

Etti Saariniemi

SÄHKÖAUTOJEN LATAUKSEN VAIKUTUKSET KAUPUNKIVERKKOYHTIÖN SÄHKÖNJAKELUVERKKOON

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta
Tarkastaja: Dosentti Antti Rautiainen
Joulukuu 2024

TIIVISTELMÄ

Etti Saariniemi: Sähköautojen latauksen vaikutukset kaupunkiverkkoyhtiön sähköjakeluverkkoon
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan DI-ohjelma
Joulukuu 2024

Sähköautot yleistyvät sekä katukuvassa että maanteilla. Ne ovat yksi suuri komponentti ilmastomuutoksen vastaisessa työssä. Sähköautojen yleistymiseen on vaikuttanut muun muassa akkujen alentunut hinta, pienemmät käyttökustannukset verrattuna polttomootoriajoneuvoihin sekä hyvät käyttökokemukset. Toisaalta vielä puutteellinen latausinfrastruktuuri ja latauksen kesto nähdään negatiivisina asioina.

Sähköautot voidaan nähdä jakeluverkon näkökulmasta kuormana, sähkövarastona tai joustavuutta tuovana komponenttina. Ongelmaa jakeluverkkoon tuo etenkin suurta tehoa ottavat kuormat. Latauspisteeseen laitettaessa sähköauto voi olla tämän kaltainen kuorma. Sähkövarastona ja joustokomponenttina sähköauto voi tukea jakeluverkkoa suuren tehokuormituksen aikana, rajoittaen omaa kuormitusta.

Työssä tarkastellaan jakeluverkon lisääntyvää kuormitusta sähköautojen latauksen vaikutuksesta. Kuormitus saadaan mallinnettua verkkotietojärjestelmään latauksen kuormituskäyrien, lisääntyvän energian siirron ja ennustetun sähköautojen määrän avulla. Ennusteet sähköautojen määrästä tehdään vuosille 2030 ja 2040 perus ja nopealla skenaariolla. Nopeassa skenaariossa sähköautojen määrä on suurempi erilaisten kannusteiden vuoksi. Kannusteet ovat esimerkiksi poliittisesta tai ympäristönäkökulmasta laadittuja. Näitä ovat esimerkiksi autoveron poistaminen sähköautoilta, latauspisteiden rakentamisen tukeminen tai määräykset sähköautojen tulevaisuuden tavoitteista.

Sähköauton latauskuorma lisätään työn sen hetkiseen jakeluverkon tilanteeseen verkkotietojärjestelmään, ja tehonjakolaskennan tulosten perusteella arvioidaan kuormitusta. Kuormitusta käsitellään kuormitusasteen ja jännitteenaleneman kautta. Jakeluverkon kuormitusta tarkastellaan keskijänniteverkossa päämuuntajilla ja keskijännitelähdöillä sekä pienjänniteverkossa jakelumuuntajilla, pienjännitelähdöillä ja liittymillä. Keskijänniteverkolla tarkastellaan lähemmin yhtä keskijännitelähtöä ja pienjänniteverkossa viittä erilaista muuntopiiriä.

Keskijänniteverkossa korostuu kuormitusasteen nousu, kun taas pienjänniteverkossa jännitteenalenema, koska tarkasteltavat kohteet ovat verkon ääripisteissä. Viisi eri muuntopiiriä sijoituivat erilaisiin ympäristöihin ja alueisiin, esimerkiksi haja-asutusalueelle Teiskoon, taajama-, keskusta- ja teollisuusalueelle. Muutamissa tapauksissa myös 100 % kuormitusaste ylittyi etenkin jakelumuuntajilla. Jakelumuuntaja oli suuren virrankulun takia yksi rajoittava komponentti muuntopiireissä. Kuormitusta tarkastellaan myös siirtämällä kotilataus tapahtuvaksi täysin yöaikaan. Huipputehot alenevat silloin merkittävästi.

Kuormitusta pystytään hallitsemaan ja rajoittamaan jakeluverkkoyhtiön kannusteilla. Kannusteita voi olla esimerkiksi joustosta saatava taloudellinen hyöty tai tehotariffi, jolla asiakas voi tehon hetkellistä kulutusta pienentämällä säästää siirtomaksuissa. Muutamissa tutkimuksissa on saatu hyviä tuloksia asiakkaille annetuissa joustomahdollisuuksissa.

Älykkäät latausratkaisut ovat sähköajoneuvoilla joustavuutta mahdollistava toiminto. Älykkäitä latausratkaisuja on esimerkiksi V2G (vehicle-to-grid), V2H (vehicle-to-home) ja latauksen ajoittaminen esimerkiksi pientuotannon, halvan pörssihinnan tai taustakuorman mukaan.

Avainsanat: Sähköauto, lataus, jakeluverkko, kuormitusaste, jännitteenalenema, älykkäät latausjärjestelmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Etti Saariniemi: The effects of electric vehicle charging on the distribution network of the urban grid operator
Master of Science Thesis
Tampere University
Degree Programme in Electrical Engineering, MSc (Tech)
December 2024

Electric vehicles are becoming increasingly common on city streets and roads. They represent a significant component in the fight against climate change. The rising popularity of electric vehicles can be attributed to factors such as the decreasing cost of batteries, lower operating costs compared to combustion engine vehicles, and positive user experiences. On the other hand, charging infrastructure and the time required for charging are seen as negative aspects.

From the perspective of the distribution network, electric vehicles can be viewed as a load, an energy storage or a component that enhances grid flexibility. The main challenge for the distribution network comes from high-power loads, which electric vehicles can represent when connected to a charging station. As an energy storage and flexibility component, an electric vehicle can support the distribution network during periods of high-power demand by limiting its own power consumption.

The study examines the increasing load on the distribution network caused by the impact of electric vehicle charging. The load is modeled in the network information system using charging load profiles, increased energy transmission, and projected electric vehicles prediction adoption rates. Based on the predictions, basic and fast scenarios have been created for the years 2030 and 2040. In the fast scenario, a higher number of EVs is anticipated due to various incentives, such as the removal of vehicle taxes for electric vehicles, subsidies for building charging infrastructure, or regulations on future targets for electric vehicles.

The electric vehicle charging load is added to the current state of the distribution network in the network information system (NIS), and load flow analysis is used to evaluate the results. The load is assessed based on the load factor and voltage drop. The study focuses on medium voltage networks at primary substations and MV-feeders, as well as low-voltage networks at distribution transformers, LV-feeders, and customers connection point. On the medium-voltage network, one MV-feeder is examined in detail, while on the low-voltage network, five areas fed from transformers are analyzed.

In the medium voltage network, the increase in load factor becomes significant, while in the low voltage network, voltage drops are more pronounced because examined points being located at the extremities of the network. Five different areas fed from transformers, each located in various environments and regions, such as the rural area of Teisko, suburban, urban, and industrial areas. In some cases, particularly with distribution transformers, the load factor exceeded 100%. The flow of high current made the distribution transform a limiting component. The load was also analyzed under the assumption that home charging occurs entirely during nighttime hours, resulting in a significant reduction in peak power demands.

The load can be managed and mitigated with incentives provided by the distribution network operator. These incentives might include financial benefits from flexibility or a demand tariff that allows customers to reduce their transfer fees by lowering their peak power usage. Some studies have shown positive results with flexibility options offered to customers.

Smart charging solutions offer electric vehicles the possibility for flexibility. Examples of smart charging include V2G (vehicle-to-grid), V2H (vehicle-to-home), and scheduling charging based on factors such as self-generated energy, low market prices or background loads.

Keywords: Electric vehicle, charging, distribution grid, load factor, voltage drop, smart charging

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen Energia Sähköverkko Oy:lle. Kiitos yhtiölle aiheesta ja luottamuksesta.

Kiitokset ohjaajalleni Ari Unkurille sekä yliopistolta ohjaajalleni professori Pertti Järventaustalle antoisista keskusteluista ja neuvoista. Kiitos Antti Rautiaiselle sähköautojen kuormituskäyrien antamisesta työn pohjaksi sekä hyvistä neuvoista. Kiitos lisäksi järjestelmäasiantuntija Hannu Wallinille, joka on auttanut ja selvittänyt monia järjestelmällisiä ongelmia työn yhteydessä. Kiitosta haluan antaa myös koko työyhteisölle jatkuvista tsempeistä.

Suuri kiitos myös omalle tukiverkostolleni. Jatkuva tuki ja ymmärrys on auttanut työn eteenpäin saattamisessa.

Tampereella, 19.12.2024

Etti Saariniemi

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset	2
2. SÄHKÖAUTOT JA NIIDEN LATAUSTAVAT.....	4
2.1 Sähköauto	4
2.1.1 Täyssähköauto	5
2.1.2 Hybridiauto	5
2.1.3 Ladattava hybridiauto	6
2.2 Sähköauton lataustavat.....	6
2.2.1 Lataustapa 1: Kevyiden sähköajoneuvojen lataus	7
2.2.2 Lataustapa 2: Hidas lataus	8
2.2.3 Lataustapa 3: Puolinopea peruslataus	8
2.2.4 Lataustapa 4: Pikalataus.....	8
2.2.5 Induktiivinen lataus.....	9
2.2.6 Hidas tasavirtalataus (DC-lataus)	10
2.2.7 Lataustapojen yhteenveto	10
2.3 Latausinfrastruktuuri.....	11
2.3.1 Sähköautopaikat kiinteistöissä.....	13
3. SÄHKÖAUTOKANTA NYKYPÄIVÄNÄ JA TULEVAISUUDESSA.....	15
3.1 Sähköautokannan tulevaisuuden ennusteet.....	17
3.2 Sähköautokannan kasvu TAES:n alueella	20
3.3 Tutkimuksen skenaariot.....	22
4. KUORMITUKSEN MUUTOS	26
4.1 Kuormituksen mallinnus	26
4.2 Sähköautojen latauksen kuormituskäyrät.....	26
4.3 Sähköauton latauksen oletukset	27
4.4 Tuntitehosarjojen muutos indeksisarjoiksi	29
4.5 Energian siirron lisäys	33
5. SÄHKÖAUTON LATAUSKUORMAN MALLINNUS	36
5.1 Tampereen Energia Sähköverkko Oy.....	37
5.2 Verkkotietojärjestelmä.....	38
5.3 Mallinnuksen algoritmi.....	38
6. VAIKUTUKSET SÄHKÖNJAKELUVERKKOON	42
6.1 Latauskuorman vaikutukset koko jakeluverkkoon.....	43
6.2 Keskijänniteverkon vaikutukset.....	44
6.2.1 Päämuuntajat	44
6.2.2 Keskijännitelähdöt	46
6.3 Pienjänniteverkon vaikutukset	49
6.3.1 Jakelumuuntajat	49
6.3.2 Pienjännitelähdöt.....	52
6.3.3 Liittymät	54

6.3.4 Pienjänniteverkon muuntopiirien tarkastelua.....	57
6.3.5 Keskijännitelähdön tarkastelu	68
6.3.6 Sähköauton kotilatauksen muutos yöaikaan	69
7.TULOSTEN POHDINTAA.....	77
7.1 Kuormanhallinta ja sähköauton lataus.....	77
7.1.1 Yksisuuntainen älykäs lataus	77
7.1.2 Kaksisuuntainen lataus, Vehicle-to-grid V2G ja vehicle-to-home V2H.....	79
7.1.3 Pientuotannon ja akkujen hyödyntäminen latauksessa	80
7.1.4 Latauksen vaikutukset Iso-Britanniassa	81
7.2 Mallinnuksessa havaitut ongelmat ja haasteet	82
7.3 Tulevaisuudessa pohdittavia asioita sähköautoihin liittyen	83
8.YHTEENVETO	85
LÄHTEET.....	87

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Latausaikoja 100 km toimintamatkan lataamiseen. [3].....	10
Kuva 2.	Tampereen sähköverkon alueen julkiset latauspaikat [19]. TAES jakeluverkkoalueen ulkopuoliset latauspisteet sumennettuna.	13
Kuva 3.	Liikennekäytössä olevat sähkökäyttöiset henkilöajoneuvot Manner-Suomessa vuosina 2017–2024/Q3. [26].....	16
Kuva 4.	Tavoite autokannan kehitykselle käyttövoimittain toimenpideohjelman mukaisesti vuosille 2020–2050 [29].	19
Kuva 5.	Tampereen alueen ensirekisteröinnit käyttövoimittain vuosina 2015–2024. [31].....	21
Kuva 6.	Sähkökäyttöisten henkilöautojen määrän kasvu molemmilla skenaarioilla.	24
Kuva 7.	Perusskenaarion määrittelemä täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrän kasvu.	24
Kuva 8.	Nopean skenaarion määrittelemä täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrän kasvu.	25
Kuva 9.	Omakoti- ja paritalolatauksen sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.	30
Kuva 10.	Kerros- ja rivitalolatauksen sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.	30
Kuva 11.	Työpaikkalatauksen sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.	31
Kuva 12.	Julkisen lataustyyppin 22 kW sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.	31
Kuva 13.	Julkisen lataustyyppin 150 kW sisäiset indeksisarjat ja hajonnat.	32
Kuva 14.	Energian siirron lisäys vuosina 2022–2040 perus ja nopealla skenaariolla.	35
Kuva 15.	Lähtötietojen ja eri vaiheiden yhteydet työn mallinnuksessa.	36
Kuva 16.	Tampereen Energia Sähköverkon jakeluverkko.	37
Kuva 17.	Käyttöpaikalle lisättävän vuosienenergian määrittäminen.	41
Kuva 18.	Mallinnuksen vaiheet.	41
Kuva 19.	Sähkönjakeluverkon tehokuvaaja väliltä 1.8.2023-31.7.2024 nykytilanteessa ja eri skenaarioilla.	43
Kuva 20.	Taajama- ja keskusta-alueen keskijänniteverkon kuormitusasteet eri skenaarioilla.	47
Kuva 21.	KJ-johtolähtöjen kuormitusaste eri skenaarioilla.	48
Kuva 22.	KJ-johtolähtöjen jännitteenalenemat eri skenaarioilla.	48
Kuva 23.	Jakelumuuntajien kuormitusaste eri skenaarioilla.	50
Kuva 24.	Jakelumuuntajien jännitteenalenema eri skenaarioilla.	50
Kuva 25.	Ylikuormittuneiden jakelumuuntajien määrä muuntajakoittain.	52
Kuva 26.	Pienjännitelähtöjen kuormitusasteet eri skenaarioilla.	53
Kuva 27.	Pienjännitelähtöjen jännitteenalenemat eri skenaarioilla.	53
Kuva 28.	Liittymien kuormitusaste eri skenaarioilla.	55
Kuva 29.	Liittymien jännitteenalenema eri skenaarioilla.	55
Kuva 30.	Taajama-alueen muuntopiirin 1 tehokuvaaja vuoden ajalta.	58
Kuva 31.	Kuormitusasteen muutos muuntopiirissä 1 eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)	59
Kuva 32.	Jännitteenaleneman muutos muuntopiirissä 1 eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)	59
Kuva 33.	Taajama-alueen muuntopiirin 2 tehokuvaaja vuoden ajalta.	60
Kuva 34.	Taajama-alueen muuntopiirin 2 kuormitusasteen muutos eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %).....	61
Kuva 35.	Taajama-alueen muuntopiirin 2 jännitteenaleneman muutos eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %).....	61
Kuva 36.	Haja-asutusalueen muuntopiirin 3 tehokuvaaja vuoden ajalta.	62

Kuva 37.	<i>Haja-asutusalueen muuntopiirin 3 kuormitusasteen muutokset eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)</i>	63
Kuva 38.	<i>Haja-asutusalueen muuntopiirin 3 jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)</i>	63
Kuva 39.	<i>Kaupunkialueen muuntopiirin 4 tehokuvaaja vuoden ajalta.</i>	64
Kuva 40.	<i>Kaupunkialueen muuntopiirin 4 kuormitusasteen muutokset eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)</i>	65
Kuva 41.	<i>Kaupunkialueen muuntopiirin 4 jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)</i>	65
Kuva 42.	<i>Teollisuusalueen muuntopiirin 5 tehokuvaaja vuoden ajalta.</i>	66
Kuva 43.	<i>Teollisuusalueen muuntopiirin 5 kuormitusasteen muutos eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)</i>	67
Kuva 44.	<i>Teollisuusalueen muuntopiirin 5 jännitteenaleneman muutos eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)</i>	67
Kuva 45.	<i>Keskijännitelähdön kuormitusasteen ja jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 % kuormitusaste ja turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 % jännitteenalenema)</i>	68
Kuva 46.	<i>Omakoti- ja paritalolatauksen indeksisarjat yölataukselle.</i>	70
Kuva 47.	<i>Kerros- ja rivitalolatauksen indeksisarjat yölataukselle.</i>	70
Kuva 48.	<i>Koko jakeluverkon tehokuvaaja skenaariossa B2030 ja F2030 ja vastaavat tehokuvaajat yölatauksen muutoksen jälkeen.</i>	71
Kuva 49.	<i>Koko jakeluverkon tehokuvaaja skenaariossa B2040 ja F2040 ja vastaavat yölatauksen muutoksen jälkeen.</i>	71
Kuva 50.	<i>Muuntopiirin 1 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.</i>	73
Kuva 51.	<i>Muuntopiirin 2 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.</i>	74
Kuva 52.	<i>Muuntopiirin 3 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.</i>	74
Kuva 53.	<i>Muuntopiirin 4 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.</i>	75
Kuva 54.	<i>Skenaarion B2030 algoritmi.</i>	91
Kuva 55.	<i>Skenaarion B2040 algoritmi.</i>	92
Kuva 56.	<i>Skenaarion F2030 algoritmi.</i>	93
Kuva 57.	<i>Skenaarion F2040 algoritmi.</i>	94

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl. Alternative Current, vaihtovirta
AFIR	engl. Alternative Fuels Infrastructure Regulation, vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria koskeva EU-asetus
ARA	asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus
B2030	perusskenaario vuodelle 2030
B2040	perusskenaario vuodelle 2040
BEV	engl. Battery Electric Vehicle, täyssähköauto
CCS	engl. combined charging system, pikalatauksen standardoitu ajoneuvopistoke, pistoketyyppi FF
CHAdemo	pikalatauksen standardoitu ajoneuvopistoke, pistoketyyppi AA
DC	engl. Direct Current, tasavirta
F2030	nopea skenaario vuodelle 2030
F2040	nopea skenaario vuodelle 2040
HEV	engl. Hybrid Electric Vehicle, hybridi-auto
EV	engl. Electric Vehicle, sähköauto
PJ	pienjännite
KJ	keskijännite
NIS	engl. network information system, verkkotietojärjestelmä
PHEV	engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle, ladattava hybridi-auto
SCHUKO	saks. Schutzkontakt, perinteinen kotilatauspistorasia Suomessa
SESKO	sähkötekniikan alan kansallinen standardointijärjestö
TAES	Tampereen Energia Sähköverkko Oy
TEN-T	Euroopan laajuinen liikenneverkko
V2G	engl. vehicle-to-grid, kaksisuuntainen lataus, jonka avulla syötetään jakeluverkkoon tehoa
V2H	engl. vehicle-to-home, kaksisuuntainen lataus, jonka avulla syötetään kodin sisäiseen verkkoon tehoa
C	vuoden kaksiviikkoindeksien summa
D	viikon tunti-indeksien summa
ΔE	energian muutos
P	teho
S	sisäinen indeksi
U	ulkoinen indeksi
β	ladattavan hybridin sähköenergialla kuljettava osuus päivittäisestä matkasta
n	sähkökäyttöisten henkilöautojen määrä
s	vuosittainen keskimääräinen ajosuorite
e	keskimääräinen sähkökäyttöisen henkilöauton energiankulutus
Sähköasemat	
ALJ	Alasjärvi
HRV	Hervanta
KLV	Kaleva
LMP	Lamminpää
MLP	Myllypuro
MLS	Multsilta
NRI	Naistenlahti
RAT	Ratina
RTH	Rautaharkko

VSL
LLT

Veslinna
Lielahi

1. JOHDANTO

Sähkönkulutus on kasvanut vuosikymmenten aikana jatkuvasti teknologian kehityksen ja uusien sähköä vaativien laitteiden myötä. Viime vuosina merkittäviä uusia kuormia ovat olleet esimerkiksi sähköautot ja lämpöpumput, jotka lisäävät sähköverkon kuormitusta. Näiden laitteiden myötä energiankulutus kasvaa, mikä vaatii sähköverkon siirtokapasiteetin lisäämistä, mutta etenkin sähköautot ja lämpöpumput aiheuttavat huipputehon kasvua sekä tehon vaihtelua paikallisesti ja ajallisesti verkkoon. Jakeluverkon kannalta sähköauton lataaminen lisää kulutuspuheen energian tarvetta sekä nostaa huipputehoa.

Kasvihuonepäästöt, ilmastonmuutos ja ilman laatu etenkin suurissa kaupungeissa on antanut sysäyksen sähköautojen yleistymiselle ja määrän lisääntymiselle. Uusiutuvien energialähteiden käyttö fossiilisten energialähteiden sijaan on lisääntynyt viimeisen vuosikymmenen aikana. Euroopan unionin Glasgow:n ilmastokokouksessa vuonna 2021 päätettiin kasvihuonepäästöjä leikattavaksi vähintään 55 %:a vuoteen 2030 mennessä, jotta globaali lämpötilan nousu saataisiin rajoitettua 1,5 asteeseen [1].

Vaikka sähköautojen määrän kasvu on ollut kiihtyvää viime vuosina, sähköautojen yleistymiselle on ollut haasteita kalliin hinnan takia ja etenkin Suomen kylmissä oloissa akkujen tuoman epävarmuuden takia. Sähköautoilun ongelmia ja haasteina nähdään nykypäivänä laajan latausverkoston puuttuminen, etenkin kaupunkien ulkopuolella, akun elinikä ja lataustapahtuman kesto verrattuna polttomoottorin muutaman minuutin tankkaamiseen.

Sähköautojen yleistymisen myötä on huomioitava lisääntyvä latausteho verkossa, ja otettava huomioon se suunnittelussa ja verkonkomponenttien mitoituksessa. Sähköauto on verkon näkökulmasta kuorma, sähkövarasto sekä tehon tarpeen joustavuutta lisäävä komponentti. Verkon osana ja epäsymmetrisenä kuormana se aiheuttaa sähkön laatuongelmia verkkoon, kuten jännitteenalenemaa ja yliaaltoja sekä tehohäviötä. Tässä työssä sähköautoa käsitellään ensisijaisesti kuormana, mutta pohditaan myös, miten esimerkiksi tulevaisuuden latauksen hallinnan ja kaksisuuntaisen latauksen avulla voidaan verkon kuormaa ja latauskäyttäytymistä hallita. Sähköautojen määrän lisääntyessä, verkon mitoituksen haasteena on sähköenergian riittävyyden sijasta verkon tehokapasiteetti.

Liittymien ylityöittäminen on yleistyvä ongelma sähköverkkoyhtiöillä. Ylityöitetyt liittymät vievät turhaan verkon kapasiteettia sekä esimerkiksi lisäävät liittymisjohtoja ja siten pienjännitekeskuksen lähtöjä jakokaapeilla ja muuntamoilla. Nämä ylityöittämisen vaikutukset voivat aiheuttaa tarpeettoman suuria investointeja, kuten uusien muuntamoiden rakentamista. Ylityöittämisen seurauksena alhaisessa kuormituksessa olevat kaapelit tuottavat loistehoa verkkoon. Tämä aiheuttaa tehohäviöitä verkkoon.

Liittymien alityöitusta pyritään luonnollisesti välttämään. Alityöitettujen liittymien ongelmaksi muodostuu pääsulakkeen ja ylivirtasuojien laukeaminen sekä mahdollisesti syöttävän verkon ylikuormittuminen. Nykyisin energiamittarit tuottavat tunnettua tarkkaa tietoa sähkönkulutuksesta, jännitteistä ja virroista, mikä tarjoaa huomattavasti luotettavampaa dataa kuin esimerkiksi pelkkiin kuormituskäyriin perustuvat arviot. Verkkotietojärjestelmän kuormitus pohjautuu energiamittareilta saatavaan kulutustietoon, jolloin kuormitusta pystytään tutkimaan entistä tarkemmin.

1.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Diplomityön tavoitteena on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten sähköautojen aiheuttama lisääntyvä kuormitus vaikuttaa pienjännite- ja keskijänniteverkkoon?
- Miten vältetään liittymien ylityöittäminen liittyen sähköautojen aiheuttamaan kuormitukseen?
- Millainen vaikutus latauskuormituksen siirtämisestä yöaikaan on jakeluverkon ja jakelumuuntopiirien kuormitukseen?
- Miten lataustehoista aiheutuvaa verkon kuormitusta voidaan pienentää muun muassa älykkäillä latausratkaisuilla?

Työn tutkimusmenetelminä käytetään latauskuormista aiheutuvan lisääntyvän sähköenergian ja tehon mallintamista nykyiseen jakeluverkkoon kuormituskäyrien avulla. Mallintaminen tehdään verkkotietojärjestelmällä nykyiseen verkkoon uusina kulutuspisteinä. Kuormitusta tutkitaan etenkin kapasiteetin riittävyyden sekä sähkön laatuparametrien näkökulmasta. Kuormituksen vaikutusten tutkiminen keskittyy koko jakeluverkkoon sekä muutamaa muuntopiiriä ja liittymien tarkasteluun. Tutkimuksen kohteena on erityisesti päämuuntajat ja jakelumuuntajat, pj- ja kj-johtolähdöt sekä liittymät. Älykkäitä latausratkaisuja pohditaan kirjallisuuden ja aiempien tutkimuksien avulla.

Työssä aluksi luvussa 2 määritellään sähköauto ja sen eri tyypit sekä esitellään sähköautojen lataustapoja ja latausinfrastruktuuria. Luvussa 3 esitellään sähköautoilun kehitystä ja kasvuennusteita yleisesti Suomessa sekä Tampereen Energia Sähköverkon (TAES) jakelualueella. Luvussa määritellään työssä käytetyt sähköautojen kasvun skenaariot. Luvussa 4 perehdytään sähköautojen aiheuttamaan latauskuorman kuormituskäyrien avulla. Seuraavassa luvussa 5 kerrotaan, kuinka mallinnus tehdään jakeluverkkoon eri skenaarioilla verkkotietojärjestelmässä. Luku 6 esittelee mallinnuksen tulokset jakeluverkon keski- ja pienjännitepuolilla sekä liittymien kuormituksen osalta. Luvussa analysoidaan muutamaa muuntopiiriä sekä mallinnetaan, miten latauksen ajankohdan siirtäminen vaikuttaisi huipputehoon. Lopuksi luvussa 7 analysoidaan tuloksia ja pohditaan tuloksissa ja mallintamisessa havaittuja ongelmia sekä pohditaan älykkäiden latausratkaisujen, kuten kaksisuuntaisen latauksen mahdollisuuksia ja tulevaisuuden näkymiä kuormituksen hallinnassa. Lopuksi tulokset ja havainnot ovat koottu yhteenveto-osioon.

2. SÄHKÖAUTOT JA NIIDEN LATAUSTAVAT

2.1 Sähköauto

Sähköauton (EV) peruskomponentteihin kuuluvat yksi tai kaksi sähkömoottoria, invertteri ja akusto, johon kuuluu hallintajärjestelmä. Sähköautot jaetaan täyssähköautoihin, hybridautoihin ja ladattaviin hybridautoihin. Täyssähköauton voimanlähteenä on pelkkä sähkömoottori, ja hybridautoissa sähkömoottorin rinnalla on polttomoottori toisena voimanlähteenä. Sähköverkon kuormituksen kannalta kiinnostavia ovat täyssähköautot ja ladattavat hybridit, sillä näitä voidaan ladata ulkoisesta lähteestä, mikä vaikuttaa sähköverkkoon. Sähköautoissa käytetään monenlaisia akkuteknologioita, mutta tämän hetken halvimmat ja tehokkaimmat teknologiat perustuvat litiumiin [2].

Sähköauton yksi tai ainoa energianlähde on ladattava akku. Akku ladataan ulkopuolisella latauslaitteella pistokekytkennällä. Sähköenergia siirretään akusta tasavirtana invertterin kautta vaihtovirraksi sähkömoottorille käytettäväksi. Sähköautot lataavat jarrutuksen sekä moottorijarrutuksen aikana syntyvän energian generaattorin kautta takaisin akkuun. Sähkömoottori ei tuota lämpöhäviöitä niin kuin polttomoottori. [3] Tämän takia autoa tarvitsee kylmällä säällä lämmittää niin akun kuin mukavuudenkin kannalta, jolloin tehon ja energian tarve on suurempi talvisin.

Sähköautojen ajokustannukset ovat yleisesti alhaisemmat kuin polttomoottoriautoilla käyttöenergian kustannusten vuoksi. Sähkön hinta on halvempaa kuin öljyperäisten energialähteiden hinta, fossiilisten polttoaineiden suuremman verotuksen takia. Sähköauton investointikustannus on kuitenkin vielä yleisesti suurempi kuin polttomoottoriauton. Ennusteen mukaan täyssähköauton hankintahinta saavuttaa polttomoottoriauton hankintahinnan vuoteen 2025 mennessä [4]. Tuotannon kasvaessa ja komponenttien hinnan alentuessa hinnat alkavat tulevaisuudessa laskemaan.

Sähköautojen etuja ovat ajon vähäpäästöisyys, alhainen melutaso ja hyvä kokonaisyötysuhde verrattuna polttomoottoriautoon. Ajon vähäpäästöisyys riippuu sähköenergian tuotannon lähteestä. Sähköauton hyötysuhde on 50–80 %, johon on huomioitu akun sekä lataus- ja ohjauselektronikan häviöt, kun taas polttomoottoriauton hyötysuhde on parhaimmillaankin alle 25 % [3]. Pelkän sähkömoottorin hyötysuhde on erittäin hyvä 85–95 % verrattuna pelkän polttomoottorin 25–30 % hyötysuhteeseen. Sähköauton hyötysuhdetta pienentää kylmä sää, ja talvella hyötysuhteiden eroa tasoittaa polttomoottorin hukkalämmön käyttö auton ohjaamon lämmitykseen. [5] Kylmällä säällä sähköauton akun häviöt kasvavat sekä sähköauton ohjaamon

lämmitykseen tarvitaan enemmän energiaa, joka otetaan akusta [3]. Hyötysuhteiden eroa kasvattaa myös se, että polttomoottoriajoneuvossa jarrutusenergia menee hukkaan, kun sähköautoissa energia pystytään ottamaan osittain talteen.

2.1.1 Täyssähköauto

Täyssähköauton (BEV) akun koko vaihtelee laajalla välillä riippuen autosta. Nykypäivänä täyssähköauton akun koko on 40–100 kWh, joka mahdollistaa 200–500 km ajon [3]. Täyssähköautossa ei ole niin paljon liikkuvia osia kuin polttomoottoriautoissa, jolloin auton elinkaaren huolto- ja korjauskustannukset eivät ole todennäköisesti niin suuret kuin polttomoottoriajoneuvoissa. Akku on sähköauton kallein komponentti ja sen hajotessa menoerä on suuri. Akusto on yleisesti jaettu akkumoduuleihin eli useamman akkukennon pakettiin, jolloin yksittäisen kennon hajotessa akustoa ei tarvitse vaihtaa kokonaan vaan pienemmän akkumoduuliosan vaihtaminen riittää [4].

Täyssähköautossa koko lämmityksen energia otetaan akusta, jolloin energiankulutus kasvaa, ja näin ajon toimintamatka lyhenee. Tämän voi välttää akuston esilämmityksellä tai esimerkiksi lämmittämällä sisätiloja polttoainekäyttöisellä lämmittimellä tai verkkovirralla auton ollessa laturissa. [3]

Täyssähköautot ovat hiljaisia sekä päästöttömiä, mikä on hyvä etenkin isoissa kaupungeissa. Akkutekniikat kehittyvät jatkuvasti hyötysuhteeltaan ja kapasiteetiltaan. Nykypäivänä toimintamatka täyssähköautoilla riittää hyvin monien päivittäisiin ajomatkoihin.

2.1.2 Hybridiauto

Hybridiautossa (HEV) on sähkömoottorin lisäksi polttomoottori. Hybridiauton akkua ei pysty lataamaan ulkoisesta latauspistokkeesta. Hybridiautoissa on pienempi akusto, noin 1 kWh, jolloin auton valmistuskustannukset ovat pienemmät kuin täyssähköautojen. Perinteisellä hybridiautolla voi ajaa tyypillisesti sähköenergialla vain muutaman kilometrin pienen akun takia. [3] Jarrutuksen aikana energiaa ladataan akkuun niin kuin kaikissa sähköautoissa.

Ei-ladattava hybridiauto tuottaa tarvitsemansa energian polttoaineesta ja käyttää akustoa energian varastoinnissa. Eniten hyötyä hybridiautosta on kaupunkiajossa, jossa sähköenergiaa voidaan varastoida jarrutuksissa ja käyttää kiihdytyksissä polttomoottorin tukena. Näin polttoaineenkulutusta vähennetään erityisesti toiminnoissa, joissa energian

tarve on suuri, kuten kiihdytyksissä, hyödyntämällä jarrutuksissa talteenotettua sähköenergiaa. [6] Sähköenergian käyttäminen kiihdytyksissä on energiatehokkaampaa kuin polttoaineen energian käyttäminen.

Hybridiajoneuvotyyppinä on kahdenlaisia: kevythybridi ja täyshybridi. Kevythybridissä sähkömoottori vain tukee polttomoottoria. Täyshybridi voi liikkua polttomoottorin, sähkömoottorin tai molempien avulla sekä polttomoottori voi ladata akkua [7]. Polttomoottori voi olla bensiini- tai dieselmoottori. Hybridiauton kaksi moottoria lisäävät monimutkaisuutta voimansiirtojärjestelmän rakenteeseen, mikä lisää liikkuvia osia ja kustannuksia [6].

2.1.3 Ladattava hybridiauto

Ladattavassa hybridiautossa (PHEV) on suurempi akku kuin ei-ladattavassa hybridiautossa sekä sitä voidaan ladata ulkoisesta latauspisteestä. Akun kapasiteetti on nykypäivänä noin 12–16 kWh. Näin ollen sillä voi ajaa pidemmän matkan, yleensä noin 50–80 km sähköenergialla ennen kuin käyttövoima vaihtuu polttomoottoriin. [8] Ladattavan hybridin etuna on se, että auton akun sähköenergian määrittelemä toimintasäde ei rajoita käyttöä. Myös ladattavassa hybridissä sähköenergiaa varastoidaan jarrutuksissa ja käytetään kiihdytyksissä niin kuin yllä on kerrottu.

Tästä eteenpäin työssä käytetään käsitettä sähköauto, jolla tarkoitetaan kaikkia henkilöautoja, joita voidaan ladata ulkoisesta virtalähteestä eli täyssähköautoja ja ladattavia hybridejä. Erikseen, jos halutaan painottaa toista tyyppiä, käytetään täyssähköajoneuvo tai ladattava hybridi -käsitettä.

2.2 Sähköauton lataustavat

Lataustavat määritellään jännitteen, virran ja lataustekniikan mukaan. Standardi SFS-EN 61851-1 jakaa sähköautojen konduktiiviset eli johtumalla tapahtuvat lataustavat neljään eri pääluokkaan. Neljä pääluokkaa ovat kevyiden sähköajoneuvojen lataus, hidas lataus, peruslataus ja pikalataus. Sähkötekniikan alan kansallisen standardointijärjestön (SESKO) lataussuositus esittelee lisäksi myös johdottoman latauksen, joka siirtää sähköenergiaa induktiivisesti käämien välillä. Sähköautojen lataukseen suositellaan ensisijaisesti lataustapoja 3 ja 4, sillä kotitalouspistorasiasta lataaminen tuo riskitekijöitä lataamiseen. [9] Kotitalouspistorasia voi esimerkiksi olla viallinen tai johdot eivät kestä lataamisen pitkäaikaista kuormitusta.

Sähköauton latauksen keston vaikuttaa akun kapasiteetti, sen varaustaso latauksen alkamishetkellä, latauspisteen antama teho ja sähköauton akustonhallintajärjestelmä, joka määrittelee latausvirran, jolla akkua voidaan ladata. Kylmällä ilmalla latauksen kesto pidentyy akun lämmityksen takia, sillä kylmän litiumakun lataaminen voi vaurioittaa sitä. Sähköautoissa onkin yleisesti lämmitysjärjestelmä akulle, jotta lataaminen ja latauksen purkautuminen onnistuu kylmällä säällä vahingoittamatta akkua. [3] Täyssähköautoja tarvitsee ladata harvemmin kuin ladattavia hybridejä, koska akun kapasiteetti on suurempi ja toimintamatka pidempi, jolloin yhden latauksen toimintamatka riittää useamman päivän matkoihin. Molempia sähköautotyyppäjä voidaan ladata myös päivittäin, jolla varmistetaan toimintamatkan riittävyys myös ei-suunniteltuja matkoja varten. [8]

Sähköautojen lataukseen on monia vaihtoehtoja. Lataus voi olla tasavirralla tai vaihtovirralla tapahtuvaa, yksi-, kaksi- tai kolmivaiheista sekä tapahtua normaalista kotitalouspistorasiasta tai sähköautolle tarkoitettusta latauspisteestä sille tarkoitettulla latauspistokkeella. Latauksen ominaisuudet ja vaihtoehdot riippuvat autosta. Peruslataustavan latauspisteitä on sekä kotilatauspaikkana, että julkisissa latauspisteissä. Pikalatauspaikkoja on nykypäivänä yleisesti vain julkisissa latauspisteissä. [8]

Paikka vaikuttaa lataustavan valintaan. Julkisissa paikoissa tärkein ominaisuus on latausnopeus eli lataustehon suuruus, kun taas kotilatauksessa riittää hitaampi lataus, jolloin latauksen kustannukset eivät ole niin suuret. Jos kotilataukseen valitaan suuritehoisia latauspisteitä, ne vaikuttavat merkittävästi sähköliittymien kokoon, ja aiheuttavat sähköverkon vahvistamista. Tämä voi aiheuttaa liittymien liiallista ylirajoittamista, sillä suuritehoista latausta ei käytetä koko aikaa. Ylirajoittamisen vaikutuksia liittymiin ja verkon investointeihin pohditaan lisää luvussa 6.

2.2.1 Lataustapa 1: Kevyiden sähköajoneuvojen lataus

Kevyen sähköajoneuvon lataus tapahtuu vaihtosähköllä normaalista yksivaiheisesta maadoitetusta 230 V kotitalouspistorasiasta (schuko). Kotitalouspistorasiat ovat suojattu 30 mA vikavirtasuojalla. Sähköajoneuvon latausvirta rajoitetaan 8 A:iin kotitalouspistorasiasta, koska kotitalouspistorasiat eivät kestä pitkäaikaista lataamista täydellä 16 A mitoitusvirralla. [9] Latauksen teho on $P = 1 \cdot 8 \text{ A} \cdot 230 \text{ V} = 1,8 \text{ kW}$. Kevyihin sähköajoneuvoihin luokitellaan esimerkiksi sähköskootterit ja sähköpotkulaudat.

2.2.2 Lataustapa 2: Hidas lataus

Lataustavassa 2 lataus tapahtuu myös vikavirtasuojatusta yksivaiheisesta kotitalouspistorasiasta tai esimerkiksi lämpötolpasta, joka antaa tyypillisesti tehoa 1–2 kW [4]. Lataustavassa on oma latausjohto, johon standardin mukaan täytyy sisältyä ohjaus- ja suojaiteyksikkö. Koska lataus tapahtuu kotitalouspistorasiasta, ajoneuvon ottama latausvirta on myös rajoitettu yleisesti 8 ampeeriin kansallisen standardin SFS 6000 mukaisesti. [10] Tällöin pistokkeesta saatava teho on 1,8 kW. Lataaminen kestää noin 8 tunnista eteenpäin 8 ampeerin virralla riippuen akun kapasiteetista lataukseen kytkettäessä. Jos sähköauton latausaika halutaan pienemmäksi hitaalla latauksella, tarvitaan suurempaa virtaa eli suurempaa tehoa. Tähän tarpeeseen on kehitetty super-schukopistokkeita, jotka ovat schuko-pistokkeita, mutta kestävät 16 A yhtäjaksoisen lataamisen [9].

2.2.3 Lataustapa 3: Puolinopea peruslataus

Peruslataus on suositeltavin sähköautojen lataustapa. Lataus tapahtuu sähköajoneuvolle suunnitellusta latauslaitteesta moninapaisella liittimellä. Lataus tapahtuu standardin määrittelemästä tyyppin 2 -pistorasiasta, jossa on tiedonsiirtoväylä, joka varmistaa, että ajoneuvo on turvallisesti kytketty latauspisteeseen. Tiedonsiirtoväylä mahdollistaa tehon- ja kuormanohjauksen sekä virran syötön molempiin suuntiin. Virran syöttö mahdollisuutta molempiin suuntiin on vielä kuitenkin harvoilla autoilla. Ladattaessa, tyyppin 2 pistorasia lukittautuu latausjohtimeen mekaanisesti ja sähköisesti sekä on jännitteetön ennen ajoneuvon kytkemistä. [9]

Tyyppin 2 latausjärjestelmässä voidaan käyttää yksi-, kaksi- tai kolmivaihevirtaa riippuen auton sisäänrakennetusta laturista [4]. Latausvirta voi olla jopa maksimissaan 3x63 A, jolloin tehoksi saadaan 43 kW [9]. Tyypillisesti virta on 16 A tai 32 A, jolloin teho on kolmivaiheisena 11 kW tai 22 kW. Auton lataaminen kestää noin 2–8 tuntia riippuen käytetystä tehosta [4]. Auton laturi voi rajoittaa järjestelmään otetun tehon suuruutta ottamalla huomioon latauspisteen tehorajoituksen tai taustakuorman [4, 8].

2.2.4 Lataustapa 4: Pikalataus

Pikalatauspisteitä on yleisesti julkisessa latausverkostossa ja joissakin palveluiden, esimerkiksi kauppakeskusten, hotellien ja ravintoloiden yhteydessä. Pikalataus tapahtuu

suurella tasavirralla. Tasavirralla tapahtuvassa latauksessa virta ohittaa auton oman laturin, ja virta syötetään suoraan auton akkuun [11].

