

Sanni Riekki

SÄHKÖBUSSILIIKENTEN LAAJENTA- MINEN TURUN SEUDULLA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Seppo Syrjälä
Sirpa Korte
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Sanni Riekk: Sähköbussiliikenteen laajentaminen Turun seudulla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka
Lokakuu 2019

Työssä tutkitaan sähköbussiliikenteen laajentamismahdollisuuksia Turun seudulla, ja tähän liittyviä teknisiä kysymyksiä, kuten akkujen ja latureiden mitoitus. Tarkoituksena oli selvittää, mille linjoille sähköbussiliikennettä voitaisiin laajentaa ja millaisilla akku- ja laturiratkaisuilla näillä linjoilla voitaisiin liikennöidä.

Sähköbussit sopivat erityisesti kaupunkiliikenteeseen, jossa reitit ja ajomäärät ovat tarkkaan tiedossa, ja niillä voidaan vähentää liikenteen päästöjä ja parantaa energiatehokkuutta. Niiden etuna on paikallispäästöttömyys ja dieselbusseihin verrattuna pieni energiankulutus, lisäksi ne ovat hiljaisia ja hyötysuhteeltaan tehokkaita. Sähköautoteknologia on laajassa käytössä kuitenkin yhä uutta, ja bussien markkinat muuttuvat jatkuvasti. Sähköbussit ovat toistaiseksi elinkaari-kustannuksiltaan dieselbusseja kalliimpia, mutta kehittyvä teknologia ja kilpailu laskevat hintoja.

Turussa liikennöidään tällä hetkellä yhdellä sähköbussilinjalta ja tarkoitus on laajentaa liikennöintiä runkolinjauudistuksen yhteydessä 2021. Potentiaalisia linjoja ovat sellaiset, joilla liikennöinti on riittävän suurta kattamaan investointikustannukset, pituus on sopiva pikalataukselle, joiden aikataulussa on tilaa lataukselle ja jotka liikennöivät Turun sisällä. Tällaisia linjoja ovat tulevan runkolinjaston 3, 4, 5, 5A, 8, 9A, 9B, 10 ja L71. Linjoille on löydettävä sopiva kilpailutusmalli, sillä ei ole olemassa vakiintuneita käytäntöjä esimerkiksi latureiden omistuksen suhteen.

Sähköbussien lataus voidaan suorittaa joko varikolla yön yli tapahtuvana kaapelilatauksena tai päivän aikana päätepuskeilla suoritettavana virroitinlatauksena. Turussa virroitimilla hoidettavaa pikalatausta voidaan pitää potentiaalisempina vaihtoehtona, sillä päivittäiset ajosuoritteet busseille ovat suuria, jolloin varikkolatauksen akkukapasiteetti ei helposti riitä. Suomen olosuhteissa talven lämmitysvaatimukset nostavat energiankulutusta jopa kaksinkertaiseksi, mikä on merkittävin haaste akkujen ja latureiden mitoituksessa, mikäli kaikki energia halutaan sähköstä.

Paras kombinaatio potentiaalisimmille linjoille muodostuu useista eri akku- ja laturivaihtoehtoista. Näin saadaan taloudellisesti tehokkain ratkaisu, jossa vältytään ylimitoitukselta. Lyhyemmillä linjoilla riittäisi kaikilla 60 kWh akkukapasiteetti, pitkillä kehälinjoilla tarvittaisiin 120 kWh akkuja ja lisäksi kaikilla latauspisteillä käytettäisiin 450 kW pikalatureita. Näillä mitoituksilla voitaisiin liikennöidä ilman merkittäviä muutoksia suunniteltuihin aikatauluihin.

Sähköbussiliikennettä laajennettaessa on otettava huomioon myös esimerkiksi latureiden sijoittamiseen vaikuttavat tekijät, kuten tarvittavat luvat ja tilantarve. Lisäksi toimitusajat busseille, latureille ja kaikille muille tarvittaville osille ovat varsin pitkiä, joten hankinnat on tehtävä vähintään vuosi ennen liikennöinnin aloittamista.

Avainsanat: Sähköbussi, sähköinen liikenne, energiatehokkuus, sähköajoneuvo, joukkoliikenne

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Sanni Riekkö: Expanding the electric bus network in the Turku area
Master of Science Thesis
Tampere University
Environmental and Energy Engineering
August 2019

The focus of this thesis work was to find out possibilities of expanding the electric bus network in the Turku area and which bus lines could be used for electric bus service. The purpose was to measure what kind of battery and charger solutions could be used to operate these lines.

Electric buses are well applied to urban transport, where routes and traffic volumes are known. Not only can they reduce local greenhouse gas emissions and decrease energy usage compared to diesel buses, they are also quieter, and their energy efficiency is better. However, electric car technology is still nascent business and the bus market is constantly changing. So far life-cycle costs of electric buses are more expensive than diesel buses. However, through advancing technology and competition on market, prices of electric buses are falling.

Currently there is one bus line in Turku served by electric buses, and the intention is to expand electric traffic in connection with the trunk line network renewal in 2021. The most potential lines for electric buses have enough traffic to compensate higher acquisition costs and enough time for charging in their schedule. Potential lines are also optimal in length and ride inside the city of Turku. Such lines include the upcoming trunk lines 3, 4, 5, 5A, 8, 9A, 9B, 10 and L71. As there is no common practice regarding an appropriate competitive bidding model, it must be found for ownership of chargers and other issues.

Charging of electric buses can be done either by cable charging overnight at the depot or by pantographs at terminals during the day. In Turku, fast charging with pantographs can be considered as a more potential option, as daily driving performance on buses is high. It means that the battery capacity of depot charging buses is usually not enough. In Finland the heating requirements during the winter can double the energy consumption. It is one of the most significant challenges when calculating optimal battery and charger capacity.

The best combination for the potential electric bus lines consists of two different battery options. This provides the most economically efficient solution that avoids over-sizing of batteries. In shorter routes battery capacity of 60 kWh would be used, and longer lines would require 120 kWh batteries. All charging points would have fast charger with 450 kW capacity. With these options, no significant changes would be needed to the schedules of the lines.

In addition, factors such as necessary permits and space requirements of the charging stations must be considered. Also, delivery times for buses, charges and all other necessary parts are quite long, so purchases must be made at least a year before operation at the line starts.

Keywords: Electric bus, EV, public transport, energy efficiency

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

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty yhteistyössä Turun seudun joukkoliikenne Fölin kanssa ja rahoitus työn tekemiseen on saatu Civitas Eccentricin tukeman hankkeen kautta. Työtä varten on haastateltu asiantuntijoita Turun kaupungilta, Turku Energialta, Turun ammattikorkeakoulusta, sekä useita alan yritysten edustajia. Haluan kiittää kaikkia heitä avusta, uusista näkökulmista ja hyvinkin yksityiskohtaisista tiedoista, joita ilman en olisi saanut työtä kaasaan.

Kiitos Turun kaupungille ja Föille mahdollisuudesta päästä tutustumaan sähköbussitekniologian mielenkiintoiseen maailmaan ja tekemään työtä, josta toivottavasti on hyötyä myös tulevaisuuden ratkaisuja pohdittaessa. Koko Fölin henkilöstölle kiitos kannustavasta työyhteisöstä, ja kaikesta avusta, jota sain pienten ja isompienkin ongelmien kanssa. Erityisesti kiitokset Sirpa Korteelle ja Topias Pihlavalle, jotka olivat vahvasti mukana työn suunnittelussa, ja ohjasivat oleellisimpien näkökulmien äärelle. Yliopiston puolelta Seppo Syrjälä oli apuna etenkin työn rakenteen kokoamisessa.

Läheisten tuki ja kannustus koko pitkän opiskelutaipaleen aikana on ollut korvaamatonta, tuntuu uskomattomalta, että opinnot ovat ainakin tältä erää suoritettuna. Vanhempiani haluan kiittää erityisesti mahdollisuudesta keskittyä elämässäni asioihin, joista olen itse ollut kiinnostunut. Suurin kiitos vielä Markolle kaikesta henkisestä tuesta opintojen ja tämän työn kirjoittamisen aikana.

Tampereella 11.11.2019

Sanni Riekki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖBUSSILIIKENNE	4
2.1 Sähköbussien tekniset ominaisuudet	5
2.2 Sähköisen liikenteen edut	9
2.3 Sähköbussiliikennöinnin haasteet	11
2.4 Sähköbussien markkinatilanne ja valikoima	13
2.4.1 12-metriset sähköbussit	14
2.4.2 15-metriset sähköbussit	15
2.4.3 18-metriset sähköbussit	15
3. TURUN TILANNE JA LAAJENTAMISEN LÄHTÖKOHDAT	17
3.1 Tämänhetkinen sähköbussiliikenne Turussa	17
3.2 Sähköbussiliikenteen laajentamisen tavoitteet	20
3.3 Linjojen valintaperusteet	21
3.3.1 Turun seudun linjauudistus ja runkolinjat	24
3.3.2 Raitiotie ja sen vaikutukset joukkoliikenteeseen	26
3.3.3 Potentiaaliset sähköbussilinjat	28
3.4 Liikennöinnin kilpailutus	29
4. AKUT JA LATUREIT	31
4.1 Latureiden vaihtoehdot ja toiminta	31
4.2 Latauspisteiden sijoittaminen potentiaalisille linjoille	34
4.3 Latureiden tehontarpeeseen vaikuttavia tekijöitä	37
4.4 Akkujen kokoon vaikuttavia tekijöitä	39
4.5 Häiriötilanteisiin varautuminen	42
4.6 Taloudelliset vaikutukset	45
5. LATUREIDEN JA AKKUJEN OPTIMOINTI	48
5.1 Laskennan lähtökohdat	48
5.2 Lähtöarvot, muuttujat ja menetelmät	49
5.3 Laskennan tulokset	50
5.4 Ratkaisujen taloudelliset vaikutukset	53
5.5 Linjakohtaiset ratkaisut	55
5.6 Linjojen sähköistämisyjärjestys	57
6. YHTEENVETO	60
6.1 Yleisiä huomioita laajentamiseen liittyen	60
6.2 Valitun tekniikan vaikutus	60
LÄHTEET	62
LIITE A: BUSSIMALLIEN TEKNISET TIEDOT	66

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO ₂ eq	Hiilidioksidiekvivalentti, kasvihuonekaasupäästöt muunnettuna ilmastovaikutuksiltaan hiilidioksidin vastaavaksi määräksi
EU	Euroopan Unioni
LFP	Litiumrautafosfaattiakku, LiFePO ₄
LTO	Litiumtitanaattiakku, Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
UITP	Kansainvälinen joukkoliikenneliitto, Union Internationale des Transports Publiques
YK	Yhdistyneet kansakunnat
ZeEUS	Zero Emission Urban Bus System

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen ehkäisy vaatii hiilidioksidipäästöjen ja muiden kasvihuonekaasujen määrän radikaalia pienentämistä. Liikenne on yksi tärkeä kohde energiatehokkuuden parantamiseen ja päästöjen pienentämiseen, sillä se aiheuttaa jopa neljäsosan maailman hiilidioksidipäästöistä. YK:n (Yhdistyneet kansakunnat) Pariisin sopimuksessa pyritään rajoittamaan ilmaston kesimääräisen lämpötilan nousu alle 2 °C, tavoitteena on korkeintaan 1,5 °C nousu esiteolliseen aikaan nähden. [1] Euroopan unionissa (EU) on käynnissä useita projekteja, joilla pyritään edistämään liikennepäästöjen vähenemistä paikallisesti ja globaalisti. YK kehottaa myös ohjaamaan varoja päästöjä vähentävien projektien ja tutkimusten rahoittamiseen [1].

Yksi keino liikenteen päästöjen vähentämiseen on siirtyä sähköisiin kulkuneuvoihin, joilla ei tuoteta lainkaan paikallisia päästöjä. Joukkoliikenne ja etenkin bussiliikenne on hyvä lähtökohta sähköiselle liikenteelle, sillä kulkuneuvojen päivittäiset ja vuosittaiset ajosuoritteet, sekä muut kulutukseen vaikuttavat ympäristön olosuhteet ovat hyvin tiedossa. [2, 3] Sähköbussit ovat uusi ja nopeasti kehittyvä teknologian ala, joten yksiselitteisiä tutkimustuloksia tai kokemuksia esimerkiksi akkujen ja latureiden todellisesta käyttöiästä ei vielä ole olemassa, mikä asettaa haasteita liikenteen laajentamiselle. Lisäksi teknologia kehittyy niin nopeasti, että esimerkiksi viisi vuotta sitten saadut tulokset eivät kaikilta osin ole enää relevantteja, kun tekniikkaa on pystytty kokemuksen perusteella parantamaan. Työssä on tarkoitus jossain määrin esittää ja arvioida tulevaisuuden skenaarioita ja niiden vaikutuksia sähköbussiliikenteeseen ja -markkinoihin tulevien vuosien aikana.

Työssä keskitytään Turun alueen joukkoliikenteen sähköistämismahdollisuuksiin. Turun alueeseen kuuluu Turun kaupunkiseutu, eli Turku, Kaarina, Lieto, Naantali ja Raisio, sekä määrittelytavasta riippuen kaikki tai osa ympäröivistä kunnista, joita ovat Aura, Parainen, Masku, Mynämäki, Nousiainen, Paimio, Rusko ja Sauvo. [4] Turun seudun joukkoliikenne Föli palvelee Turun kaupunkiseudun ja Ruskon alueella [5]. Turun kaupunki haluaa olla hiilineutraali kaupunki vuonna 2029, joten liikenteen päästöjen pienentämiseen on kunnianhimoiset tavoitteet [6]. Myös EU:n uusi direktiiviesitys vaatii päästöttömien vaihtoehtojen lisäämistä, ja täyssähköisiä busseja on oltava jokaisessa kaupunkiseudun joukkoliikennesopimuksessa noin 20 % vuodesta 2021 eteenpäin tehtävissä kilpailutuksissa [7].

Tällä hetkellä Turussa liikennöi jo yksi täysin sähköistetty bussilinja, josta on saatu hyviä kokemuksia, mutta myös kehitysideoita. Tarkoituksena on myös kerätä tietoa projektiin osallistuneilta asiantuntijoilta eri näkökulmista, minkä perusteella voidaan tunnistaa suurimmat ongelmakohdat ja esittää mahdollisesti ratkaisuja niihin. Tuleva runkolinjauudistus on ajallisesti hyvä lähtökohta sähköbussiliikenteen lisäämiselle, kun linjoihin tehdään muutenkin merkittäviä muutoksia ja linjat ovat potentiaalisempia vaihtoehtoja sähköbusseille lisääntyneen ajotiheyden myötä.

Työn tarkoituksena on selvittää, mille linjoille sähköbussiliikenne olisi järkevää ja taloudellista toteuttaa. Liikenteen toteuttamiseen vaadittavien latureiden tyyppi, koko ja sijainti on tarkoitus optimoida niin, että saadaan niistä taloudellisesti suurin hyöty, mutta on myös varauduttu mahdollisiin häiriöihin ja ongelmiin. Lisäksi on tarkoitus esitellä ja vertailla markkinoilla olevia sähköbusseja ja niiden akkukapasiteettia ja sopivuutta valituille linjoille. Tavoitteena on tuottaa mahdollisimman käyttökelpoista tietoa sähköbussiliikenteen laajentamiseen, tarjota mahdollisimman monta näkökantaa valittuihin ongelmiin ja esittää selkeitä ratkaisuehdotuksia ja toimintamalleja ongelmiin. Tarkoituksena on löytää muutama melko helposti sähköistettävissä oleva linja, joista sähköbussiliikenteen laajentaminen voidaan aloittaa ja mitoittaa näiden linjojen tehontarve.

Työssä esitellään ensin sähköbusseja, niiden kehitystä ja liikennöintiä yleisellä tasolla, sekä tähän liittyviä etuja ja haasteita. Lisäksi tutustutaan markkinoilla oleviin sähköbussimalleihin ja niiden teknisiin ominaisuuksiin. Kolmannessa luvussa esitellään Turun tilanne tarkemmin, nykyinen sähköbussiliikenne ja työn lähtökohdat, miksi liikennettä halutaan laajentaa ja mitkä ovat potentiaalisia linjoja sähköistykselle. Linjojen valintapohjana käytetään runkolinjastoa ja esimerkiksi aiemmin tehdyn diplomityön arviointiperusteita, tämä ei ole kuitenkaan työn päätarkoitus.

Sen jälkeen keskitytään lataustekniikkaan, millaisia vaihtoehtoja lataukselle on ja miten laturit saisi sijoitettua mahdollisimman toimintavarmoihin paikkoihin ja useamman linjan käyttöön. Tarkastellaan myös latureiden ja akkujen kokovaihtoehtoja ja näiden vaikutusta toisiinsa. Pohjatietojen perusteella toteutetaan laskentaosa, jonka tarkoituksena on tarjota mahdollisimman optimaalinen ratkaisu latureiden ja akkujen mitoittamiseen ja esittää tulokset havainnollisesti. Ylimittaus lisää kustannuksia tarpeettomasti, mutta toisaalta bussiliikenne on turvattava myös häiriötilanteissa, joten pyritään löytämään kokonaistilanteeseen parhaiten sopiva ja taloudellisin ratkaisu. Laskentaosion perusteella esitetään kullekin sähköistettäväksi sopivalle linjalle parhaiten sopivat laturit ja akut. Lopuksi kootaan päätelmiä ja ratkaisuehdotuksia liikenteen laajentamiseen yleisesti ja tekniikkaan liittyen.

Luvut 2 ja 3 ovat pääasiassa kirjallisuusselvityksiä, toisessa luvussa tutustutaan alalta tehtyyn tutkimukseen ja pyritään luomaan selkeä kokonaiskuva sähköbussien teknisistä ominaisuuksista, niiden nykyisestä markkinatilanteesta ja muista yleisistä tekijöistä. Luvussa 3 keskitytään paikallisempaan tietoon, pitkälti tehtyjen selvitysten, raporttien ja haastattelujen pohjalta ja esitetään määräyksiä, joiden perusteella valintoja on tehty. Luvussa neljä on käytetty paljon asiantuntijalähteitä, mutta myös tieteellisiä lähteitä, joiden perusteella on rajattu teknisiä ominaisuuksia, joita latureihin ja akkuihin liittyy. Luvussa 5 on omaa laskentaa ja luvussa 6 aiempien lukujen perusteella tehtyjä päätelmiä.

2. SÄHKÖBUSSILIIKENNE

Liikenne tuottaa tällä hetkellä noin 23 % maailman hiilidioksidipäästöistä [8] ja vielä merkittävästi suuremman osan typpioksidi- ja pienhiukkaspäästöistä [9]. Etenkin suurkaupungeissa ilmansaasteet ovat todellinen ongelma ja uhka ihmisten terveydelle, sillä niillä on todettu olevan vaikutusta miljooniin ennenaikaisesti kuolemiin. Lähipäästöjä pienentämällä voidaan vaikuttaa kaupunkien ilmanlaatuun ja sähköbusseilla saadaan näitä liikenteen päästöjä laskettua paikallisesti paljonkin. [3] Maailmanlaajuisesti YK:n Pariisin ilmastopimuksen tavoitteena on saavuttaa kasvihuonekaasupäästöjen huippu mahdollisimman pian, eli pyrkiä korvaamaan fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla ja vähemmän päästöjä tuottavilla. [1]

Toistaiseksi kiinnostus sähköbusseihin on liittynyt lähinnä niillä saavutettuihin ympäristötietuihin ja kaupunkien tavoitteisiin ilmanlaadun ja imagon parantamisessa. Useat kaupungit ovat asettaneet ilmastotavoitteita sekä kokonaispäästöille, että liikenteen päästöille erikseen, mikä ohjaa siirtymistä fossiilisista polttoaineista uusiutuviin. Taloudellisesti sähköiset bussit eivät vielä ole ylittäneet aivan kilpailukykyisiksi dieselbussien kanssa, mutta tämä ei todennäköisesti ole kaukana. Jo nyt etenkin kiinalaiset valmistajat pystyvät tuottamaan sähköbusseja sarjatuotannolla varsin kohtuulliseen hintaan, joskin huolto- ja toimintavarmuuden kanssa ei ole saavutettu yhtä korkeaa tasoa kuin pienempien valmistajien malleilla yleisesti ottaen. [10]

Jo vuonna 1907 Lontoossa on ollut käytössä lyijyakulla varustettu sähköbussi. Polttomoottoritekniikan kehittyessä sähkökäyttöiset kulkuneuvot jäivät useiksi vuosikymmeniksi varsin vähälle kehitykselle ja käytölle. 1980- ja 90-luvuilla muutamia sähköbusseja löytyi useista kaupungeista etenkin Yhdysvalloista. Nämä olivat pääosin pienikokoisia alle 7 metriä pitkiä malleja. 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen puolivälissä kehitettiin ensimmäiset pikalaturimallit, joilla busseja ei tarvinnut ladata koko yötä. Laajempaan julkisen liikenteen käyttöön täysikokoiset sähköbussit tulivat noin vuonna 2010. Ennen tätä täysin sähköiset akuilla varustetut bussit olivat kokeilumielessä käytössä Pekingin olympialaisissa 2008. [9]

Kiina on selvästi keskeisin tekijä sähköbussiliikenteessä, sillä vuonna 2016 yli 99 % kaikesta maailman sähköbusseista liikennöi Kiinassa. Kiinassa sijaitseva Shenzhen on ensimmäisiä suuren kokoluokan kaupungeja, jotka ovat sähköistäneet kaiken bussiliikenteen. Miljoonakaupungissa liikennöidään yli 16 000 sähköbussilla. Muualla maailmassa

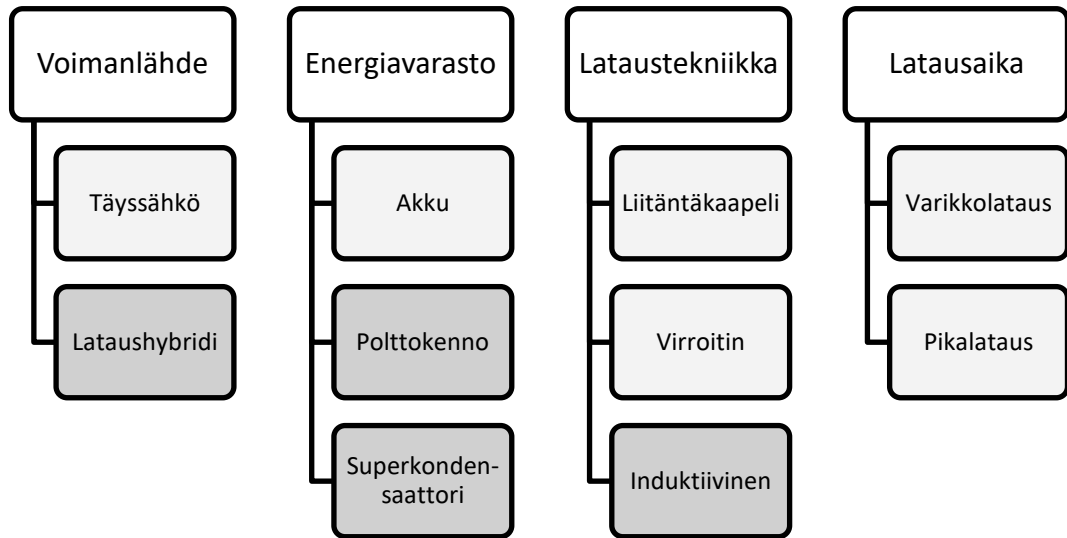
vastaavaan kokoluokkaan ei ole vielä päästy, mutta eriasteisia kokeiluja ja pilottihankkeita on käynnissä lähes kaikissa kehittyneissä maissa. Eurooppa on merkittävä alue etenkin sähköbussiliikenteeseen liittyvän tutkimuksen ja kehitystyön saralla, vaikka bussien liikennöintimäärät ovatkin vielä pääosin marginaalisia. [11]

Iso-Britannia, Alankomaat, Ranska ja Puola ovat Euroopan markkinoilla edelläkävijöitä, osittain paikallisten valmistajien ansiosta. Myös Pohjoismaissa useat kaupungit ovat sähköistäneet bussilinjojaan. [11] Tämä on Suomen kannalta ratkaisevaa, sillä kylmä ilmasto aiheuttaa omat haasteensa sähköbussiliikennöintiin, ja kokemukset liikennöinnin sujuvuudesta vastaavissa oloissa helpottavat päätöksien tekoa. [12] Ympäri maailman erilaisia yksittäisten kaupunkien kokeiluja ja pilottiprojekteja on käynnissä, ja tekniikan kehittyessä laajempikin käyttö on todennäköistä. Tällä hetkellä esimerkiksi kaasuautot ovat kuitenkin edullisempi ja houkuttelevampi vaihtoehtoinen bussimalli etenkin kehittyviin maihin. [11] Vielä 1990-luvun alussa lähes kaikki liikennöivät bussit käyttivät polttoaineenaan dieseliä. Tämän jälkeen vaihtoehtoiset voimanlähteet ovat hitaasti nostaneet suosiotaan, ja nykyisin dieselbussien osuus on alle 70 %. [9]

Kansainvälinen joukkoliikenneliitto UITP (Union Internationale des Transports Publics) [11] veti vuosina 2013–2017 suurta ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System) projektia, jolla pyrittiin edistämään sähköbussien käyttöönottoa Euroopassa muun muassa rahoittamalla pilottihankkeita. Hankkeella pyrittiin edistämään myös tiedon kulkua kaupunkien, liikennöitsijöiden, valmistajien ja muiden osallistuvien tahojen kesken, jotta kaikilla olisi mahdollisuus hyötyä saaduista tuloksista, jolloin voitaisiin edetä pilottiprojekteista todelliseen laaja-alaiseen liikennöintiin. [11]

2.1 Sähköbussien tekniset ominaisuudet

Sähköbusseja ei voi ajatella perinteiseen tapaan vain kulkuneuvoina, vaan ne ovat systeemejä, jotka koostuvat itse bussista ja latausinfrastruktuurista. Tässä luvussa käsitellään sähköbusseihin liittyvää teoriaa ja lyhyesti nykyisiä sähköbussien akku- ja laturiratkaisuja. Kuvassa 1 on esitetty erilaisten sähköbussityyppien jaottelua teknisten ominaisuuksien perusteella. Harmaalla pohjalla olevat tekniikat on rajattu tämän työn aihepiirin ulkopuolelle.



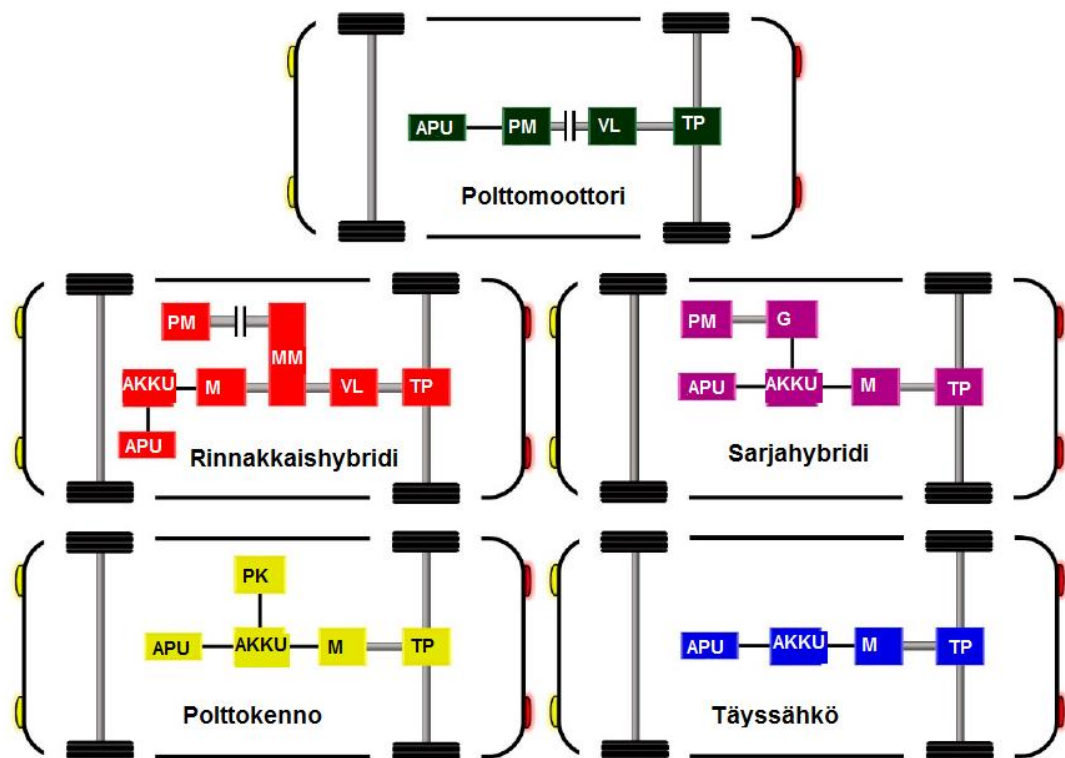
Kuva 1 Sähköbussien lajittelu tekniikan perusteella. Muokattu lähteestä [3]

Täyssähköautolla tarkoitetaan tässä työssä ajoneuvoa, johon ladataan virtaa akkuihin ulkopuolelta ja jossa ei ole muuta voimanlähdettä kuin sähkömoottori. Lataushybridi on hybridiajoneuvo, johon voidaan ladata sähköä ulkopuolisesta lähteestä, mutta jossa on myös polttomoottori voimanlähteenä. Myös sähköä polttokennoilla vedystä tuottavia malleja on esitelty markkinoille, mutta ne ovat yhä harvinaisia ja niiden käyttöönottoa hidastaa puhtaasti tuotetun vedyn saatavuus ja hinta. Samoin pääosin kehittelyasteella olevat superkondensaattoreilla varustetut bussit ovat vielä lähinnä koekäytössä. Tässä työssä sähköbussilla tarkoitetaan ainoastaan täyssähköisiä kulkuneuvoja.

