ajoakun sähkönkulutus saadaan minimoitua.

Energiatehokkuuden parantamisessa rajoittavana tekijänä ovat kustannukset. Esimerkiksi sähkönsiirtohäviöitä ei saada kokonaan poistettua, sillä joissakin tilanteissa on taloudellisesti kannattavampaa tuottaa ylimääräistä hukkasähköä kuin vaihtaa esimerkiksi voimajohto tai jakelumuuntaja entistä tehokkaamman teknologian mukaiseksi. Suomessa pitkät etäisyydet tuovat tähän myös omat haasteensa. Ajoneuvotekniikan kehittämisessäkin kustannusten ja toiminnan optimoinnin merkitys näkyy: esimerkiksi tehokkaampi akku on yleensä painavampi, eikä siis automaattisesti lisää ajoneuvon energiatehokkuutta. Myös hintojen pitäminen kuluttajille sopivana on olennaista.

5.4 Sähköntuotantojärjestelmän kehittäminen

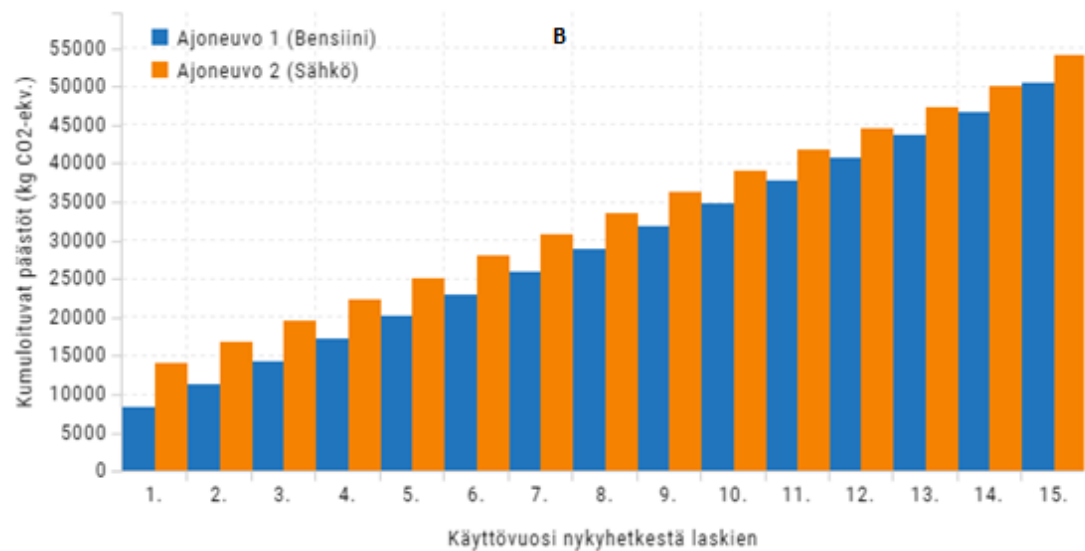
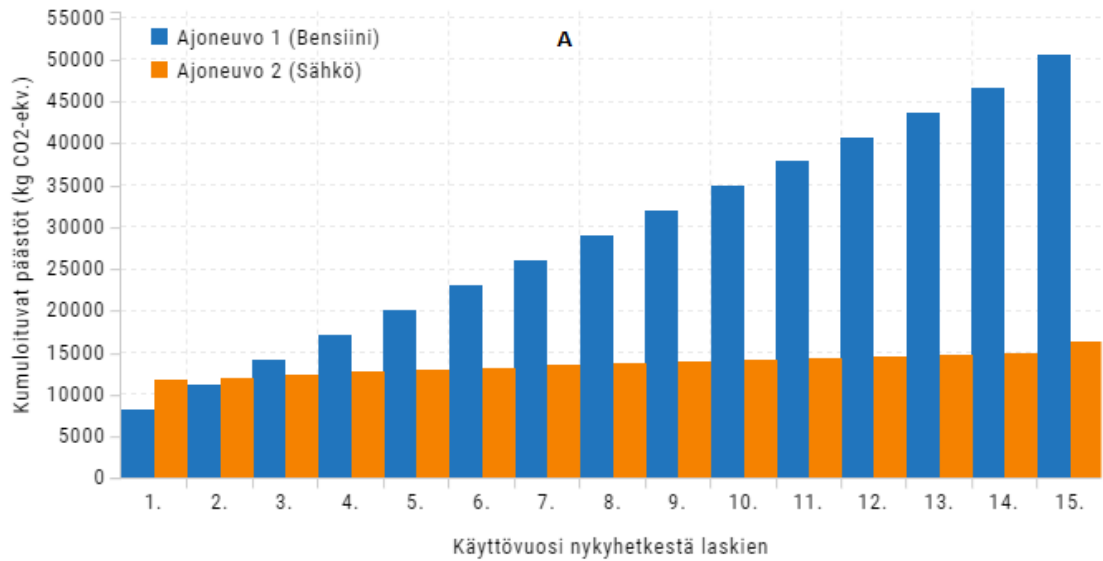
Vaikka vuotuinen sähköntuotanto ylittäisi kokonaiskysynnän, voi silti esiintyä yksittäisiä hetkiä, jolloin sähköntarvetta ei pystytä kattamaan [25]. Tämä korostaa kulutusjoukon merkitystä. Sähkön kysynnän ylittäessä tarjonnan kulutuksen vähentäminen – sekä hetkellisesti että pidemmällä ajanjaksoilla – on sähköntuotannon lisäämistä kustannustehokkaampaa. Talvikaudella 2021–22 tehoreservijärjestelmässä oli käytössä 611 MW sähkötehoa mahdollisten yllättävien tehohippujen kattamista varten [40]. Kulutushuippujen tasaaminen on olennaista, koska pohjatuotannon päälle nopeasti käynnistettävät tehokkaat tuotantomuodot ovat kalliita [41]. Luonnollisesti myös uuden voimalaitoskapasiteetin rakentaminen vaatii taloudellisia resursseja.