Latausjohto on latausaseman osa. Suuritehoinen pikalataus ei sovi kaikille sähköautoille, mikä riippuu auton omasta sisäänrakennetusta laturista. Niissä autoissa, joita voidaan ladata pikalatauksella, on erillinen soveltuva liitin. Pikalataukseen soveltuvia liittimiä ovat CCS, CHAdeMO ja Teslan Supercharger. [8]

Latauspisteiden syöttämät virrat ovat satoja ampeereita, jolloin latausteho saadaan tyypillisesti 50–150 kW:in, mutta myös jopa 350 kW latausteho on nykypäivänä mahdollinen [4]. Pikalatauksen latausaika on alle kaksi tuntia riippuen lataustehosta ja akun varaustasosta. Latausteho on suurempi pienellä akun varaustasolla ja pienenee akun varaustason suurentuessa. Tämä tapahtuu automaattisesti akuston omalla järjestelmällä. [3]

2.2.5 Induktiivinen lataus

Induktiivisessa eli johdottomassa latauksessa sähköenergiaa siirretään induktiivisesti alustaan upotetun käämin ja sähköajoneuvoon asennetun käämin välillä [9]. Nykypäivänä kaikissa ajoneuvoissa ei ole vielä mahdollisuutta käyttää induktiivista latausta. Lataus voi olla joko staattista paikallaan tapahtuvaa tai ajon aikana tapahtuvaa dynaamista latausta. Hyviä alustoja lataukselle ovat parkkipaikat, jakeluinfraktruktuuriin kuuluvat tai suurella käytöllä olevat maantiet ja kaupungin pääliikenneväylät. Tiehen upotetut käämit mahdollistavat esimerkiksi liikennevaloissa lataamisen. Parkkipaikoille integroidut induktiiviset latauskäämit vähentävät lataustolppia ja latauskaapeleiden käyttöä. Etenkin kaupunkien keskustoissa lataustolppien vähäisyys on tavoiteltava asia.

Turvallisuuden näkökulmasta induktiivinen lataus on parempi, sillä latauskaapelit voivat aiheuttaa oikosulun tai kipinäintiä vikatilanteessa, ja johdoton lataus pienentää riskiä suuritehoisessa latauksessa. Johdottoman latauksen hyötynä on se, että ajoneuvoissa riittää pienempi akku, koska akku latautuu ajon aikana koko ajan eikä pitkiä pysähdyksiä latauksen takia tarvita. Esimerkiksi langattoman latausteknologian integroiminen tyypillisille jakeluteille voi helpottaa siirtymistä sähkörekkoihin. Tämä johtuu siitä, että langattoman latauksen ansiosta sähkörekkoihin voidaan asentaa pienemmät akut, mikä alentaa sähkörekkojen kustannuksia. [12, 13]

Johdoton lataustapa on vielä tulevaisuuden teknologiaa, mutta pilotteja tästä on tehty maailmalla. Esimerkiksi Saksassa on kokeiltu kaupungin linja-autoliikenteessä induktiivista lataustyyppiä. Tämä paransi sähköbussien kantamaa. Haasteina oli

kuitenkin muun muassa kustannukset, internet-yhteyden katkokset ja bussin viallinen kohdistuminen latauskäämeihin nähden johtuen esteistä kaupungissa. [13]

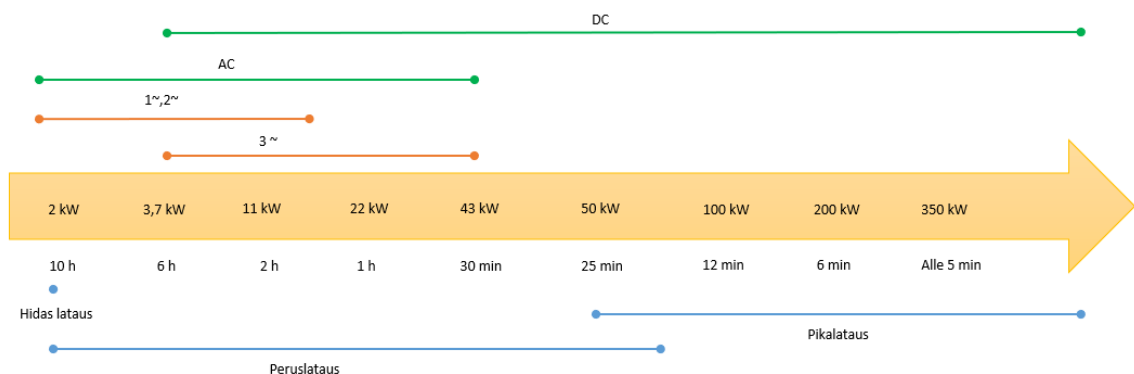
2.2.6 Hidas tasavirtalataus

Hitaalla tasavirtalataustavalla (hidas DC-lataus) ajoneuvoa ladataan pienitehoisella tasajännitelaturilla yleisesti kotona. Teho voi olla esimerkiksi enintään 22 kW. Hitaan DC-latauksen hyötynä on lataustehon säätökyky ottaen huomioon kiinteistön sähköjärjestelmän kuormitus. Latausteho voidaan ottaa useammasta vaiheesta. Tällöin auton laturin rajoitteet eivät ole esteenä, ja kiinteistön verkkoa kuormitetaan tasaisemmin. [4]

Tämän lataustavan etuna on aurinkosähkön yksinkertaisempi ja kustannustehokkaampi liittäminen kiinteistön ja älykkään latausjärjestelmän kokonaisuuteen, koska aurinkopaneeleista saatavaa tasasähköä ei tarvitse välissä muuttaa vaihtosähköksi ja näin häviöt vähentyvät. [4]

2.2.7 Lataustapojen yhteenveto

Kuvassa 1 on esitetty latauksen teho ja lataukseen kuluva aika, kun ladataan akku niin, että saadaan 100 km:n toimintamatka. Oletuksena ajoneuvon kulutukseksi on arvioitu 0,2 kWh/km, jolloin akun varaus tulee olemaan ainakin 20 kWh.



Kuva 1. Latausaikoja 100 km toimintamatkan lataamiseen. [3]

Kuvaan on merkitty tehoväli 2–43 kW vaihtovirralla (AC) tapahtuvaan lataukseen. Tasavirralla (DC) tapahtuva lataus on yleisesti yli 3,7 kW teholla tapahtuvaa. Myös yksi-, kaksi- ja kolmivaiheiset lataustehorajat ovat merkitty kuvaan janojen avulla. Pikalataus suurella teholla voisi kestää jopa alle 5 minuuttia.

Latausvirta ja tästä verrannollinen latausteho riippuvat siitä, miten ajoneuvo erinäisten komponenttien ja akuston hallintajärjestelmän vaikutuksesta vastaanottaa virtaa. Sähkövirran vastaanottaminen riippuu auton latausjohtimesta, auton sisäisestä laturista, latauspisteestä sekä taustaverkon kuormasta. Tyypin 2 latausjohtimessa ja pikalatausjohtimessa on virran- ja tehonrajoitin, jolloin näitä pystytään säätämään syöttävän verkon tai auton akun kapasiteetti huomioiden. Latauspisteellä pystytään myös säätämään virtaa esimerkiksi muiden latauspisteiden latauskuorman vaikutuksesta. Tätä käsitellään lisää luvussa 7 älykkäiden latausjärjestelmien näkökulmasta.

Tässä työssä ei määritellä mitä lataustapaa ajoneuvot käyttävät, mutta lataustehojen puolesta verkkoon lisätään enimmäkseen hitaan ja peruslatauksen latauspisteitä. Muutamille julkisille paikoille lisätään 22 kW ja 150 kW pikalatausta. Työssä ei myöskään käsitellä yksivaiheisen latauksen aiheuttamaa vinokuorman vaikutusta verkkoon.

2.3 Latausinfrastrukturi

Kotilatauspisteellä on suuri merkitys sähköautojen määrän kasvussa, sillä ilman kotilatausmahdollisuutta sähköajoneuvo tuo epävarmuutta liikkumiseen. Yleisesti lataaminen tapahtuu kotona ja työpaikalla, mikä riittää päivittäisiin ajomatkoihin. Julkisissa latauspisteissä lataaminen on satunnaisempaa. [8] Jos kotilatausmahdollisuutta ei ole, julkisten latauspisteiden käyttö lisääntyy. Arviolta 80–90 % latauksesta tapahtuu kotona yön aikana [4].

Teknologiategollisuuden julkaiseman katsauksen mukaan vuoden 2024 Q3-kvartaalilla oli 11 116 julkista latauspistettä. Näistä peruslatauspisteitä oli 8 816 kappaletta ja suuritehoista latauspisteitä 2300 kappaletta. Latauspisteiden suhdeluvut täyssähkö- ja sähköautokantaan kokonaisuudessaan ovat seuraavat: suuritehoista latauspistettä kohden on 29 täyssähköautoa ja normaalitehoista latauspistettä kohti 24 sähköautoa. Luvut ovat vain julkisille latauspaikoille, joihin eivät kuulu kotilatauspaikat tai taloyhtiöiden latauspaikat. [14]

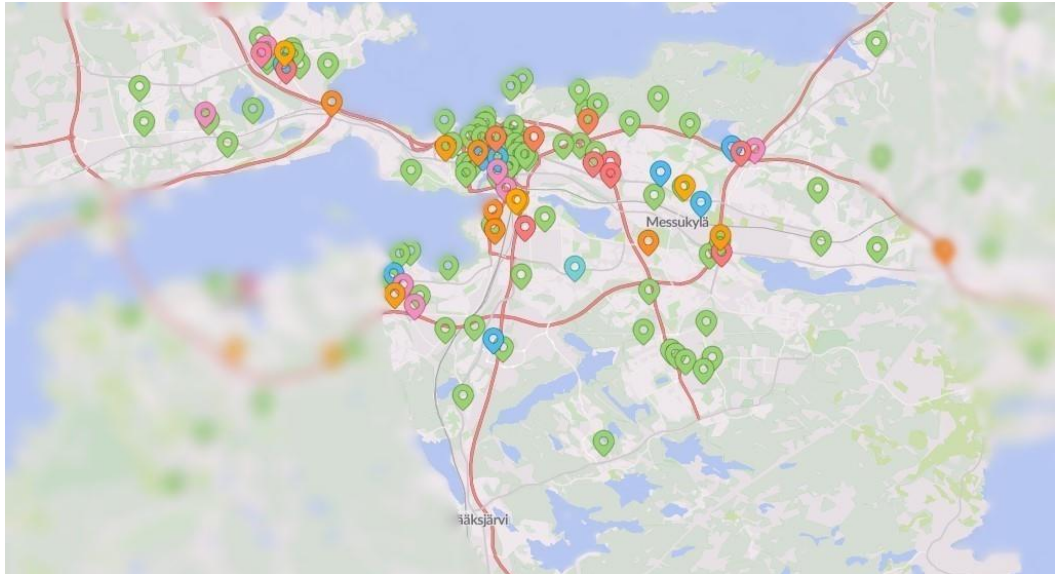
Suomessa välimatkat voivat olla pitkiä eikä julkiset latauspisteet jakaudu maantieteellisesti tasaisesti. Latauspaikat keskittyvät suuriin kaupunkeihin, mikä aiheuttaakin sähköautojen määrän kasvun suurimmaksi osaksi kaupungeissa. Harvaan asutuilla alueilla latauspisteiden välimatkat saattavat olla pitkiä. [8] Latauspaikkojen välimatkojen takia lataushybridit ovatkin vielä nykyään käyttökelpoisempia kuin täyssähköautot.

Sähköautojen määrän lisääntymiseen täytyy varautua taloyhtiöissä. Uudisrakentamisen ja saneerauksien yhteydessä taloyhtiön täytyy varautua latauspaikkoihin rakentamalla varausputkituksia mahdollisille latauspaikoille. Tämän toteutumiseen eduskunta on säätänyt lain latauspaikkojen varautumiseen rakennuksien ja kiinteistöjen yhteydessä. [15] Tästä lisää seuraavassa luvussa.

Sähköauton latauksen rakentamista tuetaan ARA-tuella. ARA-tukea voi saada asuinrakennuksen omistava yhteisö tai asuinrakennuksen omistavan yhteisön omistamalle pysäköintiyhtiölle sähköisen liikenteen latausinfra rakentamiseen [16].

EU-komissio on hyväksynyt vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria koskevan asetuksen (AFIR), jonka tavoitteena on edistää julkisesti saatavilla olevien lataus- ja vetytankkausasemien lukumäärää erityisesti tärkeimmillä liikenneväylillä ja liikenteen solmukohtissa Euroopan unionissa. Asetus asettaa tavoitteet henkilö- ja pakettiajoneuvoille seuraavasti: *”Yleisesti saatavilla olevan latausinfrastruktuurin on tarjottava 1,3 kW:n latausteho kutakin jossain jäsenvaltiossa rekisteröityä akkukäyttöistä sähköautoa kohden. Lisäksi vuodesta 2025 alkaen Euroopan laajuiseen liikenneverkkoon (TEN-T) on asennettava 60 kilometrin välein pikalatausasemia, joiden teho on vähintään 150 kW.”* [17] Tämä tulee lisäämään julkisia latauspaikkoja etenkin isojen teiden varsilla.

Fossiilittoman liikenteen tiekartta linjaa vuoden 2030 latausinfra tavoitteeksi, että jokaiselle täyssähköautolle täytyy löytyä latauspiste yön yli tapahtuvaan lataukseen sekä on olemassa vähintään yksi julkinen pikalatausasema sataa täyssähköautoa kohti [18]. Tämä tarkoittaa karkeasti TAES:n verkkoalueen kannalta vuonna 2030 perusskenaarion mukaisesti vähintään 133 pikalatauspistettä ja nopean skenaarion mukaisesti 226 pikalatauspistettä. Tiekartan linjaus on koko Suomen alueelle, joten lukuja ei voi ottaa täysin TAES:n verkon alueelle, mutta näitä voidaan käyttää ohjaavina lukuina. Tällä hetkellä julkisia pikalatausasemia (yli 50 kW) on TAES:n verkon alueella 38 kappaletta, joissa voi olla 1-6 pikalatauspistettä sekä peruslatauspisteitä yhdestä pisteestä useisiin kymmeneen [19]. Kuvassa 2 on esitetty Tampereen alueella olevat julkiset latauspaikat.



Kuva 2. Tampereen sähköverkon alueen julkiset latauspaikat [19]. TAES jakeluverkkoalueen ulkopuoliset latauspisteet sumennettuna.

Kuvassa 2 olevat latauspaikat ovat jaoteltu niin, että vihreällä on alle 50 kW latauspaikat, sinisellä 50 kW, pinkillä 100 kW, oranssilla 200 kW ja keltaisella 300 kW latauspaikat. Näissä paikoissa voi olla monen tehoisia latauspisteitä, mutta tehon määrittää suurin latauspiste. Teiskon alueella on vain yksi alle 50 kW latauspiste. [19] Teslan latauspaikkoja (alle 22 kW, määränpää-lataus) Tampereella on yksi, Lapinniemen hotellin yhteydessä. Toinen latausasema on rakenteilla Ikean yhteyteen. [20]

Kaupunkien keskustoissa on yleisesti ongelmana autopaikkojen puuttuminen. Sähköautojen hankkiminen kaupunkioloissa lisää julkisten latauspaikkojen käyttöä esimerkiksi kauppoyhtiöiden pihossa. Julkisilla latauspisteillä on yleisesti keskinopeita latauspisteitä ja pikalatauspisteitä.

Tulevaisuudessa voidaan olettaa julkisia latauspaikkoja tulevan lähes kaikille huoltoasemille, kauppakeskusten ja isojen kauppoyhtiöiden parkkipaikoille ja pysäköintihalleihin. Myös useiden hotellien, sairaaloiden ja terveyskeskusten, uimahallien, kauppoyhtiöiden ja liikekiinteistöjen parkkipaikoille ennustetaan tulevan latauspisteitä. Latausteho näissä vaihtelee 3,7–11 kW ylöspäin.

2.3.1 Sähköautopaikat kiinteistöissä

Eduskunnan asettamassa laissa ”rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä” säädetään rakennusten energiatehokkuudesta annetun direktiivin ((EU) 2018/844) perusteella rakennusten sähköautojen latauspistevalmiudesta ja automaatio- ja

ohjausjärjestelmistä energiantehokkuuden ylläpitämiseksi. Lain vaatimat muutokset tulee ottaa käytäntöön vuoden 2024 loppuun mennessä määritellyin edellytyksin ja vaatimuksin. [15]

Laissa säädetään sähköautojen latauspisteiden osalta, että uusissa rakennuksissa, joissa on enemmän kuin neljä pysäköintipaikkaa tulee asentaa latauspistevalmius siten, että jokaiseen pysäköintipaikkaan voidaan asentaa latauspiste. ”Uuden rakennuksen yhteyteen, jossa on yli 10 pysäköintipaikkaa, on asennettava yksi suuritehoinen tai:

1. vähintään yksi normaalitehoinen latauspiste, jos pysäköintipaikkoja on 11–50,
2. vähintään kaksi normaalitehoista latauspistettä, jos pysäköintipaikkoja on 51–100;
3. vähintään kolme normaalitehoista latauspistettä, jos pysäköintipaikkoja on yli 100”

Suuritehoisella tarkoitetaan tässä yhteydessä vähintään 22 kW latauspistettä ja normaalitehoisella enintään 22 kW latauspistettä [21]. Latauspistevalmiuksia tulee asentaa 50 % pysäköintipaikoista, jos kiinteistöllä on 11–30 pysäköintipaikkaa, 20 % pysäköintipaikoista, jos kiinteistöllä on yli 30 pysäköintipaikkaa kuitenkin niin, että latauspistevalmius on vähintään 15 pysäköintipaikassa. [15]

Laajamittaisesti korjattavan rakennuksen vaatimukset latauspistevalmiudesta ja latauspisteistä ovat samat kuin uuden rakennuksen vaatimukset. Yli 20 pysäköintipaikkaa omaavan olemassa olevan rakennuksen tulee vuoden 2024 loppuun mennessä asentaa vähintään yksi latauspiste. Yhden tai useamman asuinrakennuksen uuteen pysäköintitaloon tai laajamittaiseen korjattavaan pysäköintitaloon tulee asentaa jokaiseen pysäköintipaikkaan latauspistevalmius. [15]

3. SÄHKÖAUTOKANTA NYKYPÄIVÄNÄ JA TULEVAISUUDESSA

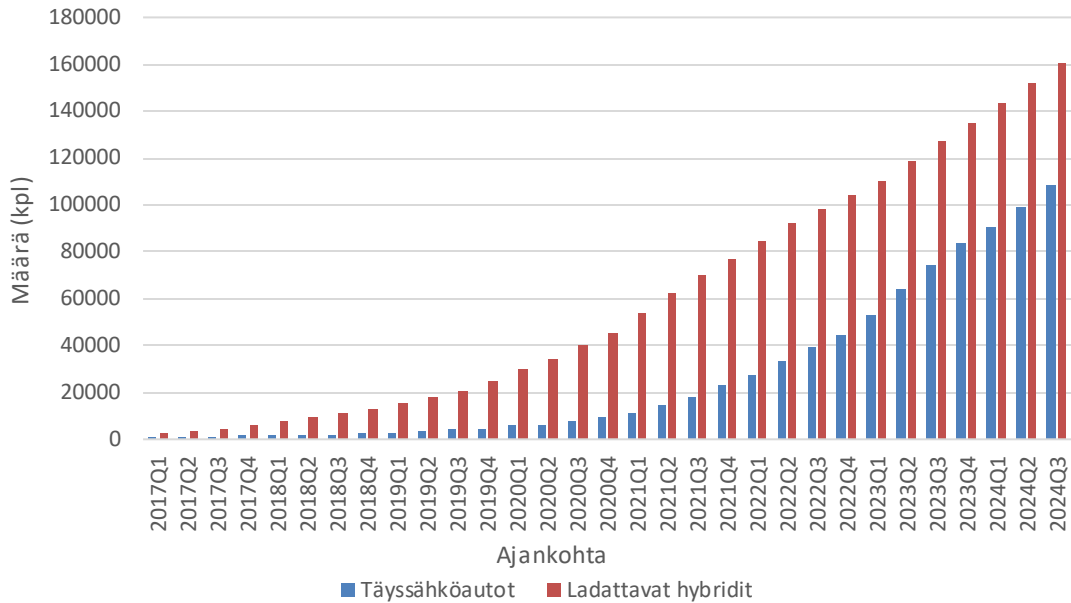
Ilmastonmuutoksen kiihtyminen ja öljyn kallistunut hinta on saanut ihmiset investoimaan sähköautoihin. Sähkökäyttöisten henkilöautojen määrän kasvu onkin ollut kiihtyvää erityisesti viime vuosina. Valtiollisilla toimilla pyritään ohjaamaan niin yksityishenkilöitä kuin yrityksiäkin siirtymään sähköautoiluun. Tämä näkyy esimerkiksi lainsäädännössä säädetyn uusien ja saneerattavien kiinteistöjen latauspaikkojen rakennevarauksilla, erilaisissa tuissa sekä verollisissa helpotuksissa.

Sähköauton hankintaa tuetaan rahallisesti muuntotuella sekä sen käyttöä verohelpotuksella. Sähköpakettiautoille ja sähkökuorma-autoille myönnetään hankintatukea. [22] Aiemmin myönnettiin myös henkilöautoille hankintatukea, mutta tämä poistui vuoden 2022 lopussa [23].

Verotuksessa täyssähköautosta maksetaan alin mahdollinen autovero, ajoneuvon perusvero ja käyttövoimaverot [24]. Verotus on pienempi kuin polttomoottoriautojen. Kokonaan sähkö- tai vetikäyttöisten uusien henkilö- ja pakettiautojen autoveroprosentti on 0, jos ajoneuvo on otettu käyttöön 1.10.2021 tai myöhemmin [25]. Autoveron poisto on lisännyt täyssähköajoneuvojen kysyntää [24].

Tällä hetkellä autokanta sähköistyy ensisijaisesti lataushybridien kautta pienemmän akun, ja näin halvemmän hinnan takia. Sähkökäyttöisiin ajoneuvoihin siirtyminen on helpompaa ladattavan hybridiautojen kautta, koska hybridiautossa sähköenergian toimintamatkarajoitus ei ole käyttöä rajoittavaa polttomoottorin takia.

Manner-Suomessa liikennekäytössä oli noin 2,84 miljoonaa henkilöautoa kvartaalilla Q3/2024. Tästä määrästä täyssähköautoja oli 3,8 % ja ladattavia hybridejä 5,7 %. Polttomoottoriautoista bensiinillä kulkevia oli 65,2 % ja dieselillä 24,6 %. Muita liikennekäytössä olevia henkilöautoja on muun muassa vedyllä ja biopolttoaineilla kulkevat ajoneuvot. [26] Kuvassa 3 esitetään täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrän lisääntyminen vuosina 2017–2024/Q3 Manner-Suomen osalta.



Kuva 3. Liikennekäytössä olevat sähkökäyttöiset henkilöajoneuvot Manner-Suomessa vuosina 2017–2024/Q3. [26]

Kuvasta 3 nähdään, että vuonna 2024/Q3 yhteenlaskettuna täyssähköautot ja ladattavat hybridautot muodostavat kokonaisuudessaan lähes 270 000 liikennekäytössä olevaa sähkökäyttöistä henkilöautoa. Tarkemmin tällöin täyssähköautoja on ollut 108 732 kappaletta ja ladattavia hybridejä 160 892 kappaletta. [26]

Maakunnittain jaoteltuna Pirkanmaalla täyssähköhenkilöautoja oli kvartaalilla Q3/2024 10 106 kappaletta ja ladattavia hybridejä henkilöautoja 14 634 kappaletta [26]. Edelleen kaupunkitasolla Tampereella täyssähköautoja oli kvartaalilla Q3/2024 4 566 kappaletta ja ladattavia hybridejä 6 867 kappaletta. [26] Taulukkoon 1 on koottu Pirkanmaan liikennekäytössä olevien henkilöautojen määrät eri käyttövoimilla.

Taulukko 1. *Liikennekäytössä olevat henkilöautot Pirkanmaalla käyttövoimittain vuosina 2018–2023. [26]*

Vuosi / Ajoneuvon energian lähde	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Yhteensä	251123	253 689	257715	259932	259125	261740
Bensiini	177770	177237	178 28	176556	174079	172552
Diesel	70 871	72 189	72 632	72 042	69 050	66 844
Sähkö	210	457	960	2 242	4 323	7 750
Bensiini/Sähkö (ladattava hybridi)	1 061	1 994	3 737	6 557	8 940	11 723
Diesel/Sähkö (ladattava hybridi)	162	312	363	522	614	672

Pirkanmaalla sekä koko Suomessa sähkökäyttöisten ajoneuvojen vuosittainen kasvu on ollut kiihtyvää ja kasvaa vuosittain yhä suuremmaksi.

3.1 Sähköautokannan tulevaisuuden ennusteet

Vuonna 2014 Energia- ja ilmastostrategia on linjannut, että tavoitteena vuodelle 2030 Suomessa pitäisi olla 250 000 sähkökäyttöistä autoa ja vähintään 50 000 kaasukäyttöistä autoa. Tähän ennusteeseen välitavoitteeksi sähköistä käyttövoimaa käyttävien ajoneuvojen määräksi on annettu vuodelle 2025 100 000 henkilöautoa, mikä on nyt jo saavutettu etuajassa. [26, 27] Ennuste saavutettiin jo vuonna 2022, mikä kertoo sähköautoilun kiihtyvästä kannan kasvusta sekä tekniikan ja tuotannon kehittymisestä.

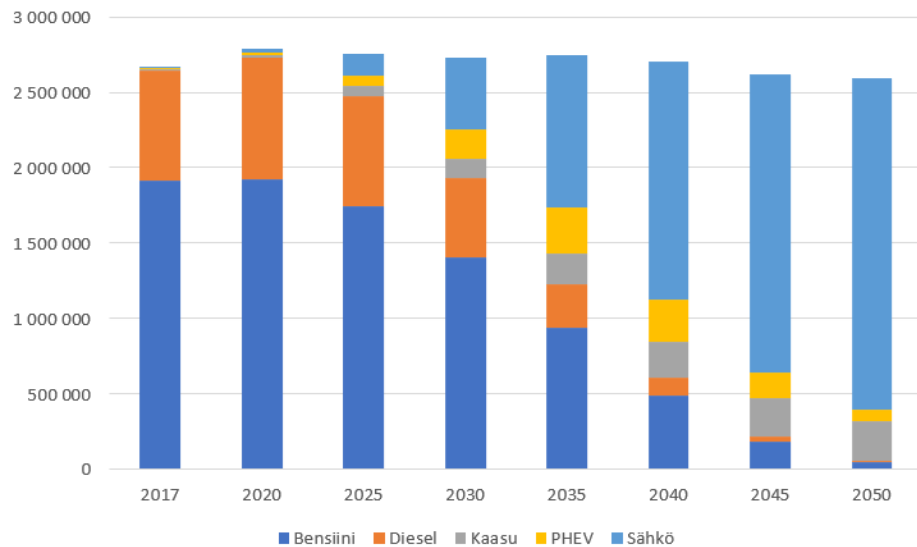
Autoalan tiedotuskeskuksen julkaisema käyttövoimatiekartta (2021) antaa ennusteen eri käyttövoimien autokannan kasvulle vuoteen 2040. Tähän ennusteeseen on otettu huomioon teknologian kehitys, lainsäädäntö- ja ohjaustoimet sekä kulutustottumusten muutokset. Käyttövoimatiekartan arvion pohjana on, että sähköautojen ensirekisteröintikehitys on nykytilanteen kasvun mukainen, liikenteen verotus mukailee nykypäivän autoilun verotusta sekä sen hetkiset hankintatuki, latausinfrastruktuurit ja hallituksen hyväksymät kannusteet ovat voimassa. Tällöin ennusteeksi saadaan vuoteen 2030 600 000 ladattavaa ajoneuvoa. Mahdollisella verotusmuutoksella käyttövoimatiekartta arvioi ladattavien ajoneuvojen kasvavan 750 000 kappaleeseen vuoteen 2030. Verotusmuutos olisi, että autovero korvattaisiin vuosittaisella ajoneuvoverolla. [6]

Autoalan tiedotuskeskus on myöhemmin vuonna 2024 arvioinut käyttövoimaennusteessaan, että käyttövoimakannusteiden skenaariossa ladattavien henkilöautojen määrä on 889 000 kappaletta vuonna 2030 ja vuonna 2040 1 444 800 kappaletta. Käyttövoimakannusteiden skenaarion kannusteita ovat muun muassa täyssähköhenkilöauton hankintatuki, kotilatauslaitteen hankintatuki ja erilaiset latausinfraan tuet sekä verokannusteet. [28]

Käyttövoimatiekartan kanssa myöhemmin samana vuonna julkaistussa Fossiilittoman liikenteen tiekartassa (2021) on arvioitu ennusteeksi, että liikenteessä olisi 700 000 sähkökäyttöistä henkilöautoa, joista vähintään puolet on täyssähköisiä henkilöautoja sekä 130 000 kaasukäyttöistä ajoneuvoa vuonna 2030 vaiheen 1 mukaisesti. Vaiheessa 2 lisätään ennusteeseen päästöjen vähennyskeinoja, jolloin sähköajoneuvojen määrä voisi olla vielä edellistä suurempi näiden keinojen avulla. [18]

Liikenne- ja viestintäviraston julkaisema toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045 esittelee tavoitteen koko autokannan kasvulle vuoteen 2050. Tämä kasvu on määritelty pohjautuen siihen, että kasvihuonepäästöt saadaan poistettua kokonaan vuoteen 2045 mennessä. Tavoitteena toimenpideohjelmassa olisi myös henkilöautojen ajosuorituksen pieneneminen, mikä vaikuttaisi kestäväen liikkumismuotojen, esimerkiksi julkiseen liikenteen ja pyöräilemisen, lisääntymiseen. [29]

Kuvassa 4 on esitetty ”toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045” -selvityksen tavoite henkilöautojen kannan kehittymiseen käyttövoimittain. Ladattaviin hybrideihin on yhdistetty ajoneuvot, jonka toisena polttomoottorin energianlähteenä on bensiini tai diesel.



Kuva 4. Tavoite autokannan kehitykselle käyttövoimittain toimenpideohjelman mukaisesti vuosille 2020–2050 [29].

Selvityksen mukaisesti autokannasta vähenevät eniten benssiini- ja dieselajoneuvot, joiden väistymiseen sähköautoilla on isoin rooli. Ladattavien hybridautojen määrä kasvaa noin vuoteen 2035, minkä jälkeen määrä alkaa pienenemään. Tämä johtuu siitä, että tulevaisuudessa hinta on laskenut täyssähköautoilla niin, ettei ladattavat hybridit ole enää kannattavia hintansa puolesta. Hinnan lasku johtuu muun muassa siitä, että akkujen sarjatuotannon ja teknologian kehityksen myötä akun yksikköhinta laskee. Biokaasu polttoaineena yleistyy tulevaisuudessa, ollen toiseksi suurin käyttövoima henkilöajoneuvokannassa noin vuodesta 2045 eteenpäin. [29] Tulevaisuudessa polttomoottoriautoja tulee olemaan autokannasta joitakin prosentteja. Polttomoottoriajoneuvojen energiatehokkuutta tullaan parantamaan, jolloin ne eivät aiheuta niin suuria päästöjä [30].

Selvityksessä annettuja keinoja liikenteen vähäpäästöisyyden saavuttamiseksi on muun muassa hankintatuet, kestävien liikkumistapojen edistäminen, uusiutuvien polttoaineiden kestävä tuotanto ja autoveron pienentäminen [29]. Ennuste on hieman maltillisempi kuin fossiilittoman tiekartan tai autoalan ennuste, mikä johtuu suurelta osin siitä, että selvitys on tehty aiemmin, vuonna 2018.

Ennusteessa koko henkilöautokannan ennustetaan pienenevän vuoden 2035 jälkeen, mikä johtuu selvityksen oletuksena olevan kestävä liikummistapojen paranemisesta. Selvityksessä onkin ollut hieman eri näkökulma aiheeseen. Ennusteen laatimisaikana ja näkökulman takia tätä selvitystä ei suoraan käytetä tämän työn ennusteen pohjana.

Henkilöautoja ensirekisteröidään nykyään vuosittain noin 80 000–120 000 kappaletta. Ensirekisteröinneissä on ollut laskua edellisinä vuosina. [31] Käyttövoimatiekartan

ennusteen mukaan tulevaisuudessa ensirekisteröinneistä noin 80 % tulee olemaan sähkökäyttöisiä [6].

3.2 Sähköautokannan kasvu TAES:n alueella

Kasvua voidaan arvioida ensirekisteröintien, tehtyjen kasvuennusteiden sekä menneiden vuosien kasvua tarkastelemalla. Näillä yhdessä saadaan valistunut ennuste seuraaville vuosikymmenille.

Tampereen Energia Sähköverkon jakelualue koostuu koko Tampereen alueesta sekä pienestä osasta Pirkkalaa, Kangasalaa ja Lempäälää. Tampere alueena koostuu karkeasti kaupunkialueesta, taajama-alueesta ja Teiskon maaseutumaisesta alueesta.

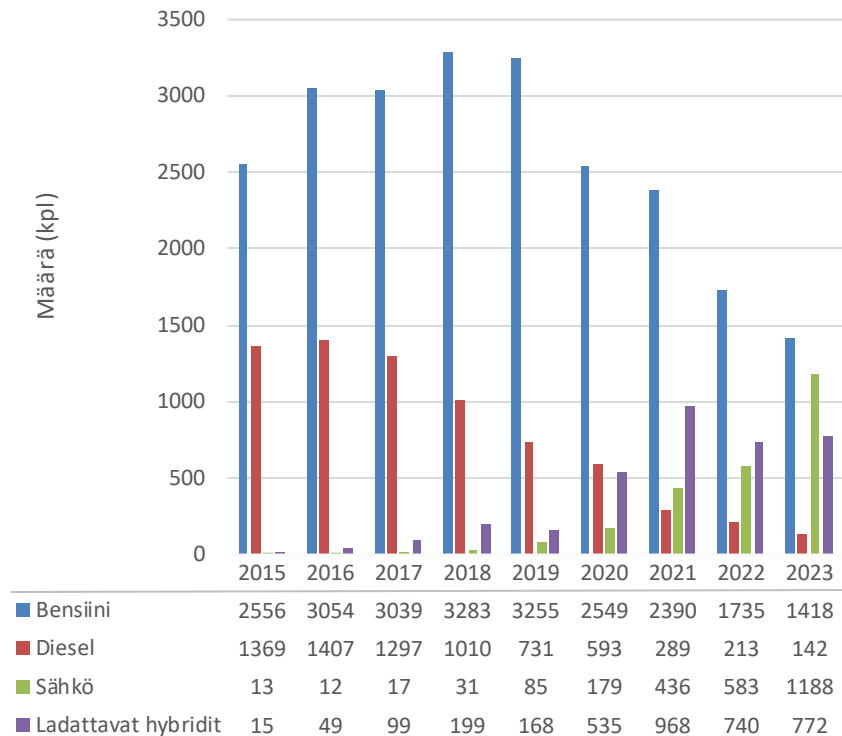
Taulukossa 2 on Tampereen liikennekäytössä olevien henkilöautojen määrä käyttövoimittain kvartaalilla Q3/2024. Taulukossa ei näy kaikkia käyttövoimia, kuten esimerkiksi biopoltoaineilla kulkevia, sillä näitä henkilöautoja on vain pieni määrä.

Taulukko 2. *Liikennekäytössä 1.9.2024 olevien henkilöautojen määrä käyttövoimittain Tampereella [26].*

Vuosi / Määrä(kpl)	Q3/2024
Yhteensä	101 882
Bensiini	68 198
Diesel	21 242
Sähkö	4 566
Ladattava hybridi bensiini/sähkö	6 589
Ladattava hybridi diesel/sähkö	278

Taulukosta nähdään, että kaikilla käyttövoimilla kulkevia henkilöautoja on Tampereella yhteensä 101 882 kappaletta. Sähkökäyttöisiä henkilöautoja on yhteensä 11 433 kappaletta ja bensiini- ja dieselautoja on yhteensä 89 440 kappaletta. Tampereen alueella koko autokannan määrä on noussut vuosikymmenien aikana. [26]

Kuvassa 5 on Tampereen ensirekisteröityjen henkilöautojen käyttövoimien osuudet vuosina 2015–2023.



Kuva 5. Tampereen alueen ensirekisteröinnit käyttövoimittain vuosina 2015–2024. [31]

Ensirekisteröintien määrät ja niiden käyttövoimatyytit ovat tärkeitä autokannan uudistumisen kannalta. Vuoden 2023 loppuun mennessä Tampereella on ensirekisteröity täyssähköisiä henkilöautoja 3202 kappaletta ja ladattavia hybridejä 4006 kappaletta. Vuonna 2023 ensirekisteröintejä tehtiin 1188 täyssähköiselle henkilöautolle ja 772 ladattavalle hybridille. Luvut kasvavat joka vuosi, mikä näkyy myös kuvasta 5. Tampereen ympäryskuntien sähkökäyttöisten henkilöautojen ensirekisteröintiluvut ovat toisiinsa verraten lähes samaa tasoa. Viime vuosina keskimäärin noin 160 (täyssähköauto) ja 60 (ladattava hybridi) kappaletta luokkaa. [31]

Ladattavat hybridit ovat tällä hetkellä vielä suosittumia niiden käyttövarmuuden takia. Kuvasta 5 nähdään, että benssiini- ja diesel henkilöautojen ensirekisteröinnit ovat selvästi laskussa. Ensirekisteröitävien sähkökäyttöisten ja polttomoottoriajoneuvojen suhde muuttuu, ja on jo muuttunut. Sähkökäyttöisten ensirekisteröintien prosenttiosuus on ollut viime vuosina lähes 10 % suurempi joka vuosi. Lähes samassa suhteessa polttomoottorien ensirekisteröintien prosenttiosuus on vähentynyt. Tulevaisuudessa voidaan nähdä sähkökäyttöisten määrän kasvun kyllästyminen, joka tulee lähenemään miltei sataa prosenttia, koska vuoden 2035 jälkeen Euroopan unionin alueella myytävien uusien ajoneuvojen tulee olla päästöttömiä. Auton keskimääräinen käyttöikä on 15 vuotta ja siten vuonna 2050 suurin osa ajoneuvoista olisi päästöttömiä. [32] Vuoden 2035

jälkeen Tampereella voidaan siis olettaa sähköautojen ensirekisteröintien olevan 3500–4500 kappaletta luokkaa kuvan 5 perusteella.

3.3 Tutkimuksen skenaariot

Edellä luvussa 3.1 esitetyt Suomen sähköautokannan tavoitteen ennusteet voidaan sovittaa karkeasti myös Tampereen jakeluverkon alueelle. Tampereella on kaupunki- ja taajama-alueita sekä maaseutumaista aluetta niin kuin Suomessa yleisesti. Määritellään tälle työlle kaksi eri skenaariota kahdelle eri vuodelle, perus ja nopea skenaario vuosille 2030 ja 2040.

Tarkastellaan edellä esitettyä fossiilittoman tiekartan ennustetta 700 000 sähkökäyttöisestä ajoneuvosta vuodelle 2030. Tämä tarkoittaisi TAES:n alueella noin 26 700 kappaletta sähkökäyttöisiä ajoneuvoja. Tämän työn perusskenaario mukailee Fossiilittoman liikenteen tiekartan vaiheen 1 ennustetta. Se on tämänhetkisten tukien avulla saavutettava ennuste.

Ennusteet ja arviot sähköautojen tulevaisuudesta kasvavat joka vuosi uusien ennusteiden myötä. Koska työssä tutkitaan pitkälle tulevaisuuteen yltävää tilannetta, tarvitsee toisen skenaarion olla hieman yläkanttiin mitoitettu. Nopea skenaario on arvioitu niin, että kasvu on lineaarista, mutta kiihtyvää, ja sähköautojen määrä kasvaa nopeammin kuin perusskenaariossa. Nopea skenaario mukailee autoalan tiedotuskeskuksen arvioitua käyttövoimakannusteiden avulla saavutettavaa skenaariota. Käyttövoimakannusteita ennusteessa ovat muun muassa hankintatuet sähköautoille ja kotilatauslaitteille sekä erilaiset latausinfraan tuet ja verokannusteet. [28]

Taulukoissa 3 ja 4 on skenaarioiden perusteella täyssähköautojen ja ladattavien hybridiautojen arvioidut prosenttiosuudet ja määrät TAES:n jakeluverkon alueella. TAES:n alueen koko henkilöautomääräksi on arvioitu 104 000 kappaletta, joista prosenttiosuudet ovat laskettu. Arvioidussa kokonaismäärässä on vuoden 2022 henkilöautomäärä, noin 101 700 kappaletta, ja lisäksi tähän on lisätty ympäryskunnista 1000 henkilöautoa sekä vapaa-ajan liikennettä ja työmatkaliikennettä Tampereelle päin 1300 kappaletta [26]. Vapaa-ajan liikenne Tampereelle päin voi olla esimerkiksi kauppakeskuksissa tai urheiluhalleissa käyviä tai ohikulkumatalla olevia, jotka lataavat TAES:n jakeluverkon alueella julkisella latauspisteellä. Työmatkaliikennettä on liikenne ympäryskunnista Tampereelle, jolloin autoa ladataan työpaikalla TAES:n jakeluverkkoalueella.

Taulukkojen 3 ja 4 luvut ovat kasvun määrän arvioita eli vuosi 2022 on määritetty nollassi. Ennustettujen vuosien luvut ovat vuoden 2022 lukumäärien (täyssähkö 2308

kpl ja ladattavia hybridejä 4985 kpl) päälle lisättäviä määriä. Lyhenne BEV kuvaa täyssähköajoneuvoja ja PHEV ladattavia hybridiajoneuvoja.