Sähköbussin akkujen lataukseen voidaan käyttää johtuvaa latausta kaapelin tai virroittimen avulla, tai langatonta induktiivista latausta. Latausaika on joko useita tunteja pienemmällä teholla useimmiten varikolla yön yli tapahtuvaa latausta tai muutaman minuutin kestävää pikalatausta, joka suoritetaan pääosin bussin kääntöpaikoilla tai muilla keskeisillä pysäkeillä.

Sähköajoneuvon voimalinja poikkeaa polttomoottorikulkuneuvoista myös muuten kuin polttoaineen suhteen. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu malli eri kulkuneuvotyyppien voimanlähteistä. Perinteisessä dieselbussissa diesel poltetaan moottorissa, ja saatu energia muutetaan männän, vaihteiston ja taseuspyörien avulla renkaita ja akselia pyörittäväksi liike-energiaksi. Hybridiautoissa on polttomoottori, jossa poltetaan bensiiniä tai dieseliä, mutta myös akusto sähköä varastointiin. Rinnakkaishybridissä momentti-muunnin muuntaa polttomoottorin tai akun moottorin avulla tuottaman liikkeen vaihteis-

tolle sopivaksi ja siten liikkeeksi. Sarjahybridissä myös polttomoottorin energia muute-
taan ensin sähköksi ja liike luodaan sähkömoottorissa. Polttokennohybridissä akun
sähkö tuotetaan vedystä polttokennossa ja se muutetaan moottorissa liike-energiaksi.
Täyssähköautossa on vähiten liikkuvia osia, sillä moottori saa voiman suoraan akusta ja
muuttaa sen liikkeeksi. Täyssähköautossa ja sarjahybridissä ei tarvita lainkaan vaihteis-
toa, sillä moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää portaattomasti liikkumisnopeuden
mukaan. Tekniikka mahdollistaa myös akun lataamisen jarrutusenergian avulla, sillä
moottoria voidaan pyörittää toiseen suuntaan, jolloin liike-energiaa saadaan muutettua
sähköksi.



Kuva 2. Ajoneuvojen voimansiirto, muokattu lähteestä [13]. APU=Apulaitteisto, PM=Polttomoottori, VL=Vaihdelaatikko, TP=Tasauspyörästö, AKKU=Akusto, M=Moottori, MM=Momenttimuunnin, G=Generaattori, PK=Polttokenno

Erilaisia akkumateriaaleja on kokeiltu sähköautojen energiavarastoiksi, mutta litium-ioni
akut ovat osoittautuneet käyttökelpoisimmiksi. [14] Ne ovat kohtuullisen turvallisia, niihin
saadaan säilyttää tarpeeksi energiaa ja hinta on kohtuullinen. Litium-ioniakkuja on kehi-
tely viime vuosina myös eniten. [15] Sähköbussissa on otettava huomioon akun tilan-
tarve ja paino, sillä nämä vaikuttavat esimerkiksi energiankulutukseen ja bussin matkus-
tajakapasiteettiin. Varikkoladattavan bussin akku voi painaa yli 1000 kg, mikä tarkoittaa
sen myös tarvitsevan varsin suuren tilan bussista. [16]

Bussien akkuja voidaan ladata eri tavoin. Yleisin malli on varikolla tapahtuva lataus, jossa bussiin liitetään laturista kaapeli ja ladataan yleensä muutamia tunteja tai yön yli. Euroopassa oli vuonna 2017 56 % busseista varikkoladattavia ja lähes kaikki loput päätepysäkeillä pikaladattavia malleja. [11]

Pikalatauksessa on yleensä käytössä virroittimena pantografi, joka liikkuu aina bussin tullessa latausasemalle mahdollistaen virtapiirin muodostumisen. Virroittinlatauksessa vaihtoehtona on bussista ylös nouseva johdin, joka liittyy pysäkillä sijaitsevaan vastinkappaleeseen, ja virta kulkee tätä kautta. Toinen vaihtoehto on alas laskeutuva pantografi, joka sijaitsee latauslaitteessa ja bussissa on ainoastaan vastuskiskot, joihin pantografin vastukset osuvat, ja sitten lataus tapahtuu. Virroittinlataus on melko pitkäikäinen tekniikka, jolla on saatu suuri toimintavarmuus, mutta laitteet ovat kuitenkin herkkiä häiriöille ja ympäristön olosuhteille. [3]

Induktiivisessa latauksessa laturin ensiökäämi sijaitsee maan alla ja bussi ajaa laturin päälle, jolloin bussissa sijaitseva toisiokäämi saa aikaan sähkönsä virtauksen ja lataus tapahtuu täysin langattomasti. Induktiolataus on toistaiseksi kokeiluasteella, eikä niitä ole vielä laajassa käytössä. Induktiolatauksen etuna on laturin helppo sulauttaminen ympäristöön sekä liikkuvien osien puuttuminen, mikä vähentää huollon tarvetta. Toisaalta induktiolataus on hyötysuhteeltaan huonompi ja herkkä häiriöille, esimerkiksi lumi tai roskat latauspisteen kohdalla voivat estää latauksen. [3] Myös akunvaihtoa on ehdotettu ja kokeiltu latausmuotona. Tällöin bussiin vaihdetaan akkujen kuluttua loppuun uudet täydet tilalle, ja liikennöinnissä ei tarvitse huomioida latausaikaa. Tämän tekniikan ongelmana on kuitenkin latauspisteen sijoittaminen, jatkuvan vaihdon vaikutukset akkujen käyttöikään ja vaihtotoimenpiteeseen liittyvät turvallisuusriskit.

Markkinoilla on myös liikenteen aikana johtimista ladattavia sähköbussseja, jotka hyödynävät olemassa olevaa raitiotie- tai johdinauto liikenteen sähköverkkoa. Johdinautoista tämän tyyppiset sähköbussit eroavat siinä, että ne on varustettu akuilla, jolloin niillä on mahdollisuus ajaa lyhyitä matkoja (noin 15 km) myös latauslinjojen ulkopuolella. Johtimista ladattavat bussit eivät kuitenkaan yleensä kuulu sähköbussien määritelmään teollisessa tutkimuksessa. [11]

Karkeasti ottaen pikalaturi maksaa noin 150 000-250 000 € ja sähköbussi hieman alle 500 000 €, riippuen akun koosta. [15] Sähköbussin runko maksaa hieman yli 300 000 € ja akut noin 50 000 – 70 000 € pikaladattaviin malleihin ja vähintään tuplasti varikkoladattaviin. [16] Varikkoladattavissa malleissa bussien akkuja ei ladata ainakaan useampaan kertaan päivän aikana, jolloin niiden on oltava kapasiteetiltaan suurempia, mikä aiheuttaa eroa hinnassa.

2.2 Sähköisen liikenteen edut

Ilmastomuutoksen hidastaminen vaatii todellisia muutoksia ja liikenteen päästöt aiheuttavat noin neljäsosan hiilidioksidipäästöistä. Raakaöljyvarannot alkavat myös kulua loppuun, ja vaikka öljyä riittääkin vielä vuosikymmeniksi, se on yhä vaikeammin hyödynnettävissä. Tämä nostaa öljypohjaisten polttoaineiden hintaa ja on yksi hyvä syy pohtia vaihtoehtoisia energiaratkaisuja liikenteeseen. [10] Biodieselin ja muiden ekologisesti kestävimpien polttoaineiden hintojen voidaan olettaa nousevan, kun niiden tuotantoon ja myyntiin myönnettyt tuet ja verohelpotukset tulevat poistumaan [12]. Etenkin ensimmäisen sukupolven biopolttoaineisiin liittyy myös eettisiä ongelmia, sillä tuotantomenetelmät vievät tilaa ruuantuotannolta ja raaka-aineet ovat usein peräisin muutoinkin ongelmallisilta trooppisilta seuduilta. [17]

Sähköbussit tarjoavat vaihtoehdot perinteisille dieselkäyttöisille joukkoliikennevälineille. Ne ovat paikallisesti kasvihuonekaasupäästövapaita, mutta todellinen ilmastovaikutus riippuu tietysti sähkön tuotantotavasta. Uusiutuvilla energianlähteillä, kuten tuuli- ja aurinkoenergialla tuotetaan täysin päästötöntä sähköä. Jos sähköbussiliikenteen energiantarve pystytään kattamaan päästöttömillä energialähteillä, on ilmastovaikutus dieselbussihin verrattuna ilmeinen. [18]

Suomessa sähköntuotanto on melko vähäpäästöistä, sillä vuonna 2018 tuotannosta syntyi hiilidioksidia $105 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$, kun Euroopassa keskimääräiset hiilidioksidipäästöt ovat lähes kolminkertaiset. [19] Eurooppalaisella sähköntuotannollakin kuitenkin sähköbussin päästöt ovat vain puolet dieselbussin vastaavista, kun otetaan huomioon koko kulkuneuvon elinkaari. [20] Biopohjaisiin dieselihin verrattuna päästövähennyksiä ei välttämättä synny, jopa päinvastoin, mikäli ei käytetä täysin uusiutuvista energialähteistä tuotettua sähköä. Tämä selittyy pitkälti sähköbussien akkujen valmistuksen synnyttämällä päästöillä. [17]

Etenkin kaupunkiliikenteessä sähköiset kulkuneuvot ovat parhaimmillaan. Bussilinjat ovat usein pituudeltaan melko lyhyitä, kaupunkialueilla usein alle 20 km, joten pikalatauksella operoivienkin bussien toimintasäde riittää hyvin. Bussilinjojen etuna on tarkka reitti päätepiteineen, jolloin latauspisteiden sijainti on loogisesti helppo valita. Linjoilla liikennöidään yleensä tietyn aikataulun mukaisesti, joten ajosuoritteiden määrä ja pituus ovat tarkasti tiedossa, mikä helpottaa mitoitusta uutta kalustoa hankittaessa. Lisäksi liikennöinnistä tehdään usein pitkiä sopimuksia, joten valituilla linjoilla liikennöinti jatkuu varmasti tarvittavan kauan, jotta investointeja kannattaa tehdä. [21]

Sähköbussien kokonaisenergiankulutus on paljon pienempi kuin dieselkäyttöisillä kulkuneuvoilla, joten energiatehokkuus on parempi. Sähköbussi kuluttaa vain noin $1 \text{ kW}/\text{km}$,

kun dieselbussilla energiankulutus on noin nelinkertainen, 4 kW/km. Tämä näkyy tietysti myös liikennöinnin kustannuksissa, sillä energiansäästö tarkoittaa myös rahan säästöä. [2] Turussa on päästy jopa parempaan energiatehokkuuteen, sillä mittausten perusteella sähköbussin energiankulutus on noin 21 % uusimman mallin dieselbussien energiankulutuksesta [2]. Sähköbussin, kuten muidenkin bussien kulutukseen vaikuttavat kuitenkin monet tekijät. Suurin vaikutus on kuljettajan ajotavalla, pysähdysten määrällä ja keskimääräisellä ajonopeudella. [13]

Sähköbussit pystyvät varaamaan jarrutuksen aikana kerättyä energiaa akkuihin, mikä parantaa energiatehokkuutta. Runsaasti korkeuseroja sisältävät reitit kasvattavat kaiken tyyppisten bussien energiankulutusta, mutta sähköbussissa ero on pienempi, koska vastaavasti myös jarrutusenergiaa saadaan talteen enemmän. [22] Myös sähköbussien hyötysuhde on parempi, sillä polttomoottorimoottorin hyötysuhde on yleensä noin 35 % [23], ja sähköbussilla noin 90 % syötetystä energiasta saadaan moottorin käyttöön [14]. Myös häviöt ovat pienempiä kuin dieselbussissa. Sähkökäyttöisissä kulkuneuvoissa ei ole tarvetta vaihdelaatikolle, mikä on suuri syy korkeaan hyötysuhteeseen. Lisäksi jarrutusenergian talteenotto on tehokasta, kun moottoria voidaan suoraan pyörittää vastakkaiseen suuntaan. [18] Perinteinen suuri polttomoottori vie paljon tilaa bussin rungossa, joten sähköbussilla tilantarve on pienempi.

Yksinkertaisempi moottorin rakenne tarkoittaa vähemmän vioille alttiita komponentteja, joten sähköbussien huoltokustannukset ovat yleisesti ottaen alemmat kuin dieselkäyttöisillä kulkuneuvoilla. [21] Huoltokustannuksia säästyy, kun esimerkiksi öljynvaihtoa ei moottoriin tarvita [23]. Yksinkertainen rakenne parantaa myös ajo-ominaisuuksia, jotka tekevät sähköbussin kuljettamisesta helpompaa [24]. Alkuun sähköbussissa on todellisuudessa huomattu normaalia enemmän tarvetta huollolle, mikä selittyy uuteen tekniikkaan liittyvillä ennakoimattomilla ongelmilla.

Kaupunkiliikenteessä päästöttömyys lisää etenkin tiheiden alueiden asumismukavuutta. Lisäksi sähköbussien aiheuttama meluhaitta on pienempi, sillä niiden moottorin käynnistä ei aiheudu dieselmoottorin kaltaista kovaa ääntä, ainoastaan sähköbussien renkaiden vierinnän aiheuttama ääni. [18] Paikallispäästöttömyys ja hiljaisuus ovat sähköbussien kilpailuvaltteja myös esimerkiksi biodieseleihin verrattuna, sillä vaikka niillä kokonaispäästöt ovat normaalia dieselbussia pienemmät, paikallisesti ero ei ole suuri. [3]

Toistaiseksi sähköbussit ovat vielä dieseleitä kalliimpia, mutta teknologia kehittyy nopealla tahdilla ja samalla valmistajia on yhä enemmän ja kilpailu kovenee. Tämä tarkoittaa komponenttien hinnan laskua, millä on suuri vaikutus bussin kokonaiskustannuksiin. [14-

16] Esimerkiksi litiumioniakkujen hinta on laskenut jopa 80 % viimeisen 10 vuoden aikana. [25] Arvioiden mukaan maailmanlaajuisesti käyttöönotettavista uusista busseista noin 15 % tulee olemaan sähköisiä vuonna 2020. [26]

2.3 Sähköbussiliikennöinnin haasteet

Sähköbussit tarjoavat ympäristöystävällisen ja energiatehokkaan vaihtoehdon dieselbusseille, mutta toistaiseksi niiden osuus joukkoliikennevälineistä on hyvin pieni, maailmanlaajuisesti noin 1 %. Ensimmäiset modernit sähköbussit on otettu laajempaan käyttöön vuoden 2010 aikaan, joten teknologia on vielä varsin uutta ja kehittyvää. Uuden teknologian käyttöönottoon liittyy aina haasteita, esimerkiksi bussien käyttöaste on teknisten vikojen vuoksi vielä dieselbusseja alhaisempi. [10] Pikaladattavan sähkökäyttöisen bussin elinkaarikustannukset ovat keskimäärin noin 35 % korkeammat kuin dieselbussin, mutta tapauskohtaisesti erot vaihtelevat keskeisesti. Sähköbusseihin siirrytään pääsääntöisesti päästövähennyksien ja imago vaikutusten takia, mutta todellinen kilpailutilanne saavutetaan, kun myös niiden hinta on oikeasti kilpailukykyinen.

Laaja-alaista käyttöönottoa hidastaa myös todellisen kokemustiedon puute. Sähköbussit liikennöivät lähinnä pilottiprojekteissa yksittäisillä linjoilla, mikä vaikeuttaa saatujen tulosten yleistettävyyttä. Projektit ovat vielä pääosin kesken ja ne ovat sen verran nuoria, että pitkäaikaista ja luotettavaa tietoa esimerkiksi bussien ja latureiden elinkaaresta ei ole vielä saatavilla. Koska bussit kehittyvät suurin harppauksin, moni odottaa yhä sarjavalmistejaisia malleja, joissa ensimmäisen sukupolven ongelmat olisi korjattu ja jotka olisivat toimintavarmoja ja yhä kilpailukykyisiä myös tulevaisuudessa. [26] Lataussysteemeille ei ole vielä tarjolla mitään standardia, jonka mukaan laitteet toimisivat, mikä lisää entisestään epävarmuutta laitehankinnoissa ja jälleenmyyntimahdollisuuksissa. Jos muutaman vuoden päästä siirrytäänkin laaja-alaisesti täysin toisenlaiseen laturimalliin, kaikki hankinnat on tehtävä uudelleen. [27] Tällaiset seikat vaikuttavat etenkin liikennöitsijöiden halukkuuteen lähteä mukaan sähköbussiliikenteeseen.

Pikalatauksella käytettävien sähköbussien akkukapasiteetti riittää yhdellä latauksella noin 20–40 km ajoon, mikä tulee ottaa huomioon jo reittisuunnittelussa. Jotta akun käyttöikä ja syklinkesto pysyy riittävällä tasolla, ei akun varaus saisi laskea lähelle nollaa. Toisaalta akku ladataan pikalatauksella yleensä maksimissaan noin 80 % varaustiheyteen. Koska bussien ajomatka on pituudeltaan näin lyhyt, ne sopivat vain osalle reiteistä ja ovat herkkiä häiriöille. Jo latureiden sijoittelussa ja mitoituksessa tulee ottaa huomioon vikatilanteet: pystytäänkö liikennöintiä jatkamaan, jos esimerkiksi toinen päätepestausasema kaatuu. [21]

Sähköbussivalmistajia on dieselbusseihin verrattuna vielä vähän, ja bussien investointikustannukset ovat noin kaksinkertaiset dieselbussiin verrattuna. [21] Osittain korkeampi hinta selittyy kilpailun vähyydellä uusilla markkinoilla, mutta nykyään etenkin kiinalaiset valmistajat tarjoavat jo merkittävästi edullisempia sarjavalmistettavia vaihtoehtoja. Halvimmatkin mallit ovat kuitenkin dieselbusseja kalliimpia, sillä akkujen osuus hinnasta on varsin suuri. Pikaladattavien mallien hinta on kuitenkin kaapeliladattavia matalampi, sillä akun kokoa voidaan huomattavasti pienentää, kun latausväli on lyhyt. [23]

Etenkin pikaladattavia sähköbusseja suunnitellessa täytyy ottaa huomioon myös latausinfraan aiheuttamat kustannukset. Pikalatauslaitteet vaativat muuntamon ja laturin ja vielä varsinaisen latauslaitteen. Nämä nostavat sähköbussien hintaa etenkin, jos latauspiisteitä tarvitaan paljon ja ne ovat vain muutamien bussien käytössä. [21] Mikäli laturi saadaan useamman linjan ja bussin käyttöön, on sen hankintakustannusten osuus kokonaiskustannuksista aina pienempi.

Suomen sääolot aiheuttavat haasteita kaikelle liikenteelle, mutta erityisesti sähköbusseille. Talviaikaan busseissa tarvitaan tehokasta lämmitystä, ja toisaalta kesäolosuhteissa ilmastointi on välttämätön matkustajien mukavuuden ja kuljettajan inhimillisten työolojen takaamiseksi. Useissa pohjoisiin oloihin tarkoitetuissa busseissa on sähköllä toimiva lisälämmitin ja/tai ilmalämpöpumppu, mutta edelleen myös dieselkäyttöinen lisälämmitin. Kylmissä talvioloissa jopa puolet auton kokonaisenergiankulutuksesta menee lämmityksen tuottamiseen, ja diesel lämmitin on toimintavarmoin, joten se on edelleen käytetyin lämmitysmuoto. [2] Sähkökäyttöisillä ilmalämpöpumpuilla ei toistaiseksi ole päästy samoihin hyötysuhteisiin kuin kiinteistöjä lämmitettäessä, ja niiden toimintavarmuus on ollut riittävää vasta melko lämpimissä olosuhteissa. Dieselpohjainen lämmitys asettaa kyseenalaiseksi sähköbussien käytöstä saadut ympäristöhyödyt.

Kylmät sääolot lisäävät myös bussin muuta energiankulutusta, mutta vaikutus on lämmitystarpeeseen nähden pienempi. Lisääntynyt energiankulutus selittyy lähinnä teiden lumen tai loskan aiheuttamasta kitkan kasvusta. Latauslaitteille kylmät sääolot ovat myös ongelma, laitteet eivät ole yhtä toimintavarmoja ja jään kertyminen voi estää niiden käytön kokonaan. [2] Toisaalta vaihtelevat sääolot vaativat myös latureiden ja akkujen lämpötilan säätelyä. Kesäaikaan ja laitteiden ollessa pitkään päällä, niitä täytyy jäähdyttää ylikuumentumisen estämiseksi. Vastaavasti aamun ensimmäisinä tunteina ja kovilla pakkasilla akut ja laturit tarvitsevat lämmitystä toimiakseen optimaalisesti. Sähköbussit eivät tuota polttomoottorien tapaan hukkalämpöä, jota voitaisiin hyötykäyttää muuhun lämmitykseen. Oikealla toimintalämpötilalla laitteiden käyttöikä voidaan pidentää olennaisesti. [28]

Suomessa ja muualla pohjoismaissa iso osa kaupunkiliikenteestä ajetaan noin 15 m pitkällä kolmiakselisilla telibusseilla, mutta muualla tämän tyyppisiä ajoneuvoja ei ole juuri käytössä. Tällöin siirtyminen maailmalla yleisempiin joko 12- tai 18-metrisiin sähköbusseihin telibusseilla liikennöidyillä reiteillä vaikuttaa matkustajakapasiteettiin ja esimerkiksi pysäkkien mitoitukseen. Yksittäisen bussin matkustajakapasiteettimuutos vaikuttaa täten koko linjan kapasiteettiin ja vaatii usein muutosta aikataulutukseen. Markkinoille on juuri tullut ainakin kahdelta valmistajalta sähköisiä telibusseja, mutta ne ovat vielä käytössä yksittäisillä kokeilulinjoilla.

Käytettäessä pikalatureita bussilinjojen liikennöinnissä tulee huomioida latauksen vaatima aika latauspisteellä. Bussien koon lisäksi tämä on tärkeä tekijä, joka on otettava huomioon aikataulusuunnittelussa ja linjastojen sähköistyksessä. Jos dieselbusseilla liikennöidyillä linjoilla aikataulu etenkin päätepysäkeillä on tiukka, voi sähköbusseihin siirtyminen tarkoittaa aikataulumuutoksia, jotka usein aiheuttavat lisäkustannuksia. Mikäli yksittäisen ajokierroksen pituus kasvaa, kasvaa aina myös kuljettajan työaika ajettua vuoroa kohden, mikä tarkoittaa palkkakulujen kasvamista. Mikäli linja- ja autokiertoaikataulut ovat hyvin tiukkoja, ei linjoja voida sähköistää ilman lisäbussien hankintaa, mikä tarkoittaa suurta korotusta kustannuksiin. [23, 26]

2.4 Sähköbussien markkinatilanne ja valikoima

Tässä luvussa on kerätty yleistä tietoa markkinoilla olevista sähköbussimalleista. Vaikka kaupunki ei Turun tapauksessa varsinaisesti osallistuisi bussien hankintaan, on hyvä tietää, minkälaisia vaihtoehtoja tällä hetkellä on saatavilla. Tämä helpottaa esimerkiksi laturiverkoston suunnittelua ja mitoitusta, kun osataan arvioida bussien latauskohtaisia ajomatkoja. ZeEUS 2 raporttiin [11] on kerätty kattavat tiedot vuonna 2016 markkinoilla olleista ja silloin tiedossa olleista tulevista malleista. Jo tuolloin vähintään 55-paikkaisia sähköbusseja oli saatavilla 29 valmistajalta ja malleja oli yli 70. Koska uusia malleja tulee markkinoille koko ajan, on tämänhetkinen tarjonta todennäköisesti ainakin 100 bussimallia. Taulukoihin on kerätty esiteltäväksi malleja suurimmilta valmistajilta ja mahdollisimman erilaisin ominaisuuksin, jotta voidaan saada laaja käsitys valikoimasta.

Valmistajien sivuilla on usein hiukan vaihtelevia tietoja, kaikkea vertailukelpoista tietoa ei pääosin ole saatavilla helposti. Etenkin bussien toimintasäteen suhteen valmistajien antamaan arvioon kannattaa suhtautua varauksella, sillä toimintasäteeksi on usein ilmoitettu optimaalisissa oloissa ilman lämmitystä tai ilmastointia ja turhia pysähdyksiä tai suuria korkeuseroja saatu tulos. [9] Useat valmistajat eivät ilmoita lainkaan akun tai käytettävän laturin kokoa esitteissään tai verkkosivuillaan. Tämä johtuu pääosin siitä, että tilaaja voi vaikuttaa näihin seikkoihin vielä hyvin paljon. Valmistajalle harvoin on suurta

merkitytystä näillä asioilla ja bussit voidaan pienin muokkauksin saada sopimaan hyvin vaihtelevalle kapasiteetille. Joitain raja-arvoja on kuitenkin yleensä saatavilla, ja suuri osa valmistajista tarjoaa jotain ensisijaista mallivaihtoehtoa, joka usein on varikkoladattava versio.

Seuraavissa alaluvuissa on taulukoissa 1, 2 ja 3 koottuna esimerkibussimallit. Nimistä on useissa esiintyvä *electric* jätetty pois selkeyden vuoksi, sillä muut kuin täyssähköbussit on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Taulukoissa esitetty laturiteho on valmistajan suositus, usein myös muita vaihtoehtoja voidaan käyttää. Tarkemmat tiedot, esimerkiksi bussien mitat, paino ja moottoritiedot on listattu liitteessä A, joskin kaikkia tarvittavia tietoja vertailua varten ei ollut saatavilla.

