

**Henkilöautoliikenteen sujuvuuden määrittäminen paikkatietomenetelmin:
tapaus pääkaupunkiseutu ja kehyskunnat**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön laitos
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Aalto-yliopisto

Espoossa 30. toukokuuta 2016

Tekniikan kandidaatti Samuli Kytö

Valvoja: Professori Kirsi Virrantaus
Ohjaaja: FM Matleena Lindeqvist

Tekijä Samuli Kytö

Työn nimi Henkilöautoliikenteen sujuvuuden määrittäminen paikkatietomenetelmin: tapaus pääkaupunkiseutu ja kehyskunnat

Koulutusohjelma Geomatiikka

Pääaine Geoinformatiikka

Koodi M3002

Työn valvoja Professori Kirsi Virrantaus

Työn ohjaaja(t) Filosofian maisteri Matleena Lindeqvist

Päivämäärä 30.5.2016

Sivumäärä 101

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Pääkaupunkiseudulla on vuosikymmenien ajan tehty matka-aikamittauksia, joiden perusteella arvioidaan ajoneuvoliikennetilanteen kehittymistä pitkällä aikavälillä ja liikenneverkon parantamistarvetta. Matka-aika vaikuttaa laajalti hyvän saavutettavuuden ja kestävän liikennejärjestelmän tavoitteiden toteutumiseen.

Matka-aikaa voidaan määrittää kahden kiintopisteen välillä eri paikannusmenetelmien perusteella. Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä (HSL) on suorittanut mittauksia ns. aktiivisen kelluvan auton menetelmällä, jossa mittausajoneuvoja ajetaan liikennevirran seassa. Lisäksi Suomessa on olemassa ajantasaista matka-aikatietoa rekisterikilpien automaattiseen tunnistukseen perustuen tuottava kamerajärjestelmä. Kumpikaan menetelmistä ei aiempien selvitysten perusteella ole riittävä tietotarpeisiin nähden.

Tämän diplomityön päätavoitteena oli selvittää, onko HSL:n matkanopeustutkimusta varten syntynyt yleistyneiden paikannuslaitteiden myötä aiempaa parempaa tapaa tai laadukasta valmista tietoaaineistoa matka-aikatiedosta johdettavan keskimääräisen matkanopeuden määrittämiseen.

Työn kirjallisuusosiossa perehdytään paikkatieto- ja paikannusmenetelmiin sekä liikenteen sujuvuuden käsitteisiin. Ihmisten liikkeiden seurannan vuoksi oleellisia yksityisyydensuojakysymyksiä käsitellään seuraavaksi. Lisäksi selvitetään, mistä tekijöistä matkanopeustiedon laatu riippuu sekä miten liikenteen matka-aikaa voidaan määrittää automaattisesti.

Kokeellisessa osiossa havaitaan, että markkinoille on syntynyt valmiita tietoaaineistoja. Ajoneuvonavigaattorien liikkeisiin perustuva TomTom:n kaupallinen paikkatietoaaineisto havaitaan laatutarkasteluiden perusteella käyttötarkoitukseen riittävän laadukkaaksi. Aineistolle kehitetään sopivat laskentamenetelmät, joilla määritetään aiempien tutkimusten kanssa vertailukelpoiset keskimääräiset matkanopeudet HSL:n vuoden 2015 matkanopeustutkimusta varten.

Diplomityössä havaittiin, että laadukasta matka-aikatietoa on haasteellista luoda ja löytää etenkin ominaisuuksiltaan sopivana. Lisäksi ongelmana oli luotettavan tietöitä koskevan tiedon löytäminen. Laatutarkastelujen perusteella nyt kehitetty tutkimusmenetelmä arvioitiin kuitenkin aiempaa laadukkaammaksi, vaikkei liikennevaloja sisältävien linkkien teosien tulosten oikeellisuutta voitu tällä erää täysin todentaa.

Avainsanat Liikenne, matka-aika, tietoaaineiston laatu, paikkatieto, satelliitipaikannus, matkapuhelinpaikannus

Author Samuli Kytö		
Title of thesis Quantifying car traffic fluency with geospatial methods: Case Helsinki metropolitan area		
Degree programme Degree Programme in Geomatics		
Major Geoinformatics		Code M3002
Thesis supervisor Professori Kirsi Virrantaus		
Thesis advisor(s) Master of Arts Matleena Lindeqvist		
Date 30.5.2016	Number of pages 101	Language Finnish

Abstract

Travel time measurements have been carried out for decades in the Helsinki metropolitan area. The measurements are done in order to assess the long-term development of car traffic fluency and the need of improvements on the road network. Travel time has a profound impact on the goals of accessibility and sustainable transport system.

Average travel times can be produced by using various positioning technologies. Helsinki Region Transport (HRT/HSL) has used the active floating car method, which means using dedicated probe vehicles and drivers. In addition there is a camera system, which produces timely average travel time information on some links. Neither of these data collection methods have been interpreted as sufficient in the previous reports about the quality of data.

The main goal of this Master's Thesis was to assess if the spreading positioning devices have resulted in the occurrence of a better method or some real dataset for calculating the average space-man speed of the road sections present in the previous research by HRT.

The literature section of this Thesis has its focus on the geospatial and positioning methods, as well as on the concepts of car traffic fluency. Privacy questions that rise because of the movement tracking of citizens are discussed. In addition, the quality factors of travel time information and the automatic methods for average travel time generation are evaluated.

In the experimental section some available geospatial data concerning average travel time are evaluated. The nagitor-based spatial dataset by TomTom is interpreted as suitable for the purpose of HRT and as quality-wise sufficient. Then the obligatory processing methods are developed.

As the result of the work, comparable space-means are generated for the research of HRT. The complexity of generating high-quality travel time information, as well as the scarcity of such data, were clearly noticed during the making of this Master's Thesis. However, the methods seem to produce more reliable results than the previous methods, although the results of the arterial roads could not be fully verified.

Keywords Traffic, travel time, data quality, geospatial data, satellite positioning, mobile positioning

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin toimeksiantona Helsingin seudun liikenne –kuntayhtymälle (HSL), jota kiitän mielenkiintoisesta aiheesta ja työn rahoituksesta. Työn keskiössä olevalla liikenteen sujuvuudella on laajoja yhteiskunnallisia, ympäristöllisiä ja sosiaalisia vaikutuksia. Työn päätavoitteena oli arvioida, onko HSL:n matkanopeustutkimuksessa käytettävien henkilöautoliikenteen matka-aikojen arvioimiseksi syntynyt laadukkaampaa vaihtoehtoa aiemmin käytetylle aktiiviselle kelluvan auton mittausmenetelmälle. Matkanopeustutkimuksessa arvioidaan toistuvasti liikenteen sujuvuuden tilaa ja parantamistarvetta pitkällä aikavälillä. HSL ja aiemmin pääkaupunki-seudun yhteistyövaltuuskunta (YTV) ovat mitanneet matka-aikaa pääkaupunkiseudun samoilla tieosilla vuodesta 1970 lähtien.

Pyrin diplomityössä liikenteen sujuvuustiedon teoreettisen ideaalin selvittämisen lisäksi arvioimaan HSL:n tutkimusalueelta saatavissa olevan matka-aikatiedon laadun vaihtelua empiirisesti, mutta sopivalla kriittisyydellä. Toivon, että työ herättää keskustelua.

Työn valvojana on ollut professori Kirsi Virrantaus. Työn ohjaajana toimi FM Matleena Lindeqvist. Ohjausryhmään kuuluivat lisäksi DI Marko Vihervuori ja VTM Pekka Rätty Helsingin seudun liikenteeltä. Kommentteista, kannustuksesta ja asiantuntemuksesta oli diplomityön tekemisen aikana suurta apua.

Lisäksi haluan kiittää etenkin perhettäni ja rakasta Johannaa – teidän läsnäolo teki tämän työn loppuunsaattamisesta mahdollista. Vanhempiani kiitän siitä, että olen aina saanut toteuttaa itseäni vapaasti. Iloisen opiskeluajan kaikista hetkistä olen kiitollinen opiskelutovereilleni.

Helsingissä 30.5.2016

Samuli Kytö

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

SISÄLLYSLUETTELO

KÄSITTEET

LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	1
	1.1 Tutkimuksen tausta	1
	1.2 Työn tavoite.....	2
	1.3 Työn sisältö	3
2	PAIKKATIETO- JA PAIKANNUSMENETELMÄT	5
	2.1 Paikkatietomenetelmistä.....	5
	2.1.1 Tieverkon kuvaaminen.....	5
	2.1.2 Verkko-optimoinnit.....	6
	2.2 Paikannusmenetelmät.....	7
	2.2.1 Satelliittipaikannus.....	8
	2.2.2 Matkapuhelinpaikannus	10
	2.2.3 Lähipaikannus	12
	2.2.4 Paikannusmenetelmien tarkkuus.....	12
	2.3 Karttasovitus.....	13
	2.4 Kulkumuodon automaattinen tunnistus.....	14
3	LIIKENTEEEN SUJUVUUDEN MÄÄRITYS	17
	3.1 Matka-aika.....	17
	3.2 Liikenteen keskinopeuden kuvaus	19
	3.3 Matka-ajan mittaussuunnitelmat	21
	3.3.1 Matka-aika lähitilapaikannuksen perusteella.....	21
	3.3.2 Matka-aika jatkuvan paikannuksen perusteella	22
	3.4 Datafuusiomenetelmät.....	24
	3.5 Havaintojen lukumäärä ja ajallinen tiheys	25
	3.6 Kaupallinen sujuvuustieto	27
	3.7 Tulkinta matka-aikatiedon keräämisen nykytilanteesta	28
4	UHAT YKSITYISYYDENSUOJALLE	29
5	HSL:n MATKANOPEUSTUTKIMUS	31
	5.1 HSL:n aiemmat matkanopeusmittaukset.....	31
	5.2 Uuden tietolähteen vaatimukset	34
	5.3 Tutkimuksen lähtökohdat	34
6	VALMIIDEN TIETOAINEISTOJEN ARVIOINTI.....	37
	6.1 Tietoaineiston laatu	37
	6.2 Matka-aikaa kuvaavat tietoaineistot.....	38
	6.2.1 Digitraffic.....	39
	6.2.2 Taksi Helsingin taksit	40
	6.2.3 TomTom	41
	6.2.4 Muut tietoaineistot	42
	6.3 Valmiiden aineistojen sopivuus HSL:n käyttötarkoitukseen	43
	6.4 TomTom-testiaineiston laatuarkastelut.....	46
	6.4.1 Vertailu LAM-pisteiden keskinopeuksiin.....	46
	6.4.2 Havaintomäärien vaihtelu	51

6.4.3	Keskihajonnan ja variaatiokertoimen ero	52
6.4.4	Välitulkinta laadusta	52
7	HSL:n MATKANOPEUSTUTKIMUS 2015	55
7.1	Lopullisen tietoaineiston ominaisuudet.....	55
7.2	Aineiston käsittelyprosessi	56
7.2.1	Linkkikohtaisten sujuvuuslukujen laskentatavat	60
7.2.2	Laskentamallien tulosten laatutarkastelu	62
7.2.3	Laskentamallien tulkinta.....	72
7.2.4	Linkkejä vastaavien segmenttien määrittäminen ilman kaupallisia ohjelmistoja.....	73
7.3	Liikenteen sujuvuuskarttojen sisältö	74
7.4	Sujuvuuden muutosten tulkinta.....	77
7.4.1	Aamuliikenne (7.30–8.30)	77
7.4.2	Päiväliikenne (klo 9.30–14.30).....	81
7.4.3	Iltapäiväliikenne (15.30–17.00)	82
7.4.4	Liikenteen sujuvuuden vaihtelu ja kokonaisuusmuutos aiempiin matkanopeustutkimuksiin nähden.....	84
7.4.5	Havaintomäärät suhteessa tilastollisiin minimimääriin	87
7.4.6	Laskennan ja vertailuasetelman epätarkkuudet	90
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	93
9	YHTEENVETO	95
	LÄHDELUETTELO	96
	LIITELUETTELO	

KÄSITTEET

Matka-aika tarkoittaa reaali maailman kahden kiintopisteen välillä liikkumiseen kuluvaa aikaa.