Uusien sähköntuotantolaitosten tarpeen säännöllinen kartoittaminen on kuitenkin osa kestävästä energiajärjestelmän hallintaa. Kotimaisen sähköntuotannon varmistaminen tulevaisuudessa on tärkeää: kuten Viinikainen et al. [38, s. 50] toteaa, etenkin kuivina vuosina sähkönsaanti voisi olla uhattuna, mikäli omaa voimalaitoskapasiteettia ei ole

käytettävissä, sillä yli puolet pohjoismaisten sähkömarkkinoiden sähköstä tuotetaan vesivoimalla [38, s. 48]. Parempi sähköomavaraisuus luo myös vakautta.

Kesällä 2022 kaupallisen tuotannon aloittava Olkiluoto 3 kasvattaa Suomen sähköntuotantoa 1600 MW vuodessa eli noin 12 TWh [42]. Tämä on merkittävä osuus sähkönkulutuksesta. Tällä hetkellä käynnissä olevia voimalaitosprojekteja on esimerkiksi Pyhäjoen ydinvoimalaitos Hanhikivi 1, joka tuottaisi noin 10 % sähköntarpeesta [43] valmistuttuaan vuonna 2029 [44]. Hankkeen suunniteltu eteneminen on kuitenkin epävarmaa poliittisen tilanteen takia [45]. Lähivuosina vesi- ja tuulivoimaa on tulossa lisää ja etenkin tuulivoimaloiden rakentaminen on vilkasta. Esimerkiksi vuoden 2022 aikana tuulivoimakapasiteetti kasvaa 1341 MW. [40] Voimalaitoksia myös poistuu käytöstä tasaisin väliajoin: esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitosyksiköiden käyttöluvut päättyvät 2027 ja 2030 [46], ellei vuoteen 2050 asti haettua jatkolupaa [47] myönnetä.

Uusiutuvalla energialla on sähköntuotannossa merkittävä rooli: jos sähköautojen käyttämä sähkö tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, liikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ei onnistu halutulla tavalla. Ydinvoima ei ole uusiutuvaa, mutta hiilidioksidivaapana sähköntuotantomuotona edistää liikenteen ilmastoystävällistä sähköistymistä. Kuva 5 havainnollistaa sähkö- ja bensiiniauton kumuloituvia päästöjä, kun sähköntuotannon suorat päästöt on määritelty arvoon 0,096 kg CO₂-ekv./kWh (A) ja 1 kg CO₂-ekv./kWh (B). Jälkimmäisessä tapauksessa sähköauton elinkaaripäästöt ylittävät bensiiniauton päästöt.



Kuva 5: Sähkö- ja bensiiniautojen elinkaaripäästöt, kun sähköntuotannon päästöt ovat 0,096 kg CO₂-ekv./kWh (A) ja 1 kg CO₂-ekv./kWh (B) [48].