2.4.1 12-metriset sähköbussit

Kaikki sähköbussivalmistajat tarjoavat ensisijaisesti 2-akselisia noin 12–13-metrisiä malleja, jotka ovat maailmanlaajuisesti yleisin tyyppi myös dieselbussien keskuudessa. Alla taulukossa 1 on koottuna muutamien bussiyhtiöiden tarjoamia malleja, mukaan on valittu pääasiassa toimittajia, joilla on useampi kuin yksi malli saatavilla, jotka tarjoavat pikaladattavia malleja tai ovat esimerkiksi käytössä Pohjoismaissa tai muuten relevantteja. Suomessa on tällä hetkellä liikenteessä ainakin BYD:n, Cataeno Busin, Ebuscon, Linkkerin, Solaris Bus & Coachin ja VDL Bus & Coachin valmistamia 12-metrisiä sähköbussseja. [29]

Taulukko 1. 12-metristen sähköbussien ominaisuuksia

Malli	Akun koko [kWh]	Laturityyppi	Laturin teho [kW]	Muuta	Lähde
VDL Citea	85–180	Pika	max 360	Useita akku- ja laturivaihtoehtoja	[11, 30]
Solaris Urbino	max 240	Varikko/ Pika	120 (varikko) 450 (pika)	Ei vakioituja akkuja	[11, 31]
Ebusco	362	Varikko	75/120	Saatavilla jopa 475 kWh akuilla	[11, 32]
Irizar ie	90/185	Pika	450	Myös varikkoladattavana	[33]
BYD ADL enviro200EV	324	Varikko	80		[11]
BYD ADL enviro400EV	382	Varikko	80	Kaksikerros, pituus 10,9m	[34]
Linkker	55–79	Pika	300–480	Turun nykyinen malli	[11]
Hybricon Haw	40–120	Varikko/ Pika	20/650	Superpikalataus (min 15 s)	[35]
Ursus City Smile	105	Pika	625	Superpikalataus (min 15 s)	[36]
Volvo	76	Pika	300		[37]
Yutong	295	Varikko	60	Tilattu Helsinkiin	[38]

Taulukosta 1 voidaan nähdä, että akkukapasiteetit vaihtelevat olennaisesti bussien lataustavan muuttuessa, ero pienimmän ja suurimman akun välillä on yli 300 kWh. Tärkeämpää onkin vertailla saman lataustavan laturi- ja akkukapasiteettien eroa ja niiden keskinäistä suhdetta. Erilaiset akkumateriaalit kestävät erilaisia lataustehoja, joten vaihteluväli on tärkeä huomioida mitoituksessa. [11]

Taulukosta nähdään myös, että tarjolla on ”superpikaladattavia” malleja, joiden ideana on ladata akkuja yli 600 kW teholla hyvin lyhyitä aikoja, esimerkiksi normaali pysäkkiajan, jolloin matkustajat nousevat kyytiin. Tällaiset vaihtoehdot sopivat erityisesti suuriin kaupunkeihin, joissa linjat kulkevat useiden liikenteen solmukohtien kautta. Näissä solmukohtissa asiakkaiden vaihtuvuus on huomattavasti suurempaa kuin tavallisilla pysäkkeillä, jolloin pidempi pysähdysaika voitaisiin tehokkaasti käyttää lataukseen ja samaa laturia voi hyödyntää monta linjaa.

2.4.2 15-metriset sähköbussit

15-metrisiä 3-akselisia telibusseja ei juuri käytetä pohjoismaiden ulkopuolella, joten niiden tarjonta sähköisenä on varsin vähäistä, eikä malleja löydy esimerkiksi suurilta kiinalaisilta valmistajilta. Muutama eurooppalainen yritys on kuitenkin ottanut valikoimiinsa telibussit, joilla saataisiin teoriassa Suomen oloissa sähköistys hoidettua ilman muutoksia matkustajakapasiteettiin tai aikataulutukseen. [34]

Taulukko 2. 15-metristen sähköbussien ominaisuuksia

Malli	Akun koko [kWh]	Laturi-tyyppi	Laturin teho [kW]	Muuta	Lähde
VDL Citea	288	Pika	-	Suunniteltu varikkoladattavaksi	[11, 30]
Irizar ie	150/260	Pika	500-600	Myös varikkoladattavana	[33]

Molemmat taulukossa 2 näkyvät mallit ovat vasta tulleet tai tulossa markkinoille, joten niistä ei ole yhtä tarkkoja teknisiä tietoja saatavilla kuin yleisemmistä bussimalleista.

2.4.3 18-metriset sähköbussit

18-metristen bussien käyttö Suomessa on melko vähäistä, sillä niiden matkustajakapasiteetti ei ole olennaisesti suurempi kuin yleisemmin käytetyillä telibusseilla. Bussit ovat kaksiosaisia nivelbusseja, eli niiden keskiosa taittuu, mikä mahdollistaa kääntymisen suunnilleen samalla säteellä kuin 12-metrisilläkin busseilla. Muualla maailmassa näitä on käytössä enemmän, ja siksi valikoimaa on kuitenkin melko paljon, muutamia sähköisiä vaihtoehtoja esitettynä taulukossa 3.

Taulukko 3. 18-metrinen sähköbussien ominaisuuksia

Malli	Akun koko [kWh]	Laturityyppi	Laturin teho [kW]	Muuta	Lähde
VDL Citea	85–248	Varikko/ Pika	max 480		[11, 30]
Solaris Urbino	max 240	Varikko/ Pika	120 (Varikko) 450 (Pika)	Ei vakioituja akkuja	[31]
Ebusco	362	Varikko	75/120	Saatavilla jopa 475 kWh akuilla	[32]
Irizar ie	150/260	Pika	500–600	Myös varikkoladattava malli	[33]
BYD 18m Articulated	Ei tiedossa	Varikko	80	Saatavilla myös pikaladattavana	
Hybricon Haw	40–120	Pika	650	Superpikalataus	
Ursus	105	Pika	625	Superpikalataus	

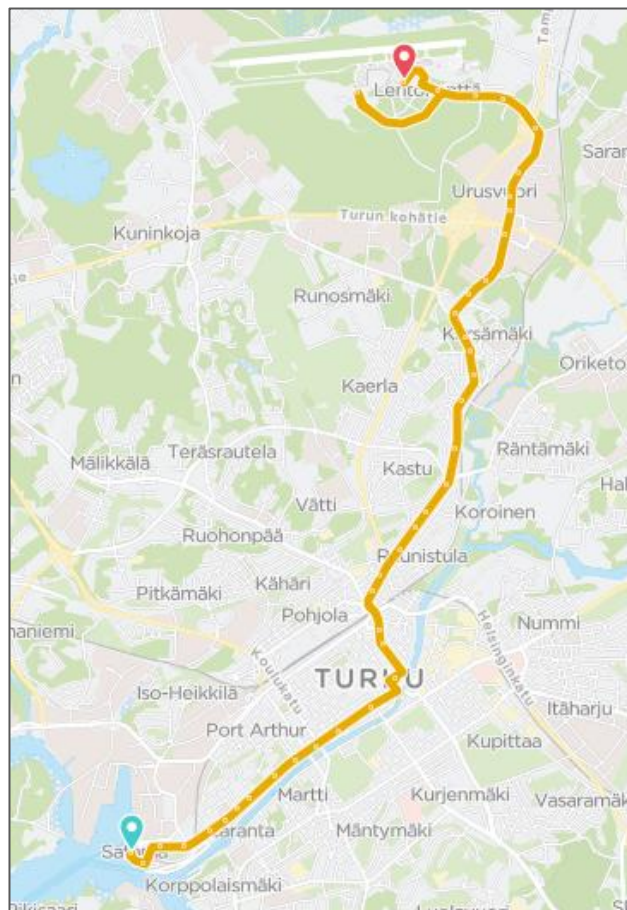
Edellä ei siis ole esiteltyä kaikki markkinoilla olevat mallit, mutta kuten taulukoista voi huomata, on vaihtelua akkujen ja laturitehojen välillä varsin paljon. Nivelbussit tarvitsevat yleisesti ottaen toki muutenkin suuremmat akut, sillä kulutus on suuremman painon takia korkeampi. Nivelbussien kulutuksesta ei ole saatavilla yhtä laajaa määrää dataa kuin lyhemmistä malleista, mutta keskimäärin kulutus on noin kaksinkertainen 12-metriseen bussiin verrattuna. [39] Tämän takia pikaladattavat vaihtoehdot ovat yleisempiä kuin pienemmissä busseissa, sillä varikkolatauksella riittävän päiväsuorituksen mahdollistaminen vaatii useiden satojen kilowattituntien akkukapasiteettia. Hybricon tarjoaa nopealla pikalatauksella ladattavaa nivelbussia vain 40 kWh akulla, jolloin tarkoitus on ladata bussia useilla pysäkeillä matkan varrella. Ebusco taas tarjoaa mallia, jonka akku on kapasiteetiltaan lähes 12-kertainen Hybriconiin verrattuna, tällä mallilla on tarkoitus saavuttaa suuri päiväsuorite yhdellä yön aikana tapahtuvalla latauksella. Kumpikin näistä malleista edustaa ääripäitä, eikä todennäköisesti ole taloudelliselta kannalta ensimmäisiä harkittavia vaihtoehtoja.

Markkinoilla on myös 18- ja 24-metrisiä sähköisiä busseja, jotka on tarkoitettu lähes raitiotiemäiseen superbussiliikennöintiin. Nämä poikkeavat ulkonäöltään ja ominaisuuksiltaan jonkin verran tavallisista busseista, esimerkiksi latausta on tarkoitus suorittaa korkeatehoisilla pikalatureilla tiheästi lähes joka pysäkillä lyhyitä aikoja kerrallaan. Erilaisen käyttötarkoituksen vuoksi nämä bussit on jätetty tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

3. TURUN TILANNE JA LAAJENTAMISEN LÄHTÖKOHDAT

3.1 Tämänhetkinen sähköbussiliikenne Turussa

Turussa joukkoliikenteen tilaajana ja suunnittelijana toimii Turun seudun joukkoliikenne Föli. Tällä hetkellä Turussa liikennöidään yhtä linjaa normaalikäytössä täysin sähköisesti. Linjan valinnasta tehtiin 2014 diplomityö [40], jossa löydettiin neljä potentiaalista linjavaihtoehtoa. Lopulta liikennöintiin valittiin linja 1, joka kulkee satamasta kauppatorin kautta lentokentälle ja takaisin. Linjan liikennemäärä oli sopivan laaja todellisten tulosten saamiseksi, mutta toisaalta riittävän matala, jotta riskit pysyivät hallinnassa. Linjan etuna on myös sen vakaus yhtenä Turun sisäisistä runkolinjoista. [41] Reitin sijainti Turun kartalla on esitettyinä kuvassa 3.



Kuva 3 Linjan 1 reitti kartalla, lähteestä [42].

Ensimmäiset sähköbussit tulivat käyttöön vuoden 2016 lokakuussa ja kaikki tilatut autot olivat liikenteessä kesäkuussa 2017. Liikennöintiä hoitaa ja bussit omistaa Turun kau-

punkiliikenne Oy, joka on kaupungin omistama yritys. Ensimmäiselle linjalle haluttiin kaupungin sisäinen toimija, jotta esimerkiksi tiedonkulku ja hankintojen jakautuminen olisi mahdollisimman helposti hoidettavissa. Mukana bussiliikenteen sähköistämiseen tähtäävässä eFöli-hankkeessa on ollut kaupungin lisäksi muun muassa Civitas Eccentric ja Turun ammattikorkeakoulu. [2]

Linjan yhdensuuntainen pituus on 12,6–12,8 km, ero johtuu keskustan alueen ajoreittien eroista. Toukokuussa 2019 sähköbussilla oli ajettu yhteensä 1 000 000 km, mikä tarkoittaa noin 1000 tonnin vähennystä hiilidioksidipäästöihin dieselbussihin verrattuna [5]. Sopimuskausi liikennöitsijän kanssa kestää 7 vuotta, vuoteen 2023 asti, jonka jälkeen sopimusta voidaan jatkaa kolmen vuoden optiolla. [2]

Linjalla liikennöi kuusi autoa arkisin ja lauantaisin, sunnuntaisin ja pyhäpäivinä kolme. Ruuhka-aikaan, laivojen saapuessa, sataman ja keskustan väliä liikennöidään lisäksi dieselbussilla. Sähköbussit on valmistanut suomalainen Linkker, joka voitti monivaiheisessa tarjouskilpailussa VDL Bus & Coach:n ja Volvon Finland AB:n. Bussit ovat 12,8 m pitkiä, aiemmin liikennöintiä hoidettiin 15-metrisillä telibusseilla, mutta niitä ei ollut vielä 2015 saatavina sähköisinä. Autoissa on alumiininen runko, joten niiden paino on vain 10 500 kg, ja maksimikuorma 5500 kg. Busseissa on 40 istumapaikkaa, ja kokonaiskapasiteetti on 69 matkustajaa. [2] Kuvassa 4 esitettynä yksi käytössä olevista sähköbussista sataman päätepysäkillä.



Kuva 4 Bussi latauksessa sataman päätepysäkillä

Linjalla 1 on kaksi huipputeholtaan 300 kW:n pikalaturia, jotka sijaitsevat kummassakin päätepisteessä ja latausaika on keskimäärin noin kolme minuuttia kerrallaan. Lisäksi varikolla on jokaiselle autolle oma maksimikuormaltaan 55 kW:n varikkolatauspiste, jossa

busseja ladataan öisin. Pikalatureissa pantografi laskeutuu lataustelineestä ja latauskiskot sijaitsevat bussin keulaosassa katolla. Bussien akkujen koko on 55 kWh, mikä tarkoittaa busseille noin 40 km toimintasädetä todellisissa olosuhteissa. Laturit ovat Helioxin valmistamia ja paikallisen sähköyhtiön, Turku Energian, omistuksessa. [2] Bussien aikataulukiertoon lisättiin 5 minuuttia ylimääräistä päätepysäkille latausta varten [41].

Bussien liikennöintiin kuluttama energia on ollut vuoden 2019 keväällä keskimäärin 1,00 kW/km, vaihdellen auton ja ajankohdan mukaan välillä 0,74–1,19 kW/km. Talven kylmimpinä viikkoina kulutus on ollut noin 1,10 kW/km. [43] Tämä ei kuitenkaan ole sama kuin verkosta otettu teho, sillä bussiin ladatun sähkötehon hyötysuhde on noin 80 %. Hyötysuhde on noussut alun pahimmillaan alle 60 % lukemista paljolti liikennemäärien kasvun myötä, sillä kiinteät häviöt jakautuvat suuremmalle latausmäärälle. [2]

Tällä hetkellä suurimpana haasteena on bussien suuri lisälämmityksen tarve talviaikaan. Koko vuoden keskiarvo diesellämmittimen kulutukselle on 0,32 kWh/km [2], talviaikaan kovimmilla pakkasilla dieselin kulutus on ollut 8,2–9,4 l/100 km, keskimäärin 8,9 l/100 km [44]. Talvikulutukseksi voidaan siis arvioida noin 0,9 kW/km. Busseissa on myös ilmalämpöpumput, mutta niiden toiminnassa on ollut suuria ongelmia, mikä on vaikuttanut etenkin kuljettajien työoloihin. [2] Diesellämmittimen käyttö ei ole ihanteellista tilanteessa, jossa sähköbusseilla on tarkoitus vähentää päästöjä ja riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Sähköbussi ei kuitenkaan tuota hukkalämpöä dieselmoottorin tavoin, joten lämpö on tuotettava erikseen. [28]

Alkuun suurena ongelmana ovat olleet myös keskeytyneet lataukset, joiden syitä ei aina ole pystytty tarkasti selvittämään. Ongelmat latauksessa vähentävät systeemin luotettavuutta ja aiheuttavat kuljettajalle ylimääräistä kuormitusta. [2] Lataustapahtuman keskeytyminen vie myös ylimääräistä aikaa, sillä uutta latausta ei voi aloittaa, ennen kuin laturi on palautunut ensin yläasentoon, ja sitten kuljettaja voi aloittaa uuden latauksen. [28]

Bussit eivät ole myöskään saavuttaneet ennen kokeilun aloittamista asetettuja tavoitteita ajomäärille, noin 70 % ajopäivistä on ylittänyt ajokilometreiltään tavoitteellisen 275 km. Pienimpään arvoon on jääty talvikuukausien aikana. Vuonna 2018 helmikuun onnistuneiden ajopäivien määrä oli vain noin 40 % elokuun onnistuneista ajopäivistä. Yllättävät käyttötauat lisäävät myös vara-autojen tarvetta, ja aina sähköbussille ei ole ollut korvaavaa dieselbussia saatavilla. Yksi isompi laturivika vähensi huomattavasti ajosuoritteita, mutta suuri osa poissaoloista liikenteestä johtuu muuhun kuin varsinaisesti bussien voi-

mansiirtoon tai lataukseen liittyvistä ongelmista. Tällaiset ongelmat esimerkiksi lämmityksen kanssa haittaavat kuitenkin sähköbussien mainetta, sillä matkustajat helposti yhdistävät viat nimenomaan sähköbussiin. [2]

3.2 Sähköbussiliikenteen laajentamisen tavoitteet

Turun seudun asukasmäärän odotetaan kasvavan noin 50 000 asukkaalla vuoteen 2029 vuoden 2015 tasosta ja yli 80 000 asukkaalla vuoteen 2050 mennessä. Myös työpaikkojen määrä tulee kasvamaan. Etenkin keskustan alueella ja sisääntuloväylillä rakentaminen on niin tiivistä, ettei autokapasiteettia voida nykyisestä tasosta juuri kasvattaa. Kasvavan ihmismäärän liikkuminen paikasta toiseen hoituu parhaiten julkisilla liikennevälineillä, joilla sama ihmismäärä saadaan mahtumaan vain murto-osaan henkilöautojen vaatimasta liikennetilasta. [4]

Suomen on toimittava edelläkävijänä ilmastonmuutoksen ehkäisemisessä, ja pyrittävä kehittämään ratkaisuja päästöjen pienentämiseen ja energiatehokkuuden lisäämiseen, sillä kehittyneet maat ovat myös tuottaneet ratkaisevan osan ilmakehän päästöistä [1]. Turku pyrkii olemaan hiilineutraali vuonna 2029. Liikenne tuottaa noin 20 % Turun päästöistä, ja vaikka julkinen liikenne on tästä vain pieni osa, on sen avulla helppo pienentää päästöjen määrää. [6] Muuttamalla julkista liikennettä ekologisemmaksi, tehokkaammaksi ja luotettavammaksi, siitä on mahdollista tehdä myös houkuttelevampi vaihtoehto, jolloin yksityisautoilun päästöihin voitaisiin vaikuttaa välillisesti [25].

EU-direktiiviesitys vaatii sähköbussien osuuden kasvattamista julkisessa liikenteessä hyvin nopealla aikataululla. Suomessa vuonna 2021 alkavissa kilpailutuksissa jokaisessa sopimuksessa päästöttömien kulkuneuvojen määrä on oltava 41 %, joista puolet täysisähköisiä. Vuodesta 2026 jokaisessa kilpailutuksessa vaihtoehtoisilla polttoaineilla kulkevien kulkuvälineiden osuus on oltava jo 59 %, josta puolet täyssähköisiä. Kyseessä on nimenomaan liikennöivien bussien määrä, ei ajosuoritteiden osuus ja vaatimus koskee busseja, joissa on seisomapaikkoja, eli rajoittuu käytännössä kaupunkiliikenteeseen. Muilla ajoneuvotyypeillä prosenttimäärät poikkeavat näistä. Tämä vaatii merkittäviä uudistuksia koko bussiliikenteille kaupungeissa. Suomi voi itse jossain määrin vaikuttaa siihen, miten direktiiviä noudatetaan. Esimerkiksi mitkä vaihtoehtoiset polttoaineet ovat hyväksyttäviä ja mitkä eivät. Tässä vaiheessa esimerkiksi maakaasukäyttöiset kulkuneuvot täyttävät direktiiviehdotuksen vaatimukset, mutta palmuöljypohjaiset biodieselit eivät. Joka tapauksessa täyssähköisten linja-autojen osuutta kaupunkiliikenteessä tulee kasvattaa merkittävästi, jotta direktiivin vaatimukset täyttyvät. [7] Direktiiviesitystä ei ole vielä hyväksytty, mutta sen oletetaan menevän läpi lähes sellaisenaan.

Vaikka sähköbussien kanssa on ollut nykyisellä pilottilinjalla pieniä haasteita, on liikennöinti pääosin sujunut hyvin ja virheistä on saatu paljon hyödyllistä lisätietoa. Toivottuja pienennyksiä päästöihin on saavutettu. [2] Markkinatilanne on myös muuttunut kehityvällä alalla olennaisesti, sillä nykyään sähköbusseja löytyy yhä useammalta valmistajalta, ja mallien valikoima on varsin laaja. Muutama yritys valmistaa busseja jo sarjatuotannolla, millä on saatu kustannuksia laskettua ja laajemman liikennöinnin myötä tutkimustieto aihepiiriin liittyen on lisääntynyt.

Sähköbussien lisäksi liikenteen päästöjä täytyy vähentää myös muista julkisen liikenteen kulkuneuvoista. Tähän tulee ratkaisuna olemaan todennäköisimmin biodiesel. Sen etuna on sen sopivuus nykykaluston käyttöön, jolloin linja-autoilla pystytään ajamaan riittävän pitkään ja niiden toimintasäde on tarkkaan tiedossa, vaikka biodieselin energiatiheys on hieman fossiilista pienempi. Biodieseliin liittyy kuitenkin haasteita, esimerkiksi riittävyyden takaaminen, jos käyttö yleistyy kaikkeen liikenteeseen. Etenkään puhtaasti jätteestä tuotettu biodiesel, joka olisi kaikkein ympäristöystävällisin vaihtoehto, ei ole kapasiteetiltaan kovin suuri. [12] Biodieselin tuottaminen kasviöljystä on eettisesti ja ekologisesti jokseenkin kestävämpi metodi. Pariisin sopimuksessa vaaditaan päästöjen vähentämistä keinoilla, jotka eivät uhkaa ruuantuotantoa, joten kasviöljypohjaisten polttoaineiden käyttö ensisijaisena polttoaineena ei myöskään ole pitkäaikainen ratkaisu [1].

3.3 Linjojen valintaperusteet

Lähtökohtaisesti halutaan, että bussit ladataan päätepisteillä pikalatureilla, sillä se on käytössä todettu toimivaksi menetelmäksi ja nykyisiä kokemuksia voidaan hyödyntää uuden latausverkon suunnittelussa. Varikkolatausta ei kokonaan suljeta pois vaihtoehtojen joukosta, sillä sen avulla mahdollistettaisiin laajempi toimintasäde, ja nykybusseissa akkujen kapasiteetti riittää jo melko suuriin päiväsuoritteisiin. Pikalatauksen vaikutus akun käyttöikäen on hyvin vähäinen, vain muutamia prosentteja, joten autojen tai akkujen elinkaareen tekniikan valinnalla ei ole suurta merkitystä. [45]

Tässä selvityksissä rajataan ulkopuolelle ne linjat, joiden päätepisteet ovat Turun kaupungin ulkopuolella (esim. Naantalın, Raision ja Kaarinan linjat), sillä näissä esimerkiksi hankintojen ja kulujen jakautuminen kuntien kesken vaatisi laajempaa selvitystä. Tarkoitus on ensin saada sähköbussiliikenne toimimaan kunnolla useammalla linjalla Turun sisällä, jonka jälkeen on mahdollista lähteä laajentamaan toimintaa ympäröiviin kuntiin.

Työn tarkoituksen ei ole keskittyä erityisen tarkasti ja liikennesuunnittelulähtöisesti linjojen valintaan, vaan apuna käytetään esimerkiksi Lehtisen diplomityössään [40] käyttämiä

valintaperusteita hyvälle sähköbussilinjalle. Lisäksi valinta rajataan uuden linjauudistuksen runkolinjoihin. Näistä muutama ulottuu Turun ulkopuolelle, joten ne karsitaan laskennasta. Hyvän sähköbussilinjan ominaisuuksia ovat esimerkiksi tiheä liikennöinti, jolloin autokohtaiset päiväsuoritteet ovat riittävän suuret kompensoimaan suuria investointikustannuksia, sekä sopiva linjan pituus, jolloin latureiden ja akkujen kapasiteetti voidaan pitää taloudellisesti järkevissä rajoissa. [40]

Etuja linjan sähköistämiseksi on sen päätepisteiden sijainti muiden linjojen suhteen, sillä laturit saadaan tehokkaampaan käyttöön, mikäli useampi kulkuneuvo käyttää niitä. Toki vilkkaasti liikennöidyillä linjoilla on mahdollisesti tarvetta useammallekin laturille, jotta aikataulut saadaan järjestettyä tehokkaasti.

Sähköbussien ja latausinfraan hankintakustannukset ovat suuremmat kuin dieselbussilla, mutta liikennöintikustannukset kilometriä kohden ovat vain noin neljäsosa dieselbussin kuluista [23]. Tämän takia sähköbussilla on ajettava riittävän pitkiä päivä- ja vuosikohtaisia suoritteita, jotta ne olisivat todellisuudessa kilpailukykyisiä dieselbussien kanssa. Kaikkia linjoja ei ole taloudellisesti järkevää edes sähköistää ja esimerkiksi pitkillä useiden kymmenien kilometrien pituisilla linjoilla tulisi liikennöidä biopohjaisia polttoaineita käyttävillä busseilla. Kaikilla eri voimanlähteitä käyttävillä kulkuneuvoilla on omat etunsa ja haasteensa, ne on tärkeä tunnistaa rationaalisten päätösten tekemiseksi. Tällöin myös päästöt on mahdollista saada lähes yhtä alas kuin pelkkiä sähköbusseja käyttämällä, kun valitaan kullekin reitille parhaiten sopiva vaihtoehto. [17]

Sähköistystä mietittäessä on otettava huomioon linjan aikataulusuunnitelma, sillä lataus vaatii normaalilinjaan verrattuna enemmän aikaa päätepysäkeillä. Bussien liikennöinnissä kuljettajien palkkakustannus on yksi merkittävimmistä menoeristä, siksi sen määrää olisi hyvä pyrkiä minimoimaan mahdollisimman tehokkaasti. Palkkakustannukset eivät toki riipu liikennevälineen energianlähteestä, mutta kaikki lisäykset työtuntitarpeeseen lisäävät myös palkkakuluja. Tällöin on tärkeää, ettei odotusaika linjan päässä kasva paljoa nykyisestä, koska tällöin kuljettajan työajan tarve päätepysäkillä pitenee ilman, että mitään saadaan varsinaisesti vastineeksi. [26] Jos Turussa jokaisen linjan päätepisteelle lisättäisiin 5 min enemmän aikaa, tämänhetkisillä linjoilla se tarkoittaisi 3 miljoonan euron vuosittaisia lisäkustannuksia. Jos päätepisteiden kääntöajat ovat liian tarkkaan mitoitettu, ei lataukselle jää aikaa tarpeeksi, jolloin tarvittavan vuorovälin saavuttamiseksi tarvittaisiin lisäauto linjalle. Tästä syntyisi merkittävän hankintahinnan lisäksi taas lisäkustannuksia myös tarvittavan ylimääräisen kuljettajan palkassa. [46]

Tällä hetkellä Turussa liikennöidään pääasiassa kolmeaksellisilla noin 15 metriä pitkillä telibusseilla, joten siirtyminen pääosin 12-metrisiin sähköbusseihin vaikuttaa keskeisesti

matkustajakapasiteettiin. Telibussit ovatkin käytössä pääasiassa vain Pohjoismaissa, muualla käytetään lähinnä 12-metrisiä busseja ja suurempia 18-metrisiä nivelbusseja. 18-metriset bussit vaativat muutoksia muun muassa pysäkkien suunnitteluun, sillä etenkin kaupunkialueella pysäkkien koko on optimoitu tarkkaan, eivätkä useita metrejä pidemmät bussit mahdu pysäkeille. 12-metriseen bussiin mahtuu istuinjärjestelyistä riippuen noin 75–90 matkustajaa, telibussiin noin 100–120 ja nivelbussiin noin 130–150. Istumapaikkoja vähentämällä voidaan lisätä matkustajien kokonaismäärää, mutta etenkin pidemmillä linjoilla istumapaikat lisäävät matkustusmukavuutta. Nivelbusseissa matkustajamäärää rajoittaa myös itse nivelen kohdalla oleva tila, johon ei voida sijoittaa istuimia kääntyvän lattian ja liikkuvien seinien vuoksi. [30, 33]

Kilpailutuksessa liikennöintisopimukset linjoille ovat useita vuosia pitkiä, eikä vaatimuksia sähköistyksestä voida esittää kesken sopimuskauden. Todennäköisesti on helpoin aloittaa linjoista, joiden sopimuskausi on tulossa muutoinkin päätökseen seuraavien parin vuoden aikana. Helsingissä on jo ensimmäinen linja, jolla on siirrytty sähköbusseihin taloudellisista syistä, tämä tietysti tulee sallia kilpailutuksessa, mikäli markkinatilanne todella muuttuu sähköbussien kannalta kokonaisedullisempaan suuntaan.