Linkki tarkoittaa mitattavaa tieosaa, jonka keskimääräisestä matka-ajasta ollaan kiinnostuneita. Linkki alkaa ja loppuu kiintopisteeseen. Linkki voi koostua yhdestä tai useasta segmentistä.

Segmentti tarkoittaa tieverkon paikkatietokuvauksessa esiintyvää lyhintä tieverkon yksikköä, jolle määritetään matka-aikaa.

Kiintopiste on tieverkolla sijaitseva kohta, jonka kohdalla matka-ajan mittaaminen aloitetaan tai lopetetaan. Linkki sijaitsee kahden kiintopisteen välillä.

Matkanopeus (engl. space-mean speed) merkitsee ajoneuvon keskimääräistä nopeutta linkillä. Matkanopeus lasketaan linkin pituuden ja matka-ajan osamääränä.

Matkanopeustutkimus tarkoittaa tässä diplomityössä Helsingin seudun liikenteen tutkimusta, jossa määritetään aikasarjana samojen linkkien ajoneuvoliikenteen keskimääräistä sujuvuutta matka-ajan ja matkanopeuden käsitteiden avulla.

Aikaryhmä tarkoittaa tässä diplomityössä tiettyä vuorokauden aikaa, jolle määritetään keskimääräistä matkanopeutta matkanopeustutkimukseen sisältyvien päivämäärien mitatun liikenteen osalta.

Paikannus merkitsee kohteen sijainnin määrittämistä vertausjärjestelmän, kuten koordinaattijärjestelmän, osoitejärjestelmän tai aluejaon, suhteen. Satelliitti-, matkapuhelin- ja lähitilapaikannus sekä näiden yhdistelmät ovat mahdollisia paikannusmenetelmiä.

Aktiivinen kelluva auto tarkoittaa matka-ajan mittauksessa käytettävää paikannettavaa mittaajajoneuvoa, jota kuljettaja ajaa linkeillä ohjeistetusti tutkimusta varten.

Passiivinen kelluva auto on kenen tahansa tien käyttäjän ajoneuvo, jonka paikannustietoja voidaan käyttää keskimääräisen matka-ajan laskennassa.

Tieverkkokuvaus tarkoittaa tässä vektorimuotoista tieverkon paikkatietokuvausta, jossa tieverkko on kuvattu tietyn tietotuotemäärittelyn ja rajauksen mukaisesti.

Reititys tarkoittaa optimaalisimman kulkureitin algoritmista päättelyä verkolla. Optimointikriteerinä voi olla esimerkiksi etäisyys, kustannus tai matka-aika.

Karttasovitus (engl. map matching) tarkoittaa liikkuvan kohteen paikannettujen sijaintien algoritmista sovittamista verkkokuvaukseen, jolloin saadaan pääteltyä todennäköisin kulkureitti.

LYHENTEET

FHWA	Federal Highway Administration
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Globalnaja navigatsioonaja sputnikovaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HLJ	Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelma
HRT	Helsinki Region Transport eli HSL
HSL	Helsingin seudun liikenne
KSV	Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto
YTV	Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta
TTI	Travel Time Index eli matka-aikaindeksi

1 JOHDANTO

Tämä diplomityö tehtiin Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymän (HSL) toimeksiantona. HSL vastaa lakisääteisesti Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelman laatimisesta ja jäsenkuntiansa joukkoliikenteen suunnittelusta. Kuntayhtymän jäsen-kuntia ovat Helsinki, Espoo, Vantaa, Kauniainen, Kerava, Kirkkonummi ja Sipoo. (HSL 2012a). HSL:n liikennejärjestelmäsuunnitelmaan (HLJ) kuuluvat jäsenkuntien lisäksi kunnat Järvenpää, Nurmijärvi, Tuusula, Hyvinkää, Mäntsälä, Vihti ja Pornainen (HSL 2015).

1.1 Tutkimuksen tausta

Matka-aikamittauksilla saadaan tietoa liikenteen sujuvuudesta ja voidaan arvioida liikenneverkon parantamistarpeita. Liikenteen sujuvuudella on laajoja yhteiskunnallisia ja sosiaalisia vaikutuksia. Vaikutukset kohdistuvat muun muassa ihmisten ajankäyttöön ja viihtyisyyteen, liikenteen päästöihin, maankäyttöön, liikkumismahdollisuuksien tasa-arvoon, yhteiskunnan toimivuuteen sekä kansantalouteen. Liian alhainen liikenteen sujuvuus vaatii jonkinlaisia sujuvoittamistoimenpiteitä. Liikenteen sujuvuus on vastuullisuuden ohella toinen HLJ 2015:n liikennettä koskeva päätavoite (HSL 2015).

Samoilla teiosilla toistettavilla matka-aikamittauksilla saadaan tietoa liikennetilanteen kehittymisestä pitkällä aikavälillä. Suomessa matka-aikaa mitataan toistuvasti lähinnä pääkaupunkiseudulla. HSL (aiemmin Helsingin seudun Yhteistyövaltuuskunta YTV) on tehnyt matka-aikamittauksia vuodesta 1970 lähtien joka toinen vuosi pääkaupunkiseudun päätieverkolla (YTV 1996). Keskimääräistä matka-aikaa on mitattu ns. aktiivisen kelluvan auton menetelmällä, jossa tutkimukseen kuuluvilla tieverkon osilla ajetaan mittausajoneuvoilla eri vuorokauden aikoina. Edelliset HSL:n mittaukset tehtiin vuoden 2011 syksyllä. YTV:n ja HSL:n ohella matka-aikamittauksia ovat tehneet hieman eri menetelmillä Helsingin Kaupunkisuunnitteluvirasto (KSV) sekä Liikenneviraston teiosasto (Perasto-Bernitz 2010).

Liikenteen sujuvuuden ja sen kehittymisen seurannan lisäksi matka-aikatietoa hyödynnetään tieverkon käyttäjiä informoivassa liikennetiedotuksessa, jonka on havaittu lisäävän turvallisuutta ja parantavan tieverkon palvelutasoa. Suomessa matka-aikatietoa hyödyntävät Liikenneviraston liikennekeskus, media, eri viranomaiset sekä liikennesuunnittelun ammattilaiset. (Tiehallinto 2008). Toisaalta matka-aikatietoa hyödynnetään satelliittipaikannukseen perustuvien navigointilaitteiden dynaamisessa reitin optimoinnissa, jonka avulla tieverkon käyttäjät voivat tehdä onnistuneita reittivalintoja. Matka-aikatietoa on Suomessa hyödynnetty myös tieteellisessä tutkimuksessa, kuten saavutettavuustutkimuksissa.

HSL on käyttänyt matka-aikatietoa liikenteen sujuvuuden muutosten pitkäaikaisessa seurannassa. Sujuvuuden määrittämiseksi on laskettu matka-ajan perusteella keskimääräisiä matkanopeuksia, jotka tarkoittavat ajoneuvojen keskimääräistä nopeutta tietyllä linkillä eli teiosalla. Aiempia HSL:n matka-aikamittauksia sekä kelluvan auton mittauksen laatua ja ominaisuuksia on käsitelty Olga Perasto-Bernitz:n diplomityössä (2010), Joonas Hartosen erikoistyössä (2012) sekä Timo Jaakkolan pro gradu –tutkielmassa (2013). Aiemmin käytetyssä aktiivisen kelluvan auton mittauksessa on havaittu ongelmia kustannusten vuoksi vähäisiksi jäävissä näytemäärissä (Perasto-Bernitz 2010). Tämän vuoksi uudenlaisten informaatiolähteiden arviointia pidettiin nyt tarpeellisena.

1.2 Työn tavoite

Tämän diplomityön päätavoitteena oli arvioida, onko HSL:n matka-aikatiedon keräämisessä aiemmin käytetylle kelluvan auton mittausmenetelmälle syntynyt yleistysten paikannuslaitteiden myötä parempia vaihtoehtoja. Toisena päätavoitteena pyrittiin löytämään laadukas matka-aikaa kuvaava tietoaaineisto, joka sopii HSL:n matkanopeustutkimukseen.

Paikannustoiminnoilla varustettujen mobiililaitteiden myötä ihmisten ohjastamien ajoneuvojen liikkeistä kertyy tänä päivänä informaatiota ennennäkemättömällä ja kiihtyvällä tahdilla. Informaatiosta tuotetaan liikenteen sujuvuutta kuvaavia valmiita tietoaaineistoja, jotka ovat usein kaupallisia. (Patire 2015). Saatavilla olevien matka-aikaa kuvaavien tietoaaineistojen laatua pyrittiin arvioimaan sopivan kriittisesti.

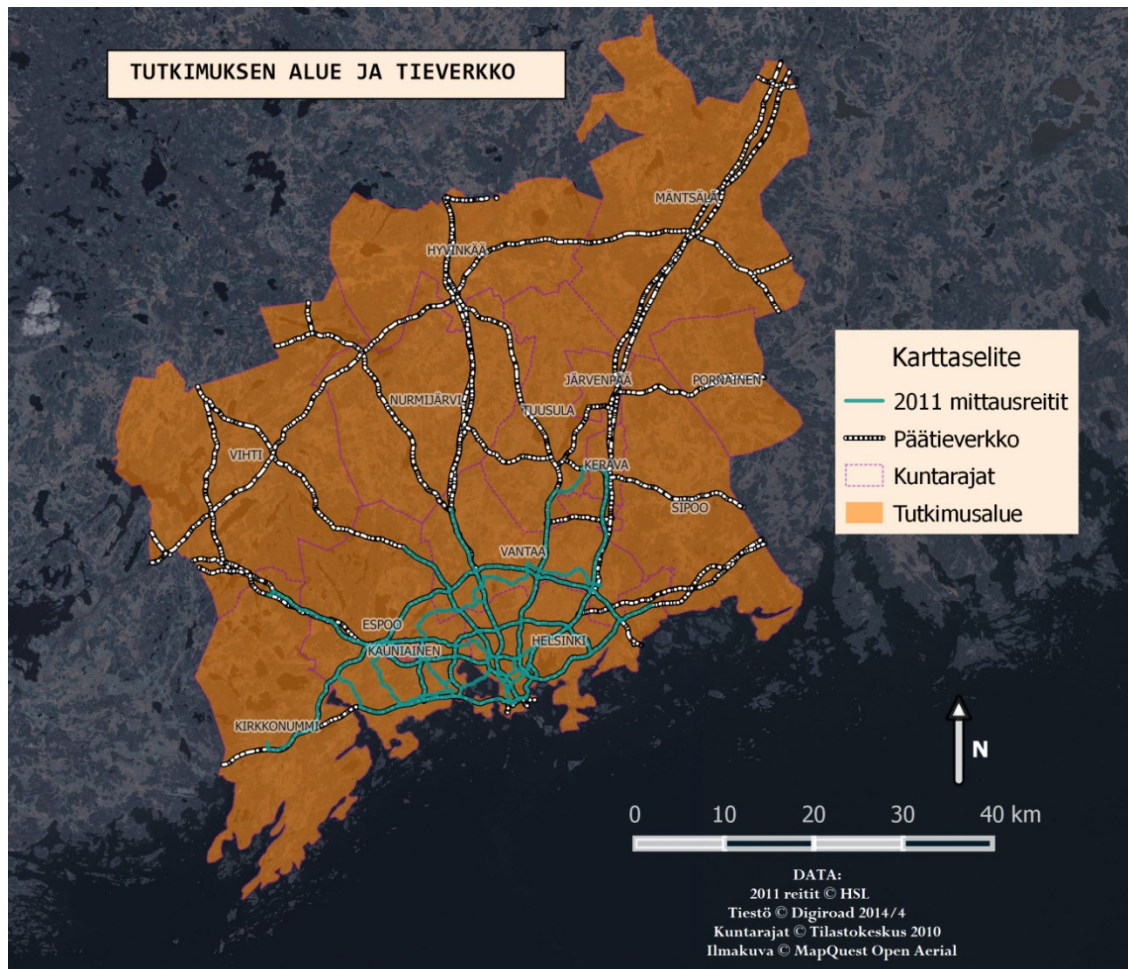
Tutkimuskysymykset liittyvät matka-ajan mittausmenetelmiin, tiedon laatuun ja saatavilla olevien tietoaaineistojen ominaisuuksiin:

1. Minkälaisia matka-ajan mittaukseen sopivia menetelmiä on olemassa?
2. Onko HLJ-alueelta saatavissa sopivaa matka-aikatietoa?
3. Mistä tekijöistä matka-aika- ja matkanopeustiedon laatu riippuu?
4. Kuinka luotettavasti matkanopeuksia saadaan laskettua aiempaan mittausmenetelmään verrattuna?