Suunnitelmat uusista tuuli-, vesi- ja ydinvoimaloista siis tukevat hiilidioksidivapaan sähkön käyttöä myös sähköautoilussa. Kuten luvussa 3.2 tuotiin esille, esimerkiksi tuulivoiman yleistymisen yhdessä sähköautojen kanssa tasapainottaa sähköntuotantoa [25].

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähköajoneuvojen yleistymisen lisää sähköenergian ja sähköntuotannon tarvetta. Yhteenveto numeerisista tuloksista on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Keskeiset tulokset.

	2022	2030	2045	x
Täyssähköautojen lukumäärä	22000	350000	2000000	3000000
Hybridisähköautojen lukumäärä	77000	350000	500000	0
Sähköautojen kokonaissähköntarve (GWh)	201,8	1515,8	5755,3	7179,8
Osuus 2021 tuotetusta sähköstä 69 TWh (%)	0,3	2,2	8,3	10,4
Pikalataustehon tarve (MW)		700	4000	600000
Yölataustehon tarve (MW)		2590	14800	22200
Yölataustehon osuus vuoden 2019 teoreettisesta sähköntuotantokapasiteetista 17 600 MW (%)		14,7	84,1	126,1

Tulosten perusteella tämän hetken sähkön vuosituotantoon 69 TWh ja teoreettiseen tuotantokapasiteettiin 17 600 MW nähden realistinen sähköautojen määrä on alle 350 000 täyssähköautoa ja alle 350 000 hybridiautoa. Kokonaissähköntarve ja lataustehot on laskettu keskimääräisten lähtöarvojen avulla, mikä vaikuttaa tulosten luotettavuuteen, mutta ne antavat suuntaa todellisesta kehityskulusta. Myös sähköautojen lukumäärät tulevana vuosina saattavat poiketa jonkin verran valtioneuvoston asettamista tavoitemääristä. Voidaan kuitenkin sanoa, että nykyinen sähköntuotantokapasiteetti ei tällaisenaan mahdollista liikenteen laajempaa sähköistymistä.

Ensisijaiset toimenpiteet sähköautojen laajemman yleistymisen mahdollistamiseksi ovat sähkön kulutushuippujen tasaaminen esimerkiksi lataustehojen säätelyn avulla, energia- varastojen kehittäminen ja integrointi osaksi sähköjärjestelmää sekä energiatehokkuuden kehittäminen niin sähkön tuotannossa, jakelussa kuin ajoneuvotekniikassakin. Näiden lisäksi on syytä suunnitella uutta sähköntuotantokapasiteettia. Hiilidioksidivapaisiin energianlähteisiin perustuvien tuotantomuotojen painottaminen uusissa hankkeissa on ehdotonta, sillä niiden rooli päästöjen vähentämisessä on kiistaton.

Sähköautot ovat vain yksi tulevaisuuden sähkönkulutusta lisäävä tekijä. Muu sähköinen liikenne, digitalisaatio ja teollisuuden luopuminen fossiilista polttoaineista nostavat säh-

köenergian kysyntää. Sähköautot parantavat osaltaan energian varastointimahdollisuuksia ja niiden yleistyminen nähdään useassa tutkimuksessa positiivisena asiana sähköntuotannon joustavuuden kannalta.

Tulevaisuuden kannalta olennaisinta on kehittää energiavarastoja, *vehicle-to-grid* -tekniikkaa sekä älykästä latausverkkoa ja niiden integroitumista sähköntuotantojärjestelmään. Sähköautojen yleistymiseen liittyy sähköntuotannon lisäksi muitakin pohdittavia asioita, kuten energiapolitiikan, kiertotalouden ja sosioekonomian haasteita.

