

Aviapoliksen suuralueen soveltuvuus automaattibusseille



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäki, liikennealan koulutusohjelma

kevät 2019

Otto Tarnanen

Liikennealan koulutusohjelma
Riihimäki

Tekijä	Otto Tarnanen	Vuosi 2019
Työn nimi	Aviapoliksen suuralueen soveltuvuus automaattibusseille	
Työn ohjaajat	Teppo Sotavalta (Hämeen ammattikorkeakoulu) Heikki Alkila (Vantaan kaupunki)	

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää automaattibussien soveltuvuus Aviapoliksen alueelle liikenneinfrastruktuurin puolesta. Tämän lisäksi opinnäytetyössä mitattiin automaattibussien kilpailukykyä ja arvioitiin, mitä liikennesuunnittelussa tulisi ottaa huomioon automaattibussien yleistyessä.

Tutkimus automaattisesta liikenteessä Suomessa infrastruktuurin näkökulmasta on toistaiseksi vähäistä, ja automatisaation lisääntyessä aiheesta kaivataan lisää tietoa. Opinnäytetyö on tehty liikennealan ammattilaisille, mutta se soveltuu myös henkilöille, jotka kaipaavat perustietoa automaattisesta liikenteestä.

Insinööriä käsittelee aiemmin tehtyjä tutkimuksia automaattisesta liikenteestä, automaattibusseilla toteutettuja pilotointeja sekä automaattibussien tekniikkaa ja lainsäädäntöä. Lisäksi työssä arvioidaan automaattibussien liikenneinfrastruktuuritarpeita ja kilpailukykyä. Arvioinnin pohjatiетona käytettiin asiantuntijahaastatteluista saatua tietoa ja maastokäynteiltä kerättyä dataa.

Lopputuloksina todettiin, että nykytekniikalla toimivien automaattibussien operointia voisi helpottaa liikennesuunnittelun ratkaisuilla, ja että nykyinen liikenneinfrastruktuuri ei ole optimaalinen automaattiliikenteelle. Automaattibusseja voidaan pitää matka-aikojen puolesta kilpailukykyisenä vaihtoehtona last mile -tyyppisessä liikenteessä joillain reiteillä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Vantaan kaupunki.

Avainsanat Aviapolis, liikenne, liikenneinfrastruktuuri, liikennesuunnittelu, robottibussi

Sivut 43 sivua

Traffic and Transport Management
Riihimäki

Author	Otto Tarnanen	Year 2019
Subject	Suitability of Automated Buses in the Region of Aviapolis	
Supervisors	Teppo Sotavalta (HAMK) Heikki Alkila (City of Vantaa)	

ABSTRACT

The purpose of this thesis project was to examine the suitability of automated buses in the region of Aviapolis in the city of Vantaa. The research was conducted from the vantage point of traffic infrastructure. In addition, the thesis project evaluates the possible effects of automated buses becoming more common to traffic planning, and their general competitiveness.

Research on automated traffic from an infrastructural perspective in the Finnish context is not yet substantial, and as the technology evolves, the demand for this knowledge among professionals is high. Thus the thesis is directed towards traffic professionals, but also provides in-depth information on automated buses for the general public.

The thesis project consists of review of existing literature and research, pilot projects, the legislation and technology of automated buses. The data for examining the effects to traffic planning and measuring the last mile - competitiveness of automated buses was collected by interviewing professionals and by examining the research area.

In conclusion, the thesis project shows that operating automated buses can be enhanced by undertaking suitable traffic planning for this very purpose. At its current stage, the traffic infrastructure is not optimal for automated traffic. At the moment, automated buses can be considered as a competitive last-mile-form of transportation on some of the sample routes.

The thesis was commissioned by the city of Vantaa.

Keywords Aviapolis, robot bus, traffic, traffic infrastructure, traffic planning

Pages 43 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	AUTOMAATTIAJONEUVOISTA TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA.....	2
2.1	Robottibussien kokeilujaksot	2
2.2	Infrastruktuuri	2
2.3	Hyväksyttävyys ja vuorovaikutus	3
3	PILOTOINNIT	4
3.1	CityMobil2	4
3.2	SOHJOA.....	5
3.3	aIGO.....	6
3.4	FABULOS.....	7
3.5	Sohjoa Baltic.....	8
4	ROBOTTIBUSSIEN TEKNIikka JA LAINSÄÄDÄNTÖ	9
4.1	Lainsäädäntö	9
4.2	SAE-tasot	10
4.3	Operational Design Domain	11
4.4	Robottibussien tekniikka	11
4.4.1	Tutka	11
4.4.2	Optinen tutka	12
4.4.3	Satelliittipaikannus	12
4.4.4	Inertiamittausyksikkö	13
4.4.5	Stereokamerat.....	13
4.4.6	Kaikuluotain	13
4.5	Sensorifuusio	14
4.6	Etäohjaus.....	15
4.7	Gacha.....	15
5	TARKASTELUALUE.....	17
5.1	Nykyinen liikennejärjestelmä	19
5.2	Kulkumuotojakauma	21
6	ROBOTTIBUSSIEN LIIKENNEINFRASTRUKTUURI	22
6.1	Robottibussien nykyiset ongelmakohdat.....	22
6.1.1	Liittymät.....	22
6.1.2	Rakennettu ympäristö	23
6.1.3	Liikenne.....	24
6.2	Esimerkkireitit	25
6.3	Reittien ongelmakohdat.....	28
6.4	Kehittämistarpeet	29
7	ROBOTTIBUSSIEN KILPAILUKYKY	31
7.1	Matka-aikavertailu	31

7.1.1	Ensimmäinen reitti	32
7.1.2	Toinen reitti	33
7.1.3	Kolmas reitti.....	34
7.2	Lisäarvo matkustajille.....	35
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	36
	LÄHDELUETTELO	39

KÄSITTEET

Automaattiajoneuvo

Ajoneuvo, joka on osittain tai kokonaan tietokoneen ohjaama.

Automated Road Transport Systems (ARTS)

Tie / katuverkolla toimivat liikennejärjestelmät, jotka on koottu korkean automaatiotason ajoneuvoista.

Autonominen ajoneuvo

Ajoneuvo, joka pystyy toimimaan täysin itsenäisesti.

First / last mile -liikenne

Matkaketjun ensimmäinen tai viimeinen osa, esimerkiksi kävely tai pyöräily kotoa rautatieasemalle tai sieltä työpaikalle.

Georeferointi

Kartan, kuvan tai muun asian liittäminen oikeaan koordinaatistoon referenssipisteiden avulla.

Global Navigation Satellite System (GNSS)

Yleistermi maailmanlaajuiselle satelliittipaikannusjärjestelmälle.

Operaattori, turvamatkustaja, turvakuljettaja ym.

Automatisoidun ajoneuvon turvallisesta liikennöinnistä vastaava henkilö.

Operational Design Domain (ODD)

Olosuhteet ja ympäristö, jossa automaattiajoneuvo pystyy operoimaan.

Operointi

Automatisoidun ajoneuvon ”ajaminen”, eli liikennöinti.

Robottibussi

Nykykäsityksen mukaan pieni, noin 10 – 15 paikkainen, automatisoitu linja-auto.

1 JOHDANTO

Robottibussit voivat kuulostaa joidenkin korviin vielä kaukaiselta ajatukselta. Ne ovat kuitenkin yleistymässä ja ne alkavat jo olla arkipäivää tietyillä alueilla, kuten pääkaupunkiseudulla. Tutkimuksia automaattisesta liikenteestä ei ole vielä tehty infrastruktuurin näkökulmasta montaa, joten aiheesta kaivataan lisää tietoa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää nykyisten robottibussien vaatimuksia liikenneinfrastruktuuriin ja niiden kilpailukykyä first / last mile -tyyppisessä liikenteessä. Työssä tarkasteltiin edellä mainittuja asioita Vantaan Aviapoliksen alueelle sijoitetuilla esimerkkireiteillä, joiden kautta kerättiin tietoa liikenneinfrastruktuurin muutostarpeista ja robottibussien kilpailukykyä matka-ajan puolesta. Tulevaisuuden teknologian kehitystä ja tie/katuverkon muutoksia ei ole otettu huomioon, vaan työ perustuu nykyisten robottibussien ominaisuuksiin. Tavoitteena ei ollut varsinaisen liikennöinnin suunnittelu, vaan työssä pyrittiin selvittämään miten liikenneinfrastruktuurin tulisi kehittyä robottibussien sujuvaa liikennöintiä varten.

Teoriaosuudessa käydään läpi perustietoja automatisoidusta liikenteestä ja esitellään sen nykytilannetta. Ala on vielä alkuvaiheissaan, joten esimerkiksi lainsäädäntö ja standardisointi on vielä kehittymisvaiheessa. Kilpailukykyyn arvioinnissa käytettiin 8.3.2019 julkaistua Gacha-merkkisen robottibussin nopeuksia. Gacha on ensimmäinen ja toistaiseksi ainut robottibussi, joka on sopiva Suomen sääolosuhteisiin ja sitä voidaan pitää todennäköisenä vaihtoehtona mahdolliseen oikeaan liikennöintiin.

Työssä haetaan vastausta seuraaviin tutkimuskysymyksiin: Mitä liikennesuunnittelussa tulisi ottaa huomioon robottibussien yleistyessä infrastruktuurin näkökulmasta? Onko automaattibussi kilpailukykyinen vaihtoehto first / last mile -tyyppisessä liikenteessä? Soveltuuko alueen nykyinen liikenneinfrastruktuuri automaattiajoneuvoille?

Tilaaajana opinnäytetyölle toimi Vantaan kaupunki. Liikenneinsinööri Heikki Alkila toimi tilaajan puolesta opinnäytetyön ohjaajana. Hämeen ammattikorkeakoulun puolesta ohjaajana toimi lehtori Teppo Sotavalta.

2 AUTOMAATTIAJONEUVOISTA TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA

Selvityksiä ja tutkimuksia automaattiliikenteestä on tehty hyväksyttävyyden, vuorovaikutuksen, infrastruktuurin, kaupallistamisen ja käytännön kokeiluiden näkökulmista. Luvussa on keskitytty erityisesti Suomessa tehtyihin tutkimuksiin, vaikka tutkimuksia löytyy laajalti myös ympäri maailmaa.

2.1 Robottibussien kokeilujaksot

Matias Pikkarainen tutki vuonna 2017 valmistuneessa insinööriyössä (Pikkarainen, 2017, ss. 52-55) Espoon Otaniemen robottibussikokeilujaksoson pohjalta robottibussien toimintakykyä ja vaikutuksia. Insinööriyön lopputuloksissa todetaan kokeilujakso onnistuneeksi ja siinä pidetään erityisen tärkeänä tiedotusta kokeilualueella asuville ihmisille. Kokeilun aikana liikenteessä oli käytössä poikkeusjärjestelyjä, joita tulisi tutkimuksen mukaan jatkossa vähentää, jotta robottibussien toiminta voisi laajentua. Liikennejärjestelyillä mahdollistettiin kokeilun toteuttaminen, mutta niitä noudatettiin vaihtelevasti ja robottibussin alhainen nopeus aiheutti ylimääräisiä ohitustilanteita.

Azat Ismailogullari lähti tutkimaan robottibussien pilotteja kaupallistamisen näkökulmasta. Tutkimuksessa mainitaan, että nykyiset robottibussit eivät kykene toimimaan turvallisesti ilman kyydissä olevaa operaattoria. Myös ulkoiset robottibussin valmistajat koetaan hidasteeksi, koska uudet reittisuunnitelmat vaativat hyväksynnän ja valmistajan edustaja joutuu opettamaan uuden reitin itse paikan päällä. (Ismailogullari, 2018, ss. 27-30)

2.2 Infrastruktuuri

Riku Suursalmen ylemmän ammattikorkeakoulun tutkimuksessa ”Automaattiajamiseen varautuminen valtion tieverkolla” todetaan, että automaattiajoneuvoja kehittävät yritykset eivät vaadi nykyiseltä tieliikenteen infrastruktuurilta muutoksia, vaan oletuksena on, että ajoneuvot pärjäävät tieverkolla omien laitteidensa avulla. Digitaalista materiaalia ajoneuvot voivat kuitenkin käyttää hyödykseen erilaisissa toimenpiteissä. (Suursalmi, 2018, s. 43)

Maailmanlaajuinen asiantuntijayritysten verkosto KPMG julkaisi vuonna 2019 Autonomous Readiness Index-nimisen raportin, jossa mitataan 25 eri maan valmiutta autonomisten ajoneuvojen käyttöönottamiselle. Mittareina arvioinnille toimi neljä eri kriteeriä; lainsäädäntö, teknologia ja innovaatio, infrastruktuuri ja asukkaiden hyväksyntä uuteen teknologiaan. Maat pisteytettiin edellä mainitulla kriteereillä, ja Hollanti sijoittui ensimmäiseksi.

mäiseksi. Raportin mukaan etenkin infrastruktuuri on maassa erinomaisella tasolla autonomisille ajoneuvoille. 5G-teknologian edistäminen, älykäiden liikennevalojen asentaminen ja sähköautojen latauspaikat keräsivät Hollannille paljon pisteitä. Suomi sijoittui selvityksessä kuudenneksi ja sai paljon pisteitä Aurora-älytiestä, lainsäädännöstä, robottibussikokeiluista ja kaikissa sääolosuhteissa toimivan bussin kehityksestä. Myös liikenneturvallisuutta ja mahdollisuutta testata automaattiajoneuvoja liikenteen seassa kehuttiin. (KPMG International, 2019, ss. 6,14,19)

2.3 Hyväksyttävyyys ja vuorovaikutus

Riku Huhta teki diplomityönsä robottibussien hyväksyttävyydestä ja kustannusrakenteesta osana joukkoliikennettä. Tarkasteluvuotena toimi vuosi 2021, jolloin kaupallisen toiminnan on arvioitu alkavan. SOHJOA-hankeen aikana kerättyä tietoa käytettiin työssä pohjamateriaalina. Työssä todetaan, että robottibussit ovat jopa 2,5-kertaisesti kustannustehokkaampia kuin tavalliset linja-autot. Säästöjä syntyy mm. kuljettajakustannuksista ja optimaalisesta ajotavasta. Kalustokustannukset ovat todennäköisesti korkeampia, mutta pidemmällä aikavälillä kustannukset laskevat huomattavasti. Asiakaspalautteen perusteella robottibussissa matkustamista pidettiin turvallisena, mutta tutkimuksen mukaan kyydissä olevalla operaattorilla on ollut myönteinen vaikutus turvallisuuden tunteeseen. (Huhta, 2017, ss. 84-86)

Raimo Tengvallin Pro gradu -tutkielma lähestyy aihetta vuorovaikutuksen kannalta. SOHJOA-nimisen robottibussihankkeen aikana dataa kerättiin bussin kohdanneilta henkilöiltä haastatteluilla. Tutkimuksessa havaittiin, että vaikka ajoneuvo ei kommunikoi ihmisten tavoin, niin muut tielläliikkuajat pystyvät arvioimaan sen liikkeen ja tarkoituksen nopeuden, suunnan ja näiden vaihteluiden perusteella. (Tengvall, 2018, s. 2)

Trafin (nykyään osana Traficomia) ja Liikenneviraston (nykyään Väylävirasto) toimeksiannosta tehty tutkimus tarkastelee automaattiautojen vaikutusta liikkumistottumuksiin. Liikennealan asiantuntijoista koostuva ryhmä keräsi aineistoa postilaatikkokyselyllä, jonka otos oli 10000 henkilöä. Laaja tutkimus käsittelee mm. automaattiautojen hyväksyttävyyttä, vaikutusta autonomistukseen, liikkumisen määrään ja kulkutavan valintaan. Tutkimuksessa todetaan, että suomalaisilla on pääosin myönteinen suhtautuminen automaattiautoihin. Automaattiautot voivat lisätä henkilöautoilun houkuttelevuutta, mutta esimerkiksi parkkitilan tarve voi vähentyä. Postilaatikkokyselyn pohjalta huomattiin, että eettiset näkökulmat ja turvallisuus ovat suuressa roolissa automaattiautojen hyväksynnän kannalta. (Liljamo, ym., 2018, ss. 1-3, 98-104)

Minkälaisia tunteita robottibussissa matkustaminen herättää? Tätä ovat tutkineet Arto Salonen ja Noora Haavisto, joiden tutkimuksessa käytettiin

Espoon robottibussikokeilujaksoon osallistuneiden matkustajien haastatteluista saatua dataa ja vertailtiin niitä Harry Triandiksen ihmisten väliseen käyttäytymisteoriaan. Ihmiskuljettajan puuttuminen ei ollut ongelma matkustajille ja he olivat jopa yllättyneitä, kuinka turvalliselta tuntui matkustaa robottibussissa. Tulokset kuitenkin osoittavat, että autonomisten ajoneuvojen aiheuttamia kolareita ei hyväksytä samalla tavalla kuin ihmisten aiheuttamia kolareita. Tarjoamalla ihmisille mahdollisuus kokeilla autonomisia ajoneuvoja oikean liikenteen seassa edistää niiden hyväksyttävyyttä. (Salonen & Haavisto, 2019, ss. 1,7)

3 PILOTOINNIT

Luvussa käydään läpi menneitä ja tulevia automaattiliikenteen kehittämiseen liittyviä hankkeita. Esimerkkihankkeet valikoituivat niiden merkityksellisyyden perusteella Suomen ja Euroopan kannalta. Hankkeet esitellään luvussa kronologisessa järjestyksessä.