Tärkeänä lisätavoitteena oli uudistaa tutkimusmenetelmää hyödyntämään uutta tietolähdettä, mikäli sellainen todettaisiin laadukkaaksi. Uudistetun tutkimusmenetelmän tärkeimpiä tavoitteita olivat etenkin aiempaa parempi tilastollinen luotettavuus, vertailukelpoisuus aiempien tulosten kanssa, aiempaa parempi alueellinen kattavuus ja alhaisemmat kustannukset sekä menetelmän toistettavuus. Vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi haluttiin mitata matka-aikaa samoilla linkeillä samaan aikaan vuodesta.

Toistettavuuden kannalta tärkeänä tekijänä pidettiin samanlaisen tietoaaineiston saatavuutta myös tulevaisuudessa. Menetelmän toistettavuus riippuu pitkälti kehitetyn käsittelyprosessin laadusta, ymmärrettävyydestä ja dokumentoinnista.

Tutkimusaluetta haluttiin laajentaa kattamaan 14 kuntaa, jotka ovat osa myös Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmaa. Kuvassa 1 on esitetty HLJ:n mukaan muodostettu tutkimusalue ja tavoitetieverkko suhteessa vuoden 2011 mittausten laajuuteen.



Kuva 1 Tavoitteellinen tutkimusalue ja sen päätieverkko suhteessa HSL:n vuoden 2011 mittausreitteihin.

1.3 Työn sisältö

Tämä diplomityö jakautuu kirjallisuuskatsaukseen ja kokeelliseen osuuteen. Kirjallisuuskatsaukseen kuuluvat luvut 2-4 ja kokeelliseen osuuteen luvut 5-7.

Luvussa 2 käsitellään ensin paikkatieto- ja paikannusmenetelmiä, sillä matka-ajan mittaaminen vaatii sijainnin, kuljetun etäisyyden ja ajan tarkkaa määrittämistä. Luvussa 3 käydään läpi, kuinka liikenteen sujuvuutta ja matka-aikaa voidaan määrittää numeerisesti. Lisäksi tehdään huomioita matka-ajan automaattisista mittausmenetelmistä ja -teknologioista. Luvussa 4 käsitellään ihmisten yksityisyydensuojaa sijainnin osalta. Luvussa 5 käydään läpi HSL:n aiemman matkanopeustutkimuksen periaatteet, sekä tarkennetaan vaatimuksia uuditetulle tutkimusmenetelmälle ja siinä käytettävälle tietolähteelle.

Luvussa 6 arvioidaan löydettyjen matka-aikaa kuvaavien tietoaineistojen laatua aiemmin määriteltuihin vaatimuksiin suhteutettuna. Luvussa 7 kerrotaan matkanopeustutkimuksen toteutus- ja laskentatavoista. Sopivin laskentatapa valitaan lisälaatutarkasteluiden perusteella. Lopuksi tulkitaan laskettuja sujuvuustuloksia visuaalisesti ja kvantitatiivisesti tarkastellen.

Luvussa 8 esitetään johtopäätökset, joiden jälkeen tehdään luvussa 9 yhteenveto.

Potentiaalisia uusia tietolähteitä arvioidaan vertailemalla muun muassa aineistojen keruumenetelmiä, prosessointitapaa, tietorakennetta, laatua sekä sopivuutta käyttötarkoitukseen eli matkanopeuksien laskentaan. Aineistoja laatua ja sopivuutta arvioidaan tiedontuottajalle esitettyjen kysymysten, testikäytön sekä kvantitatiivisten tarkasteluiden keinoin. Matkanopeustutkimukseen ei tarvita reaaliaikaista matka-aikatietoa, joten reaaliaikaisten matka-aikajärjestelmien käsittely rajattiin pois tästä diplomityöstä.

2 PAIKKATIETO- JA PAIKANNUSMENETELMÄT

2.1 Paikkatietomenetelmistä

Paikkatieto on tietoa, joka on linkitetty maantieteelliseen sijaintiin (Dawsen 2011). Sijainti voi olla tyyppiltään ja geometriselta ulottuvuudeltaan paikka, alue tai tila. Paikkatietoaineisto sisältää kuvattavan kohteen sijainnin, geometriatyypin määrittelyn sekä kohdetta kuvaavaa ominaisuustietoa. Todellisen maailman kohteet kuvataan paikkatietoaineistoissa yksinkertaistettuina tietyn määrittelyn mukaisesti.

Paikkatietojärjestelmä (engl. Geographic Information System, GIS) on tietojärjestelmä, jota käytetään paikkatiedon keräämiseen, tallentamiseen, muokkaamiseen, analysointiin ja visuaaliseen esittämiseen. Analysointi käsittää reaali maailman ilmiöiden mallintamista ja laskennallista ratkaisemista lisäinformaation esittämiseksi tai päätöksenteon tueksi. Analysointi voi tarjota lisätietoa esimerkiksi kohteiden sijoittumisesta, alueellisista keskittymistä tai ilmiöiden välisistä piilevistä riippuvuuksista. Analysointi vaatii tyyppillisesti paikkatiedon käsittelyä, geoprocessointia, jolla lähtötieto muokataan kulloistakin laskentavaihetta varten sopivaksi. Tulosten esittäminen visuaalisessa muodossa helpottaa todellisen maailman ilmiöiden alueellisen vaihtelun tulkintaa. Interaktiivinen tai staattinen kartta mahdollistaa monimuuttujaisen tiedon esittämisen muodossa, josta ihminen voi tehdä oivalluksia pelkkää numeerista tietoa helpommin. (Galati 2006).

Matkanopeustutkimuksessa paikkatietomenetelmiä tarvitaan matka-ajan määrittämiseksi kahden tieverkon kiintopisteen eli sijainnin välille. Toisaalta matkanopeutta määritetään etäisyyden ja matka-ajan suureiden avulla. Jotta nämä suureet olisivat tarkkoja, on käytettävien paikkatieto- ja paikannusmenetelmien sekä laskentamenetelmien oltava tarkkoja ja laadukkaita.

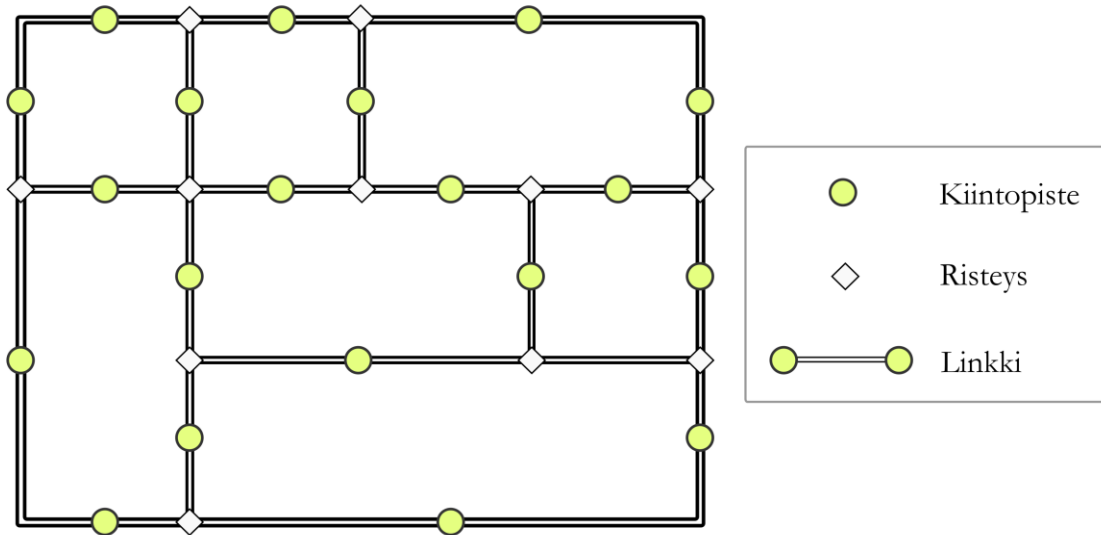
2.1.1 Tieverkon kuvaaminen

Paikkatieto-ohjelmistoissa todellista maailmaa voidaan kuvata rasteri- tai vektoritietomallin avulla. Rasterimallissa kohde kuvataan jatkuvana hilamaisena ruudukkona, jonka jokaisella solulla on omat ominaisuustietonsa. Rasterimalli sopii erityisesti jatkuvien ilmiöiden, joilla ei ole selkeitä rajoja, kuvaamiseen. (Galati 2006). Esimerkkejä tällaisista ilmiöistä ovat maanpinnan korkeus, maanpeite ja väestötiedot. Rasterimallilla voidaan kuvata kohteen muotoa vain suurpiirteisesti ruudukon muotorajoitteesta johtuen. Kohteen kulkusuuntaa voidaan kuvata jokaista ruutua ympäröivällä 8 vaihtoehdolla. (McCloy 2006). Rasterimallin tarkkuus riippuu resoluutiosta eli solun koosta todellisessa maailmassa.

Vektorimalli sopii selvärajaisten ympäristön kohteiden kuvaukseen (Galati 2006, McCloy 2006). Esimerkkejä tällaisista ovat hallinnolliset rajat, tieverkko ja kulkureitit. Vektorimuotoinen tieverkkokuvaus koostuu viivageometrioista sekä niihin liittyvistä ominaisuustiedoista. Ominaisuustietoa voi olla esimerkiksi tieto päällysteen tyypistä, nopeusrajoituksesta, sallitusta ajosuunnasta, liikennemääristä ja ylläpitäjistä.

Liikennetarkasteluissa vektorimalli sopii rasterimallia paremmin muun muassa tarkkoihin optimaalisimman reitin laskentoihin, kun taas rasterimallia voidaan hyödyntää vektorimallia paremmin esimerkiksi sopivan kulkumaaston etsinnässä (McCloy 2006). Tästä lähtien tieverkkokuvauksella tarkoitetaan vektorimallin kuvausta tieverkosta.