Sähköbussilinjojen valinnassa täytyy ottaa huomioon myös ulkopuoliset rajoitteet, jotka koskevat ensisijaisesti latausasemien sijoitusta. Linjan päätepysäkillä täytyy olla maankäytöllisesti tarpeeksi tilaa muuntajalle ja laturilaitteelle. Muuntajan ei tarvitse olla aivan laturin ja latauslaitteen vieressä, mutta etäisyys voi olla korkeintaan 80 m, tämän jälkeen hyötysuhde alkaa kärsiä. Etenkin keskustan tiheämpään rakennetuilla alueilla maankäyttö täytyy suunnitella hyvin, jotta tila saadaan tehokkaasti käyttöön. Päätepysäkin tulisi sijaita kaupungin omistamalla maalla, tai ainakin sen välittömässä läheisyydessä, muutoin rakennuslupien ja muun suhteen tulee haasteita ja ylimääräisiä kuluja. [47]

Latauspisteille ja muuntamoille on tosiaan saatava rakennusluvat ja mahdollisesti jopa kaavamutoksia on tehtävä. Tähän kaikkeen tulee varata riittävästi aikaa, sillä muutoinkin esimerkiksi muuntamoiden rakennustyöhön on varattava kuukausia. Lupia haettaessa otetaan huomioon myös lähialueen muu toiminta, esimerkiksi sairaala-alueella täytyy selvittää suuritehoisen sähkönsiirron mahdolliset haittavaikutukset herkkiin laitteisiin. Myös maaperän on oltava riittävän kantavaa painavalle laitteistolle, tämä on huomioitava etenkin, jos laturit sijoitetaan esimerkiksi parkkihallin tai muun maan alla sijaitsevan kiinteistön päälle.

3.3.1 Turun seudun linjauudistus ja runkolinjat

Turun alueen koko joukkoliikennejärjestelmää ollaan uudistamassa kesällä 2021, ja nykyinen linjasto muutetaan tärkeimmillä linjoilla runkolinjoiksi. Runkolinjoilla bussit liikennöivät tiheällä vuorovälillä, vähintään vartin välein ja ruuhka-aikaan useammin, ja linjoja liikennöidään koko päivän, myös viikonloppuisin. Runkolinjojen liikennöinnin sujuvoittamiseksi tarvitaan liikennevaloetuksia sekä joukkoliikennekatuja tai -kaistoja, joilla hidasteiden määrä on minimoitu. Liikennöintiä voidaan nopeuttaa lisäksi esimerkiksi tehostamalla maksamista, sallimalla nousu useammasta ovesta ja harventamalla pysäkkiväliä. Lisäksi vaihto bussista toiseen on oltava sujuvaa ja miellyttävää, eli etenkin keskeisillä vaihtopysäkeillä on oltava kunnolliset katokset ja reaaliaikaista tietoa bussien aikatauluista. [25]

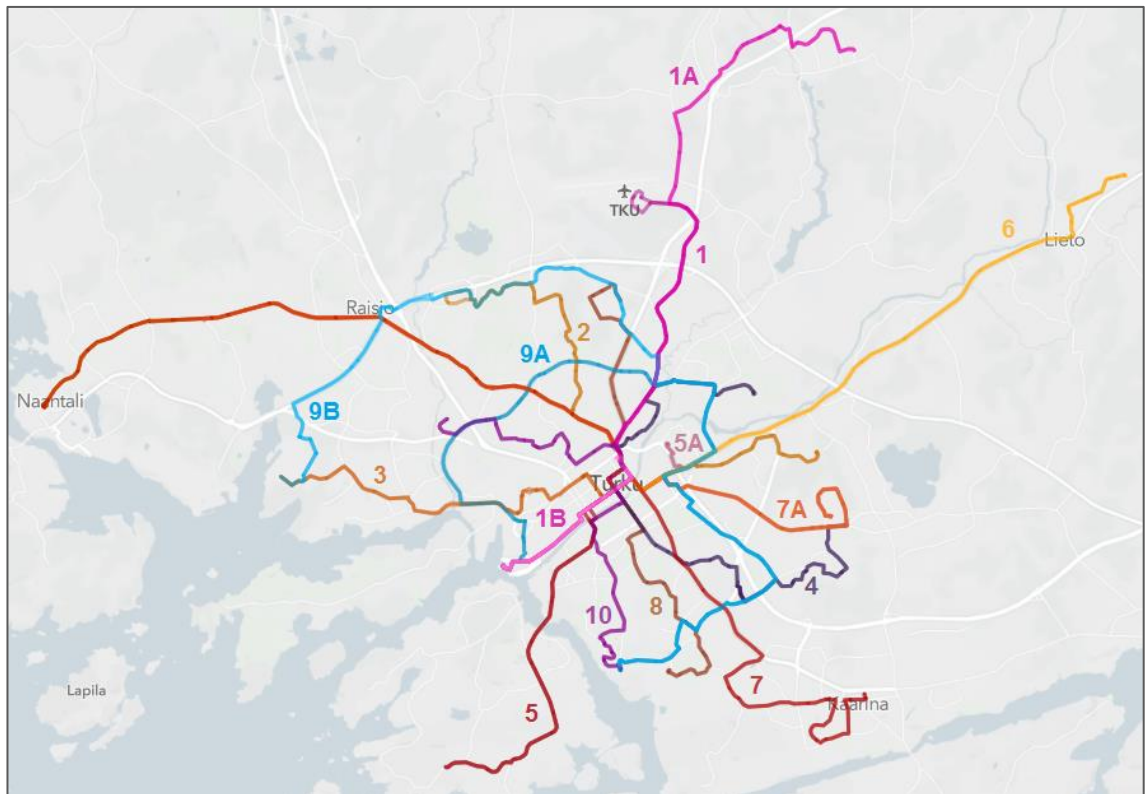
Bussiliikennöintiin runkolinjauudistuksessa tehtävät parannukset lisäävät matkustusnopeutta, luotettavuutta ja asiakkaiden tyytyväisyyttä sekä vähentävät odotusaikaa. Joukkoliikenne tavoittelee jatkuvaa matkustajamäärän kasvua, mikä edellyttää uusien asiakkaiden hankkimista. Tässä auttaa liikennöinnin jatkuva kehitys ja asiakastyytyväisyyden perusteella tehtävät muutokset. Runkolinjoilla pyritään lähes raideliikennettä muistuttavaan tehokkaaseen liikennöintiin, joilla saavutetaan todellinen kilpailuasema henkilöautoon verrattuna. Tämän takia on myös tärkeää, että runkolinjoilla liikkuvat autot ovat helposti erotettavissa muusta joukkoliikenteestä, ja brändi tehdään tunnetuksi alueen potentiaalisille asiakkaille. [25]

Runkolinjojen ohella liikennöidään näiden liityntälinjoilla, jotka tarjoavat yhteyden lähialueilta runkolinjoille. Lisäksi jatketaan palvelua täydentävillä linjoilla, jotka liikennöivät harvemmillä vuoroväleillä ja täydentävät runkolinjaston palveluja pienemmän asiakastiheyden alueilla. Näiden lisäksi liikennöidään palvelulinjoilla, jotka palvelevat esimerkiksi ikäihmisten tarpeita ja ovat reitiltään ja aikataulultaan joustavampia, sekä seutu- ja koululaislinjoilla, jotka liikennöivät pääsääntöisesti vain arkisin ja tiettyinä kellonaikoina. [48] Suurin osa muista kuin runkolinjoista ei liikennöi kauppatorille ollenkaan, mikä lisää vaihtojen tarvetta, sillä keskusta on kuitenkin suurin matkustuskohde. [4]

Runkolinjat ovat tiheästi liikennöitäviä linjoja, joilla on suuri matkustajakapasiteetti ja laaja kattavuus. Näiden seikkojen johdosta niillä on myös yleisesti ottaen hyvä potentiaali sähköbussilinjaksi. Runkolinjaston lisäksi tarkasteluun on valittu tilaajan toiveesta yksi linja, L71, jonka päätepisteet ovat samat kuin usealla runkolinjalla ja jonka vuoroväli on tiheä. Linja ei liikennöi keskustan kautta vaan toimii syöttölinjana runkolinjoille.

Todennäköisesti bussien määrä lisääntyy merkittävästi, jolloin myös uusia kuljettajia tarvitaan. Tämä on potentiaalinen ajankohta myös uuden tekniikan käyttöönotolle, sillä uudet kuljettajat eivät ole tottuneet kaikkiin dieselbussien ominaisuuksiin, jotka eroavat sähköbussista. Myös kuljettajien ajotapaan on mahdollista vaikuttaa enemmän, jolloin voidaan ohjata etenkin sähköbussien kannalta tehokkaisiin tekijöihin.

Uusien linjastojen aikataulut eivät vielä ole täysin lukkoon lyödyt, eli sähköistämisen vaikutus aikatauluihin ja esimerkiksi pysäkkien päätepisteisiin voitaisiin huomioida jo suunnitteluvaiheessa. Pienillä muutoksilla ei olisi välttämättä juurikaan vaikutusta asiakaskokemukseen, mutta niillä voitaisiin optimoida sähköbussien toimintaa. Linja 8 on sama kuin Lehtisen diplomityössä yhdeksi potentiaalisimmista linjoista valittu linja 18 [40]. Kaikkien runkolinjojen reitit ovat nähtävissä kuvassa 5.



Kuva 5 Runkolinjaston kartta, muokattu lähteestä [48]

Kuvassa 5 näkyvien linjojen sekä liityntälinjan L71 ominaisuudet on listattu tarkemmin taulukkoon 4 vertailun helpottamiseksi. Linjoista on ilmoitettu ajoaika, nopeus, pituus, vuoroväli, päätepysäkeille varattu aika, autojen määrä sekä muita sopivuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Taulukko 4. Runkolinjojen tiedot, koottu lähteestä [48]

Linja	Kiertoaika [min]	Nopeus [km/h]	Pituus [km]	Vuoroväli [min]	Automaäärä	Päätepysäkki-aika [min]	Muuta
1	80	19,1	12,7	15	6	10	Jo sähköinen
1A	110	21,4	19,6	15	8	10	
1B	35	16,1	4,7	15	3	10	
2	95	19,5	15,5	8	14	10	Raisioon
3	120	18,1	18,1	10	13	10	
4	100	19,6	16,3	10	11	10	
5	80	18,9	12,6	10	9	10	
5A	50	23,7	9,8	10	6	10	
6	150	25,2	31,5	20	8	10	Lieto-Naantali
7	160	22,3	29,8	20	9	10	Kaarina-Naantali
7A	120	20,2	20,1	10	13	10	Raisioon
8	90	17,8	13,4	5	20	10	
9A	150	19,1	23,8	15	11	10	
9B	155	22,4	28,9	15	12	10	
10	100	15,9	13,2	10	11	10	
L71	80	16,3	10,8	10	9	10	

Taulukosta voidaan nähdä, että muutamat linjoista liikennöivät tiheimmilläänkin korkeintaan 20 minuutin vuoroväliä, joskin nämä ovat muutenkin karsittuja naapurikuntiin kulkevia linjoja. Muutoin linjojen pituus ja liikennöintiväli on suurimmalla osalla linjoista varsin sopiva sähköbussiliikenteelle.

3.3.2 Raitiotie ja sen vaikutukset joukkoliikenteeseen

Turussa on suunniteltu runkobussiliikenteen lisäksi raitiotien rakentamista vilkkaimmin liikennöidyille bussireiteille. Raitiotie tarjoaisi suuren kapasiteetin liikennöintiä lyhyellä vuorovälillä ja nopean yhteyden keskustaan. Raitiotietä on suunniteltu ensimmäisessä vaiheessa Varissuolta keskustan kautta Raisioon, runkolinjoista 7A liikennöi suunniteltua raitiotielinjaa pitkin. Toteutuessaan raitiotie tulee vaikuttamaan myös runkolinjauudistuksen mukaisiin uusiin linjoihin. Toistaiseksi mitään täyttä varmuutta raitiotien kohtalosta ei ole, joten merkittäviä päätöksiä sen pohjalta ei voi tehdä. Todennäköisin ensimmäinen linja raitiotielle on esitettyä kuvassa 6. Mikäli raitiotie päätetään rakentaa, tullaan verkostoa toki myöhemmin levittämään pidemmälle kuin yhdelle linjalle. Suunnitteluineen ja rakennustöineen myöhempien vaiheiden toteutus venynee sen verran pitkälle, että sillä

ei juuri ole vaikutusta lähitulevaisuudessa tehtäviin sähköbussihankintoihin. Sähköbussien käyttöikä on kuitenkin rajallinen, joten se tulee täyteen ennen kuin muut raitiotielinjat on saatu valmiiksi. [49]



Kuva 6 Raitiotien mahdollinen reitti lähteestä [49]

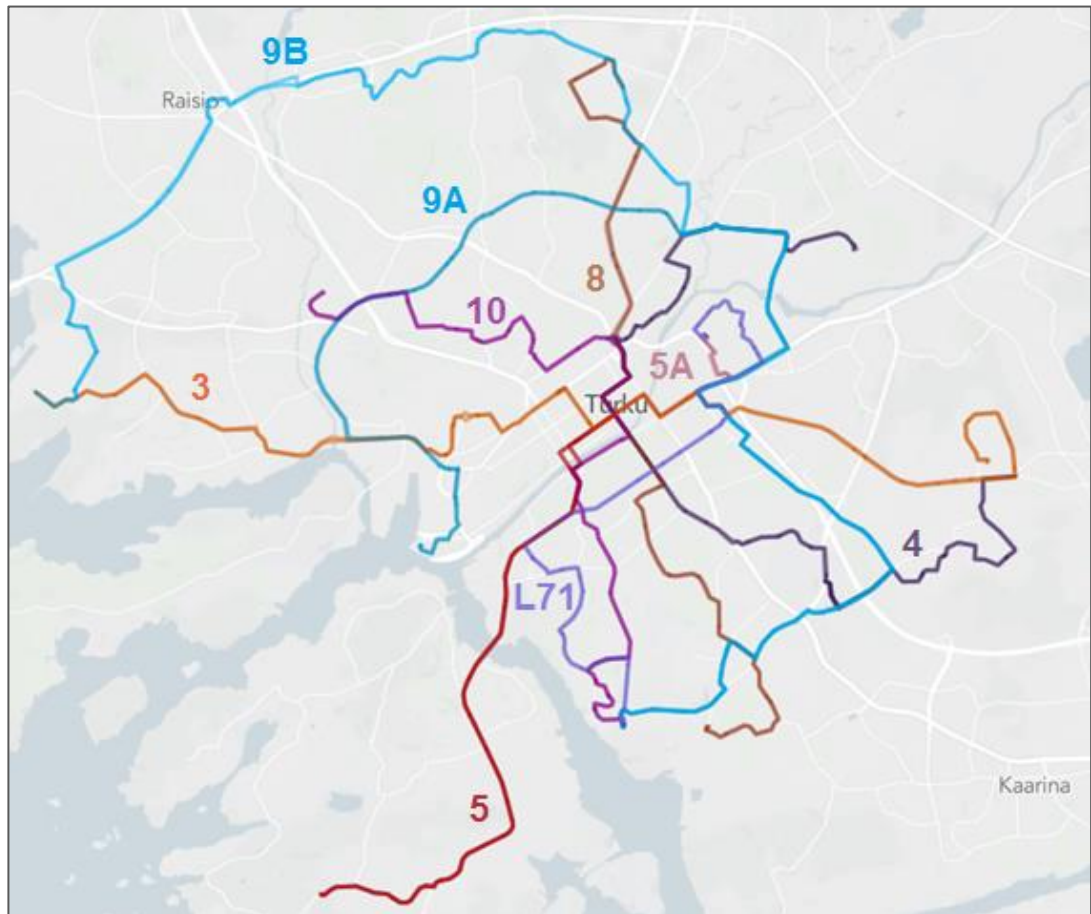
Toisena vaihtoehtona raitiovaunuliikennöinnille on selvitetty superbussilinjaa, jolloin suunniteltua raitiotielinjaa ajaisivatkin 18- tai 24-metriset supersähköbussit. Liikennöinti tapahtuisi tiheällä 7,5 min vuorovälillä ja superbussien liikennöintiä helpotettaisiin esimerkiksi omilla kaistoilla ja liikennevalo-ohjauksella. Toteutuessaan superbussit todennäköisesti ladattaisiin päätepysäkeillä ja merkittäväillä taseusasemilla (esimerkiksi torilla). Näiden latausasemien hyödyntäminen myös muun sähköisen bussiliikenteen käyttöön olisi tietysti kaikkien liikennemuotojen etu. Superbussien energiankulutus on kokonsa takia suurempi kuin sähköbussilla muuten, joten ne tarvitsevat todennäköisesti enemmän myös välilatauksia, jotta vältetään valtavilta akuilta. [4]

Raitiovaunuliikennöinnin tai superbussien etuna tavalliseen bussiliikennöintiin runkolinjoilla pidetään matkustusmukavuuden, linjojen hahmotettavuuden ja luotettavuuden paranemista, turvallisuuden kasvua, sekä odottelu- ja vaihto-olosuhteiden parempaa laatua. Monet edellä mainituista tekijöistä koetaan vielä superbusseja korkeammalle tasolle raideliikenteessä. [4] Raitiotie tai superbussi korvaisi muun bussiliikenteen linjallaan, joten sen reitille ei ole järkevää tässä vaiheessa tehdä suuria investointeja sähköbussijär-

jestelmään. Toteutuessaan raitiotiehanke olisi jonkin verran vaikutusta myös muuhun liikennöintiin, etenkin heilurilinjojen yhdistelmät voivat muuttua, jolloin uusilla reiteillä sähköistämistä olisi hyvä pohtia uudelleen.

3.3.3 Potentiaaliset sähköbussilinjat

Kun otetaan huomioon esitetyt tavoitteet ja rajoitteet sähköistettäville linjoille, sopivia linjoja jää jäljelle kokonaisuudessaan 9, joista kaksi on muiden linjojen muunnelmia. Nämä sopivat linjat on esitetty kuvassa 7. Mukaan on valittu myös linjat 3 ja 4, jotka liikennöivät Varissuolle, vaikka ne ovatkin osittain raitiotiesuunnitelman alueella. Molemmat linjat päättyvät kuitenkin toisesta päästään pysäkillä, jolle ajaa myös muita potentiaalisia sähköbussilinjoja. Voidaan siis esimerkiksi tarkastella, riittäisikö näillä linjoilla liikennöintiin lataus vain linjan toisessa päässä ja torilla. Linjat 1A ja 1B on jätetty huomioimatta, sillä nämä ovat nykyisen sähköbussilinjan variaatioita.



Kuva 7 Linjat, jotka voitaisiin sähköistää, muokattu lähteestä [48]

Kuten kuvasta 7 voi huomata, myös potentiaaliset linjat kulkevat Turun kaupungin rajojen ulkopuolella Raisiossa, mutta niiden päätepisteet ovat kuitenkin Turun sisäisiä. Ylioppilaskylästä Uittamolalle kulkeva linja L71 on lisätty runkolinjojen joukkoon.

Tässä työssä ei ole mahdollista tarkastella kaikkien linjojen taloudellista kannattavuutta tarkasti, joten ennen sähköistämistä on tärkeää laskea vielä elinkaarikustannukset ja takaisinmaksuaikaa jokaiselle linjalle. Nämä vaikuttavat paljon linjojen sähköistämisyjärjestykseen, joten tulokset voivat poiketa jonkin verran teknisen laskennan perusteella tehdystä järjestyksestä. Kustannusarviot voivat muuttua muutaman vuoden aikana oleellisesti, joten mikäli linjalla on nykyinen liikennöintisopimus voimassa vielä esimerkiksi viiden vuoden ajan, voi nykyisellä hintatasolla kannattamaton linja muuttua kannattavaksi hintatason muuttuessa.

3.4 Liikennöinnin kilpailutus

Sähköbussiverkoston omistukseen ja kustannusten sekä vastuun jakamiseen liittyvät tekijät on pohdittava tarkkaan kilpailutusta tehtäessä. Eri kaupungeissa on erilaisia toimintamalleja muun muassa latureiden omistuksen ja huoltosopimuksien suhteen, eikä mitään yleistä toimintamallia ole vielä olemassa. Tämä hankaloittaa kilpailutuksen ehtojen laatimista. Jossain liikennöitsijä ostaa itse bussit ja hankkii niille sopivat laturit itse katsomilleen paikoille. Esimerkiksi Helsingin seudulla myös laturit on hankittu kolmannelta osapuolelta palveluna, johon kuuluu niiden huolto ja rakennus. [50]

Turussa kaupungin omistama Turku Energia -yhtiö omistaa ja vastaa latureiden huollosta. Tämän mallin etuna on, että laturit ovat mahdollisimman monen linjan käytössä ja kaikki samanlaisia ja siten esimerkiksi huollon kannalta yksinkertaisempia. Suurella energiayhtiöllä on myös hyvät valmiudet latureiden toiminnan reaaliaikaiseen tarkkailuun ja huoltoon. Mikäli tätä mallia jatkettaisiin laajemmassakin mittakaavassa, kilpailutuksessa vaadittaisiin bussifirmoilta, että näiden on hankittava latureihin sopivat bussit. Turun tämänhetkinen sähköbussiliikenne on kaupungin omistaman yhtiön liikennöimää, mutta laajempaan liikennöintiin tarvitaan jokin toimiva ratkaisu, jossa kaikki kilpailijat voivat halutessaan osallistua. [2]

Helpointa tilaajan kannalta tietysti olisi, että ehtoja busseille tai voimalähteille ei tarkkaan määriteltäisi, vaan kilpailutuksen ehtona olisi vain, että tietty prosentti liikennöinnistä on oltava täysin päästötöntä. Pienimmät toimijat eivät kuitenkaan voisi todellisuudessa kilpailla tällaisessa asetelmassa, jossa kilpailija vastaisi kaikista kuluista, sillä esimerkiksi latureiden hankintakustannus on muutamalle bussille jyvitettyä varsin suuri. Realistinen malli olisi sellainen, jossa kaupunki hankkii laturit joko itse, tai kilpailuttaa laturitoiminnan kolmannelle osapuolelle ja sitten vaatii liikennöitsijöiltä näihin latureihin sopivat autot. Tämä olisi todennäköisesti kokonaisedullisin ratkaisu, sillä laturit saataisiin mahdollisimman monen linjan ja auton käyttöön.

Koska sähköbussit ovat vielä melko uutta tekniikkaa ja kaikkia mahdollisia vikatilanteita ei osata ennakoida, kannattaa kilpailutuksessa sopia mahdollisimman tarkasti vastualueiden rajauksista. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi bussin vioittumisesta johtuvat ajamattomat päivät ja niistä koituvat kustannukset. Valmistajilla on karkeasti ajateltuna kaksi toimintamallia, yleensä sarjatuotannolla edullisemmin busseja toimittavat valmistajat tarjoavat pelkät bussit ja kaikki huolto jää tilaajan vastuulle ja maksettavaksi. Toisaalta osa valmistajista tarjoaa pakettia, jossa he vastaavat kaikista bussin toimintaan liittyvistä huolloista ja näistä aiheutuvista kustannuksista, mutta tällainen sopimus on ratkaisevasti kalliimpi vaihtoehto. Kokonaiskustannusten arviointi on kuitenkin vielä vaikeaa, kun ei osata varmaksi arvioida tulevien ongelmien määrää. Tilanne tulee helpottumaan, kun kokemuksen myötä osataan arvioida suunnilleen tarvittavan huollon määrä. Usein sopimuksessa on määrätty myös sakoista, jotka seuraavat, jos sopimuksessa asetettuja tavoitteita ei saavuteta. Turussa haasteeksi on osoittautunut sakkomaksujen katto, joka on saavutettu jo varsin paljon odotettua aikaisemmin. Tämän jälkeen uusia maksuja ei enää tule, vaikka autot olisivat esimerkiksi pois liikenteestä teknisten ongelmien takia. [28]

Kilpailutuksessa on löydettävä sopiva ratkaisu, joka on riittävän houkutteleva myös liikennöitsijöille. Muutoin voidaan päätyä tilanteeseen, jossa todellista kilpailua ei synny ja tarjouksia saadaan vain yksi tai muutamia. Parhaan vaihtoehdon löytämiseksi on tärkeää jakaa kokemuksia etenkin muiden Suomen sähköbussikaupunkien kesken, kuten tähän mennessä on tehtykin.

Laajennuksessa on hyvä kartoittaa myös mahdollisten yhteistyökumppaneiden halukkuutta osallistua hankintoihin. Useat linjat palvelevat esimerkiksi kauppakeskusten asiakkaita tai suurten teollisten yritysten työntekijöitä, jolloin yritykselle itselleenkin voisi olla imagohyötyä vähäpäästöisten kulkumahdollisuuksien tukemisesta. Mikäli esimerkiksi laturi sijoitettaisiin yrityksen tilojen yhteyteen, voitaisiin selvittää yhteistyömahdollisuuksia, joilla voitaisiin kattaa osa kustannuksista.

Kustannusten lisäksi on hyvä varautua latureiden ja bussien sekä sähkötekniikan pitkiin toimitusaikoihin. Turkuun tilattavien bussien määrä on kuitenkin sen verran pieni, että valmistajilla suuremmat tilaukset saattavat ajaa näiden ohi. Myös latureiden ja niiden osien toimitusajat ovat useita kuukausia. Sähköverkon rakennustöihin ja muuntajien ja muiden tarvittavien osien rakennukseen täytyy varata vähintään puoli vuotta, pidempi varoaika tietysti vähentää ongelmien mahdollisuutta. Lisäksi on hyvä varata riittävästi aikaa kuljettajien koulutukseen, sähköbussien ajoon liittyä kuitenkin useita tekijöitä, joita ei dieselbussien kanssa tarvitse huomioida, kuten bussin sijoittaminen latauspisteelle ja latausajan vaikutus bussikiertoon.

4. AKUT JA LATURIT

Tässä luvussa tarkastellaan varikkolatausta ja virroittimilla tapahtuvaa pikalatausta. Muut latausvaihtoehdot on rajattu työn ulkopuolelle lähinnä niiden toistaiseksi suurten kustannusarvioiden ja tekniikan kehittymättömyyden takia. Esimerkiksi induktiolatausta voidaan harkita todellisena vaihtoehtona, kun siitä saadaan riittävästi käyttökokemusta maailmalta ja mikäli hinta laskee tekniikan kehittyessä. Laturivaihtoehtojen jälkeen keskitytään latureiden ja akkujen kapasiteettia rajoittaviin tekijöihin ja muihin vaatimuksiin, jotka on otettava huomioon. Lisäksi esitetään hyviä latauspisteiden sijainteja ja tekijöitä, jotka on otettava huomioon, jotta systeemi kokonaisuudessaan olisi mahdollisimman kestävä myös häiriötilanteissa.

4.1 Latureiden vaihtoehdot ja toiminta

Akut voidaan ladata varikkolatauksella kaapeleilla matalalla, yleensä noin 50–150 kW teholla, jolloin lataus kestää usein vähintään tunnin, suurilla akuilla lähes koko yön. Lataustapahtuma ei ole automatisoitu, vaan laturista on kytkettävä kaapeli autoon. Kaapelin ja auton välisiin liittimiin on useampi vaihtoehto, mutta busseissa käytetään yleensä suuremman tehon takia CCS-liitintä (Combined Charging System). Nämä langallisen latauksen liittimet ovat lähes ainoa, mikä lataustapahtumasta on saatu standardisoitua useiden vuosien aikana. Latauslaitteet sijaitsevat pääsääntöisesti liikennöitsijöiden varikoilla, jolloin busseja voidaan ladata yöaikaan tai niiden ollessa muuten pois ajosta, esimerkiksi päivällä ruuhkatuntien ulkopuolella. Yön yli tapahtuva lataus sopii etenkin busseille, joissa on suuret, useiden satojen kilowattituntien akut, sillä niillä voidaan ajaa koko päivän ajosuoritteet yhdellä latauksella, ja ladata niiden ollessa poissa käytöstä. [3]

Varikkolataukseen voidaan käyttää myös virroitinlatausta tai muuta latausmenetelmää, mutta tämä ei yleensä ole kannattavaa, sillä kaapelilaturit ovat olennaisesti edullisempia ja tehontarve on pienempi, kun latausaikaa on paljon. Pantografien etuna varikkolatauksessa on kuitenkin niiden pienempi tilantarve ja turvallisuus, kun ne saadaan sijoitettua varikon rakenteisiin. [33] Kannattavaksi tällainen lataus tulee kuitenkin vasta suurilla automäärillä.