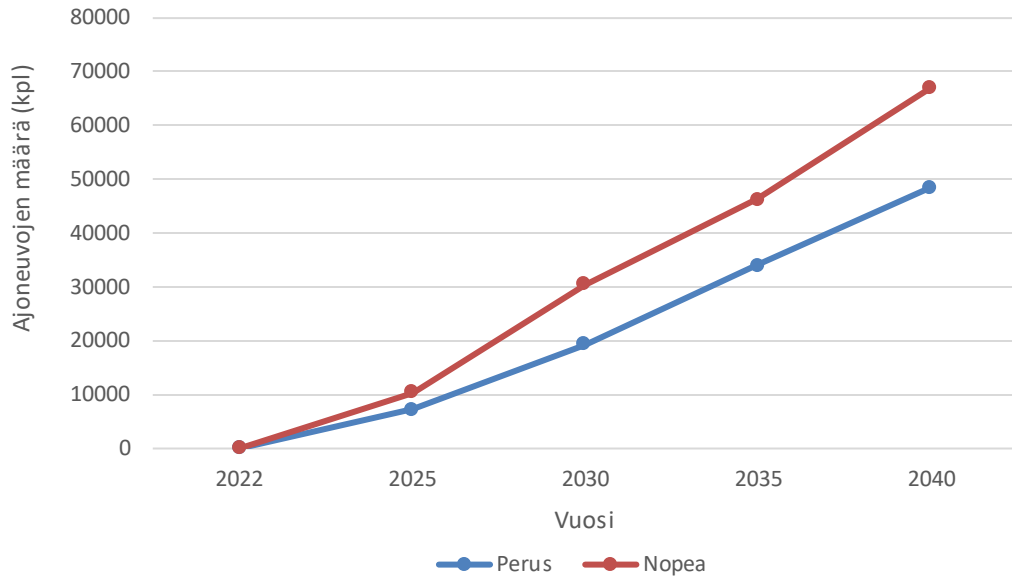
Taulukko 3. *Perusskenaarion määrittelemä sähköautokannan kasvu.*

Vuosi / Määrä	2022	2025	2030	2035	2040
prosenttiosuus BEV (%)	0	3,17	10,58	22,79	37,69
BEV (kpl)	0	3300	11000	23700	39200
Prosenttiosuus PHEV (%)	0	3,85	8,08	9,90	8,94
PHEV (kpl)	0	4000	8400	10300	9300
Sähköautoja yhteensä (kpl)	0	7300	19400	34000	48500

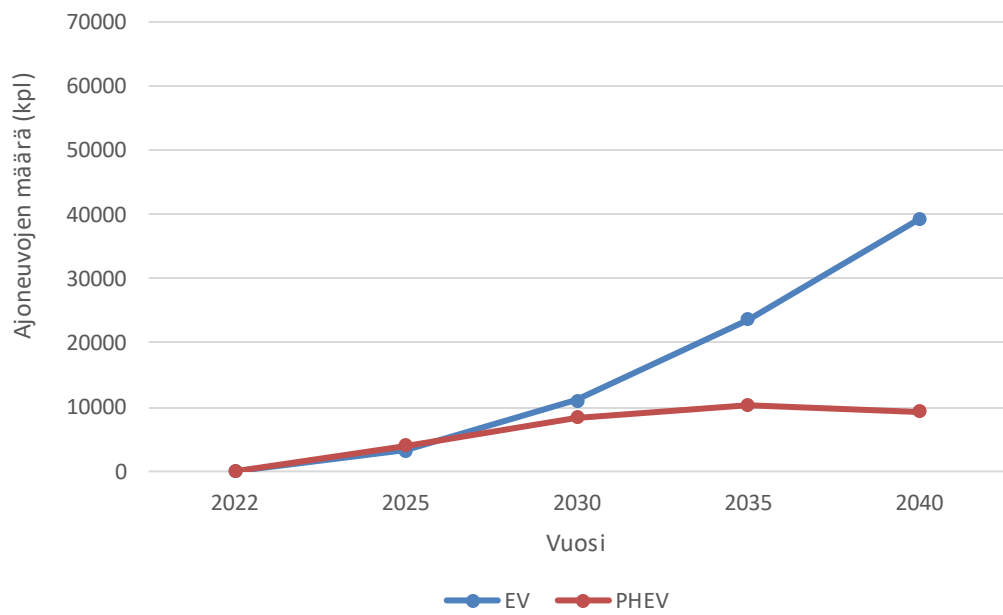
Taulukko 4. *Nopean skenaarion määrittelemä sähköautokannan kasvu.*

Vuosi / Määrä	2022	2025	2030	2035	2040
Prosenttiosuus BEV (%)	0	4,52	19,52	35,58	57,69
BEV (kpl)	0	4700	20300	37000	60000
Prosenttiosuus PHEV (%)	0	5,48	9,71	8,94	6,73
PHEV (kpl)	0	5700	10100	9300	7000
Sähköautoja yhteensä (kpl)	0	10400	30400	46300	67000

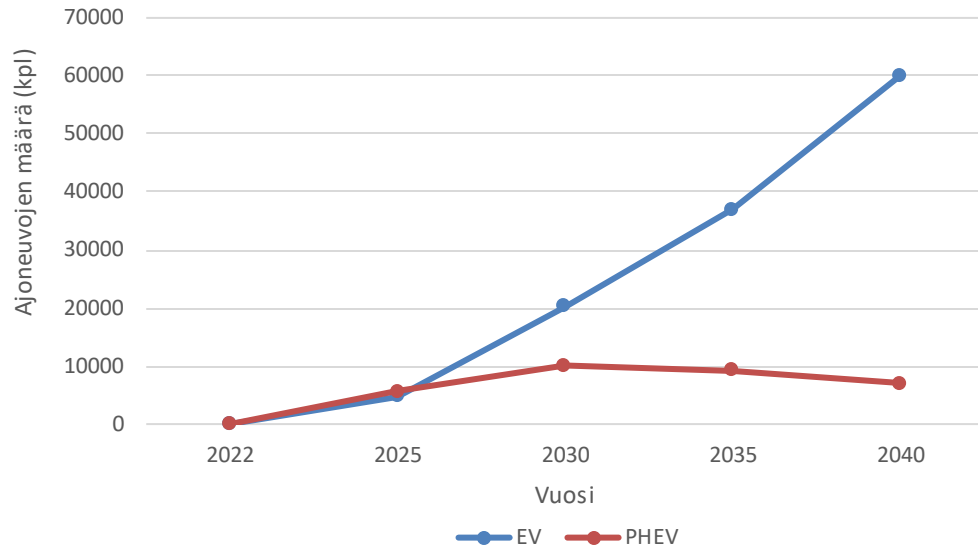
Seuraavissa kuvissa 6, 7 ja 8 on taulukkojen 3 ja 4 lukujen pohjalta piirretyt kuvaajat. Ensimmäiseksi samassa kuvaajassa on perus ja nopean skenaarion kaikkien sähkökäyttöisten henkilöautojen kasvu. Kuvissa 4 ja 5 on erikseen molempien skenaarioiden täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrän kasvun kuvaajat.



Kuva 6. Sähkökäyttöisten henkilöautojen määrän kasvu molemmilla skenaarioilla.



Kuva 7. Perusskenaarion määrittelemä täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrän kasvu.



Kuva 8. Nopean skenaarion määrittelemä täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrän kasvu.

Kuvista 7 ja 8 nähdään, että alussa ladattavien hybridiautojen määrä on suurempi, mutta pienenee niin, että täyssähköautojen määrä ylittää ladattavien hybridien määrän vuoden 2025 jälkeen. Perusskenaariossa tämä tapahtuu noin vuonna 2027 ja nopeassa skenaariorissa aiemmin noin vuonna 2026. Kuvasta 6 nähdään yhteensä sähkökäyttöisten henkilöautojen määrän kehittyminen näillä kahdella skenaarioilla.

4. KUORMITUKSEN MUUTOS

Latauksen vaikutuksesta tapahtuvaan kuormituksen muutokseen vaikuttavat energian siirron lisäys, tehon ajallinen ja määrällinen vaihtelu ja etenkin tehohuipun kasvu. Näihin vaikuttavat latauksen ajoitus, latauksen erilaiset ominaisuudet ja akun kapasiteetti sekä sähköautojen ajosuorite. Kuormituksen muutosta näiltä osin esitellään tässä luvussa. Kuormitukseen vaikuttaa myös muita tekijöitä, esimerkiksi ympäristöolosuhteet ja tehohäviöt. Näitä ei kuitenkaan tämän työn rajoissa käsitellä. Kuormituksen muutos lisätään tämänhetkisen todellisen taustakuorman päälle.

Seuraavissa luvuissa määritellään latauksen kuormituskäyrät eri lataustyypeille, latauksen parametrit ja oletukset sekä energian siirron lisäys jakeluverkossa.

4.1 Kuormituksen mallinnus

Kuormituskäyrien avulla saadaan tehon vaihtelu mallinnettua määritellyn vuosienergian kanssa. Kuormituskäyrät kuvaavat tehon keskimääräistä ajallista vaihtelua tunneittain. Ne mallintavat tyyppikäyttäjäryhmän kulutusta. Vuosia käytössä olleet kuormituskäyrät ovat mittaustulosten perusteella mallinnettu jo 80-luvulla, ja ovat osaltaan vanhentuneet uusien kuormitusten ja sähkönkäytön muuttumisen vaikutuksesta. [33]

Sähkökäyttöisten ajoneuvojen lataukseen ei ole virallisia kuormituskäyriä olemassa, mutta tutkimuksia on tehty jo paljon aiheesta. Antti Rautiaisen väitöstyössään ”*Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids*” määritellyt kuormituskäyrät ovat tässä työssä latauksen kuormituksen pohjana. Ne määrittelevät sähköauton latauksen ajoittumisen ja kuormituksen, määrittelyllä vuosienergialla kullakin erityyppisellä kulutustyyppillä. Käyrät ovat pohjimmiltaan muodostettu ladattavien hybridien lataukseen, mutta työssä mallinnetaan yleisesti kaikkia sähkökäyttöisiä ajoneuvoja. Saatuja kuormituskäyriä voidaan käyttää myös täyssähköautojen latauksen mallinnukseen. [34]

4.2 Sähköautojen latauksen kuormituskäyrät

Määritellään työssä sähköajoneuvon latauskäyttäytyminen seuraaviin ryhmiin: koti, työpaikka sekä julkinen. Nämä perustuvat Antti Rautiaisen määrittämiin sähköauton lataustyypeihin väitöskirjassaan. [34] Näillä ryhmillä on erilainen latauskäyttäytyminen. Koti-tyyppiin kuuluvat tässä työssä omakoti- ja paritalot, rivitalot ja kerrostalot sekä vapaa-ajanasunnot. Työpaikka-tyyppiin kuuluvat teollisuus ja muut työpaikat ja julkiseen

tyyppiin esimerkiksi kauppoja, sairaaloita, uimahalleja, liikuntapaikkoja, hotelleja ja huoltoasemia.

Kotitalouksien oletetaan omistavan oman latauspisteen, ja lataavan tällä töistä kotiin tullessaan sekä öisin. Lataustapa on joko hitaalla tai perus lataustavalla tapahtuvaa, jolloin se ei käytä hetkellisesti paljoa tehoa. Omakoti-, paritalot ja vapaa-ajanasunnot kuuluvat tähän tyyppiin. Rivitalo- ja kerrostaloilla on yleensä asukkaiden yhteinen parkkipaikka tai parkkihalli, missä on saatavilla latauspisteitä. Ne ovat yleensä myös hitaan tai peruslataustavan pisteitä. Latauspisteet eivät ole välttämättä yhden asukkaan käytettävissä, joten niitä voidaan käyttää satunnaisemmin kuin omakoti- tai paritalon latauspistettä. Työpaikkalataus erottuu edellä olevista merkittävästi. Työpaikkalataus tapahtuu työpäivän aikana, mikä sijoittuu yleisesti arkipäiville välille klo 7–16. Julkisen latauksen pisteet ovat eniten satunnaisuutta sisältäviä, ja sijoittuvat koko viikolle, mutta suuren tehon kuormitus painottuu eniten viikonloppuihin, sillä ihmisillä on yleisesti silloin vapaa-aikaa lähteä viettämään päiväänsä esimerkiksi kauppakeskuksiin. Nämä eri latauskäyttäytymisten kuormituskäyrät indeksisarjoihin muutettuina esitellään luvussa 4.4.

Koti- ja paritalojen sekä rivitalojen oletetaan olevan kauempana kaupungin keskustasta taajama-alueilla sekä omistavan oman latauspisteen tai yhtiön yhteisen latauspaikan. Yleisesti kauempana kaupungin keskustoista asuvat ihmiset ajavat pidempiä matkoja. Oletetaan siis, että näiden asumismuotojen henkilöt ajavat vuodessa enemmän, joten kotilatauksen vuosienergia on suurempi. Kerrostalolatauspisteen vuosienergia on keskimäärin pienempi, koska kerrostalot sijaitsevat lähempänä kaupunkia, ja näiden parkkipaikoilla ei todennäköisesti ole jokaisessa paikassa vielä latauspistettä tai mahdollisesti ei tule edes olemaan latausmahdollisuutta tulevaisuudessa. Vapaa-ajan asunnon latauspisteen vuosienergian oletetaan olevan vielä pienempi, koska asunnolla ei ole koko ajan, ja suurimmassa osassa tapauksista sähkönkäyttö painottuu vain kesään. Näin ollen latausenergia jää vuodessa pienemmäksi. Eri skenaarioille ja eri lataustyypeille määritellään omat vuosienergiansa yllä olevien oletuksien mukaisesti. Lataustyyppien vuosienergian määrittäminen perustuu tässä työssä myös lisääntyvän energian siirron määrään. Vuosienergian määrittästä kuvataan tarkemmin luvussa 5.3.

4.3 Sähköauton latauksen oletukset

Sähköauton latauksen kuormituskäyriä muodostettaessa on täytynyt tehdä joitakin oletuksia. Oletuksia on täytynyt tehdä akun kapasiteetin, lataustehon ja lataustyyppien kanssa.

Sähköauton keskimääräinen akun kapasiteetti on arvioitu olevan 40 kWh latauksen kuormituskäyriä muodostettaessa. Arvo on keskiarvo, johon on otettu huomioon sekä lataushybridit että täyssähköautot. Näin ollen kapasiteetin arvo on nykyisille täyssähköautoille pieni ja hybrideille suuri akkukapasiteetti. Kapasiteetti on valittu myös sillä perusteella, että akut eivät koskaan ole täysin tyhjiä lataukseen kytkettäessä. Akut kestävät paremmin, jos niitä ei ladata aivan täyteen ja voikin olla, että tulevaisuudessa on trendinä, ettei akkuja ladata täysin täyteen akkujen elinkaarta säästäen. 40 kWh akkukapasiteetilla ja keskimääräisellä energiankulutuksen arvolla 0,2 kWh/km pääsee kulkemaan 200 km, mikä riittää monelle päivittäisiin ajoihin.

Lataustehot ja edellä mainitut kuormituskäyrätyypit ovat määritelty seuraavasti: omakoti-, paritalo- ja vapaa-ajanasuntolataus 11 kW (koti), kerros- ja rivitalolataus 3 kW (koti), työpaikkalataus 3 kW (työpaikka) ja julkinen lataus 22 kW ja 150 kW (julkinen). Näiden vuosittainen kuormitus muuttuu vuosienergioiden mukaan, jolloin latauskuorma on hieman erilainen eri kulutustyypeillä.

Oletuksena kuormituskäyrissä on, että latausteho pysyy samana latauksen ajan. Tällöin ei ole mahdollista esimerkiksi latauslaitteen pienentää lataustehoa latausaseman suuren latauskysynnän tai suuren taustakuorman aikana. Esimerkiksi julkisten ja työpaikkojen latauspaikoilla on monesti kuormanhallintaa, koska latauspisteitä on monta, ja esimerkiksi kaikkien ollessa käytössä, maksimiteho ei välttämättä riitä kaikille. Tästä lisää luvussa 7. Muita oletuksia kuormituskäyrillä on, että lataus jakautuu tasaisesti kolmelle vaiheelle ja epäsymmetriaa ei huomioida. Lataushäviöt ovat pieniä, joten työssä ei oteta niitä huomioon. Lataustapahtuman hyötysuhde on siis 100 %.

Latauksen kuormituskäyrissä lataus ajoittuu kaikilla lataustyypeillä päiväsaikaan eikä esimerkiksi kotitalouksissa ole huomioitu yöllä tapahtuvaa latausta. Kotitalouksissa yöaikaan tapahtuva lataus on nykypäivänä yleistä halvan sähköenergian takia sekä siksi, että autoa ei tarvita yöaikaan. Yöaikaan tapahtuva lataus on merkittävä osa kaikesta latauksesta, ja vaikuttaa tehon jakautumiseen. Yöaikaan tapahtuvaa latausta mallinnetaan karkeasti luvussa 6.3.6.

Näiden oletuksien pohjalta on muodostettu kuormituskäyrät ja hajonnat eri lataustyypeille. Latauksen kuormituskäyrät ja hajonnat on saatu tuntikeskitehosarjoina, jolloin käyrät täytyy muuttaa verkkotietojärjestelmän vaatimaan muotoon indeksisarjoiksi.

4.4 Tuntitehosarjojen muutos indeksisarjoiksi

Tuntitehosarjat kuvaavat kuinka paljon tehoa käytetään jokaisella tunnilla. Kaksiviikkoindeksisarjoissa on kaksi komponenttia. Ulkoinen indeksi kuvaa kuormituksen vuodenajan vaihtelua jokaiselle 2-viikkoindeksille. Sisäinen indeksi kuvaa ulkoisen 2-viikkoindeksin sisällä jokaisen päivän tuntikohtaista vaihtelua. Luku 100 on indeksin keskiarvo, johon jokaista ulkoista ja sisäistä indeksiä verrataan. [35]

Latauksen tuntitehosarjat muutetaan indeksisarjoiksi seuraavilla kaavoilla (1)-(3). Kaavalla (1) lasketaan ulkoinen kaksiviikkoindeksi talvi- ja kesäkaudelle ja kaavoilla (2) ja (3) sisäinen kaksiviikkoindeksi. Kuukaudet jaetaan kesä- ja talvikuukausiin, joilla on eri ulkoiset indeksit. Kesäkuukausiksi on määritelty toukokuu-elokuu ja talvikuukausiksi syyskuu-huhtikuu. Tällöin kesäkuukausien määrä viikkoina on 18 viikkoa ja talvikuukausien määrä 34 viikkoa. Kaksiviikkojaksoina edellä olevat kesäkuukaudet ovat 9 kappaletta ja talvikuukaudet 17 kappaletta. Sisäinen kaksiviikkoindeksi määritetään jokaiselle tunnille eri päivätyypille kesä- ja talvikaudelle. Päivätyyppejä on arki, aatto ja pyhä. Viikossa päivätyyppejä on siis 5 arkipäivää, 1 aattopäivä ja 1 pyhäpäivä. [36]

$$U_{i,t/k} = C \cdot \frac{\text{viikkojen_lkm}_{\text{talvi/kesä}}}{\text{kaksiviikkojaksojen_lkm}_{\text{talvi/kesä}}} \cdot \frac{\text{viikon_tuntitehojen_summa}_{\text{talvi/kesä}}}{\text{tuntitehojen_summa}_{\text{vuosi}}} \quad (1)$$

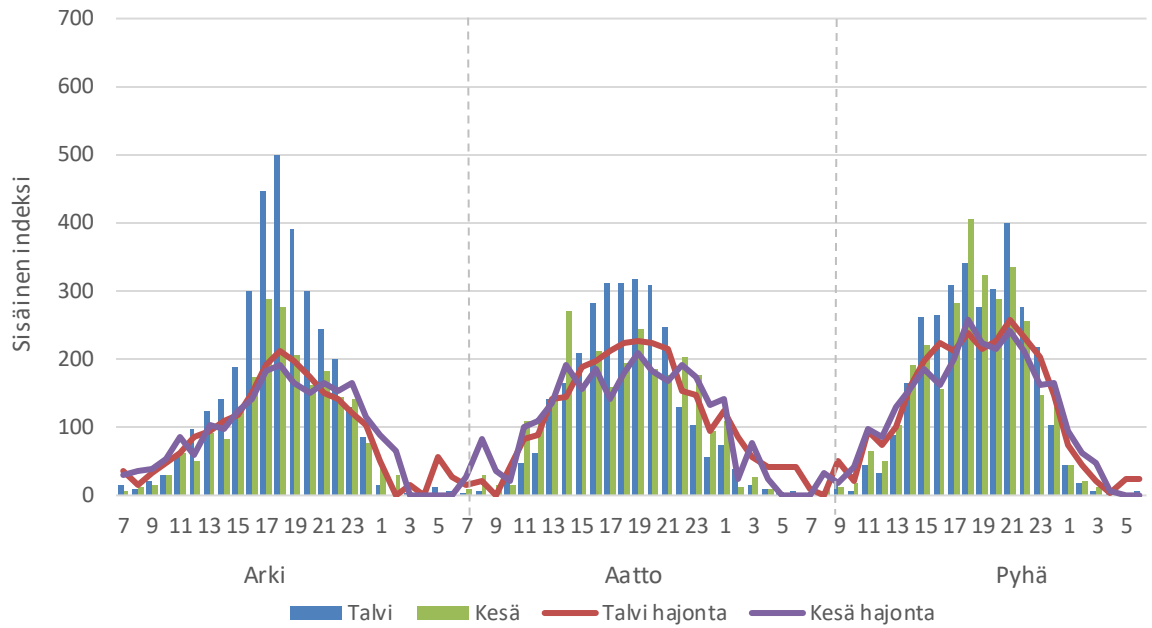
$$S_i = D \cdot B \cdot \frac{\text{tunnin } h \text{ tuntiteho}}{\text{tuntitehojen summa vuorokaudessa}} \cdot \frac{1}{\text{päivätyypin lkm viikossa}} \quad (2)$$

, jossa

$$B = \frac{\text{tietyn päivätyypin tuntitehojen summa viikossa}}{\text{koko viikon tuntitehojen summa}} \quad (3)$$

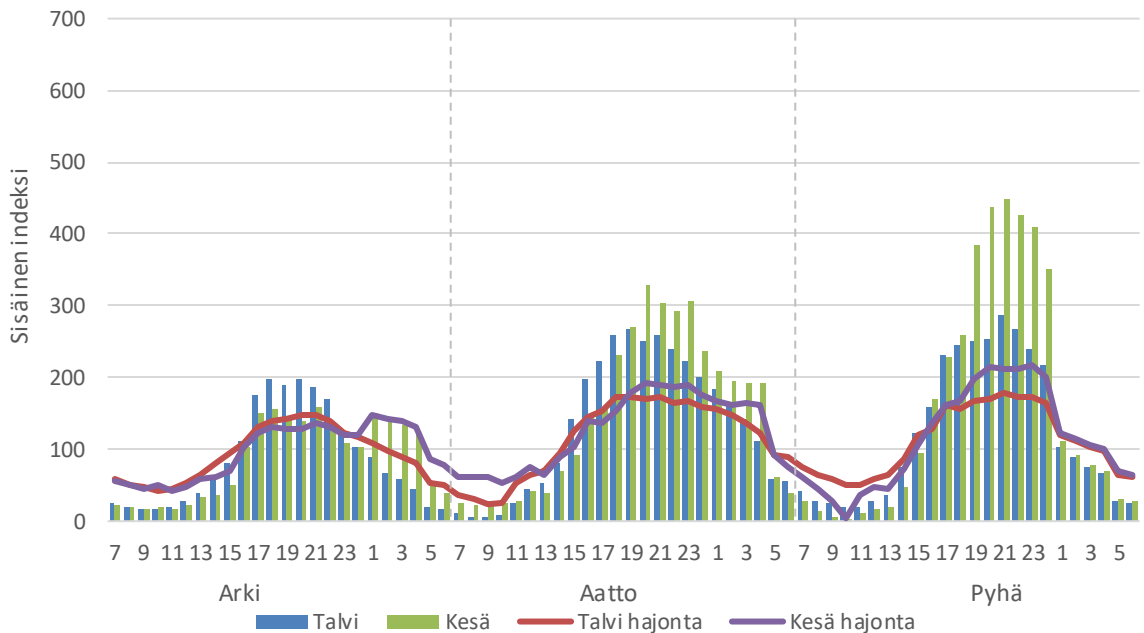
, missä C on vuoden kaksiviikkoindeksien summa 2600 ja D on viikon tunti-indeksien summa 16800. Kaavalla 1 voidaan laskea talvi ja kesäkauden ulkoiset indeksit. Alaindeksi on siis joko talvi tai kesä, ja sen mukaiset yhtälön arvot lukumäärille ja summille. [36]

Kuormituskäyrien ja hajontojen indeksisarjat kesälle ja talvelle ovat esitetty kuviin 9–13. Pylvää esittävät kuormituskäyriä indeksisarjoina ja viivakäyrät hajontoja indeksisarjoina. Ulkoinen 2-viikkoindeksi alkaa tammikuusta ja päättyy joulukuun loppuun. Ensimmäinen ulkoinen 2-viikkoindeksi kuvaa siis ajanjaksoa 1.–14.1. Ulkoiset indeksit ovat tämän työn tapauksessa tietyllä latauskäyrällä kaikilla talviviikoilla sama arvo sekä kesäviikoilla sama arvo. Sisäiset kaksiviikkoindeksit ovat jokaiselle päivätyypille niin, että arki on maanantai 07.00- lauantai 07.00, aatto lauantai 07.00 – sunnuntai 07.00 ja pyhä sunnuntai 07.00 – maanantai 07.00. [35]



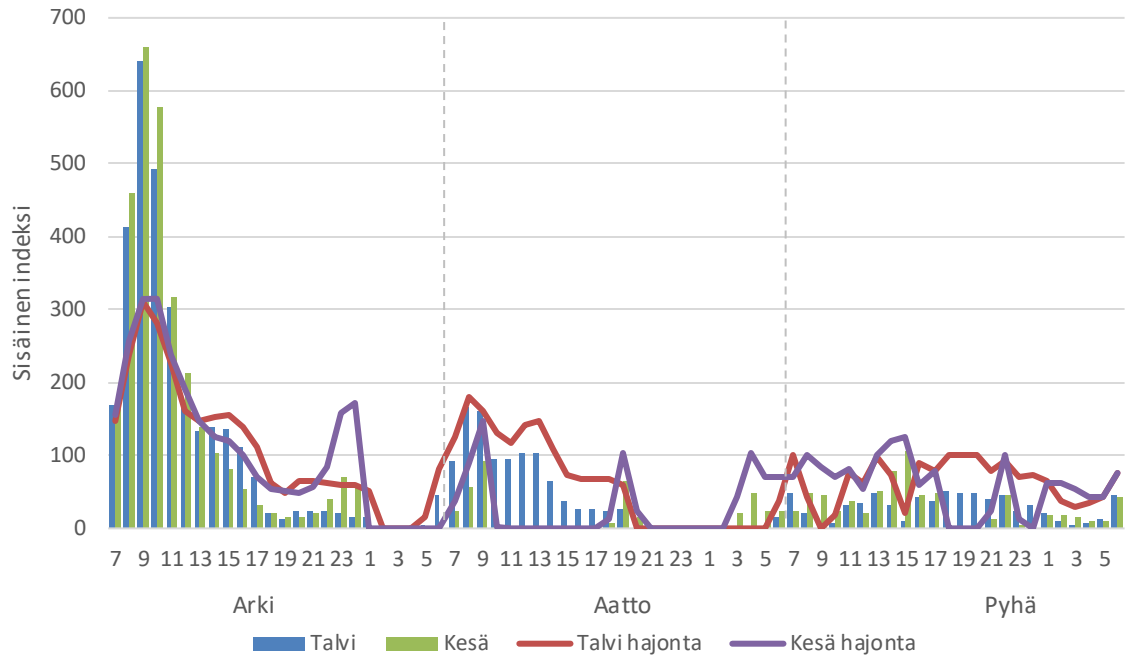
Kuva 9. Omakoti- ja paritalolatauksen sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.

Ulkoiset indeksisarjan arvot omakoti- ja paritalolataustyypin talvi- ja kesäsarjoille on $U_{i,t}=104$ ja $U_{i,k}=93$. Hajontojen ulkoiset indeksit vastaavasti ovat $U_{i,t,haj}=101$ ja $U_{i,k,haj}=98$.



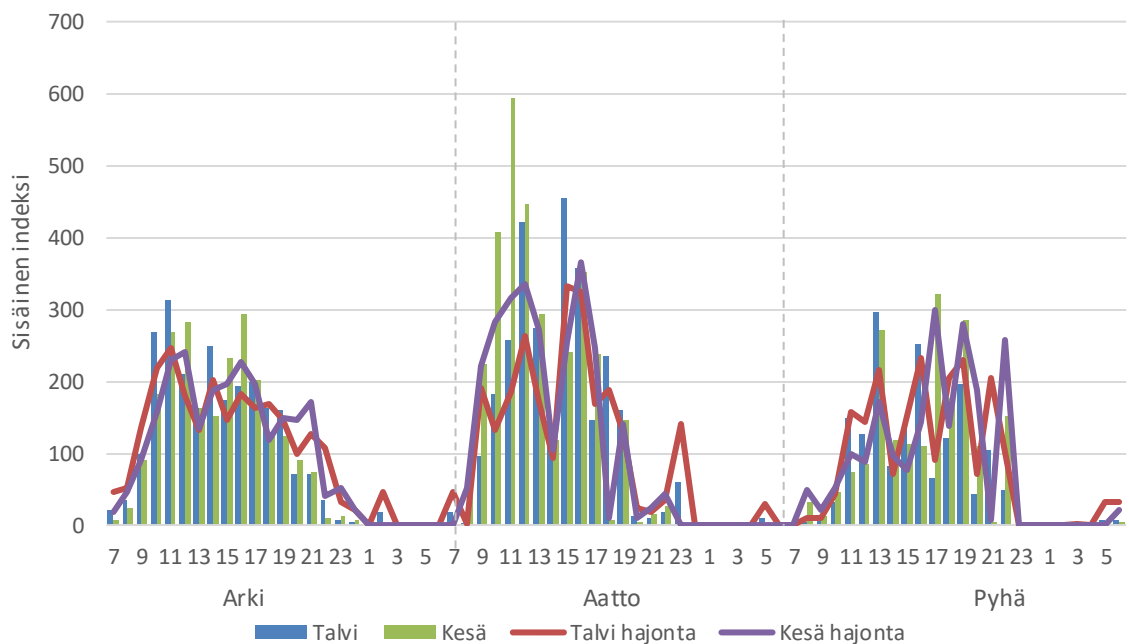
Kuva 10. Kerros- ja rivitalolatauksen sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.

Ulkoiset indeksisarjan arvot kerros- ja rivitalolataustyypin talvi- ja kesäsarjoille on $U_{i,t}=100$ ja $U_{i,k}=92$. Hajontojen ulkoiset indeksit vastaavasti ovat $U_{i,t,haj}=101$ ja $U_{i,k,haj}=93$.



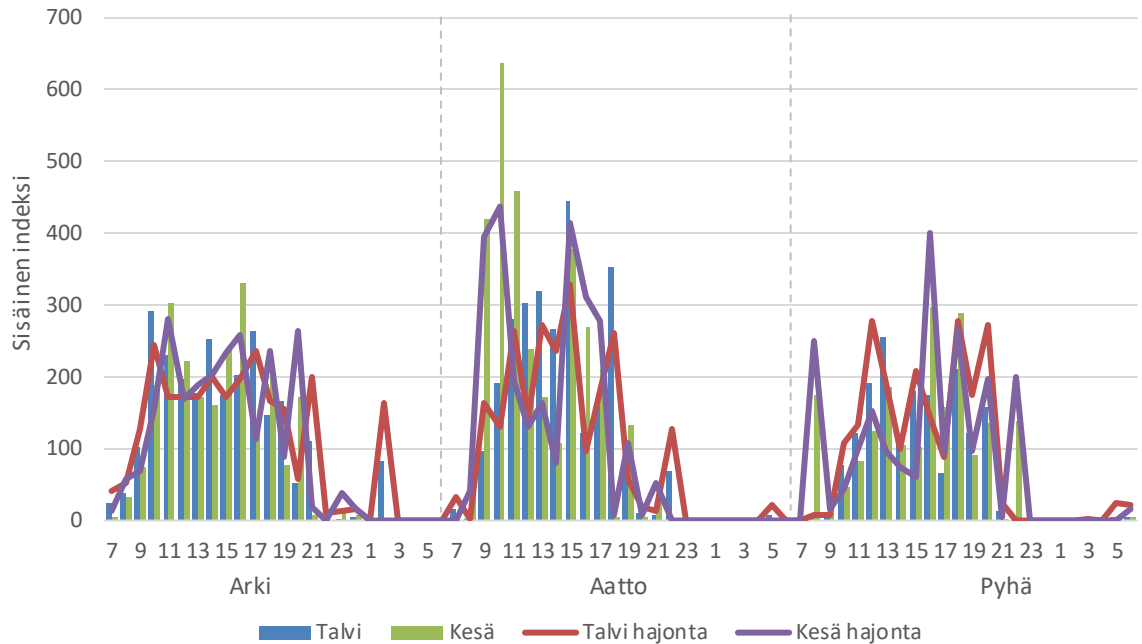
Kuva 11. Työpaikkalatauksen sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.

Ulkoiset indeksisarjan arvot työpaikkalataustyyppin talvi- ja kesäsarjoille on $U_{i,t}=106$ ja $U_{i,k}=91$. Hajontojen ulkoiset indeksit vastaavasti ovat $U_{i,t,haj}=103$ ja $U_{i,k,haj}=98$.



Kuva 12. Julkisen lataustyyppin 22 kW sisäiset indeksisarjat ja -hajonnat.

Ulkoiset indeksisarjan arvot julkiselle lataustyyppille talvi- ja kesäsarjoille on $U_{i,t}=103$ ja $U_{i,k}=95$. Hajontojen ulkoiset indeksit vastaavasti ovat $U_{i,t,haj}=103$ ja $U_{i,k,haj}=94$.



Kuva 13. Julkisen lataustyypin 150 kW sisäiset indeksisarjat ja hajonnat.

Ulkoiset indeksisarjan arvot julkiselle lataustyypille talvi- ja kesäsarjoille on $U_{i,t}=104$ ja $U_{i,k}=93$. Hajontojen ulkoiset indeksit vastaavasti ovat $U_{i,t,haj}=105$ ja $U_{i,k,haj}=91$.

Yllä olevista kuvista nähdään edellä mainitut latauskäyttäjymiset sekä jokaisen kuormituskäyrän tehohiipun käyttöaika. Tehohiipun ajankohdat ovat seuraavat: omakoti ja paritalolataustyypin arkena klo 17–18, kerros- ja rivitalolataustyypin aatto ja pyhä iltaisin, työpaikkalataustyypin arkisin 8–12 ja julkisen latauksen huippu aattona noin klo 10-12.

Kotilatauksen kuormituskäyrän huippu sijoittuu ajankohtaan, kun ihmiset palaavat töistä kotiin. Työpaikkalatauksen kuormitus on suurimmillaan töihin tultua ja siitä eteenpäin toimistoaikojen välillä. Julkinen lataus on suurimmillaan viikonloppuisin. Rivi- ja kerrostalolataus on suurimmillaan viikonloppuisin. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että kerros- ja rivitaloissa asuvat eivät välttämättä omista autoa tai ei aja niin paljoa, koska kiinteistöt sijaitsevat yleisesti hyvien julkisen liikenteen kulkuyhteyksien varrella taajamissa tai keskustoissa. Viikonloppuna on mahdollisuus lähteä sähköautolla kauemmas, jolloin sähköautoa myös ladataan.

Kuormituskäyrissä on mukana hajonnat, mitkä kuvaavat latauksen satunnaisuutta ja virhettä. Yhden autoilijan latauskäyttäjyminen on melko vaikea ennalta määrittää eikä välttämättä mukaile keskimääräisiä kuormituskäyriä. Suurelle joukolle kuormituskäyrät summautuvat, ja joukon latauskäyttäjyminen muistuttaa keskimääräistä latauskäyttäjymistä.

4.5 Energian siirron lisäys

Sähköenergiaa siirretään tuotantolaitoksilta kuluttajille. Tuotantolaitokset ovat perinteisesti kaukana kulutuksesta, mutta pientuotantolaitosten yleistyessä pienliittyjillä voi olla oma tuotantolaitos, esimerkiksi aurinkopaneelit. Vielä kuitenkin suurin osa käytetystä sähköenergiasta siirretään kaukaa kuluttajille, joten energian siirron kapasiteetti täytyy ottaa huomioon. Sähköauton lataus lisää vuosien energian kulutuksen määrää liittymillä, jolloin siirrettävä kokonaisenergia lisääntyy jakeluverkossa.

Energian siirron lisäys on sama kuin latauksen käyttämän sähköenergian määrä vuosille 2030 ja 2040 laskettuna. Energian siirron lisäys saadaan laskettua määrittämällä sähkökäyttöisten ajoneuvojen määrän lisäys määritellyille vuosille, keskimääräinen ajosuorite vuodessa ja sähköauton keskimääräinen energiankulutus. Sähkökäyttöisten ajoneuvojen määrän kasvun skenaariot on määritelty jo luvussa 3.3.

Energiankulutus riippuu ulkolämpötilasta, auton ominaisuuksista, ajoneuvon painosta ja ajoneuvon hyötysuhteesta. Yleisesti keskimääräisenä energiankulutuksena ladattavilla sähköautoilla käytetään 0,20 kWh/km. Joillakin kevyillä autoilla energiankulutus voi olla pienempääkin noin 0,10–0,15 kWh/km, mutta eroa keskimääräiseen energiankulutukseen tasoittaa se, että talviolosuhteissa energiankulutus kasvaa. [3]

Vuonna 2016 tehty henkilöliikennetutkimus arvioi keskimääräisen ajosuoritteiden vuorokaudessa olevan 40,7 kilometriä koko Suomen osalta. Kaupungeissa luku on hieman pienempi ja maaseudulla suurempi. [37] Vuonna 2021 samaisella päivitetyllä tutkimuksella saatiin keskimääräiseksi matkasuoritteeksi vuorokaudessa vain 34 km, mikä johtui pandemiasta ja yleisestä etätyösuosituksesta [38]. Näin ollen vuoden 2016 luku on todenmukaisempi. Tampereella on kaupunki-, taajama- ja maaseutumaista aluetta, joten keskimääräinen luku sopii tämän työn laskennan lähtöarvoihin. Keskimääräinen vuoden matkasuorite on noin 15 000 km vuoden 2016 tutkimuksessa [37]. Tutkimukset ovat arvioineet vuorokauden ajokilometrimäärän nousevan sähköautojen lisääntymisen myötä alhaisemman käyttöenergian vuoksi. Ladattavien sähköautojen käyttäjätutkimuksen mukaan täyssähköautolla ajetaan vuodessa 23 000 km ja ladattavilla hybrideillä 19 000 km vuodessa. [8] Tässä työssä arvioidaan tulevaisuutta, joten vuosittainen keskimääräinen ajosuoritteiden kilometrimäärä on oletettu hieman suuremmaksi. Lähtöarvona on käytetty 20 000 kilometriä vuodessa.

Täyssähköautoissa on energianlähteenä vain sähköenergia, mutta ladattavissa hybrideissä voidaan käyttää myös polttomoottoria. Tarvitsee siis määrittää kuinka paljon ladattavat hybridit käyttävät keskimääräisesti sähköenergiaa ajosuoritteessa. Arvioidaan, että ladattavan hybridin akkukapasiteetti kattaa 80 % keskimääräisestä ajon

määrästä. Laskennassa käytetään hybridien vuosienergiana siis $0,8 \times$ latauksen vuosienergia. Kertoimeen on verrattu päivittäisen latausenergian tarpeen ja hybridin akun kokoa. Käyttäjätutkimuksen mukaisesti päivittäinen ajosuoritus ladattavilla hybrideillä keskimäärin on noin 52 km (vuodessa 19 000 km), jolloin sähköenergiaa tarvitaan noin $52 \text{ km} \times 0,2 \text{ kWh/km} = 10,4 \text{ kWh}$. Tämä sähköenergian määrä on noin 80–100 % keskimääräisen hybridi-auton akun kapasiteetista. [8]

Kaikkien ladattavien sähkökäyttöisten ajoneuvojen kokonaismäärän vuosittainen latausenergia lasketaan kaavalla (4). Vuosittainen latausenergian arvo on samalla lisääntyvän energian siirron lisäys TAES:n jakeluverkkoon. Energian siirron lisäys lasketaan eri sähköautokannan kasvun skenaarioiden määrillä vuosille 2030 ja 2040 kaavalla 4.

$$\Delta E = (n_{BEV} \cdot s_{BEV} \cdot e_{BEV}) + (n_{PHEV} \cdot s_{PHEV} \cdot e_{PHEV} \cdot \beta), \quad (4)$$

jossa n on sähköautojen määrän lisäys eri skenaarioilla, s vuosittainen keskimääräinen ajosuorite, e sähköautojen ajon keskimääräinen energiankulutus. Alaindeksillä BEV kuvataan täyssähköautojen parametreja ja PHEV-alaindeksillä ladattavien hybridien parametreja. β kuvaa ladattavien hybridien keskimääräisesti sähköllä kuljettavaa matkaa, joka on määritelty aiemmin olevan noin 80 %.

Edellä esitetyillä peruskasvun skenaariolla saadaan sähköautokannan kasvuksi ja energian siirron lisäykseksi taulukon 5 mukaiset arvot laskettuna kaavalla 4. Vuoden 2022 sähköautojen lisäys on nolla ja seuraavien vuosien määrän kasvu on lisäys vuoden 2022 määrään.

Taulukko 5. *Perusskenaarion sähköautokannan ja energian siirron lisäys.*

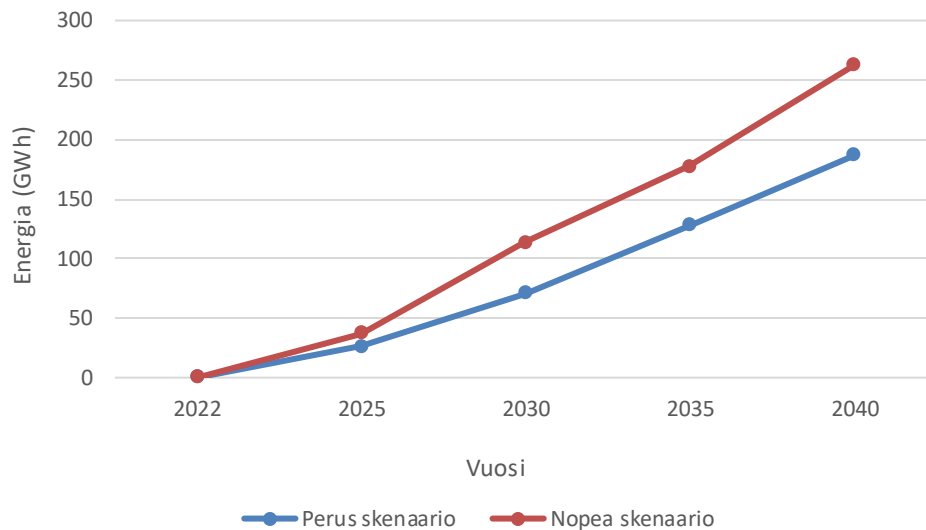
Määrät/ Vuosi	n_{BEV} (kpl)	n_{PHEV} (kpl)	ΔE (GWh)
2022	0	0	0
2025	3300	4000	26,00
2030	11000	8400	70,88
2035	23700	10300	127,76
2040	39200	9300	186,56

Nopean kasvun skenaariolla saadaan seuraavat määrät sähkökäyttöisten ajoneuvojen määrän kasvulle ja energian siirron lisäykselle.