List ym. (2014) mukaan tieverkko voidaan jakaa matka-aikojen tarkastelua varten käsitteisiin kiintopiste, risteys ja linkki (Kuva 2). Kiintopiste tarkoittaa tieverkon kohtaa, jonka kohdalla määritetään ajoneuvon ohitus aika. Segmentti on lyhin tieverkon yksikkö, jolle matka-aikaa määritetään. Kaksi kiintopistettä sulkevat sisäänsä linkin eli tieosan, jonka matka-ajasta ollaan lopulta kiinnostuneita. Linkki koostuu yhdestä tai useasta segmentistä. Kiintopisteitä ei matka-aikojen seurantajärjestelmää suunniteltaessa kannattaisi sijoittaa tieverkon risteyskohtiin, sillä kääntyvä liikenne aiheuttaa monikäsitteisyyttä matka-ajan laskennassa. (List ym. 2014).



Kuva 2 Matka-aikaan liittyviä tieverkkokuvauksen käsitteitä.

2.1.2 Verkko-optimoinnit

Verkko-optimoinnit ovat reaali maailmaa kuvaavia verkkokuvauksia koskevia optimointiongelmiä, joissa pyritään esimerkiksi määrittämään paras mahdollinen reitti verkko kohteiden välillä, sijoittamaan jokin toiminto sen käyttäjäkunnan kannalta optimaaliselle paikalle tai selvittämään, onko kohde B saavutettavissa kohteesta A. Tällöin tietokannassa on oltava tieto verkko osien liitoskohdista ja topologisista suhteista toistensa kanssa. Topologisesti muodostettu verkkomalli perustuu graafiteoriaan. Graafi koostuu joukosta solmuja ja joukosta niitä yhteen liittäviä kaaria, jotka kuvaavat verkko mahdollisia kulkuyhteyksiä. Kaarilla on määritetty jokin kustannus, jota pyritään optimoinnissa minimimoimaan. Painoarvona voi olla esimerkiksi etäisyys, matka-aika tai maaston kulkukelpoisuus. (McCloy 2006).

Optimaalisen reitin laskentaa tarvitaan esimerkiksi navigaatiotarkoituksissa. Reititys algoritmit ovat usein heuristisia, rajaten tarkasteltavien ratkaisujen määrää. Heuristiikalla päästään riittävän lähelle parasta ratkaisua, mutta ratkaisun ei voida todistaa olevan paras mahdollinen. (Jaakkola 2013, de Smith ym. 2015). Tunnettuja reitin optimoinnin algoritmeja ovat esimerkiksi Dijkstra, Dantzig ja A*. Eniten käytetty ja tunnetuin lienee Dijkstran (1959) heuristinen algoritmi, joka ratkaisee lyhimmän reitin ongelman graafin yhdestä lähtösolmusta yhteen tai useampaan solmuun. Algoritmi toimii ei-negatiivisesti painotetulla, suunnatulla graafilla. (McCloy 2006. Tuloksena syntyvä optimaalinen reitti lähtösolmusta A kohdesolmuun B on se reitti, jolle kuuluvien kaarien painoarvojen summa on pienin seurattuna solmujen järjestystä.

Karimi ym. (2014) toteavat, että reititys- ja navigointipalvelut ovat muuttumassa staattisesta optimoinnista kohti reaaliaikaista reititys- ja navigointikokemusta. Tällöin ei ratkaista ainoastaan lyhintä reittiä, vaan reitityspalvelu ottaa reaaliajassa huomioon suuren määrän erilaisia muuttujia ja käyttäjän toiveita. Tällaisia muuttujia voivat olla reaaliaikainen sää- ja ruuhkatilanne. Toiveita voivat olla esimerkiksi reitin varrella olevat nähtävyydet tai palvelut. (Karimi ym. 2014).

Tässä diplomityössä lyhimmän reitin optimointia hyödynnetään myöhemmin aineiston käsittelyvaiheessa, jossa linkkigeometriat määritetään topologisesti muodostetulla verkkokuvauksella sijaitsevien kiintopisteparien välille.

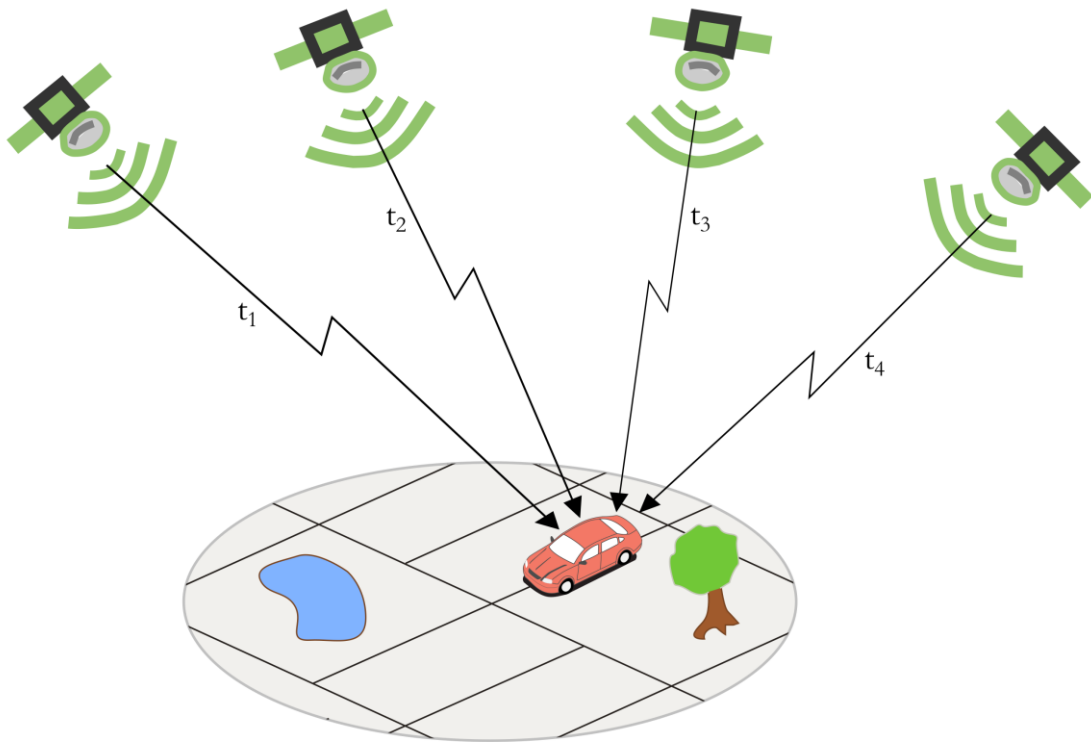
2.2 Paikannusmenetelmät

Paikannus tarkoittaa kohteen sijainnin määrittämistä vertausjärjestelmän suhteen. Sijainti voidaan määrittellä esimerkiksi koordinaattijärjestelmässä, aluejaossa, osoitejärjestelmässä, matkapuhelinverkon solukkojärjestelmässä tai valitun reitin tai tunnettujen kohteiden suhteen. Paikannuksen laatua kuvaa sijaintitarkkuuden suure, joka ilmaisee tietyllä luotettavuudella kohteen paikannetun sijainnin poikkeaman todellisesta sijainnista. (Tekniikan Sanastokeskus 2002).

Henkilöiden ja laitteiden paikannus voidaan jakaa käytettävän paikannusteknologian perusteella kolmeen tyyppiin – satelliittipaikannukseen, verkkopaikannukseen ja sisätilapaikannukseen. (Rainio 2000). Tässä diplomityössä käytetään sisätilapaikannuksen sijasta käsitettä lähipaikannus, sillä samat paikannusteknologiat toimivat myös ulkotiloissa.

2.2.1 Satelliittipaikannus

Satelliittipaikannus perustuu usean satelliitin lähettämien mikroaaltosignaalien kulkuai-kaerojen mittaamiseen. Satelliittien liikeratatietoja hyödyntäen vastaanotin saadaan paikannettua kolmiulotteisesti, kun signaalin kulku-aika paikannuslaitteeseen saadaan määritettyä vähintään neljästä satelliitista (Kuva 3). Satelliittipaikannusjärjestelmä koostuu Maata kiertävistä satelliiteista, laskentakeskuksista ja käyttäjistä vastaanottimiseen. (Rainio 2000).



Kuva 3 Satelliittipaikannuksen peruseriaate.

Satelliittipaikannusjärjestelmän avulla on mahdollista määrittää tietyn kohteen sijainti ja nopeus sekä tarkka aika maapallolla. GPS (Global Positioning System) on järjestelmästä laajalti käytetty nimitys, vaikkakin se tarkoittaa vain amerikkalaista NAVSTAR-satelliittijärjestelmää. GPS-järjestelmän ohella satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat muun muassa venäläinen GLONASS-järjestelmä ja kehitteillä oleva eurooppalainen Galileo. Satelliittipaikannusjärjestelmien kokonaisuutta kutsutaan nimikkeellä GNSS (Global Navigation Satellite System). (Kaplan ja Hegarty 2006). Tässä työssä käytetään paikannusmenetelmästä jatkossa nimitystä satelliittipaikannus, ellei haluta korostaa tiettyä järjestelmää.

Eri satelliittipaikannusjärjestelmistä on kehitetty keskenään yhteensopivia. Yhteensopivuuden tärkeimpiä kriteereitä ovat järjestelmien signaalirakenteen, geodeettisen koordinaattijärjestelmän ja aikajärjestelmän yhteensopivuus. GPS on nykyään tuplakäyttöjärjestelmä eli sitä käyttävät sekä siviilit että armeija. (Kaplan ja Hegarty 2006).

GNSS-satelliitti lähettää jatkuvasti mikroallosignaalia, joka sisältää kahden tyyppistä tietoa; navigaatioviestin ja saapumisaikatiedon, joka määrittää satelliitin ja vastaanottimen välisen etäisyyden (Schaefer ja Woodyer 2015). Etäisyyttä kutsutaan pseudoetäisyydeksi, johtuen Maassa sijaitsevan vastaanottimen kellon epätarkkuuden aiheuttamasta kellovirheestä.

Koska sijaintiepätarkkuutta aiheuttava vastaanottimen kellovirhe halutaan ratkaista, vaatii kohteen kolmiulotteinen paikannus neljä vastaanottimelle näkyvää satelliittia (Hofmann-Wellenhof ym. 2008). Sijainnin laskennassa aiheuttavat lisäksi virhettä ilmakehän olosuhteet, liikeratavirhe, vastaanotinvirhe ja poikkeavat satelliittigeometriat. Näitä virheitä on korjattava laskennallisesti, jotta päästään lopulliseen sijaintiratkaisuun. (Kaplan ja Hegarty 2006)

GNSS-vastaanottimia on paikannuslaitteiden ohella nykyään myös hyvin monissa matkapuhelimissa. Schaefer ym. (2015) mukaan vuodesta 2010 lähtien valmistetuista matkapuhelimista 63 prosenttia ja kosketusnäytöllisistä 85 prosenttia on GNSS-yhteensopivia (Schaefer ja Woodyer 2015). GSMA Intelligence arvioi älypuhelimia olevan käytössä maailmassa vuonna 2015 noin 3,3 miljardia, joka käsittää noin 44 % maailman väestöstä. Euroopassa arviolta 51 %:lla väestöstä oli matkapuhelin käytössään vuoden 2014 lopussa. (GSMA Intelligence 2015). Suomessa 16-89 -vuotiaista ihmisistä 69 prosentilla oli oma älypuhelin käytössä vuonna 2015 (Tilastokeskus 2015).