LÄHTEET

- [1] ”Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet | Ajankohtaista | Euroopan parlamentti”, 3. elokuuta 2018. Viitattu: 8. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://www.euro-parl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180305STO99003/hiilidioksidipaastoja-vahentamassa-eu-n-tavoitteet-ja-toimet>
- [2] S. Jääskeläinen, ”Fossiilittoman liikenteen tiekartta”. Liikenne- ja viestintäministeriö, 2021. Viitattu: 8. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163258/LVM_2021_15.pdf?sequence=1
- [3] E. Korhonen, V. Linja-aho, J. Mäkinen, ja M. Orrberg, *Sähköautot ja latausjärjestelmät*. Espoo: Sähkötieto ry, 2019.
- [4] M. Kara, S. Helynen, L. Mattila, S. Viinikainen, M. Ohlström, M. Lahnalampi-Vesivalo, M. Hongisto, M. Ruska, I. Savolainen, S. Syri, S. Vuori, J. Hämäläinen, E. Kurkela, M. Kytö, J. Laurikko, T. Mäkinen, E. Peltola, R. Rosenberg, K. Sipilä, T. Vanttola, A. Lehtilä, *Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset*. Edita Prima Oy, 2004.
- [5] ”Kysyntäjousto”, *Energiatiedotus*. Viitattu: 4. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kulutusjousto>
- [6] Sähköjänis, ”Sähköautoilusta | STEK”, 17. syyskuuta 2018. Viitattu: 9. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://stek.fi/energiatehokkuutta-sahkolla/sahkoautoilu>
- [7] ”Liikenteen päästöt ja energiankulutus”, *Motiva*. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/perustietoa_liikenteesta/liikenteen_paastot_ja_energiankulutus
- [8] ”Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus | Liikennefakta”. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://www.liikennefakta.fi/fi/ymparisto/liikenteen-kasvihuonekaasupaastot-ja-energiankulutus>
- [9] ”Liikenteen energiankulutus - Autoalan Tiedotuskeskus”. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://www.aut.fi/tilastot/liikenteen_energiankulutus
- [10] G. Milev, A. Hastings, and A. Al-Habaibeh, ”The environmental and financial implications of expanding the use of electric cars - A Case study of Scotland”, *Energy Built Environ.*, vol. 2, pp. 204–213, 2021.
- [11] ”Valtakunnallinen henkilöliikennetutkimus | Traficom”. Viitattu: 9. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/julkaisut/valtakunnallinen-henkiloliikennetutkimus?toggle=Yleiskuva%20suomalaisista%20liikkumisesta>
- [12] ”Häviösähkö”, *Fingrid*, 19. toukokuuta 2017. Viitattu: 15. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/sahkon-siirtovarmuus/haviosahko/>
- [13] ”Sähköautojen määrän kehitys - Autoalan Tiedotuskeskus”. Viitattu: 16. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys
- [14] S. Lahtinen, ”Tilastokeskus - Moottoriajoneuvokanta 2020”. Viitattu: 9. maaliskuuta 2022. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/mkan/2020/mkan_2020_2021-02-26_tie_001_fi.html

- [15] M. Rapo, "Tilastokeskus - Väestöennuste 2021–2070". Viitattu: 9. maaliskuuta 2022. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/vaenn/2021/vaenn_2021_2021-09-30_tie_001_fi.html
- [16] "Energiavuosi 2021 - Sähkö", *Energiateollisuus*. Viitattu: 23. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2021_-_sahko.html
- [17] T. Myllymaa, "Tilastokeskus - Sähkön ja lämmön tuotanto 2020". Viitattu: 23. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html
- [18] "National Report 2019 to the Agency for the Cooperation of Energy Regulators and to the European Commission". Energy Authority Finland, 14. heinäkuuta 2020. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/13026619/National+Report+2020+Finland.pdf/7fb2df66-cf5e-ecf5-22a2-635077b6297a/National+Report+2020+Finland.pdf?t=1594791637682>
- [19] "Sähköntuotanto", *Energiateollisuus*. Viitattu: 31. tammikuuta 2022. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto>
- [20] M. Salo, *Energiakääänne: Saksan ja Suomen energiapolitiittiset valinnat*. Helsinki: Vihreä Sivistysliitto ry, 2015.
- [21] "Johdanto sähkömarkkinoihin", *Fingrid*, 25. huhtikuuta 2019. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/>
- [22] "Säätövoima", *Energiateollisuus*. Viitattu: 24. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima>
- [23] "Pohjoismainen energiayhteistyö", *Energiateollisuus*. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/pohjoismainen_energiayhteistyö
- [24] "Sähkömarkkinat - Työ- ja elinkeinoministeriön verkkopalvelu", *Työ- ja elinkeinoministeriö*. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://tem.fi/sahkomarkkinat>
- [25] S. Bellekom, R. Benders, S. Pelgröm, and H. Moll, "Electric cars and wind energy: Two problems, one solution? A study to combine wind energy and electric cars in 2020 in The Netherlands", *Energy*, vol. 45, pp. 859–866, 2012.
- [26] "Sähköinen liikenne -tilannekatsaus 2021 Q4". Sähköinen liikenne ry, 2. maaliskuuta 2022. Viitattu: 8. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/inline-files/2021%20Q4%20Sa%CC%88hko%CC%88inen%20liikenne%20tilannekatsaus%202022%2002%2003%20%20jaettava.pdf>
- [27] "TVO - Teollisuuden Voima Oyj:n vuosikertomus 2021 on julkaistu". Viitattu: 16. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.tvvo.fi/ajankohtaista/tiedotteetporssitiedotteet/2022/teollisuudenvoimaoyjnvuosikertomus2021onjulkaistu.html>
- [28] "Seudullinen yleissuunnitelma | Tampereen Ratikka". Viitattu: 16. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.tampereenratikka.fi/suunnittelu/seudullinen-suunnittelu/>
- [29] Turun kaupunki, "Raitiotie", *Turku.fi*, 24. maaliskuuta 2015. Viitattu: 16. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.turku.fi/raitiotie>