3.1 CityMobil2

Kansainvälinen hanke CityMobil2 oli noin 15 miljoonan euron EU:n rahoittama projekti, jonka tarkoituksena oli edistää automaattiliikenteen kehittymistä laillisesta ja teknisestä näkökulmasta. Hankeen taustalla oli visio ARTS (Automated Road Transport System) liikennejärjestelmästä, joissa automaattiajoneuvoilla voitaisiin täydentää nykyistä liikennejärjestelmää luomalla katkeamaton matkaketju ovelta ovelle. (Euroopan komissio, 2016)

Tietoa kerättiin pilotoimalla automaattiajoneuvoja seitsemässä eri kaupungissa Euroopassa. Ajoneuvot olivat käytännössä robottibusseja, joilla oli etukäteen dataa alueen infrastruktuurista ja ne olivat koko ajan valvonnan alaisena. Robottibussien matkustajilta kerättiin palautetta, joka oli pääosin positiivista. Vantaa oli yksi valituista testikaupungeista, joissa robottibusseja testattiin heinä- ja elokuussa 2015. (Euroopan komissio, 2016)

EasyMile nimisen robottibussivalmistajan EZ10-merkkisiä (Kuva 1) robottibusseja käytettiin Vantaan Kivistön asuntomessuilla. Bussi kulki aidattua kevyen liikenteen väylää, joka oli eritetty muulta liikenteeltä (Vantaan kaupunki, 2015). Tämä oli ensimmäinen suurempi automaattiliikenteen pilotti Suomessa, joka oli yleisölle avoin (Tuominen, 2015). EZ10 pystyy kulkemaan tietyissä olosuhteissa (esim. ilman vesi- tai lumisadetta) SAE tasolla 4 (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 25).



Kuva 1. EasyMilen EZ10-robottibussi (EasyMile, 2018).

Suomen lisäksi robottibussit liikkuvat Italiassa, Ranskassa, Sveitsissä, Kreikassa ja Espanjassa vuosien 2014 ja 2016 välillä CityMobil2-projektin ansiosta.

3.2 SOHJOA

Seuraava askel kehityksessä nähtiin vuosina 2016 – 2018 Suomessa toteutettujen testauksien yhteydessä. Robottibusseja pilotoitiin kolmessa eri kaupungissa Suomessa – Helsingissä, Espoossa ja Tampereella. SOHJOA eroaa CityMobil2:n testauksista, koska robottibussit kulkivat tällä kertaa oikean liikenteen seassa ilman omaa kaistaa. Joitain muutoksia liikennejärjestelyihin kuitenkin tehtiin. Robottibusseista varoittavia kylttejä asennettiin, lisättiin hidastetöyssyjä, kiellettiin pysäköintiä ja käytettiin siirreltäviä liikennevaloja. Hernesaaren reitin muutokset näkyvät kuvassa 2. (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 12)



Kuva 2. Muutokset liikennejärjestelyihin robottibussia varten (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018).

Tuloksina todettiin, että kyseinen robottibussi ei ole valmis olemaan osana joukkoliikennejärjestelmää. Etäohjauksen puuttuminen, liikennesääntöjen hallitseminen, haja-asutusalueella toimiminen ja ajoneuvon hidas nopeus (noin. 5-12km/h) vaativat kaikki vielä jatkokehitystä (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, ss. 27-28). Toisaalta artikkelikokoelmassa mainitaan myös, että automaattibussit ovat lähellä kaupallistamista niille sopivissa ympäristöissä (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 18).

Monet tulevaisuuden hankkeet tulevat perustumaan SOHJOA-projektista kerättyyn dataan, koska aiempaa kokemusta oikean liikenteen seassa kulkevista robottibusseista ei ole saatavilla (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 3)

3.3 aIGO

Hankkeen virallinen nimi on ”aIGO – Asemanseutujen joukkoliikenteen kehittäminen ympärivuotisella automaatiolla”, jonka tarkoituksena oli kehittää ympärivuotiseen liikennöintiin sopiva automaattibussi ja parantaa asemanseutujen liikkuvuutta (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017).

Kahta automatisoitua Renault Twizy-merkkistä ajoneuvoja pilotointiin vuonna 2018 Espoossa, Vantaalla ja Hämeenlinnassa. Twizyjä käytettiin first / last mile -automaattiliikenteen testaamiseen ja koko pilotti oli yleisölle avoin. Ajoneuvot toimivat myös ohjelmiston testialustana maaliskuussa 2019 valmistuneelle Gacha-robottibussille. Hämeenlinnan reitti ja käytetty automaattiajoneuvo näkyy kuvassa 3.



Kuva 3. Hämeenlinna pilotissa käytetty pysäkkimerkki ja automatisoitu Renault Twizy (Suomen kasvukäytävä, 2018).

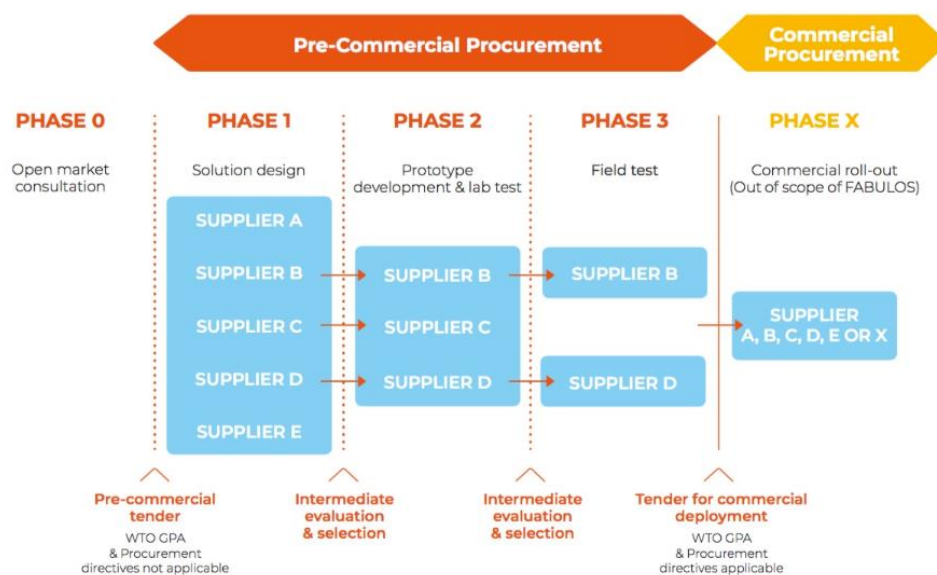
Pientä robottibussia testanneet henkilöt pitivät kyytiä turvallisena ja mielenkiintoisena. Negatiivinen palaute liittyi pääosin kaksipaikkaisen testiajoneuvon istumatilaan.

3.4 FABULOS

Hankkeen tavoitteena on selvittää, miten kaupungit voivat käyttää automaattiajoneuvoja osana joukkoliikennejärjestelmää. Tarkoituksena on luoda oikeita linja-autolinjoja, joita liikennöitäisiin robottibusseilla. Todisteita usean automaattiajoneuvon hallitsemisesta osana julkista liikennettä etsitään kuuden kumppanikaupungin kanssa. Tästä hanke saa myös nimensä: Future Automated Bus Urban Level Operation Systems. (FABULOS, 2018)

Yritykset pystyivät hakemaan mukaan hankkeeseen vuoden 2018 elokuun loppuun asti. Kuusitoista yritystä pääsi ensimmäisestä vaiheesta läpi, joista muodostettiin viisi konsortiota. Suomalaisista mukaan ovat päässeet VTT, Fortum, Sensible 4 ja Fleetonomy.ai Oy. Muut yritykset tulevat Ranskasta, Norjasta, Virossa, Kanadasta ja Tanskasta. Tutkimus- ja kehitystyöhön on jaossa 5,5 miljoonaa euroa ratkaisujen kehittämiseen. (FABULOS, 2018)

FABULOS-projekti koostuu avoimesta konsultaatiosta ja kolmesta vaiheesta: Ratkaisun suunnittelusta, prototyypin kehittämisestä ja testaamisesta ja kenttätestauksesta. Vaiheet on kuvattu kuvassa 4. (FABULOS, 2018)



Kuva 4. FABULOS-hankkeen vaiheet (FABULOS, 2018).

Ensimmäinen vaihe alkoi tammikuussa 2019 ja päättyi maaliskuussa 2019 toisen vaiheen konsortioiden valintaan. Toinen vaihe, prototyyppien kehitysvaihe, alkaa heinäkuussa 2019 ja päättyy joulukuussa 2019. Tässä vaiheessa konsortioilta odotetaan toimivan prototyypin valmistamista ja testausta suljetuissa olosuhteissa. Kolmas vaihe alkaa huhtikuussa 2020 ja päättyy syyskuussa 2020, jolloin konsortiot testaavat prototyyppisiä oikeissa olosuhteissa ja oikean liikenteen seassa. (FABULOS, 2018)

Lopputuloksena odotetaan toimivaa robottibussipalvelua, joka toimii osana nykyistä joukkoliikennejärjestelmää. (FABULOS, 2018)

3.5 Sohjoa Baltic

FABULOS-projektin kanssa suunnilleen samalla aikajänteellä toimiva hanke Sohjoa Baltic pyrkii tuottamaan uutta tietoa first/last mile tyyppisestä robottibussiliikenteestä. Lokakuussa 2017 alkanut projekti päättyy vuoden 2020 syyskuussa. (Sohjoa Baltic, 2018)

Kuudessa Itämeren alueen valtiossa kokeillaan robottibusseja oikean liikenteen seassa osana julkista liikennettä. Suomi on yksi näistä valtioista, ja Helsingissä testataan robottibussia noin vuoden verran projektin aikana. (Sohjoa Baltic, 2018)

Huomioitavaa on, että jo vuoden 2018 kesällä Helsingissä operoitiin robottibussilinjaa 94R, joka kulki oikean liikenteen seassa. Bussilla oli aikataulut

ja se löytyi HSL:n reittiopas-palvelusta (HSL, 2018). Kyydissä oli aina yhdestä kahteen henkilöä, jotka vastasivat bussin turvallisesta toiminnasta. Muuttuvat olosuhteet, kuten vesisade tai esteet kadulla rajoittivat ope-
rintia hetkellisesti. Linja toteutettiin osana EU-laajuista mySMARTlife-
hanketta, joka kehittää viisasta ja energiatehokasta liikkumista (HSL,
2018).

4 ROBOTTIBUSSIEN TEKNIikka JA LAINSÄÄDÄNTÖ

Tässä luvussa kerrotaan yleistietoa robottibusseista ja avataan teknologian toimintaa. Kirjallisuusselvityksen lisäksi osuutta varten on tehty kaksi sähköpostihaastattelua. Gacha-robottibussin kappaletta varten haastateltiin robotiikkainsinööri Aku Kyyhkystä, jonka työtehtäviin kuuluu eri järjestelmien integrointi. Kyyhkynen on ollut vahvasti mukana kehittämässä Sensible 4:n Gacha-robottibussin ohjelmistoa. SAE-tasoihin ja etäohjaukseen näkemystänsä jakoi Metropolian Älykäs liikkuminen -innovaatiokeskittymän johtaja Oscar Nissin.

4.1 Lainsäädäntö

Suomen tieliikennelaki mahdollistaa automaattiliikenteen testaamisen muun liikenteen seassa sen väljyyden ansiosta. Laissa ei esimerkiksi mainita erikseen, että ajoneuvon sisällä täytyy olla kuljettaja, toisin kuin monen muun maan vastaavassa laissa. (Helsingin Sanomat, 2015)

Uusi tieliikennelaki astuu voimaan 1.6.2020. Turvallisuuden ja sujuvoittamisen lisäksi Liikenne- ja viestintäministeriö painottaa varautumista digitalisaation mahdollisuuksiin. Byrokratia vähentyy, kun säännöksiä modernisoidaan selkeämmiksi ja yksittäisiä säännöksiä poistuu laista kokonaan. Tieliikennelain valmistelussa otettiin ajoneuvojen ja infrastruktuurin tuleva kehittyminen huomioon. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2018).

Hallituksen vuonna 2017 tekemän tieliikennelakiehdotuksen (Sipilän hallitus, 2017, s. 131) mukaan voimassa olevassa tieliikennelaissa ei ole määritelty kuljettaa ollenkaan. Laista kuitenkin ilmenee, että kuljettajan pitää pystyä hallitsemaan ajoneuvoa ja kuljettajan täytyy olla ihminen. Ehdotuksessa pohditaan, että kuljettajan roolin voisi jättää jatkossakin avoimeksi, joka mahdollistaisi ajoneuvojen teknisen kehityksen paremmin. Yhtenä vaihtoehtona on myös, että säännöksissä ei määritellä ohjaako ajoneuvoa ihminen vai tietokone.