Schaefer ja Woodyer (2015) testasivat Applen, Samsungin ja Sonyn matkapuhelimien GPS-paikannuksen absoluuttista ja suhteellista sijaintitarkkuutta. Absoluuttinen sijaintitarkkuus tarkoittaa mitatun arvon poikkeamaa todellisesta sijainnista. Todellisen sijainnin estimaattina käytettiin vertailuarvoa eli tarkempaa paikannustulosta, joka oli saatu differentiaalisella GPS-paikannuksella. Suhteellinen sijaintitarkkuus tarkoittaa yksittäisen kohteen paikannuksen tarkkuutta suhteessa muihin kohteisiin. Absoluuttisen horisontaalisen sijainnin (x, y) keskivirheen havaittiin olevan välillä 2,6 –4,3 m. Vertikaalisen sijainnin (z) keskivirheet olivat suurempia. (Schaefer ja Woodyer 2015).

Satelliittipaikannuksen etuna liikennelaskentojen kannalta on korkea paikannustarkkuus ja teknologian yleisyys. Haittapuolena on ensimmäisen sijainnin löytämisen hitaus sekä huono tarkkuus sisätiloissa, tunneleissa ja esimerkiksi korkeiden rakennusten välissä. Mobiililaitteissa satelliittipaikannusta käytetään usein yhdessä verkkopaikannuksen tai WiFi-verkkojen kanssa paremman tarkkuuden ja paikannuksen jatkuvuuden saavuttamiseksi. (Euroopan komissio 2011).

2.2.2 Matkapuhelinpaikannus

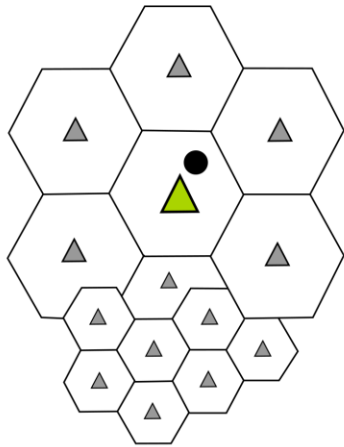
Matkapuhelimen sijainti saadaan selville, vaikkei satelliittipaikannus olisi käytettävissä. Matkapuhelinjärjestelmä perustuu radiotaajuuksilla toimivaan tietoliikenneverkkoon, joka koostuu monesta tukiaseman (engl. base station) sisältävästä solusta ja yhdestä MTSO- asemasta (engl. mobile telephone switching office). Tukiasema koostuu tornista ja tietoliikennelaitteistosta. Tukiaseman ja matkapuhelimien välinen tiedonsiirto tapahtuu radiotaajuuksilla. Tukiaseman ja MTSO-aseman välinen tiedonsiirto onnistuu kiinteää runkoverkkoa hyödyntäen. (Izadpanah 2010).

Tukiasemat kattavat puhelinoperaattorin palvelualueella erikokoisia alueita, riippuen esimerkiksi väestön määrän vaihtelusta, korkeista rakennuksista ja pinnanmuodon vaihteluista (Euroopan komissio 2011). Matkapuhelin on jatkuvasti jonkun tukiaseman solun piirissä, minkä avulla matkapuhelimen sijainti saadaan laskettua karkealla tarkkuustasolla (VTT 2000). Erämaat ja syrjäseudut saattavat kuitenkin luoda poikkeuksia matkapuhelinpaikannuksen jatkuvaan saatavuuteen.

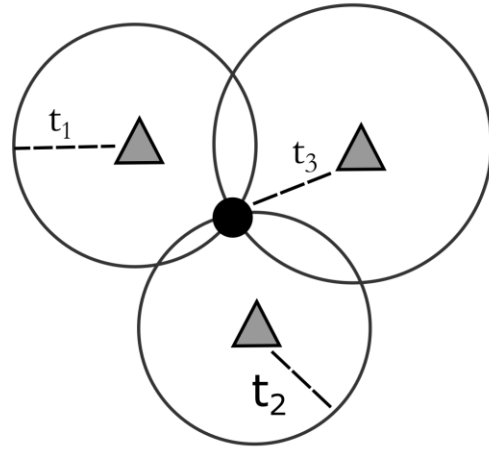
Matkapuhelinpaikannuksessa mahdollisia sijainnin laskentamenetelmiä ovat ainakin (Kuva 4, Izadpanah 2010 mukaillen):

- a) **Solupaikannus.** Matkapuhelinverkon perusominaisuutena matkapuhelimesta tiedetään sen hetkellisesti käyttämä tukiasema. Tukiasemien sijainnit tiedetään. Sijaintitarkkuus riippuu tukiaseman solun koosta, joka riippuu tukiasemien tiheydestä. Sijaintitarkkuus laskee kaupunkialueilta pois päin liikuttaessa.
- b) **Signaalin kulkuaika.** Radioaalto matkapuhelimen ja tukiaseman välillä kulkevat noin valonnopeutta ($299\,792\,358$ m/s), minkä perusteella voidaan laskea matkapuhelimen etäisyys tukiasemasta. Jos signaalin kulkuaika tiedetään 3 tukiasemaan, voidaan puhelimen sijainti määrittää 3 tukiasemaa kiertävän ympyrän leikkauspisteinä. Matkapuhelin voidaan paikantaa samalla periaatteella myös käyttäen laitteen tunnistamaa signaalien vahvuustietoa usean tukiaseman suhteen.
- c) **Signaalin saapumisaikaero.** Kahden tukiaseman ja matkapuhelimen välisen radioaallon kulkuajan erotuskäyrä eli mahdollinen sijainti on tasogeometria muotoon hyperbeli. Sisällyttämällä laskentaan toinen tukiasemapari, saadaan toinen hyperbeli. Matkapuhelin sijaitsee tällöin hyperbelien leikkauspisteessä.
- d) **Signaalin saapumissuunta.** Kun liikkeeltään suoraviivaiseksi oletetun radioaallon tulokulma vähintään kahteen tukiasemaan tiedetään, sijaitsee matkapuhelin signaalien leikkauskohdassa. Menetelmä vaatii suunnattuja tukiaseman antennejä.

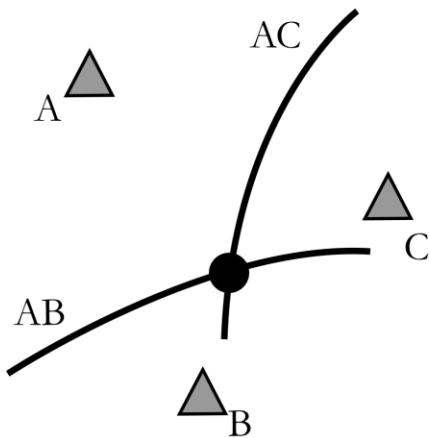
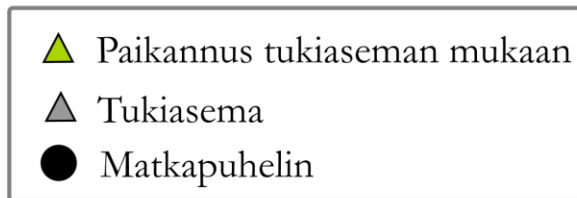
Käyttämällä yhdessä useampia edellä mainituista menetelmistä tarkkuus parantuu (Euroopan komissio 2011).



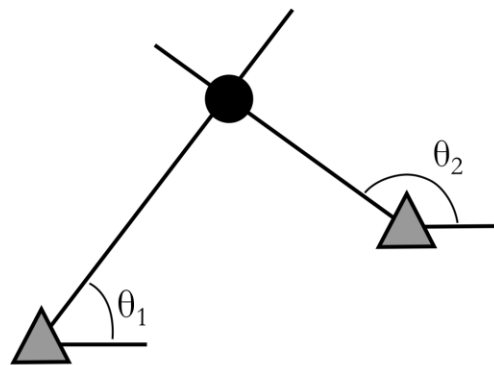
a) Solupaikannus



b) Signaalin kulku-aika



c) Signaalin saapumisaikaero



d) Signaalin saapumisuunta

Kuva 4 Verkkopaikannuksen periaatteet (Izadpanah 2010 mukailleen).

2.2.3 Lähipaikannus

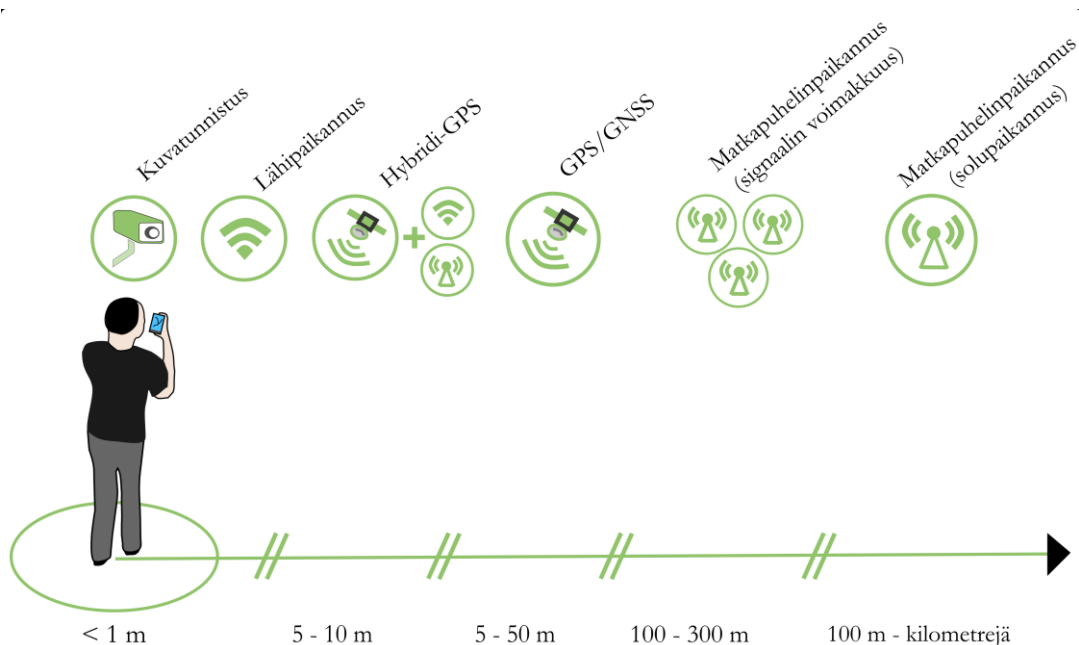
Lähipaikannuksella tarkoitetaan tietyllä rajatulla alueella toimivaa paikannusta, jolla kohteen sijainti voidaan määrittää lyhyen kantaman signaalien välityksellä (Tekniikan Sanastokeskus 2002). Ajoneuvon osalta tämä tarkoittaa käytännössä kiintopisteen ohitushetken tunnistamista.

List ym. (2014) mukaan kohteen läheinen sijainti voidaan tunnistaa automaattisesti esimerkiksi langattomien lähiverkkojen, radiotaajuustunnistuksen tai kuvatunnistuksen avulla. WiFi, radiotaajuuden etätunnistus RFID-tunnisteella, Bluetooth ja rekisterikilven kuvatunnistus ovat esimerkkejä tällaisista ajoneuvon paikannuksessa käytettävistä teknologioista. (List ym. 2014).

Lähipaikannuksen etuna liikennekontekstissa on sijainnin määrittämisen mahdollisuus niillä alueilla, joilla satelliittipaikannuksen tarkkuus on heikkoa paikannussignaalin puuttumisesta tai heijastelusta johtuen – kuten esimerkiksi tunneleissa tai rakennusten välissä (List ym. 2014).