- [30] AFRY, "Finnish Energy - Low carbon roadmap". 1. kesäkuuta 2020. Viitattu: 22. maaliskuuta 2022. Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiesobW5Nn2AhXxoosKHaTiAhUQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F5064%2FTAustaraportti_-_Finnish_Energy_Low_carbon_roadmap.pdf&usg=AOvVaw3axFMRuceb3uY9bomzknqA
- [31] N. Ortar and M. Ryghaug, "Should All Cars Be Electric by 2025? The Electric Car Debate in Europe", *Sustain*, vol. 11, 1868, 2019.
- [32] H. Tolvanen, "Päästöjen hallinta energiantuotannossa 3", 16. maaliskuuta 2021.
- [33] "Pyhäsalmen pumppuvoimalaitoshankkeelle tulossa uusiutuvan energian investointitukea 26,3 miljoonaa euroa", *Valtioneuvosto*, 2. syyskuuta 2021. Viitattu: 22. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/pyhasalmen-pumppuvoimalaitoshankkeelle-tulossa-uusiutuvan-energian-investointitukea-26-3-miljoonaa-euroa>
- [34] A. M. Elberry, J. Thakur, and J. Veysey, "Seasonal hydrogen storage for sustainable renewable energy integration in the electricity sector: A case study of Finland", *J. Energy Storage*, vol. 44, 103474, 2021.
- [35] M. Child and C. Breyer, "The Role of Energy Storage Solutions in a 100% Renewable Finnish Energy System", *Energy Procedia*, vol. 99, pp. 25–34, 2016.
- [36] P. Finn, C. Fitzpatrick, and D. Connolly, "Demand side management of electric car charging: Benefits for consumer and grid", *Energy*, vol. 42, pp. 358–363, 2012.
- [37] M. Wang and M. T. Craig, "The value of vehicle-to-grid in a decarbonizing California grid", *J. Power Sources*, vol. 513, 230472, 2021.
- [38] S. Viinikainen, S. Soimakallio, E. Ikonen, J. Manninen, S. Helynen, S. Kärkkäinen, K. Sipilä, P. McKeough, J. Hakala, T. Pekkarinen, K. Edelman, L. Holappa, H. Holmberg, A. Roschier, S. Salo-Asikainen, P. Tuomaala, H. Pihala, J. Laurikko, E. Pursiheimo, *Energy use: Visions and Technology, Opportunities in Finland*. Edita Prima Ltd., 2007.
- [39] "Energiatehokkuus - Työ- ja elinkeinoministeriön verkkopalvelu", *Työ- ja elinkeinoministeriö*. Viitattu: 25. helmikuuta 2022. Saatavissa: <https://tem.fi/energiatehokkuus>
- [40] "Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2021". Energiavirasto, 2. joulukuuta 2021. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/S%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuus+vuonna+2021.pdf/6f44505f-e004-25a4-78b7-1ff1a1610e8e/S%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuus+vuonna+2021.pdf?t=1638513974909>
- [41] E. Seppänen, "Tampereen ilmastotyö ja päästölaskenta", 14. helmikuuta 2022.
- [42] "TVO - OL3". Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol3.html>
- [43] "Hanhikivi 1", *Hanhikivi 1*. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.hanhikivi1.fi/>