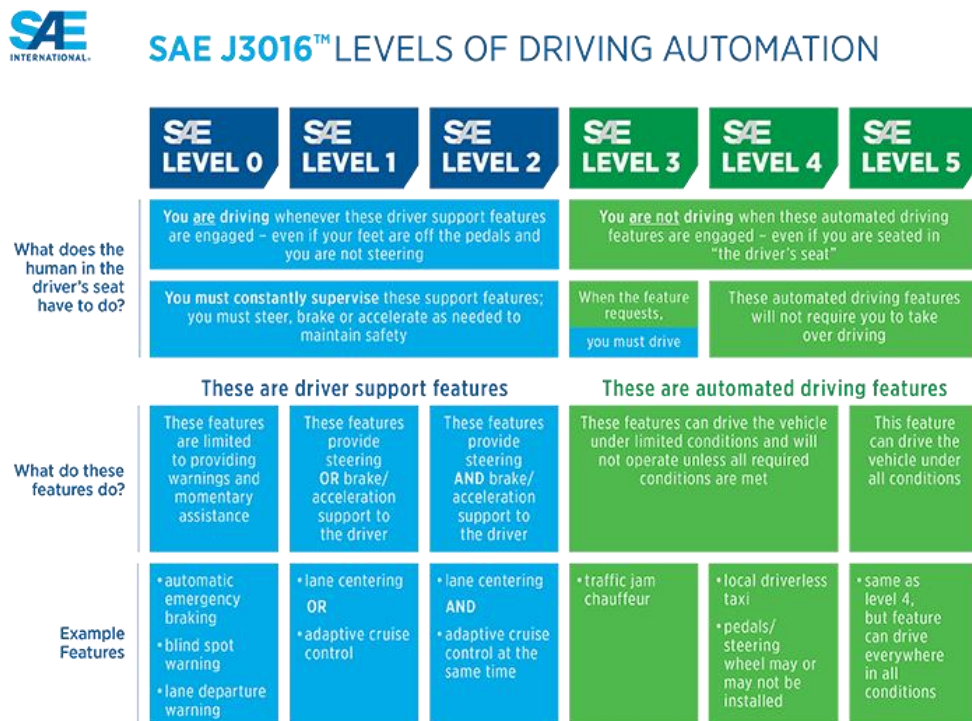
KPMG:n tekemän selvityksen (KPMG International, 2019) mukaan Singapore on lainsäädännöltään maailman hyväksyvin maa automaattiajoneuvoille. Singapore on perustanut vuonna 2017 yliopiston testilaitoksen autonomisten ajoneuvojen (AV) tutkimukselle ja kehitykselle. Täältä kerätyn

tutkimusdatan avulla valtion kehitti standardien sarjan, joiden avulla sujuva ja turvallinen autonomisten ajoneuvojen kehittyminen mahdollistettiin.

4.2 SAE-tasot

Society of Automotive Engineers (SAE) on yhdysvaltalainen standardisointiin erikoistunut järjestö, jonka ajoneuvojen automaation mittaukseen käytettyjä tasoja käytetään yleisesti maailmalla. Tasoja on kuusi kappaletta, joista 0-taso tarkoittaa täysin manuaalista ajoneuvoa taso 5 tarkoittaa täysin itsestään ajavaa ajoneuvoa. (Society of Automotive Engineers, 2018)

Kuvassa 5. näkyy SAE:n vuonna 2018 päivittämä kaavio automaation tasoista.



Kuva 5. SAE-automaatitotasot (Society of Automotive Engineers, 2018).

Yleisimmät robottibussit toimivat nykypäivänä tasoilla 3 ja 4. SAE-Tasot voivat vaihdella yksittäisissä malleissa paikasta ja olosuhteista riippuen. Käytännössä tason 5 robottibusseja ei ole vielä olemassa kuin erittäin rajoituksissa olosuhteissa.

Oscar Nissinin mukaan SAE-tasot kuvaavat automaattista ja autonomista liikennettä varsin heikosti ja pintapuolisesti. Keskustelussa ollaan siirrytty puhumaan Operational Design Domainista, jotka kuvaavat ajoneuvon toimintaa tietyissä olosuhteissa. (Nissin, haastattelu 2019)

4.3 Operational Design Domain

Yritykset määrittävät yleensä ajoneuvoilleen rajat, joiden sisällä ajoneuvo pystyy operoimaan automaattisesti. Tätä kutsutaan Operational Design Domain (jatkossa ODD) nimellä.

Waterloon yliopiston professorin kirjottaman raportin (Czarnecki, 2018) mukaan ODD tarkoittaa olosuhteita, jossa ajoneuvo on suunniteltu toimimaan, kuten päivän aika, fyysinen ympäristö tai sääolosuhteet. Myös esimerkiksi liikennemerkkien ja liikennevalojen puuttuminen tai olemassaolo voi vaikuttaa ajoneuvon ODD:iin.

Erilaisten liittymien ominaisuudet ja tieolosuhteet ovat iso osa ajoneuvon ODD:n kartoittamista. Kiertoliittymillä, tunneleilla ja valo-ohjatuilla liittymillä on kaikilla omat rajoituksensa ja haasteensa automaattiajamiseen. Automaattiajoneuvon rajoitukset voivat vaihdella paikasta riippuen. Urbaaneissa ympäristöissä ja haja-asutusalueilla automaattiajoneuvon ääri-rajat voivat olla hyvinkin erilaiset. (Czarnecki, 2018)

Itse ajoneuvon ominaisuudet ovat myös yksi osa sen ODD:n määrittämistä. Esimerkiksi operointinopeus, maksimi kantokyky ja ajoneuvon kääntösäde asettavat omat rajoituksensa toimintakykyihin- ja ympäristöön. (Czarnecki, 2018)

4.4 Robottibussien tekniikka

Erilaisilla tutkilla ja sensoreilla pyritään luomaan robottibussille kattava kuva sen ympäristöstä. Osaa laitteista käytetään paikannukseen, osaa esteiden tunnistukseen ja osaa ajoneuvon tarkempaan asemointiin. HD-kartan luominen ja käyttäminen, kuten myös konenäkö ovat myös olennaisia osia automaattista ajamista. Pyrkimyksenä on luoda mahdollisimman hyvä, ihmisen havaintoihin verrattava kuva erilaisista liikennetilanteista ja ympäristöstä (Liljamo, ym., 2018, s. 8).

Robottibusseissa on käytössä erilaisia sensoreita valmistajasta riippuen, mutta tässä luvussa painotetaan Sensible 4:n valmistaman Gacha-nimisen robottibussin käytössä olevaa tekniikkaa. Gachaa tullaan operoimaan kolmessa kaupungissa Suomessa vuonna 2019.

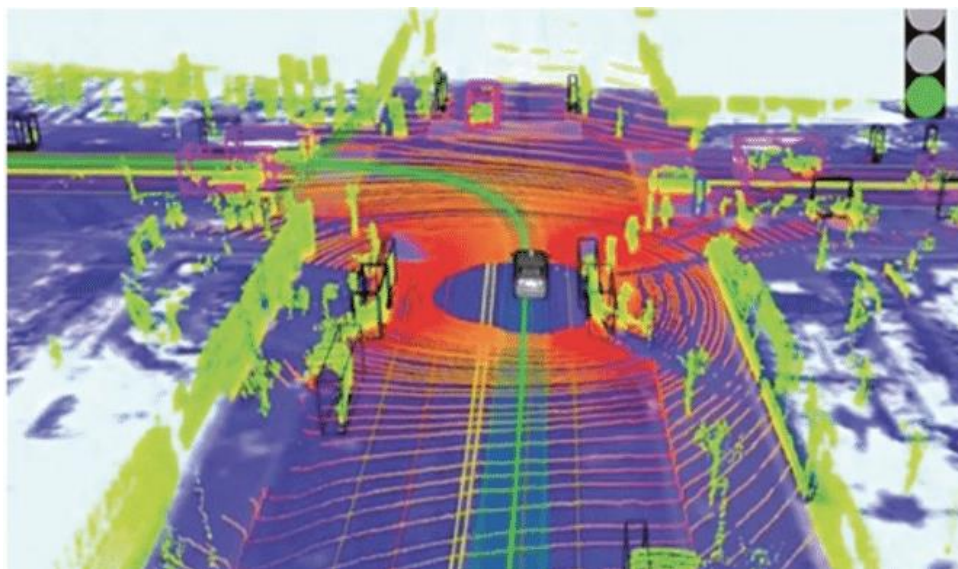
4.4.1 Tutka

Yleisesti tunnettu nimellä Radar (Radio Detection and Ranging), tutka on yleisesti robottibusseissa käytetty sensori. Sillä voidaan mitata objektin etäisyyttä, suuntaa ja nopeutta. Tutka lähettää sähkömagneettista säteilyä, jonka heijastuessa objektista saadaan mitattua sensorin ja objektin välinen matka pulssin kulkuajasta. (Niemi, 2015)

4.4.2 Optinen tutka

Lidar (Light Detection and Ranging) on optinen tutka, joka käyttää muista tutkista poiketen lasersäteitä. Heijastuksen mittaaminen on myös tämän tutkan pääperiaate, jolloin saadaan kerättyä tietoa etäisyyksistä. Toinen yleinen optisten tutkien käyttötarkoitus on luoda HD-karttoja ympäristöstä. Jokainen tutkasta lähtenyt lasersäde jättää pisteen heijastuskohtaan oikealle etäisyydelle, joiden avulla voidaan luoda pistepilvikartta. Kartan georeferoinnin mahdollistaa GNSS-antenni ja inertiamittausyksikkö. Karttoja käytetään mm. metsäteollisuudessa, mutta myös automaattisten ajoneuvojen paikannuksen apuna. (3D Laser Mapping, 2019)

Kuvassa 6. näkyy optisen tutkan luoma visuaalinen pistepilvikartta. Piirre-pohjainen paikannus toimii reaaliaikaista tutkadataa ja HD-karttaa vertailemalla, jolloin saadaan tieto ajoneuvon sijainnista kartalla.



Kuva 6. Lidarin luoma pistepilvikartta (Khanh Tran, 2017).

4.4.3 Satelliittipaikannus

GNSS (Global Navigation Satellite System) on yleistermi globaalille satelliittipaikannukselle. Esimerkkejä GNSS-systeemeistä on eurooppalainen Galileo, Yhdysvaltojen NAVSTAR Global Positioning System (GPS), venäläinen GLONASS ja kiinalainen BeiDou. Satelliitit lähettävät paikannus- ja aikadatan vastaanottimeen, joka voi näiden tietojen avulla määrittää sijaintinsa. (European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2017)

Kuvassa 7 on kuvattu RTK (Real-Time Kinematic) järjestelmän toimivuutta, jota käytetään GNSS-datan reaaliaikaiseen korjaamiseen. Datan korjaamisella saadaan tarkempaa paikkatietoa. Tämä voi tapahtua joko virtuaalisen tai kiinteän, maassa sijaitsevan korjausaseman kautta. (NovAtel, n.d.)

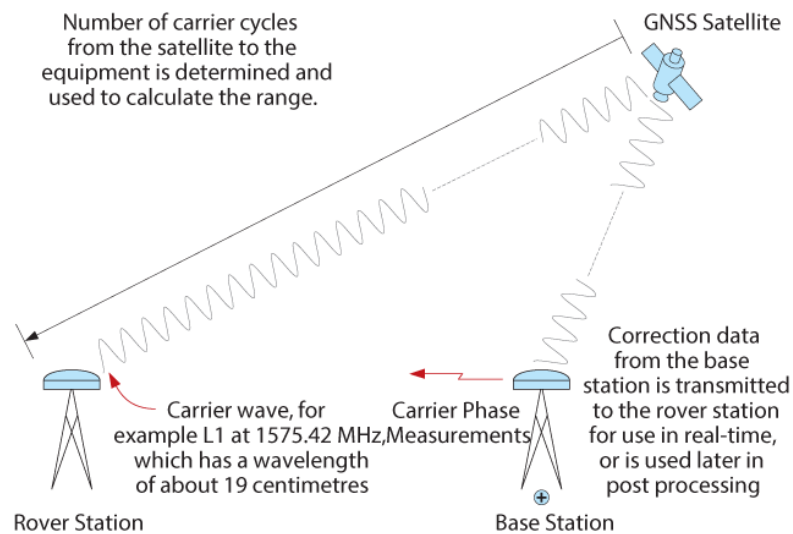


Figure 42 Real-Time Kinematic

Kuva 7. RTK-järjestelmä (NovAtel, n.d.).

4.4.4 Inertiamittausyksikkö

Kiihtyvyyssantureista, gyroskoopista, lämpötila-anturista ja mikro-ohjaimesta koostuva yksikkö IMU (Inertial Measurement Unit) mittaa liikkeen tilaa ja asentoa. Laitteesta saatua dataa joudutaan jatkokäsittelyyn muun muassa aikatahdistamisella ja kalibroinnilla. (Pihlström, 2013, ss. 1,4)

4.4.5 Stereokamerat

Kamerat ovat hyvä lisä automaattisen ajoneuvon sensoripankkiin, sillä se säilyttää myös väridatan ja muistuttaa ihmissilmää ominaisuuksiltaan (Nissin, 2019). Robottibusseja valmistava ranskalainen yritys Navya käyttää kameroita esteiden tunnistukseen, etäisyyksien mittaamiseen, liikennemerkkien ja liikennevalojen tunnistukseen ja karttojen parantamiseen (Navya, 2018).

4.4.6 Kaikuluotain

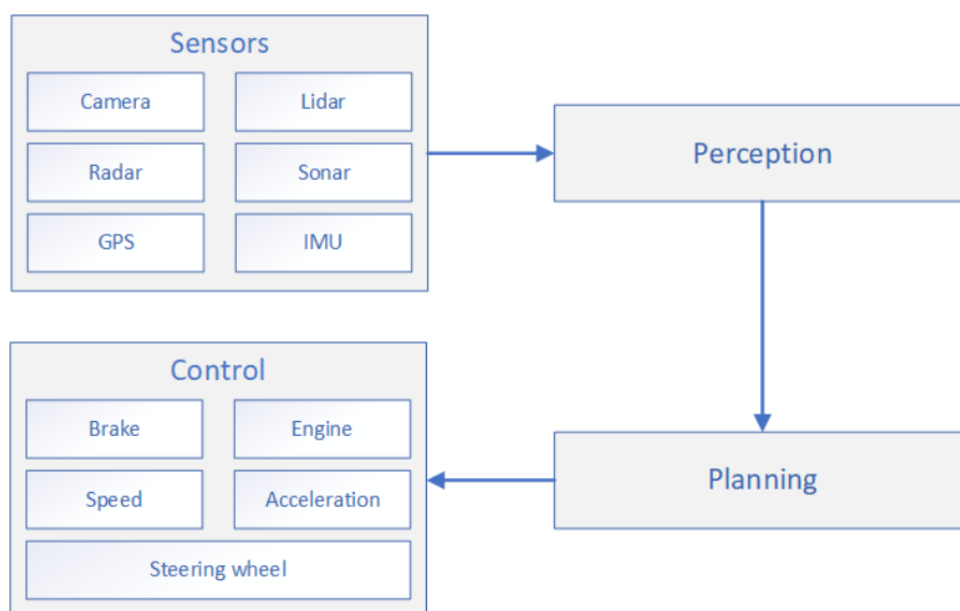
Sonar (Sound Navigation and Ranging) on sensori, joka käyttää äänipulssia etäisyyksien mittaamiseen. Äänen nopeudesta ja matka-ajasta kerättyä dataa käytettiin alun perin vain merenalaisiin tarkoituksiin (Leonard & Durrant-Whyte, 1990, s. 13), mutta myöhemmin sitä alettiin käyttämään myös kartoituksessa ja ajoneuvoteknologiassa (Mitsubishi, 2017).