2.2.4 Paikannusmenetelmien tarkkuus

Paikannetuissa sijainneissa on aina sijaintiepätarkkuutta kohteen todelliseen sijaintiin nähden. Paikannusmenetelmillä saavutettavat sijaintitarkkuudet horisontaalisessa tasossa poikkeavat toisistaan (Kuva 5, International Transport Forum 2015 mukailen). Kuvasta huomataan, että etenkin matkapuhelipaikannuksen tarkkuus on alhaista. Tiheään asutuilla kaupunkialueilla tarkkuus voi olla luokkaa 50 metriä, mutta haja-asutusalueilla ennemminkin usean kilometrin luokkaa (Euroopan komissio 2011).



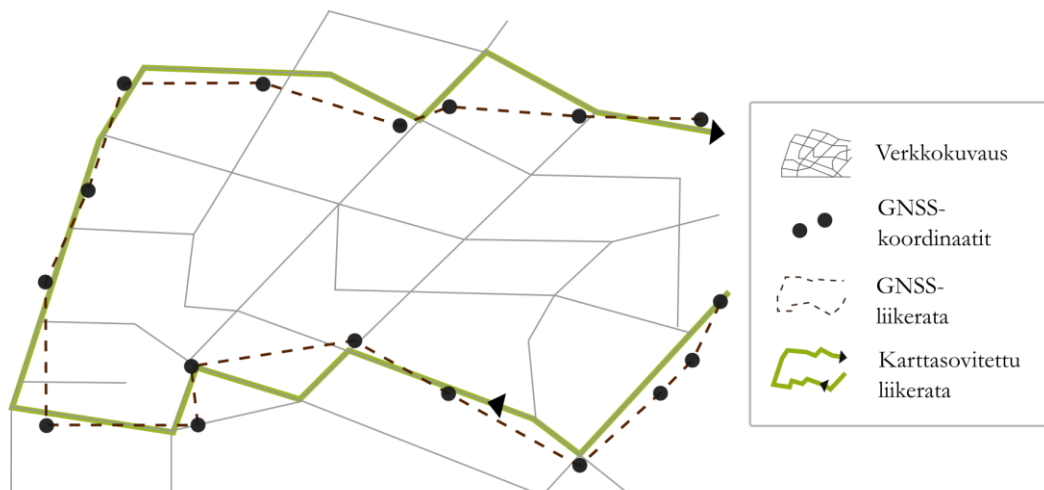
Kuva 5 Eri paikannusmenetelmillä saavutettava sijaintitarkkuus.

Paikannustarkkuutta voidaan parantaa hybridimenetelmillä eli yhdistämällä useamman toisistaan riippumattoman paikannusmenetelmän sijaintihavainnot. Esimerkiksi autonavigaattoreissa yhdistetään yleensä GPS- ja inertiapaikannusmenetelmän tietoja. Inertiapaikannuksessa ajoneuvon uusi sijainti määritetään 3-akselisen kiihtyvyyssanturin, gyroskoopin ja magnetometrin avulla laskettavaan paikan ja nopeuden muutokseen perustuen. Yhdistelyllä hyödynnetään esimerkiksi parantamaan paikannustarkkuutta satelliittiipaikannuksen kannalta ongelmallisilla alueilla, kuten katveisilla ja tunneleilla sisältävillä tieosilla. (Pilli-Sihvola ym. 2011).

2.3 Karttasovitus

Paikannuksen myötä kohteen hetkittäiset koordinaatit tai sijainti vertausjärjestelmässä tunnetaan. Sijaintihavainnot yhdistämällä saatava ulkureitti ei kuitenkaan suoraan vastaa todellista reittiä tai verkkokuvausta. Liikennetarkastelun ja -laskelmien kannalta tämä tarkoittaa sitä, että paikannustiedot täytyy esikäsittää, suodattaa ja sovittaa verkkokuvaukseen. (Lou ym. 2009). Kohteen sijaintihavaintojen aikasarjasta käytetään nimitystä liikerata (engl. trajectory, Dodge ym. 2009).

Karttasovitus (engl. map-matching) tarkoittaa algoritmista päättelyä, jossa sijaintihavaintojen aikasarja sovitetaan verkkokuvaukseen, kuten tieverkkokuvaukseen. Sovituksessa päätellään liikkuvan kohteen todennäköisin liikerata eli kulkureitti verkolla (Kuva 6). Sovitus mahdollistaa esimerkiksi kuljetun etäisyyden ja keskimääräisten nopeuksien laskennan. Mitä harvempia paikannustiedot ovat ajalliselta tiheydeltään, sitä haastavampaa luotettava liikeratapäättely on. Koordinaattien välille voidaan löytää sitä useampia potentiaalisia polkuja, mitä harvempi sijaintitiedon päivitystiheys on. (Lou ym. 2009).



Kuva 6 Karttasovituksen periaate.

Liikennesovelluksiin tarkoitetut karttasovitusmenetelmät voidaan List ym. (2014) mukaan jakaa neljään kategoriaan: geometrisiin, topologisiin, probabilistisiin ja edistyneisiin. Geometriset algoritmit huomioivat ainoastaan geometrian, kun taas topologiset huomioivat myös linkkien yhdistyvyyden esimerkiksi sallitut ajosuunnat ja kääntymismääräykset huomioiden. Probabilistiset algoritmit luovat aluksi linkkejä suodattavan toleranssi-alueen mahdollisten linkkien rajaamiseksi, minkä jälkeen topologiaa käytetään reitille sisältyvien linkkien määrittämiseksi. Edistyneet algoritmit voivat hyödyntää esimerkiksi Kalman-suodatusta, Bayesilaista päättelyä ja sumeaa logiikkaa. (List ym. 2014).

Lou ym. (2009) mukaan verkoston topologia eli tieverkkokuvauksen segmenttien naapurussuhteet on syytä huomioida, sillä todelliset ajoneuvojen liikeradat ovat tieverkolla tyypillisemmin suoria kuin alati mutkittelevia. Nopeustiedon huomioimisesta on hyötyä karttasovituksessa, sillä ajoneuvojen nopeudet muistuttavat tyypillisesti nopeusrajoituksia. Sopiva sovitusten menetelmän tyyppi riippuu etenkin sijaintitiedon päivitystiheydestä. (Lou ym. 2009).

Tieverkkokuvauksen epätarkkuudet ja päivityksen puute voivat johtaa siihen, että oikein paikannetut sijainnitkaan eivät kohdistu tieverkkokuvauselle (Rahmani ja Koutsopoulos 2013). Tällaiset epätarkkuudet kasvattavat karttasovituksessa ja matkanopeuden laskennassa syntyvää virhettä.

2.4 Kulkumuodon automaattinen tunnistus

Kulkumuodon tunnistus on yksi liikkeen tunnistuksen muoto, jossa päätellään ja luokitellaan algoritmillisesti havainnoitavan kohteen kulkumuoto. Tyypillisesti käytettäviä kulkumuotoluokkia ovat jalankulku (kuten kävely, juoksu tai portaissa liikkuminen), ei-moottoroidut kulkumuodot (kuten polkupyörä tai rullaluistelu) ja moottoroidut ajoneuvot (kuten bussi, henkilöauto tai juna). (Hemminki ym. 2013).

Kulkumuodon tunnistus on HSL:n matkanopeustutkimuksen kannalta tärkeä matka-aikatiedon laskennan taustalla vaikuttava operaatio, jos liikkumistietoa on alun perin kerätty henkilöautoliikenteen lisäksi muista kulkumuodoista. Vääränlaiset kulkumuodot tulee tällöin tunnistaa ja suodattaa pois matka-aikatiedon laskennasta.

Dodge ym. (2009) mukaan sijainniltaan dynaamisten kohteiden, kuten ihmisten, eläinten tai ajoneuvojen, liikkumisen luonteet maantieteellisen referenssijärjestelmän (3-ulotteisen koordinaatiston) suhteen ovat jossain määrin samanlaisia, poiketen kuitenkin oleellisesti toisistaan. Karttasovitetusta liikeradasta on mahdollista laskea liikkumista kuvaavia tunnuslukuja, joiden avulla liikkumiskäyttäytymisen eroja voidaan analysoida. Tällaisia tunnuslukuja ovat esimerkiksi nopeus, kiihtyvyys, liikkumisen kesto, kulkusuunta ja kiemurtelevuus. Tunnuslukuja voidaan arvioida absoluuttisesti tai suhteellisesti vertaamalla toisen liikeradan vastaavaan tunnuslukuun. (Dodge ym. 2009).

Dodgen ym. (2009) tekemän kirjallisuuskatsauksen perusteella liikkumismuodon tunnistuksessa on käytetty esimerkiksi sumeaa logiikkaa, Bayes-verkkoja ja päätöspuita (engl decision tree). Näiden menetelmien käsittely sivuutetaan tässä kohtaa. Kaikilla tunnistusmenetelmillä oli kirjoittajien tulkinnan mukaan vaikeuksia kulkumuodon tunnistuksessa, kun liikenne oli ruuhkautunutta. Lisäksi vaikeuksia esiintyi, kun liikerata koostui vain yhdestä kulkumuodosta. (Dodge ym. 2009).

Dodge ym. (2009) esittelevät metodologiaa ja algoritmia, jolla voidaan automaattisesti päätellä kohteen kulkumuoto GPS-paikannuksella kerätyistä sijaintitiedoista. Kulkumuotoja ovat auto, moottoripyörä, polkupyörä ja kävely. Päätely tapahtuu vertaamalla kulkumuodoltaan tuntemattomien kohteiden liikeradoista laskettujen profiilien samankaltaisuutta etukäteen tunnettujen liikkumismuotojen profiileihin. Esitelty algoritmi on siis ohjatusti oppiva, eli sille annetaan aluksi syötteenä oppimismateriaalia, joissa esiintyvät kulkumuodot tunnetaan. Algoritmin toiminta jakautuu neljään vaiheeseen: esikäsitelyyn, globaalien tunnuslukujen laskentaan, lokaalien kohteiden erotteluun sekä eroteltujen liikeratojen luokitteluun.

Lokaalien kohteiden erotteluvaiheessa algoritmi määrittää liikeradoista profiileja eli nopeuden, kiihtyvyyden, liikkeen suoruuden ja kääntymiskulman arvoja ajan funktiona. Profiilin kiemurtelevuus- (engl. sinuosity) ja poikkeamaindeksin (engl. deviation) perusteella liikeradat pilkotaan liikkumistavaltaan homogeenisiksi kynnyksiarvojen perusteella. Liikeratojen luokitteluvaiheessa valitaan pääkomponenttianalyysillä tärkein muuttujajoukko. Tätä seuraa opetusvaihe, jossa tukivektorikone (engl. support vector machine) oppii ja määrittää opetusdatan perusteella luokkarajat. Lopulta algoritmi luokittelee liikeradan pilkotut osat opitun luokittelun mukaisesti. Menetelmällä saatiin luokiteltua oikein yli 90 % pilkotuista osista. (Dodge ym. 2009).

Hemminkin ym. (2013) mukaan nykyisillä GPS-laskentamenetelmillä päästään vain kohtuulliseen tarkkuuteen erilaisten moottoriajoneuvojen erottelussa. Parempaan lopputulokseen päästiin yhdistämällä tietoja kiihtyvyyssensorista, joka tuottaa kiihtyvyystietoa kolmen akselin suhteen verraten vallitsevaan painovoimaan. Feng ym. (2013) mukaan pelkällä kiihtyvyyssensorilla saadaan GPS-paikannusta parempia kulkumuodon tunnistamistuloksia, mikäli GPS-tiedoissa esiintyy katkoksia. Heidänkin mukaan kulkumuodon tunnistaminen onnistuu yksittäistä teknologiaa paremmin fuusioimalla GPS- ja kiihtyvyystietoja.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella kulkumuodon tunnistaminen on mahdollista sekä jatkuvan sijainti- että kiihtyvyystiedon perusteella. Vaikuttaa siltä, että lihasvoimin liikkuvat kohteet ovat luotettavasti eroteltavissa moottoroiduista ajoneuvoista. Moottoroitujen ajoneuvojen tunnistaminen toisistaan on sen sijaan haastavampaa.