Taulukko 6. Nopean kasvun skenaarion sähköautokannan ja energian siirron lisäys.

Määrät/Vuosi	n_{BEV}	n_{PHEV}	ΔE (GWh)
2022	0	0	0
2025	4 700	5 700	37,04
2030	20 300	8 400	113,52
2035	37 000	9 300	177,76
2040	60 000	7 000	262,40

Kuvassa 14 on esitetty kuvaajan muodossa energian siirron lisäys jakeluverkkoon molemmilla skenaarioilla.



Kuva 14. Energian siirron lisäys vuosina 2022–2040 perus ja nopealla skenaariolla.

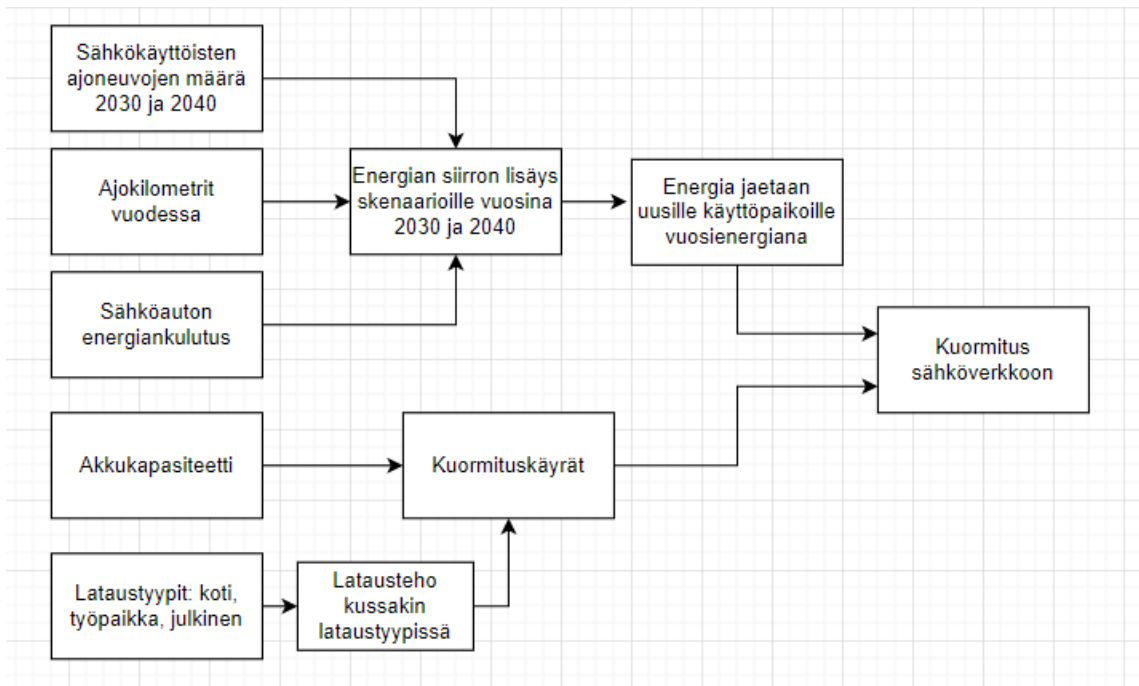
TAES:n sähköenergian siirto vuonna 2021 oli 1 948 GWh, 2022 1 957 GWh ja 2023 2189 GWh. Energian siirron lisäys vaihtelee vuosittain riippuen esimerkiksi lämpötilasta ja uusista kuormista. Vuoden 2023 energian siirron kasvu johtuu muun muassa sähkökattilasta. Normaali energian siirto TAES:n verkossa on välillä 1 900–2 200 GWh. Vuoden 2040 energian siirron lisäys perusskenaariossa on 186,6 GWh ja nopeassa skenaariossa 262,4 GWh. Siirron lisäys on keskiarvoisesta kokonaisenergian 2 100 GWh siirrosta 8,9 %:a ja 12,5 %:a.

5. SÄHKÖAUTON LATAUSKUORMAN MALLIN- NUS

Kuormituksen mallintamiseen ja laskentaan käytetään Trimble NIS - verkkotietojärjestelmää. Skenaarioiden kuormituksen mallinnuksessa lisätään käyttöpaikalle tietyn tyyppinen latauskuorma skenaarioiden sähköautokannan määrillä. Mallinnus tehdään koko jakeluverkon osalta. Tulokset esitellään seuraavassa luvussa koko verkon sekä lähemmin muutaman valitun muuntopiirin osalta.

Kuormituksen ennusteen mallinnus etenee seuraavin askelin: arvioidaan lisääntyvä energian siirtotarve eri kulutustyypeillä (koti, työpaikka ja julkinen) ja arvioidaan yhdelle käyttöpaikalle lisääntyvä vuosienergia. Vuosienergia ja kuormituskäyrä lisätään käyttöpaikalle, jolloin laskennan tulokseksi saadaan verkon ja verkon osien kuormitus. Mallinnukseen tarvitaan aiemmin arvioidut sähköautojen määrät ja koko verkon energian siirron lisäys eri skenaarioilla edellisistä luvuista.

Kuva 15 esittää lähtötietojen ja eri vaiheiden yhteydet mallinnuksessa.

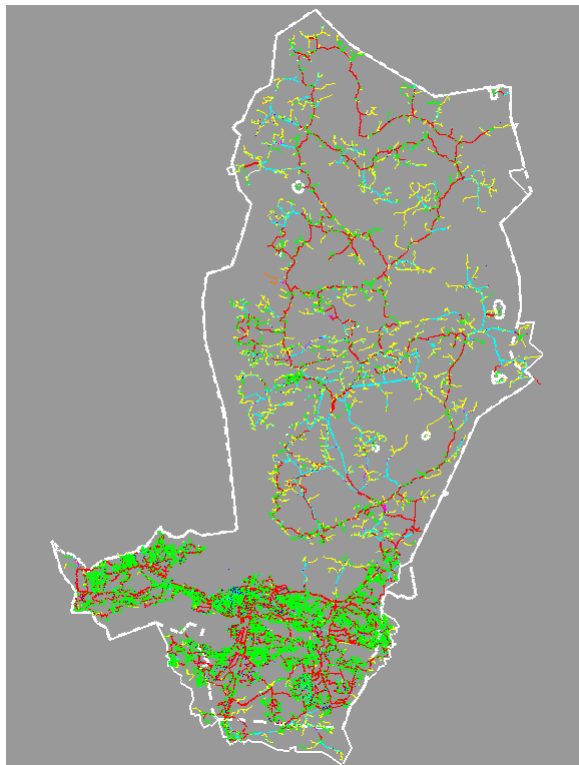


Kuva 15. Lähtötietojen ja eri vaiheiden yhteydet työn mallinnuksessa.

Mallinnuksen algoritmi esitellään karkeasti luvussa 5.3, ja on tarkemmin kuvattuna työn liitteessä I. Liitteessä III on esitetty mallinnuksen algoritmin koodi.

5.1 Tampereen Energia Sähköverkko Oy

Tampereen Energia Sähköverkko Oy on kaupunkiverkkoyhtiö, jossa on maaseutumainen Teiskon kaupunginosa. Tampereen kaupunki- ja taajama-alueen sähköverkko on suurilta osin kaapeloitu maan alle, mutta joitakin pieniä alueita on vielä pj-ilmajohtoverkon piirissä. KJ-verkko on kaupunki- ja taajama-alueella lähes kokonaan maakaapeloitu. Teiskon alueella yli puolet KJ-verkosta on kaapelina maassa. Teiskossa pienjänniteverkko on vielä suurimmalta osin ilmajohtoverkkoa, mutta on tällä hetkellä suurimmassa muutoksessa sähkömarkkinalain vaatimusten takia. Kuvassa 16 on esitetty TAES:n jakeluverkko.



Kuva 16. Tampereen Energia Sähköverkon jakeluverkko.

Kuvassa 16 TAES:n verkkoalue on rajattu valkoisella viivalla. Punaisella on maakaapeloitu keskijänniteverkko, vihreällä kaapeloitu pienjänniteverkko, keltaisella pj-ilmajohto ja sinisellä kj-ilmajohtoverkko.

TAES:n verkon alueella on 13 sähköasemaa, joissa jokaisessa on 1–3 päämuuntajaa. Jakelumuuntajia tällä hetkellä on 1488 kappaletta, mutta määrä suurenee koko ajan, kun uusia alueita ja rakennuksia rakennetaan, laajennetaan tai saneerataan.

5.2 Verkkotietojärjestelmä

Verkkotietojärjestelmä on verkon digitaalinen kaksonen, johon on integroitu paikkatietotoiminnallisuudet. Verkkotietojärjestelmän toiminnallisuuksia ovat verkostolaskenta, verkon suunnittelu, rakentaminen, investointien hallinta, omaisuudenhallinta ja kunnossapito. [39] Tämä työ perustuu verkkotietojärjestelmän verkostolaskennan hyödyntämiseen. Verkkotietojärjestelmänä TAES:lla on käytössä Trimble NIS.

Verkkotietojärjestelmästä saadaan verkon nykyhetken tilanne, kytkentätietojen ja kulutustietojen avulla. Se antaa verkon nykytilanteen pohjakuorman, jonka päälle latauskuorma lisätään. Taustakuorma saadaan asiakkaiden etäluettavilta energiamittareilta, joiden tieto summautuu verkkotietojärjestelmässä muuntopiireille ja edelleen kj-verkkoon.

Vanhojen energiamittareiden tapauksessa käyttöpaikan kulutus arvioidaan vuosienenergian ja kuormituskäyrän avulla.

5.3 Mallinnuksen algoritmi

Muodostetut skenaariot ovat tästä eteenpäin nimetty seuraavasti; perusskenaariot eri vuosille B2030 ja B2040 ja nopeat skenaariot eri vuosille F2030 ja F2040.

Kulutuspaikat ovat työssä jaoteltu käyttöpaikkojen mukaisesti. Käyttöpaikkatyypejä ovat omakoti- ja paritalo, rivitalo, kerrostalo, vapaa-ajan asunto, työpaikka, teollisuus ja julkinen, jotka mukailevat kuormituskäyrien paikkatyypejä. Ulkopuolelle on jätetty käyttöpaikkatyypejä kuten muun muassa liikennevalot, mainostaulut, opastetaulut ja ulkovalaistus, joihin latauskuormaa ei lisätä.

Kuormituskäyrät määriteltiin edellä erilaisille latauskäyttötymisen paikkatyypeille: koti, työpaikka ja julkinen. Mallinnuksessa käyttöpaikoilla käytetään lataustehoina ja kuormituskäyrän paikkatyyppinä seuraavia: rivitalo-, kerrostalokäyttöpaikat 3 kW (koti), omakoti- ja paritalokäyttöpaikat sekä vapaa-ajankäyttöpaikat 11 kW (koti), työpaikkakäyttöpaikat 3 kW (työpaikka), johon kuuluu teollisuuden käyttöpaikat ja muiden työpaikkojen käyttöpaikkoja sekä julkisen latauksen käyttöpaikoilla kahta eritehoista 22 kW ja 150 kW latauspistettä.

Vuositason energian siirron lisäys jaetaan latauspaikkatyypeille niin, että skenaariolla B2030 kokonaisenergian lisäyksestä 80 % lisätään koti-kulutustyyppille, 10 % työpaikka-kulutustyyppille ja 10 % julkiselle kulutustyyppille. Skenaariossa F2030 vastaavasti jako on 75 % koti, 10 % työpaikka ja 15% julkinen kokonaisenergian lisäyksestä. Muissa

skenaarioissa B2040 ja F2040 jako on kulutustyypeittäin: 70 % koti, 10 % työpaikka ja 20 % julkinen kokonaisenergian lisäyksestä. Jaot johtuvat siitä, että tulevaisuudessa julkisen latauksen määrän oletetaan suurentuvan ja tehojen suurenevan. Kotilatauksen energian suhteellinen prosenttisuus pienenee, koska kotona latausteho ei tule suuresti kasvamaan 11 kW lataustehosta. Prosentuaalinen suhde siis on pienempi tai samansuuruinen skenaarioiden välillä, mutta joka vuosi kokonaisenergian määrä kasvaa. Taulukossa 7 on laskettu prosenttiosuudet auki energian määräksi kulutuspaikkatyypeille.

Taulukko 7. *Energian siirron lisäys eri paikkatyypeille.*

Skenaariot /kulutuspaikkatyytit	Koti (%; GWh)	Työpaikka(%; GWh)	Julkinen(%; GWh)
B2030	80; 57,5	10; 7,2	10; 7,2
B2040	70;126,0	10; 18,0	20; 26,0
F2030	75; 81,8	10; 11,0	15;16,4
F2040	70; 183,8	10;26,3	20; 52,5

Taulukossa olevat energiamäärät jaetaan algoritmin avulla monelle eri käyttöpaikalle vuosienenergiaksi. Taulukot 8 ja 9 esittävät kuinka monelle käyttöpaikalle latauskuormaa lisätään eri skenaarioiden tapauksissa. Esimerkiksi skenaarion B2030 omakotitalo ja paritalo -kulutustyyppin mukaiselle käyttöpaikalle lisätään joka neljanteen käyttöpaikkaan uusi latauskäyttöpaikka. Uuteen käyttöpaikkaan lisätään latauksen kuormituskäyrä ja vuosienenergia, joka määrittää lisääntyvän lataustehokuorman liittymälle. Skenaariorissa B2040 omakoti- ja paritalo -kulutustyyppin mukaiselle käyttöpaikalle lisätään joka toiselle käyttöpaikalle latauskuormaa.

Taulukko 8. *Perusskenaarion latauspisteen lisäyksen algoritmi.*

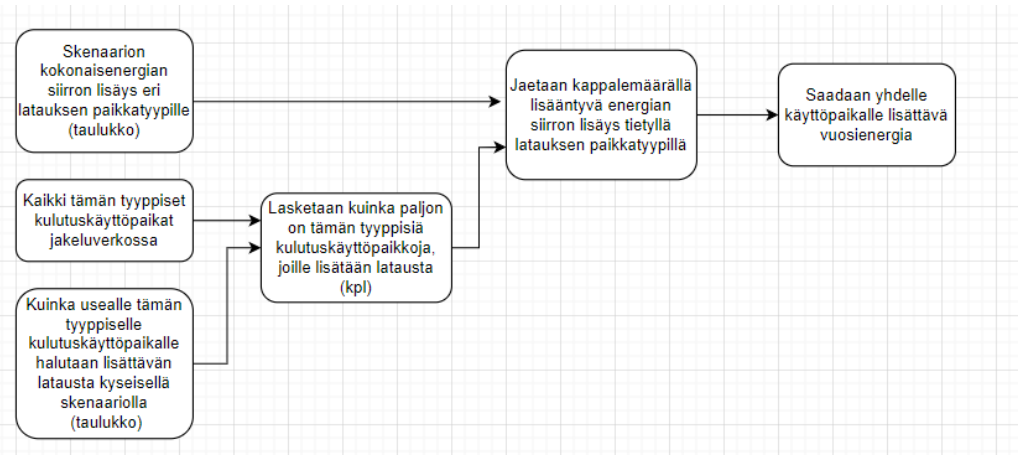
Perusskenaario	B2030	B2040
Omakotitalot ja paritalot	1/4	1/2
Rivitalot	1/3	3/4
Kerrostalot	1/4	1/3
Vapaa-ajan asunnot	1/6	1/5
Työpaikka, teollisuus	3/4	jokaiselle
Työpaikka, muut	1/2	1/2
Julkiset pisteet	jokaiselle	jokaiselle

Taulukko 9. *Nopean skenaarion latauspisteen lisäyksen algoritmi.*

Nopea skenaario	F2030	F2040
Omakotitalot ja paritalot	1/3	3/4
Rivitalot	1/2	jokaiselle
Kerrostalot	1/3	1/3
Vapaa-ajan asunnot	1/5	1/4
Työpaikka, teollisuus	3/4	jokaiselle
Työpaikka, muut	1/2	3/4
Julkiset pisteet	jokaiselle	jokaiselle

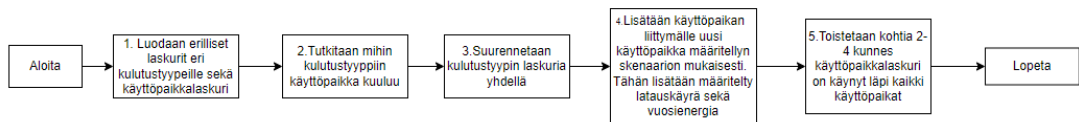
Algoritmi käydään läpi perusskenaarioiden ja nopean skenaarioiden osalta erikseen, sillä latauspisteiden lisäyksen määrät ovat erilaiset ja vuosienergia skenaarioissa muuttuu. Liitteessä I on esitetty perus ja nopean skenaarioiden algoritmit. Algoritmista muuttuvat sähköautojen määrä, latauspaikkojen määrän lisäys eli kuinka monelle käyttöpaikalle latausta lisätään ja lisättyjen latauspaikkojen vuosienergia.

Vuosienergia on laskettu ja arvioitu siten, että kulutustyyppin kokonaisenergiämäärä (taulukosta 7) jaetaan tämän kulutustyyppin käyttöpaikkojen kappalemäärällä (taulukoista 8 ja 9), johon lisätään uusi latauskäyttöpaikka. Seuraava kuva 17 esittää miten yhden kulutuspaikkatyyppin vuosienergia on laskettu.



Kuva 17. Käyttöpaikalle lisättävän vuosenergian määrittäminen.

Kuvassa 18 on kuvattu käyttöpaikkojen lisäyksen algoritmin toiminta yleisellä tasolla. Algoritmi on muodostettu lisäämään liittymälle uusi käyttöpaikka ja kulutus piste sekä oikeantyyppinen latauskäyrä ja vuosenergia. Liitteessä I on kuvattu tarkemmin algoritmin toiminta kaikille neljälle skenaariolle.



Kuva 18. Mallinnuksen vaiheet.

Kuvassa 18 olevat vaiheet latauskäyttöpaikkojen lisäämiselle on esitetty tarkemmin liitteessä III kuvatussa koodissa. Julkisen latauksen käyttöpaikat lisätään käsin. Liitteeseen II on lueteltu paikat, minne julkisen latauksen pisteitä on lisätty.

Tämän tutkimuksen rajoitteissa yhdelle käyttöpaikalle voidaan lisätä yhden tehoinen latauskäyttöpaikka. Todellisuudessa esimerkiksi huoltoasemilla voi olla nopeaa latausta sekä puolinopeaa latausta. Algoritmista olisi tullut liian monimutkainen, jos tämä olisi otettu huomioon, joten mallia on yksinkertaistettu.

6. VAIKUTUKSET SÄHKÖNJAKELUVERKKOON

Mallinnuksen jälkeen tulokset saadaan verkkotietojärjestelmän laskennan avulla, ja niitä analysoidaan tässä luvussa kuormitusten kannalta. Todellisuudessa ajallisesti sekä maantieteellisesti tulokset voivat vaihdella, koska tulokset ovat riippuvaisia mallinnukseen annetuista parametreista ja satunnaisuudesta. Uusien latauspisteiden kuormitus summautuu muuntopiireille ja edelleen keskijänniteverkkoon. Näin ollen satunnaisuuden vaikutus vähenee kauemmas kulutusposteilta siirryttäessä. Latauskäyttöpaikkojen summautuessa kuormitus mukaillee latauksen kuormituskäyriä.

Verkkotietojärjestelmän laskennassa vakioparametreina ovat vakiolaskentajännite 235 V, kuormien kasvukerroin 1 ja huippukuormituksen ylittymistodennäköisyys 85 %. Hajonnan todennäköisyys määrittää tilastomatemattisen todennäköisyyden laskennalle [40]. Laskenta suoritetaan säteisverkkona. Jotkut verkon osat ovat rengasverkossa verkkotietojärjestelmässä, jolloin näistä ei ole saatu tulosta, ja ovat jääneet laskennan ulkopuolelle.

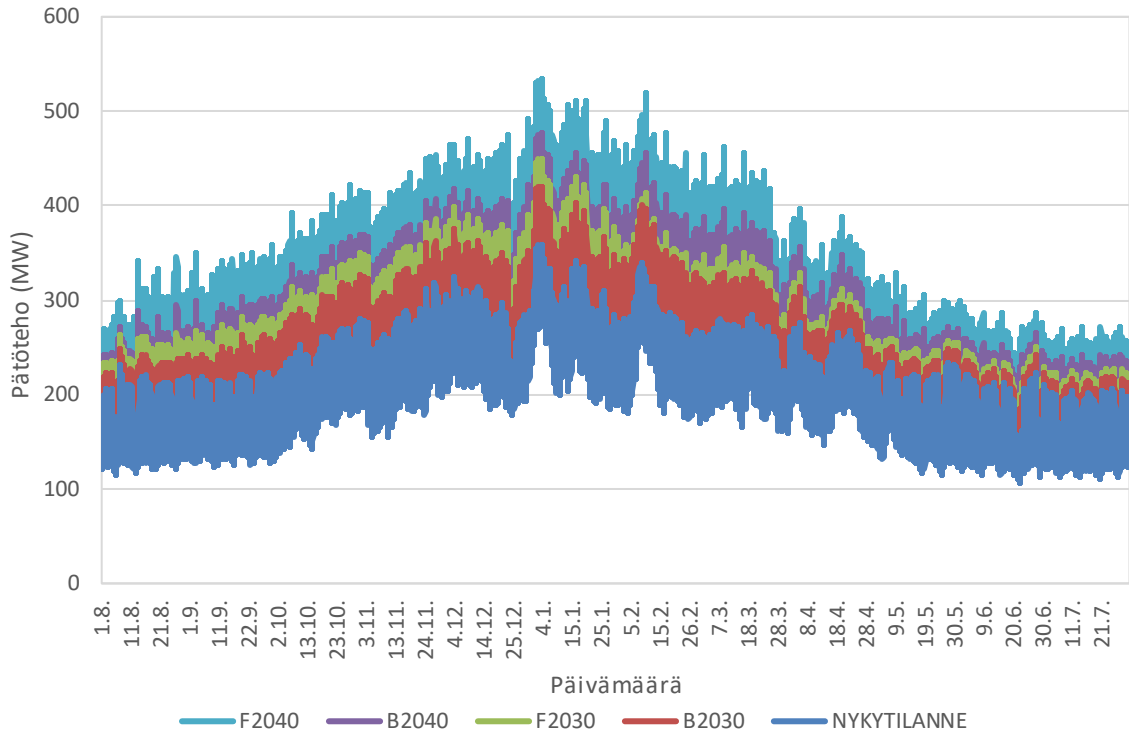
Luvussa esitetään eri komponentteihin kohdistuvia kuormitusten muutosten vaikutuksia keski- ja pienjänniteverkossa eri skenaarioissa. Erityisesti tarkastellaan kahta eri parametria, kuormitusastetta ja jännitteenalenemaa. Kuormitusaste kuvaa maksimivirran ja komponentin virran kestoisuuden raja-arvon suhdetta eli on komponentin termisen ominaisuuden raja-arvo. Jännitteenalenema on verkon komponenteilla jännitehäviötä kuvaava parametri. Sen raja-arvo on jokaisessa jakeluverkon solmupisteessä 5 %. Mitä lähemmäs jakeluverkossa mennään kohti loppupistettä eli asiakasta, sitä suuremmaksi jännitteenalenema yleisesti kasvaa.

Standardi SFS-EN 50160 ”Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet” määrittelee jännitetasojen vaihtelujen vaatimuksista seuraavasti: *”Normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitetaso vaihtelut eivät saisi ylittää $\pm 10\%$ nimellisjännitteestä U_n . Normaaleihin käyttöolosuhteisiin ei lukeudu keskeytysjaksot. Lisäksi erityisillä syrjäseutujen verkon käyttäjillä jännitevaihtelun ei tulisi ylittää $+10\% / -15\%$ nimellisjännitteestä U_n .”* [41]

Jännitteenalenemaan vaikuttaa johtojen resistanssi ja pituus sekä kuormituksen suuruus eli kulkevan virran määrä. Johdon resistanssiin vaikuttaa johtimen materiaali sekä kaikki verkossa olevien liitosten laatu, jotka suurentavat resistanssin arvoa johtimessa. Siksi esimerkiksi liitosten ja kontaktien täytyy olla verkossa hyvin tehtyjä.

6.1 Latauskuorman vaikutukset koko jakeluverkkoon

Esitellään aluksi energian ja tehon muutokset koko verkon osalta. Kuvassa 19 on koko jakeluverkon tehokuvaaja välillä 1.8.2023-31.7.2024 sekä nykyisessä verkon tilanteessa että eri skenaarioilla.



Kuva 19. Sähkönjakeluverkon tehokuvaaja väliltä 1.8.2023-31.7.2024 nykytilanteessa ja eri skenaarioilla.

Jakeluverkon tehuhippu on nykytilanteessa noin 359 MW. Skenaarioilla tehuhippu kasvaa arvoon: B2030 421 MW, B2040 476 MW, F2030 450 MW ja F2040 534 MW. Jakeluverkon energian siirto kasvaa skenaarioissa seuraavasti: B2030 +73 GWh, B2040 +177 GWh, F2030 +118 GWh ja F2040 +272 GWh. Nykyinen vuosienergian siirto on jakeluverkossa noin 2 100 GWh luokkaa. Lisääntyvä energian siirto on muutaman prosentin luokkaa koko siirron arvosta eikä tule aiheuttamaan ongelmaa sähköenergian siirrossa. Tehon kasvu on merkittävämpi ja rajoittavampi suure esimerkiksi komponenttien läpi siirtyessään. Teho on verrannollinen virtaan, joten mitä suurempi teho sitä suurempi virta kulkee verkossa, mikä aiheuttaa lämpenemistä, komponenttien hajoamista ja häviöitä.

Vuotuinen tehuhippu sijoittuu talvikuukausille lämmityksen ollessa huipussaan. Sähköauton latauksen lisäys ei muuta juurikaan tehokuvaajan profiilia vaan sähköauton latauskuorma lisääntyy nykyisen tehokuorman päälle. Tehokuvaajasta nähdään, että kesäkuukausina kapasiteettia on enemmän, ja rajoittavat kuukaudet ovat talvikuukausia.

Sähköautoilla ajosuorite on keskimäärin suurempi kesällä kuin talvella. Tämä johtuu siitä, että ladattavilla hybrideillä pystyy ajamaan pidemmän matkan sähköenergialla ja täyssähköautoilla ajetaan yleisesti enemmän kesällä kuin talvella. [8]

Sähköverkon mitoitus on vuosikymmenet perustunut tehohuippuihin, mutta nykyään kuormien joustavuuden avulla voidaan kuormaa siirtää, ja siten tasata tehohuippuja, jolloin verkon mitoitusta voidaan perustaa eri rajoituksiin. Tehohuippujen tasaamista voidaan tehdä sähköauton akkujen avulla. Tästä lisää luvussa 7.

6.2 Keskijänniteverkon vaikutukset

Tarkastellaan latauskuorman keskijänniteverkon vaikutuksia eri komponenteilla.

6.2.1 Päämuuntajat

Päämuuntajat sijaitsevat verkossa siirtoverkon ja jakeluverkon keskijännitepuolen rajalla. Päämuuntajat muuntavat jännitteen 20 kV:in, ja ne ovat jakeluverkkoyhtiön omaisuutta.

Taulukossa 10 on listattu jakeluverkossa olevat päämuuntajat, näiden kuormitukset eri skenaarioilla, muuntajien asennusvuosi ja päämuuntajan muuntopiirissä olevien asiakkaiden lukumäärä. Päämuuntajilla jännitteenalenema on alle 1 % luokkaa eikä ole listattu vähäisen merkityksen vuoksi.

Taulukko 10. *Päämuuntajien kuormitusasteet eri skenaarioilla.*

Päämuuntaja (MVA)	Asennusvuosi	$N_{asiakas}$ (kpl)	Nykytilanteen kuormitusaste (%)	B2030 kuormitusaste (%)	F2030 kuormitusaste (%)	B2040 kuormitusaste (%)	F2040 kuormitusaste (%)
ALJ-M1 40MVA	1984	4917	36	40	42	46	53
ALJ-M2 48,5MVA	1993	1175	83	93	98	107	122
HRV-M2 40MVA	1983	5431	32	35	37	41	44
KLV-M1 40MVA	2008	17924	69	77	83	91	107
KLV-M2 40MVA	1982	9750	60	68	72	78	88
LMP-M2 40MVA	1976	6264	0	65	68	65	72
MLP-M1 30MVA	1973	4312	60	70	71	73	76
MLP-M2 25MVA	1989	3779	22	26	28	30	34
MLS-M1 31,5MVA	2010	13451	80	90	95	103	120
NRI-M1- 31,5MVA	2014	1726	19	20	21	22	26
RAT-M1 40MVA	1990	8468	80	82	92	103	147
RAT-PM3 40MVA	2005	2251	44	47	48	50	52
RTH-M3 40MVA	1988	9172	44	54	57	62	73
RTH-M4 48,5MVA	1995	7733	75	80	90	92	127
VSL-M1 40MVA	1989	19426	78	89	96	105	121

Punaisella merkityt kuormitusasteet ovat ylikuormassa skenaariolla laskettuna. Keltaisella merkityt ovat yli 85 % kuormitusasteessa eli näitä olisi hyvä tarkastella tulevaisuudessa. Lisäksi on merkitty sinisellä värillä ennen 1980-lukua käyttöönotetut päämuuntajat, violetilla jo saneerausikäiset päämuuntajat ja oranssilla 10 vuoden sisällä saneerausikään tulevat päämuuntajat. Saneerausikä on määritelty olevan 45 vuotta muuntajan asennusvuodesta. Todellisuudessa muuntaja voi kestää hyvinkin yli käyttöikänsä varsinkin, jos muuntaja ei ole ollut kovassa kuormassa. Energiavirasto antaa aikavälin 40–65 vuotta laskennalliselle pitoajalle, jonka jokainen verkkoyhtiö voi itse määrittää. Tämä määrittää, milloin komponentti on verkon arvon kannalta nolla-arvoinen. [42]

Akuuteimmat tilanteet muodostuvat skenaarioilla B2040 ja F2040. Silloin akuutteja tarkasteltavia kohteita ovat ALJ-M2, KLV-M1, MLS-M1, RAT-M1, RTH-M1 ja VSL-M1.

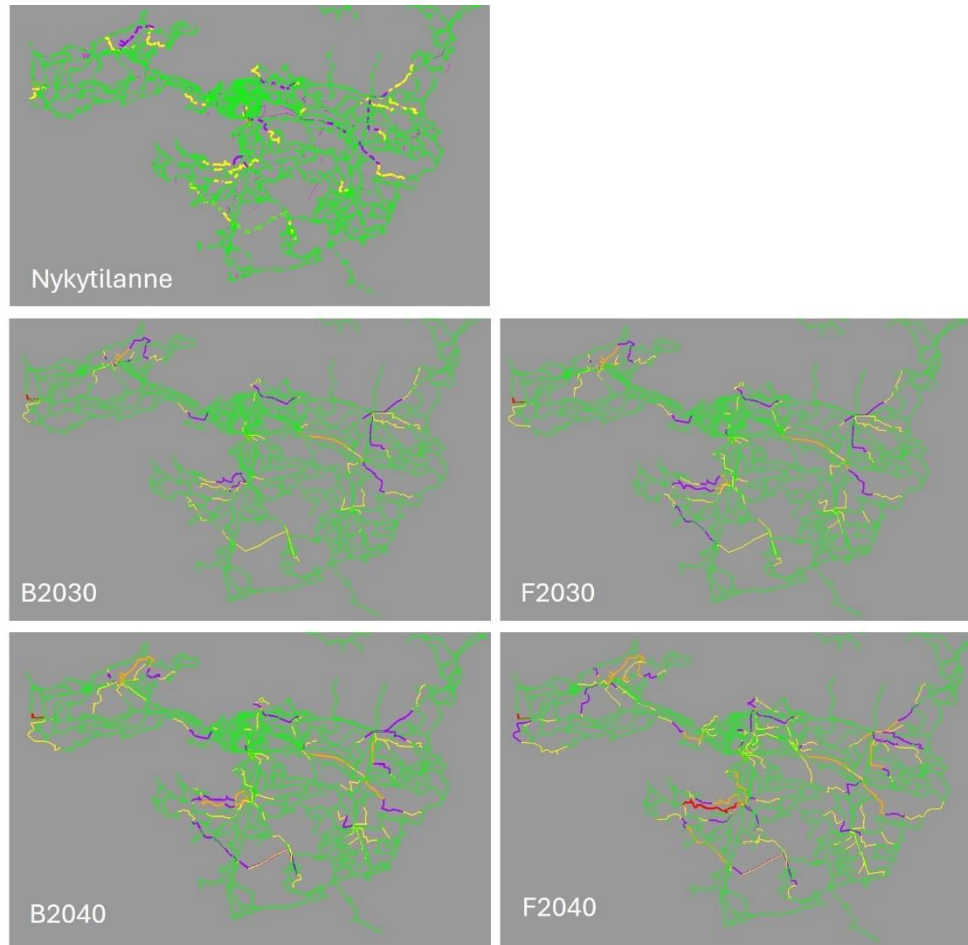
Nämä päämuuntajat ovat näillä skenaarioilla ylikuormassa. Ne voivat olla jo skenaariolla B2030 ja F2030 suuressa yli 85 % kuormitusasteessa. Päämuuntajien kuormitusaste on hyvä olla sen verran pieni, että vapaata kapasiteettia on tarvittaessa, jolloin korvattavuus säilyy jakeluverkossa. Kuormat pystytään siten siirtämään vikatilanteessa toisen päämuuntajan syötettäväksi.

Edellä mainittujen päämuuntajien kuormitusta voidaan pienentää, siirrettäessä kj-johtolähtöjä saman sähköaseman toisen päämuuntajan syötettäväksi tai täysin toisen sähköaseman syötettäväksi. Kj-johtolähtö on yleisesti molemmista päistä kytkettynä eri päämuuntajien takana jopa toisella sähköasemalla, mutta on syötettynä vain toisesta päästä eli toisesta päästä kj-johtolähdön katkaisija on auki-asennossa. Esimerkiksi RAT-M1 kuormia voidaan mahdollisesti siirtää RAT-PM3 päämuuntajan syötettäväksi, jos muut rajoitukset eivät tule vastaan. Esimerkiksi rajoituksena voi olla se, ettei vapaita lähtöjä ole suurjännitekojeistossa.

Listaan ei ole saatu tuloksia korvatusta muuntajasta HRV-M1, koska vaihto oli juuri kesken laskennan aikana. Vaihdossa saatiin 12 MVA muuntotehoa lisää, kun vanha päämuuntaja vaihdettiin 52 MVA päämuuntajaan. Lisäksi LMP-M1 oli kytketty jo pois verkosta laskennan aikana sekä LMP-M2 irtikytketty hieman myöhemmin, mitä korvaamaan on nyt kytketty uuteen LLT sähköasemaan 52 MVA päämuuntaja. Tässä korvauksessa muuntoteho hieman laski, mutta tällä hetkellä teho riittää. Nämä korvatut päämuuntajat sijaitsevat maantieteellisesti eri puolilla verkkoa. Molemmat tasapainottavat viereisten sähköasemien tilannetta, kun pystytään tasaamaan ja siirtämään kuormia pois muilta päämuuntajilta.

6.2.2 Keskijännitelähdöt

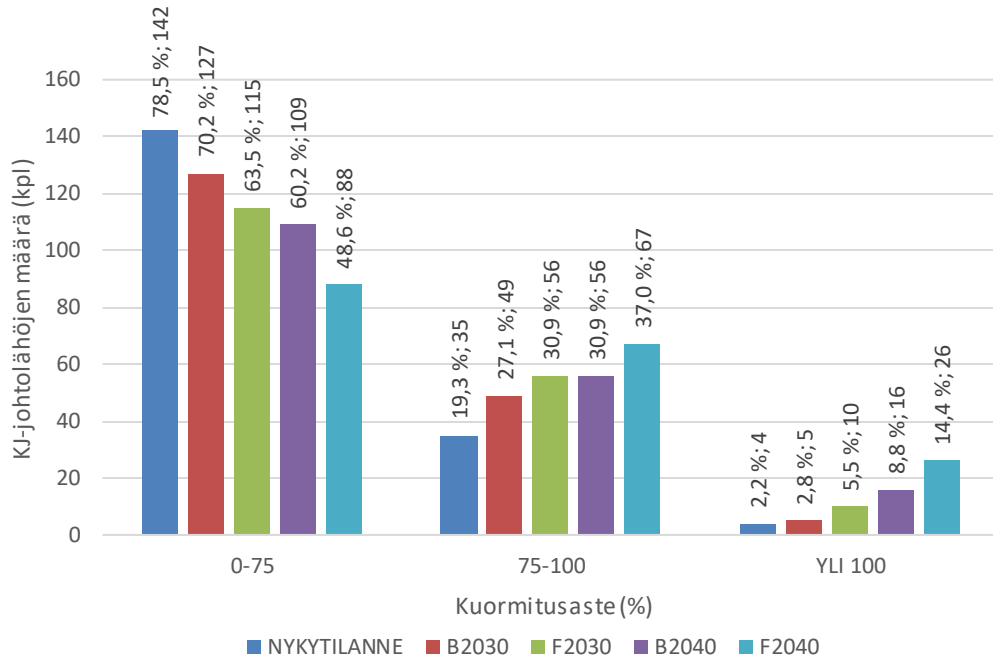
Kuvassa 20 on esitetty jakeluverkon keskijänniteverkko ja keskijännitelähtöjen kuormitusasteet eri väreillä korostaen TAES jakeluverkon keskusta- ja taajama-alueen osalta. Teiskon alueella vain yksi kaapeliväilyhteys on kaikissa skenaarioissa 50-75 % kuormitusasteessa ja muut alle 50 % kuormitusasteessa. Tämä on kuitenkin melko kriittinen väli pohjois-etelä suunnassa, joten tilannetta täytyy seurata tulevaisuudessa. Väli on myös saneerattu muutama vuosi sitten, joten ei ole tulossa korvattavaksi lähitulevaisuudessa.



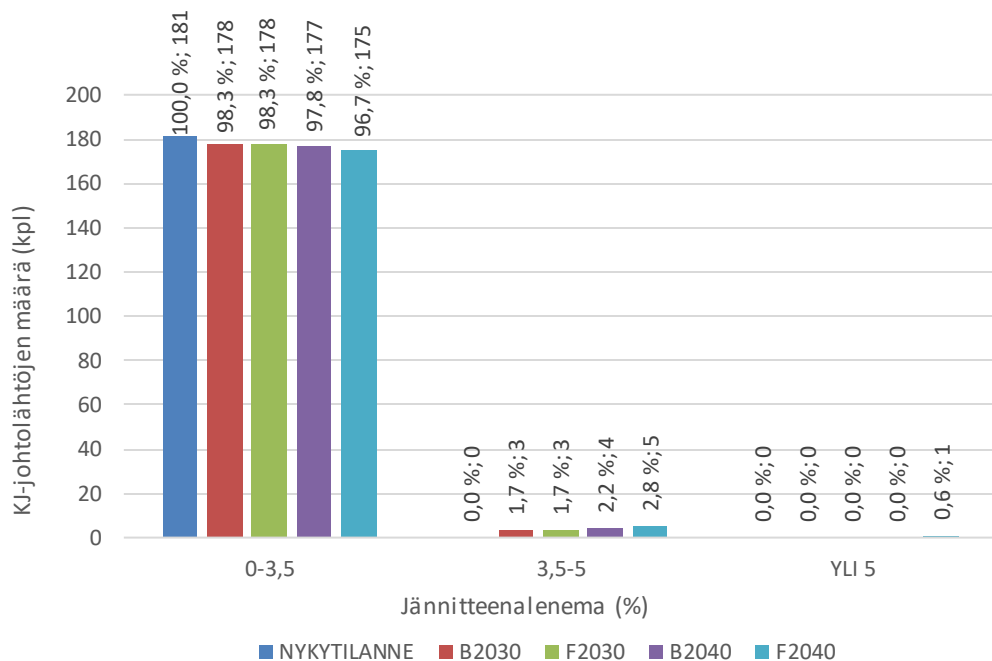
Kuva 20. Taajama- ja keskusta-alueen keskijänniteverkon kuormitusasteet eri skenaarioilla.

Vihreällä on kuvattu alle 50 % kuormitusasteella olevat johdot, keltaisella 50–75 % kuormitusasteella ja violetilla 75–100 % kuormitusasteella olevat keskijännitejohtovälit. Oranssi ja punainen väri kuvaa ylikuormitusta seuraavasti: 100–150 % oranssilla värillä ja yli 150 % punaisella värillä. Suuret kuormitukset jakautuvat tasaisesti Tampereen alueelle. Suurimpia kuormituksia esiintyy etenkin taajama-alueilla, missä on pitempiä matkoja muuntamoiden välillä. Keskusta-alueella keskijänniteverkko on tiheään rakennettua, ja muuntamoiden välillä etäisyydet ovat lyhyet. Sen takia monetkaan johdot ei ole suuressa kuormassa keskusta-alueella. Seuraavaksi tarkastellaan tarkemmin keskijänniteverkon kuormituksia.

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty sähköasemilta lähtevien keskijännitejohtolähtöjen kuormitusaste ja jännitteenalenema. Kuormitusaste on tässä tilanteessa suurin laskettu kuormitusvirta jaettuna koko kj-johtoreitin pienimmällä sallitulla kuormitusvirralla [40]. KJ-johtoreitti sisältää monta johtoyhteyksiä jakelumuuntajien välillä, mitkä kuuluvat kuitenkin samalle kj-johtolähdölle sähköasemalta tarkasteltuna.



Kuva 21. KJ-johtolähtöjen kuormitusaste eri skenaarioilla.



Kuva 22. KJ-johtolähtöjen jännitealenemat eri skenaarioilla.

Keskijännitelähdöt sijaitsevat alkupäässä jakeluverkkoa siirtoverkosta päin tarkasteltuna. Koska jännitetaso on 20 kV, kulkeva virta ei ole suhteellisesti niin suuri kuin pienjännitteellä. Resistanssi on myös pienempi suurempien johtojen poikkipinta-alojen vuoksi. Näiden takia jännitealenema ei kasva suureksi, ja ei ole ongelma tehon lisääntyessä. Tämä nähdään kuvasta 22. Ainostaan yksi KJ-lähtö mahdollisesti voisi ylittää 5 % raja-arvon vuonna 2040 nopean skenaarion tapauksessa.