Kaikuluotain ei ole ollut varusteena Suomessa käytetyissä robottibusseissa, mutta esimerkiksi Tesla käyttää sensoria automaattiparkkeeraamisessa ja lähellä olevien autojen havaitsemiseen (Tesla, 2019)

4.5 Sensorifuusio

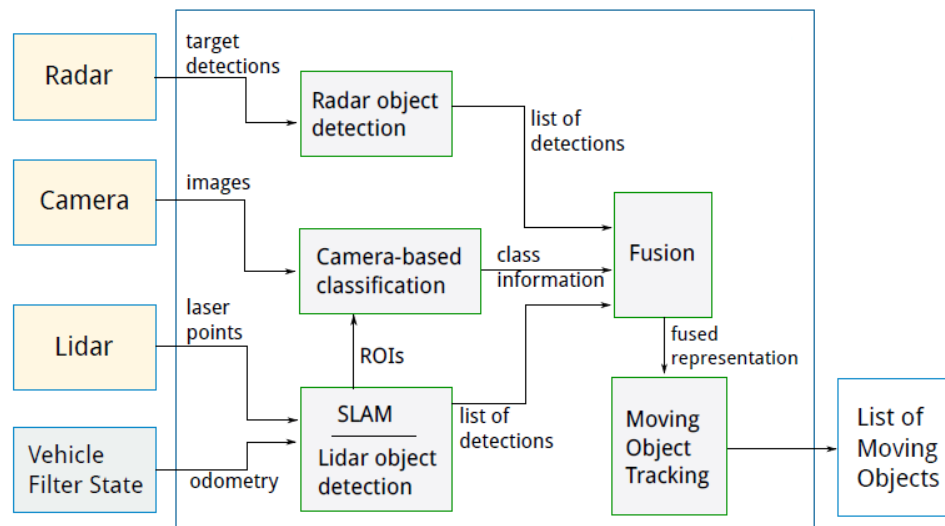
Eri sensoreista kerätyn datan yhdistämistä ja hyödyntämistä kutsutaan sensorifuusioksi. Ihmisetkin käyttävät sensorifuusion tapaista toimintaa jatkuvasti käyttämällä eri aisteista kerättyä tietoa ja prosessoimalla sitä. (Elmenreich, 2002, ss. 1-2)

Automaattiset ajoneuvot käyttävät sensorifuusiota yhdistämällä eri sensoreiden keräämät tiedot, prosessoimalla ne, suunnittelemalla lyhyen ja pitkän aikavälin toimenpiteet ja lähettämällä ne ajoneuville (Kocić;Jovičić;& Drndarević, 2018, s. 1). Kuvassa 8 on kuvattu sensorifuusiota diagrammilla.



Kuva 8. Sensorifuusio automaattisissa ajoneuvoissa (Kocić;Jovičić;& Drndarević, 2018).

Sensorifuusio mahdollistaa luotettavamman datan käyttämisen autonomisessa ajamisessa. Yksittäisien sensoreiden datan käyttäminen ilman fuusiota ei olisi yhtä varmaa, kuin sensoreiden datan käyttäminen yhdessä. Esimerkiksi kamera on hyvä sensori simuloimaan ihmisen silmää, mutta välimatkan mittaaminen tapahtuu pääsääntöisesti erilaisilla tutkilla (Kocić;Jovičić;& Drndarević, 2018). Yksi esimerkki automaattiajoneuvon havainnointiin sensorifuusion avulla on kuvattu kuvassa 9. Sensorit keräävät omaa dataa objekteista, mutta yhdistämällä sensoreista kerätty data, saadaan lista liikkuvista objekteista luokiteltuna.



Kuva 9. Esteiden tunnistuksessa käytetty sensorifuusio (Kocić; Jovičić; & Drndarević, 2018).

4.6 Etäohjaus

Syksyllä 2017 toteutettiin Finavialla SOHJOA-projektiin liittyen robottibus-sikoikeilu. Bussin operoijat totesivat projektin jälkeen, että operointi ilman operoijaa vaatisi vakaan etäohjausjärjestelmän lisäksi myös selkeät matkustajainformaatiot. Operaattori voi kertoa muille automaattibussin matkustajille, miten bussi toimii, ja hän on luomassa yleistä turvallisuuden tunnetta. Näin saadaan uusi liikkumismuoto ihmisille tutuksi. Ennen etäohjauksen käyttöönottoa, operoijan kydyssä olemista pidetään hyvänä väli-vaiheena. (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 39)

Oscar Nissin kertoo etävalvonnan olevan mahdollista jo nyt. Suuret robot-tibussien valmistajat tarjoavat omia ratkaisujaan etävalvontaan. Nissin arvioi, että 2 – 3 vuoden kuluttua kaupallisissa ratkaisuissa voidaan poistaa turvaoperaattori automaattiajoneuvon sisältä. Tässä vaiheessa täytyy pysyä jo luottamaan ajoneuvon omaan älyyn ja etävalvontaan/operointiin täysin. (Nissin, haastattelu 2019)

Lainsäädännön puolesta etävalvonta- ja ohjaaminen on mahdollista Suomessa.

4.7 Gacha

Suomalainen robottibussitekniikka- ja ohjelmistoa kehittävä yritys Sensible 4 ja japanilainen designketju MUJI kehittivät yhdessä maailman ensimmäisen joka sään kestävä robottibussin, joka näkyy kuvassa 10. Julkaisu-tilaisuus oli maaliskuussa 2019, jonka yhteydessä kutsuvieraat pääsivät testaamaan bussia muusta liikenteestä erotetulla alueella.



Kuva 10. Joka sään kestävä robottibussi Gacha (Sensible 4, 2019).

Gachassa tutkia tullaan todennäköisimmin käyttämään ainoastaan esteiden tunnistukseen (Kyyhkynen, haastattelu 2019), joita bussiin asennetaan kahdeksan kappaletta.

Optisia tutkia Gachassa on neljä kappaletta. Kaksi tutkista on niin sanottuja navigointilidareita, joita käytetään paikannukseen ja esteiden tunnistukseen, ja kaksi niin sanottuja esteiden tunnistus lidareita, joita käytetään nimensä mukaisesti esteiden tunnistamiseen. Lidareita käytetään myös 3D-kartan tekemiseen. (Kyyhkynen, haastattelu 2019)

Satelliittipaikannuksesta hyödynnetään monessa eri tarkoituksessa. Lokaalit kartat kiinnitetään globaaliin koordinaatistoon, ajoneuvon aloituspaikka kartalla asetetaan GPS:n perusteella ja se otetaan huomioon signaalin ollessa hyvä myös paikannuksessa. (Kyyhkynen, haastattelu 2019)

Inertiamittausyksikköä käytetään Gachassa kiihtyvyyden mittaamiseen. Yhdistämällä kiihtyvyydsmittauksen ja renkaiden odometrian data saadaan tarkka estimaatti ajoneuvon liikkeestä. (Kyyhkynen, haastattelu 2019)

Gacha käyttää kameroita optisista tutkista saadun datan kanssa objektien tunnistukseen ja seurantaan (Kyyhkynen, haastattelu 2019). Viisi kameraa luo robottibussille täydellisen 360-asteen kameranäön (Sensible 4, 2019).

Robottibussi asettuu SAE-asteikolla tasolle 4. Sensible 4 tarjoaa SAE-tason 4 ratkaisuja myös tavallisiin ajoneuvoihin (Sensible 4, 2019). Vertauksena asiantuntijat pitävät Teslan autopilotin olevan SAE-tasolla 2 (The Verge, 2019)

5 TARKASTELUALUE

Robottibussien vaikutusta liikennesuunnitteluun ja infrastruktuuriin tarkasteltiin teoreettisten esimerkkireittien avulla. Oikeaa robottibussia ei ole operoitu tarkastelualueella, vaan tiedot perustuvat haastatteluista ja aiemmista kokeiluista saatuun tietoon.

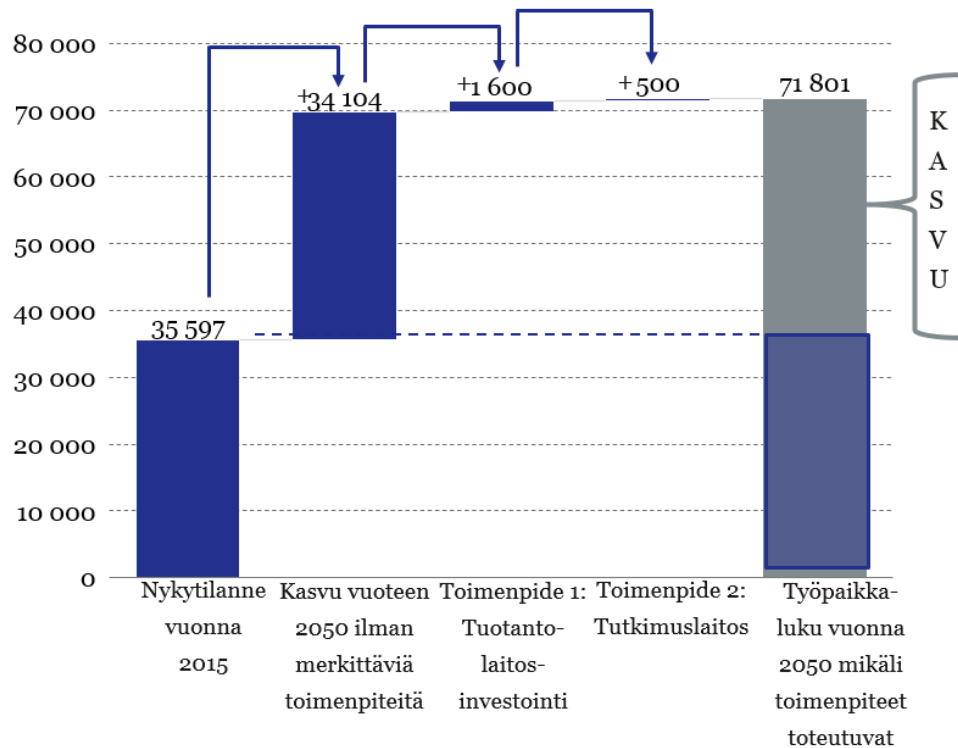
Joukkoliikennettä täydentävä robottibussilinja vastaisi kaupungin tavoitteita tehdä yrityksille monipuolisia ja vetovoimaisia työpaikka-alueita, olla edelläkävijä palvelujen kehittämisessä ja se edistäisi ympäristötavoitteiden saavuttamista sekä henkilöautoriippuvuuden vähentämistä.

Tarkemmin tarkastelut kohdistuvat Viinikkalan, Veromiehen ja Lentoken-tän kaupunginosiin. Tarkastelualue sijoittuu teitä pitkin noin 20 kilometrin päähän Helsingin päärautatieasemasta pohjoiseen (kuva 11).



Kuva 11. Tarkastelualueen sijainti Maanmittauslaitoksen karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

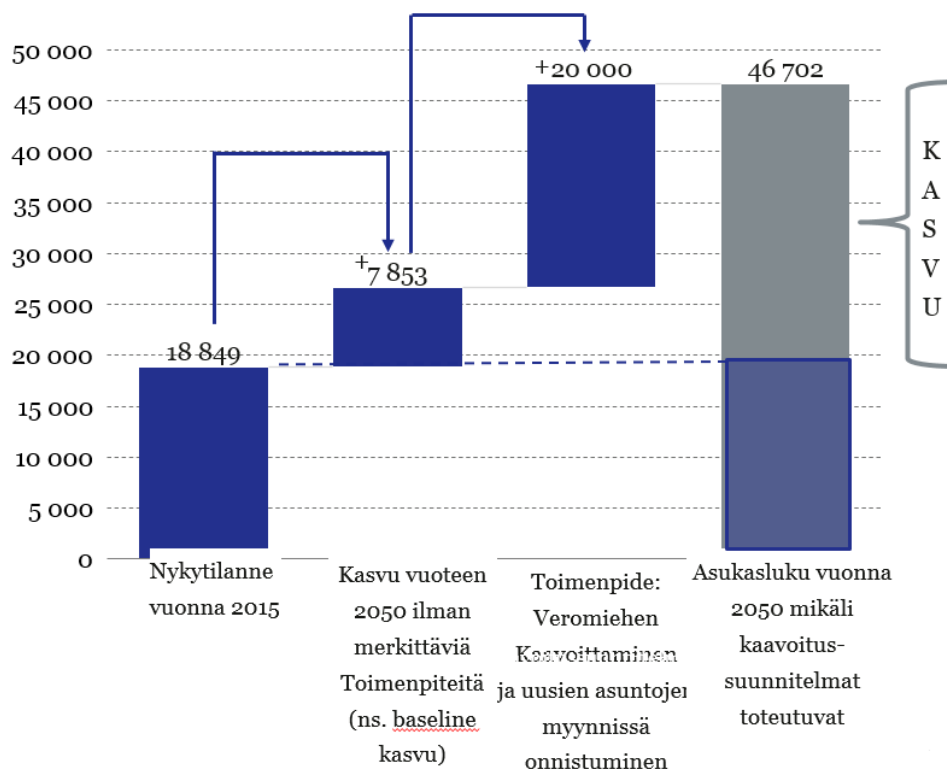
Aviapolis on pääkaupunkiseudun toiseksi suurin työpaikka-alue, joka työllistää 37000 ihmistä (Aviapoliksen internetsivut, 2019). Kansainvälisen lentoaseman läheisyys ja hyvät liikenneyhteydet houkuttelevat etenkin logistiikkayrityksiä alueelle. Kaavoituksessa on mahdollistettu asumisen ja työpaikkojen vahvakin kasvaminen. Kuvassa 12 on ennustettu työpaikkojen kasvua vuoteen 2050 eri toimenpiteiden toteutuessa. Diagrammissa käytetyt tilastot ovat vuodelta 2015. (Vantaan kaupunki, 2017)



Kuva 12. Aviapoliksen työpaikkojen kehityksen kasvuennuste 2050 (Vantaan kaupunki, 2017).

Nykyisestä 37000 työpaikasta määrän on potentiaalia kasvaa jopa melkein kaksinkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä. Huomioitavaa on, että ilman merkittäviäkin toimenpiteitä työpaikkojen määrän on arvioitu kasvavan noin 34000:lla.

Aviapoliksen suuralueen asukasluvun on myös ennustettu kasvavan merkittävästi vuoteen 2050 mennessä (kuva 13). Toimenpiteiden merkitys on huomattavasti tärkeämmässä roolissa, kuin työpaikkojen kasvuennusteissa. Veromiehen alueelle on kaavoitettu asuntoja 20000 ihmiselle, joten laajennussuunnitelman toteutumisella on suuri merkitys alueen kasvulle (Vantaan kaupunki, 2017).