Suurimmassa osassa maailmalla käynnissä olevista pilottihankkeista sähköbusseja ladataan nimenomaan varikkolatauksella. Tämän etuna on latureiden helpompi sijoitus yhteen paikkaan, jolloin infrastruktuuriin tarvittavat muutokset ovat pienempiä. Lisäksi va-

rikkolatureiden etuna on ratkaisevasti pienempi hinta, noin 10 % virroitinlaturin hankintahinnasta. [14] Etenkin kiinalaiset valmistajat tarjoavat varikkoladattavia sähköbussimalleja, joissa on suuri akku ja pitkä käyttösaade. Varikkoladattavien mallien etuna on myös niiden joustavuus liikenteessä. Ne eivät ole sidottuja tietyille reiteille, kuten pikaladattavat mallit, vaan verrattavissa dieselbusseihin, joilla voidaan ajaa, kunnes polttoaine loppuu. [16] Tämän tyyppisiä autoja ladataan usein kaikkia yhtä aikaa, jolloin vaikutus sähköverkkoon on suurempi kuin lyhytaikaisilla pitkin päivää tapahtuvilla latauksilla. [3] Toisaalta taas päästään hyödyntämään yleisesti ottaen halvempaa sähkön yöhinnointilua, joten ei voida yksiselitteisesti sanoa, onko varikko- vai pikalataus parempi vaihtoehto, ne vaan palvelevat erilaisia tarpeita [9].

Turussa ja Suomessa yleensäkin kaupunkiliikenteessä päiväsuoritteet kullekin bussille ovat pääsääntöisesti niin suuria, että varikkoladattavan auton kapasiteetti ei yhdellä latauksella riitä. Tämä tarkoittaa, että autoa olisi ladattava kesken päivän jopa useiden tuntien ajan ennen liikennöinnin jatkamista. Tällaiset käyttökatkokset eivät kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavia, eikä suureen vara-autokapasiteettiin ole varaa tämän kokoisella liikennöntialueella. Esimerkiksi Pietarissa yhdellä varikolla voi olla 2000 busssia, ja yhdestä akun käydessä vähiin, voidaan aina lähettää uusi bussi ja kuljettaja tilalle. Tällainen toimintamalli kuitenkin tulee kannattavaksi vasta, kun kyseessä on useita tuhansia busseja käsittävä joukkoliikenneverkko. [28]

Vaihtoehtona varikkolataukselle on käytön aikana tapahtuva pikalataus virroittimilla. Pikalatauksessa käytetään yleensä suurempaa lataustehoa, tavallisia ovat 300, 450 ja 600 kW laturit. [3] Virroitin voi sijaita joko bussin katolla, jolloin se nousee ylös latausasemalla kuskin valitessa toiminnon kojelaudalta, tai vaihtoehtoisesti virroitin on kiinni latauslaitteessa, jolloin se laskeutuu alas bussin vastuksia vasten. Molemmissa tapauksissa kyseessä on etäohjattu ja automatisoitu systeemi, jossa virroitin ja vastukset muodostavat virtapiirin. Latauslaite kommunikoi sähköisesti laturin kanssa, ja kun virtapiiri on kytketty, laturi syöttää virtaa akkuihin. Systeemi lähettää koko ajan tietoa toisille komponenteille, jotta lataustapahtuma on turvallinen, ja mikäli yhteenkin osaan tulee häiriö, lataus keskeytetään heti. [28]

Virroitinlatauksen etuna on lyhyt latausaika ja tiheä latausväli. Latausvälin lyhyys pitää akun varaustilan melko tasaisena, mikä pidentää akun käyttöikä ja tarjoaa pitkän päivittäisen toimintasäteen. Akun varaus ei pääse laskemaan kovin matalaksi, jolloin lataukseen ei tarvitse kerralla kuluttaa paljon aikaa, mikä helpottaa aikataulusuunnittelua.

Virroitin- ja varikkolataus eivät ole toisensa poissulkevia vaihtoehtoja ja usein käytetäänkin yhdistelmälatausta, pikalatauksen lisäksi vielä hitaampaa varikkolatausta, jolloin bussien akut saadaan ladattua yön aikana täyteen. Yhdistelmälatausta hyödynnettäessä akun varauksen voidaan antaa laskea viimeisinä tunteina normaalia alemmas, sillä akku saadaan taas täyteen varikolla. Turussakin käytetään yhdistelmälatausta ja käytössä olevat pikalaturit ovat alas laskeutuvia pantografeja, kuvassa 8 lentoaseman pikalaturi. Lisäksi Turun kaupunkiliikenteen varikolla on 6 kappaletta 55 kW varikkolaturia, yksi kullekin sähköbussille. [28]



Kuva 8 Bussi latauksessa lentoaseman päätepyssäkillä

Laajentamisen yhteydessä laturityypin valinta on mietittävä tarkoin, sillä tällä on pitkäaikaisia vaikutuksia bussimallien valinnan suhteen ja kerran valitun laturityypin vaihtaminen aivan uudelleen tulee hyvin kalliiksi. Mallit kehittyvät koko ajan eikä yleisiä standardeja ole vielä olemassa, mikä vaikeuttaa valintaa. Jos valittava malli tulee poikkeamaan muiden kaupunkien suosimasta, voi varaosien ja jälleen myynnin kanssa tulla haasteita myöhemmin. Tällä hetkellä Helsingissä ja Tampereella, joissa Turun lisäksi on laajempaa sähköbussiliikennöintiä, on käytössä autojen katolla sijaitsevat nousevat pantografit. [29]

Latureita valmistavia suurempia yrityksiä ovat esimerkiksi ABB Oy, Ekoenergetyka, Heliox ja Irizar. Bussien valmistamisessa kiinalaiset yhtiöt ovat suuria tekijöitä, mutta laturimalleissa eurooppalaiset yritykset ovat kehityksen kärjessä ja yleisesti käytettyjä. Turun tämän hetkiset laturit ovat hollantilaisen Helioxin valmistamia, samoin Espoon Tapiolan pikalatauspiste. Tampereella on käytössä puolalaisen Ekoenergetykan pikalaturi. [29, 33, 51-53]

Latureiden käyttövarmuus on tärkeä tekijä laturityyppiä valittaessa, minkä takia yleisesti luotetaan hyväksi todettuihin vaihtoehtoihin [54]. Turussa pikalatauksen kanssa on ollut yksittäisiä ongelmatilanteita, mutta pääosin käyttövarmuus laturien osalta on ollut vaaditulla tasolla. Laturit on yleensä suunniteltu toimimaan $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakkasissa, mutta usea valmistaja tarjoaa vielä matalampiin lämpötiloihin soveltuvaa paremmin eristettyä mallia Pohjoismaiden markkinoille.

Myös latureiden hyötysuhteissa ja irrotukseen ja liittämiseen kuluva ajassa on eroa, nämä vaikuttavat sähköbussikonaisuuden energiatehokkuuteen. Yleisesti ylöspäin nousevaa pantografia pidetään hieman nopeampana vaihtoehtona, mutta erot ovat korkeintaan kymmenen sekunnin luokkaa. Muiden muuttujien suhteen tiedot ovat lähinnä valmistajien antamia arvioita, joiden todenmukaisuus selviää vasta yleisen käytön myötä.

Nykyään on mahdollista myös yhdistää yhteen laturiin jopa kolme pantografia, jolloin voidaan ladata kaikkia autoja samaan aikaan vaihtuvalla teholla, esimerkiksi suurempi teho sille, jonka akku on tyhjempi tai jolla on lyhempi pysäkkiaika. Lisäksi on mahdollista liittää virroitimen lisäksi samaan latauslaitteeseen latauspisteitä sähkökäyttöisten henkilöautojen lataukseen. Teho on mahdollista ohjata aina bussin tullessa kokonaan sen käyttöön, mutta laturisysteemin kokonaisyhyötysuhdetta ja käyttöastetta voitaisiin merkittävästi parantaa, kun samaa laturia voisi tyhjäkäyntiaikana hyödyntää muille kulkuneuvoille. Tulevaisuudessa samoja latureita voitaisiin mahdollisesti hyödyntää myös raskaan liikenteen lataukseen, mikäli nämä lataustapahtumat sijoittuisivat bussien vilkkaan liikennöintiajan ulkopuolelle. [51, 52]

Latausratkaisuja voidaan myös yhdistellä suuremmiksi kokonaisuuksiksi, jotka palvelevat erityyppisiä busseja. Esimerkiksi Saksan Mannheimissa Mercedes on suunnitellut latausaseman, jossa on 150 kW kaapelilatausmahdollisuus ja lisäksi 300 kW virroitinlatauspisteet sekä ylös nousevalle että alas laskeutuvalla pantografille. [55] Toki tällainen ratkaisu on kustannuksiltaan suurempi, ja sopii siksi lähinnä suurten kaupunkien käyttöön etenkin liikenteen solmukohtiin, kuten asemille.

4.2 Latauspisteiden sijoittaminen potentiaalisille linjoille

Työssä ei ole mahdollista suurissa määrin keskittyä latureiden paikkojen optimointiin, joten lähdetään olettamuksesta, että parhaat sijoituspaikat ovat linjojen päätepisteet ja liikenteen solmukohdat [56]. Runkolinjastossa kaikki linjat kehälinjoja lukuun ottamatta kulkevat torille, joka on yleensä matkallisesti noin puolessa välissä linjaa, joten se on

päätepisteiden lisäksi merkittävä sijoituspaikka latureille. Varikkolaturit sijoitetaan luonnollisesti kunkin liikennöitsijän omalle varikolle, joten niiden paikka määräytyy kilpailutuksen mukaan.

Potentiaalisten linjojen joukosta on jätetty pois muihin kuntiin kulkevat linjat. Tulevaisuudessa yksi potentiaalisimmista latauspaikoista olisi myös kauppakeskus Mylly, joka sijaitsee Raisiossa. Tänne kulkisi runkolinja 2, jolla on tiheää liikennöintiä. Lisäksi Mylly voisi toimia latauspisteenä myös pidemmälle kehälinjalle 9B, jolloin latausaikaa muilla pysäkeillä voitaisiin lyhentää.

Turun kokoisessa kaupungissa liikenteen solmukohtia on muutama, ja ne ovat melko lähellä toisiaan. Kaukoliikenteen linja-autoaseman ja rautatieaseman kautta kulkee paljon linjoja, mutta ne eivät ole laajassa kuvassa suuria risteyskohtia ja lisäksi niiden etäisyys torille on varsin lyhyt. Torin kautta tulevat ajamaan sen sijaan kaikki runkolinjat kehälinjoja lukuun ottamatta, ja se on merkittävä vaihtopaikka ja useiden matkustajien määränpää. Muutamien merkittävien linjojen solmukohtia ovat lisäksi puutori ja Kupittaa. Puutori on kuitenkin niin lähellä kauppatoria, että latausaseman rakentaminen tuskin kannattaisi ja sen suhteen tulevaisuuden käyttöön liittyvät suunnitelmat ovat muutenkin vielä auki. Kupittaaalle kulkevat useat linjat keskustasta, mutta myös molemmat kehälinjat, joten sinne on tarkoitus muodostua jonkinlainen vaihtopiste. Sen suhteen tarkka sijainti on vielä epävarma, koska latureita ei välttämättä saa mahtumaan kadun varressa oleville bussipysäkeille kovin kätevästi, etenkin kun latauksen aikana pysäkillä täytyisi mahtua varmasti muitakin busseja.

Mikäli optimointia halutaan tehdä tarkemmin esimerkiksi linjojen sijainnin ja pysäkkiaikojen mukaan vielä ennen varsinaisten latureiden hankintaa, voi apuna käyttää esimerkiksi lähteen [56] laskentamallia. Toisaalta Turun tapauksessa mahdolliset latauspaikat ovat myös tilan puolesta melko rajoitetut keskustan alueella ja kaupungin linjasto on melko helposti jaettavissa potentiaalsiin linjoihin, joiden reitiltä laturipaikat ovat löydettävissä.

Pikalatauspisteet tarvitsevat virroitinlaitteen, itse laturin ja oman muuntamon. Virroitin tai sen vastakappale on usein mahdollista kiinnittää myös kiinteistön rakenteisiin, jolloin latauspaikkoja voidaan sijoittaa esimerkiksi pysäkkikatoksiin, parkkihalliin tai alikulkujen kohdalle. Pantografin rakentamiseen liittyvät tarkemmat tilavaatimukset ja rajoitteet vaihtelevat valmistajien välillä jonkin verran, mutta karkeita arvioita voidaan tehdä.

Ihanteellinen paikka latauspisteelle on kääntöpaikan keskellä sellaisilla pysäkeillä, joilla kääntöpaikka on rakennettu nimenomaan tähän käyttöön ja joissa bussi ajaa pienen lenkin päätepysäkillä vaihtaakseen suuntaa. Muuntajan sijoittamisessa on huomioitava, että

sen turvaetäisyys muihin rakennuksiin olisi oltava vähintään 8 m ja sen etäisyys laturilaitteesta korkeintaan 80 m. Laturi ja muuntamo ovat noin kaksi metriä korkeita laitteistoja, ja tarvitsevat kumpikin noin 2*2 m maa-alueen ja lisäksi virroittimen jalusta reilun neliömetrin. Näitä ei voida sijoittaa vieri viereen ja ympärille on muutoinkin varattava ylimäärästä tilaa esimerkiksi huoltoa varten, joten todellinen tilantarve on huomattavasti suurempi. [47] Samaan muuntamoon on kuitenkin mahdollista yhdistää useampi laturi ja samaan laturiin useampi latauspiste, joten useamman linjan pysäkeillä säästetään hieman tilaa. Nykyisin on olemassa myös malleja, joissa laturi ei tarvitse erillistä suurta tilaa, vaan se saadaan sijoitettua pantografin jalustaan. [52]

Pysäkkien ja latauspaikkojen melko pienillä parannuksilla on mahdollista nostaa latausvarmuutta ja vähentää turhaa aikaa, joka kuluu pysäkillä lähinnä bussin sijoittamiseen oikein. Nykyisellä linjalla on huomattu, että bussin ohjaamista latauspaikalle voidaan helpottaa esimerkiksi maalaamalla maahan merkit kohdalle, jossa etuoven tulisi sijaita. Merkinnot voisivat olla esimerkiksi pysäkin rakenteissa, jotta ne ovat näkyvillä myös haastavissa keliolosuhteissa. Myös pysäkin suunta ajosuuntaan nähden vaikuttaa bussin sijoittamiseen latauspisteellä. Lentoasemalla pysäkillä voi ajaa hieman vinosti kulkusuuntaan nähden, jolloin bussi on helpompi saada osumaan oikealle kohdalle heti ensi yrittämällä. Satamassa taas pysäkki sijaitsee heti jyrkän mutkan jälkeen, mikä aiheuttaa sen, että bussi on helposti vinossa pysäkin suuntaan ja laturiin nähden. Tästä johtuen laturin virroittimet saattavat asettua väärään kohtaan ja tippua bussissa olevien virroittimien alle, mikä aiheuttaa vääntymisen ja häiriötä laturin toimintaan. [28]

Myös asfaltin kulutus latauspaikalla on ollut odotettuaakin suurempaa, sillä bussien on ajettava hyvin tarkkaan samaan kohtaan, toisin kuin normaaleilla pysäkeillä. Tämä aiheuttaa pinnan voimakasta kulumista ja latauspaikkaan syntyy helposti kuopat renkaille, jolloin bussin liikkeellelähtö vaikeutuu. Tähän on hyvä varautua tulevilla latauspisteillä valitsemalla pysäkillä mahdollisimman kova ja kulutusta kestävä pinnoite. Lisäksi latauspisteiden lähellä talvikunnossapitoon on kiinnitettävä erityisen paljon huomiota, jotta auton sijoittaminen oikein pysäkillä on mahdollista myös lumisissa olosuhteissa. Pysäkeille ei saa muodostua suuria lumivalleja, jotka estävät bussin ajamisen oikealle kohdalle. [28]

Latauspisteiden suunnittelussa on otettava huomioon myös tulevaisuudessa mahdollisesti kasvava autojen koko. Ihanteellisessa tilanteessa samaa laturia voidaan käyttää monen erityyppisen ja kokoisen auton lataamiseen. Tämän takia uusia pysäkkejä ja latauspisteitä ei kannata suunnitella vain 12-metrinen, nykyisin yleisimpien, sähköbussien tarpeisiin, vaan on huomioitava myös teliautojen ja 18-metrinen bussien latausmahdol-

lisuudet. Markkinoilla on tarjolla myös kaksikerroksisia sähköbussseja, ja alaspäin laskeutuva pantografi tarjoaa varsin laajan toimintasäteen, jolloin nämäkään eivät olisi täysin pois suljettu vaihtoehto.

4.3 Latureiden tehontarpeeseen vaikuttavia tekijöitä

Keskeisin latureiden tehoon vaikuttava tekijä on tietenkin linjalla liikennöivien bussien akkukapasiteetti ja latauspisteiden määrä sekä latausaika reitin varrella. Latauspisteiden määrää kasvattamalla ja näin latausväliä lyhentämällä voidaan vaikuttaa olennaisesti akkukapasiteetin tarpeeseen. [40] Latauspisteiden suurten investointikustannusten takia on kuitenkin tärkeää sijoittaa pisteet järkevästi ja tehokkaasti mahdollisimman monen linjan käyttöön. Yhden latauspisteen hankintakustannukset vastaavat karkeasti yhden suurempikokoisen sähköbussin akun hintaa, joten taloudellisesti järkevintä vaihtoehtoa kannattaa myös etsiä eri vaihtoehtojen joukosta.

Laturivalmistajat tarjoavat laajan kirjon eri tehovaihtoehtoja, joten se ei rajaa mahdollisuuksia juurikaan. Yleisimmät virroitinlaturitehot ovat 150, 300, 450 ja 600 kW, sillä laturit koostuvat pääsääntöisesti 150 kW moduuleista, joskin laturivalmistajat tarjoavat myös omia kokonaisuuksiaan. Mutta yhteen laturilaitteeseen voidaan kytkeä useita virroittimia, jolloin laturin kokonaisteho voi olla 1 MW tai jopa enemmän. Varikkolatauksessa yleisiä tehovaihtoehtoja ovat 40, 50, 60, 90, 100, 120 ja 150 kW. Alle sadan kilowatin latureissa on yleensä ohut latauskaapeli, joka kytketään bussiin. Mikäli tehoa nostetaan yli sadan kilowatin, etenkin 150 kW, laturit tarvitsevat nestejäähdytyksen kaapeliin, jolloin se muuttuu huomattavasti kalliimmaksi, kookkaammaksi ja hankalammin käsiteltäväksi. Etenkin yhdistelmälatausta käytettäessä matalammat varikkolataustehot ovat kuitenkin yleensä riittäviä, sillä latausaikaa on yöllä useita tunteja ja akut ovat kooltaan melko pieniä. [51, 52] Latausjännite on suurilla akuilla ja tehokkailla latureilla noin 600–750 V, minkä ansiosta latauksen hyötysuhde on varsin korkea, karkeasti noin 97 %. [23]

Työvoimakustannus on yksi suurimmista menoeristä bussiliikenteessä, joten ylimääräistä odottelu-aikaa (kuten päätepestelatauksen aiheuttama kääntöajan kasvatus) tulisi välttää viimeiseen asti. Tämä korostuu etenkin ruuhka-aikana, kun bussien ja kuljettajien määrän tarve on suurin. Silloin olisi ihanteellista, että pystyttäisiin suorittamaan osa latauksesta linjan merkittävissä taseuspisteissä, tai vastaavissa paikoissa, missä paljon ihmisiä on tulossa kyytiin ja bussi joutuu kuitenkin seisomaan. Näissä solmukohdissa odotusaika voi venyä etenkin ruuhka-aikaan useisiin minuutteihin, joten tämä aika voitaisiin siis hyödyntää täysin bussin varauskapasiteetin kasvattamiseen, mikä lyhentäisi latausaikaa päätepestäkeillä ja parantaisi näin tehokkuutta merkittävästikin. [46]

Työvoimakustannusten ja aikataulusuunnittelun kannalta on tärkeää myös, että latureille ei synny jonoa, etenkin jos samaa laturia käyttää useampi linja. Tällöin myöhästymiset heijastuvat pitkälle ajalle, ja toisaalta lataaminen saattaa jäädä väliin, jotta aikataulussa pysytään. [54] Jonon välttämiseksi tärkeää on realistiset aikataulutukset ja lähtöjen porrastaminen, sekä riittävä laturikapasiteetti. Näin jonotusaika ja ylimääräinen työaika saadaan minimoitua, mutta laturit saadaan mahdollisimman tehokkaaseen käyttöön.

Laturin tehoa kasvattamalla voidaan lyhentää latausaikaa ja täten mahdollisesti pienentää akun kokoa, koska se saadaan samassa ajassa ladattua täyteen. Toisaalta akut kestävät vaan tietyn lataustehon (esimerkiksi 6 C eli laturin teho $kWh = 6 \cdot \text{akun koko kW}$), eli loputtomasti laturin tehoa ei voida kasvattaa. Tietysti tehokkaammat laturit myös maksavat enemmän, eli on löydettävä taloudellisesti järkevin vaihtoehto, 600 kW latureita ei kannata hankkia jokaiselle pysäkillle. [57]

Laturin häviöt lepotilan aikana ovat Turussa olleet hiukan yli 5 % kaikesta laturin energiankäytöstä. Suhteessa siihen, että laturi on käytössä vain pienen osan ajasta, häviöt ovat olleet varsin maltillisia. Latauksen aikana häviöt ovat suurempia, sillä laturi ottaa verkosta enimmillään noin 330 kW tehon, josta noin 300 kW siirtyy akkuihin. [2] Laturin hyötysuhde kuitenkin nousee, mikäli sen käyttökapasiteettia lisätään, kun saadaan poistettua tyhjäkäyntihäviöitä.

Käyttämällä tehokkaampia latureita, latureiden määrää voidaan pienentää, koska latausaika lyhenee. Tällöin samassa ajassa yhdellä laturilla voidaan ladata useampi auto. Toisaalta tehon ja latausajan suhde ei ole täysin lineaarinen, sillä latausajassa on otettava huomioon myös laturin kytkentään ja irrotukseen kuluva aika, joten vaikka latausaika puolittuisi, tämä ”kuollut” aika ei muutu mihinkään. Tosin laturien määrän pienentäminen lisää ongelmia kaikissa häiriötilanteissa. Jos yksikin latureista on rikki, useampi auto kärsii tästä. Kuitenkin myöhästymiset heijastuvat useammalle autolle ja mahdollisesti useammalle linjallekin, jos kaikki autot käyttävät pysäkillä vain yhtä korkeatehoista laturia kahden matalampitehoisen sijaan.

Mikäli käytetään varikkolatausta, riittää tehontarpeen arviointiin tieto akun kapasiteetista E_{akku} ja käytössä olevasta latausajasta. Runkolinjoilla bussit liikennöivät arkisin kello 05.00–00.30 ja mikäli vähennetään ajasta vielä tunti, joka täytyy korkeintaan varata aikaa pysäkillle siirtymiseen ja varikolle palaamiseen, jää latausaikaa noin 3,5 h. [48] Tällöin pienin laturin tarvittava teho P_{min} on $P_{min} = \frac{E_{akku}}{3,5h}$.

Suurimmalle osalle busseista riittää pienempikin teho, sillä aamun ensimmäisinä ja illan viimeisinä liikennöintitunteina vuoroväli on tyypillisesti pitkä, ja kullakin linjalla liikennöidään vain muutamalla autolla.

Latauksen aiheuttamat muutokset sähköverkkoon ovat suuria ja sen takia laturit on eristettävä normaalista verkosta. Tämän takia ne vaativat aina omat muuntamot, vaikka lähistöllä olisikin muutoin käyttökelpoisia muuntajia. [47]

4.4 Akkujen kokoon vaikuttavia tekijöitä

Sähköbussissa, kuten muissakin sähkökulkuneuvoissa on nykyisin käytössä litium-ioniakut, joiden tarkempaan kemialliseen rakenteeseen on useita vaihtoehtoja. Yleisin malli on litiumrautafosfaattiakku (LiFePO_4 , LFP), joka on syklinkestoltaan eli eliniältään pitkä, turvallisempi ja myrkyttömämpi kuin useat muut akut ja jonka energiatiheys on kohtuullisen suuri sekä latausaika lyhyt. Akku koostuu yksittäisistä 3,2 V kennoista, jotka yhdistetään moduuleiksi ja sitten moduuleista kootaan tarvittavan kokoisia kokonaisuuksia. [58]

Toinen sähköbussissa yleinen akkumateriaali on litiumtitanaatti ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO), jonka etuna on korkean syöttötehon mahdollisuus (jopa 10 C), minkä takia se on yleisempi malli pikaladattavissa autoissa, sekä parempi lämpötilavaihteluiden sieto. LTO-akkua voidaan käyttää jopa $-35\text{ }^\circ\text{C}$ pakkasessa ja lisäksi sillä on hyvä syklinkesto. LFP-akkuun verrattuna sen hinta on kuitenkin ratkaisevasti korkeampi, kennon jännite pienempi ja tilantarve pienemmän energiatiheiden myötä suurempi. Uusia akkuvaihtoehtoja on kuitenkin kehitteillä koko ajan, ja tulevaisuudessa mahdollisesti edullisemmat ja tehokkaammat akut voisivat vaikuttaa paljonkin sähköbussien kilpailukykyyn. [59]

Yksittäisen bussin akkukapasiteettia mitoitettaessa on ensimmäiseksi lähdettävä liikkeelle kunkin linjan tehontarpeesta. Karkea arvio kulutuksesta saadaan kertomalla mitattu keskimääräinen kulutus linjan pituudella. Linjalla 1 kokonaiskulutus 1,00 kW/km, mitä voidaan pitää hyvänä lähtöarvona [2]. Lisäksi on hyvä arvioida suurpiirteisesti linjan erityispiirteet, eli onko linjalla esimerkiksi suuria korkeuseroja tai osuuksia moottoritillä, jolloin nopeus on keskimääräistä paljon suurempi. Latauspisteiden sijainti on otettava tuki huomioon, onko tarkoitus ladata molemmissa päissä, jolloin ajomatka suunnilleen sama kumpaankin suuntaan, vai onko toisessa päässä esimerkiksi jokin lenkki, joka lisää pituutta. Kun on saatu suurpiirteinen arvio latausvälin kulutuksesta, voidaan laskea akun minimikoko. Akkujen hyötysuhde on hyvä, yleensä noin 98 %, joten häviöt eivät aiheuta suurta ylimääräisen kapasiteetin tarvetta [23].

Mikäli akku ladattaisiin joka kerta täyteen ja ajettaisiin aina aivan tyhjäksi, olisi akun koko oltava vähintään sama kuin linjasivun maksimikulutus. Todellisuudessa pikalatureilla on tehokasta ladata akku maksimissaan 80 % täydestä varauksesta. Lisäksi akun varaus-tasoa ei kannata päivittäisessä liikennöinnissä laskea alle 20 %, jotta akun käyttöikä ei

lyhene. Lisäksi akkukapasiteetissa on oltava sen verran ylimääräistä, että auto saadaan aamulla ja illalla ajettua vielä varikolle ja sieltä pois.

Tarkempaa mitoitusta varten on hyvä huomioida, että lähes kaikki tutkitut kulutuslukemat sähköbusseille on mitattu 12-metrisistä busseista. Teli- ja nivelbussit ovat kooltaan suurempia ja niiden omamassa ja matkustajakapasiteetti ovat suuremmat, eli niiden kulutus on varmasti isompi. VDL on tehnyt mittauksia nivelbussien kulutuksesta yli 50 miljoonan ajatun kilometrin perusteella, joten tuloksia voidaan pitää hyvänä lähtökohtana, vaikka ne eivät täysin ole yleistettävissä muiden valmistajien malleihin. Optimaalisissa ajo-olosuhteissa kulutus on noin 1,2 kW/km, mutta kovimmilla pakkasilla lumisissa oloissa noin 3,0 kW/km. Mikäli reitillä on paljon korkeuseroja tai ilma niin lämmin, että tarvitaan ilmastointia, on kulutus noin 1,6 kW/km ja normaaleissa talviolosuhteissa 1,8–2,4 kW/km. [39] Näiden lukemien perusteella voidaan arvioida laskennassa käytettäväksi keskikulutukseksi 1,8 kW/km.