Keskijännitekaapeleilla suurempi haitta on kuormituksen nousu eli kuormitusvirran kasvu, jolloin johdon terminen kestävyys ei riitä, ja johto alkaa lämpenemään ja mahdollisesti vaurioituu. Laskennassa näkyy, että nykytilanteessa olisi jo neljä yli 100 % kuormitusasteessa olevaa kj-johtolähtöä. Tämä on todennäköisesti verkkotietojärjestelmän laskentavirhe tuntemattomasta syystä. Kaikilla sähköasemilla on virta- ja jännitemittauksia, joilla ylikuormitus olisi huomattu, jos se olisi todellinen tilanne. Keskijännitejohtoja voi olla kuitenkin suuressa kuormassakin nykytilanteessa uusien kuormien lisääntyessä kj-lähdölle.

Skenaariolla B2030 5 kappaletta ja skenaariolla F2030 10 kappaletta kj-johtolähtöjä voisi olla ylikuormassa. Näihin täytyy kiinnittää erityistä huomiota, kun suunnitellaan esimerkiksi sähköasemien saneerauksia sekä verkon vahvistamista kj-verkon osalta. Lisäksi B2030 49 kappaletta ja F2030 56 kappaletta voisi olla yli 75 % kuormituksessa.

Keskijänniteverkon muutokset ja saneeraukset ovat suuria investointeja jakeluverkolla, ja niitä täytyykin alkaa hyvissä ajoin suunnittelemaan. TAES:lla on tällä hetkellä pääosin kaikkialla vain yksi keskijännitekaapelin poikkipintakoko käytössä, joten hyvä tarkastelukohte olisi poikkipinnan kasvattaminen, suuren kuormituksen alueilla.

Vuonna 2040 kj-verkko on jo todennäköisesti muuttunut hyvinkin paljon tämänhetkiseen tilanteeseen verrattuna, ja saneerauksia kohteisiin on tehty. Skenaarioilla suurta kuormitusta (yli 75 %) havaitaan jo B2040 skenaariolla 40 %:lla lähdöistä ja 51 %:lla skenaariolla F2040. KJ-kaapeleiden poikkipinta-alojen suurentaminen sekä uusien keskijännitelähtöjen lisääminen verkolle pienentäisi kuormitusasteita johtolähdöillä.

6.3 Pienjänniteverkon vaikutukset

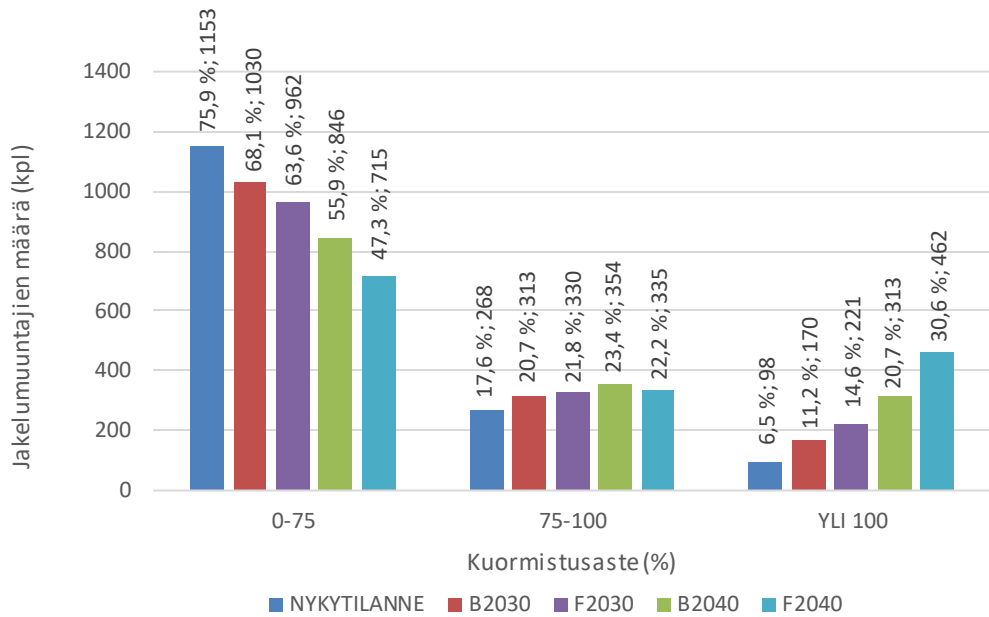
Tarkastellaan latauskuorman pienjänniteverkon vaikutuksia jakeluverkossa.

6.3.1 Jakelumuuntajat

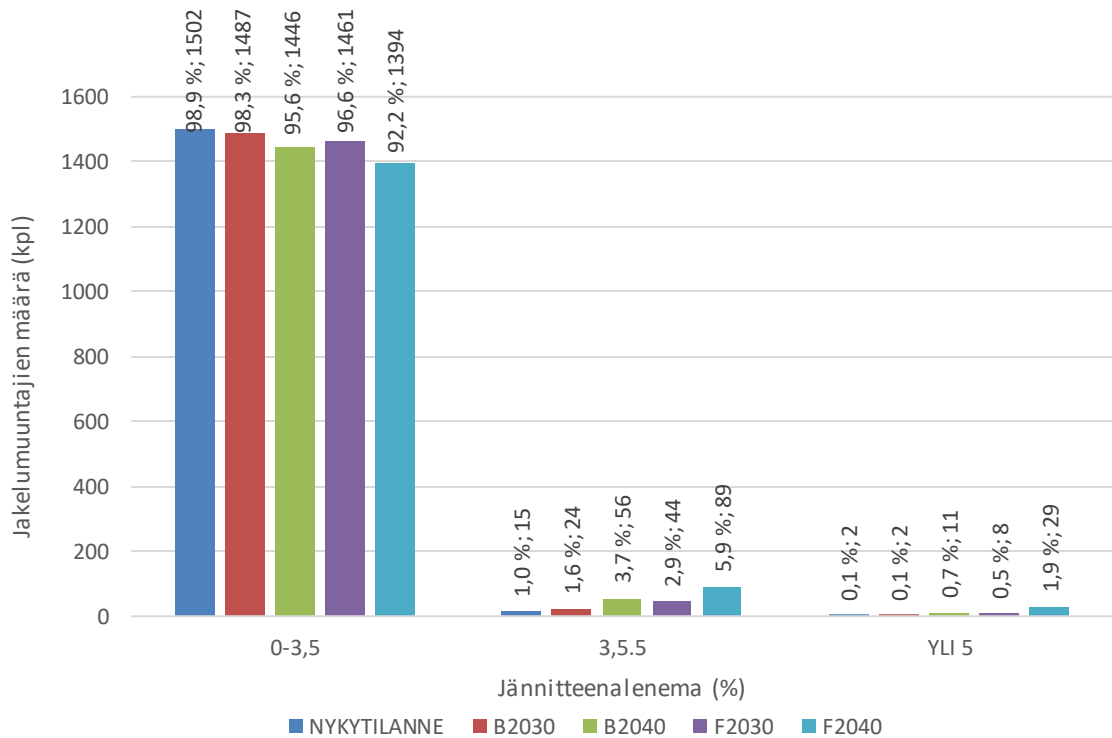
Jakelumuuntajat rajaavat keskijänniteverkon ja pienjänniteverkon jakeluverkossa. Jakelumuuntajien kuormitukseen vaikuttaa kuormituksen määrä eli virran siirto muuntajan läpi sekä muuntajan koko.

Kuvaajissa 23 ja 24 on esitetty jakelumuuntajien kuormitusaste sekä jännitteenalennus eri skenaarioilla. Tuloksista on poistettu verkkotietojärjestelmässä olevat asiakasmuuntamoiden muuntajat. Aiemmissä tarkasteluissa nämä ovat olleet mukana,

koska ne vaikuttavat keskijänniteverkon kuormitukseen. Ne eivät ole kuitenkaan jakeluverkkoyhtiön omaisuutta eikä siksi oteta tähän tarkasteluun mukaan.



Kuva 23. Jakelumuuntajien kuormitusaste eri skenaarioilla.



Kuva 24. Jakelumuuntajien jännitteenalenema eri skenaarioilla.

Kuvaajista nähdään, että jakelumuuntajilla merkittävin rajoittava tekijä on kuormitusaste. Jakelumuuntajia laskennassa oli mukana noin 1515 kappaletta. Nykytilanteessa laskennan mukaan on ylikuormassa 98 jakelumuuntajaa. Jakelumuuntajaa voidaan pitää ylikuormassa hetkellisesti, mutta muuntaja vanhenee ja eristeet kuluvat tällöin nopeammin. Talvella ylikuormitus voi olla hetkellisesti jopa 150 % asti sään aiheuttaman jäädytyksen takia. [43] Mikäli sähköauton lataus aiheuttaa ylikuormitusta muuntajassa kesäaikaan, tilanne on kriittisempi.

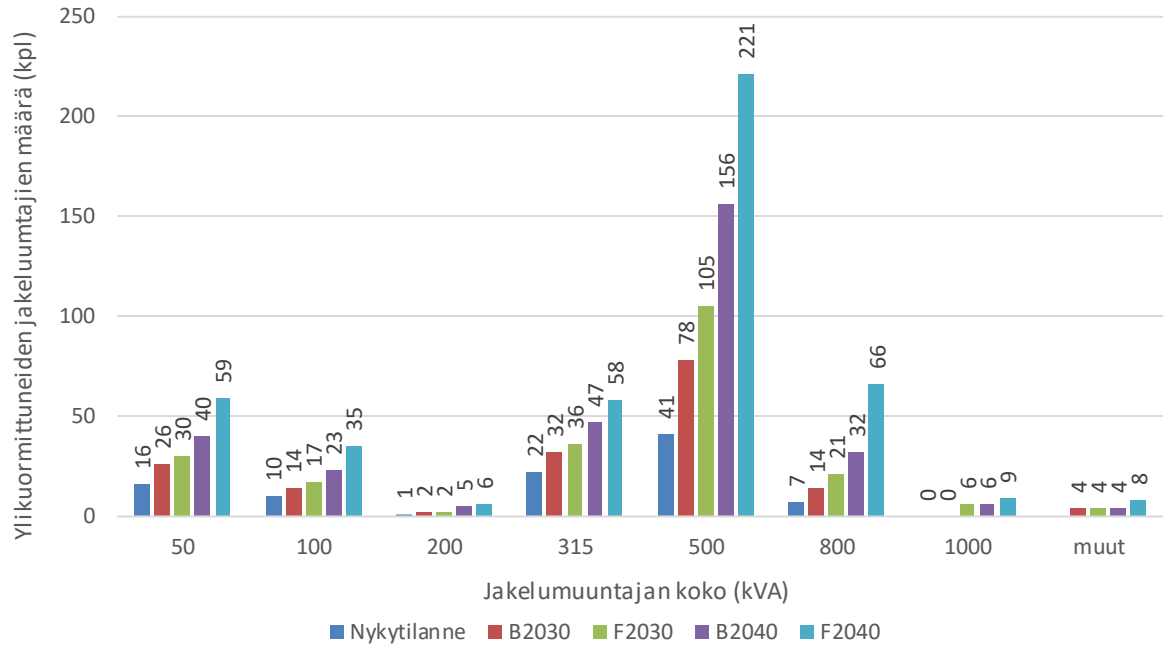
Nykypäivänä jakelumuuntamoissa on vähintään hälytysrajat muuntajan lämpötilalle, joka on verrannollinen virran kulkuun ja kuormitukseen muuntopiirissä. Myös ulkopuolisen ilman lämpötila vaikuttaa muuntajan lämpötilaan. Jakelumuuntamoissa voi olla myös suoraan hälytykset kulkevalle virralle ja jännitteelle, jolloin näitä mitataan suoraan. Kuormituksia on nykyään helpompi seurata asiakkaiden energiamittareilta tulevien tietojen pohjalta. Verkkotietojärjestelmässä ne summautuvat syöttävälle muuntajalle, jolloin nähdään todellinen kuormitus, ja saadaan laskennallisesti otettua kuormitus paremmin huomioon verkkoa suunniteltaessa.

Jakelumuuntajien kuormitus kasvaa voimakkaasti, ja jo vuonna 2030 satoja jakelumuuntajia voisi olla yli 100 % kuormassa, ja lisäksi yli 75 % kuormassa satoja muuntajia lisää. Kohteita tarvitsee tarkastella kohdekohtaisesti kuormitusta lisättäessä muuntopiiriin. Tarvittaessa muuntajaa tarvitsee vaihtaa suuremman kokoluokan muuntajaan.

Jännitteenalenema täytyy myös ottaa huomioon. Jakelumuuntajien jälkeen ennen kulutuspisteitä on pienjänniteverkko, jolloin jännitteenalenema suurenee entisestään, ja jännitteenalenema kulutuspisteissä voi nousta suureksi. Suhteellisesti jännitteenaleneman raja-arvon ylittäviä jakelumuuntajia ei kuitenkaan ole paljoa, joten nämä kannattaisi käydä kohdekohtaisesti läpi.

Jakelumuuntajia tulee verkkoon koko ajan lisää. Kaupungin kasvaessa lisärakentamisen ja uusien alueiden vuoksi täytyy rakentaa uusia muuntamoita muuntopiirien välille sekä uusille alueille. Näin ollen muuntotehoa saadaan verkkoon lisää, ja joidenkin jakelumuuntajien kuormitus saattaa tällöin laskea muuntopiirien jakorajojen muuttuessa. Tämä helpottaa osaltaan tilannetta tulevaisuudessa. Myös kahden muuntajan muuntamoita eli niin kutsuttuja tuplamuuntamoita on yhä useammin otettu käyttöön kaupungin tilan puutteessa tai suurta pistemäistä muuntotehoa varten.

Kuvassa 25 on esitetty jakelumuuntajien ylikuormitusten lukumäärä eri muuntajien koilla. Tässä näkyvät vain ylikuormittuneet muuntajat.



Kuva 25. Ylikuormittuneiden jakelumuuntajien määrä muuntajakoittain.

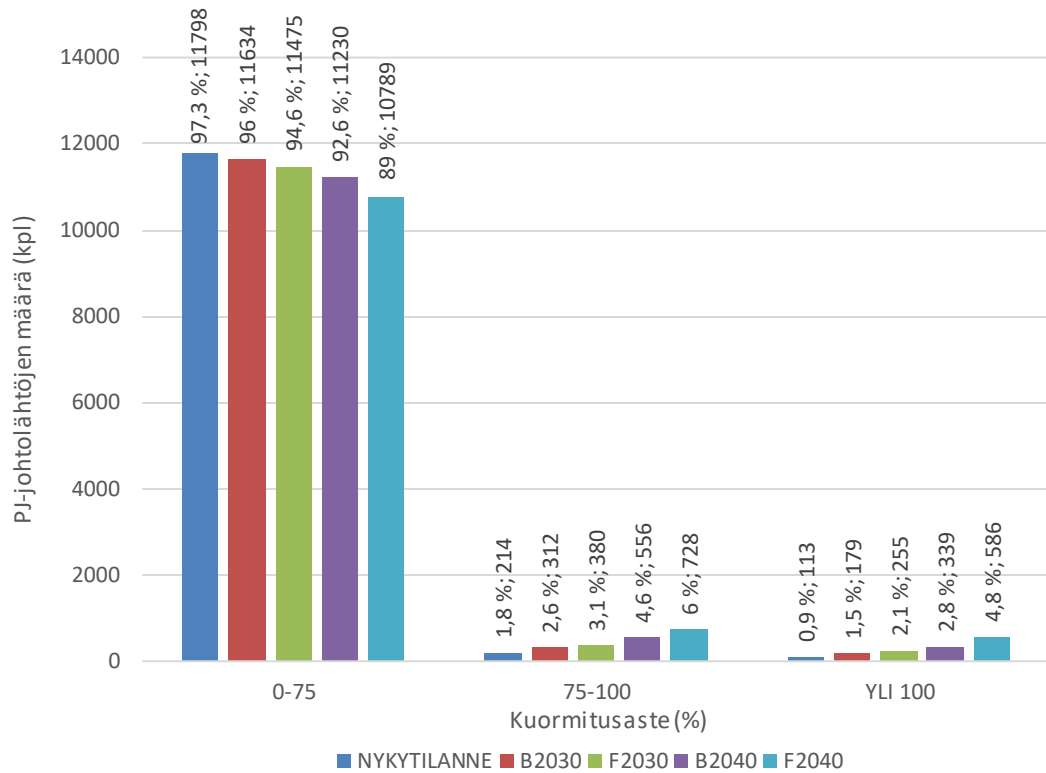
Jakelumuuntajien ylikuormitus ei täysin riipu muuntajan koosta vaan ylikuormitusta skenaarioissa tapahtui kaiken kokoisilla muuntajilla. Kuormitus johtuu siitä, millaisen kulutusprofiilin omaavia asiakkaita muuntaja syöttää. Kuvasta nähdään, että eniten skenaarioissa ylikuormittuu 500 kVA jakelumuuntajia. Tämä voi johtua siitä, että 500 kVA ja 800 kVA muuntajien välillä on suuri tehoero. Kun muuntopiiriä on mitoitettu, on päädytty pienempään vaihtoehtoon eli 500 kVA muuntajaan. Siinä kohtaa valinta on ollut järkevämpi ja parempi ratkaisu. Nyt uusien kuormien tullessa syöttävän muuntajan taakse, muuntaja ylikuormittuu. Isomman muuntajan vaihto muuntamoon ylikuormitustilanteissa on yksi vaihtoehto.

Nykypäivänä uusille alueille ja asemakaavoille tarvitaan aikaisempaa suurempia muuntajia, etenkin kerrostaloja, parkkihalleja ja palveluja syöttäville alueille. Skenaarioissa alkavat nämä suuren muuntotehon muuntajatkin ylittymään. Tulevaisuudessa täytyy miettiä yli 1000 kVA jakelumuuntajien hankintoja. Huipputehot kasvavat niin paljon, ettei suurinkaan muuntoteho näytä mahdollisesti riittävän edes skenaariolla F2030.

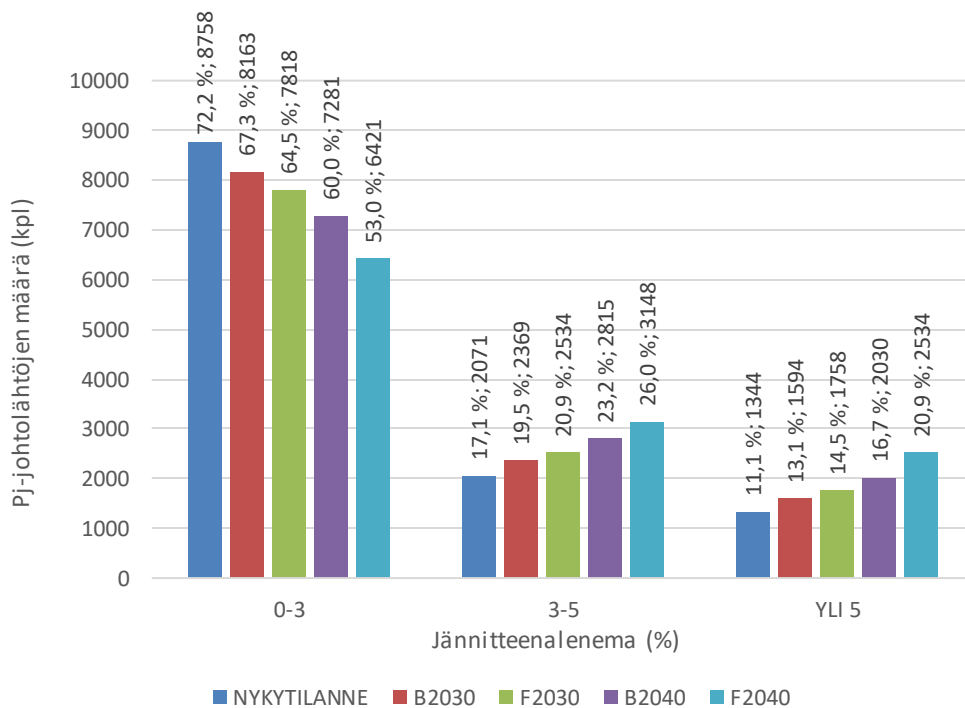
6.3.2 Pienjännitelähdöt

Kuvissa 26 ja 27 on esitetty pienjännitelähtöjen kuormitusaste ja jännitteenalenema eri skenaarioilla. PJ-johtolähtö on jakelumuuntajalta lähtevä johto kohti verkon loppupistettä. Näiden johtojen määrä on suuri. Yhteensä laskennassa pj-johtolähtöjä oli

mukana 12125 kappaletta. Laskennasta on poistettu asiakkaan kj-liittymän sisäisen liittymän pj-johdot, koska nämä ovat asiakkaan liittymän sisäistä verkkoa.



Kuva 26. Pienjännitelähtöjen kuormitusasteet eri skenaarioilla.



Kuva 27. Pienjännitelähtöjen jännitteenalenemat eri skenaarioilla.

Kuvaajasta 27 nähdään, että on siirrytty verkon loppupäätä kohti, sillä jännitteenalenema on merkittävämpi suure, kun tarkastellaan kuormituksen kasvua verkolla. Laskenta näyttää, että jännitteenalenemaa esiintyisi nykytilanteessa yli raja-arvon 11,1 % pj-lähdöistä, mikä tarkoittaa 1345 kappaletta pj-lähtöjä. Uusimmat asiakkaan energiamittarit hälyttävät jännitteenalenemasta, mutta vanhemmat energiamittarit eivät. Tulevien energiamittarien vaihdon jälkeen tulevaisuudessa jännitteenalenemaa on edelleen helpompi seurata sekä näihin verkon osiin tehdä muutoksia täsmällisemmin.

Yli raja-arvon ylittävää jännitteenalenemaa esiintyy suurella osuudella kaikista pj-lähdöistä. Ongelmallisimpia on etenkin Teiskon alueella pitkän yhteyden päässä muuntamosta olevat vanha liittymät, jotka ovat mitoitettu sen aikaisten standardien mukaisesti. Muutoksia liittymille tehtäessä täytyykin aina tarkastella jännitteenalenemaa kohdekohtaisesti. Muutokset tehdään sen hetkisten standardien raja-arvojen mukaisesti.

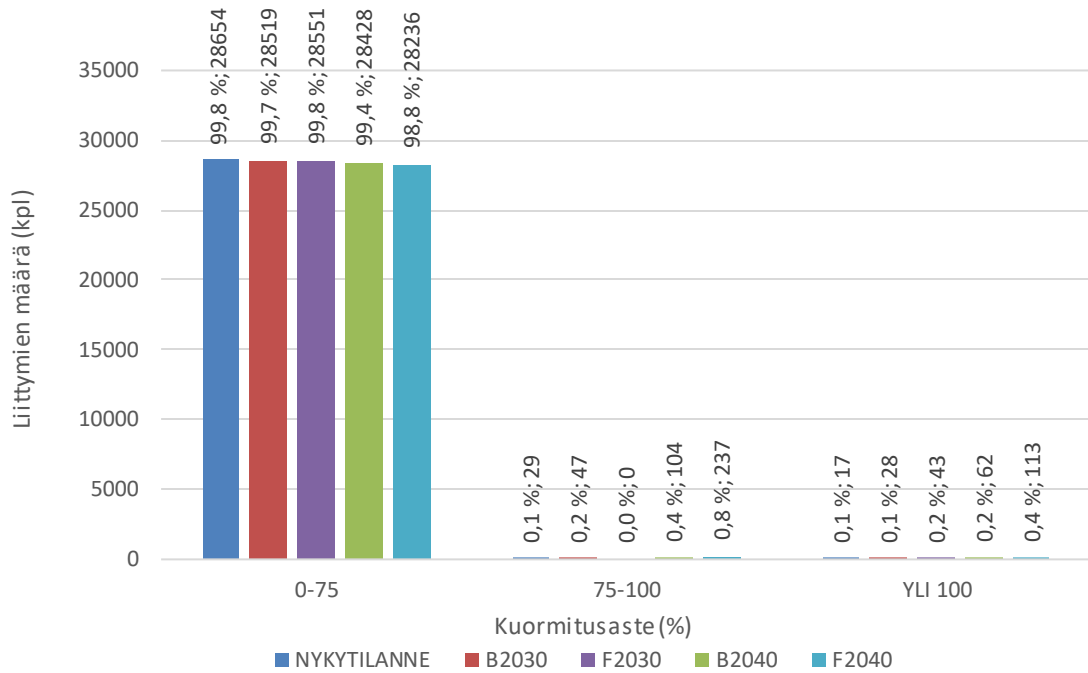
Ylikuormitusta ei suhteellisesti monella pj-lähdöllä ole. Pj-johdot mitoitetaan niin, että tehokapasiteetti on riittävä, varausta jää mahdolliselle uudelle kulutukselle ja mahdollisesti varayhteyksin voidaan syöttää toista muuntopiiriä vikatilanteessa PJ-verkon kautta. Pj-johtoja täytyy siis hieman ylimitoitaa. Seuraavaksi luvussa tarkastellaan liittymien ylimitoitamisen haasteita. Yksi haaste on se, että pj-johdoille jää turhan paljon kapasiteettia, jos pj-lähdöt ovat mitoitettu ylimitoitettujen liittymäkokojen mukaan. Tämä voi olla yksi syy miksi kuormitusaste ei nouse yli 100 % kovin monella pj-johtolähdöllä.

6.3.3 Liittymät

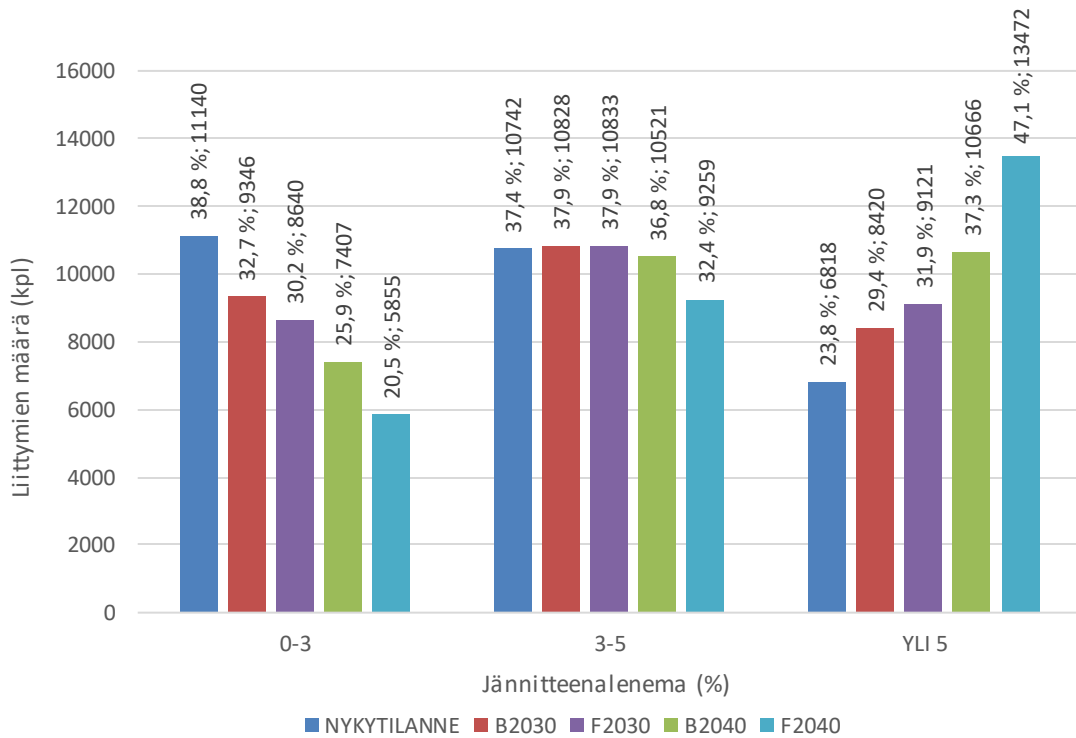
Liittymät ovat 400 V tai 20 kV liittymiä. Yleisesti ne ovat kuitenkin pienjänniteverkkoon liitettyjä kulutusposteita. Keskijänniteliittymissä asiakas liittää oman muuntamonsa jakeluverkon keskijännitepuolelle. Keskijänniteliittymät ovat muun muassa taloyhtiöitä, teollisuutta, kauppakeskuksia ja muita suuren kulutuksen pisteitä. Näiden kuormitus on keskijänniteverkon laskennassa mukana. Tässä luvussa tarkastellaan pj-liittymiä.

Liittymäkoon valinta perustuu arvioituun tehon tarpeeseen, mutta koon valinnassa tapahtuu monesti ylimitoitamista. Sähkösuunnittelijat ja asiakkaat haluavat varmistua, että teho varmasti riittää tulevaisuudessakin. Liittymien hinnan ero ei myöskään ohjaa merkittävästi liittymän oikeaan mitoittamiseen, sillä isomman kokoluokan liittymän hinta ei näy juurikaan suuren rakennusprojektin budjetissa. Näin ollen helposti valitaan suurempi liittymä pienemmän sijaan.

Kuvaajissa 28 ja 29 on liittymien kuormitusaste ja jännitteenalenema esitettynä eri skenaarioilla. Tuloksista on poistettu asiakasmuuntamoiden pienjänniteliittymät, sillä nämä ovat asiakkaan sisäistä verkkoa.



Kuva 28. Liittymien kuormitusaste eri skenaarioilla.



Kuva 29. Liittymien jännitteenalenema eri skenaarioilla.

Liittymillä jännitteenalenema on merkittävämpi suure verkon kuormitusvaikutuksia tarkastellessa. Jännitteenalenemaan voidaan vaikuttaa pienjänniteverkon vahvistamisella. Liittymän tulokset kuormitusasteen osalta ei anna välttämättä oikeaa kuvaa asiakkaan liittymän kuormitusasteesta, sillä uusien kuormien vaikutuksesta asiakkaan täytyy monesti suurentaa liittymäkokoluokkaansa. Tarkastellaan asiakkaan pääsulakkeen ylikuormitusta. Taulukossa 11 on pääsulakkeen ylikuormituksen lukumäärät eri pääsulakkeen koolla.

Taulukko 11. *Pääsulakkeen ylityksen määrät eri skenaarioilla.*

	Nykytilanne	B2030	F2030	B2040	F2040
25	702	1410	1693	2630	4701
35	154	259	298	445	757
50	5	7	9	11	25
63	12	20	26	49	90
80	0	3	3	3	6
100	4	5	7	22	45
125	2	5	8	15	18
160	3	7	12	24	74
200	4	6	7	20	57
250	9	16	22	37	82
320	5	6	6	9	20
400	6	8	14	17	25
500	1	1	1	1	2
630	1	4	7	10	13
750	2	2	2	3	6
1000	0	3	5	5	9
1200	2	1	1	1	2
muut	7	17	29	29	49

Eniten pääsulakkeen ylityksiä tapahtuu pienillä liittymillä. Pienempiä liittymiä on suhteellisesti myös enemmän verkossa kuin isompia. Taulukosta nähdään kuitenkin, että isoimmissakaan (yli 1000 A) liittymissä pääsulakkeen koko ei aina riitä, jolloin

asiakkailla on tässä tapauksessa vaihtoehtona muuttaa liittymä KJ-liittymäksi. Poikkeuksena tapauskohtaisesti voidaan sallia toinen pj-liittymä latausta varten.

Pienjänniteliittymien suurentaminen on verkon näkökulmasta joiltain osin helppoa, koska moneen liittymiskokoon voidaan käyttää samansuuruisia liittymisjohtoa. Suurilla liittymäkoolla monesti täytyy tuoda rinnakkainen johto liittymälle, jolloin koon suurentaminen vaatii lisärakentamista. Suurien liittymien ylikuormituksen määrällisesti pienestä osuudesta voidaan päätellä, että liittymissä on kapasiteettivarausta eli liittymiä on saatettu ylimitoittaa. Ylimitoittaminen on jakeluverkkoyhtiöissä näkyvä ongelma, sillä esimerkiksi ne vievät muuntamoista ja jakokaapeista johtolähtöjä sekä ylimitoitettut maakaapelit tuottavat suhteellisesti paljon loistehoa.

Nykyinen sähköenergian hintatilanne ja pörssisähkön hintojen seuraaminen kannustavat asiakkaita ajoittamaan sähkönkäyttönsä edullisempien hintojen tunneille. Lisäksi tulevaisuuden tehopohjaiseen kulutukseen perustuva hinnoittelumalli houkuttelee asiakkaita siirtämään kuormitustaan. Tämä vähentää liittymien kuormituksesta aiheutuvia vaikutuksia, helpottaa kapasiteetin riittävyyteen liittyvien ongelmien hallintaa ja tukee sähköverkkojen tehokkaampaa mitoitusta.

Kun tarkastellaan pienjänniteliittymän tehon riittävyyttä tarvitsee tarkastella, onko huippukuormitus hetkellistä vai kauemmin kestävää kuormitusta. Esimerkiksi latauspistettä suunniteltaessa ja mitoittaessa tarkastellaan latauksen kuormituksen ajallista sijoittumista, ja siten esimerkiksi koko muuntopiirin kuormituksen ajallista sijoittumista. Huippukuorman ollessa hetkellinen voidaan verkon komponentteja hieman ylikuormittaa. Tästä lisää muuntopiirien tarkastelun yhteydessä.

6.3.4 Pienjänniteverkon muuntopiirien tarkastelua

Tarkastellaan viittä erilaista muuntopiiriä pienjänniteverkossa. Muuntopiirit ovat sijainniltaan eri ympäristössä, ja kulutukseltaan erilaisia asiakasprofiileja syöttäviä. Muuntopiirit sijaitsevat alueellisesti ja kulutustyypillisesti eri paikoissa. Tarkasteltavat muuntopiirit ovat:

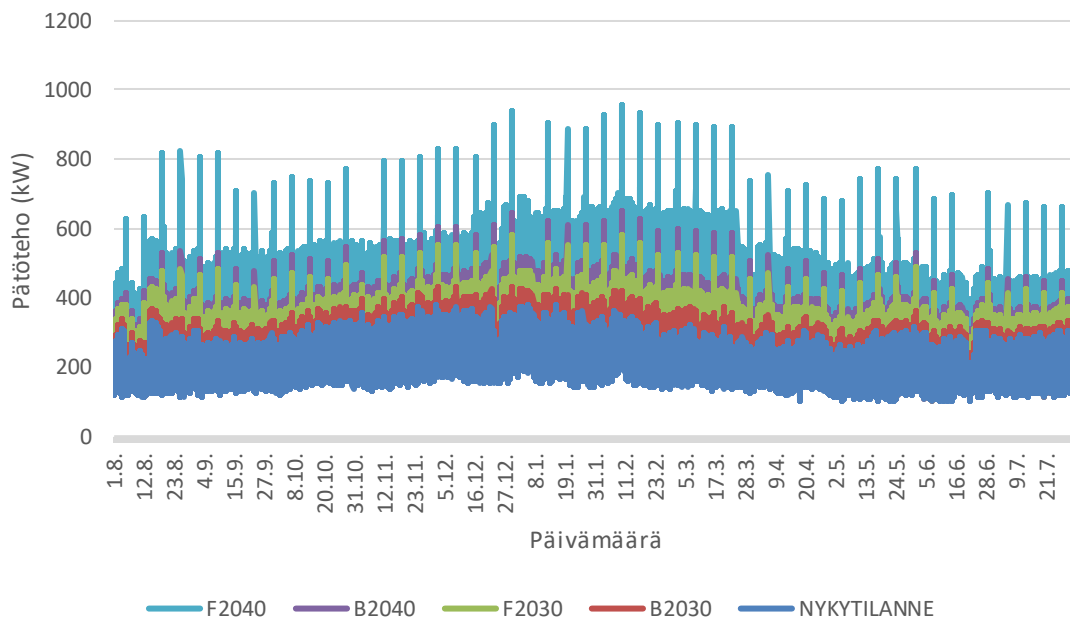
1. Muuntopiiri 1: Taajama-asutusalue; omakoti-, rivitalo- ja kerrostaloasutusta sekä kauppakeskuskompleksi; kotilatausta ja julkista latausta.
2. Muuntopiiri 2: Taajama-asutusalue; omakoti-, rivitalo- ja kerrostaloasutusta; kotilatausta.
3. Muuntopiiri 3: Teiskon maaseutumainen alue; omakoti- ja vapaa-ajanasutusta; kotilatausta.

4. Muuntopiiri 4 Keskusta-alue; kauppoja, kerrostaloasutusta ja kiinteistöjen yhteydessä parkkihalleja; työpaikkalatausta ja kotilatausta.
5. Muuntopiiri 5: Teollisuusalue; teollisuusrakennuksia; julkista latausta ja työpaikkalatausta.

Lisäksi tarkastellaan luvussa 6.3.5. yhdellä keskijännitelähdöllä latauskuorman vaikutuksia.

Ainoastaan muuntopiirissä 3 haja-asutusalueella on ilmajohtoa sekä pienjänniteverkossa että muuntopiiriä syöttävässä keskijännitejohdossa. Muissa muuntopiireissä kaikki johto-osuudet ovat maan alla kaapelina sekä syöttävät keskijännitejohdot ovat maakaapelina.

Tarkastellaan ensimmäisenä muuntopiiriä 1 taajamassa. Taajama-alueen muuntopiirinä kohde on hieman poikkeuksellinen, koska muuntaja syöttää sekä kerros-, rivi- ja omakotitalokäyttöpaikkoja sisältäviä liittymiä sekä isoa kauppakompleksia, johon kuuluu huonekalukauppa, pikaruokaravintola ja sekatavara-kauppa. Nykypäivänä taajama-alueillakin on isoja kauppakomplekseja, joita syötetään pienjänniteverkon puolelta. Kuvassa 30 esitetään muuntopiirin tehokuvaaja vuoden ajalta alkaen elokuusta ja päättyen heinäkuuhun. Muuntopiiriä syöttää 800 kVA muuntaja.

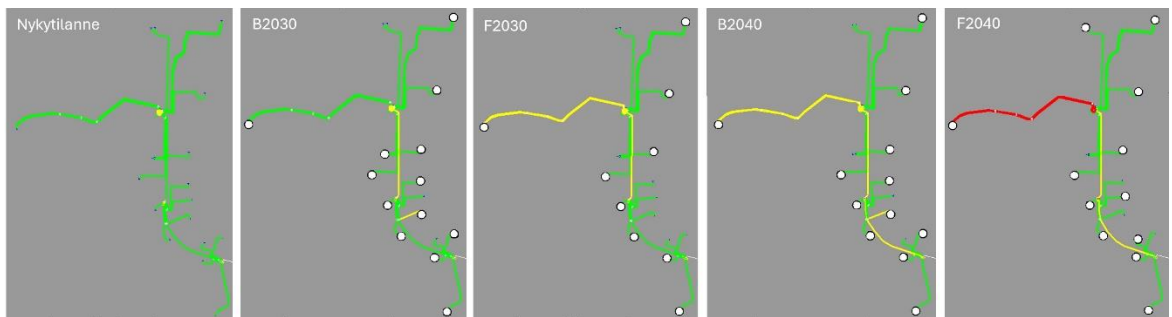


Kuva 30. Taajama-alueen muuntopiirin 1 tehokuvaaja vuoden ajalta.

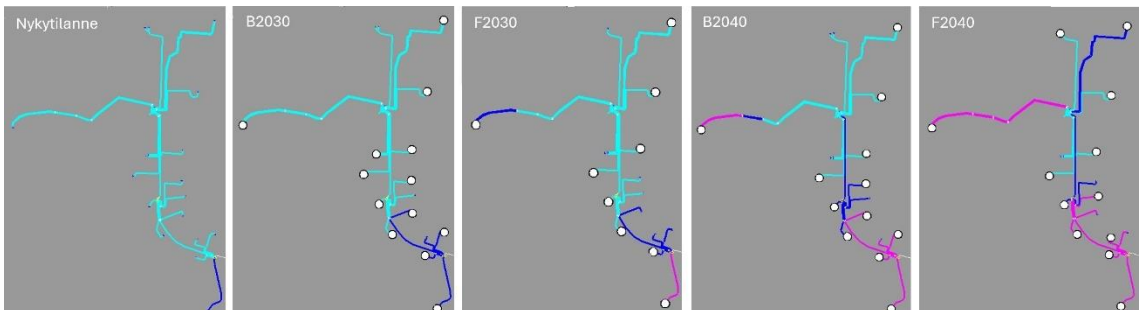
Sinisellä on kuvattu nykyhetken peruskuorma. Skenaariossa B2030 ei nähdä vielä suuria tehopiikkejä, mutta muissa skenaarioissa sähköauton lataus aiheuttaa suuria tehopiikkejä kulutusprofiiliin. Latauskäyrien takia ne sijoittuvat samoihin ajankohtiin,

iltapäiville. Muuntopiirissä on yksi 22 kW julkisen latauksen piste. Muut ovat asiakkaiden tai yhtiöiden omia kotilatauspisteitä. Muuntopiirin huipputehot ovat seuraavat: nykytilanne 381 kW, B2030 433 kW, F2030 590 kW, B2040 648 kW, F2040 956 kW. Muuntaja on ylikuormassa skenaariolla F2040.

Kuvissa 31 ja 32 esitetään muuntopiirin kuormitusasteen ja jännitteenaleneman muuttuminen nykyisestä verkon tilanteesta eri skenaarioilla. Valkoiset pisteet kuvaavat uusia lisättyjä latauskäyttöpaikkoja. Kuormitusasteen väritys kuvaa seuraavaa: vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 % kuormitusastetta. Jännitteenaleneman suuruus kuvataan seuraavasti: turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 % jännitteenalenema. Verkosta on väritetty johto-osuudet sekä muuntaja.