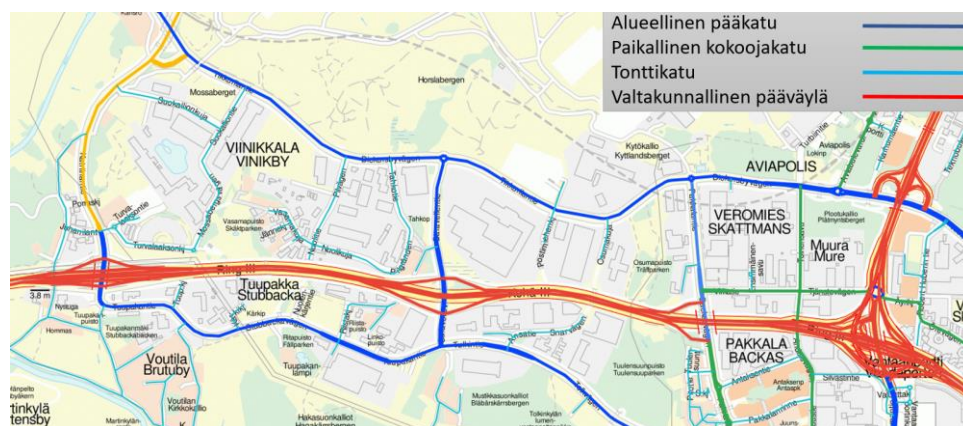


Kuva 13. Aviapoliksen suuralueen asukasluvun kasvuennuste 2050 (Vantaan kaupunki, 2017).

Vantaan väkiluku kasvoi 5100 ihmisellä vuonna 2018, joka tarkoittaa 2,3 % kasvua. Helsinkiin ja Espooseen verrattuna Vantaan väkiluku kasvoi suhteellisesti eniten. (Vantaan Sanomat, 2019).

5.1 Nykyinen liikennejärjestelmä

Tarkastelualan katuverkko koostuu alueellisista pääkaduista, paikallisista kokoojakaduista ja tonttikaduista (kuva 14). Esimerkkireiteillä käytetään kaikkia edellä mainittuja katutyyppejä. Kehä 3 on valtakunnallinen pääväylä, joka edesauttaa työmatkan suorittamista henkilöautolla.



Kuva 14. Tarkastelualan katuluokat (Vantaan kaupungin karttapohja, 2018).

Kuvassa 15 on havainnollistettu karttapohjalle työpaikka-alueiden sijainti ja läheiset kehäradan pysäkit. Viinikkalan kohdalla on työpaikka-alueita, josta on jalankulku- ja pyöräilyväyliä pitkin sama matka (3 – 4 km paikasta riippuen) kolmelle eri kehäradan pysäkillä. Lähempänä Aviapoliksen eteläistä rautatieasemaa töissä käyvillä on lyhyempi matka juna-asemalta työpaikalle, mutta osa työpaikoista jää silti kohtuullisen kauas asemasta. Pidempi työmatkaan käytetty aika aiheuttaa lisää matkavastusta, jota pyritään vähentämään paremmilla first / last mile -ratkaisuilla.



Kuva 15. Tarkastelualueen läheiset juna-asemat Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

Alueen linja-autopysäkit on merkattu kuvaan 16. Kuvassa on kaikkien käytössä olevien linjojen pysäkit. Linja-autot kiertävät aluetta, mutta alueen liikumistapatutkimuksen mukaan joukkoliikenteen aikataulut eivät sovi työaikaan. Pysäkeiltä on maksimissaan noin 10 minuutin matka työpaikoille (Google Maps, 2019). Kuvaa tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että osa linjoista kulkee pohjois-eteläsuunnassa ja osa itä-länsisuunnassa.



Kuva 16. Tarkastelualueen läheiset linja-autopysäkit Vantaan kaupungin karttapohjalla. Pysäkkietiedot saatu HSL:n reittioppaasta. (Tarnanen, 2019)

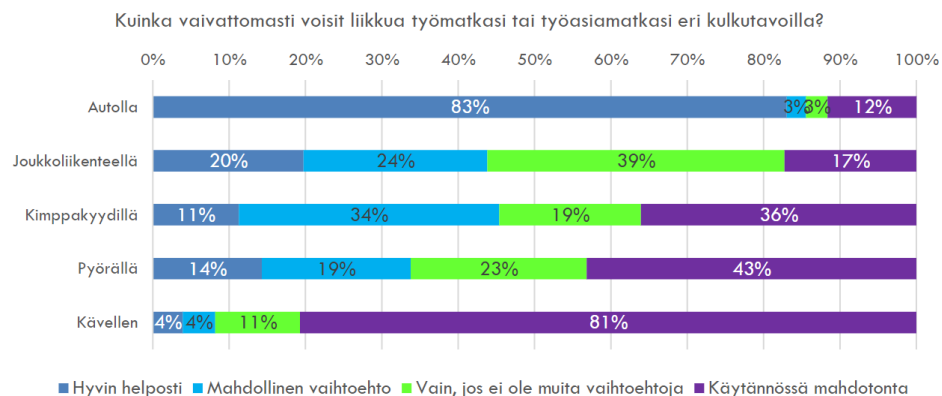
Tarkastelualueen joukkoliikenne koostuu pääosin kahdesta kulkumuodosta: junasta ja linja-autosta. Tikkurilasta lentokentälle kulkeva, suunnitella oleva raitiotie jättäisi alueen myös huomioimatta. Raitiotien esitteen mukaan (Tikkurilan ratikka, 2019, s. 3) raitiotien linjaus kulki tarkastelualueen itäreunaa, jättäen työpaikka-alueet suurelta osin huomioimatta. Alueelle on suunnitella kaupunkipyöräverkosto, joka täydentää liikennejärjestelmää etenkin last mile -yhteyksillä.

5.2 Kulkumuotojakauma

Aviapoliksen liikkumistaputkimuksen (FLOU Oy, 2019) mukaan 58,3 % alueen työmatkaliikenteestä tapahtuu yksin henkilöautolla (n=334). Muista kulkutavoista esille nousee linja-auto (19 % vastaajista), juna (3 % vastaajista) ja junan ja linja-auton yhdistelmä (7 % vastaajista). Suurin syy oman auton käyttämiseen on joukkoliikenteen käyttämisestä syntyvä lisäaika työmatkaan. Toiseksi suurin syy oli, että joukkoliikenteen aikataulut eivät sovi työaikoihin.

Työpäivän aikana tehtäviä, työhön liittyviä matkoja tehdään 71% henkilöautolla (n=274). Työasiamatkoja varten HSL:n joukkoliikennettä tai joukkoliikenteen kulkumuotojen eri yhdistelmiä kertoi käyttävänsä 24 % vastaajista. (FLOU Oy, 2019, s. 4)

Työmatkojen kulkumuotojen vaivattomuudesta kysyttiin 332 alueen työsäikäyvältä henkilöltä (kuva 17). Kävellessä kulkeminen työ- tai työasiamatkoilla koettiin käytännössä mahdottomaksi; vain 19 % vastaajista koki sen olevan jollain tasolla mahdollinen vaihtoehto. 83 % vastaajista voisi liikkua työmatkansa hyvin helposti henkilöautolla. Pyöräilyn, joukkoliikenteen tai kimppekyydin osuuden kasvattamisessa on potentiaalia, koska 33 % – 45 % pitävät sitä mahdollisena tai helppona vaihtoehtona. (FLOU Oy, 2019, s. 5)



Kuva 17. työmatkaliikenteen vaivattomuus (FLOU Oy, 2019, s. 5).

Vastauksista huomaa Aviapoliksen alueen hyvän saavutettavuuden henkilöautolla. Yli puolet työssäkävivistä pitivät joukkoliikennettä viimeisenä tai mahdottomana vaihtoehtona työmatkaliikenteeseen.

Etätöitä tekee viikoittain 8 % 330:stä vastaajasta. 35 % vastaajista tekevät etätöitä pari kertaa kuukaudessa tai harvemmin ja loput 57 % vastaajista eivät tee etätöitä. (FLOU Oy, 2019, s. 6)

Avoimissa vastauksissa annettiin mahdollisuus kommentoida nykyisiä liikumisvaihtoehtoja. Vastauksista korostuu joukkoliikenteen heikkous, henkilöauton välttämättömyys ja joukkoliikenteen kehittäminen. Bussipysäkkejä moitittiin siitä, että ne eivät ole katettuja. Vastauksissa ehdotettiin uutta asemaa kehäradalle Viinikkalaan ja alueen linja-autojen vuorovälien tihentämistä. (FLOU Oy, 2019, s. 6)

Vastaajista kolmasosa piti mielenkiintoisina kulkutapoina polkupyöriä ja kaupunkipyöriä. Huomattavaa on, että viidesosa vastaajista piti asemalta/pysäkiltä saatua sähköpyörää, kimppekyytiä tai jaettua taksia kiinnostavana vaihtoehtona (FLOU Oy, 2019, s. 6). Robottibussin voisi ajatella olevan vastaava palvelu tälle last mile -ongelmalle.

6 ROBOTIBUSSIEN LIIKENNEINFRASTRUKTUURI

Tässä luvussa tarkastellaan robottibussien tarpeita infrastruktuuriin ja operointiin liittyen. Lukua varten on maastokäyntien ja kirjallisuusselvityksen lisäksi haastateltu Metropolian Älykäs liikkuminen -innovaatiokeskitymän johtajaa Oscar Nissiniä. Robottibussien yleisiä ongelmakohtia verrattiin tarkastelualueen kolmeen esimerkkireittiin.

6.1 Robottibussien nykyiset ongelmakohdat

Tässä kappaleessa tarkastellaan nykytekniikalla toimivien robottibussien ongelmakohtia eri liikennetilanteissa. Eri robottibussien valmistajilla on eritasoisia järjestelmiä, mutta luvussa verrataan ongelmakohtia yleiseen järjestelmätasoon.

6.1.1 Liittymät

Liikenneympyrät ja kiertoliittymät soveltuvat robottibusseille melko hyvin. Ruuhkainen liikenneympyrä tai kiertoliittymä ja kevyen liikenteen huomiointi ottaminen voi aiheuttaa haasteita joillekin järjestelmille. Kaistanvaihto on liikenneympyrässä vielä haastavaa robottibusseille, etenkin korkeammassa nopeuksissa. (Nissin, haastattelu 2019)

Tasa-arvoiset liittymät ovat haastavia näkyvyyden oikealle ollessa heikko. Nopeuserot risteävien teiden välillä ja yleisesti korkea nopeus aiheuttavat myös ongelmia. Käytännössä haastavissa tasa-arvoisissa liittymissä robottibussi ohjelmoidaan hidastamaan vauhtiansa merkittävästi, ja tarvittaessa operaattori käyttää stop&go -toimintoa, eli pysäyttää bussin manuaalisesti ja antaa luvan lähteä liikkeelle, kun kokee sen turvalliseksi. (Nissin, haastattelu 2019)

Liikennevalo-ohjatun liittymän robottibussi voi hoitaa kahdella tavalla, visuaalisella tunnistuksella tai digitaalisella tunnistuksella. Visuaaliseen tunnistukseen liittyy teknisiä epävarmuuksia, joten digitaalinen tunnistaminen olisi varmempi vaihtoehto. Tietoinfrastruktuuriratkaisut ovat vielä erittäin harvassa. Ala on alkutekijöissään ja odottaa standardoitumista. (Nissin, haastattelu 2019)

Kolmesta edellä mainitusta liittymätyypistä liikennevalo-ohjattu liittymä on haastavin. (Nissin, haastattelu 2019)

6.1.2 Rakennettu ympäristö

GNSS-signaali peittyy muun muassa tunneleissa ja korkeiden rakennusten läheisyydessä. Tällöin kyseissä robottibussissa tulee olla jonkinlainen varajärjestelmä, muuten ajo päättyy siihen. Sensorit voivat ottaa heijasteita suurista lasi- tai metallipinnoista, kuten rakennusten seinistä, jolloin data vääristyy ja siihen ei voi luottaa. Piirrepohjaisen järjestelmän toiminta voi toimia väärin, jos ympäristö toistaa itseään pitkällä matkalla samoilla muodoilla, kuten samanmuotoisilla rakennuksilla. Myös rakennuksien tai muiden kiinteiden rakenteiden puuttuminen aiheuttaa vaikeuksia piirrepohjaiselle paikannukselle. Puomit ja laskusillat tai muut saman tapaiset liikennettä ohjaavat järjestelmät voivat olla vaikeita havaita. Kiintopisteiden puuttumiseen voidaan reagoida asettamalla operointialueelle kiintopisteitä itse (kuva 18). (Nissin, haastattelu 2019)



Kuva 18. Robottibussi pysäkillä ja lokalisointitaulu (kuvan vasen reuna). (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 31).

Monet nykyaikaiset järjestelmät vaativat ajoväylältä vain sen verran tilaa, että siitä mahtuu kaksi leveää ajoneuvoa ohittamaan toisensa. Robottibusseille ohjelmoidaan turvaetäisyydet, joiden sisäpuolella oleviin objekteihin reagoidaan eri toiminnoilla. Ajoneuvoa lähin raja on se turvaetäisyys, jossa se tekee hätäjarrituksen havaitessaan objektin sen sisäpuolella. Kapealla kadulla vastaantuleva ajoneuvo voi laukaista tämän toiminnon. Muuttuvat turvaetäisyydet voivat olla tähän ratkaisu. (Nissin, haastattelu 2019)

6.1.3 Liikenne

Kadunvarsipysäköinti aiheuttaa ongelmia sen luomien katvealueiden takia. Riskitilanteita syntyy myös ihmisten noustessa ulos tai astuessa sisään autoon, jonka takia kadunvarsipysäköintiin ollaan reagoitu hidastamalla robottibussin nopeutta riskikohdan alueella. (Nissin, haastattelu 2019)

Vilkkaut suojatiet tulisi varustaa liikennevaloilla, ettei robottibussi joudu odottamaan liian pitkiä aikoja, että jalankulkijat antaisivat tilaa (Nissin, haastattelu 2019). Reittisuunnittelussa tulisi muistaa, että robottibussit ajavat rauhallisesti turvallisuussyistä, eivätkä yritä mennä tiukkoihin väleihin.

Älykkäät liikennevalot laajentaisivat robottibussien reittimahdollisuuksia (Nissin, haastattelu 2019). Varman tiedon saaminen suoraan digitaalisessa muodossa on parempi vaihtoehto kuin optisesti liikennevalon värin lukeminen.