3 LIIKENTEEN SUJUVUUDEN MÄÄRITYS

Tässä luvussa esitellään tapoja määrittää liikenteen sujuvuutta käsitteellisesti ja numeerisesti. Sitten käydään läpi periaatteita, mittausmenetelmiä ja teknologioita, joilla ajoneuvo-liikenteen keskimääräistä matka-aikaa voidaan mitata automaattisesti.

Liikenteen sujuvuudella on laajoja vaikutuksia ihmisten ajankäyttöön, viihtyisyyteen, päästöihin, tasa-arvoon, yhteiskunnan toimivuuteen ja taloudelliseen tilanteeseen. Sujuvuutta määritetään kirjallisuudessa tyypillisesti matka-ajan tai sen perusteella laskettavan matkanopeuden käsitteiden avulla. Sujuvuuden käsite liittyy myös saavutettavuuden käsitteeseen, jolla voidaan tarkoittaa esimerkiksi tietyn kohteen saavuttamisen helpoutta tietyllä liikennejärjestelmän kulkumuodolla (Geurs ja van Wee 2004). Saavutettavuudella voidaan myös tarkoittaa kohteiden tai alueiden välillä vallitsevia tyypillisiä matka-aikoja. Saavutettavuuskysymykset ovat olennaisia urbaanien ympäristöjen kannalta – kaupungit eri puolilla maailmaa pyrkivätkin saamaan asukkaidensa arkiliikkumisesta ekologisesti ja sosiaalisesti kestävämpää (Salonen 2014).

Ruuhkat ovat alhaisen liikenteen sujuvuuden ilmenemismuoto. Luttisen (2005) mukaan ”liikenteen ruuhkautumista voidaan selittää muun muassa väestön kasvulla, asutuksen keskittymisellä suuriin kaupunkeihin, yhdyskuntarakenteen hajautumisella, joustamattomilla työajoilla sekä elintason ja autoistumisen kasvulla”. Ruuhkautumisen kuvauksissa esiintyy ilmauksia ”tyrehtyminen”, ”jonoutuminen”, ”ylenmääräinen täynnäolo”. Ruuhkautuminen ilmenee tyypillisesti pysähtyneenä tai pysähtelevänä liikenteenä. (Federal Highway Administration 2005). Seurauksena väylän välittämä liikenne jää pienemmäksi kuin sille pyrkimä liikenne (Luttinen 2005). Ruuhkia voidaan luokitella toistuviksi tai epäsäännöllisiksi. Toistuva ruuhka, kuten aamu- tai iltaruuhka, noudattaa ajallista säännönmukaisuutta. Epäsäännöllinen ruuhka syntyy tavallisesta poikkeavana ajankohtana tai poikkeavalla alueella. (OECD 2007).

3.1 Matka-aika

Matka-aika on laajalti käytetty ja ymmärretty käsite liikenteen sujuvuuden määrittelyssä. Käsite määritellään reaali maailman minkä tahansa kahden kiintopisteen väliseen matkustamiseen kuluvana aikana. (Turner ym. 1998). Tässä diplomityössä matka-ajalla tarkoitetaan kahden tieverkon kiintopisteen väliseen matkustamiseen kuluvaa aikaa henkilöautolla liikkuen.

Ajoneuvon matka-aika muodostuu liikkeelläolosta ja pysähdyksistä. (Federal Highway Administration 1998). Toisaalta matka-aika voidaan jakaa vapaan nopeuden sekä systemaattisen ja satunnaisesti vaihtelevan viivästyksen komponentteihin (Fosgerau ym. 2008). Ylimääräinen matka-aika aiheutuu liikenneolosuhteiden toistuvista tai yllättävistä muutoksista (Carrion ja Levinson 2012). Ajoneuvoliikenteen matka-aikaan vaikuttavia liikenneolosuhteiden muutoksia ovat esimerkiksi liikennemäärän vaihtelut, liikenneonnettomuudet, laitehäiriöt, rakennustyömaat, sääilmiöt, tienpinnan olosuhteet, riittämätön välityskyky sekä muut poikkeamat normaalitilanteeseen nähden (Federal Highway Administration 2005). Tietyn tieosan matka-aika vaihtelee myös ajallisesti noudattaen vallitsevalle vuodensajalle, kuukaudelle, viikolle ja viikonpäivälle tunnusomaisia piirteitä (Izadpanah 2010).

Ruuhkautumisella on kaksi vaikutusta matka-aikaan. Ensinnäkin matka-ajat kasvavat ruuhkautumisen myötä. Ylimääräinen matka-aika aiheuttaa kuntannuksia yhteiskunnalle. Toiseksi, matka-ajat muuttuvat vaihtelevammiksi ja epäluotettavammiksi. Matkustajan täytyy varautua epävarmuuteen, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia matkustajalle ja yhteiskunnalle menetetyin ajan muodossa. (Fosgerau ym. 2008). Matka-aikaa voidaan pitää luotettavana, jos matkustajan kokema matka-aika vastaa hänen oletettamaansa matka-aikaa riittävällä tarkkuudella. (List ym. 2014). Mainittakoon, että matka-ajan luotettavuus ei estä matka-ajan vaihtelua eri aikoina.

Transportation Research Board –järjestö (2013) ja Koskinen ym. (2014) esittävät raportissaan suosituksia matka-ajan luotettavuutta kuvaaviksi tunnusluvuuksi (Taulukko 1). Matka-aikaindeksi (engl. TTI, Travel Time Index) määritellään matka-ajan suhteena vapaan nopeuden tilanteeseen, jolloin ajoneuvo liikkuu nopeusrajoituksen mukaisesti. Persentiiliarvo tarkoittaa sitä jakauman arvoa, jota pienempiä tietty suhteellinen osuus kaikista arvoista on (Moore ym. 2009, s. 34).

Taulukko 1 Matka-aikojen luotettavuuden tunnuslukuja
(Transportation Research Board 2013, Koskinen ym. 2014).

Luotettavuusluku	Määritelmä tai laskutapa
Bufferi-indeksi (engl. buffer index)	Matka-ajan 95. persentiilin ja keskiarvon erotus normalisoituna matka-ajan keskiarvolla. $\frac{tt_{95} - tt_{avg}}{tt_{avg}}$
Ajallaan olevien matkojen osuus	Matkojen osuus, joissa matka-aika alittaa joko luvun <ul style="list-style-type: none"> • 1,1 x matka-ajan mediaaniarvo • 1,25 x matka-ajan mediaaniarvo
Planning Time –indeksi	Matka-ajan 95. persentiilin matka-aikaindeksi
80. persentiili	Matka-ajan 80. persentiilin matka-aikaindeksi
Vinoutumisindeksi	$\frac{tt_{90} - tt_{med}}{tt_{med} - tt_{10}}$
”Kurjuusindeksi” (engl. misery index)	Matka-aikojen suurimman 5 prosentin keskiarvon suhde vapaan nopeuden matka-aikaan

Taulukon 1 lyhenteet tarkoittavat seuraavaa:

tt_{90} = matka-ajan 90. persentiili

tt_{avg} = keskimääräinen matka-aika.

tt_{med} = matka-ajan mediaaniarvo eli suuruusjärjestyksessä olevan jakauman keskimäinen arvo.

Matka-ajat eivät noudata normaalijakaumaa, vaan ovat positiivisesti vinoutuneita. Minkä tahansa segmentin matka-aika on nollaa suurempi. Kun ajoneuvon nopeus hidastuu kohti nollaa, suppenee matka-aika kohti ääretöntä. Tällaisen jakauman vuoksi matka-ajan mediaaniarvo on tyypillisesti keskiarvoa pienempi. (Zliobaite ja Khokhlov 2016). Mediaaniarvoa pidetään keskiarvoa parempana tunnuslukuna matka-ajan kuvaamiseen, koska se ei muutu yhtä herkästi poikkeavien matka-aikojen myötä (List ym. 2014).

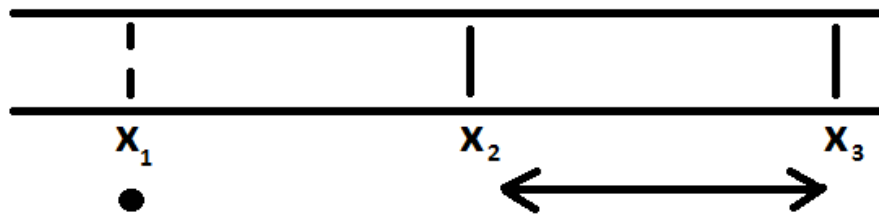
Isukapati ym. (2012) esittävät, että linkin matka-aika on mahdollista laskea peräkkäisten segmenttien tietyn persentiilin matka-aikojen summaamalla, kun linkillä ei esiinny korkeaa ruhkautumista. Tämä selittyy sillä, että peräkkäisten segmenttien matka-ajat ovat vahvasti korreloituneita. Tulos ei ole identtinen kuin suoraan kiintopisteiden välillä mitattuna, mutta virhe jää pieneksi. (Isukapati ym. 2012). Myös List ym. (2014) mukaan matka-aikojen yhdistely onnistuu segmenteiltä, mutta peräkkäisten segmenttien matka-aikojen välinen korrelaatio on syytä huomioida.

3.2 Liikenteen keskinopeuden kuvaus

Ajoneuvon nopeus tarkoittaa sen kulkemaa etäisyyttä aikayksikössä. Nopeus voidaan mitata joko hetkellisenä nopeutena tai matkanopeutena. Pistenopeudella tarkoitetaan ajoneuvon hetkellistä nopeutta sen ohittaessa tietyn kiinto- eli mittauspisteen. Keskimääräinen pistenopeus on tietyssä aikavälillä mittauspisteessä x mitattujen pistenopeuksien aritmeettinen keskiarvo (Luttinen ym. 2005):

$$\bar{v}_i(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(x) \quad (1)$$

Matkanopeus tietyllä tieosalla lasketaan ajoneuvon kulkeman matkan ja matka-ajan osamääränä. Kuva 7 esittää tieosaa, jolla kulkevan ajoneuvon pistenopeus määritetään tien poikkileikkauksessa x_1 ja matkanopeus poikkileikkausten x_2 ja x_3 välillä.



Kuva 7 Pistenopeus pisteessä x_1 ja matkanopeus poikkileikkausten x_2 ja x_3 välillä.

Usean ajoneuvon keskinopeus voidaan määrittää keskimääräisenä pistenopeutena tai keskimääräisenä matkanopeutena. Keskimääräinen matkanopeus lasketaan n ajoneuvon kulkemien etäisyyksien summan ja matka-aikojen t summan osamääränä. Kun kuljetut etäisyydet oletetaan samaksi etäisyydeksi L , saadaan keskimääräinen matkanopeus laskettua kaavalla (Luttinen ym. 2005):

$$\bar{v} = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2)$$

Myös pistenopeuksien harmoninen keskiarvo on liikennelaskennoissa käytetty tunnusluku, jota pidetään pistenopeuksien aritmeettista keskiarvoa luotettavampana tunnuslukuna. Jos jokaisen havaitun ajoneuvon nopeus vi säilyy vakiona koko tarkasteltavan etäisyyden L , vastaa harmoninen keskiarvo keskimääräistä matkanopeutta. Positiivisten lukujen harmoninen keskiarvo voidaan laskea kaavalla (Luttinen ym. 2005):

$$H = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i(x)}} \quad (3)$$

Pistenopeus voidaan mitata kahden peräkkäisen induktiosilmukan tai magnetometrin, videotunnistuksen tai tutkan avulla. Matka-aikojen ja siten matkanopeuksien laskenta ei ole suoraan mahdollista kyseisillä teknologioilla. (List ym. 2014).