Kuva 31. Kuormitusasteen muutos muuntopiirissä 1 eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)



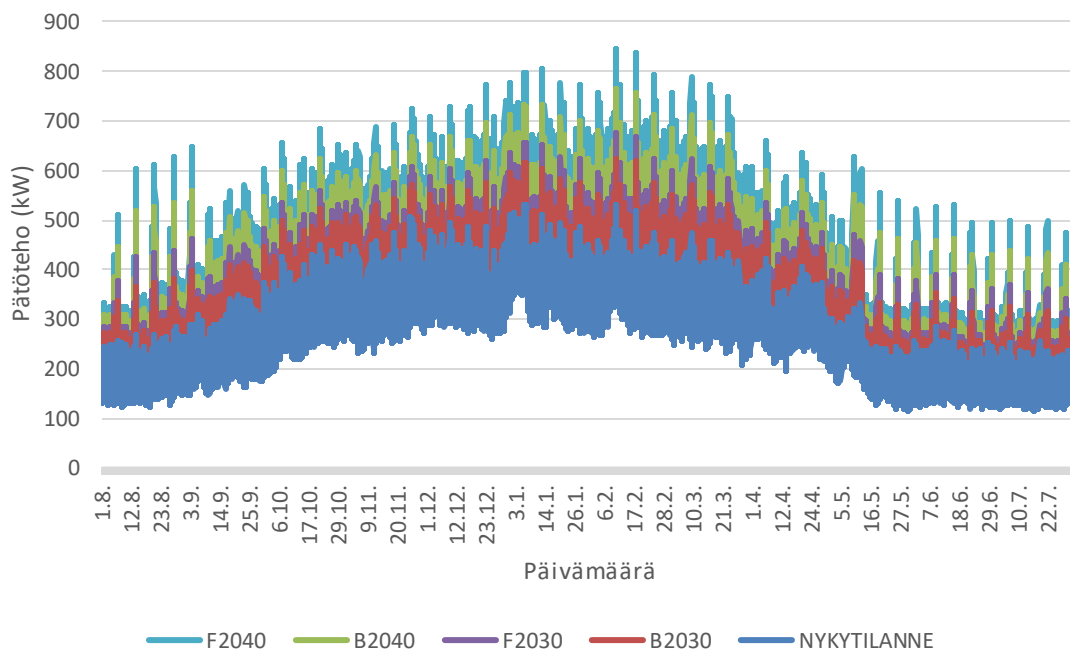
Kuva 32. Jännitteenaleneman muutos muuntopiirissä 1 eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)

Kuvasta 31 nähdään, että yhdellä liittymisjohdolla kuormitusaste ylittää 100 %:n. Tähän liittymään on lisätty julkisen latauksen käyttöpaikka jokaisessa skenaariossa. Ratkaisuna liittämiskokoa tulisi suurentaa, ja liittymisjohdot korvata uusilla suuremman poikkipinta-alan johdoilla. Mahdollisuutena on myös muuttaa liittymä keskijänniteliittymäksi tai lisätä latauspisteeseen kuormanohjausta. Kaikissa skenaarioissa yksi runkojohto muuntamon ja jakokaapin välillä on keltaisella. Muuntaja on ylikuormassa skenaariolla F2040, ja onkin silloin rajoittavana komponenttina muuntopiirissä. Tämä voidaan vaihtaa kokoluokkaa isommaksi, 1000 kVA muuntajaan.

Kuvasta 32 nähdään, että muutamilla liittymäjohdoilla esiintyy raja-arvon 5 % ylittävää jännitteenalenemaa. Muuntamosta kauimpana olevat johdot sekä suuren kuormituksen johdoilla jännitteenalenema ylittää raja-arvon. Tähän voidaan vaikuttaa rajoittamalla kuormitustehoa tai uusimalla johdot poikkipinta-alaltaan suuremmiksi. Muuntajalla jännitteenalenema nousee skenaariossa F2040 yli raja-arvojen, mihin auttaa myös muuntajan kokoluokan suurentaminen.

Muuntopiirin 1 pienjännite- ja keskijänniteverkko on suurelta osin 60–90-luvulla rakennettua. Vanhimmat osuudet tullaan siis uusimaan mahdollisesti jo vuoteen 2030 mennessä, jolloin vahvistamista tullaan tekemään sen hetkisiä ja tulevaisuuden kuormia tarkastellessa. Vuonna 2040 verkko saattaa olla jo aivan toisenlainen, ja vahvistamista on todennäköisesti tehty.

Tarkastellaan seuraavaksi perinteisempää taajama-alueen muuntopiiriä 2. Jakelumuuntaja syöttää useata omakoti-, paritalo-, rivitalo- ja kerrostaloliittymää. Lisäksi muuntopiirissä on ulkovalaistuksen liittymä. Yhdeltä liittymältä löytyy aurinkopaneelit. Muuntajan koko on 800 kVA. Kuvassa 33 on esitetty muuntopiirin 2 tehokuvaaja vuoden ajalta, alkaen elokuusta ja päättyen heinäkuun loppuun.

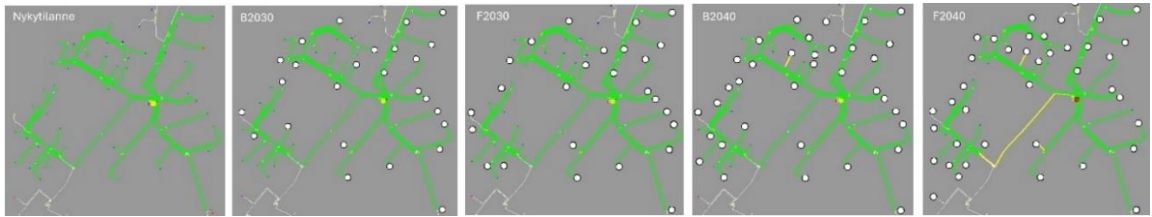


Kuva 33. Taajama-alueen muuntopiirin 2 tehokuvaaja vuoden ajalta.

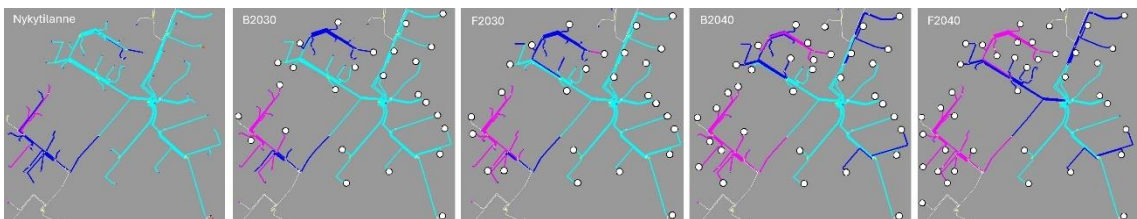
Tehohuippu on nykyhetkessä sekä eri skenaarioilla seuraavat: Nykytilanne 530 kW, B2030 625 kW, F2030 676 kW, B2040 765 kW ja F2040 845 kW. Tehopiikit muuntopiirissä kasvavat melko paljon kesäkuukausina. Talvikuukausina peruskuorma muuntopiirissä on suurempi, joten tehopiikit eivät nouse niin paljon esille, koska

peruskuorma on monella tunnilla suuri. Muuntaja on hieman ylikuormassa skenaariolla F2040. Tämä olisi siedettävä tilanne, koska muuntajan tehon ylittävät huipputehot ovat talvikuukausina, jolloin muuntamossa on sään tuomaa jäädytystä. Lisäksi tehopiikit ovat vain hetkellisiä latauksesta johtuvia.

Kuvissa 34 ja 35 on esitetty muuntopiirin 2 rakenne sekä kuormitusaste ja jännitteenalenema eri skenaarioilla. Valkoiset pisteet kuvaavat lisättyjä latauskäyttöpaikkoja.



Kuva 34. Taajama-alueen muuntopiirin 2 kuormitusasteen muutos eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)



Kuva 35. Taajama-alueen muuntopiirin 2 jännitteenaleneman muutos eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)

Nykyisessä verkon kytkentätilanteessa verkko ei ole ylikuormitettu eikä kuormitus nouse yli 100 %:n skenaarioiden lisääntyvässä kuormassa. Vain yksi runkojohto ja yksi liittymisjohto nousee yli 50 % skenaariossa F2040, mikä näkyy keltaisella värillä kuvassa 34. Runkojohto nousee hieman yli 50 % eikä haittaa kuormituksen osalta. Muuntajan kuormitus nousee skenaariossa F2040 yli 100 % kuormitusasteen.

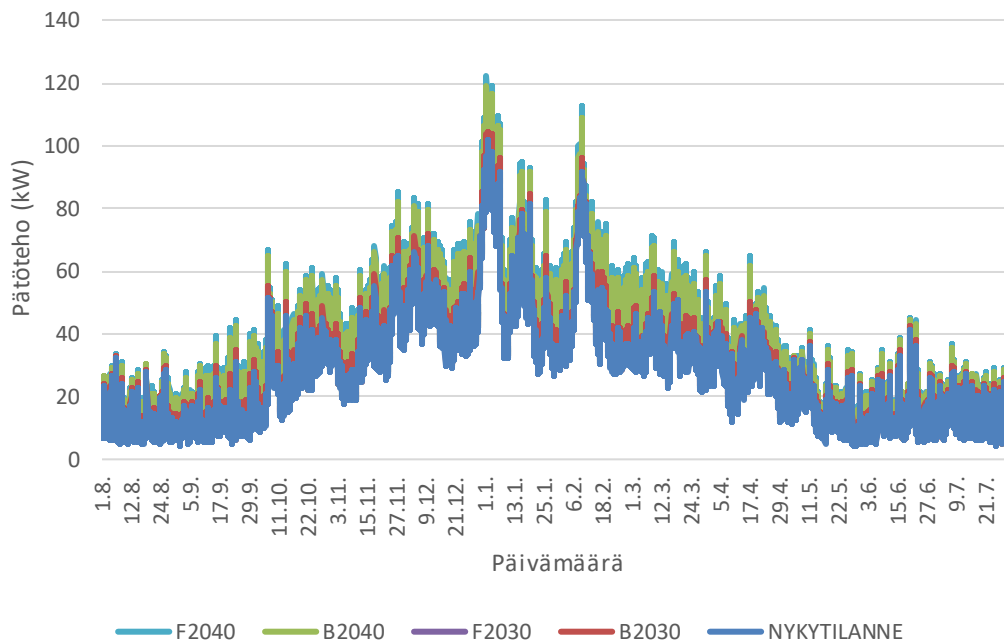
Nykytilanteessa jännitteenalenemaa esiintyy verkon ääriosassa neljällä liittymällä yli raja-arvon. Tämä näkyy lilalla korostuksella kuvassa 35. Syöttävän verkon kaapeleiden poikkipinta-ala vaikuttaa jännitteenalenemaan ja esimerkiksi rakentamalla rinnakkainen johto runkoyhteyden tilanne helpottuisi.

Jännitteenalenema on tässä muuntopiirissä merkittävämpi tarkasteltava suure, ja se nouseekin yli raja-arvon muutamilta verkon ääriosalta. Tämä johtuu muuntamon ja liittymien suuresta etäisyydestä. Liittymillä kuormitusvirrat nousevat, ja monessa virta voi nousta jopa yli pääsulakkeen, jolloin tilanne ei ole edes mahdollinen. Todellisuudessa liittymäluokkaa korotettaisiin, ja liittymisjohtoon sekä mahdollisesti runkojohtoon tehtäisiin muutoksia tässä yhteydessä.

Muuntopiiri 2 on suurelta osin rakennettu 1990–2000 -luvuilla, joten vuoteen 2040 mennessä verkkoa on suurelta osin saneerattu ja vahvistettu. Vuoteen 2030 mennessä verkkoa voidaan joutua vahvistamaan jännitteenaleneman vuoksi.

Seuraavaksi tarkastellaan Teiskon maaseutumaisella alueella olevaa muuntopiiriä 3. Teiskoa on saneerattu sähkömarkkinalain vaatimiin raja-arvoihin viime vuosina jatkuen edelleen. Teiskon alueelta on valittu muuntopiiri, joka ei ole ollut saneerausohjelmassa viime vuosina. Muuntopiirin verkko onkin näin ollen suurimmaksi osaksi pienjännitteellä ilmajohtoa, muuntamo on pylväsmuuntamo ja keskijännitejohto tulee osaksi ilmassa ja osaksi maakaapelina viereiseltä muuntamolta. Muuntopiiri syöttää omakotitaloja sekä vapaa-ajan asuntoja ja muuntaja on kokoluokaltaan 100 kVA.

Kuvassa 36 on muuntopiirin 3 tehokuvaaja vuoden ajalta alkaen elokuusta ja päättyen heinäkuun loppuun. Huipputeho ei suuresti lisäännä nykytilanteesta, keskimäärin vain noin 20 kW. Uudet kuormat ei aiheuta uusia tehopiikkejä, suurentaa vain olemassa olevia tehopiikkejä. KJ-verkon syöttävä virta kasvaa vain yhden ampeerin skenaariossa F2040 verrattuna nykytilanteeseen.



Kuva 36. Haja-asutusalueen muuntopiirin 3 tehokuvaaja vuoden ajalta.

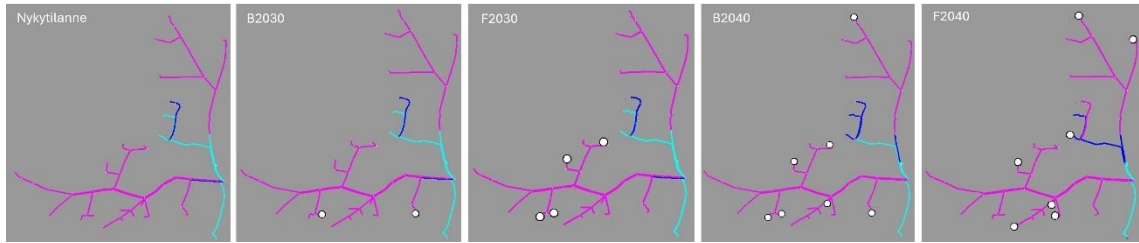
Huipputeho on eri skenaarioilla seuraavat: Nykytilanne 102 kW, B2030 104 kW, F2030 106 kW, B2040 119 kW, F2040 122 kW. Muuntaja on ollut jo nykytilanteessa ylikuormassa, mutta ei merkittävästi, ja tehohuippu sijoittuu talvikuukausille. Muuntaja on pylväässä, joten jäähdytys on todella hyvä eikä tilanne näin ollen ole hälyttävä. Kuorman lisääminen muuntopiiriin tulee tarkastella tapauskohtaisesti, ja vaihtaa mahdollisesti

muuntajakone yhtä kokoluokkaa suuremmaksi, jolloin myös olisi hyvä korvata pylväsmuuntamo puistomuuntamoksi.

Kuvissa 37 ja 38 esitetään muuntopiirin 3 kuormitusasteen ja jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. Muuntopiirin rakenne on hieman erilainen haja-asutusalueella, sillä pj-verkolla varayhteyksiä ei ole viereisiin muuntopiireihin. Tämä nähdään myös seuraavista kuvista.



Kuva 37. Haja-asutusalueen muuntopiirin 3 kuormitusasteen muutokset eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)



Kuva 38. Haja-asutusalueen muuntopiirin 3 jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)

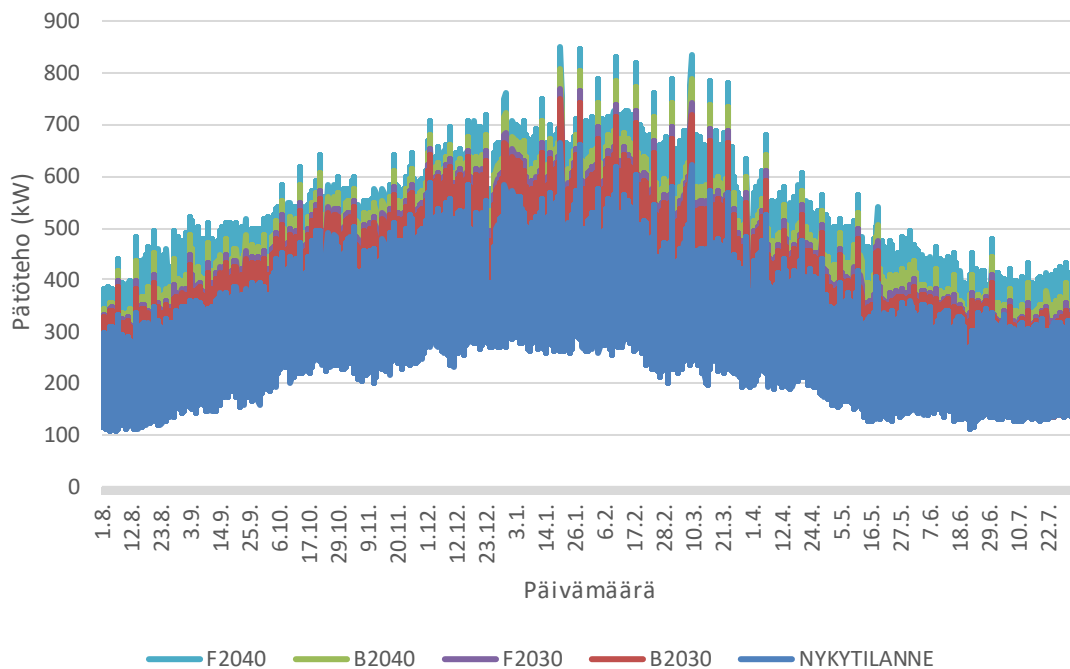
Kuvassa 37 kuormitusaste on yli 50 %:n vain yhdellä liittymällä. Tämä ei tulisi aiheuttamaan toimenpiteitä. Skenaariolla F2040 keltainen osuus on jo kuitenkin lähellä 100 % kuormitusta.

Jännitteenalenema sen sijaan aiheuttaa ongelmaa verkkoon. Nykytilanteessa on jo yli 5 % jännitteenalenemaa monella johto-osuudella, mikä ei ole nykystandardin rajoissa. Tulokset ovat kuitenkin vain hetkellisiä suurimpia arvoja eikä tiedetä, onko se jatkuvaa. Laskenta antaa nimittäin vain hetkellisen suurimman arvon parametreille. Suuri hetkellinen jännitteenalenema voi esimerkiksi johtua suurta virtaa ottavan koneen käynnistymisestä. Kuitenkin vain skenaariossa F2040 jännitteenalenema muuttuu yhdellä johto-osuudella yli 5 % raja-arvon. Tämä johtoväli tulee myös saneerausikään ennen todennäköistä jännitteenaleneman ylitystä. Jännitteenaleneman ongelmiin auttavat uudet energiamittarit, jotka ilmoittavat jännitteenalenemasta, ja pystytään reagoimaan tilanteisiin tarkemmin.

Muuntopiiri 3 on rakennettu 1970- 2000- luvulla, joten saneerattaessa verkkoa täytyy tarkastella jännitteenaleneman tilanne. Siihen mennessä asiakkailta tulee olemaan

nykyaikaset energiamittarit, ja saadaan todellista mittaustietoa, jolla päätöksiä jännitteen laadun ongelmista, ja niiden parantamisesta tullaan tekemään. Muuntamo on kuitenkin 2010-luvulla rakennettu. Muuntajan kokoon täytyy todennäköisesti jo aiemmin kiinnittää huomioita, ja tehdä vahvistavia toimenpiteitä.

Seuraavaksi tarkastellaan kaupunkialueen muuntopiiriä 4. Muuntaja syöttää erilaisia liikekiinteistöjä, kerrostaloja ja liikennevaloja. Muuntaja on kooltaan 500 kVA. Kuvaajassa 39 on esitetty kaupunkialueen muuntopiirin 4 tehokuvaaja vuoden ajalta alkaen elokuusta ja päättyen heinäkuun loppuun.

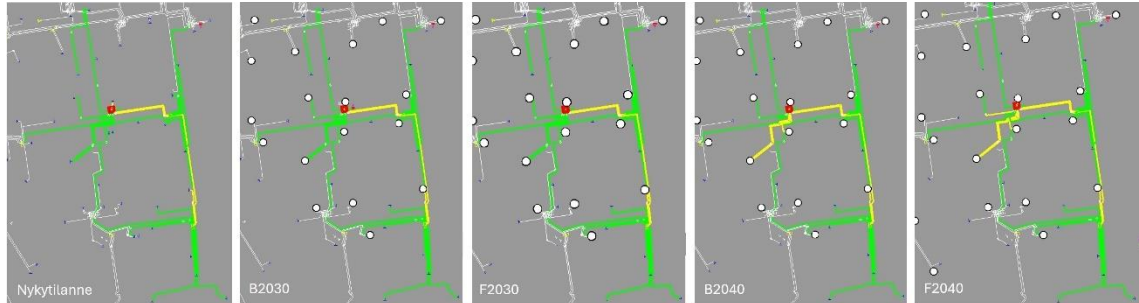


Kuva 39. Kaupunkialueen muuntopiirin 4 tehokuvaaja vuoden ajalta.

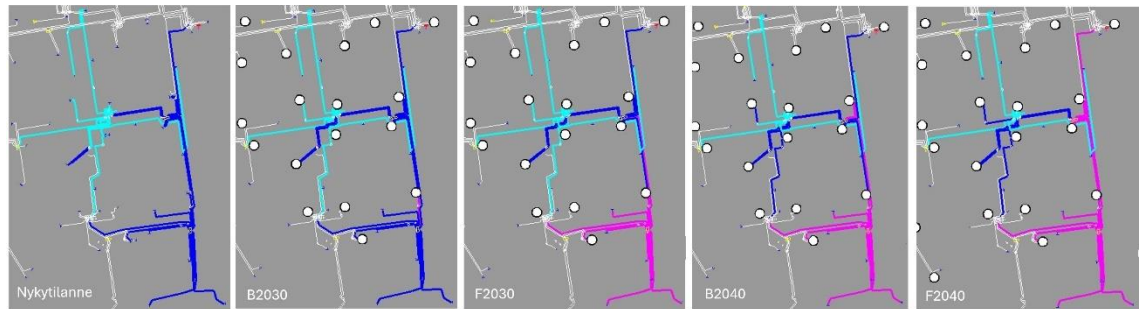
Tehokuvaajasta nähdään, että jo nykytilanteessa talvikuukausilla tehopiikit ovat hieman suurempia, mikä johtuu ainakin kaupunkialueen vanhojen talojen sähkölämmityksistä. Lämmityksen päälle tulee sähköauton latauskuormitus, mikä suurentaa tehopiikkejä. Huippukuormitus muuttuu eri skenaarioilla seuraavasti: nykytilanne 665 kW, B2030 749 kW, F2030 769 kW, B2040 809 kW ja F2040 851 kW. Muuntaja on ylikuormassa nykyhetkessä sekä kaikilla skenaarioilla. Laskennan tulos on huolestuttava, koska muuntajan kuormitusaste laskennan mukaan on nykyhetkellä 144 %. Tällä kuormitusasteella muuntajakoneen osat alkavat vanhenemaan huomattavasti. Lisäksi muuntamo on kiinteistömuuntamo, joten tuuletus tilassa täytyy olla näillä kuormituksilla todella hyvä turvallisuuden kannalta. Laskenta voi kuitenkin näyttää väärin, jos esimerkiksi liittymillä on kuormanhallintaa tai kulutusta arvioidaan vanhojen kuormituskäyrien mukaisesti, mikä voi aiheuttaa todellisuudesta eriävää kulutustietoa.

Laskenta ei pysty ottamaan kuormanhallintaa huomioon eikä välttämättä verkkoyhtiöllä ole siitä tietoa.

Kuvissa 40 ja 41 on esitetty muuntopiirin 4 kuormitusasteen ja jännitteenaleneman muutokset.



Kuva 40. Kaupunkialueen muuntopiirin 4 kuormitusasteen muutokset eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)



Kuva 41. Kaupunkialueen muuntopiirin 4 jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)

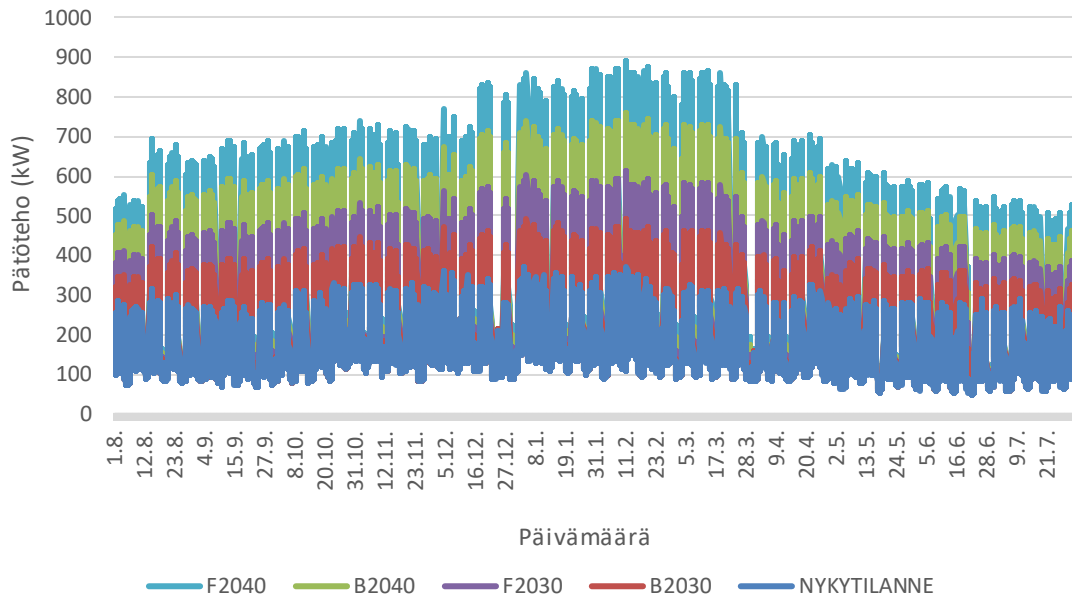
Kuvassa 40 muuntaja näkyy punaisella värillä, ja onkin siten muuntopiirin rajoittava komponentti. Verkko ei kuitenkaan ole ylikuormituksessa. Kuormitus ei nouse yli 100 % millään johto-osuudella, mutta jännitteenalenema kasvaa yli raja-arvon eteläisen puolen johto-osuuksilla. Jo skenaariolla F2030 voisi olla jännitteenaleneman kanssa ongelmaa. Tilannetta voidaan parantaa johtojen poikkipinta-aloja suurentamalla sekä rinnakkaisia johtoja lisäämällä.

Muuntopiiri 4 on 50-luvulla ensimmäisen kerran rakennettu, ja siitä jäänyt johto-osuuksia tähän päivään asti. 90-luvulla verkko on suurelta osin saneerattu, mutta verkkoa on muuntopiirissä tällä hetkellä lähes jokaiselta vuosikymmeneltä. Joiltain osin verkkoa tullaan siis uusimaan, mutta ei välttämättä kokonaan vuoteen 2040 mennessä. Myöskin muuntamon ollessa kiinteistössä tarvitsee muuntajan ylikuormitusta seurata, koska ilmanvaihto ja jäähdytys ei ole yhtä hyvä kuin puistomuuntamon jäähdytys.

Viimeiseksi tarkastellaan teollisuusalueen muuntopiiriä 5. Teollisuusalueella on muun muassa seuraavia käyttöpaikkoja: tekstiili- ja vaateteollisuus, tukkukauppa ja tavaratalot,

tietoliikenne, metalli- ja konepajateollisuus, graafinen teollisuus ja kustantamot ja asuintalojen käyttöpaikkoja. Teollisuuden käyttöpaikkojen nimet voivat olla harhaanjohtavia oikeaan tilanteeseen verrattuna, sillä näissä on voinut toiminta vaihtua tai alkujaankin on laitettu vain parhaiten kulutuskäyrältään sopivin vaihtoehto.

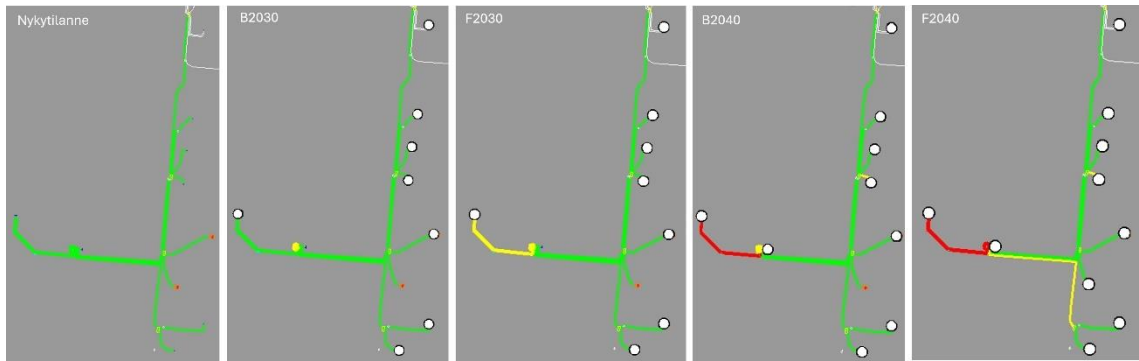
Kuvaajassa 42 on esitetty teollisuusalueen muuntopiirin tehokuvaaja vuoden ajalta alkaen elokuusta ja päättyen heinäkuuhun. Muuntajan koko on 800 kVA.



Kuva 42. Teollisuusalueen muuntopiirin 5 tehokuvaaja vuoden ajalta.

Tehokuvaaja on hyvin teollisuuden kulutusta kuvaava. Arkena on kulutusta, mutta viikonloppuina kulutus laskee pieneksi. Sähköauton latauskuorma on lisätty peruskuorman päälle, jolloin muuntaja on ylikuormassa skenaariossa F2040. Muuntajassa on melko paljon vapaata kapasiteettia nykytilanteessa. Skenaarioissa tehohiippu muuttuu seuraavasti: nykytilanne 372 kW, B2030 491 kW, F2030 611 kW, B2040 759 kW, F2040 892 kW.

Kuvissa 43 ja 44 on esitetty kuormitusasteen ja jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla.



Kuva 43. Teollisuusalueen muuntopiirin 5 kuormitusasteen muutos eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 %)



Kuva 44. Teollisuusalueen muuntopiirin 5 jännitteenaleneman muutos eri skenaarioilla. (turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 %)

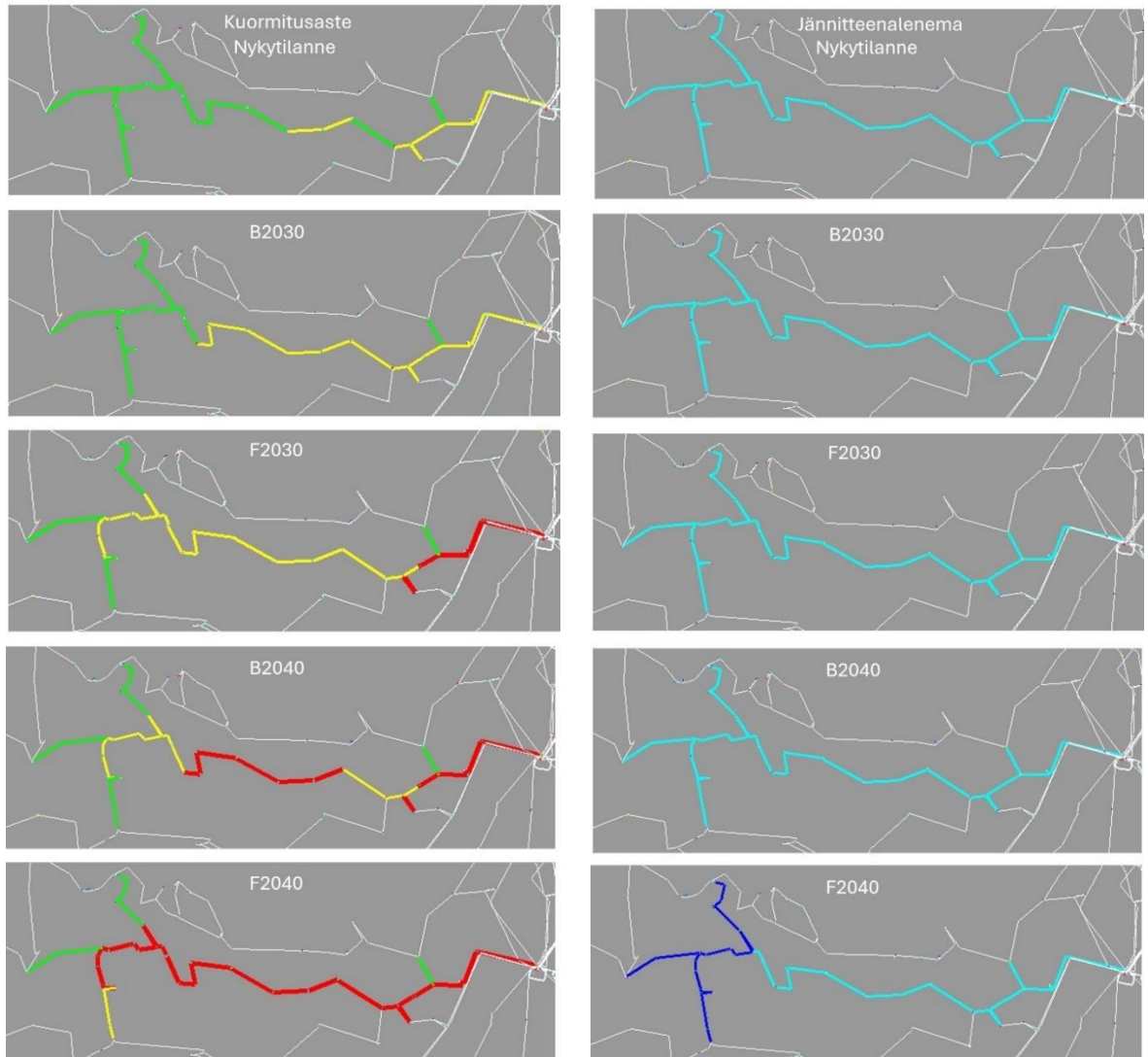
Yksi liittymisjohto on ylikuormassa molemmilla vuoden 2040 skenaarioilla. Lisäksi skenaariolla F2040 yksi runkojohto kuormittuu yli 50 %:n. Liittymäkoon kasvaessa tuleekin tapauskohtaisesti tarkastella liittymisjohdot, ja rakentaa rinnakkainen johto, jos poikkipinta-alat eivät riitä. Muuntaja on nykytilanteessa alle 50 % kuormassa, mutta skenaariossa B2040 jo lähelle 100 % kuormitusastetta. Skenaariolla F2040 muuntaja on jo ylikuormassa, kuten nähtiin kuvasta 42. Muuntaja onkin muuntopiirin tehoa rajoittava komponentti.

Jännitteenalenema nousee välille 4–5 % monella johto-osuudella skenaariolla F2040. Muilla skenaarioilla jännitteenalenemat pysyvät alle 4 %:n. Jännitteenalenema ei aiheuta toimenpiteitä näillä kuormilla.

Muuntopiiri 5 on 1980-2000 -luvulla rakennettua. Teollisuusalueelle mahdollisten uusien teollisuuskohteiden tullessa täytyy aina tarkasti tarkastella muuntopiirin tehokuormitus. Monet teollisuuskohteet ovat kriittisiä liittymiä sähkökatkojen suhteen, ja esimerkiksi johto-osuuksilla toisiin muuntamoihin täytyy olla vapaata kapasiteettia, jotta vikatapauksessa voidaan esimerkiksi muuntaja korvata viereisen muuntopiirin muuntajalla.

6.3.5 Keskijännitelähdön tarkastelu

Tarkastellaan yhtä keskijännitelähtöä sähköasemalta. KJ-johtolähtö sisältää osittain liikekeskustan alueen ja uuden asuinalueen, missä on paljon uusia parkkialueita sekä kerrostaloja. Lisäksi KJ-lähtö sisältää kaksi asiakasmuuntamoita, jotka ovat kahden teollisuusyrityksen omistamia. Kuvassa 45 on esitetty KJ-lähdön kuormitusasteen sekä jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla.



Kuva 45. Keskijännitelähdön kuormitusasteen ja jännitteenaleneman muutokset eri skenaarioilla. (vihreä 0–50 %, keltainen 50–100 % ja punainen yli 100 % kuormitusaste ja turkoosi 0–4 %, sininen 4–5 % ja lila yli 5 % jännitteenalenema)

Kuormitusaste on merkittävämpi tekijä KJ-verkolla kuin jännitteenalenema kuten myös aiemmin todettiin. Yli 100 % kuormitusaste voi ylittyä jo skenaariolla F2030 KJ-lähdön alussa suuren virran takia. Alueen lähistölle on suunniteltu uutta sähköasemaa, mikä voisi parantaa tilannetta. Tällöin kuormat jakautuisivat paremmin. Uusi sähköasema on

kuitenkin monen vuoden rakennusprojekti, joten vuodelle 2030 se ei ehtisi valmistua kaavoituksen ja rakentamisen keston takia. Kyseiseen KJ-lähtöön täytyy tulevaisuudessa kiinnittää erityistä huomiota, sillä kyseinen alue kasvaa muunkin rakentamisen kannalta tulevaisuudessa.

Vuonna 2040 KJ-lähdön tilanne näyttää erittäin huonolta, ja melkein koko lähtö olisi ylikuormassa. Ne johto-osuudet, jotka eivät ole ylikuormassa ovat suurin osa yli 4 % jännitteenalenemassa.

KJ-lähdön johdot ovat suurelta osin 2000-luvulla rakennettua. Alun johdot ovat vanhempia, 1980-2000 -luvulla rakennettuja, joten ne tullaan jo mahdollisesti vuoteen 2030 mennessä korvaamaan. Ongelmallisiksi voi tulla loppupään uudet johto-osuudet, jotka näyttävät kuormittuvan vuoden 2040 skenaarioissa. Työn pohjalta saadaankin perustelua mahdollisia verkon investointitarpeita ja kohdennettua niitä oikein.

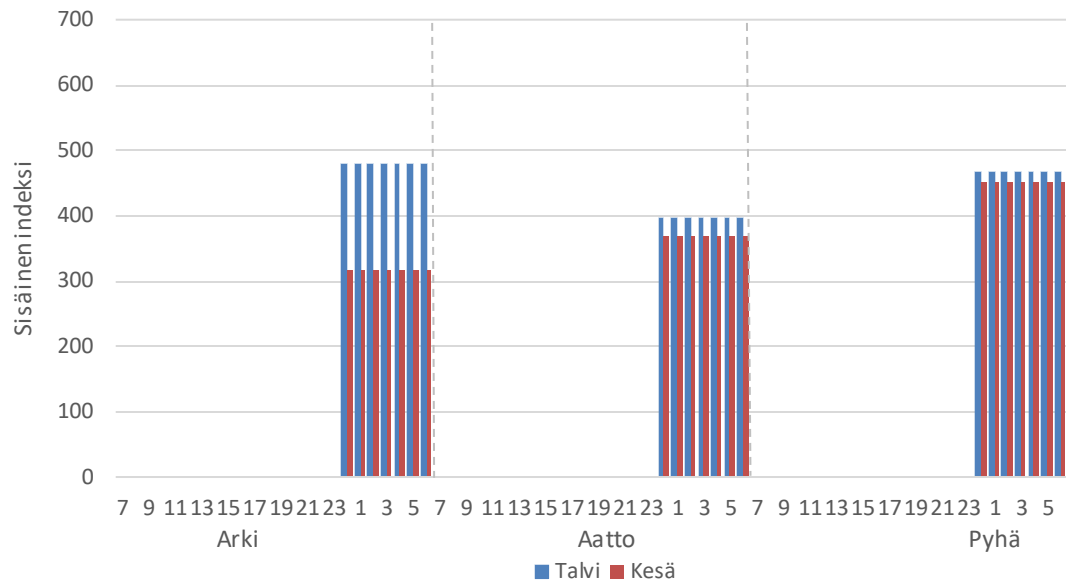
6.3.6 Sähköauton kotilatauksen muutos yöaikaan

Muutetaan sähköauton kotilatauksen kuormituskäyriä niin, että lataus tapahtuu täysin yöaikaan halvimmilla tunneilla. Kotilataukseen kuuluu omakoti-, paritalot, kerros- ja rivitalot sekä vapaa-ajanasuntojen lataus. Tarkastellaan koko verkon kuormituksen muutosta sekä miten muutos vaikuttaa edellä tarkasteltuihin muuntopiireihin ja KJ-johtolähtöön.

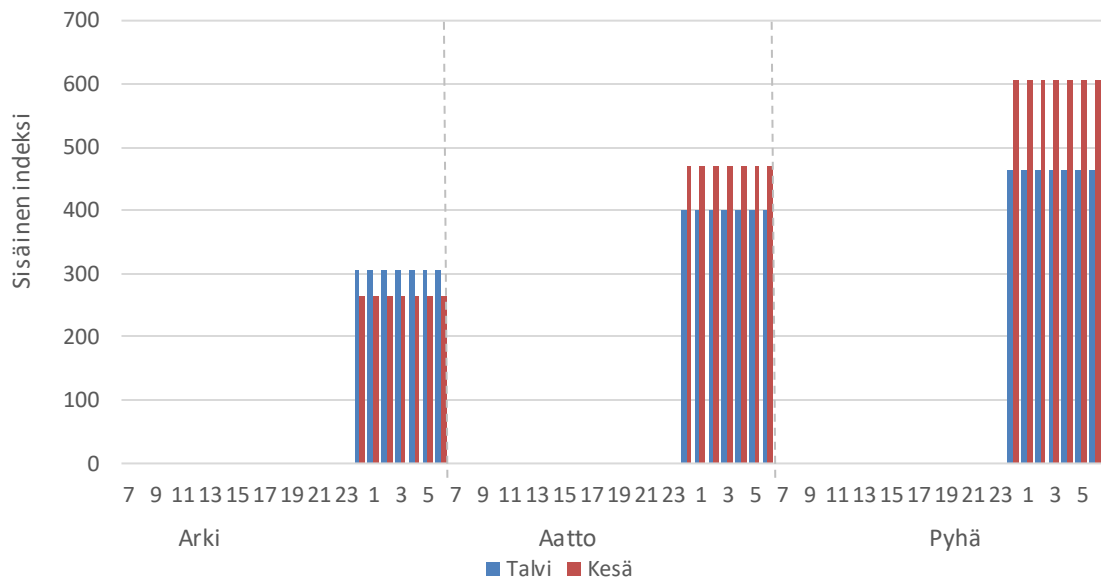
Keskiarvoltaan pörssisähkön halvimmat tunnit ovat välillä kello 23–06 [44]. Siirretään kotilataus pelkästään yöaikaan tapahtuvaksi näille tunneille. Jaetaan näiden jokaisen päivätyypin (arki, aatto, pyhä) kuormituskäyrien koko energiamäärä tasan tietyn päivätyypin seitsemälle tunnille. Kokonaisenergimäärä ei muutu, jolloin sisäiset ja ulkoiset kaksiviikkoindeksit pysyvät samoina.

Hajontaa ei ole huomioitu käyrissä, koska lataus tapahtuu vain yöaikaan rajatun seitsemän tunnin ajanjaksolla. Tällöin ei synny merkittävää vaihtelua siinä, milloin tai millä teholla autot kytketään lataukseen. Latausteho oletetaan tässä vakioksi, joten tämäkään ei aiheuta hajontaa. Tilanne tarkoittaa karkeasti siis sitä, että kaikki autot laitetaan kello 23 lataukseen, ja otetaan latauksesta pois kello 6 tai esimerkiksi lataus lopetetaan automaation avulla. Jokaisena yönä ladataan autoa.