Jalankulkijoita ja pyöräilijöitä robottibussi kohtelee samanarvoisesti. Ajoneuvo havaitsee objektin, mutta se ei tunnista sitä. Robottibussin reitillä sijaitseviin objekteihin ajoneuvo reagoi hidastamalla tai pysäyttämällä itsensä. Suojateiden kohdilla on joissain järjestelmissä mahdollista ohjelmoida odotusalueet, jolloin robottibussi odottaa alueella olevan objektin poistumista tai operaattori antaa luvan jatkaa matkaa. Kehittyneimmät järjestelmät voivat luokitella objekteja ja reagoida niihin eri tavoin. (Nissin, haastattelu 2019)

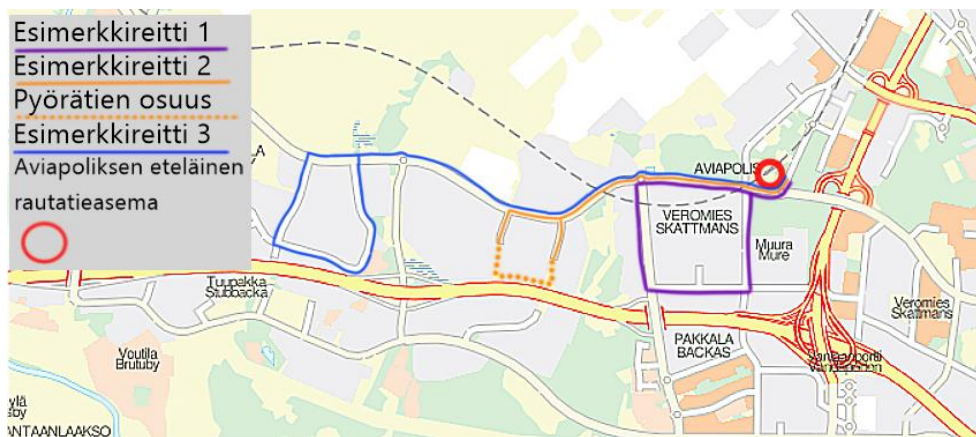
SOHJOA-projektin aikana opittiin, että hidas nopeus (5 km/h – 12 km /h) ei sovellu sekaliikenteeseen. Tässä pilotointiprojektissa operointinopeus pidettiin kuitenkin alhaisena turvallisuuden takaamiseksi. Hätäjärrutuksen tapahtuessa loukkaantumisen riski kasvaa huomattavasti etenkin turvavyöttömissä penkeissä istuvien ja seisovien matkustajien osalta. Hidas operointinopeus syö myös robottibussin kilpailukykyä. (SOHJOA artikkelikokoelma, 2018, s. 28)

Helsingin Kivikossa pilotoidulla robottibussilinjalla 94R:llä alennettiin nopeusrajoitusta 10 kilometrillä tunnissa 40 kilometriin tunnissa. 50 km/h rajoitukseen soveltuvalla kadulla tapahtui paljon ohitustilanteita, kun Navyan valmistamalla robottibussilla oli turvallisuussyistä 18 km/h operointinopeus. (Maastokäynti, 2018)

Vuonna 2018 Vantaan Kivistössä käytetty operointinopeus 30 km/h aiheutti joitain ohituksia 40 km/h alueella. Tavallista hitaamman nopeuden takia myös turvavälit pienentyivät. Käytetty ajoneuvo oli huomattavasti normaalin kokoista robottibussia pienempi, kaksipaikkainen Renault Twizy. Reitillä olevien potentiaalisten ohituspaikkojen vähäinen määrä vähensi ohitustilanteita.

6.2 Esimerkkireitit

Kolme erilaista reittiä luotiin tuottamaan erilaista tietoa tarkastelualueen liikenneinfrastruktuurin soveltuvuudesta robottibussille. Opinnäytetyössä haluttiin tarkastella rohkeasti liikenneinfrastruktuuriltaan erilaisia reittejä, joiden avulla infrastruktuurin muutosten tarvetta ja robottibussien kilpailukykyä voitiin arvioida. Kaikki kolme reittiä ovat kehä 3:n ja Tikkurilantien välisellä alueella, ja ne kulkevat last mile -tyyppisesti Aviapoliksen eteläisen rautatieaseman kautta Veromiehen ja Viinikkalan työpaikka-alueille. Reitien ongelmakohtien tietoja voi soveltaa myös muilla alueilla. Esimerkkireitit on kuvattu alla (kuva 19).



Kuva 19. Esimerkkireitit Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

Kaikissa reiteissä robottibussin kiertosuunta on suunniteltu myötäpäivään. Myötäpäivään operoidessa vältetään vasemmalle kääntymisiä. Vasemmalle kääntymiset voivat hidastaa robottibussien operointia etenkin ruuhka-aikoina, koska vastaantulevaa liikennettä joudutaan useissa liittymissä väistämään.

Ensimmäinen reitti (kuva 20) palvelisi Aviapoliksen eteläisestä rautatieasemasta katsottuna lähimpää työpaikka-aluetta. Se on noin 2,8 kilometrin pituinen, joten soveltuu hyvin last mile -tyyppiseen liikenteeseen pienemmälläkin kalustomäärällä. Reitillä sijaitsee liikennevalo-ohjattu liittymä, kaksi kiertoliittymää sekä kaksi liittymää, jossa on sivusuuntien väistämisvelvollisuus. Alueella on yksitoista suojatietä, joista yhdeksässä robottibussi olisi väistämisvelvollinen.

Reittiä myötäpäivään ajettaessa liikennevalo-ohjatussa liittymässä ensimmäinen kohtaaminen on nuolivalolla ohjattu käänнос vasemmalle ja toinen on tavallinen suoraan ajettava kohta. Ensimmäisessä liittymässä, jossa sivusuuntia joudutaan väistämään robottiauto pääsisi kääntymään etuajo-oikeutetusti oikealle. Toisessa samankaltaisessa liittymässä robottibussi joutuisi väistämään vasemmalta tulevaa liikennettä.



Kuva 20. Ensimmäinen reitti Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

Toinen reitti (Kuva 21) on noin 4,1 kilometrin pituinen. Se poikkeaa ensimmäisestä reitistä pituuden lisäksi sillä, että osa reitistä on kehä 3:sen pohjoispuolella sijaitsevalla pyörätiellä. Tämä reitti palvelisi myös yhtä Aviapoliksen suurista työpaikka-alueista. Pyörätien osuus reitistä on noin 700 metriä. Reitillä on yksi liikennevalo-ohjattu liittymä, kaksi kiertoliittymää, kaksi liittymää, jossa täytyy väistää sivusuunnista tulevaa liikennettä sekä kaksitoista suojatietä, joissa yhdessä robottibussin ei tarvitsisi väistää kevyttä liikennettä. Näiden lisäksi on vielä pyörätien osuus, jossa robottibussin voisi kuvitella ajavan esimerkiksi omalla rajatulla kaista-alueellaan.

Myötäpäivään ajaessa molemmissa liikennevalokohtaamisissa ajettaisiin suoraan. Ensimmäisessä liittymässä, jossa täytyy väistää sivusuunnista tulevaa liikennettä, kääntyttäisiin vasemmalle, jolloin vastaantulevaa liikennettä ja kevyttä liikennettä tulisi väistää. Toisessa samankaltaisessa liittymässä kääntyttäisiin oikealle, jolloin vasemmalta tulevaa liikennettä tulisi väistää kevyen liikenteen lisäksi.



Kuva 21. Toinen reitti Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

Kolmas reitti (kuva 22) on esimerkkireiteistä pisin, noin 7 kilometrin pituinen. Hyvän palvelutason saavuttamiseksi tämä reitti vaatisi paljon kalustoa. Viinikkalan kaupunginosan keskialueen lisäksi tämä reitti palvelisi myös yleisemmin Tikkurilantietä, jonka varrella on myös useita työpaikka-alueita. Reitillä on kolme kiertoliittymää, yksi valo-ohjattu liittymä, kolme liittymää, jossa on sivusuuntien väistämisvelvollisuus sekä 13 suojatietä, joista yhdessä robottiauto ei ole väistämisvelvollinen.

Valo-ohjatussa liittymässä robottibussi pääsisi ajamaan kierroksen molemmilla kerroilla suoraan. Liittymistä, jossa sivusuutia täytyy väistää, ensimmäisessä kääntyttäisiin vasemmalle ja kahdessa jälkimmäisessä oikealle. Kaikissa liittymissä, paitsi yhdessä kiertoliittymässä on myös kevyen liikenteen suojateitä.



Kuva 22. Kolmas reitti Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

6.3 Reittien ongelmakohdat

Robottibussin toimintakelpoisuutta alueella lähdettiin tutkimaan esimerkkireittien ongelmakohtien kautta. Kaikissa liittymätyypeissä tulee jonkintasoisia ongelmia, mutta osassa vain harvoin ja rajatuissa olosuhteissa. Liittymien lisäksi ongelmia voi syntyä suojaiteiden kohdalla ja muusta liikenteestä.

Jokaisessa esimerkkireitissä on sama valo-ohjattu liittymä Aviapoliksen rautatieasemalta lähdettäessä. Nykytekniikalla yleiset robottibussien operaattorit käyttäisivät tässä stop&go-toimintoa, eli pysäyttäisivät bussin ja antaisivat luvan jatkaa valon ollessa vihreä. Kehittyneemmät järjestelmät voisivat tunnistaa valon visuaalisen tunnistuksen avulla, mutta operaattorin tulisi tässäkin olla valmiudessa tunnistuksen epävarmuuden takia. Reitit suunnittelussa otetaan huomioon valo-ohjattujen liittymien väistämisvelvollisuudet, ja priorisoidaan suuntia, joissa robottibussi ei joudu väistämään muuta liikennettä valon ollessa vihreä.

Alueella olevat kiertoliittymät ja liikenneympyrä ovat hallittavissa robottibussilla, paitsi kaistanvaihto voi aiheuttaa ongelmia. Kiertoliittymiä pidetään alueella olevista liittymätyypeistä helpoimpana robottibussille. Ruuhka-aikoina tulee ottaa huomioon, että robottibussit eivät vielä mene pieniin väleihin, vaan odottavat turvallista ja rauhallista paikkaa liittyä liittymään.

Liittymät, jossa täytyy väistää sivusuunnista tulevaa liikennettä sekä suoja-tiet ovat hoidettavissa myös väistämissääntöjen ohjelmoinnilla. Turva-alueita on mahdollista ohjelmoida kartalle, jonka alueelta robottibussi odottaa objektien poistumisen, ennen kuin jatkaa matkaansa. Mahdollisia ongelmia voi syntyä, jos järjestelmä havaitsee niin sanotun haamuobjektin. Haamuobjekti on tutkan tai muiden sensorien havaitsema objekti, jota ei ole oikeasti olemassa tai sensorit ovat ottaneet häiriötä hyvin pienistä objekteista. Tässä tilanteessa operaattori joutuu antamaan luvan robottibussille jatkaa matkaa.

Tikkurilantiellä ei ole tarpeeksi kiintopisteitä piirrepohjaiselle paikallistamiselle, josta voi syntyä ongelmia joillekin järjestelmille. Puiden oksat ja muut tuulessa liikkuvat asiat eivät sovi piirrepohjaisen paikannuksen kiintopisteiksi.

Kaikki kolme reittiä käytiin ajamassa henkilöautolla Gacha-robottibussin käyttämillä nopeuksilla (40 km/h). Robottibussin rauhallista ajotapaa pyrittiin noudattamaan mahdollisimman tarkasti. Maastohavaintojen pohjalta huomattiin, että alueella on paljon raskasta liikennettä. Muuta liikennettä hitaampi nopeus aiheutti turvaetäisyyksien pienentymisen muutama metriin 50 km/h nopeusrajoitusalueella.

Nykypäivänä robottibussien operointikokeiluissa on käytetty rauhallisia pysäkkiratkaisuja, jotka tarkoittavat käytännössä syvennettyjä bussipysäkkejä.

Toisen esimerkkireitin pyörätienosuutta on nykytilassaan liian kapea robottibussille ja kevyelle liikenteelle. Leveä robottibussi vaatisi nykyisellään liian paljon tilaa väylästä, jolloin ongelmatilanteita voi syntyä esimerkiksi pyöräilijöiden kanssa.

6.4 Kehittämistarpeet

Tämän kappaleen pohjatietona käytetään esimerkkireittien ongelmakohtia, aiemmin kerättyä henkilökohtaista kokemusta robottibussin operoinnista ja aiemmin tehtyjä tutkimuksia.

Pääperiaatteena pidetään, että robottibussien takia ei tarvitse tehdä muutoksia infrastruktuuriin, vaan robottibussien tekniikan pitäisi kehittyä tarvittavalle tasolle. Tulee kuitenkin muistaa, että digitaalisen- ja tavallisen liikenneinfrastruktuurin kehittyminen nopeuttaisi automaattisen liikenteen kehittymistä ja mahdollistaisi robottibussien käytön laajemmin eri ympäristöissä.

Älykkäistä liikennevaloista voisi saada tiedon suoraan robottibussille, jolloin sen ei tarvitsisi perustaa tunnistusta optiseen lukemiseen, vaan se saisi lisäksi varmemman tiedon suoraan liikennevalosta. Toimivilla liikennevaloetuksilla voitaisiin varmistaa robottibussin sujuva kulkeminen valo-ohjatuista liittymistä.

Kaistanleveydet ovat esimerkkireittien alueella hyvät (kuva 23). Kaksi nykyisen kokoista robottibussia mahtuisi hyvin kulkemaan vastakkain reiteillä. Poikkeuksena on toisen esimerkkireitin pyörätienosuus, jossa vaadittaisiin kaistan levennystä ja oman alueen varaamista robottibussille. Suositteisin ajokaistan leveyksien suunnittelussa käytettävän vähintään pääkadun leveyttä (3,5 metriä). Näissä leveyksissä ei yleisten järjestelmien turvajärjestelmät aktivoidu vastaantulevasta liikenteestä ja operoinnin turvallisuus parane.



Kuva 23. Robottibussille hyvä kaistanleveys (Tarnanen, 2019).

Piirre pohjaisia järjestelmiä käytettäessä tarkastelualueelle pitäisi pystyttää lokalisointitauluja. Toinen vaihtoehto on vaatia robottibussin toimittajalta / valmistajalta GNSS-pohjaisen paikannuksen vakaata toimintaa alueilla, joissa piirre pohjainen paikannus on haastavaa.

Robottibussien nopeuksien pitäisi pystyä yleiseen taajamanopeuteen (50 km / h) sujuvan ja turvallisen operoinnin takaamiseksi Tikkurilantiellä. Turvallisuutta lisäksi myös syvennetyt bussipysäkit, jolloin turhia ohituksia ei aiheutuisi. Pysäkin tulisi olla riittävän pitkä, jotta robottibussi mahtuisi pysähtymään siihen, vaikka pysäkillä olisi samaan aikaan tavallinen bussi. Operointi on mahdollista myös nykyisellä 40 km/h nopeudella, mutta se vaikuttaisi muun liikenteen sujuvuuteen. Nopeuserot ovat aiempien pilottien pohjalta kerätyn tiedon mukaan aiheuttaneet ylimääräisiä ohitustilanteita.

Robottibussien vuorovaikutus muun liikenteen kanssa on joissain järjestelmissä hyvällä tasolla. Gacha-robottibussissa on koko auton ympäröivä valonauha, jonka avulla se voi kertoa esimerkiksi aikeistaan pysähtyä tai jatkaa matkaansa. Käsimerkkejä ja muita liikenteenohjaukseen liittyviä, ihmisten tekemiä merkkejä ei vielä tunnisteta. SOHJOA-hankkeen aikana tehdyn tutkimuksen mukaan (Tengvall, 2018, p. 2) ihmiset voivat ennustaa robottibussien käyttäytymistä sen nopeuden muutosten pohjalta.

Katualue tulee pitää hyvässä kunnossa robottibussien operoinnin aikana. Tievauriot, lumikasat tai muuta esteet voivat haitata järjestelmien toimivuutta ja pahimmassa tapauksessa jopa estää robottibussin operoinnin reitillensä.

7 ROBOTTIBUSSIEN KILPAILUKYKY

Liikenneinfrastruktuurin tarkastelun lisäksi robottibussireiteistä mitattiin matka-ajat ja niitä vertailtiin muihin yleisesti käytettyjen last mile -kulkumuotojen, kävelyn ja pyöräilyn matka-aikoihin. Lukua varten haastateltiin Helsingin seudun liikenteen (HSL:n) asiantuntijoita sähköpostihaastattelulla, jonka koordinoijana toimi linjasto- ja aikataulusuunnitteluryhmän ryhmäpäällikkö Jonne Virtanen.