- [44] "Tietoa Hanhikivi 1 -hankkeesta", *Hanhikivi 1*. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.hanhikivi1.fi/tietoa-hankkeesta>
- [45] "Fennovoiman kannanotto Ukrainan tilanteeseen 15.3.", *Hanhikivi 1*, 15. maaliskuuta 2022. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.hanhikivi1.fi/artikkelisivu/fennovoiman-kannanotto-ukrainan-tilanteeseen-153>
- [46] "Loviisa 1 ja 2 - Työ- ja elinkeinoministeriön verkkopalvelu", *Työ- ja elinkeinoministeriö*. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://tem.fi/loviisa-1-ja-2-kayttolupa-2007-2030>
- [47] "Loviisan ydinvoimalaitos: Käyttölupahakemus". Fortum, 2021. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/113721784/K%C3%A4ytt%C3%B6lupahakemus_Voimalaitos_FI_saavutettava.pdf/c927f9dc-f422-ce56-b02d-07e713d29a66/K%C3%A4ytt%C3%B6lupahakemus_Voimalaitos_FI_saavutettava.pdf?t=1647593828206
- [48] "Autokalkulaattori", *Suomen ilmastopaneeli*. Viitattu: 29. maaliskuuta 2022. Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/autokalkulaattori/>

LIITE 1: LASKENTA

Sähköauton keskimääräinen kulutus	C	20 kWh/100 km			Kandidaatintyö			
Ajokilometrit vuorokaudessa		32,3 km			Sähköautojen yleistymisen vaikutus sähköntuotantoon Suomessa			
Ajokilometrit vuodessa (täyssähkö)	ADT_BEV	11790 km			Ella-Maria Kortelahti			
Sähköiset ajokilometrit hybridillä vähintään		7300 km			3/2022			
Sähköiset ajokilometrit hybridillä enintään		11790 km						
Sähköiset ajokilometrit hybridillä vuodessa n.	ADT_PHEV	9545 km						
Autokohtainen sähköenergia (täyssähkö)	E_BEV	2358 kWh	Kaava (1)					
Sähköverkon siirtohäviö		1,5 %						
Autokohtainen tuotettava sähkö (täyssähkö)	E_tod,BEV	2393 kWh	Kaava (2)					
Autokohtainen sähköenergia (hybridi)	E_PHEV	1909 kWh	Kaava (1)					
Autokohtainen tuotettava sähkö (hybridi)	E_tod,PHEV	1938 kWh	Kaava (2)					
Täyssähköauton pikalatausteho vähintään		50 kW						
Täyssähköauton pikalatausteho enintään		350 kW						
Täyssähköauton pikalatausteho keskimäärin	P_pika	200 kW						
Täyssähköauton hidaslatausteho	P_yö	7,4 kW						
Vuosi	2022	2030	2045	x	2020	Tuotettu sähkö 2021	69 TWh	
Täyssähköautojen lukumäärä väh.	22000	350000	2000000	3000000	10000	Sähköntarpeen osuus		
Hybridisähköautojen lukumäärä	77000	350000	500000	0	45000	2030	0,021968	
Täyssähköautoja pikalatauksessa		3500	20000	3000000		2045	0,083411	
Täyssähköautoja yölatauksessa		350000	2000000	3000000		x	0,104055	
Täyssähköautojen kokonaissähköntarve (GWh)	52,7	837,6	4786,5	7179,8	23,9			
Hybridiautojen kokonaissähköntarve (GWh)	149,2	678,2	968,8	0,0	87,2			
Sähköntarve yhteensä (GWh)	201,8	1515,8	5755,3	7179,8	111,1			
Pikalataustehon tarve (MW)		700	4000	600000				
Yölataustehon tarve (MW)		2590	14800	22200				

	2022	2030	2045	x
Täyssähköautojen lukumäärä	22000	350000	2000000	3000000
Hybridisähköautojen lukumäärä	77000	350000	500000	0
Sähköautojen kokonaissähkötarve (GWh)	201,8	1515,8	5755,3	7179,8
Osuus 2021 tuotetusta sähköstä 69 TWh (%)	0,3	2,2	8,3	10,4
Pikalataustehon tarve (MW)		700	4000	600000
Yölataustehon tarve (MW)		2590	14800	22200
Yölataustehon osuus vuoden 2019 teoreettisesta sähköntuotantokapasiteetista 17 600 MW (%)		14,7	84,1	126,1