Kuvassa 46 on omakoti- ja paritalon yölatauksen indeksisarjat kesälle ja talvelle. Kuvassa 47 vastaavat rivi- ja kerrostalolataukselle. Arki on maanantaista 07.00 lauantaihin 07.00, aatto lauantaista 07.00 sunnuntaihin 07.00 ja pyhä sunnuntaista 07.00 maanantaihin 07.00.



Kuva 46. Omakoti- ja paritalolatauksen indeksisarjat yölataukselle.

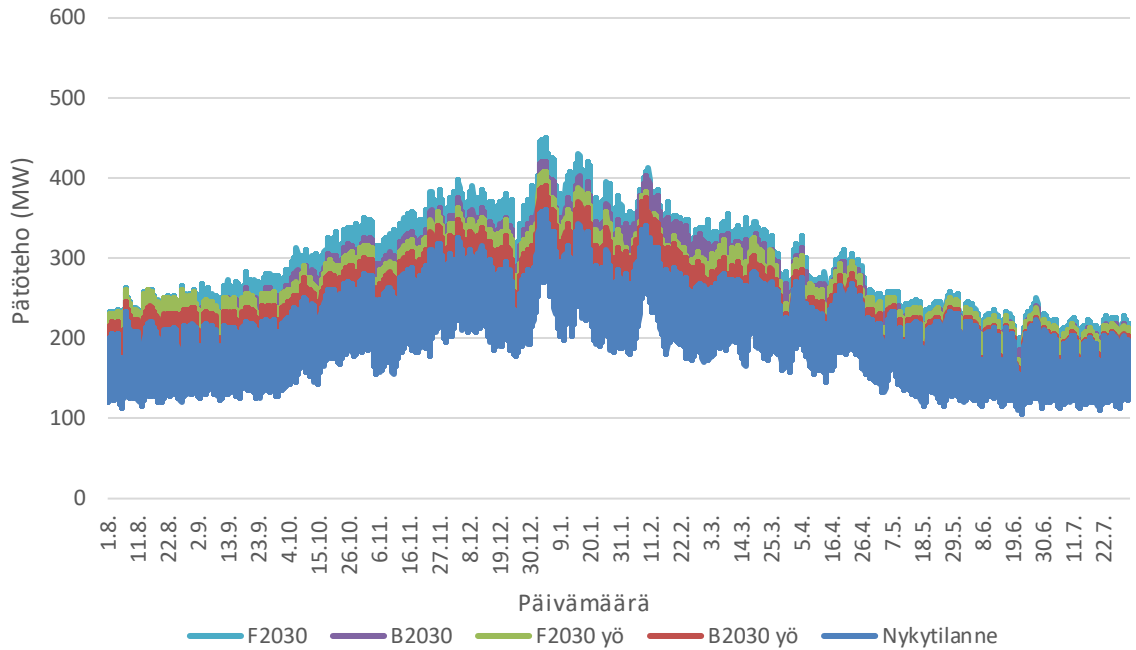


Kuva 47. Kerros- ja rivitalolatauksen indeksisarjat yölataukselle.

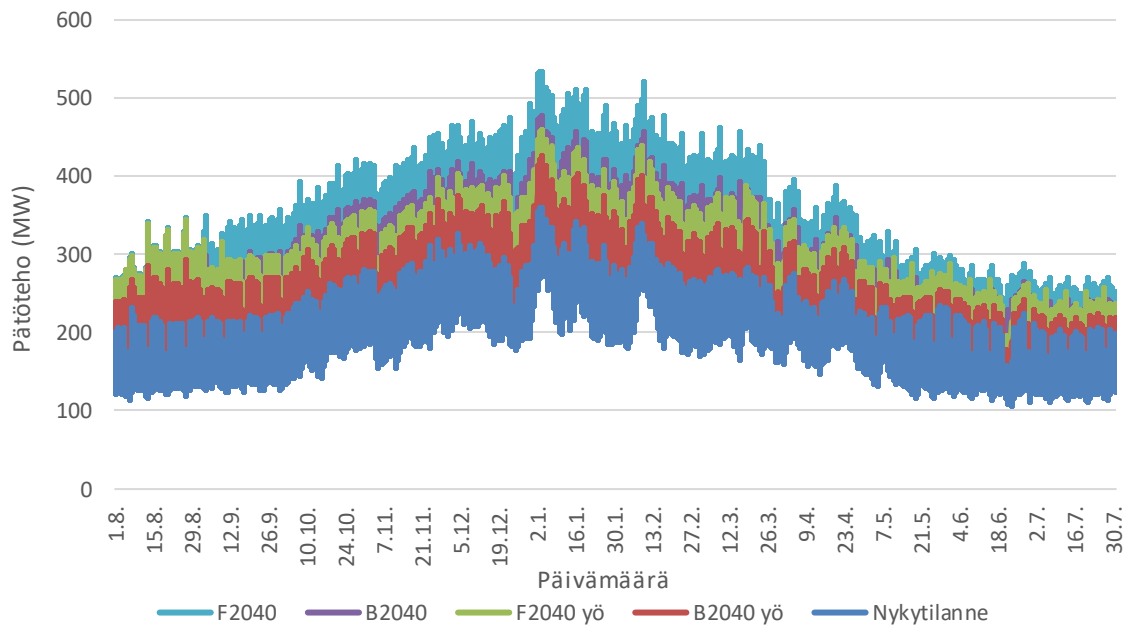
Katkoviivoilla on eroteltu arki-, aatto- ja pyhätyypin indeksisarjat. Yölataus sijoittuu tunneille 23–06. Todellisuudessa latauskäyrät eivät olisi näin tasaisia vaan akut latautuvat suuremmalla teholla alkuun, ja akun ollessa lähes täynnä, latausteho pienenee. Työpaikka ja julkinen lataus säilyy ennallaan luvussa 4.4 esitetyillä latauskäyrillä.

Tarkastellaan ensimmäiseksi koko jakeluverkon kuormitusta ja sen muutosta. Kuvassa 48 on kuvattu koko verkon osalta tehokuvaajat skenaariolla B2030 ja F2030 sekä näiden skenaarioiden vastaavat tehokuvaajat yölatauksen muutoksen jälkeen alkaen elokuusta

ja päättyen heinäkuuhun. Kuvassa 49 vastaavasti on esitetty skenaarioiden B2040 ja F2040 tehokuvaajat ja näiden skenaarioiden vastaavat tehokuvaajat muutoksen jälkeen.



Kuva 48. Koko jakeluverkon tehokuvaaja skenaariossa B2030 ja F2030 ja vastaavat tehokuvaajat yölatauksen muutoksen jälkeen.



Kuva 49. Koko jakeluverkon tehokuvaaja skenaariossa B2040 ja F2040 ja vastaavat tehokuvaajat yölatauksen muutoksen jälkeen.

Kuvista 48 ja 49 nähdään, että tehohiiput jokaisella skenaariolla on laskenut kotilatauksen muutoksen jälkeen. Yön teho ei ylitä siis päiväsaikaan olevaa huipputehoa.

Tehokuvaajien profiili ei muutu merkittävästi, muuten kuin ettei yöaikaan tule suuria tehon alenemisiä käyrään. Esimerkiksi kuvassa 49 elokuu-syyskuu näkyy nykytilanteen käyrässä selkeitä tehon alenemisiä, kun taas skenaarioiden yö-käyrissä niitä ei ole. Kuvista nähdään, että kotilatauksen siirrolla saadaan monen megawatin huipputehon säästöt.

Taulukkoon 12 on koottu tarkemmin skenaarioiden muutokset muutettaessa kotilataus yöllä tapahtuvaksi. Taulukossa esitetään kuinka paljon siirto vaikuttaa tehohiipun arvoon verrattuna aiemman laskennan tehohiippuun sekä kuinka paljon tehohiippu suurenee nykytilanteen huipputehosta.

Taulukko 12. *Koko jakeluverkon tehohiipun (Nykytilanne tehohiippu 359 MW) muutokset kotilatauksen muuttuessa.*

	B2030 yö	F2030 yö	B2040 yö	F2040 yö
Tehohiippu (MW)	390	408	425	459
Nykytilanteesta nousut (MW)	+31	+49	+66	+100
Luvun 6.1 laskennasta pienentynyt (MW)	-31	-42	-51	-75

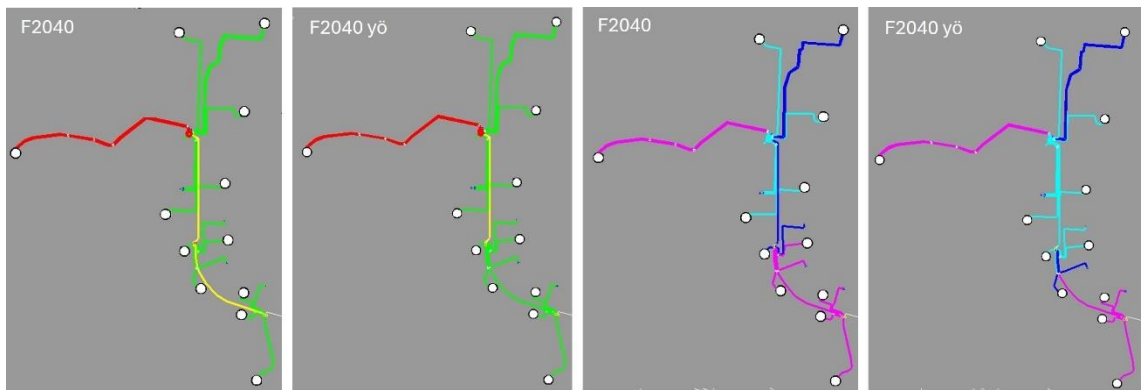
Latauksen siirtämisellä saadaan jo skenaariolla B2030 yhden pienen päämuuntajan verran pienennettyä tarvittavaa huipputehoa. Kaikissa skenaarioissa saadaan verkkoon merkittävästi kapasiteettia verrattuna edelliseen laskentaan. Tämä on merkittävä säästö myös kustannuksiltaan, koska vältytään verkon vahvistuksilta.

Tarkastellaan seuraavaksi luvussa 6.3.4 tarkasteltuja muuntopiirejä 1-5. Suurimman muutokset näissä muuntopiireissä tapahtuvat taajama-alueella ja Teiskon alueella, koska näissä on määrällisesti eniten muuttuneita kotilatauspaikkoja. Esimerkiksi teollisuusalueella ei ole kuin muutama muuttunut kotilatauspaikka.

Tarkastellaan kuinka paljon muuntopiirien tehohiippu pienenee kotilatauksen muutoksen jälkeen. Seuraavissa taulukoissa 13-17 on esitetty muuntopiirien tehohiippu ensimmäisessä laskennassa sekä muutoksen jälkeen, ja kuinka paljon tehohiippu pienenee muutoksessa. Lisäksi on laskettu kuinka paljon tehohiippu kasvaa nykytilanteeseen nähden kotilatauksen muututtua. Tarkastellaan kaikkia 1-5 muuntopiiriä, jotka on esitelty edellä. Jokaisen taulukon jälkeen, kuvissa 50-54, esimerkkinä muuntopiiristä esitellään skenaarion F2040 muutokset kuormitusasteen ja jännitteenaleneman osalta. Nämä ovat esitetty muuntopiirien 1-4 osalta.

Taulukko 13. Muuntopiirin 1 (nykytilanne tehohiippu 381,2 kW) tehohiipun muutokset kotilatauksen muututtua.

	B2030	F2030	B2040	F2040
Ensimmäinen laskenta (kW)	433,2	581,7	647,6	956,2
Kotilatauksen muutos (kW)	417,2	554,0	596,2	879,6
Muutos ensimmäiseen laskentaan (kW)	- 16,0	-27,7	-51,4	-76,6
Muutos nykytilanteesta (kW)	+36,0	+172,8	+215,0	+498,4

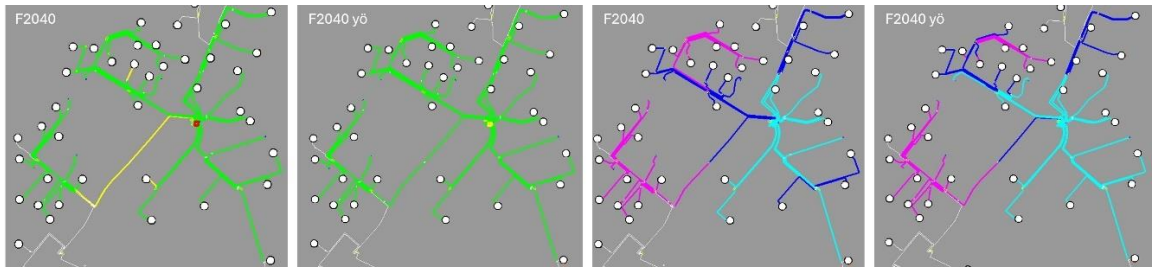


Kuva 50. Muuntopiirin 1 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.

Muuntopiiri 1 sijaitsee taajama-asutusalueella, jossa on myös kauppakeskuskompleksi. Edelleen muuntaja (800 kVA) kuormittuisi skenaariossa F2040. Muuntopiirissä kuormitusaste pienenee alle 50 % muuntamosta kauimmaisen runkojohdon osalta. Kolmen liittymisjohdon osalta jännitteenalenema pienenee alle 5 % raja-arvon.

Taulukko 14. Muuntopiirin 2 (nykytilanne tehohiippu 530,2 kW) tehohiipun muutokset kotilatauksen muututtua.

	B2030	F2030	B2040	F2040
Ensimmäinen laskenta (kW)	625,1	675,6	764,7	844,5
Kotilatauksen muutos (kW)	530,8	555,7	662,3	760,8
Muutos ensimmäiseen laskentaan (kW)	- 94,3	-119,9	-102,4	-83,7
Muutos nykytilanteesta (kW)	+0,6	+25,5	+132,1	+230,6

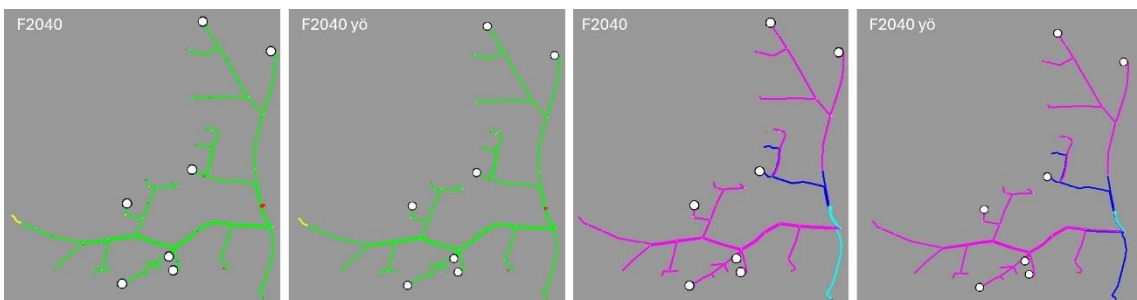


Kuva 51. Muuntopiirin 2 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.

Muuntopiiri 2 sijaitsee taajama-asutusalueella. Aiemmassa tilanteessa skenaariolla F2040 muuntaja (800 kVA) olisi ollut ylikuormassa, mutta muutoksen jälkeen huipputeho on alle muuntajan nimellisen tehoarvon, ja kestää varmasti ennustetun kuormituksen. Kuormitusasteen osalta kaikki johdot ovat alle 50 % muutoksen jälkeen. Jännitteenalenema pienenee lähellä muuntajaa olevien alueiden osalta. Kolmen liittymisjohdon jännitteenalenema pienenee alle raja-arvon.

Taulukko 15. Muuntopiirin 3 (nykytilanne tehohiippu 101,9 kW) tehohiipun muutokset kotilatauksen muututtua.

	B2030	F2030	B2040	F2040
Ensimmäinen laskenta (kW)	104	106,2	118,9	122,5
Kotilatauksen muutos (kW)	102,1	102,1	107,4	109,5
Muutos ensimmäiseen laskentaan (kW)	-1,9	-4,1	-11,5	-13,0
Muutos nykytilanteesta (kW)	+0,2	+0,2	+5,5	+7,6

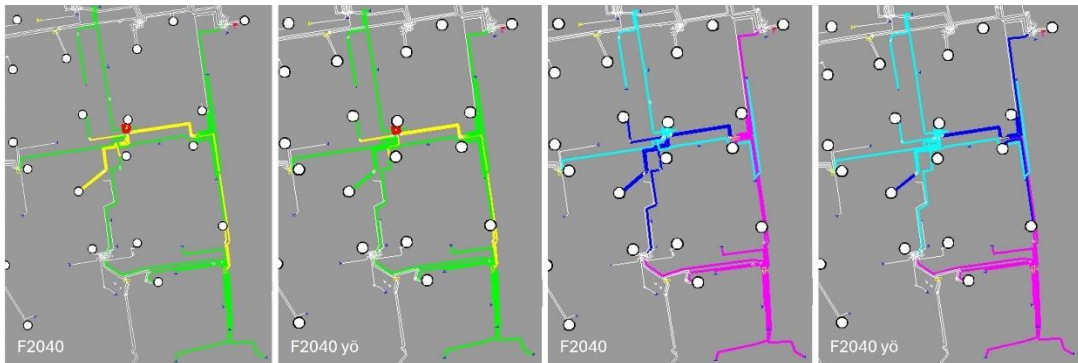


Kuva 52. Muuntopiirin 3 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.

Muuntopiiri 3 sijaitsee Teiskon maaseutumaisella alueella. Kuormitus ei oleellisesti muutu, ja kuormitusasteet ja jännitteenalenemat pysyvät lähes samoina. Kuormitusta saadaan kuitenkin pienennettyä muutoksella hyvin suhteessa pieneen 100 kVA muuntajaan.

Taulukko 16. Muuntopiirin 4 (nykytilanne tehohiippu 665,0 kW) tehohiipun muutokset kotilatauksen muututtua.

	B2030	F2030	B2040	F2040
Ensimmäinen laskenta (kW)	749,1	769,5	809,2	851,1
Kotilatauksen muutos (kW)	696,7	697,4	698,7	720,0
Muutos ensimmäiseen laskentaan (kW)	-52,4	-72,1	-110,5	-131,1
Muutos nykytilanteesta (kW)	+31,7	+32,4	+33,7	+55



Kuva 53. Muuntopiirin 4 kuormitusaste (vasemmalla) ja jännitteenalenema (oikealla) skenaariossa F2040 sekä muutoksen jälkeen.

Muuntopiiri 4 sijaitsee kaupunkialueella. Tehohiippu pienenee merkittävästi. Johtosuudet eivät olleet ensimmäisessä tilanteessa suuressa kuormassa. Jännitteenalenema pienenee alle raja-arvon kahden johtovälin osilta. Muuntopiirissä muuntaja on kuormituksen suhteen rajoittava komponentti, ja on sitä vielä muutoksen jälkeen. Jännitteenalenema on myös merkittävänä rajoittavana tekijänä muuntopiirissä.

Taulukko 17. Muuntopiirin 5 (nykytilanne tehohiippu 371,8 kW) tehohiipun muutokset kotilatauksen muututtua.

	B2030	F2030	B2040	F2040
Ensimmäinen laskenta (kW)	491,0	611,4	759,3	892,3
Kotilatauksen muutos (kW)	490,9	611,4	759,2	892,3
Muutos ensimmäiseen laskentaan (kW)	-0,1	-0,0	-0,1	-0,0
Muutos nykytilanteesta (kW)	+119,1	+239,6	+387,4	+520,5

Muuntopiiri 5 sijaitsee teollisuusalueella. Kuten taulukosta 17 nähdään, muutos kotilatauksen siirrosta ei vaikuta juurikaan huipputehooon, koska muuntopiirissä ei ole

kuin muutama kotilatauksen käyttöpaikka, ja muu lisätty lataus on työpaikkalatausta ja julkista latausta. Kuormitusasteet ja jännitteenalenema johdoissa ei muutu, ja kuva pysyy samanlaisena kuin kuvat 43 ja 44.

Aiemmin tarkasteltu KJ-johtolähtö ei olennaisesti muutu kuormitusasteen tai jännitteenaleneman suhteen. Värytys pysyy samana kuin kuvassa 45 eli johtovälit, jotka olivat ylikuormassa ovat myös muutoksen jälkeen ylikuormassa. Jännitteenalenema ei ole ongelma kummassakaan tapauksessa.

Muuntopiireissä kuormitusaste pienenee etenkin runkojohdoissa ja muuntajilla, koska käyttöpaikkojen kuormituksen pieneneminen summautuu runkojohtojen ja muuntajien kuormitukseen. Muuntajien korvattavuus parantuu kuormitusasteen pientyessä. Muutos myös pienentää liittymisjohtojen jännitteenalenemaa, kun kuormitus pienenee.

Todellinen tilanne voisi olla jotain näiden kahden laskennan väliltä. Latausta olisi verkkoyhtiön hyvä kannustaa ajoittamaan yöaikaan tai muuten pienen pohjatehokuorman aikaan. Keinoja ja muita vaikutuksia latauksen rajoittamisesta ja kontrolloinnista erilaisin keinoin käsitellään seuraavassa luvussa 7.

7. TULOSTEN POHDINTAA

Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin, miten erilaisten älykkään latauksen hallintamenetelmien avulla voidaan välttää latauskuormituksen vaikutuksia jakeluverkkoon. Lisäksi esitellään kaksi Suomen jakeluverkkoon verrattavissa olevaa tutkimusta latauskuormituksesta Euroopasta. Tutkimuksesta saadaan tuloksia sähköautojen integroitumiseen tarvittavaan verkon kapasiteetin lisäämiseen (hosting capacity), ja latauksen joustavuuden hyödyntämiseen. Lisäksi pohditaan työhön liittyviä epävarmuuksia, mallinnuksessa esiin tulleita haasteita ja tulevaisuudessa tarkasteltavia asioita tämän työn pohjalta latauskuormitukseen liittyen.

7.1 Kuormanhallinta ja sähköauton lataus

Ei ole taloudellisesti eikä yhteiskunnallisesti järkevää loputtomasti laajentaa ja vahvistaa verkkoa kapasiteetiltaan suuremmaksi uuden sähkökuorman myötä. Tarvitaan muita keinoja muun muassa sähköautojen kuorman hallitsemiseen. Näihin haasteisiin perehdytään seuraavissa luvuissa älykkään latauksen, vehicle-to-grid (V2G) ja uusiutuvien sähköenergiälähteiden osalta.

Kuormanhallinnalla pyritään pienentämään ja vaikuttamaan huipputehoihin, ja tasaamaan verkon huipputehoja. Tarkastellaan sähköautojen latauksen vaikutuksia jakeluverkon kuormitukseen, latauksen kuormanhallinnan eli älykkäiden latausjärjestelmien avulla. Älykäs lataus on lataustehon hallintaa käytettävissä olevan verkon kapasiteetin, sähköliittymän kapasiteetin tai sähkön hintatason mukaan [3].

7.1.1 Yksisuuntainen älykäs lataus

Älykäs lataus tarkoittaa hallittua, yksisuuntaista latausprosessia, mikä tukee kiinteistöjen kuormanhallintaa ja auttaa alueellisesti jakeluverkon kysyntäjoustossa [4]. Älykäs latausjärjestelmä on ohjattava latausjärjestelmä, joka mahdollistaa sallitun lataustehon säädön ylös- ja alaspäin kesken lataustapahtuman ilman, että lataus keskeytyy [45]. Ohjattavuus on nykypäivänä automaatiolla tapahtuvaa ja etäohjattavaa. Kun älykkäällä latauksella siirretään kulutusta huippukuormituksen tunneilta muille tunneille, jakeluverkkoon jää ylimääräistä kapasiteettia uusille kuormille.

Älykkäät latausratkaisut voivat optimoida latausta niin, että se tapahtuu kustannustehokkaasti sekä sähköverkon kestävyyttä ja toimitusvarmuutta tukien. Näillä

ratkaisuilla latausta voidaan ajoittaa, rajoittaa ja hallita taustakuorma huomioiden. Tarvittaessa tehoa voidaan jakaa usean latauspisteen välillä liittymän ylikuormittumisen ehkäisemiseksi [11]. Tämä on erityisen hyödyllinen ominaisuus yhteisissä pysäköintipaikoissa, esimerkiksi rivitalo- ja kerrostalo-yhtiöissä tai julkisella latausasemalla. Nykypäivän huippukuormat ovat jakeluverkossa ihmisten palatessa töistä kotiin noin kello 17–20 välillä, ja tätä suurentaa edelleen sähköauton lataus.

Jakeluverkkoyhtiöiden yhtenä tavoitteena on vähentää kuormitusta suuren kysynnän aikana ja varmistaa verkon kestävyys jokaisessa kuormitustilanteessa. Yhtiö voi tukea älykkään latauksen käyttämistä, ja pienentää kuormitushuippuja mm. perimällä suuresta tehosta maksua tai tarjoamalla taloudellisia kannustimia, jotka ohjaavat siirtämään kuormitusta alemman kuormituksen ajankohtiin. Tämä hyödyttää sekä asiakasta että jakeluverkkoyhtiötä.

Jakeluverkkoyhtiöt voivat tarjota rahallisia kannustimia kulutuksen siirrosta tai vähentämisestä, mikä sähköautojen latauksen kohdalla voidaan toteuttaa tehokkaasti älykkäillä latausratkaisuilla. Kuormitushuippujen pienentäminen latauksen optimoinnilla onnistuu esimerkiksi hyödyntämällä edullisimpia pörssisähkön tunteja, pienentämällä lataustehoa silloin, kun verkon kuormitus on korkea tai aurinkopaneelien omatuoton mukaan. [46]

Jakeluverkkoyhtiön siirtohinnoittelun tehotariffin ohjausvaikutuksena on hillitä suurien tehojen ottamista jakeluverkosta. Tehotariffin avulla asiakkaan kustannukset määräytyvät käytetyn huipputehon mukaan määritellyllä ajanjaksolla. Se voi olla käytössä esimerkiksi suurilla pienjänniteliittymillä ja keskijänniteliittymillä. [47, 48]

Tutkimus ”*Optimised controlled charging of electric vehicles under peak power-based electricity pricing*” mallintaa tehotariffin vaikutusta jakeluverkon kuormitukseen älykkään latausalgoritmin avulla Suomen jakeluverkossa. Tulokseksi älykkäällä latausalgoritmilla saadaan kiinteistön huipputehoa rajoitettua 2,5 kW verrattuna kontrolloimattomaan lataukseen. [48] Jos esimerkiksi muuntopiirissä olisi 20 kappaletta sähköautoja, jotka rajoittavat latauksen tehoa 2,5 kW verran, kuormitus pienentyisi 50 kW. Tämä on esimerkiksi 500 kW muuntajan kapasiteetista 10 %. Tämän diplomityön tuloksissa jakelumuuntaja oli suuressa osin muuntopiirin yksi rajoittava komponentti. Kun keskijännitelähdöllä muuntopiirejä olisi esimerkiksi 10 kappaletta, kuormitus pienenesi 500 kW. Tämä toisi jo yhden jakelumuuntajan verran lisää tehokapasiteettia. Jos kaikki Tampereen alueen tämänhetkiset täyssähköautot joustaisivat 2,5 kW saataisiin tehokapasiteettia $2,5 \text{ kW} \cdot 4566 = 11,4 \text{ MW}$.

Älykäs lataus voi sisältää energiavarastointia halpojen tuntien aikana, jolloin varastoitua energiaa voi hyödyntää kalliimpina sähkön tunteina pienentäen jakeluverkon kuormitusta. Aurinkopaneelien tuottama energia voidaan ladata suoraan ajoneuvon akkuun, ja kaksisuuntaisen latauksen (V2G, vehicle-to-grid, V2H vehicle-to-home) ansiosta sähköä voidaan syöttää takaisin jakeluverkkoon tai omaan käyttöön suuren kysynnän aikana.

Kuormanhallinta edistääkin sääriippuvaisten uusiutuvien energialähteiden integroimista verkkoon ja mahdollistaa verkon vahvistusinvestointien lykkäämistä. Lisäksi kuormitushuippujen pienentäminen vähentää energiantuotannon päästöjä, koska se tukee uusiutuvan energian tehokkaampaa käyttöä ja vähäpäästöisen varastoidun energian hyödyntämistä. [49]

Electric Nation -projektissa selvitettiin sähköautojen joustomahdollisuuksia verkon kapasiteettiongelmien ratkaisemiseksi. Iso-Britanniassa tehdyn tutkimuksen mukaan latauskäyttäytymisen huipputeho osuu samaan aikaan suurimman pohjakuorman kanssa noin kello 17–20, mikä vastaa myös Suomen tilannetta. *Electric Nation* -tutkimuksessa käyttäjät saivat käyttöönsä sovelluksen, jolla he pystyivät säätämään latausta huomioiden lähtöajan, akun varaustason, sähkön hinnan ja verkon kuormituksen. Näin latausnopeutta voitiin rajoittaa tai lataus keskeyttää kuormitushuippujen tasaamiseksi. Tämä ei vaikuttanut asiakkaiden tyytymättömyyteen, ja rajoittamisella saatiin tehohuippuja alhaisemmiksi jakeluverkossa. [50]

Uudet energiakuormat, joilla on joustopotentiaalia, mahdollistavat liittymisen tulevaisuuden sähkömarkkinamekanismeihin, joissa esimerkiksi hajautettuja kuormia voidaan koota yhdeksi suureksi kulutusjouston kokonaisuudeksi [3]. Kehitteillä on myös jakeluverkon joustomarkkinapaikka, jota tulevat pilotoimaan Suomessa yhteistyössä Fingrid ja Helen Sähköverkko. [51]

7.1.2 Kaksisuuntainen lataus, Vehicle-to-grid V2G ja vehicle-to-home V2H

Kaksisuuntainen latausjärjestelmä voi toimia joko sähköverkon kanssa rinnan kuten tavalliset aurinkosähköjärjestelmät, kiinteistön varavoimana tai tarvittaessa molempina [52]. Kaksisuuntainen latausjärjestelmä onkin etenkin kotilataukseen integroitava ominaisuus, mikä voi hyödyttää kiinteistön kuormaa sekä verkon kulutusta alueellisesti. Ajoneuvot ovat monia tunteja pysäköitynä eli kapasiteettipotentialiaali on suuri.

Sähköauton akun toimiminen varastona ja varaston purkaminen kaksisuuntaisen latauksen avulla tasoittaa kokonaissähkökulutusta. Esimerkiksi yöllä ladattua energiaa

voidaan siirtää verkkoon akusta kulutuksen huipputunneilla. V2G:n ja V2H:n hyödyntämisen kriteerinä sähköauto tulee olla liitettynä sähköverkkoon sähköautolle tarkoitetun latauspisteen kautta, missä on mahdollisuus kaksisuuntaiseen tehon syöttöön. Myös ajoneuvossa tarvitsee olla tekniikka energian syöttöön akusta pois päin, mikä ei kuitenkaan ole vielä kovinkaan monessa automallissa.

Sähkön syöttäminen takaisin verkkoon suuren kuormituksen ajankohtana alentaa jännitteenalenemaa pistemäisesti. Älykkäät latausjärjestelmät voivat auttaa jännitteenaleneman haasteissa, kun ei kuormiteta verkkoa niin suurella kuormituksella tai syötetä verkkoon sähkötehoa lähellä kulutusta.

Tehohuippujen leikkaamisen ja verkon jännitteen stabiloinnin lisäksi muita hyötyjä kaksisuuntaisesta latauksesta ovat tehohäviöiden pieneneminen sekä taajuuden kontrollointi. [53] Tehohäviöt pienenevät, koska sähköenergiaa ei tarvitse siirtää kaukaa tuotantolaitoksilta, ja taajuuden kontrollointi liittyy kulutushuippujen leikkaamiseen, ja näin tuotannon riittävyyteen.

Tutkimuksessa ”*Scheduling optimization analysis of electric vehicle and building roof photovoltaic system based on V2G technology*” esitellään sähköajoneuvojen ja aurinkosähköjärjestelmien yhteiskäytön hallintajärjestelmä, joka huomioi V2G-tekniikan, vuorokausihinnoittelun, rakennusalueen sähköverkon kuormituksen sekä sähköajoneuvojen varaustilan. Optimoitu aikataulutus vähentää rakennusalueen operointikustannuksia ja parantaa alueen taloudellista tehokkuutta. [54]

7.1.3 Pientuotannon ja akkujen hyödyntäminen latauksessa

Pientuotanto, kuten aurinkopaneelit talon katolla, tuottaa asiakkaalle sähköenergiaa. Jos sähköauto ladataan asiakkaan tuottamalla omalla energialla, lataus ei kuormita jakeluverkkoa. Pientuotannon tuottamaa sähköenergiaa voidaan varastoida akkuihin ja käyttää myöhemmin esimerkiksi sähköauton lataukseen tai kodin kulutuksessa.

Sähköauton lataaminen itsetuottamalla energialla on sekä asiakkaalle että jakeluverkkoyhtiölle kustannustehokasta. Asiakkaan ei tarvitse maksaa siirrosta ja jakeluverkon ei tarvitse vahvistaa verkkoa. Näin ollen myös verkon kuormitukset eivät lisäänty. Esimerkiksi Australiassa on tutkittu näiden yhteistoimintaa, ja tämän vaikutuksena jännitteenvaihtelut ovat vähentyneet, kun ei tarvitse siirtää suurta tehoa. [55] Toisaalta tutkimuksessa todettiin, että aurinkovoimalla ei ole kovinkaan paljon hyötyä vapaassa kapasiteetissa sähköautojen yleistymiselle, koska aurinkoenergiaa saadaan eri aikoihin kuin autoa halutaan ladata [55]. Tähän rinnalle olisi hyvä liittää akku, jota

ladattaisiin aurinkoenergiaa tuottaessa, ja purettaisiin energia akusta sähköautoon. Suomessakin asiakkaille on tullut markkinoille monia pilotteja tällaisista yhdistelmistä. Niissä yritys maksaa asiakkaille siirtomaksut, ja asiakas hankkii aurinkopaneelit ja akun toimittajalta esimerkiksi kuukausihintaan. [56]

V2G-teknologia ei ainoastaan tue sähköverkon vakautta, vaan tuo myös taloudellista hyötyä sähköajoneuvojen omistajille, ja auttaa vähentämään päästöjä uusiutuvia energialähteiden käyttöä tehostaen. V2G ja V2H, uusiutuvat energialähteet sekä akku yhdessä järjestelmänä tuovat mahdollisuuksia kuluttajille, jakelu- ja siirtoverkoille ja energiantuotannolle.

7.1.4 Latauksen vaikutukset Iso-Britanniassa

Iso-Britanniassa on tehty vuosina 2013–2015 yksi suurimmista tutkimuksista, joka analysoi sähköautojen haasteita ja hyötyjä, kun käytetään 3,6 kW kotilatausta sähköautojen lataamiseen. Tutkimus on tehty jakeluverkon näkökulmasta, mikä vastaa Suomen jakeluverkon rakennetta. Tässä MEA-projektissa tutkittiin yli 200 Nissan LEAF sähköautoa, joissa on kooltaan 24 kWh akku. MEA on vuonna 2018 ensimmäinen julkaistu projekti, joka keskittyi paikallisen sähköverkon hallintaan, kun suuri määrä sähköautoja latautuu samalla kadulla samaan aikaan. Projektissa tutkittiin tarkemmin latauskäyttäytymistä, sähköautojen vaikutusta pienjännitejakeluverkkoon eri sähköautojen lisääntymistasoilla. Tulokset ja mitatut tiedot ovat tuotettu geneerisillä menetelmillä niin, että ovat integroitavissa muihin samanlaisiin maihin ja jakeluverkkoihin. [57]

Toisessa Electric Nation -projektissa tutkittiin vuosina 2017–2018 latauksen kontrolloinnin mahdollisuutta latauspisteessä suurentaakseen jakeluverkon vapaata kapasiteettia (hosting capacity) [50]. Tämä kapasiteetti kuvaa sitä, kuinka paljon lisäkuormaa, tässä tilanteessa sähköajoneuvoa, verkko pystyy tukemaan turvallisesti ja luotettavasti ilman, että verkon suorituskyky heikkenee tai sähköjakelu keskeytyy. Käytännössä siis kapasiteetti määrittää sähköverkon kyvyn kestää kasvavaa latauskuormaa niin, että jännite- ja virtarajat pysyvät sallituissa rajoissa ja ylikuormitusta ei synny. [58]

Ensimmäinen projekti tehtiin niin teknisen kuin sosiaalisen näkökulman kautta, ja tuloksia on molemmilta kanteilta. Sähköautojen 40 % lisääntymisessä monissa pienjänniteverkon osissa muuntaja ylikuormittui. Monissa pitkissä johdoissa tapahtui jännitteenalenemistä yli raja-arvojen, mutta vasta suuremmalla kuin 40 % sähköautojen määrän lisääntymisellä. Eli jakelumuuntajat olivat monesti pullonkaulana verkossa. Näitä

tutkittiin jännitteen sekä virran aiheuttaman lämpenemisen kautta. Projektissa rajoitettiin latauskuormitusta katkaisemalla lataus etäyhteyden avulla, jos tekniset rajoitukset verkolla tulivat vastaan. Sähköautojen latauksen katkaisu ei lisännyt osallistujien tyytymättömyyttä. Katkaisuilla saatiin verkon vapaa kapasiteetti 40 %:sta 100%:iin. [57]

Jälkimmäisessä projektissa tutkittiin erilaisten latauksen kontrolloinnin vaikutuksia lataukseen. Käyttäjille annettiin sovellus latauksensa optimointiin. Tutkimuksessa havaittiin, että sähköautojen latauksen hallinnassa on potentiaalia. Tutkimus osoitti myös, että asiakkaat ovat halukkaita käyttämään älykkään latauksen ominaisuuksia, jos tästä on heille kustannushyötyä. Kummassakaan projektissa käyttäjille ei aiheutunut merkittävää tyytymättömyyttä latauksen siirtämisestä tai katkaisemisesta [50, 57].

7.2 Mallinnuksessa havaitut ongelmat ja haasteet

Tämän työn mallinnuksessa on tehty jonkin verran yksinkertaistuksia ja oletuksia, mitkä vaikuttavat tuloksiin. Tämän tutkimuksen puitteissa on tarvinnut tehdä näitä yksinkertaistuksia.

Epävarmuutta tuloksiin tekee se, että sähköautojen määrät ovat ennustettu tämänhetkisen parhaan tiedon mukaan. Ennusteet voivat muuttua monesti vielä vuoteen 2030 ja etenkin 2040 mennessä.

Latauksen kuormituskäyrät lisäävät latauskuormaa jokaiselle viikonpäivälle. Käytännössä esimerkiksi täyssähköautoja ei ladata joka päivä, sillä nykypäivänä niiden akut ovat suuria ja toimintamatkat pitkiä.

Yhden autoilijan latauskäyttäytyminen on melko vaikea ennalta määrittää eikä välttämättä mukaile keskimääräisiä kuormituskäyriä. Suurelle joukolle kuormituskäyrät summautuvat, ja joukon latauskäyttäytyminen näyttää kuitenkin keskimääräiseltä latauskäyttäytymiseltä. Näin ollen esimerkiksi koko verkon osalta ja muuntopiirin tasolla saadaan jo melko luotettavia tuloksia, kun tarkastellaan tarpeeksi etäältä yksittäisiä kulutuspeitteitä. Yksittäisen syöttökaapelin kuormituksesta tai jännitteenalenemasta ei voi kuitenkaan sanoa mitään varmaa. Tämän tutkimuksen mallinnuksella saadaan keskimääräisiä tuloksia koko verkon tasolla. Tuloksista nähdään, mitkä ovat mahdollisia kriittisiä kohteita, ja mitkä verkon osat mahdollisesti tarvitsevat verkon vahvistamista.

Epävarmuutta aiheuttaa myös samojen kuormituskäyrien käyttäminen esimerkiksi kaupunki-, taajama- ja maaseutualueella. Eri alueiden ihmisten ajo- ja latauskäyttäytyminen on erilaista. Näissä eroa on otettu huomioon vuosienergian suuruudella sekä kuormituskäyrien hajonnoilla.

Algoritmilla yhdelle käyttöpaikalle lisättiin vain yksi tietyn tyyppinen ja -tehoinen latauskäyttöpaikka. Yhdellä liittymällä voi olla kuitenkin useampi käyttöpaikka, esimerkiksi rivitaloliittymällä on jokaisella asunnolla oma käyttöpaikkansa. Tämä mahdollistaa liittymälle useamman latauskäyttöpaikan lisäämisen algoritmin avulla. Muissa kuin asuntoja sisältävissä liittymissä, esimerkiksi liikkeissä tai kaupoissa on normaalisti vain yksi käyttöpaikka. Tällöin algoritmin on mahdollista lisätä vain yksi latauskäyttöpaikka liittymälle.

Algoritmi käyttöpaikkojen lisäämiselle tehtiin niin, että kun haluttiin lisätä esimerkiksi joka neljännelle käyttöpaikalle uusi latauskäyttöpaikka (taulukon 8 ja 9 mukaisesti), käyttöpaikan numerolle laskettiin jakojäännös, ja tämän ollessa arvoltaan nolla, käyttöpaikalle lisättiin latausta. Tämä ei täysin vastaa sitä tilannetta, että joka neljännelle käyttöpaikalle lisättäisiin latauskäyttöpaikka, koska käyttöpaikkojen numerointi ei ole täysin jatkuva. Latauskäyttöpaikkojen lisääminen ei näin ollen ole tehty satunnaisesti vaan tehtäessä mallinnus uudestaan samoilla parametreilla tulokset ovat samat kuin nyt. Uusia käyttöpaikkoja tulee koko ajan useita lisää, joten siten tulokset kuitenkin muuttuisivat.

Työssä ollaan tutkittu verkkotietojärjestelmän tehonjakolaskennan tuloksia. Tulokset kertovat suurimman kuormitusasteen tai jännitteenaleneman arvon. Tehonjakolaskennan tuloksilla ei voida siis tietää onko tilanne jatkuvaa vai onko esimerkiksi teollisuusalueella käynnistetty suurta virtaa ottava kone, joka saa jännitteenaleneman ja kuormitusasteen kasvamaan hetkellisesti todella suureksi. Pehdyttäessä tarkemmin tiettyyn verkon kohteeseen, voitaisiin tarkastella kuorman ajallista vaihtelua tarkemmin verkkotietojärjestelmällä. Tämän diplomityön laajuudessa se ei ole kuitenkaan ollut mahdollista. Poikkeuksena ovat esitetyt tehokuvaajat verkon ja muuntopiirien osalta.

Muun energiankulutuksen kasvua ei otettu huomioon, mikä voi vääristää tulevaisuuden tilannetta kaiken kuormituksen osalta. Siksi myöskään yksittäisen liittymän tai pienjännitejohdon osalta ei voida sanoa varmaksi mitään, koska käyttöpaikan kulutus voi muuttua tulevaisuudessa muunkin energiankulutuksen muutoksien takia.