Robottibussien kilpailukykyä laajemmin arvioidessa pitäisi ottaa huomioon myös kustannukset ja kapasiteetti. Kapasiteetin pitäisi tukea kysyntää ja infran asettamia reunaehtoja, kuten terminaalien kapasiteettia. Robottibussin operoinnin kustannusten pitäisi olla vähintään samalla tasolla, kuin nykyisen linja-auton operoinnin kustannukset. (HSL, haastattelu 2019)

Tässä luvussa keskitytään matka-aikojen pohjalta tehtyyn kilpailukyvyn arviointiin.

7.1 Matka-aikavertailu

Matka-aikoja vertailtiin robottibussilinjan kierrosajan, esimerkkipysäkkien välisen matka-ajan ja asemalta työpaikalle kuluvan matka-ajan avulla. Tarkkaan matka-aikojen vertailuun tarvittaisiin oikea robottibussi liikennöimään alueella, mutta tässä työssä käytettiin henkilöautolla mitattuja matka-aikoja. Polkupyöräilyn ja kävelyn matka-ajat saatiin Googlen kartta-palvelusta.

Esimerkkireiteille tehtiin kuvitteelliset, asiakasystävälliset pysäkit robottibusseille. Bussipysäkkien välit ovat noin 300 metriä. Pysäkillä käytetty esimerkkiaika liitynnän kanssa arvioitiin olevan 40 sekuntia, jolloin aikaa jää hieman myös asiakkaiden opastamiseen.

Nopeusrajoitukset ja ajotapa vaikuttavat robottibussien aikatauluihin. Tässä työssä käytetty Gacha-bussin esimerkinopeus 40 km / h hidastaa operointia normaaliin bussiin verrattuna. Rauhalliseksi kuvatun ajotavan voitaisiin arvioida hidastavan robottibussireitin kierrosaikaa noin 10 %. Arvio perustuu henkilökohtaiseen automaattiajoneuvon operointikokemukseen sekä useiden robottibussien testikyytien havaintoihin.

Reittien matka-ajat ilman pysäkkejä käytiin mittaamassa henkilöautolla noudattaen Gacha-bussin maksimioperointinopeutta. Esimerkkireittien kierrosajat ilman pysäkkejä ovat seuraavat:

- reitin 1 matka-aika robottibussilla on noin 6 minuuttia
- reitin 2 matka-aika noin 11 minuuttia
- reitin 3 matka-aika noin 16 minuuttia.

Kierrosaika pysäkkien kanssa laskettiin kaavalla: *matka-aika * rauhallisen ajotavan vakio + pysäkkien määrä * pysäkkiajan vakio*. Esimerkiksi ensimmäisen reitin kierrosaika sekunneissa laskettiin näin: $360 * 1.1 + 8 * 40 = 396 + 320 = 716$. Näin uudeksi, robottibusseille soveltuvaksi ympyrälinjan kierrosajan kaavaksi tulee:

$$T = so + pt$$

Kaavassa T tarkoittaa ympyrälinjan kierrosaikaa, s tarkoittaa matka-aikaa sekunneissa, o tarkoittaa rauhallisen ajotavan vakiota, p tarkoittaa ympyrälinjan pysäkkien määrää ja t tarkoittaa robottibussin pysäkkiajan vakiota.

Tavallisesti kierrosaika (T) lasketaan kaavalla $T = (2l / v) + t$, jossa l on linjan pituus, v on matkanopeus ja t on päätepysäkkiaikojen summa (Hämeen ammattikorkeakoulu, 2018). Kaavaa sovellettiin robottibusseille soveltuvaan. Rengaslinjoissa, joita käytetään kaikissa esimerkkireiteissä, linjan pituutta ei kerrota kahdella. Matkanopeuden sijasta tässä työssä käytetyssä kaavassa käytettiin maastokäynnin pohjalta saatuja matka-aikoja. Jokaista pysäkkiä kohdeltiin päätepysäkkinä, koska yleisimmät nykytekniikalla toimivat robottibussit noudattavat ennalta opetettua reittiä, jonka takia ne myös pysähtyvät kaikilla pysäkeillä.

Oikeaan tarpeeseen vastaavan vuorovälin määrittämiseen tulisi laskea matkustuskysyntä. Tässä työssä kuitenkin käytetään matka-aikoja mittaamaan kilpailukykyä. Keliolosuhteiden ja muiden asioiden aiheuttamiin viiveiden tasaamiseen on varattu aikaa jokaisen reitin P0-pysäkillä. Vertailuajankohtana toimii liikenteellisesti tavallisen arkipäivän (tiistai – torstai) ruuhkatuntien ulkopuolella oleva aika, jota käytettiin myös robottibussin matka-aikojen mittaamisessa.

7.1.1 Ensimmäinen reitti

Ensimmäisen reitin yhden kierroksen matka-aika olisi robottibussilla näillä esimerkkipysäkeillä ja aika-arviolla on noin 12 minuuttia. P0 – P5 väli kestäisi robottibussilla noin 5,5 minuuttia. Kokonaismatka-aika asemalta esimerkkityöpaikalle (punainen piste kuvassa 24) kestäisi kävelymatkojen kanssa noin 8,5 minuuttia, olettaen että robottibussi lähtisi pysäkiltä saman tien. Asemalta robottibussipysäkillä kuluvan kävelymatka-ajan on oletettu olevan noin 1 minuutti. Näillä nopeuksilla päästäisiin parhaimmillaan 15 minuutin vuoroväleihin yhdellä normaalikokoisella robottibussilla. Asiakasmäärät ja kalustonkoko vaikuttaisivat oikean robottibussilinjan vuoroväleihin. Pysäkkijärjestelyt ja työpaikan sijainti on kuvattu kuvassa 24.



Kuva 24. Ensimmäisen esimerkkireitin pysäkkijärjestelyt ja esimerkkityöpaikan sijainti Vantaan kaupungin kartta-pohjalla (Tarnanen, 2019).

Kierrosaika kävellessä kestäisi 34 minuuttia ja pyörällä 11 minuuttia. Aloituspysäkillä P0 pysäkillä P5 matka-aika kävellessä kestäisi 15 minuuttia ja pyörällä 4 minuuttia. Kokonaismatka-ajat asemalta työpaikalle olisivat kävellessä 17 minuuttia ja pyörällä 6 minuuttia, olettaen että polkupyörän saa parkkeerattua suoraan työpaikan oven eteen. Matka-aikojen mittauksissa on otettu huomioon kävelyaika asemalta polkupyörälle (1min). (Google Maps, 2019)

Yhteenvertaustaulukosta (taulukko 1) voi päätellä, että polkupyörä olisi kilpailukykyinen vaihtoehto robottibussille tällä reitillä. Polkupyörällä kokonaismatka-aika asemalta työpaikalle on 2,5 minuuttia nopeampaa kuin robottibussilla eli noin 29 %. Kävely on hitain kulkumuoto jokaisessa osa-alueessa, 50 % hitaampi kuin robottibussi kokonaismatka-ajassa. Robottibussin matka-aikoihin tulisi todennäköisesti lisäksi vielä pysäkillä kuluva odotusaika, jolloin sen kilpailukyky matka-ajan näkökulmasta heikkenee. Pyörän lukitsemiseen ja työpaikan päässä polkupyörältä työpaikalle kuluva matka-aika ei otettu huomioon.

Taulukko 1. Yhteenvertaus ensimmäisen reitin matka-ajoista.

	Kierrosaika (min)	P0 - P5 (min)	Kokonaismatka-aika (min)
Kävellessä	34	15	17
Polkupyörällä	11	4	6
Robottibussilla	12	5,5	8,5

7.1.2 Toinen reitti

Toisen reitin kierrosaika robottibussilla olisi noin 19 minuuttia. P0 – P6 väli kestäisi pysäkkiaikojen kanssa 14,5 minuuttia. Kokonaismatka-aika Aviapolin asemalta esimerkkityöpaikalle (punainen piste kuvassa 25) kestäisi

17,5 minuuttia. P6-robottibussipysäkiltä työpaikan ovelle kestäisi tällä reitillä kävellen noin 2 minuuttia ja asemalta P0-pysäkille noin 1 minuutti. Yhden normaalikokoisen robottibussin vuoroväli voisi tällä kierrosajalla olla esimerkiksi 25 tai 30 minuuttia. Kaluston määrää lisäämällä vuoroväliä voisi lyhentää. Toisen reitin pysäkkijärjestelyt näkyvät kuvassa 25.



Kuva 25. Toisen esimerkkireitin pysäkkijärjestelyt ja esimerkkityöpaikan sijainti Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

Kävellen koko reitin matka-aika olisi 52 minuuttia ja polkupyörällä 16 minuuttia. P0-pysäkiltä P6-pysäkillä kuluisi kävellen 23 minuuttia ja polkupyörällä 7 minuuttia. Kokonaismatka-ajaksi kävellen jäisi 25 minuuttia ja polkupyörällä 9 minuuttia.

Robottibussi ei ole kilpailukykyinen vaihtoehto polkupyörälle tälle työpaikalle matka-ajan perusteella. Polkupyörällä pääsee asemalta esimerkkityöpaikalle noin 49 % nopeammin kuin robottibussilla. Kävelyn kokonaismatka-aika on tälläkin reitillä näistä kulkumuodoista pisin, 25 minuuttia, joten robottibussilla pääsee työpaikalle 30 % nopeammin. Matka-aikoihin vaikuttaa robottibussin käyttämä kiertosuunta, joten se ei mene suorinta reittiä P6-pysäkillä Tikkurilantien kautta vaan kiertää P5-pysäkin kautta. Toisen reitin matka-ajat näkyvät taulukosta 2.

Taulukko 2. Yhteenveto toisen reitin matka-ajoista.

	Kierrosaika (min)	P0 - P6 (min)	Kokonaismatka-aika (min)
Kävellen	52	23	25
Polkupyörällä	16	7	9
Robottibussilla	19	14,5	17,5

7.1.3 Kolmas reitti

Kolmannen reitin kierrosajaksi robottibussilla muodostuisi noin 30 minuuttia. Aloituspysäkiltä P0 matka-aika pysäkillä P11 kestäisi 15 minuuttia pysähdysten kanssa. Kokonaismatka-aika tällä reitillä asemalta työpaikalle

olisi 18 minuuttia. Tähän reittiin tarvittaisiin todennäköisesti useampi robottibussi operoimaan, jotta palvelutaso saataisiin pidettyä hyvällä tasolla. Vuoroväli olisi minimissään 35 minuuttia yhdellä robottibussilla. Kahdella robottibussilla onnistuisi tasavälinen vuoroväli, 20 minuuttia. Kolmannen reitin pysäkkijärjestelyt näkyvät kuvassa 26.



Kuva 26. Kolmannen reitin pysäkkijärjestelyt ja esimerkkityöpaikan sijainti Vantaan kaupungin karttapohjalla (Tarnanen, 2019).

Reitin kierrosaika kävellen olisi 1 tunti ja 28 minuuttia ja polkupyörällä 27 minuuttia. P0 – P11 matka kestäisi kävellen 40 minuuttia, kun taas polkupyörällä 11 minuuttia. Kokonaismatka-aika asemalta esimerkkityöpaikalle olisi kävellen 42 minuuttia ja polkupyörällä 13 minuuttia.

Yhteenvertotaulukosta (taulukko 3) huomaa, että robottibussi häviää tällä reitillä polkupyörälle kokonaismatka-ajassa noin 28 %. Kävely on selkeästi hitain kulkumuoto ja sillä matka työpaikalle kävellen kestää noin 57 % pidempään kuin robottibussilla. Robottibussi kiertää reitin lenkin myötäpäivään, joten matka-aika pitenee hieman.

Taulukko 3. Yhteenvedo kolmannen reitin matka-ajoista.

	Kierrosaika (min)	P0 - P11 (min)	Kokonaismatka-aika (min)
Kävellen	88	40	42
Polkupyörällä	27	11	13
Robottibussilla	30	15	18

7.2 Lisäarvo matkustajille

Matkustajan näkökulmasta robottibussit ovat kilpailukykyinen vaihtoehto, kun ne alkavat saavuttamaan nopeuden ja kapasiteetin osalta perinteisen bussijärjestelmän ominaisuudet. Turvallisuuden tunteen tulisi säilyä myös autonomisissa tai etäohjatuissa robottibusseissa. Tähän tunteeseen liittyy muun muassa yleinen turvallisuuden tunne, huonommin liikkuvien huomiointi liikkeelle lähtiessä ja tuki häiriötilanteissa. (HSL, haastattelu 2019)

Robottibussit eivät itsessään tuo lisäarvoa matkustajille. Matkustajien lisäarvo syntyy pääosin palveluun liittyvistä ominaisuuksista, kuten vuorovälistä, luotettavuudesta, palveluajasta ja matka-ajasta, eikä niinkään kaluston teknisistä ominaisuuksista. (HSL, haastattelu 2019)

Nykyisessä järjestelmässä kuljettajakustannukset muodostavat ison osan kokonaiskustannuksista. Autonomisten robottibussien myötä kuljettajakustannuksista pitäisi saada säästöjä, jolloin voitaisiin tarjota tiheämpiä vuorovälejä ja laajentaa palveluaikaa, jota kautta matkustajille voisi syntyä lisäarvoa. (HSL, haastattelu 2019)

Tulevaisuudessa autonomiset robottibussit voisivat tuoda joukkoliikenteeseen lisätuloja uuden liikkumismuodon myötä ja parantaa palvelutasoa heikosti liikennöidyillä alueilla, jolloin joukkoliikenteen kilpailukyky parantuisi kokonaisuudessaan.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Nykytekniikalla toimivan robottibussin operointia on mahdollista helpottaa liikennesuunnittelun ratkaisuilla. Erilaiset liittymätyypit tuottavat erilaisia ongelmia robottibusseille ja ne voidaan järjestää vaikeusjärjestykseen. Liikennevalo-ohjattu liittymä koetaan tällä hetkellä haasteellisimmaksi vaihtoehdoksi, kun taas kiertoliittymä helpoimmaksi vaihtoehdoksi. Robottibusseille soveltuvassa ympäristössä ei olisi tarvetta kaistanvaihdolle, joissa täytyy väistää muuta liikennettä, koska ne ovat robottibusseille haasteellisia liikennetilanteita.

Optimaalisen ympäristön liikennevalot olisivat älykkäitä, sensoreilla varustettuja opastimia ja niissä olisi toimivat liikennevaloetuedet. Robottibussi voisi tämänkaltaisessa ympäristössä saada liikennevalon opastinväritiedon suoraan sensorista optisen tunnistamisen tueksi. Tulevaisuuden automatisoidussa ympäristössä liikennevaloille ei olisi tarvetta ollenkaan, kun ihminen poistetaan yhtälöstä kokonaan. Ruuhkaiset suojatiet olisivat valo-ohjattuja.

Kaistanleveydet olisivat pääkadunmitoituksella tehtyjä, leveähköjä kais-toja, joissa ei tarvitse väistää vastaantulevaa liikennettä. Robottibussit kulkevat jo nyt kohtuullisen tarkasti kaista-alueellansa, mutta turvallisuuden takaamiseksi leveä kaista on hyvä vaihtoehto. Kadunvarsipysäköintiä vältettäisiin operointialueella sen tuottamien katvealueiden takia. Tulee kuitenkin huomioida, että ihmiskuljettajalla on saman kaltaisia ongelmakoh-tia kuin robottibussillakin, kuten edellä mainitut katvealueet. Alueen bus-sipysäkit olisivat syvennettyjä, ja niissä olisi tilan varaus automaattiliiken-teelle.