Akkujen minimikokoa määritettäessä on otettava huomioon myös valittujen laturien teho, sillä akun koko määrää myös syötettävän tehon maksimiarvon. LTO-akuilla teho voi olla korkeintaan kymmenkertainen akun kapasiteettiin nähden, LFP-akulla paljon pienempi. 50 kWh akkuja ei siis voida ladata 600 kW laturilla, vaan on löydettävä sopiva yhdistelmä.

Tällä hetkellä akkujen kapasiteettia käytetään niin, että torin ja sataman välillä varaustilan vaihtelu on noin 5 prosenttiyksikköä kumpaankin suuntaan, lentoasemalta torille noin 8 % ja torilta lentoasemalle noin 14 %. 55 kWh akuille tämä tarkoittaa noin 7-11 kWh kulutusta suuntaansa. Erot ajosuuntien välillä selittyvät pääosin reitin korkeuseroilla. Vaihtelut kuljettajien ja ajankohdan suhteen ovat kuitenkin suuria, esimerkiksi luminen, kylmä ilma tai ruuhka lisäävät kulutusta. Vuoden 2017 tilastoissa helmikuun keskikulutus on yli 40 % suurempi kuin elokuun, eikä tässä huomioida lisälämmittimen energiankulutusta. [2]

Lähtökohtana on myös, että tulevaisuudessa sähköbussit eivät tarvitsisi enää ainakaan dieselkäyttöisiä lisälämmittimiä, vaan kaikki lämmitys hoidettaisiin sähköllä. Nyt lisälämmityksen kulutus on kylmillä ilmoilla noin 0,9 kW/km, mutta ei voida täysin varmasti sanoa, olisiko energiankulutus sama, mikäli lämmitysmuoto on eri. Tätä voidaan kuitenkin käyttää hyvänä lähtökohtana.

Akun kapasiteetin lisäksi on huomioitava sen varaustilan muutos latauskierron aikana. Mitä syvempi varauskierto on (eli mitä suurempi osuus akun kapasiteetista on käytössä), sen lyhempi on sen elinikä. Esimerkiksi kun lataussyklin syvyyttä kasvatetaan 20 %:sta 40 %, akun käyttöikä lähes puoliintuu. Tämän takia varikkolataus ainoana latausmuotona

vähentää ratkaisevasti akkujen käyttöikä. Koska tähän mennessä täysin sähköisiä busseja ei ole vielä ollut käytössä kauaa, ovat kaikki akun eliniän arviot laskennallisia, ja todellinen kesto selviää vasta laajemman käytön myötä. [27] Pikalatureilla akkuja ei kannata ladata yli 80 % tai lataus hidastuu merkittävästi, ja vastaavasti akun varausta ei voi päästää kovin lähelle nolaa. Akun kokoa optimoitaessa on siis ensin arvioitava todellinen energiantarve ja häviöt, ja sitten vähintään tuplattava tuo energiamäärä todellisen akun koon määrittämiseksi.

Akkujen fyysiseen kokoon vaikuttaa energiatiheys (kWh/kg). Koska bussissa tietysti toivotaan mahdollisimman pientä kuormaa kulutuksen ja teiden kulumisen minimoiseksi, on tärkeää, että akut ovat kompakteja. 300 kWh akku lisää bussin energiankulutusta jopa 20 % 100 kWh akkuun verrattuna. [17] Tämän takia akkujen kapasiteetti olisi hyvä optimoida jokaiselle reitille erikseen, jolloin niistä saataisiin maksimihyöty minimihaitoilla. Tällainen järjestely kuitenkin estää bussien liikennöinnin linjoilla ristiin, kun pienempi akkukapasiteetti ei riittäisikään pidemmälle linjalle tarvittaessa.

Vielä energiatheyttä kilogrammaa kohti merkittävämpi tekijä sähköbussseissa on akun energiatiheys tilavuutta kohti. Hiukan suurempikin paino voi olla parempi, jos akut vastaavasti vievät vähemmän tilaa. Yleisesti ottaen tehon ja tehotiheyden parantuessa akkujen riskit kasvavat. Joukkoliikennevälineissä turvallisuus on tietysti äärimmäisen tärkeä tekijä, joten akkujen valinnassa on tehtävä kompromisseja. Markkinoilla olevat sähköbussivalmistajat eivät tietenkään halua riskeerata asiakkaiden turvallisuutta tai omaa mainettaan, joten kaikkein riskialttiimpia akkumateriaaleja ei ole edes saatavilla.

Turussa sähköbussseissa tehtyjen mittausten perusteella bussin kulutus vaihtelee myös kuljettajan ajotavan mukaan. Suurimmillaan ero energiankulutuksessa taloudellisimman ja vähiten taloudellisen kuljettajan välillä on jopa 50 %. [2] Akkukapasiteetti on mitoittettava niin, ettei matkanteko pysähdy kuljettajan ajotavan takia. Toki kuljettajien ajotapaan on pyrittävä vaikuttamaan esimerkiksi koulutusten avulla. Paljon kuitenkin riippuu kuljettajan asenteesta ja vanhoista toimintamalleista, joihin ei aina pystytä ulkopuolelta vaikuttamaan. [28]

Kustannukset nousisivat, jos jokaiseen bussiin ruvettaisiin etsimään tarkalleen oikean kokoista akkua. Tästä syystä olisi hyvä löytää joku standardikoko, jolla pystyttäisiin liikennöimään kaikilla linjoilla, mutta joka ei olisi ylimitoitettu. Toinen vaihtoehto olisi hankkia esimerkiksi kahta eri kokoa akkuja omaavia autoja, jolloin autot voisivat kohtuullisessa määrin siirtyä linjalta toiselle. Tällöin kuitenkin esimerkiksi lyhyillä liityntälinjoilla ei tarvitsisi samanlaista akkukapasiteettia kuin monen kymmenen kilometrin kehälinjoilla.

Todelliseen tilanteeseen tietysti vaikuttavat eniten tällaisen järjestelyn vaikutukset kustannuksiin. Lisäksi on huomioitava kunkin linjan kilpailutuksessa valitut liikennöitsijät, eli samat bussit liikkuvat vain saman liikennöitsijän muilla linjoilla. Tämä voitaisiin mahdollisesti huomioida jo kilpailutuksen yhteydessä ja kilpailuttaa mahdollisimman samankaltaisia linjoja yhtenä kokonaisuutena, mikäli tälle ei ole muita ulkopuolisia esteitä.

Todellisuudessa akkujen hinnat eivät ole niin merkittävä kuluerä, että ne vaikuttaisivat ratkaisevasti elinkaarikustannuksiin. On siis tärkeämpää pelata hiukan varman päälle ja ottaa vähän isommat ja vähän kalliimmat akut kuin niin pienet, etteivät ne toisille reiteille riitä. [60] Liian suuria akkuja ei kuitenkaan kannata hankkia myöskään päästösyistä, sillä akkujen valmistuksessa syntyvien päästöjen osuus koko sähköbussin elinkaaripäästöistä on keskeinen. Akkujen valmistuksesta aiheutuvien päästöjen on arvioitu olevan $6 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{kg}$ akkua, mutta myös kaksinkertaisia lukemia hiilidioksidipäästöille on esitetty. Päästöt riippuvat vahvasti akun kemiallisesta rakenteesta ja esimerkiksi energiatiheydestä. 300 kWh akun valmistuksessa syntyvät päästöt ovat noin 30 % koko bussin elinkaaripäästöistä. [17]

4.5 Häiriötilanteisiin varautuminen

Kokemus on opettanut, että sähköbussisysteemin kanssa ongelmiin on hyvä varautua etukäteen. Vaikka pääosin lataus on toiminut kohtuullisen hyvällä tasolla, yksittäiset ongelmat ovat kuitenkin miltei päivittäisiä ja hyvällä ennakkoinnilla niiden riskejä voidaan vähentää olennaisesti. [2] Mitoituksessa on hyvä huomioida ainakin sellainen varmuuskerroin, että bussilla voidaan ajaa tarvittaessa kokonainen linjakierros, vaikka toisessa päässä ei pystytä lataamaan ollenkaan. Tämä parantaa käyttövarmuutta merkittävästi, sillä laturin lyhyessä vikatilanteessa linjan liikennöinti ei vaarannu.

Yleisin ja käytännössä varmasti esiintyvä häiriötilanne on bussin myöhästyminen aikataulusta. Laturi- ja akkukapasiteetti olisi syytä mitoittaa niin, että bussi pystyisi jatkamaan liikennöintiä, vaikka yksi suunniteltu lataus jäisi välistä. Tämä tarjoaisi merkittävää toimintavarmuutta ja sillä voitaisiin estää myöhässä olevien bussien laturille aiheuttaman jonon kerrannaisvaikutukset. Usein varmasti olisi aikaa edes lyhyeen lataukseen ja todennäköisesti aikataulua pystyttäisiin kirmämään niin, että seuraavalla latauspisteellä olisi mahdollista ladata hiukan pidempään.

Linjalla 1 sähköbussien mediaani myöhästymisaika kevään 2019 aikana on ollut noin 10 s ja keskimäärin noin 40 s. Myöhästymisajoista ei voi toki erotella, mitkä myöhästymisistä johtuvat esimerkiksi latausongelmista ja mitkä ruuhkasta tai muusta ulkopuolisista tekijöistä. Dieselbusseilla myöhästymistä ei samalla linjalla ole keskimäärin lainkaan.

Voidaan huomata, että myöhästymisten siis täytyy johtua jostain sähköbussin lataukseen liittyvistä tekijöistä, kuten latauksen keskeytymisen aiheuttamasta viivästyisestä. Toisaalta linjalla liikennöidään dieselbussein ainoastaan ruuhka-aikoina hyvin tiheällä vuorovälillä, mikä saattaa vääristää tilastoa.

Nykyään on olemassa myös älykkäitä laturimalleja, joissa on kaksi pantografia. Näissä malleissa olisi periaatteessa mahdollista hyödyntää reaaliaikaista älykästä järjestelmää, joka tunnistaa eri bussien akun varaustilan ja optimoi lataustehon sen perusteella. Tällöin samaan laturiin olisi kytkeytyneenä kaksi bussia, ja laturin maksimiteho olisi jaettu kahdelle autolle niiden akun varaustilan ja tunnetun reitin mukaan. Esimerkiksi 300 kW laturiin tulee kaksi bussia, toisen akun varaustila on 65 % ja sen linjasivun pituus on 10 km ja toisen auton varaus 50 % ja linjasivun pituus 15 km. Tällöin jälkimmäiselle autolle ohjattaisiin esimerkiksi 200 kW lataustehoa ja ensimmäiselle vain 100 kW. Vastavasti, jos toisen bussien akut tulevat täyteen, saadaan kaikki teho ohjattua toisen bussien käyttöön ja niin edelleen. Tällainen tekniikka ei ole vielä laajassa käytössä, mutta tulee todennäköisesti yleistymään tulevaisuudessa. Nykyisissä kahden pantografien malleissa latausteho usein jakautuu tasan molemmille autoille. Toisaalta jo se, että lataus onnistuisi kerralla vain yhteen autoon, nopeuttaisi latausta, kun toinen auto voisi kiinnittyä laturiin etukäteen ja lataus voisi alkaa heti edellisen päätyttyä, vaikka toisessakin autossa virroitin olisi yhä kiinni. [28]

Hyvä ratkaisu joustava lataus on etenkin, jos käytössä on useita erikokoisia busseja. Esimerkiksi suuremman kulutuksen nivel- ja telibusseille voitaisiin tällöin ohjata suurempaa tehoa kuin muille busseille, jolloin kaikkien latausajat pysyisivät kohtuullisina. Muiden laturilla olevien bussien sisääntulotehoa voitaisiin laskea esimerkiksi 50 kW ja ohjata tämä teho yhdelle laturille, jolta saisi 300 kW sijaan 450 kW tehoa.

Mikäli torille päädytään rakentamaan latauspisteet kaikille sitä kautta kulkeville linjoille, voitaisiin häiriötapauksissa latausaikaa torilla mahdollisesti kasvattaa normaalista, ja näin varautua muiden latureiden ongelmiin. Välilatausmahdollisuus lisäisi toimintavarmuutta ratkaisevasti, vaikka välilataukselle ei normaaliajossa olisi välttämättä tarvetta. Tällöin riittäisi, jos torilla olisi laturit muutamalle niistä vakituisesti käytävälle linjalle, ja esimerkiksi yksi varalaturi. Varalaturia voitaisiin hyödyntää muiden latureiden vioituessa tai mikäli linjojen omille latureille on myöhästymisen takia kertynyt jonoa. Tällainen järjestely edellyttää toki, että eri linjoilla liikennöidään autoilla, joita voi ladata kaikkia samankaltaisella latauslaitteella.

Mikäli linjoilla siirrytään siihen suuntaan, että lataus tapahtuu ensisijaisesti kauppatorilla ja esimerkiksi vain toisella päätepysäkillä, on otettava huomioon ulkoiset rajoitteet keskusta-alueen liikennöinnissä. Laturimitoituksessa on otettava huomioon esimerkiksi keskusta-alueen liikennöintiä rajoittavat tapahtumat ja varsin mahdolliset liikenneruuhkat tai -onnettomuudet, jotka voivat rajoittaa liikennöintiä keskusta-alueella osittain tai kokonaan. Jos tällaisia häiriötilanteita ilmenee, on liikennöintiä pystyttävä edes jossain määrin jatkamaan ilman keskustassa latausta.

Varsinkin siirryttäessä yhä laajemmalla kapasiteetilla sähköbussiliikennöintiin, tulee tutkia varalatauspaikkojen tarpeellisuutta. Varalatureina olisi ensisijaisesti hyvä hyödyntää muiden runkolinjojen latauspisteitä, mikäli tämä on mahdollista. Muussa tapauksessa latauspaikat eivät välttämättä sijaitisi yhdenkään varsinaisen linjan päätepysäkillä, vaan merkittävässä solmukohdissa niin, että etenkin pidemmän välimatkan linjoilla niillä voitaisiin häiriötilanteissa korvata päätepysäkkilatausta. Ihanteellinen tilanne toki olisi, jos solmupisteessä sijaitisi vielä esimerkiksi liityntälinjan latauspaikka, jolloin laturin todellinen kapasiteetti saataisiin hyödynnettyä. Lyhyet liityntälinjat voisivat pärjätä hyvinkin yhdellä latauspaikalla. Tällaisia sopivia solmukohtia voisivat olla esimerkiksi kehälinjan ja naapurikuntiin kulkevien pitkien heilurilinjojen risteämiskohdat. Hätätapauksissa latausta ei haittaisi, vaikka jouduttaisiin poikkeamaan joitain kymmeniä metrejä normaalilta reitiltä (laturi esimerkiksi liittymän yhteydessä).

Häiriötilanteisiin valmistautumisessa täytyy jossain vaiheessa toki tehdä myös taloudellisesti järkeviä ratkaisuja, sillä latauskapasiteetin ylimitoitus tulee varsin kalliiksi. Tällöin on tehtävä linjauksia esimerkiksi siitä, onko bussien akku- ja laturikapasiteetin riittävä kokopäiväiseen liikennöintiin yhden laturin voimin kahden sijaan, tai kuinka alas akun varaustaso saa tällaisissa tapauksissa laskea. Usein varavaihtoehdoksi on tarjolla dieselkäyttöisiä busseja, joita voidaan poikkeustilanteissa käyttää sähköisillä linjoilla. Toki varabussikapasiteetti ei riitä kattamaan laajaa, esimerkiksi sähköverkkoon liittyvää ongelmaa. Tällöin toisaalta bussien liikennöinti ei liene tärkeysjärjestyksessä ensimmäisenä.

Turussa on tunnistettu myös yksittäisiä lataukseen vaikuttavia häiriötekijöitä. Lataustapahtuma keskeytyy herkästi, mikäli bussi heilahtaa voimakkaasti latauksen aikana. Koska linja 1 liikennöi satamaan ja lentoasemalle, matkustajat nousevat usein kyytiin painavien matkatavaroiden kanssa, mikä voi saada bussin liikahtamaan. Erityisen herkkä laite on, mikäli lataus ei ole vielä täysin alkanut, tällöin lataus on aloitettava uudelleen. Osa kuljettajista päästää ongelmaa välttääkseen asiakkaat kyytiin vasta, kun

lataustapahtuma on käynnissä, mikä aiheuttaa hämmennystä asiakkaisissa ja saattaa pitkittää päätepyysäkillä kulunutta aikaa, etenkin kun linjalla on normaalia enemmän kertali-pun ostajia. [28]

Bussissa sijaitseviin latauslaitteen vastaanottokiskoihin on myös tullut sähkövirran aiheuttamaa paksuuntumista, joka estää virran normaalin kulun. Tällöin virroitin ei koske tarpeeksi bussin kiskoihin, ja lataus ei toimi. Muutos kiskoissa aiheuttaa muutosta myös virroittimen pinnoille, mikä taas saa vastaavan ongelman leviämään kaikkiin samaa laturia käyttäviin busseihin. Ongelman tunnistamisen jälkeen latureiden ja bussien virroittimien kuntoa on tarkkailtu säännöllisesti vastaavien ongelmien ehkäisemiseksi. Laturin kanssa ongelmana on ollut myös virroittimen kiskojen vääntyminen, kun bussi ei ole ollut täysin oikeassa asennossa latauspisteelle tultaessa. Tämän ehkäisemiseksi virroittimen varsien päihin on asennettu muoviset lisäkappaleet, jotka ehkäisevät virroittimen pääsyn bussin katolla olevien kiskojen alle. [28]

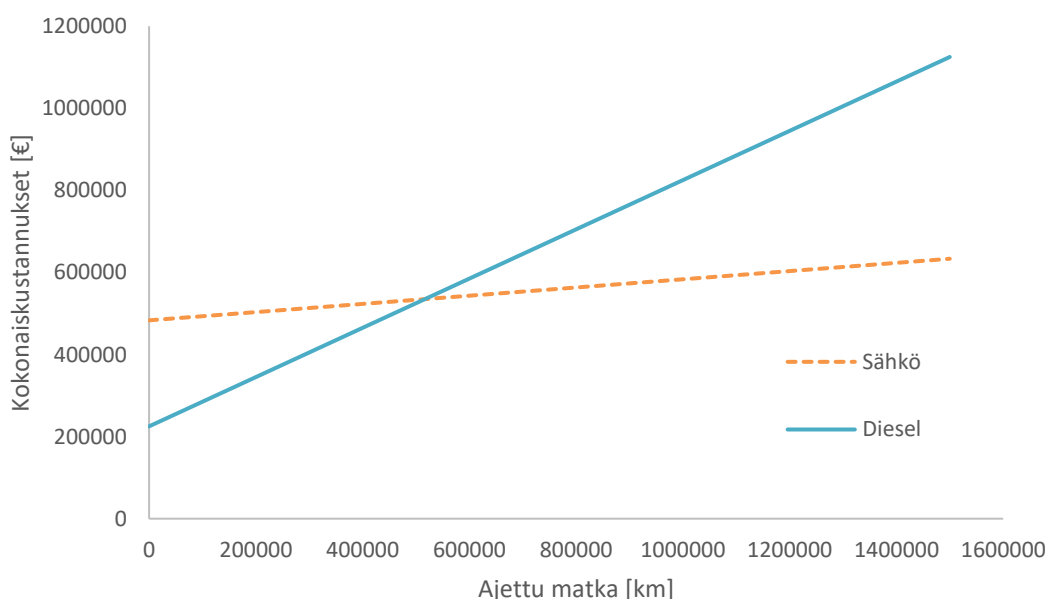
4.6 Taloudelliset vaikutukset

Latureiden valinnassa ei voi tehdä valintoja yhden laturin kappalehinnan perusteella, vaan on ajateltava koko kokonaisuuden elinkaarikustannuksia [54]. Sähköbussiverkoston laajentuessa hinnan kasvu ei myöskään ole lineaarista. Esimerkiksi halvemmat varikkolaturit vaativat kalliimmat suuret akut ja mahdollisesti vara-autoja, kun taas kalliimmat pantografilaitteet voivat palvella useita busseja ja linjoja. Vastaavasti bussien akkujen kokoon ja hintaan vaikuttaa latureiden tyyppi ja koko. Sähköbussien kokonaiselinkaarikustannuksiin vaikuttavat kuitenkin eniten investointikustannusten suuruus, esimerkiksi laturin hinta on pikalatausmallissa keskimäärin noin 20 % bussin kokonaiselinkaarikustannuksista. Akkujen hinta on noin 500–800 €/kWh, riippuen akun koostumuksesta. Pikaladattavissa malleissa voidaan arvioida hinnan jäävän siis alle 100 000 € bussia kohden. [15]

Sähköbussiverkostolla on sekä kertaluonteisia investointiin ja tekniikan asentamiseen liittyviä kustannuksia, että jatkuvia vuosittaisia tai päivittäisiä käyttökustannuksia. Liittyminen verkkoon noin 9000–18000 € laturin tehosta riippuen [47], vuosittainen verkkomaksu noin 4000 € ja lisäksi muut liityntäkulut (verkon vedot latauspisteelle, kaivuu ja muut maatyöt) muutamia kymmeniä tuhansia. Itse pikalaturi noin 150 000 €, mutta tarkka hinta tietysti riippuu siitä, minkä tehoinen ja mallinen laturi valitaan ja tuleeko siihen esimerkiksi kaksi pantografia tai latauspaikkoja henkilöautoille. [56] Laturin tehon vaikutus hintaan on kuitenkin varsin pieni osuus kokonaiskustannuksiin nähden, joten sen perusteella ei kannata valita pienempitehoisempaa laturia.

Jatkuvat käyttökustannukset ovat esimerkiksi bussien ja latureiden huoltokustannukset. Nämä voidaan onneksi melko hyvin ennakoida, sillä usein liikennöitsijällä ja valmistajalla on jokin kiinteähintainen sopimus, joka kattaa kaikki tarvittavat huollot. Turun tapauksessa Linkker ei ole täysin pystynyt tarjoamaan luvattuja huoltopalveluita, mikä on aiheuttanut hidastumista huoltotöihin ja autojen poissaoloa liikenteestä. [2] Sähköbussien huoltokustannukset ovat yleisesti pienemmät kuin dieselbusseilla, mutta lisäksi tulee huomioida latauslaitteiden vaatiman huollon lisäkustannus. Nämä yhdessä ovat melko lähellä tavallisen dieselbussin huoltokustannusta, joten niitä ei tarvitse sen tarkemmin ottaa huomioon laskennassa.

Turun tapauksessa kokonaiselinkaarikustannuksiksi sähköbusseille on vuoden 2017 hintatasolla arvioitu noin 0,85 €/km. Kokonaiskustannukset ovat vahvasti riippuvaisia bussin ajosuoritteiden määrästä, suuri vuosittainen ajomäärä ja bussin käyttöikä laskevat kilometrikohtaista kustannusta. Elinkaarikustannukset ovat noin 0,07 €/km pienemmät kuin dieselkäyttöisellä telibussilla, mutta noin 0,05 €/km suuremmat kuin sähköbussin kanssa samankokoisella dieselbussilla. Täysin tarkkojen elinkaarikustannusten määrittäminen on haastavaa, sillä rajausta ei ole helppoa. Bussien ja latureiden investointikustannusten lisäksi tulee huomioida esimerkiksi sähköistyksen vaikutukset autojen ajokiertoon ja kuljettajien työaikaan ja tarvittavien maankäytöllisten muutosten kustannukset. Nämä eivät usein tule kaikki yhden tahon maksettavaksi, joten tarkkoja summiakaan ei välttämättä ole saatavilla. [2] Karkeasti sähköbussin energiakustannukset ovat noin 60–75 % matalammat kuin dieselbusseilla [15], joten voidaan laskea, millaisilla ajomäärillä saavutetaan dieselbusseja parempi kannattavuus. Kuvassa 9 on karkeasti arvioitu kustannusten määrä ajosuoritteen suhteen.



Kuva 9 Bussien elinkaarikustannukset ajettujen kilometrien funktiona

Kuvasta nähdään, että suurista investointikustannuksista huolimatta sähköbusseilla voidaan päästä dieselbusseja kannattavampaan liikennöintiin, mikäli vuosittaiset ajosuoritteet ovat tarpeeksi suuria. 100 000 km vuosisuoritteilla sähköbussit tulisivat kokonaiskustannuksiltaan edullisemmiksi normaalin noin 10 vuoden käyttöiän aikana. Laskennassa ei tosin ole huomioitu akkujen mahdollista vaihtotarvetta kesken käytön. Suuremmilla ajomäärillä kannattavuus tulee paremmaksi jo alle viidessä vuodessa, mutta todellisiin vertailukelpoisiin lukuihin on vaikea päästä ilman laajempaa näyttöä käytön loppupuolella syntyvistä kustannuksista. Tällaisia ovat esimerkiksi akkujen varauksen muutokset käyttöiän lopulla, eli joudutaanko latausaikaa tai -tehoa kasvattamaan, jotta päästään uuden akun kaltaisiin energiamääriin.

5. LATUREIDEN JA AKKUJEN OPTIMOINTI

Suurella teholla tehtävät pikalataukset mahdollistavat bussien ajamisen vaikka kellon ympäri ja päiväsuorite voi olla hyvinkin pitkä. Jotta pikalataustehosta saadaan suurin mahdollinen hyöty, pyritään minimoimaan akun koko ja maksimoimaan laturin teho, kuitenkin näiden toisilleen asettamissa rajoissa. [23] Tässä laskentaosassa optimoidaan laturin ja akkujen kokoa. Koska tarkoituksena on hankkia käyttökelpoista tietoa, valitaan akuista ja latureista vaihtoehtoisiksi tällä hetkellä markkinoilla olevia yleismalleja, joiden hankintakustannukset todennäköisesti ovat paljon alhaisemmat, kuin yksittäiselle reitille optimoidut akkupaketit.

5.1 Laskennan lähtökohdat

Työssä on tarkoitus selvittää suuntaa antavasti, miten hyvin valitut laturityypit palvelevat valittuja akkukokoja tietyn pituisilla reiteillä. Jotta olisi varauduttu tilanteeseen, jossa myös bussin lämmitysenergian tarve katetaan sähköllä, käytetään kovilla pakkasilla mitattuja kulutuslukemien keskiarvoa, eli noin 1,10 kW/km itse liikkumiseen ja 0,90 kW/km lämmitykseen, eli karkeasti 2,00 kW/km [43, 44]. Todellisuudessa energiankulutus vaihtelee esimerkiksi sää- ja keliolosuhteiden, reitin profiilin, matkustajamäärän ja kuljettajan ajotavan mukaan, mutta saatu arvo pohjautuu kuitenkin melko suureen datamäärään, joten sitä voidaan pitää luotettavana. [22]

Latauksessa syötetty energiamäärä saattaa vaihdella, mutta tällekin on annettu arviot olemassa olevan datan perusteella, ja ne on todettu hyväksi keskiarvoiksi. Maksimiarvoksi akkuun tulevalle energialle voidaan pitää 300 kW, mikäli käytetään nykyisen kaltaisia latureita. Todellisuudessa latausteho laskee, kun lähestytään 80 % varaustiheyttä, mutta vaikutus ei päivätason tarkastelussa ole merkittävä. [2]

Latauksen lisäksi aikaa kuluu laturin kiinnittymiseen ja irrottautumiseen; Turussa keskimääräiset arvot noille ajoille ovat noin 38 s ja 36 s. [2] Koska laskennallisesti ei ole tarpeen eritellä kiinnitys- ja irrotusaikaa, tämä huomioidaan vähentämällä jokaisen pysäkin latausajasta 1 min. Latausajat ylös nousevalle pantografille ovat yleisesti hieman lyhemmät kuin alas laskeutuvalla mallilla, joten minuutin arvio kuvaa molempia.

Saaduissa tuloksissa yksittäiset lukuarvot eivät ole tieteellisesti päteviä, eikä niitä ole sellaisina tarkoitus tutkia. Sen sijaan pyritään saamaan jonkinlainen käsitys lataus- ja akkukapasiteetin riittävydestä. Jokaiselle reitille on arvioitu keskinopeus vastaavalla reitillä liikennöivien dieselbussien keräämän datan perusteella. Päätepysäkeille jäävä aika

on selvitettävissä aikataulujen perusteella ja se on kaikilla runkolinjoilla 5 minuuttia päätepusäkkiä kohti. [48]

5.2 Lähtöarvot, muuttujat ja menetelmät

Muuttujina on valitun reitin pituus [km], keskinopeus ajoaikana [km/h], käytettävissä oleva aika päätepusäkeillä [min] ja mahdollisella välilatausasemalla, käytettyjen latureiden teho [kW] ja akun koko [kWh]. Lisäksi on tehty testauksia, joissa toinen latureista on vikatilassa, ja esitetty tämän vaikutusta akun kapasiteettiin.