7.3 Tulevaisuudessa pohdittavia asioita sähköautoihin liittyen

Jotkin jakeluverkkoyhtiöt ovat jo antaneet asiakkaille säätömahdollisuuksia esimerkiksi sähköauton lataukseen. Esimerkiksi sähköverkkoyhtiöillä on tarjolla palveluja niin, että asiakkaat pystyvät helposti säätämään kulutustaan sähkömittareiden releiden avulla [59].

Uusien energiamittareiden myötä säätömahdollisuudet paranevat. Tampereen Energia Sähköverkolla on käynnissä koko jakeluverkon kattava mittareiden vaihto -projekti. Vuoteen 2028 mennessä jokaisella asiakkaalla tulee olemaan uuden sukupolven energiamittari, tiettyjä poikkeuksia lukuun ottamatta. Näiden energiamittareiden avulla pystytään tarjoamaan paremmin joustomahdollisuuksia. Esimerkiksi releiden avulla asiakkaan olisi helppo kytkeä kuormia pois ja takaisin päälle.

Tulevaisuudessa olisi hyödyllistä tarkastella, voitaisiinko asiakkaille suunnattujen kannusteiden avulla siirtää kuormitusta eri ajankohtiin. Tämä voisi parantaa sähköverkon kuormitustilanteita ja samalla lisätä asiakastyytyvääsyyttä. Kannustimien ja optimointijärjestelmien avulla liittymien ylirajoittamista voitaisiin vähentää. Esimerkiksi järjestelmällä, joka siirtäisi suuren pohjakuormituksen ajalta sähköauton latauksen pois toisille tunneille, asiakas voisi rajoittaa käyttämänsä liittymän tehoa.

Pohdittavana on, miten kohdistetaan investoinnit ja saneeraukset oikein, ajallisesti ja paikallisesti. Aiempien tulosten pohjalta on hyvä pohtia tulevaisuuden investointikohteita. Esimerkiksi uusi sähköasema lisäisi verkon muuntotehoa ja toimitusvarmuutta. Uudet keskijännitejohtolähdöt sähköasemilta lisäisivät verkon kapasiteetin riittävyyttä eri alueilla ja lisäisi toimitusvarmuutta sekä korvattavuutta viereisiltä sähköasemilta. Pienjänniteverkossa yksi keskeinen pohdittava asia on jakelumuuntajien koon riittävyys. Tarvitseeko tulevaisuudessa suurempia muuntajia verkkoon verrattuna nykyisiin kokoihin.

Jatkotutkimuksena täytyisi tutkia, miten sähköauton latauskuorma vaikuttaa esimerkiksi muuntajan lämpötiloihin. Yliaaltoja syntyy latauksen kuormituksessa eri lailla kuin perinteisessä kuormituksessa. Nyt on jo huomattu, että jotkin muuntajat ovat alkaneet lämpenemään enemmän ja erilailla kuin ennen.

8. YHTEENVETO

Tulevaisuudessa sähköverkot ja liikenne tulevat olemaan yhteydessä toisiinsa entistä enemmän. Sähköautot ja niiden latausinfrastruktuuri ovat keskeisiä tekijöitä näiden yhdistämisessä. Sähköautot ovat osa tulevaisuuden ja nykypäivän älykästä sähköverkkoa, mitä voidaan hyödyntää joustomarkkinoilla, luoden vapaata kapasiteettia nykyisen kulutuksen huipputunteina.

Sähköautokanta suurenee vuosi vuodelta koko ajan enemmän. Joinakin vuosina kasvu on ollut jopa yli 100 %. Samalla myös latausinfrastruktuuri kasvaa sekä julkisen että työpaikka- ja kotilatauksen osalta. Sähköautokannan määrän kasvuun vaikuttaa muun muassa sähköautojen tukitoimet, ihmisten kiinnostus sähköautoja kohtaan sekä globaalit asiat kuten ilmastonmuutoksen kiihtyminen ja teknologioiden kehittyminen. Viime vuosina negatiivisena vaikutuksena sähköautoon vaihtamiseen on ollut sähköenergian kohonnut hinta. Työn nopeassa skenaariossa oletuksena on, että tukitoimet vaikuttavat enemmän, ja sähköautot ovat siten halutumpia kuin perusskenaariossa.

Sähköauton kuormituksen vaikutusta tutkittiin kuormitusasteen ja jännitteenaleneman osalta. Keskijänniteverkolla suurempi ongelma on kuormitusaste, koska pienjänniteverkon kuormat summautuvat keskijänniteverkkoon, jolloin kapasiteetti päämuuntajilla ja etenkin kj-johtolähdöillä saattaa ylittyä. Näihin ratkaisuna on muun muassa uuden sähköaseman rakentaminen, päämuuntajan suurentaminen tai rinnakkaisen päämuuntajan lisääminen sähköasemalle sekä kj-johtolähtöjen rakentaminen eri alueille tasaten muiden lähtöjen kuormitusta. Näillä saadaan myös verkon korvattavuutta paremmaksi esimerkiksi vikatilanteissa. Korvattavuus etenkin keskijänniteverkolla on tärkeä asia, koska keskijänniteverkossa komponentin vikaantuminen aiheuttaa suuren sähköttömien asiakkaiden määrän, ja siten suuret kustannukset. Korvattavuustarkasteluita täytyy tehdä kohde- ja tilannekohtaisesti.

Pienjänniteverkossa jakelumuuntajilla havaittiin ylikuormitusta sekä jännitteenaleneman raja-arvon ylittymistä. Pienjännitejohtoilla oli yleisesti enemmän jännitteenaleneman haasteita, koska mitä kauempana solmupiste on muuntajasta, sitä suuremmaksi jännitteenalenema suurenee. Etenkin Teiskon alueen pitkien johtoyhteyksien päässä olevat asiakkaat kärsivät herkästi jännitteenalenemasta. Pienjänniteverkon kuormituksen vaikutuksia voidaan pienentää runkoverkkojen vahvistamisella kuten rakentamalla rinnakkaisia johtoja ja johtojen poikkipinta-aloja suurentamalla sekä muuntajakokoja suurentamalla.

Liittymien ylimitoittaminen on yleinen ongelma nykypäivänä jakeluverkkoyhtiöissä. Liittymien koissa varaudutaan nykypäivänä monesti uusiin kuormiin esimerkiksi sähköautoihin tai maalämpöön. Ylimitoittamista voitaisiin välttää tarjoamalla kuormanhallintaratkaisuja asiakkaille, jotka voisivat esimerkiksi kännykkäsovelluksella automatisoidusti säätää muun muassa lämmitystä tai sähköauton latausta pörssisähkön hinnan tai kiinteistön omatuotannon mukaan. Tämä voi myös lisätä liittymän kuormitusta, jos monet kuormat synkronoituvat samoille halvoille tunneille.

Kotilatauksen muokkaaminen tapahtuvaksi pelkästään yöaikaan välillä 23-06 muutti vuoden tehokuvaajaa eri skenaarioilla seuraavasti: Nykytilanne 359 MW, B2030 421 ->390 MW, F2030 450 -> 408 MW, B2040 476 -> 425 MW, F2040 534 -> 459 MW. Muuntopiiritasolla taajama- ja kaupunkialueilla sekä Teiskossa tapahtui suurin muutos, sillä näissä muuntopiireissä suurin osa lisäystä latauksesta on kotilatausta. Tarkasteltava muutos vähensi erityisesti talvikuukausien huipputehon kasvua, jolloin jakeluverkon kapasiteetti on muutenkin tiukimmillaan. Yölataus tuo jakeluverkkoon joustavuutta, ja edistää resurssien tehokasta käyttöä.

Teholtaan isommat kohteet verkon eri osissa täytyy tarkastella tapauskohtaisesti. Monesti tällöin tarvitsee tehdä suuria investointeja tarvitsevia verkon vahvistuksia. Kuormituksen rajoittamisesta ja asiakkaiden osallistamisesta kulutuksensa joustamiseen on tutkitusti saatu todellisia hyötyjä. Myös koko ajan lisääntyvä akkukanta jakeluverkossa antaa joustomahdollisuuksia verkon kuormituksen nousua vastaan. Pienjänniteverkossa ei voida sanoa kovinkaan varmaksi tulevaisuuden kuormituksesta, koska tuloksissa on niin paljon epävarmuutta yhden liittymän kuormituksen kasvun osalta. Alueellisesti ja muuntopiiritasolla voidaan tuloksia tarkastella jo niin, että ne ovat suuntaa-antavia, mutta merkittäviä investointipäätöksiä ei näiden perusteella voi tehdä.

Älykkäät latausjärjestelmät, kuten V2G, voi tuottaa merkittäviä hyötyjä niin taloudellisesta, teknisestä kuin ympäristönäkökulmasta. Järjestelmillä saadaan tehohippuja pienennettyä alueellisesti, kun pienennetään kulutusta tai kun syötetään sähköauton akusta sähköenergiaa verkkoon päin. Jotkin jakeluverkon investoinnit pystytään välttämään näillä keinoilla. Tulevaisuudessa älykkäillä latausjärjestelmillä tulee olemaan suuri merkitys kuormituksen optimoinnin kannalta, mikä voi vähentää myös liittymien ylimitoittamista.

Tulevaisuudessa on hyvä olla tietoinen ja pohtia muun muassa suurempien jakelumuuntajien hankintaa, asiakkaiden joustotoimien mahdollistamista ja latausjärjestelmien muodostamien yliaaltojen vaikutuksia verkkoon kuten esimerkiksi jakelumuuntajiin.

LÄHTEET

1. Eurooppa-neuvosto, Ilmastonmuutos: mitä EU tekee?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.11.2024): <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/>
2. A. Santiago, L. A. Tayo, J. Giron, M. A. Domingo and L. Tria, "Evaluation of Cell Balancing Methods for High Capacity Electric Vehicle Lithium-ion Battery Packs," *2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, China, 2024, pp. 664-668, doi: 10.1109/ITECAsia-Pacific63159.2024.10738638. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&number=10738638&isnumber=10738524>
3. Sähköautot ja latausjärjestelmät, Sähkötieto ry, ST-käsikirja 41, 6. uudistettu painos, 2022, 150 s.
4. M. Pihlatie, M. Paakkinen, J. Laurikko, M. Laurikkala, P. Ylén, V. Peltola, P. Pyly, Sähkö- ja kaasuautojen kustannustehokkaat edistämiskeinot - GASELLI loppuraportti, Helmikuu 2019, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 3/2019, 72 s. + liite 2 s. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161364/3-2019-GASELLI_loppuraportti_.pdf;jsessionid=F833C96CA755AAFC2912ACF1B2A1FF9C?sequence=1
5. Motiva, Täyssähköauto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/autotyypit/tays-sahkoauto
6. Autoalan tiedotuskeskus, Autoalan käyttövoimatiekartta 2021- Autokannan käyttövoimaennusteet, Helsinki 2021, 38 s. Saatavissa: https://www.aut.fi/files/2356/Kayttovoimatiekartta_raportti_1502_2021.pdf
7. Sähköajoneuvojen latauspisteet kiinteistöissä, Rakennustieto Oy, RT 103404, 2022, 17 s.
8. Autoalan tiedotuskeskus, Ladattavien autojen käyttäjätutkimus-selvitys ladattavien hybridien ja täyssähköautojen käyttötavoista, Helsinki 2020, 43 s. + liite I-II s 22. Saatavissa: https://www.aut.fi/files/2116/Ladattavien_autojen_tutkimusraportti_liitteinen.pdf
9. Sähköajoneuvojen lataussuositus, Sähköteknisen alan kansallinen standardointijärjestö SESKO ry, Helsinki, 6. painos 2023, 8 s.
10. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta, Suomen standardisoimisliitto, SFS 6000-4-41, Helsinki, 2022, s.33.
11. Sähköinen liikenne ry, Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q3/2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://teknologiateollisuus.fi/emobility/sites/emobility/files/in-line-files/2022%20Q3%20S%C3%A4hk%C3%B6inen%20liikenne%20tilannekatsaus%202022%2010%2028%20jaettava.pdf>
12. D. Mehar, R. K. Singh and A. K. Gupta, "Wireless Power Charging System for Electric Vehicles through Inductive Coupling Method," *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/RESEM57584.2023.10236012. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&number=10236012&isnumber=10235986>
13. A. Wendt *et al.*, Wireless Electric Road Systems – Technology Readiness and Recent Developments, 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE), Japan, 2024, pp. 177-182, doi: 10.1109/WPTCE59894.2024.10557264. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&number=10557264&isnumber=10557256>
14. Sähköinen liikenne ry, Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q3/2024, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://teknologiateollisuus.fi/emobility/sites/emobility/files/2024-10/2024%20Q3%20S%C3%A4hk%C3%B6inenLiikenne%20tilannekatsaus%202024%2010%2028%20jaettava.pdf>

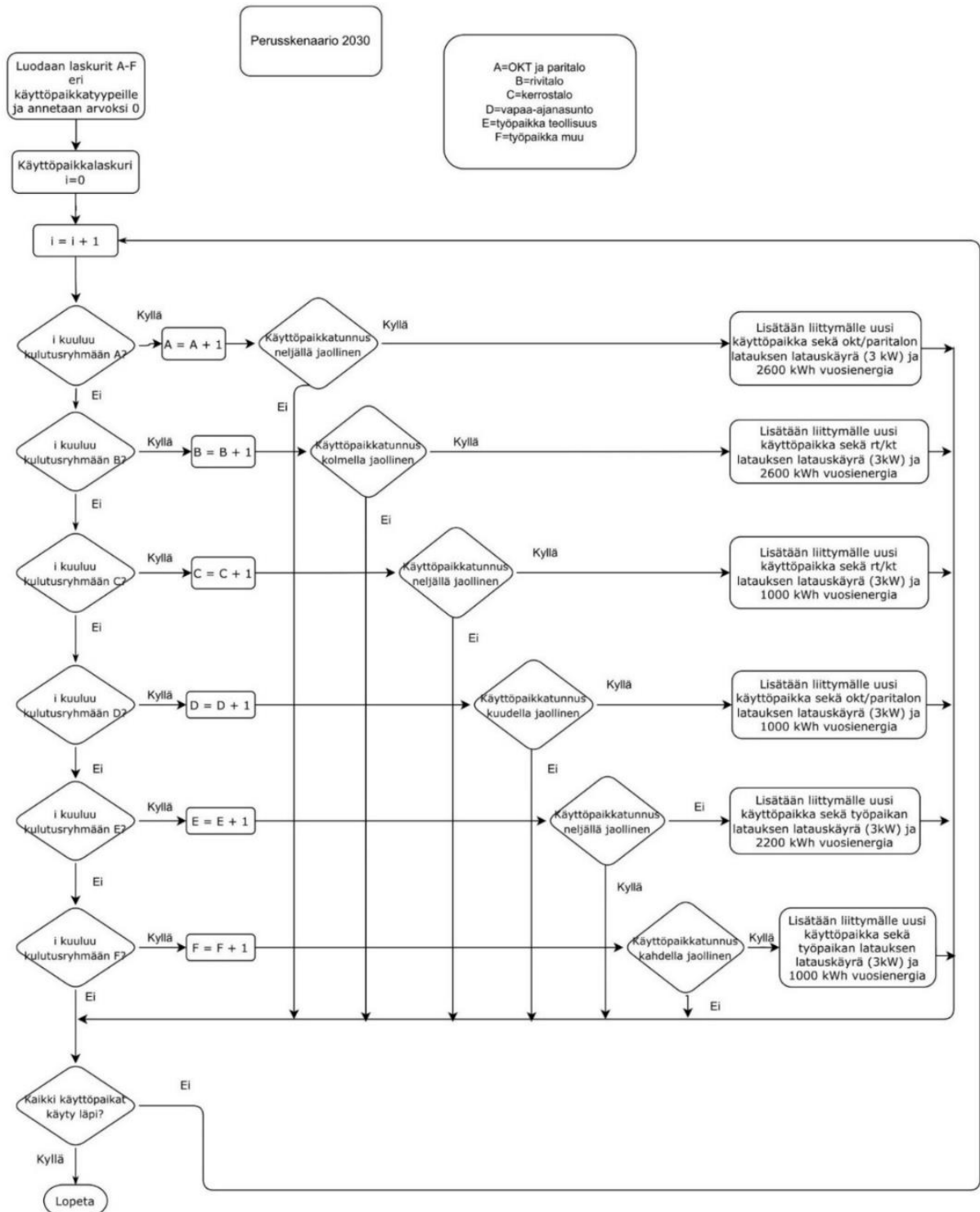
15. Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä, 733/2020, 2020. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200733>
16. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus, Sähköautojen latausinfra-avustus - hakuohje 2023, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://www.ara.fi/fi/document/sahkoautojen-latausinfra-avustuksen-hakuohje-2023>
17. Euroopan komissio, Euroopan vihreän kehityksen ohjelma: uusi kunnianhimoinen laki, jonka tavoitteena on taata riittävä vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuri, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 10.11.2024): https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/ip_23_1867
18. Liikenne- ja viestintäministeriö, Fossiilittoman liikenteen tiekartta: Valtioneuvoston periaatepäätöskotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä, Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:15, 2021, 54 s. Saatavissa: <http://um.fi/URN:ISBN:978-952-243-588-0>
19. Sähköautoilijat ry, Latauskartta, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): latauskartta.fi
20. Tesla, Määränpää-lataus Suomessa, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 21.11.2024): https://www.tesla.com/fi_fi/findus/list/chargers/Finland
21. Euroopan Unioni, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU)2023/1804 vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuriin käyttöön otosta ja direktiivin 2014/94/EU kumoamisesta, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32023R1804>
22. Laki vaihtoehtoisella käyttövoimalla toimivan ajoneuvon hankinnan sekä ajoneuvon vaihtoehtoisella käyttövoimalla toimivaksi muuntamisen määräaikaisesta tukemisesta, 1289/2021, 2021. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2021/20211289>
23. Traficom, Tuet vähäpäästöisen ajoneuvon hankintaan, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://www.traficom.fi/fi/hankintatuet>
24. Autoalan tiedotuskeskus, Sähköautot eivät ole verotuksen vapaamatkustajia, Tiedotteet, 2024, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): https://www.aut.fi/ajankoh-taista/tiedotteet/sahkoautot_eivat_ole_verotuksen_vapaamatkustajia.3552.news
25. Vero, Autoveroprosentit ajoneuvoille, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://www.vero.fi/henkiloasiakkaat/omaisuus/autovero/autoveron-maara/autoveroprosentit-ajoneuvoille/#henkiloauto>
26. Traficom, Tilastotietokanta, Liikennekäytössä olevat ajoneuvot, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Liikennekaytossa_olevat_ajoneuvot/040_kanta_tau_104.px/
27. Valtioneuvosto, Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017, 2017, s. 119. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <http://um.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>
28. Autoalan tiedotuskeskus, Autoalan käyttövoimaennusteet – Ennusteet eri käyttövoimien yleistymisestä ensirekisteröinneissä ja autokannassa, 2024, 22 s. Saatavilla: https://www.aut.fi/files/2861/Kayttovoimaennusteet_2024_2205.pdf
29. Valtioneuvosto, Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045 Liikenteen ilmasto-politiikan työryhmän loppuraportti, Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 13/2018, Helsinki 2018, s.136. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <http://um.fi/URN:ISBN:978-952-243-559-0>
30. Liikenne- ja viestintäministeriö, Ennuste: Tieliikenteen päästöt laskevat hieman ennakoitua nopeammin – syynä sähköautojen yleistymisen, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024) <https://www.lvm.fi/-/ennuste-tieliikenteen-paastot-laskevat-hieman-ennakoitua-nopeammin-syyna-sahkoautojen-yleistyminen-1509917>

31. Traficom, Tilastotietokanta, Ensirekisteröinnit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi_Ensirekisteroinnit/?tablelist=true
32. Euroopan parlamentti, Uusien bensiini- ja dieselautojen myyntikielto – mitä vuosi 2035 tuo mukanaan?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20221019STO44572/uusien-bensiini-ja-dieselautojen-myyntikielto-mita-vuosi-2035-tuo-mukanaan>
33. Verkoston mitoitusenergiat, Sähköenergialiitto ry, SA 10:92, 1992, s.29.
34. A. Rautiainen, Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids, Tampereen teknillinen yliopisto, julkaisu 1327, 2015, 79 s. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3615-1>
35. Trimble, Power system analysis Theory Guide For Finland, sähköinen materiaali.
36. A. Unkuri, Sähköautojen vaikutukset kaupungin sähköjakeluverkkoon: diplomityö, 2011, 56 s.
37. V. Pastinen, A. Rantala, H. Lehto, Henkilöliikennetutkimus 2016, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 14/2018, Helsinki 2018, 39 s. + liite I-II 6 s. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-522-8>
38. R. Kallio, T. Kärkinen, J. Mutikainen, A. Supponen, Henkilöliikennetutkimus 2021, Traficom:n tutkimuksia ja selvityksiä 12/2023, Helsinki 2023, 118 s. Saatavilla: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/HLT_2021_p%C3%A4%C3%A4raportti.pdf
39. Trimble Inc., Trimble NIS sähköverkoille, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 13.2.2022): <https://upa.trimble.com/fi/tuotteet/trimble-nis-sahkoverkoille>
40. Trimble Inc., Trimble NIS ohje 23.1., sähköinen sisäinen materiaali.
41. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, Suomen standardoimisliitto, SFS-EN 50160:2022, Helsinki 2022, 107 s.
42. Energiavirasto, Verkko toiminnan julkaisut, Yksikköhinnat 2024 sähköjakelu vuoden 2022 arvossa, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): <https://energiavirasto.fi/verkko-toiminnan-julkaisut>
43. Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen, Energiateollisuus, SA 2:21, 2021, 47 s.
44. A. Jalli, Pörssisähkön keskihinta tunneittain (aikaväliltä 2021–2023), verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): <https://www.vertaasahkot.fi/porssisahkon-keskihinta-tunneittain/>
45. Motiva, Kotilataukseen liittyvä tekniikka tutuksi, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/sahkoautoille_-_arjen_alykas_sahkoautoilu/latauspisteet_taloyhtioihin/kotilataukseen_liittyva_tekniikka_tutuksi
46. Sähkön kulutusjousto rakennuksissa, Sähkötieto ry, ST 55.51, 2024, 9 s.
47. J. Lassila, J. Haakana, J. Haapaniemi, O. Räisänen, J. Partanen, Sähköasiakas ja sähköverkko 2030, Lappeenranta, Loppuraportti, LUT School of Energy Systems, 2019, 79 s. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-357-2>
48. T. Simolin, K. Rauma, P. Järventausta and A. Rautiainen, Optimised controlled charging of electric vehicles under peak power-based electricity pricing, IET Smart Grid, 3: 751-759, 2020. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2020.0100>
49. R. Lv, L. Lan, Z. Yin, S. Wang, M. Guo and J. Zhu, Scheduling optimization analysis of electric vehicle and building roof photovoltaic system based on V2G technology, 2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA), China, 2023, pp. 943-948. doi: 10.1109/IFEEA60725.2023.10429303. Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=10429303&isnumber=10428946>

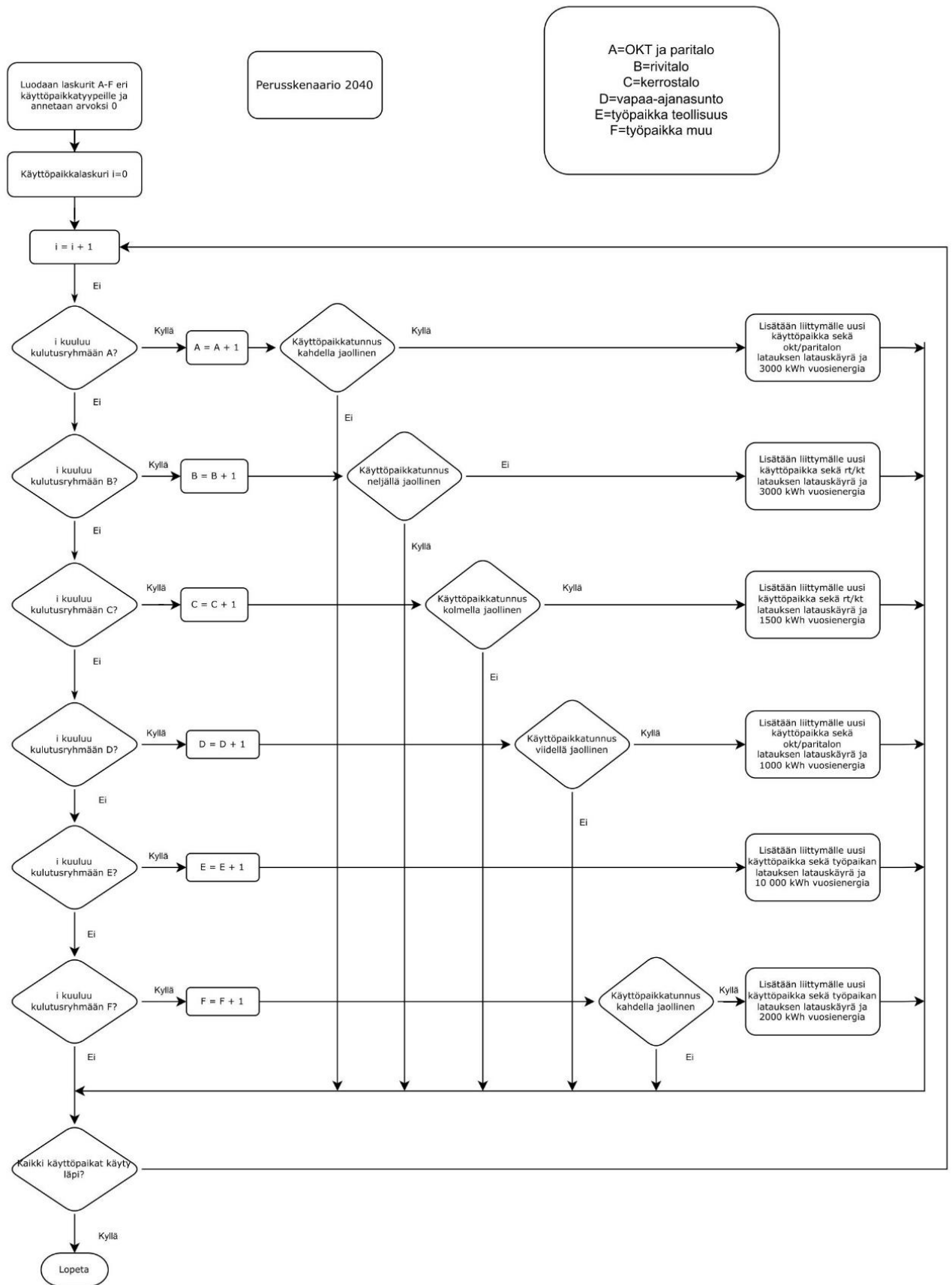
50. E. Dudek, The Flexibility of Domestic Electric Vehicle Charging: The Electric Nation Project, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 19, no. 4, pp. 16-27, 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3072714. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9461730&isnumber=9461708>
51. Fingrid Oyj, Markkinapaikka sähköverkkojen joustotarpeelle, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/markkinapaikka-sahkoverkkojen-joustotarpeelle/>
52. Sesko ry, Kaksisuuntainen lataus, sähköauto sähkövarastona?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.11.2024): <https://sesko.fi/kaksisuuntainen-lataus-sahkoauto-sahkovarastona/>
53. S. Deb, K. Kalita and P. Mahanta, Review of impact of electric vehicle charging station on the power grid, 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), India, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAPENERGY.2017.8397215. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8397215&isnumber=8397198>
54. R. Lv, L. Lan, Z. Yin, S. Wang, M. Guo and J. Zhu, Scheduling optimization analysis of electric vehicle and building roof photovoltaic system based on V2G technology, 2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA), China, 2023, pp. 943-948, doi: 10.1109/IFEEA60725.2023.10429303. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10429303&isnumber=10428946>
55. I. U. Nutkani and J. C. Lee, Evaluation of Electric Vehicles (EVs) Impact on Electric Grid, 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Japan, 2022, pp. 239-246, doi: 10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9806958. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9806958&isnumber=9806821>
56. Kauppalehti, Suomalaisfirma testaa: Koteihin järkälemäinen akku ja sähkön hinnaksi 4 senttiä kilowattitunnilta, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/suomalaisfirma-testaa-koteihin-jarkalemainen-akku-ja-sahkon-hinnaksi-4-senttia-kilowattitunnilta/39991f6d-03ec-4e27-94cd-2933e816e6e7>
57. J. Quiros-Tortos, L. Ochoa and T. Butler, How Electric Vehicles and the Grid Work Together: Lessons Learned from One of the Largest Electric Vehicle Trials in the World, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 16, no. 6, pp. 64-76, 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2863060. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8501603&isnumber=8495015>
58. S. Cundeva, A. K. Mateska and M. H. J. Bollen, Hosting capacity of LV residential grid for uncoordinated ev charging, 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Slovenia, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378892. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8378892&isnumber=8378806>
59. Elenia, Kuormanohjaus, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 10.11.2024): <https://www.elenia.fi/tulevaisuuden-energia/sahkonkulutuksen-mittausuudistus/kuormanohjaus>

Liite I

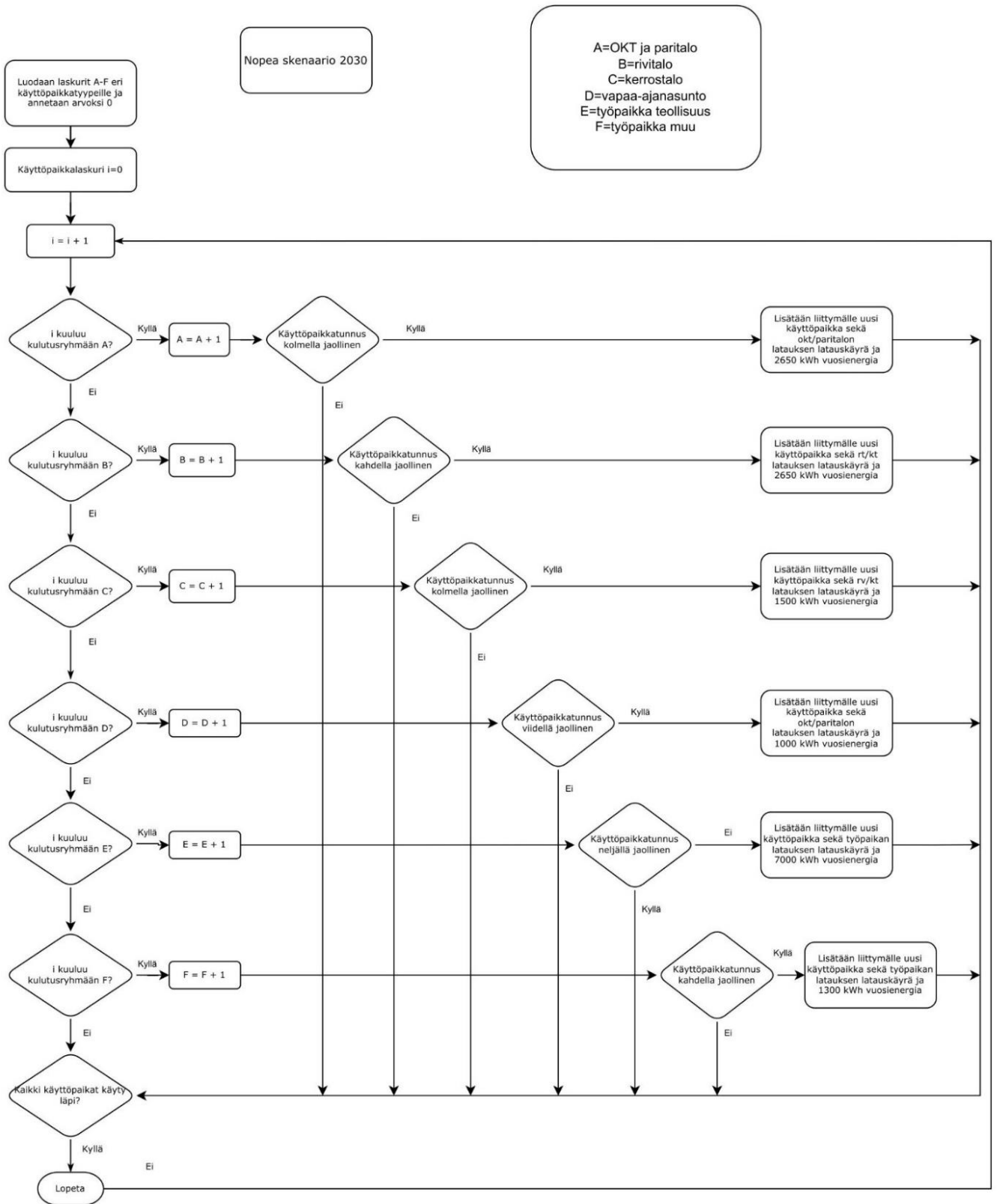
Mallinnuksen algoritmin toiminta vaiheittain kuvattuna jokaiselle skenaariolle.



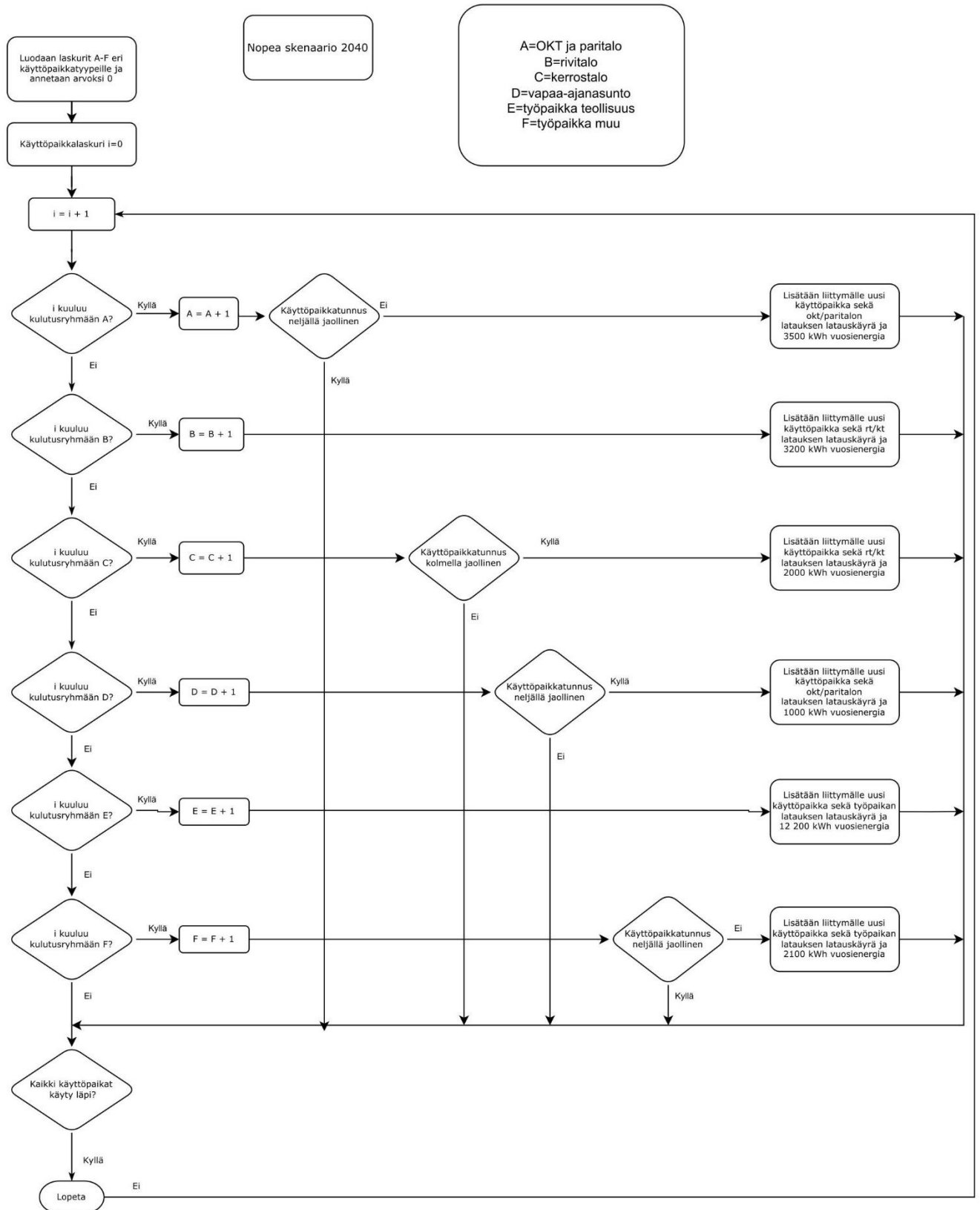
Kuva 54. Skenaariion B2030 algoritmi.



Kuva 55. Skenaarion B2040 algoritmi.



Kuva 56. Skenaarion F2030 algoritmi.



Kuva 57. Skenaarion F2040 algoritmi.

Liite II

150 ja 22 kW latauspaikat lisätty:

ABC Kaleva
 ABC Lahdesjärvi
 ABC Viinikka
 Prisma Linnainmaa
 K-Citymarket Turtola
 Prisma Koivistonkylä
 Lielahतिकeskus
 Prisma Lielähti
 Hatanpään sairaala
 Hatanpään sairaala
 Kauppakeskus Veska
 K-Citymarket Pirkkala
 Bauhaus Pirkkala
 Prisma Pirkkala
 Messukeskus Pirkkala
 Ikea
 Tampereen yliopisto, Hervannan kampus
 Tampereen yliopistollinen sairaala
 Prisma Kaleva
 Tampereen yliopisto, keskustan kampus
 Ratina stadion
 Ratinan kauppakeskus
 Lapinniemen kylpylä
 Särkänniemi
 Rosendahl
 Kauppakeskus Westeri
 K-Citymarket Lielähti

22 kW julkinen latauspaikka lisätty:

Kalevan uimakeskus
 Pyynikin uimahalli
 Kauppakeskus Duo
 Kaukajärven kauppakeskus
 McDonalds Kaukajärvi
 McDonalds Hakametsä
 Kauppi SportCenter
 Urheiluhalli Linnainmaa
 Teboil Aitolahti
 K-Supermarket Nekala
 K-Supermarket Kaleva
 Tallipiha
 Pyynikin palloiluhalli
 K-supermarket Villilä
 S-market Tesoma
 Tesoman jäähalli
 Tesoman palloiluhalli
 Koskikeskus
 Sokos
 Luminary hotelli
 Lapland hotelli Tampere
 Pääkirjasto Metso
 Pysäköintitalo Pinninkatu
 K-market Aitolahti
 Neste Lielähti
 Neste Hervanta
 Mustavuori laskettelukeskus
 Pyynikintori

K-Citymarket Linnainmaa

Tullintori kauppakeskus

Kansi Areena

Tornihotelli

Marriot hotelli

Tampere-talo

Hotelli Ilves

Scandic Koskipuisto

Hämpin parkkihalli

Lidl Janka

Lidl Lahdesjärvi

Rusko Kauhakorventie 56

Vuoreksen liikuntapuisto

Parkkipaikka Kauppi

Tapahtumakeskus Santalahti

Motonet Lielähti

Hakametsä jäähalli

Liikuntahalli Ikuri

Liite III

Koodi uusien latauskäyttöpaikkojen lisäämiselle. Esimerkkinä skenaarion B2030 latauskäyttöpaikkojen lisääminen.

```

CREATE OR REPLACE VIEW CUSTOMER.EVCHARGING_B2030 AS
--perusskenaario 2030
WITH Q1 AS (
select a.library, a.category, b.category catlink, a.name, c.clientpointno, c.connectionpointid,
CASE --asiakasryhmittely
WHEN c.loadtype in
(114,124,117,115,111,118,125,126,121,122,112,116,119) THEN 'B'
WHEN c.loadtype in (214,215,216,211,212) THEN 'C'
WHEN c.loadtype in (311,312,313,314) THEN 'D'
WHEN c.loadtype in (403,402,401,404) THEN 'E'
WHEN c.loadtype in (4800,4200,4500,4300,4700,4600,4400,4900) THEN
'F'
WHEN c.loadtype in (1040,
99,6100,7500,7100,6400,8100,8300,8200,9400,9100,9300) THEN 'G'
ELSE 'N'
END LATAUSKAYRA
from nec_slycategory a inner join nec_categorylink b on(a.category
= b.category and a.library = b.library) inner join nisclientpoint c
on (c.loadtype = b.category) inner join lvcustomerpoint d on(c.con-
nectionpointid = d.id)
where a.library = 'TKS_KOPIO' and length(c.clientpointno)=18),
Q2 AS (
SELECT library, category, catlink,name,clientpointno,latauskayra,
CASE --latausenergiat
WHEN LATAUSKAYRA = 'B' AND MOD(CLIENTPOINTNO,4)=0 THEN 2700
WHEN LATAUSKAYRA = 'C' AND MOD(CLIENTPOINTNO,3)=0 THEN 2700
WHEN LATAUSKAYRA = 'D' AND MOD(CLIENTPOINTNO,4)=0 THEN 1000
WHEN LATAUSKAYRA = 'E' AND MOD(CLIENTPOINTNO,6)=0 THEN 1000
WHEN LATAUSKAYRA = 'F' AND MOD(CLIENTPOINTNO,4)!=0 THEN 3000
WHEN LATAUSKAYRA = 'G' AND MOD(CLIENTPOINTNO,2)=0 THEN 1000
ELSE 0
END ADDENERGY,
CASE --latauskäyrien valinta
WHEN LATAUSKAYRA = 'B' AND MOD(CLIENTPOINTNO,4)=0 THEN 9990993
WHEN LATAUSKAYRA = 'C' AND MOD(CLIENTPOINTNO,3)=0 THEN 9990996
WHEN LATAUSKAYRA = 'D' AND MOD(CLIENTPOINTNO,4)=0 THEN 9990996
WHEN LATAUSKAYRA = 'E' AND MOD(CLIENTPOINTNO,6)=0 THEN 9990993
WHEN LATAUSKAYRA = 'F' AND MOD(CLIENTPOINTNO,4)!=0 THEN 9990999
WHEN LATAUSKAYRA = 'G' AND MOD(CLIENTPOINTNO,2)=0 THEN 9990999
ELSE 0
END ADDLOADTYPE, connectionpointid
from Q1)
SELECT SUM(ADDENERGY) ADDENERGY, ADDLOADTYPE, CONNECTIONPOINTID
FROM Q2
GROUP BY ADDLOADTYPE, CONNECTIONPOINTID
;
```