Hyvän GNSS-signaalin takaamiseksi operointialueella ei olisi lähellä ajoväylää olevia korkeita rakennuksia, eikä tunneleita, jotka vaikuttavat signaalin vastaanottamiseen. Kiintopisteitä piirrepohjaiset järjestelmät kuitenkin tarvitsevat, joten rakennettu ympäristö on hyvää operointialuetta. Korkeistakaan rakennuksista ei synny haittaa, jos ne eivät ole liian lähellä ajoväylää.

Liikenneinfrastruktuuri olisi hyvällä operointialueella suunniteltu 40 km / h nopeustasoa varten, joka on esimerkiksi Gacha-robottibussin maksimi operointinopeus. Muu liikenne ei tällöin hidastuisi ja ylimääräisiä ohitustilanteita ei syntyisi.

Digitaalinen liikenneinfrastruktuuri olisi kehittynyttä ja ajan tasalla, jotta robottibussien valmistajat voisivat luottavaisesti käyttää sen tietoja. Esimerkiksi liikennemerkit, liikennevalot, työmaa-alueet ja katualueen kunto-tieto olisivat kaikkien käytössä avoimen datan muodossa. Kaikkien liikennevalojen opastinvärit olisivat saatavilla reaaliajassa.

Aviopoliksen suuralueen tarkastelualue soveltuu robottibussiliikenteen operointia varten infrastruktuurin näkökulmasta kohtalaisesti. Robottibussi hidastaisi muuta liikennettä nykyisillä nopeuksillansa ja aiheuttaisi mahdollisesti ohitustilanteita. Liittymät ovat hallittavissa stop&go -toiminnolla, joten operaattori joutuu puuttumaan välillä ajoneuvon toimintoihin. Kaistan leveydet ovat hyvät moottoriajoneuvoille tarkoitetuilla osuuksilla ja asiakaspotentiaalia on tarpeeksi. Pyörätietä käytettäessä tarvittaisiin mahdollisesti levennys tai rajausta toimenpiteitä, tai molempia. Tikkurilantiellä ei ole tarpeeksi kiintopisteitä, johon piirrepohjainen lokalisointi perustuu. GNSS häiriöntekijöitä ei infrastruktuurin puolesta alueella ole. Pysäkkijärjestelyt vaatisivat sujuvan operoinnin takaamiseksi syvennettyjä bussipysäkkejä.

Matka-aikavertailusta korostuu kävelyn heikkous kulkumuotona last mile -tyyppisessä liikenteessä matka-aikojen näkökulmasta, etenkin tämän alueen pidemmällä reiteillä. Polkupyörän ja robottibussin matka-ajat ovat kohtuullisen lähellä toisiansa, joten robottibussia voisi pitää osalla reiteistä kilpailukykyisenä vaihtoehtona. Pysäkkijärjestelyillä on suuri merkitys robottibussin matka-aikaan. Pysäkkien sijainteja optimoimalla tai harventamalla robottibussista voisi saada matka-ajan näkökulmasta kilpailukykyisemmän vaihtoehdon.

Todelliset pysäkkiajat voivat olla matka-aikavertailussa käytettyjä 40 sekuntia lyhyempiä asiakasmäärien ollessa pienempiä. Pysäkeillä ja robottibussin sisällä voisi myös olla nappi pysähtymispyyntöä varten, jolloin turhia pysäkkipysähdyksiä ei tulisi ja robottibussin kilpailukyky paranisi.

Kilpailukykyä voisi mitata vielä kustannusten ja robottibussin kapasiteetin kannoilta. Asiakkaille robottibussit eivät tuo itsessään lisäarvoa, vaan lisäarvoa tuottavat palveluominaisuudet, kuten matkanopeus, mukavuus ja luotettavuus.

On Demand -tyyppinen liikennöinti voi olla mahdollista tulevaisuudessa, jolloin robottibussin voi kutsua pysäkillä esimerkiksi puhelinsovelluksella. Robottibussilla voisi olla useampi reittivaihtoehto, joita se käyttäisi asiakastarpeen mukaisesti.

Tutkimuksia automaattiliikenteestä kaivataan lisää useammastakin näkökulmasta. Aviapoliksen alueen tarkastelu jää tämän infrastruktuuriin painottuvan tutkimuksen pohjalta vajaaksi liikennemäärien ja hyväksyttävyyden näkökulmista, jotka kaipaavat lisäselvityksiä. Robottibussien yleistyessä voisi operointialueelle tehdä robottibussien liikennöinnistä simuloinnin ennen pilottijakson tai liikennöinnin aloittamista. Nykyisten robottibussien ajotyylit eroaa saman kokoisten ajoneuvojen ajotyylisiä jonkun verran rauhallisuutensa vuoksi, joten simulointiohjelmiin voisi myös kehittää robottibussia kuvaavan ajoneuvon. Kilpailukykyyn näkökulmasta voisi tehdä kokonaan oman tutkimuksen, jossa arvioitaisiin tarkkaan robottibussin kilpailukykyä muihin kulkumuotoihin nähden. Infrastruktuuriin näkökulmasta samantyyppiselle tutkimukselle voi olla tarvetta joidenkin vuosien kuluttua, jolloin robottibussien tekniikka on kehittynyt eteenpäin.

LÄHDELUETTELO

3D Laser Mapping. Yksityisyrittäjä. (2019). Haettu 25.3.2019 osoitteesta <https://www.3dlasermapping.com/what-is-lidar-and-how-does-it-work/>

Aviapoliksen internetsivut. (2019). Haettu 8.4.2019 osoitteesta <https://aviapolis.fi/>

Czarnecki, K. (2018). Operational Design Domain for Automated Driving Systems. ResearchGate. Haettu 25.3.2019 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/326543176_Operational_Design_Domain_for_Automated_Driving_Systems_-_Taxonomy_of_Basic_Terms

Elmenreich, W. (2002). An Introduction to Sensor Fusion. Researchgate. Haettu 26.3.2019 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/267771481_An_Introduction_to_Sensor_Fusion

Euroopan komissio. (2016). CityMobil2 Summary. Haettu 2.4.2019 osoitteesta <https://cordis.europa.eu/project/rcn/105617/reporting/en>

European Global Navigation Satellite Systems Agency. (2017). Haettu 26.3.2019 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>

FABULOS. (2018). Pre-Commercial Procurement. Haettu 2.4.2019 osoitteesta <https://fabulos.eu/fabulos-precommercial-procurement/>

FLOU Oy. (2019). Aviapoliksen alueen liikkumistapatutkimus. Vantaa. Vantaan kaupunki. Vantaan kaupungin intranet. Haettu 18.3.2019 Vantaan intranetistä.

Google Maps. Kävelyopas. (2019). haettu 10.4.2019 osoitteesta <https://www.google.fi/maps>

Helsingin Sanomat. (2015). Laista puuttuva sana voi tehdä Suomesta robottiautoilun edelläkävijän. Helsingin Sanomat 9.7.2015. Haettu 19.3.2019 osoitteesta <https://www.hs.fi/autot/art-2000002837229.html>

HSL. (2018). Haettu 2.4.2019 osoitteesta <https://www.hsl.fi/uutiset/2018/robottibussilinja-94r-kaynnistyy-kivikossa-15157>

HSL. (2019). Pohjakartta. Haettu 10.4.2019 osoitteesta
<https://reittiopas.hsl.fi/pysakit/HSL:4520501>

Huhta, R. (2017). Automaattisten pikkubussien hyväksyttävyyys ja kustannusrakenne osana joukkoliikennettä. Tampere. Diplomityö. Rakennustekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Haettu 19.3.2019 osoitteesta <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tyy-201703131163>

Hämeen ammattikorkeakoulu . (2018). Liikennejärjestelmien suunnittelu. Riihimäki. Haettu 2.5.2019 Hämeen ammattikorkeakoulun Moodle-järjestelmästä

Ismailogullari, A. (2018). Robottibussipilottien kaupallistaminen. Helsinki. Opinnäytetyö. Auto- ja kuljetustekniikka. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Haettu 18.3.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201803093178>

Khanh Tran, G. (2017). ResearchGate. Haettu 25.3.2019 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/HD-map-measured-by-LiDAR-as-a-high-resolution-point-cloud-60_fig5_316505446

Kocić, J.;Jovičić, N.;& Drndarević, V. (2018). Sensors and Sensor Fusion in Autonomous. ResearchGate. Haettu 26.3.2019 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/329153240_Sensors_and_Sensor_Fusion_in_Autonomous_Vehicles

KPMG International. (2019). Autonomous Vehicles Readiness Index. KPMG. Haettu 19.3.2019 osoitteesta <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2019/02/2019-autonomous-vehicles-readiness-index.html>

Leonard, J.;& Durrant-Whyte, H. (1990). Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation. Haettu 27.3.2019 osoitteesta https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=oQ_aBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=sonar&ots=fF_51e-5wO&sig=uLlwzjFtwwtOvvQ2Y0jke3kjqls&redir_esc=y#v=onepage&q=sonar&f=false

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2018). Tieliikennelaki uudistuu. Tiedote. Haettu 20.3. osoitteesta <https://www.lvm.fi/-/tieliikennelaki-uudistuu-981352>

Liljamo, T.;Liimatainen, H.;Pöllänen, M.;Tiikkaja, H.;Utriainen, R.;& Viri, R. (2018). Automaattiautojen vaikutukset liikkumistottumuksiin. Helsinki. Trafan tutkimuksia 1/2018. Trafi; Liikennevirasto. Haettu 19.3.2019 osoitteesta <https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1514986269/b5ae0319297711c948bcd b784cab7555/28956->

Trafi_01_2018_Automaattiautojen_vaikutukset_liikkumistottumuksiin.pdf

Maanmittauslaitoksen pohjakartta. (2019). karttapaikka. Haettu 20.4.2019 osoitteesta
<https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/>

Maastokäynti (2018). Helsinki, Kivikko. Otto Tarnanen.

Maastokäynti (2019). Vantaa, Aviapolis. Otto Tarnanen.

Mitsubishi. (2017). Sonar System. Haettu 27.3.2019 osoitteesta
https://www.mitsubishielectric.co.jp/automotive/tms2017/english/xauto/pdf/sonar_system.pdf

Niemi, M. (2015). Nykyaikainen Itämeren alueen pintataistelualuksen valvontatutka. Kandidaatin tutkielma. 82. merikadettikurssi. Maanpuolustuskorkeakoulu. Haettu 25.3.2019 osoitteesta
http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/118721/Niemi_MT.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Nissin, O. (2019). Luento Älyliikenteen sovellukset.. Hämeen ammattikorkeakoulu. Riihimäki.
 NovAtel. (ei pvm). Haettu 26.3.2019 osoitteesta
<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/real-time-kinematic-rtk/>

Pihlström, T. (2013). Langaton inertiamittausyksikkö. Diplomityö. Sähkötekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Haettu 26.3.2019 osoitteesta <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201406061266>

Pikkarainen, M. (2017). Robottibussit - Espoon Otaniemen kokeilujakso. Riihimäki. Opinnäytetyö. Liikenneala. Hämeen ammattikorkeakoulu. Haettu 18.3.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201704054209>

Salonen, A.;& Haavisto, N. (2019). MDPI. Haettu 27.3.2019 osoitteesta
<https://artosalonen.com/julkaisut/>

Sensible 4. (3 2019). Solutions: Gacha. Haettu 27.3.2019 osoitteesta
<https://www.sensible4.fi/gacha/>

Sipilän hallitus. Hallituksen esitys eduskunnalle tieliikennelaiksi ja eräiksi siihen liittyviksi laeiksi. (2017). Haettu 20.3. osoitteesta
https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Documents/HE_180+2017.pdf

Society of Automotive Engineers. (2018). SAE International. Haettu 20.3.2019 osoitteesta <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>

SOHJOA artikkelikokoelma. (2018). Metropolian ammattikorkeakoulu. Haettu 2.4.2019 osoitteesta https://www.metropolia.fi/fileadmin/user_upload/TK/Julkaisut/pdf/2018_nissin_aman_sohjoa_erillisjulkaisu.pdf

Sohjoa Baltic. (2018). Haettu 2.4.2019 osoitteesta <http://www.sohjoabaltic.eu/fi/#yhteystiedot>

Suursalmi, R. (2018). Automaattiajamiseen varautuminen valtion tieverkolla. Riihimäki. Ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyö. Liikenneala. Hämeen ammattikorkeakoulu. Haettu 18.3.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018112718625>

Tengvall, R. (2018). Robottiauto katuliikenteen vuorovaikutuksessa. Helsinki. Pro gradu -tutkielma. Sosiologia. Helsingin yliopisto. Haettu 18.3.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201807022910>

Tesla. (2019). Ajamisen tulevaisuus: Tesla. Haettu 27.3.2019 osoitteesta https://www.tesla.com/fi_FI/autopilot?redirect=no

The Verge. (2019). No, Elon, the Navigate on Autopilot feature is not 'full self-driving'. Haettu 28.3.2019 osoitteesta <https://www.theverge.com/2019/1/30/18204427/tesla-autopilot-elon-musk-full-self-driving-confusion>

Tieliikennelaki. (729/2018 § 2). Haettu 20.3.2019 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180729>

Tikkurilan ratikka. (2019). Vantaan ratikka. haettu 14.4.2019 osoitteesta https://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaawwwstructure/143846_vantaanratikka-web-27022019.pdf

Tuominen, A. (2015). HSL uutiset. Haettu 2.4.2019 osoitteesta <https://www.hsl.fi/uutiset/2015/kuskiton-bussi-kuljettaa-vieraat-vantaan-asuntomessuille-6515>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2017). AIKO-hankelomake. Haettu 5.4.2019 osoitteesta https://www.uudenmaanliitto.fi/files/20779/UUD15-hankelomake_aIGO_-_Asemanseutujen_joukkoliikenteen_kehittaminen_ymparivuotisella_automatiolla.pdf

Vantaan kaupungin karttapohja. (n.d.). Haettu 10.4.2019 osoitteesta <https://kartta.vantaa.fi/>

Vantaan kaupunki. (2015). Citymobil2 Summary. Haettu 2.4.2019 osoitteesta https://www.vantaa.fi/hallinto_ja_talous/tyo_ja_elinkeinot/elinkeinoketjuttaminen/citymobil2

Vantaan kaupunki. (2017). Aviapoliksen kasvuskenaariot. Vantaa. Haettu Vantaan kaupungin sisäisestä tietokannasta 8.4.2019

Vantaan Sanomat. (1 2019). Vantaan väkiluku paisuu nyt hurjasti. Vantaa. Haettu 8.4.2019 osoitteesta <https://www.vantaansanomat.fi/artikkeli/741326-vantaan-vakiluku-paisuu-nyt-hurjasti-espookin-teki-ennatyksen-helsingin-kovin-kasvu>

Vantaan tietopalveluyksikkö. (2015). Vantaa alueittain 2015. Vantaa: Vantaan kaupunki. Haettu 13.3.2019 osoitteesta https://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaawwwstructure/124282_Vantaa_alueittain_2015.pdf

HAASTATTELUT

Virtanen, Jonne. (3.5.2019). Haastattelija O. Tarnanen.

Nissin, Oscar. (15.4.2019). Haastattelija O. Tarnanen

Kyyhkynen, Aku. (26.3.2019). Haastattelija O. Tarnanen.