Akkujen kokovaihtoehtoina ovat 40, 60, 80 ja 100 kWh ja kehälinjoilla on lisäksi testattu 120 ja 150 kWh kapasiteettia. Kaikki laskennassa käytetyt vaihtoehdot on esitetty taulukossa 5. Eri vaihtoehdoissa on muutettu lataustehoa, laturien määrää ja sijaintia sekä latausaikaa. Päätepusäkki 1 (taulukossa pp1), on linjan lähtöpiste laskennassa. Tapauksissa, joissa latausaika ja -teho ovat samat kummallakin päätepusäkillä, ei sinänsä ole merkitystä, kumpi valitaan aloituspusäkillä. Epäsymmetrisissä tilanteissa esimerkiksi toisen laturin vaurioituessa, voi ajomahdollisuuksiin vaikuttaa selkeästi se, kumpaa laturia voidaan käyttää.

Taulukko 5. *Latausvaihtoehdot. Päätepusäkin lyhenteenä käytetty pp ja välilatauspusäkillä vp.*

Testitunnus	pp1 aika	vp aika	pp2 aika	pp1 teho	vp teho	pp2 teho
A	5	0	5	300	0	300
B	7	0	7	300	0	300
C	5	0	5	300	0	450
D	5	0	5	450	0	450
E	5	0	5	300	0	600
F	5	0	5	450	0	600
G	5	0	5	600	0	600
H	5	3	5	300	300	300
I	5	3	5	300	300	450
J	5	3	5	450	300	450
K	5	3	5	300	300	600
L	5	3	5	450	300	600
M	5	3	5	600	300	600
N	3	5	3	0	300	0
O	3	5	3	0	450	0
P	3	5	3	0	600	0
Q	5	0	5	300	0	0
R	5	0	5	450	0	0
S	5	0	5	600	0	0
T	5	3	5	300	300	0
U	5	3	5	450	300	0
V	5	3	5	600	300	0

Läheskään kaikki taulukon arvot eivät ole kaikilla linjoilla järkeviä kombinaatioita, ja mikäli tarvittava päiväsuorite täytetään jo pienemmällä latausteholla, ei suurempia tarvitse erikseen tutkia. Tarkoituksena on löytää suuntaa antavat arvot siitä, millaisilla tehoilla ja latausmäärillä kullakin linjalla pärjättäisiin. Lisäksi on huomioitava, että käytettäessä 450 tai 600 kW latureita, pienin mahdollinen akkukapasiteetti, joka kestää tällaisen tehon, on 60 kWh.

5.3 Laskennan tulokset

Edellisessä luvussa esitetyn taulukon 5 mukaiset erilliset tapaukset on laskettu jokaiselle potentiaaliselle linjalle Excel-ohjelmistolla. Saadut tulokset pienimmästä riittävästä akkukapasiteetista on koottu alle taulukkoon 6.

Taulukko 6. *Eri linjojen akkukapasiteetin tarve taulukon 5 mukaisilla lataustehoilla ja -ajoilla.*

	3	4	5	5A	8	9A	9B	10	L71
A	-	-	-	40	-	-	-	-	80
B	-	100*	40	+	60	-	-	40	40
C	-	-	80*	+	-	-	-	80	40
D	-	100*	60	+	100	-	-	60	+
E	-	-	60	+	60	-	-	60	+
F	100*	60	+	+	+	-	-	+	+
G	60	+	+	+	+	-	-	+	+
H	-	40	40		40	-	-	40	
I	60	+	+		+	-	-	+	
J	+	+	+		+	150	-	+	
K	+	+	+		+	150	-	+	
L	+	+	+		+	60	-	+	
M	+	+	+		+	+	150	+	
N	-	-	-		-	-	-	-	
O	100*	60	60*		60	-	-	60	
P	80	+	60		+	-	-	60	
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	80	-	-	-	-	100*
T	-	-	-		-	-	-	-	
U	-	-	80		60	-	-	60	
V	-	80	60		+	-	-	60	

Taulukossa 6 tähdellä merkatut linjat on mahdollista ajaa yhden päivän ajan, mutteivat sovi päivittäiseen liikennöintiin, eli käytännössä varaustaso laskee hyvin lähelle nollaa. + tarkoittaa, että pienin akkukapasiteetti riitti jo pienemmällä latausteholla, joten kaikki suuremmat käyvät myös. – ei edes 100 kW akulla ole mahdollista ajaa koko päivää.

Tyhjät ruudut kuvaavat tilannetta, jossa välilatausmahdollisuutta ei ole, eli käytännössä linja joko alkaa tai päättyy torille.

Linjalla 3 välilataus on lähes välttämätön, tai vaihtoehtoisesti joudutaan kasvattamaan lataustehoa 600 kW päätepusäkeillä. Välilatauksen kanssakaan linja ei kestä koko päivää tilannetta, jossa toinen laturi on poissa käytöstä, eikä päätepusäkeillä riitä pelkkä 300 kW latausteho. Linjalla 4 suuret lataustehot riittävät pelkällä päätepusäkkilatauksellakin, mutta mikäli välilataus on mahdollinen, saadaan lataustehoja ja akun kapasiteettia pienennettyä selvästi. Myös lataus pelkästään torilla riittäisi, kun käytetään vähintään 450 kW lataustehoa.

Linja 5 on edellisiä lyhempi, joten sillä liikennöintiin riittäisi pienempikin akku. Päätepusäkkilatauksessa 450 kW teholla voidaan liikennöidä sujuvasti jo 60 kWh akuilla ja mikäli välilataus on mahdollinen, voidaan laskea myös lataustehoja. Linjalla olisi mahdollista liikennöidä myös yhden päätepusäkkilaturin voimin, mikäli lisäksi voitaisiin tehdä välilataus torilla. Linjalla 8 tilanne on hyvin samankaltainen; sen suurimpana erona linjaan 5 on välilatauspisteen sijainti lähes puolivälissä linjaa, mikä tarkoittaisi pientä varaussyvyyden laskua käytettäessä välilatausta. Runkolinjoista lyhimmillä 5A linjalla 40 kWh akku riittää liikennöintiin kaikissa normaaleissa tilanteissa ja akkukapasiteettia kasvattamalla linjalla voitaisiin liikennöidä myös ainoastaan yhden laturin turvin.

Linja 10 on pituudeltaan lyhimpien joukossa, joten sen maltillinen sähkönkulutus sopii pienemmällekin akku- ja laturiteholle. Samoin se mahdollistaa latauksen pelkästään torilla tai ilman toista päätepusäkkilaturia. Linjalla L71 ei ole välilatausmahdollisuutta, mutta mikäli sitä pystytään lataamaan molemmilla päätepusäkeillä, ei tarvita kovin suurta akkua. Ylioppilaskylän päätepusäkki ei ole kaikista paras sijainti laturille, mutta vain yhdellä latauksella liikennöinti vaatisi suuren akkukapasiteetin. Ylioppilaskylään liikennöi kuitenkin myös linja 5 ja useat liityntälinjat, joten sen rakentaminen olisi kuitenkin perusteltavissa.

Linja 4 päättyy toisesta päästäan Halisiin ja linja 10 Härkämäkeen. Näille päätepusäkeille ei liikennöi yksikään muu runkolinja, joten ne eivät ole parhaita mahdollisia sijoituspaikkoja latureille. Kummallakin linjalla on mahdollista liikennöidä myös pelkästään toisen päätepusäkkilaturin ja välilatauksen turvin, mikäli lataustehoa päätepusäkillä tai latausaikaa torilla kasvatetaan. Aikataulutuksessa voitaisiin tällöin mahdollisesti lyhentää latauksettoman päätepusäkin pysäkkiaikaa, jolloin vaikutus autokiertoon ei olisi olennainen.

Mikäli lisälämmityksen tarvetta ei oteta huomioon, laskennan perusteella kaikille paitsi kehälinjoille riittäisi 5 min päätepusäkkijalla 300 kW lataus ja 40 kWh akkukapasiteetti.

Tämä on todella hyvä tulos bussiliikenteen suunnittelun kannalta, sillä samat autot soveltuisivat liikennöintiin kaikilla näillä linjoilla. Nämä tulokset eivät kuitenkaan vielä riitä talviajan liikennöintiin lainkaan, vaan akun kokoa on kasvatettava merkittävästi kaikilla linjoilla 5A:ta lukuun ottamatta.

Kehälinjat ovat pituudeltaan lähes kaksikertaisia kaikkiin muihin linjoihin nähden, joten niiden kulutus on eri luokkaa. Niillä suurempi akkukapasiteetti ja välilataus ovat välttämättömiä, jotta saavutetaan riittävä toimintavarmuus. Muuten korkeillakin lataustehoilla ongelmia muodostuu heti, jos bussi myöhästyy aikataulun mukaisesta saapumisajasta ja päätepysäkin latausaika vähenee lasketusta. Nämä kaksi linjaa voidaan siis erottaa aivan omaksi ryhmäkseen suunnitellessa akkukapasiteetin ja laturitehojen riittävyyttä. Taulukosta 6 huomataan, että pidemmällä kehälinjalla ei riitä edes 100 kWh akku talviliikennöintiin. Suurempiakin akkukapasiteetteja on toki tarjolla, mutta hyvä vaihtoehto olisi myös latausajan pidentäminen, mikäli se olisi mahdollista. Mikäli pisimmälle linjalle 9B voitaisiin lisätä toinen välilataus edes häiriötilanteita varten, paranisi toimintavarmuus merkittävästi. Tällöin esimerkiksi toisen päätepysäkkilaturin vaurioituessa voitaisiin korvata päätepysäkin lataus tällä välilatauspaikalla ilman kohtuuttomia vaikutuksia aikatauluun.

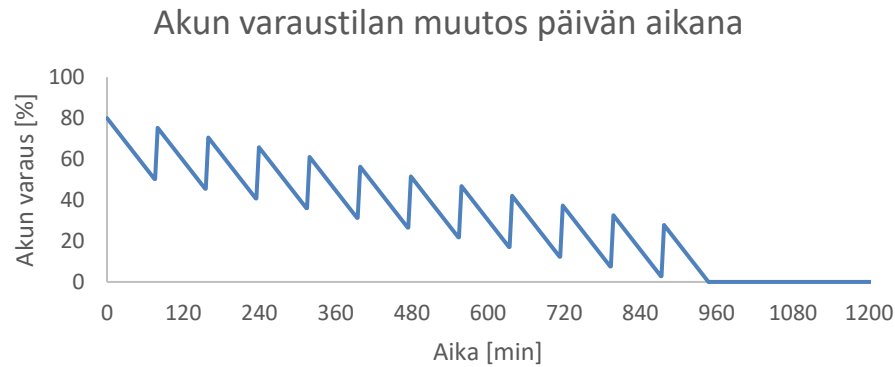
Taulukosta nähdään, että helpoin tapa varmistaa akkukapasiteetin riittävyys on lisätä latausaikaa. Jo kaksi minuuttia lisää latausaikaa vähentää akun kokotarvetta ratkaisevasti. Kuten aiemmin todettua, ei päätepysäkkiajan kasvattaminen ole kuitenkaan taloudellisesti hyvä vaihtoehto, sillä se lisää työvoimakustannuksia ja vaikuttaa aikataulusuunnitteluun.

Myös välilatauksen käyttö on yksittäisen laturin lataustehon kasvattamista tehokkaampi keino akkukapasiteetin tarpeen pienentämiseen. Lyhytkin välilataus pitää akun varaustilaa korkeammalla, jolloin liikennöinti ei ole niin altista häiriötilanteille, esimerkiksi yksittäisille myöhästymisille. Välilatausmahdollisuus jo hätäratkaisuna häiriötilanteisiin tuo ratkaisevasti lisää toimintavarmuutta. Käyttövarmuuden kannalta ihanteellinen tilanne olisi, mikäli osaa linjoista ladattaisiin torilla välilatauksella, ja muut linjat voisivat esimerkiksi häiriötilanteissa käyttää näitä latureita.

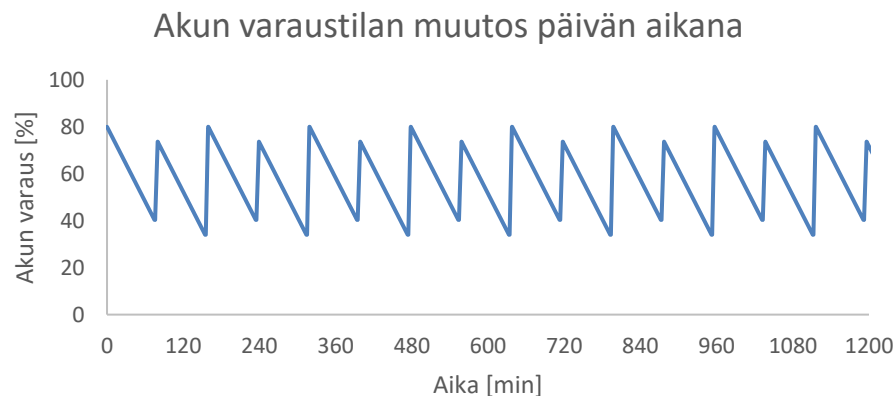
Mikäli aikataulusuunnittelussa ollaan liian tiukkoja, ja bussit ovat lähes jatkuvasti myöhässä, ei yhdelläkään linjalla voida jatkaa liikennöintiä samalla akkumitoituksella. Yksittäisissä myöhästymisissä käytännössä kaikki linjat pystyvät jatkamaan liikennöintiä normaalisti, mutta systemaattinen myöhästyminen vähentää latausaikaa olennaisesti, jolloin

akkukapasiteetin tarve olisi paljon suurempi. Liian lyhyt latausaika muodostuu ongelmaksi myös, jos laturikapasiteetti on alimitoitettu bussien tarpeeseen nähden ja latauspisteille muodostuu jonoa. Jonoa ei ole muutoin huomioitu laskennassa.

Taulukon 6 kokoamiseen käytetystä laskennasta on saatu kuvien 10 ja 11 kuvaajia, joiden perusteella arviot akkukapasiteetin riittävydestä on tehty.



Kuva 10 Linja 10, ei välilatausta, molemmissa päissä 300 kW, 80 kWh akku



Kuva 11 Linja 10, ei välilatausta, laturit 300 ja 450 kW, 60 kWh akku

Kaikkien linjojen osalta kuvaajia ei ole mielekästä esittää, sillä vaihtoehtoja kertyy yhteensä lähes 200.

5.4 Ratkaisujen taloudelliset vaikutukset

Laskennan perusteella kehälinjat eroavat keskeisesti kaikista muista linjoista tehontarpeensa puolesta. Häiriötilanteisiin voitaisiin varautua torin latauspisteillä, joita voidaan toki normaalikäytössäkin hyödyntää, mikäli bussi pysähtyy useammaksi minuutiksi torille.

Akkujen hinta vaihtelee materiaalista riippuen noin 500–1000 €/kWh ja pikalaturin noin 150 000–250 000 € [15, 16, 57]. Näitä hintoja käyttäen voidaan laskea myös taloudellista

kannattavuutta välilataukselle. Esimerkiksi linjalla 8 liikennöidään ruuhka-aikoina 20 autolla. Jos tällä linjalla yhdellä välilaturilla voitaisiin pienentää kaikkien bussien akkutarvetta 20 kWh syntyisi säästöä parhaimmillaan 250 000 €. Välilatauksen lisääminen tuo säästöjä etenkin tilanteessa, jossa käytetään kalliita LTO-akkuja ja samalla voidaan pienentää päätepuskien lataustehoa esimerkiksi 600 kW:sta 300 kW:iin. Linjan 8 lisäksi linjoilla 4, 5 ja 10 välilataus olisi todennäköisesti halvempi vaihtoehto, tosin erot eivät pienemmän automäärän takia ole yhtä olennaisia. Mikäli akkujen hinta laskee ratkaisevasti, tulee tilanne todennäköisesti kääntymään.

Yleisesti voidaan huomata, että talviolosuhteiden liikennöintiä varten 300 kW latausteho ei yksin riitä monellakaan linjalla. Nyt laskennassa on oletettu, että torilla käytetään aina vain 300 kW lataustehoa ja 3 minuutin latausaikaa. Toinen vaihtoehto olisi sijoittaa torille kovatehoisemmat laturit, jolloin päätepuskikilatauksen tehontarve ei nousisi kovin suureksi. Latausaikaa torilla ei todennäköisesti voida kovin paljon pidentää, ainakaan ruuhkaisina aikoina, tai alkaa muodostua jonoja.

Mikäli kaikki potentiaaliset linjat sähköistettäisiin, olisi Uittamolla yhteensä neljän eri linjan päätepuske. Tällöin olisi todennäköisesti tarvetta vähintään kahdelle laturille tai ainakin yhdelle laturille, jossa olisi kaksi erillistä pantografia. Mikäli laturi mahdollistaisi lataustehon optimoinnin eri autojen kesken, olisi kannattavaa käyttää kehälinjojen lataukseen suurempaa tehoa, ja muille linjoille voisi riittää jo esimerkiksi 200 kW.

Latureiden tehoerot vaikuttavat kustannuksiin vähemmän kuin erot akkujen koossa, jo niiden pienemmän lukumääränkin takia. Tämän takia päädytään ratkaisuun, jossa kaikilla pysäkeillä käytetään 450 kW latureita ja tarkastellaan, olisiko tällöin mahdollista liikennöidä esimerkiksi vain kahdella erilaisella akkukapasiteetilla.

Kaikille linjoille ei ole järkevää rakentaa omaa laturia päätepuskeille, mikäli päätepuskiki on vain yhden linjan käytössä. Esimerkiksi linjalla 10 riittäisi lataus Uittamon päätepuskikillä, mikäli torilla voitaisiin suorittaa edes lyhyt lisälataus asiakkaiden noustessa kyytiin. Toki tällaisissa tilanteissa ainoan päätepuskikilaturin vaurioituminen tai myöhästyminen aikataulusta vaikuttaa ratkaisevasti akun varaustason riittävyteen.

Optimoinnin kannalta ihanteellinen vaihtoehto olisi, jos bussien akkukapasiteettia voisi muuttaa, esimerkiksi lisääkuilla jotenkin. Tällöin optimointi onnistuisi ja painavan akun haitat voitaisiin minimoida lyhyillä reiteillä akun kuitenkin riittäessä myös pitkille reiteille. Tällaista mahdollisuutta eivät kuitenkaan valmistajat ainakaan vielä tarjoa, vaikka se toisi paljon joustavuutta, kun samat bussit käyvät melkein minne vain ja kuitenkin aamulla

tiedetään mille reitille se on lähdössä. [23] Ongelmat tekniikkaan liittyen ovat pitkälti samoja kuin akunvaihtolataustyylissä, akkujen käyttöikä pienenee ja sähköturvallisuusriskit kasvavat.

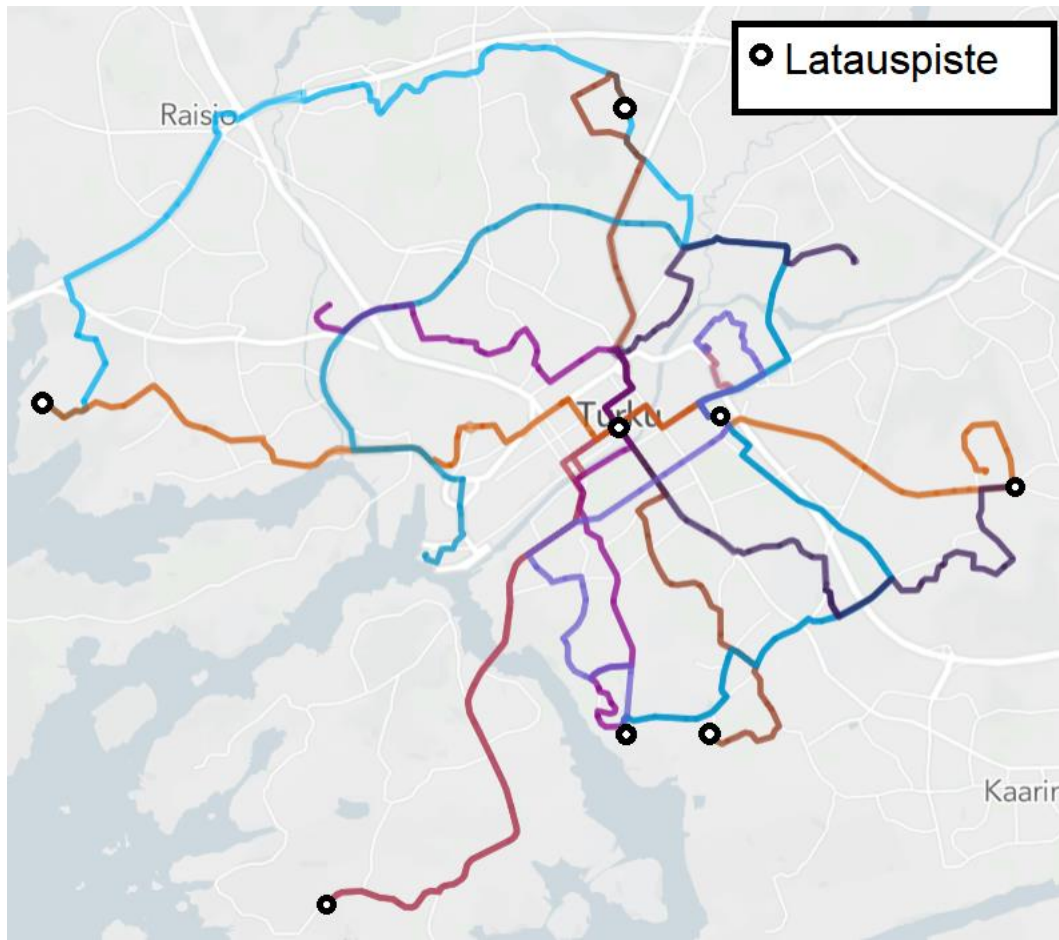
5.5 Linjakohtaiset ratkaisut

Tässä luvussa esitetään kullekin linjalle laskennan perusteella optimaalisimmat ratkaisut. Koska latureiden parhaat sijoituspaikat vaihtelevat linjoittain, poikkeavat ratkaisut toisistaan muutoin samankaltaisillakin linjoilla. Tässä kohdassa on lähtökohtaisesti oletettu latausajan olevan päätepysäkeillä 5 min ja välilatauksessa 3 min ja kaikkien lataus-tehojen olevan 450 kW. Linjakohtaisia poikkeavuuksia on käsitelty kunkin linjan kohdalla oleellisilta osin.

- Linjalla 3 välilataus välttämätön, 60 kWh akku riittäisi normaalioloissa oikein hyvin ja kestää pienet häiriöt.
- Linjalla 4 taloudellisesti järkevin vaihtoehto voisi olla lataaminen Varissuon pääte-pysäkillä ja torilla. Jos torin latausaikaa voitaisiin kasvattaa vastaamaan pääte-pysäkin aikaa eli viiteen minuuttiin, 60 kWh akku riittäisi hyvin, alin varaustaso normaaliliikennöinnissä olisi noin 35 %.
- Linjalla 5 matka torilta toiselle pääte-pysäkille ylioppilaskylään on alle 3 km, joten ei ole suurta merkitystä, kummassa näistä latauspiste sijaitsee. Kummassakin tapauksessa 60 kWh akku riittää hyvin ja sallii pienet häiriöt. Mikäli lataus torilla tapahtuu molempiin suuntiin, riittää torin latausajaksi 3 min kerralla. Linjalla 5A tarvitaan lataus molemmissa päissä, joten torin latauspiste tulisi tälle linjalle kuitenkin varata, jolloin olisi tehokkainta käyttää samaa laturia myös linjalle 5. Myös 5A-linjalla 60 kWh akku sallii pienet häiriötkin.
- Linjalla 8 lataus pelkillä pääte-pysäkeillä ja 60 kWh akuilla on varsin mahdollinen, akun varaustila ei normaalioloissa laske alle 35 %. Välilataus toki parantaisi toimintavarmuutta oleellisesti, jolloin tällä tiheästi liikennöidyllä linjalla olisi hyvin mahdollisuus joustaa latauksista esimerkiksi ruuhkatuntien myöhästymistapauksissa.
- Linjalla 9 A välilataus on välttämätön. Jos halutaan hyödyntää satamassa jo ole-massa olevaa 300 kW laturia, on akun tarve 120 kWh ja Kupittaalla vaaditaan 5 min lataus. Mikäli myös sataman laturin teho nostettaisiin 450 kW, riittäisi 100 kWh akku paremmalla häiriövarmuudella.

- Pisimmällä kehälinjalla 9B tarvittaisiin 120 kWh akku, jotta voitaisiin liikennöidä yhden välilatauksen voimin. Välilatauksen olisi oltava kestoltaan 5 min, jotta varaustaso pysyy yli 35 %. Mikäli linjalle olisi mahdollista lisätä toinen välilataus esimerkiksi Runosmäkeen tai Myllyyn, voitaisiin latausaikaa laskea molemmilla välilatauspisteillä 3 minuuttiin.
- Linjalla 10 taloudellisin vaihtoehto lienee lataus Uittamalla ja torilla. 60 kWh akku riittäisi tällöin hyvin, mikäli latausaikaa torilla kasvatettaisiin 5 minuuttiin. Tämä toki vaikuttaisi aikataulutukseen, mutta jos mahdollista, voitaisiin pääte pysäkkiaikaa Härkämäessä vastaavasti lyhentää.
- Koska linjalle 5 ei olisi järkevää rakentaa latauspistettä Ylioppilaskylän pääte pysäkille, ei sitä kannattaisi myöskään linjaa L71 varten tehdä. Tällä linjalla kuitenkin voitaisiin hyödyntää Kupittaa latauspistettä, joka toimisi kehälinjojen välilatauspaikkana. Tällöin linjalla L71 pystyttäisiin hyvin liikennöimään 60 kWh akuilla, vaikka latausaika Kupittaalla olisi vain 3 min suuntaansa.

Kehälinjoilla voitaisiin siis liikennöidä 120 kWh akuilla, mikäli varalatauspisteet saataisiin esimerkiksi Myllyyn tai Runosmäkeen, olisi liikennöinti jopa häiriötilanteissa mahdollista ilman merkittäviä vaikutuksia ajoaikoihin. Muilla linjoilla 60 kWh akut riittäisivät normaaliolosuhteissa oikein hyvin, häiriötilanteissakin niillä pärjättäisiin useampi tunti, mutta joillain linjoilla tällä olisi varmasti vaikutusta aikataulussa pysymiseen. 80 kWh akut tarjoaisivat enemmän toimintavarmuutta, mutta ne eivät ole missään tapauksessa välttämättömyys edes talviolosuhteissa. Lisäksi kulutus on laskettu talven kylmimpiä olosuhteita ajatellen, joten suurimman osan vuodesta 60 kWh akku riittäisi jo täyspäiväiseen liikennöintiin, vaikka toinen pääte pysäkkilatureista olisi kokonaan pois käytöstä. Usein toki ongelmatilanteet ajoittuvat muutenkin talviaikaan, jolloin esimerkiksi keliolosuhteet lisäävät myöhästymisiä ja laskevat latureiden toimintavarmuutta. Kaikki tarvittavat latauspaikat aiemmin valituille linjoille on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12 Kuvassa yksi vaihtoehto sähköbussiverkostosta ja sen vaatimista latauspisteistä. Ainakin torilla ja Uittamolla tarvitaan useampia latureita, joita ei ole eroteltu kuvaan. Muokattu lähteestä [48].

Kuvan 12 vaihtoehdon lisäksi sähköbussiverkoston toiminta voidaan mahdollistaa myös muin tavoin. Esimerkiksi suuritehoinen riittävän pitkä lataus pelkästään torilla riittäisi lyhemmille linjoille. Lisäksi, mikäli kaikki mahdolliset linjat hyödyntäisivät torin välilatausmahdollisuutta, voitaisiin muutaman laturin tehoa laskea.

Lisäksi on huomioitava omistussuhteiden vaikutus laturiratkaisuihin. Mikäli valitaan kaikille pysäkeille saman tehoiset laturit, on niiden oltava muutoinkin samanlaisia, sillä lähes kaikkia pysäkkejä hyödyntää useampi kuin yksi linja. Tällöin olisi tehokkainta, mikäli yksi taho vastaisi kaikkien latureiden ostosta ja huollosta.

5.6 Linjojen sähköistämisyjärjestys

Työssä ei ole mahdollista tutkia parasta linjojen sähköistämisyjärjestystä kokonaisvaltaisesti, mutta tässä luvussa esitellään tekniikan kannalta yksi potentiaalisimmista järjes-

tyksistä, sekä liikennöintisopimusten kannalta paras järjestys. Nämä poikkeavat toisistaan melko paljon, joten paras ratkaisu löytynee yhdistelemällä ja tutkimalla kunkin linjan taloudellisia näkökulmia tarkemmin.

Mahdollisesti helpoin ratkaisu olisi lähteä liikkeelle linjasta 9A, jolla on jo yksi latauspiste satamassa valmiina. Tällöin tarvittaisiin laturit Uittamolle ja Kupittaalle. Jos nämä laturit rakennettaisiin ensimmäisenä, voitaisiin linja L71 sähköistää saman tien, sillä se käyttäisi ainoastaan näitä kahta laturia.

Uittamon päätepusäkkilaturin rakentamisen lisäksi keskeisin latauspiste olisi tori. Mikäli torin laturi saataisiin rakennettua, voitaisiin näiden kolmen uuden laturin voimin liikennöidä jo kolmella linjalla, sillä linja 10 ei tarvitse välttämättä latausta toisella päätepusäkillään. Tästä voitaisiin edetä seuraavaksi esimerkiksi linjoille 4, 5 ja 5A, jotka tarvitsisivat uuden laturin ainoastaan Hirvensaloon ja Varissuolle. Kupittaaan ja Uittamon laturit taas palvelisivat myös toista kehälinjaa 9 B, jolloin sen sähköistäminen vaatisi ainakin telakan päätepusäkillä uuden laturin. Tällöin olisi taas jo linjalle 3 vaadittavat kaikki kolme laturia, joten silläkin voitaisiin liikennöidä.

Linja 8 on liikennemääriltään niin suuri, että se vaatisi jokaiselle latauspisteelleen oman laturin, joten se ei varsinaisesti ole riippuvainen muiden linjojen sähköistämisyjärjestyksestä. Mikäli tekniikka saadaan luotettavalle tasolle, on kuitenkin suuren liikennemäärän etuna etenkin latureiden kustannusten jakautuminen suurelle automäärälle ja tätä kautta elinkaarikustannusten lasku. Linjan 8 Runosmäen laturi voisi toimia myös tärkeänä varalatauspisteenä pidemmällä kehälinjalla.

Liikennöintisopimukset aiheuttavat haasteita etenkin linjoilla, joille ei ole suoraan vastaavaa linjaa nykyisessä linjastossa. Useampi tulevista linjoista koostuu nykyisellään kahden eri linjan yhdistelmästä ja osalle ei ole ollenkaan vastaavia linjoja olemassa. Liikennöintisopimuksista potentiaalisten runkolinjojen osalta ensimmäisenä päättyy tuleva linja 3, eli nykyinen 42. Tämä on päättymässä kuitenkin jo 2020 ennen linjauudistusta, joten aikataulu on todennäköisesti turhan tiukka. Seuraavana vuonna 2021 on nykyinen linja 13, joka vastaa osittain tulevia linjoja 10 ja L71. Molempien linjojen toista päätä vastaavilla linjoilla sopimukset päättyvät vasta 2024 ja 2026, joten näiden kohdalla muutoksia täytyisi tehdä.

Linjalla 18, joka vastaa tulevaa linjaa 8, sopimus päättyy vuonna 2023. Tämä linja on kuitenkin suoraan vastaava nykyiselle linjalle, joten sen osalta sähköistäminen on kohtuullisen helppoa. Linjoja 4, 5 ja 5A vastaavien linjojen sopimukset päättyvät vasta vuonna 2026, mikäli optiot käytetään. Kehälinjat ovat käytännössä täysin uusia linjoja,

joten niiden osalta kilpailutus on helpompaa. Toisaalta sopimukset on tehtävä hyvissä ajoin ennen runkolinjaston muutosta, joten niiden kanssa on melko tiukka aikataulu.

Lisäksi järjestykseen vaikuttavat esimerkiksi tarvittavien lupien käsittelyajat, alueella tehtävät rakennustyöt, bussien ja latureiden toimitusajat ja sähköbussitekniikkaan liittyvät haasteet. Esimerkiksi toimintavarmuus ja bussien liikennöintipäivät ovat toistaiseksi yleisesti merkittävästi dieselbusseja alemmat, jolloin linjan 8 kaltaisilla hyvin tiheästi liikennöidyillä linjoilla riskit kasvavat helposti turhan suuriksi.

Liikennöintisopimusten kannalta tilanne muuttuu varsin ongelmalliseksi, jos linjauudistuksen aikataulu venyy nykyisestä suunnitelmasta. Tällöin useammalla linjalla ei voida suoraan kilpailuttaa tulevia runkolinjoja, vaan joudutaan todennäköisesti tekemään lyhyitä väliaikaisia sopimuksia, jotka ovat haastavia taloudellisesti ja sopimuksien kannalta. Osa nykyisistä linjoista ei vastaa suoraan mitään runkolinjaston mukaista uutta linjaa, joten niiden kanssa haasteita liikennöintisopimusten kanssa on luultavasti muutoinkin.

6. YHTEENVETO

6.1 Yleisiä huomioita laajentamiseen liittyen

Haastavin tekijä on valita toimivin malli kilpailutukseen ja omistussuhteisiin liittyen. Mitään vakiintunutta toimintamallia ei ole olemassa, mikä vaikeuttaa valintojen tekemistä ja taloudellisen vastuun jakautumisen arviointia. Kilpailutuksen suhteen etuna on, että kaikki sopimukset eivät pääty samaan aikaan, vaan aikaisimmista sopimuksista voidaan ottaa oppia myöhemmin alkaviin, mikäli ongelmia ilmenee.

Bussien valmistaja vaikuttaa merkittävästi mahdollisuuksiin esimerkiksi akkukapasiteettia mitoitettaessa. Toisaalta tilaajaosapuolen ei ole tarpeellista määritellä tarkkaan, millaisia kulkuneuvoja linjoille valitaan, vaan valinta jätetään liikennöitsijän tehtäväksi. Esimerkit kulutuksesta ja akkukapasiteetin tarpeesta helpottavat kuitenkin molempia osapuolia sopimuksia laadittaessa. Bussien valinnassa on hinnan lisäksi kiinnitettävä erityisesti huomiota huoltosopimukseen ja lämmitysjärjestelmän toimivuuteen, jotta voitaisiin jatkossa käyttää ainoastaan sähkövoimaa.

Latauspaikkojen suunnittelu ja sijoittelu on mietittävä tarkkaan, jotta ne ovat alusta asti mahdollisimman tehokkaasti, turvallisesti ja helposti käytettäviä. Suunnittelussa on tärkeää kuunnella etenkin kuljettajien kokemuksia, jotta voidaan vähentää kaikkia latausta- pahtumaan liittyviä ongelmatilanteita ja ehkäistä turhaa ajanhukkaa latauksen yhteydessä. Yksinkertaisilla ja halvoilla toimenpiteillä voidaan lisätä tehokkuutta ratkaisevasti, jos oikeat tekijät osataan tunnistaa.

Turussa on tähän mennessä saatu hyvin tarkkaa tietoa esimerkiksi sähköbussien kulutuksesta ja akun varaustason vaihtelusta. Tämä olisi tärkeää myös tulevaisuudessa, jotta voidaan jatkuvasti kehittää liikennöinnin tehokkuutta ja tunnistaa mahdollisia kehityskoh- teita. Bussivalmistajilta olisi hyvä saada jo tilausvaiheessa pääsy bussin kaikkiin olen- naisiin kulutustietoihin ja muuhun tärkeään dataan.

6.2 Valitun tekniikan vaikutus

Lopullisten kustannusten arviointi on hyvin haastavaa, sillä niihin vaikuttavat varsin monet tekijät. Autojen ja latureiden hinnat vaihtelevat valmistajan mukaan, eikä mitään standardimallisia hinnastoja ole olemassa, koska pääsääntöisesti hinta koostuu monesta ti- laajan valitsemasta ominaisuudesta. Lisäksi Turun tapauksessa puhutaan kuitenkin var- sin pienistä tilausmääristä, jolloin ei voida hyödyntää suurten tilausmäärien tuomia alen- nuksia.

Busseja valittaessa on tietysti kiinnitettävä huomiota hankintahinnan lisäksi elinkaaren aikana syntyviin kustannuksiin esimerkiksi huollosta ja varaosista johtuen. Valmistajien välillä on suuria eroja hinnoittelutekniikassa ja pelkät investointikustannukset eivät usein ole vertailukelpoisia keskenään. Elinkaarikustannusten arviointi on kuitenkin haastavaa, sillä valmistajien tapa ilmoittaa käytön aikaisista kustannuksista vaihtelee suuresti ja perustuu usein varsin optimaalisissa olosuhteissa tehtyihin arvioihin. Todellisuudessa esimerkiksi osien kuluminen on usein suurempaa ja käyttöikä lyhempi, kuin testiolosuhteissa.

Tärkeää on tehdä kaikki hankinnat riittävän aikaisin ja valmistautua jo ennakkoon mahdollisiin viivästyksiin. Tällöin voidaan välttää paitsi tarpeettomat lisäkustannukset, myös imagovahingot. Etenkin latausinfrastruktuurin tilaamiseen ja rakentamiseen on hyvä varata vähintään vuosi aikaa, sillä useisiin kohteisiin täytyy rakentaa ensin sähköverkko muuntamoineen, mikä vaatii kaivuutöitä ja lupia. Todennäköisesti prosessissa tulee aina joitain odottamattomia viivästyksiä, joihin on helpoin varautua etukäteen.

Elinkaarikustannuksiin vaikuttaa eniten bussin ja etenkin akun hinta, sillä bussien runkojen hinnanvaihtelut ovat kohtuullisen pieniä. Akun hintaan vaikuttaa koon lisäksi myös valmistusmateriaali, Suomen sääolosuhteissa kalliimpi LTO-akku on käytännössä ainoa vaihtoehto, jolla voidaan taata liikennöinti myös kovilla pakkasilla. Toinen merkittävä tekijä on latausinfrastruktuurin hankintahinta ja jakautuminen ajoneuvojen kesken. Yhden bussin elinkaarikustannuksia laskettaessa latauksen hankinta ja ylläpitokustannukset voidaan yleisesti ottaen jakaa niiden autojen kesken, jotka kyseistä laturia käyttävät.

Myös kustannusten arviointien kannalta yhteistyö esimerkiksi muiden Suomen sähköbussikaupunkien kanssa on tärkeää. Näin saadaan kerättyä ajantasaista tietoa esimerkiksi alan kehityksestä, odottamattomista lisäkustannuksista, eri valmistajien eroista ja eri kilpailutusmallien toimivuudesta. Suomen sisäinen informaation jako on tärkeää, koska vaativien sääolojen vaikutus bussien elinkaarikustannuksiin on todettu merkittäväksi.

Tässä työssä on esitetty muutama vaihtoehto bussien akkujen kapasiteetin tarpeeseen kullakin potentiaalisella linjalla, näillä vaadittavien latureiden tehojen ja sijainnin suhteen sekä laajennuksen aikataulutuksen osalta. Ennen varsinaisia päätöksiä on kuitenkin tehtävä vielä tarkemmat laskennat kunkin linjan elinkaarikustannuksista ja takaisinmaksuajasta, sekä muista kannattavuuteen vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi on selvitettävä olemassa olevien liikennöintisopimusten vaikutus runkolinjaston myötä tehtäviin linjauudistuksiin ja linjojen sähköistämismahdollisuuksiin.

LÄHTEET

- [1] Ilmastonmuutosta koskevaan Yhdistyneiden Kansakuntien puitesopimukseen liittyvä Pariisin sopimus, 75/2016, 2016. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsviite/2016/20160075>.
- [2] P. Aho, Procurement and commissioning of electric city buses in Turku - Observations from the eFÖLI project 2015–2018, Reports from Turku University of Applied Sciences 254, 2019
- [3] M. Xylia, S. Silveira, E. Energi och klimatstudier, Integrated Transport Research Lab, ITRL, Centra, Skolan för industriell teknik och management, (ITM), KTH, Energiteknik, The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport: Experiences from demonstration projects, Transportation Research Part A, 2018, pp. 399-415.
- [4] A. Supponen, Turun raitiotien yleissuunnitelman tarkennus – liikennemallitarkastelut, 2017, Saatavissa: https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/turun_raiotien_yleissuunnitelman_tarkennus_-_liikennemallitarkastelut_15-12-2017.pdf.
- [5] Föli, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.foli.fi/fi/f%C3%B6lin-s%C3%A4hk%C3%B6busseilla-ajettu-miljoona-kilometri%C3%A4>. Viitattu 4.7.2019.
- [6] Turun kaupungin ilmastosuunnitelma 2029, 2018. Saatavissa: <http://ah.turku.fi/kv/2018/0611007x/3733927.htm>.
- [7] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient vehicles, Directive 2009/33/EC, 2019. Saatavissa: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-6345-2019-INIT/en/pdf>.
- [8] IEA, CO2 Emissions from Fuel Combustion 2015, OECD Publishing, Paris, 2015.
- [9] J. Li, Battery-electric transit bus developments and operations: A review, International Journal of Sustainable Transportation, 2016, pp. 157-169.
- [10] International Association of Public Transport, ZeEUSeBus Report - An overview of electric buses in Europe, International Association of Public Transport, 2016, Saatavissa: <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-inter-net.pdf>.
- [11] International Association of Public Transport, ZeEUS eBus Report #2, 2017, Saatavissa: <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-2.pdf>.
- [12] M. Xylia, S. Silveira, On the road to fossil-free public transport: The case of Swedish bus fleets, Energy Policy, 2017, pp. 397-412.
- [13] K. Kivekäs, A. Lajunen, J. Vepsäläinen, K. Tammi, City bus powertrain comparison: Driving cycle variation and passenger load sensitivity analysis, Energies, 2018, pp. 1755.

- [14] M. Rogge, E. van der Hurk, A. Larsen, D.U. Sauer, Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure, *Applied Energy*, 2018, pp. 282-295.
- [15] A. Lajunen, Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods, *Journal of Cleaner Production*, 2018, pp. 56-67.
- [16] S. Rothgang, M. Rogge, J. Becker, D.U. Sauer, Battery design for successful electrification in public transport, *Energies*, 2015, pp. 6715-6737.
- [17] M. Xylia, S. Leduc, A. Laurent, P. Patrizio, Y. van der Meer, F. Kraxner, S. Silveira, Impact of bus electrification on carbon emissions: The case of Stockholm, *Journal of Cleaner Production*, 2019, pp. 74-87.
- [18] R. Kühne, Electric buses – An energy efficient urban transportation means, *Energy*, 2010, pp. 4510-4513.
- [19] Energiatoteollisuus Sähkön kuukausitilasto, verkkosivu, Saatavissa: https://energi.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkon_kuukausitilasto.html#material-view. Viitattu 13.8.2019.
- [20] J.A. García Sánchez, J.M. López Martínez, J. Lumbreras Martín, M.N. Flores Holgado, H. Aguilar Morales, Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System, *Energy Conversion and Management*, 2013, pp. 332-343.
- [21] M. Mahmoud, R. Garnett, M. Ferguson, P. Kanaroglou, Electric buses: A review of alternative powertrains, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, pp. 673-684.
- [22] J. Vepsäläinen, A. Ritari, A. Lajunen, K. Kivekäs, K. Tammi, Energy uncertainty analysis of electric buses, *Energies*, 2018, pp. 3267.
- [23] Z. Gao, Z. Lin, T.J. LaClair, C. Liu, J. Li, A.K. Birky, J. Ward, Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service, *Energy*, 2017, pp. 588-600.
- [24] B.O. Varga, C. Iclodean, F. Mariasiu, *Electric and Hybrid Buses for Urban Transport : Energy Efficiency Strategies*, Springer, Cham, 2016.
- [25] Trafix Oy, Liidea Oy, Reform Oy, RUNKOBUSSILINJASTON KEHITTÄMISOHJELMA VUOSILLE 2012–2020, 2012, Saatavissa: <http://ah.turku.fi/tksjlk/2012/1114010x/Images/1188081.pdf>.
- [26] M. Mohamed, M. Ferguson, P. Kanaroglou, What hinders adoption of the electric bus in Canadian transit? Perspectives of transit providers, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, pp. 134-149.
- [27] M. Pihlatie, S. Kukkonen, T. Halmeaho, V. Karvonen, N.-. Nylund, Fully electric city buses - The viable option, 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE, pp. 1-8.
- [28] R. Wahlsten, Turku AMK, Haastattelu 16.5.2019.

- [29] A. Lehtinen, O. Kanerva, Selvitys sähköbussien edistämiseksi suomalaisilla kaupunkiseuduilla, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2017, 2017, Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-21_selvitys_sahkobussien_web.pdf.
- [30] VDL, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.vdlbuscoach.com/Producten/Openbaar-vervoer/Citea-Electric/Technische-specificaties.aspx>. Viitattu 9.7.2019.
- [31] Solaris, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/zero-emissions/urbino-electric>. Viitattu 9.7.2019.
- [32] Ebusco, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://ebusco.eu/electric-buses/>. Viitattu 9.7.2019.
- [33] Irizar, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.irizar-emobility.com/solutions-and-services/vehicles/ie-bus/?lang=en>. Viitattu 10.7.2019.
- [34] M. Kane, The first five of 37 BYD ADL Enviro400EV double-deck buses hit the streets of London, 2019, verkkosivu, Saatavissa : <https://insideevs.com/news/358499/byd-adl-enviro400ev-double-deckers-london/>. Viitattu 10.7.2019.
- [35] Hybricon, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.hybricon.se/en/products--services/electric-buses/haw-gen2.htm>. Viitattu 23.7.2019.
- [36] Ursus Bus, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <http://ursusbus.com/en/electric-drive>. Viitattu 23.7.2019.
- [37] Volvo, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.volvobuses.fi/fi-fi/our-offering/buses/volvo-7900-electric/specifications.html>. Viitattu 23.7.2019.
- [38] Yutong, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://en.yutong.com/z/newenergybus/>. Viitattu 23.7.2019.
- [39] S. Ojamo, VDL nivelbussin kulutusarvot, 2019, Julkaisematon selvitys.
- [40] A. Lehtinen, Sähköbussit osana Turun seudun joukkoliikennejärjestelmää, Tampere University of Technology, 2014, Available: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201410081496>.
- [41] Turun Kaupunginhallituksen pöytäkirja, 2015. Saatavissa: <http://ah.turku.fi/kh/2015/0601015x/3249199.htm>.
- [42] Föli, Reittiopas, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://reittiopas.foli.fi/linjat/FOLI:1/pysakit/FOLI:1:0:01>. Viitattu 4.7.2019.
- [43] M. Ikonen, eKeko-esitys, Turku amk, 2019, Julkaisematon selvitys.
- [44] J. Parkkonen, Turun kaupunkiliikenne, Haastattelu 3.9.2019.
- [45] M. Shirk, J. Wishart, Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance, SAE Technical Papers, 2015.
- [46] J. Walker, Human Transit: How Clearer Thinking about Public Transit Can Enrich Our Communities and Our Lives, Island Press, Washington, UNITED STATES, 2011.

- [47] A. Ahonen, J. Stränden, Turku Energia Oy, Haastattelu 26.6.2019.
- [48] Föli, Runkolinjasto, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.foli.fi/fi/runkolinjasto>. Viitattu 8.7.2019.
- [49] R. Vaarala, Turun raitiotien yleissuunnitelman tarkennus - Bussilinjaston raitiotie- ja superbussivaihtoehdot, 2017, Saatavissa: https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/bussilinjastot_eri_vaihtoehtoissa.pdf.
- [50] Helsingin seudun liikenne, Toiminta- ja taloussuunnitelma 2019-2021, 2018, Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/hsl_toiminta_ja_taloussuunnitelma2019_2021.pdf.
- [51] ABB, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://new.abb.com/ev-charging/fi/>. Viitattu 24.7.2019.
- [52] Ekoenergetyka, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://ekoenergetyka.com.pl/charging-stations/>. Viitattu 24.7.2019.
- [53] Heliox, 2019, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.heliox.nl/products>. Viitattu 26.7.2019.
- [54] M. Xylia, Towards electrified public bus transport - The case of Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2018, Saatavissa: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1198831/FULLTEXT01.pdf>.
- [55] eCitaro testing infrastructure in Mannheim: 1.2 MW via three charging technologies, in: Sustainable Bus, 2019.
- [56] M. Xylia, S. Leduc, P. Patrizio, F. Kraxner, S. Silveira, Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm, Transportation Research Part C, 2017, pp. 183-200.
- [57] H. Ding, Z. Hu, Y. Song, Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station, Applied Energy, 2015, pp. 630-639.
- [58] A. Väyrynen, J. Salminen, Lithium ion battery production, The Journal of Chemical Thermodynamics, 2012, pp. 80-85.
- [59] X. Zhang, H. Peng, H. Wang, M. Ouyang, Hybrid Lithium Iron Phosphate Battery and Lithium Titanate Battery Systems for Electric Buses, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, pp. 956-965.
- [60] A. Lajunen, Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods, Journal of Cleaner Production, 2018, pp. 56-67.

LIITE A: BUSSIMALLIEN TEKNISET TIEDOT

Markkinoilla olevat bussit vakiovarustelulla, myyjän lupaamat tuotetiedot

Akkumateriaalit: LFP=Litium-Rautafosfaatti (LiFePO₄), NMC=Nikkeli-magnesium-koboltti, LTO=Litiumtitanaatti (Li₄Ti₅O₁₂)

Alexander Dennis & BYD	Enviro200EV	Enviro400EV Double deck
Mitat [mm] (p,l,k)	12 029, 2470, 3385	10 900, 2550, 4300
Paino [kg]	max 8 600	
Matkustajakapasiteetti [hlö]	90	95
Moottori	2*90 kW	2*150 kW
Akku [kWh]	324	382
Akku materiaali	LFP	
Latausteho [kW]	80	80
Matka	320 km	257 km
Alfabus	Ecity L12	Ecity L18
Mitat [mm] (p,l,k)	12 200, 2550, 3320	TULOSSA
Paino tyhjänä [kg]		
Matkustajakapasiteetti [hlö]		
Moottori	max 210 kW	
Akku [kWh]	355 kWh	
Akku materiaali	NMC	
Latausteho [kW]	25/50/180 (varikko)	
Matka		
BYD (Euroopan yleisimmät mallit, paljon muitakin)	12m Overseas	18m Articulated
Mitat [mm] (p,l,k)	12 200, 2550, 3370	18 250, 2550, 3370
Paino [kg]	max 19 000	max 28 500
Matkustajakapasiteetti [hlö]	95	150
Moottori	2*90/150 kW	2*150 kW
Akku [kWh]		
Akku materiaali	LFP	LFP
Latausteho [kW]	80	80 (myös pikavaihtoehto)
Matka	320 km	200 km
Caetanobus	e. City Gold	
Mitat [mm] (p,l,k)	11 995, 2500, 3058	
Paino tyhjänä [kg]	max 19 000	
Matkustajakapasiteetti [hlö]	88	
Moottori	160 kW	
Akku [kWh]	85–250	
Akku materiaali	LTO/NMC	
Latausteho [kW]	50–150/350	
Matka	200	
Ebusco	2.2 12M, 2-DOOR	2.2 18M, 3-DOOR
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000, 2550, 3375	18 000, 2550, 3375

Paino [kg]	12 850 (tyhjä)	19 000 (tyhjä)
Matkustajakapasiteetti [hlö]	90	130
Moottori	270 kW	270 kW
Akku [kWh]	362	362
Akku materiaali	LFP	LFP
Latausteho [kW]	75/120	75/120
Matka		

Hybricon	Haw 12	Haw 18
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000, 2550, 3300	18 000, 2550, 3300
Paino [kg]	max 19 000	max 28 000
Matkustajakapasiteetti [hlö]	74	104
Moottori	2*125 kW	4* 125 kW
Akku [kWh]	40–120	40–120
Akku materiaali	LTO	LTO
Latausteho [kW]	20–650	jopa 650
Matka		

Irizar	ie 12m	ie 15m	ie 18m
Mitat [mm] (p,l,k)	11 980, 2550, 3209	14 980, 2550, 3300	18 730, 2550, 3300
Paino [kg]	max 20 000		max 28 000
Matkustajakapasiteetti [hlö]	76	105	155
Moottori	Irizar, 180 kW	Irizar, 235 kW	Irizar, 235 kW
Akku [kWh]	185	260	260
Akku materiaali			
Latausteho [kW]	150–450	200–500	200–500
Matka	n 100km	n 100km	n 100km

Linkker	12 +
Mitat [mm] (p,l,k)	12 800
Paino [kg]	10 500 (tyhjä)
Matkustajakapasiteetti [hlö]	
Moottori	Visedo, 180 kW
Akku [kWh]	55–79
Akku materiaali	LTO
Latausteho [kW]	300–480 (6C)
Matka	300–400

Otokar	e-KENT C
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000, 2540, 3450
Paino [kg]	12 500 (tyhjä)
Matkustajakapasiteetti [hlö]	95
Moottori	max 250 kW
Akku [kWh]	300
Akku materiaali	LFP
Latausteho [kW]	90 (varikko)
Matka	noin 300 km

Skoda	Perun
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000
Paino [kg]	max 18 600
Matkustajakapasiteetti [hlö]	82

Moottori	160 kW		
Akku [kWh]	230		
Akku materiaali	LFP		
Latausteho [kW]	100		
Matka			
Solaris	Urbino 12 electric	Urbino 18 electric	
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000, 2550, 3300	18 000, 2550, 3300	
Paino [kg]	max 19 000	max 30 000	
Matkustajakapasiteetti [hlö]	90	129	
Moottori	2*110 kW	240 kW	
Akku [kWh]	max 240	max 240	
Akku materiaali	LFP/LTO	LFP/LTO	
Latausteho [kW]	120/450	120/450	
Matka			
Temsa	Avenue Electron		
Mitat [mm] (p,l,k)	12 095, 2550, 3237		
Paino [kg]	max 19 000		
Matkustajakapasiteetti [hlö]	90		
Moottori	270 kW		
Akku [kWh]	75		
Akku materiaali	LTO		
Latausteho [kW]	450		
Matka			
Ursus	CS12	CS18	
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000 muut ei tiedossa	18 000 muut ei tiedossa	
Paino [kg]	max 18 000	max 28 000	
Matkustajakapasiteetti [hlö]	82	104	
Moottori	170 kW	240 kW	
Akku [kWh]	105	105	
Akku materiaali	LTO	LTO	
Latausteho [kW]	625	625	
Matka			
VDL	Citea XLE-145 Electric	Citea SFLA-180 Electric	Citea SLE-129 Electric
Mitat [mm] (p,l,k)	14 480, 2550, 3160	18 000, 2550, 3290	12 900, 2550, 3430
Paino [kg]	13 670 (tyhjä)	19 150 (tyhjä)	13 850 (tyhjä)
Matkustajakapasiteetti [hlö]	120	135	80
Moottori	228 kW, FPT	210 kW, Siemens	160 kW, Siemens
Akku [kWh]	288	85–248	85–180
Akku materiaali	Useita	Useita	Useita
Latausteho [kW]		max 480	max 360
Matka	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa
Volvo	7900 Electric		
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000, 2550, 3280		
Paino [kg]	11 400 (tyhjä)		
Matkustajakapasiteetti [hlö]	80–105		
Moottori	160 kW		

Akku [kWh]	76
Akku materiaali	LFP
Latausteho [kW]	300
Matka	
Yutong	E12LF
Mitat [mm] (p,l,k)	12 000, 2550, 3340
Paino [kg]	max 19 100
Matkustajakapasiteetti [hlö]	92
Moottori	350
Akku [kWh]	295
Akku materiaali	LFP
Latausteho [kW]	60
Matka	220