Induktiosilmukka on yleisimmin käytetty pistenopeuden mittausteknologia. Tiehen upotettavan induktiosilmukan avulla voidaan tunnistaa ajoneuvon ohitus. Kahden lähekkäin sijaitsevan peräkkäisen induktiosilmukan avulla voidaan mitata ajoneuvon pistenopeus. Menetelmän etuna on se, että induktiosilmukat ovat olleet käytössä pitkään, joten teknologian käyttöönotto on helppoa. Pistenopeuksien mittaustarkkuus on lisäksi korkeaa luokkaa. Haittapuolena menetelmällä ei saada tietoa matka-ajasta ja induktiosilmukat ovat herkkiä toimintahäiriöille. (List ym. 2014).

Suomessa Liikennevirasto seuraa pääteiden liikennemääriä ja pistenopeuksia induktiosilmukalla varustetuissa LAM-pisteissä (liikenteen automaattinen mittauspiste). Mittauspisteitä on Suomen pääteillä noin 350. Pisteiden sijainnit on valittu ennen kaikkea siten, ettei poistuva tai liittyvä liikenne vaikuttaisi haitallisesti liikennelaskentojen luotavuuteen. (Rajamäki 2012).

Kaupunkiliikenteen ajoneuvojen nopeudet ovat selvästi maantieliikenteen ajoneuvojen nopeutta vaihtelevampia, sillä kaupunkiympäristössä on enemmän ajoneuvoliikenteen häiriötekijöitä, kuten liikennevaloja, risteyksiä ja kevyttä liikennettä. Kaupunkiliikenteen keskimääräiset nopeudet ovat alhaisimmillaan liikennemäärien aamu- ja iltahuipputuntien aikana. Maantieliikenteen osalta voidaan käyttää pistenopeuksien aritmeettista keskiarvoa liikenteen homogeenisyydestä johtuen. Kaupunkiliikenteessä määritetään yleisimmin matkanopeuksia. (Luttinen ym. 2005).

Matkanopeus on Norjassa tehdyn selvityksen perusteella pistenopeutta vakaampi tunnusluku (Innamaa ym. 2002). Yksittäisen LAM-pisteen pistenopeudet kuvaavat huonosti koko tieosan ajonopeuksia, vaikka LAM-pisteiden avulla lasketut keskimääräiset pistenopeudet ja matkanopeusaineistosta lasketut keskimääräiset matkanopeudet vastaavatkin pääteillä tyypillisesti varsin hyvin toisiaan (Rajamäki 2012). Epätarkkuuden sekä LAM-pisteiden vähäisen määrän ja sijaintien (Kuva 15, s. 47) vuoksi tieto keskimääräisistä pistenopeuksista ei riitä HSL:n matkanopeustutkimukseen.

3.3 Matka-ajan mittausmenetelmät

Matka-ajan mittausmenetelmiä on käsitelty Travel Time Data Collection Handbook -oppaassa, jossa ne luokitellaan kelluvan auton menetelmään, rekisterikilpitunnistukseen ja älykkään teknologian menetelmiin (Turner ym. 1998).

Uudempia matka-ajan mittausmenetelmiä kuvataan Cambridge Systematicsin Floridan liikennelaitokselle valmistelemissa Travel Time Data Collection -oppaassa. Matka-ajan mittauksessa mahdollisina teknologioina esitellään magneettitunnistus, videotunnistus, ruuhkamaksutunniste, Bluetooth, matkapuhelinpaikannus, matkapuhelimien GPS-paikannus sekä autonavigaattorien GPS-paikannus. Lisäksi yksityiset yritykset mainitaan erikseen matka-aikatietoaineistojen tuottajina. (Cambridge Systematics 2012).

List ym. (2014) jakavat mittausmenetelmät luonteeltaan kiinteisiin ja jatkuviin. Kiinteät menetelmät tunnistavat, kun tietty ajoneuvo ohittaa tietyn kiintopisteen eli sensorin. Tätä jaottelua käytetään seuraavassa, koska mittausmenetelmän periaate on käytettävää teknologiaa pysyvämpi piirre. Kiinteiden menetelmien avulla matka-aika saadaan selville kahden sensorin välillä. Jatkuvien sijaintitietojen perusteella lasketut matka-aikatiedot eivät puolestaan ole sijainniltaan sidottuja kahden kiintopisteen välille, vaan tietoa voidaan kertyä koko tieverkolta. (List ym. 2014).

3.3.1 Matka-aika lähitilapaikannuksen perusteella

Yksi vaihtoehto matka-ajan mittaukseen on lähitilapaikannus. Mittauspisteen ohittava ajoneuvo tunnistetaan yksilöivän tunnisteiden perusteella. Kun ajoneuvo tunnistetaan toisenkin mittauspisteen kohdalla, voidaan matka-aika laskea ohitusaikojen erotuksena kyseisten mittauspisteiden välille (Tiehallinto 2003). Sopivia teknologioita ovat esimerkiksi rekisterikilven kameratunnistus, Bluetooth, radiotaajuustunnistus, sormenjälkitunnistus ja WiFi (List ym. 2014).

Menetelmien yhteisenä vahvuutena voidaan pitää systemaattista mittausta ja tyypillisesti korkeaa havaintomäärää. Ajoneuvossa ei tarvitse erikseen olla mittauslaitteistoa. Haittapuolena ei voida tietää nopeuden vaihteluita linkillä, mitä reittiä ajoneuvo ajoi ja sisältyikö linkin ajamiseen pysähdyksiä. Yksilöivä tunniste aiheuttaa myös yksityisyydensuojariskejä. (List ym. 2014). Matka-aikatulosten luotettavuus riippuu sensorien sijoittelusta ja linkin liikennevirran ominaisuuksista.

Rekisterikilven tunnistus perustuu tieverkolle asennettuun kamerajärjestelmään ja kuvantunnistusalgoritmeihin. Ajoneuvon matka-aika kahden ajoreitillä peräkkäisen kameran välillä lasketaan ohitusaikojen erotuksena (Tiehallinto 2003). Kamerajärjestelmän etuna on jatkuva systemaattinen mittaus. Kamerajärjestelmää on kuitenkin kallista laajentaa laite- ja asennuskustannusten vuoksi. Lisäksi kamerat eivät aina toimi toivotulla tavalla huonoissa sääolosuhteissa tai hämärässä. (Izadpanah 2010).

Suomessa Liikennevirasto mittaa autojen matka-aikoja päätieverkolla tunnistamalla autojen rekisterikilpiä automaattisesti kamerajärjestelmää hyödyntäen. Kamerajärjestelmän on havaittu tuottavan laadukkaita matka-aikatietoja, mutta toiminnan on havaittu olevan ajoittain epäluotettavaa (Perasto-Bernitz 2010). Vallitsevat matka-aikatiedot ovat saatavilla lähes reaaliaikaisesti Liikenneviraston Digitraffic-palvelusta.

Bluetooth on lyhyen kantaman langaton kaksisuuntainen tiedonsiirtoteknologia laitteiden välillä. Bluetooth-laitteen yksilöivää MAC-osoitetta voidaan käyttää ajoneuvoikohtaisen matka-ajan laskennassa. Tielle asennettava tiedonkeruuyksikkö poimii ohitusajat niiden laitteiden osalta, joissa Bluetooth-ominaisuus on kytketty päälle. Tarkkuutta on mitattu useassa tutkimuksessa, joiden perusteella matka-aikatulokset poikkeavat alle 10 % käytetystä referenssidatasta. (Porter ym. 2012). Teknologian etuja ovat helppo asennus ja ylläpito, varsin alhainen yksikkökustannus sekä kasvava laitemäärä. Teknologia kattaa osan ajoneuvoista (Cambridge Systematics 2012). Menetelmällä saadaan kuitenkin huomattavasti ns. aktiivista kelluvaa autoa suurempia havaintomääriä, minkä lisäksi Bluetooth-taustaisia matkanopeuksia käytetään usein referenssiarvona eli totuutena, johon toista arvoa verrataan (Hu ym. 2016). Samaa tunnistusperiaatetta voidaan käyttää tunnistamaan laitteet, joissa on kytketty päälle WiFi eli langaton lähiverkkoyhteys (List ym. 2014).

Radiotaajuustunnistusta (engl. Radio Frequency IDentification) käytetään monissa maissa tiemaksujen määrittämiseen sen perusteella, että ajoneuvo ohittaa tulliaseman. Teknologia soveltuu samalla matka-aikojen mittaamiseen. (Izadpanah 2010). Tulliasemat sijoitellaan yleensä ruuhkaherkille urbaaneille alueille, mikä vaikuttaa saatavan matka-aikatiedon alueelliseen kattavuuteen ja tarkkuuteen (List ym. 2014). Teknologialla saadaan tunnistettua lähes 100 % ohittavista ajoneuvoista (HSL 2016).

Sormenjälkitunnistus on teknologia, jolla voidaan tunnistaa ajoneuvon luoman yksilöllisen magneettikentän muutos kahdessa mittauspisteessä. Teknologiaa on toistaiseksi käytetty maailmalla matka-aikojen määrittämisessä vain vähän. (List ym. 2014).

3.3.2 Matka-aika jatkuvan paikannuksen perusteella

Ajoneuvoa voidaan paikantaa jatkuvasti satelliitti- ja verkkopaikannuksen sekä tiedonsiirtoteknologioiden avulla keskustelevien ”linkittyneiden ajoneuvojen” (engl. Connected Vehicle) menetelmän avulla, jolloin on mahdollista laskea ajoneuvon koko ajo-reitti. Tällöin myös matka-ajan vaihteluita linkin sisällä on mahdollista määrittää. (List ym. 2014).

Kelluva auto on nimitys menetelmälle, jossa liikkuva auto kerää suoraan tai välillisesti tietoa vallitsevasta liikennetilanteesta. Tieto voi olla esimerkiksi nopeus-, sää-, kiihdytys-, onnettomuus-, tienpintavaurio- tai sijaintitietoa. Karttasovituksen jälkeen voidaan laskea tieverkon sujuvuustilaa kuvaavia tunnuslukuja. (Rahmani ja Koutsopoulos 2012). Kelluvan auton matka-aikatieto voi kontekstista riippuen tarkoittaa pelkkää jatkuvalla paikannuksella tai myös ohitustunnistuksella kerättyä tietoa. Aktiivisella kelluvalla autolla tarkoitetaan varta vasten ajettavaa mittausajoneuvoa, jota kuljettaja ajaa liikennevirran seassa mitaten matka-aikaa tietyllä linkillä tietyssä ajankohtana. Menetelmällä saadaan kertaluonteisesti tietoa mittaushetkellä vallitsevista matka-ajoista. Kyseistä menetelmää käytettiin HSL:n matkanopeustutkimuksessa vuonna 2009 ja 2011. Käytetty mittausmenetelmä käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.1.

Passiivisena kelluvana auton voi toimia mikä tahansa tieverkon käyttäjän auto, jonka sijaintitietoja kerätään, anonymisoidaan ja käytetään matka-aikojen laskentaan (Liu ym. 2012). Myös ammattimaisen liikenteen ajoneuvoja, kuten takseja, kuorma-autoja ja busseja, voidaan käyttää tietolähteinä (Turner 1998). Taksi- ja kuljetusyritykset hyödyntävät paljon ajoneuvopaikannusta tilannekuvan luomiseksi ja parempien palveluiden saavuttamiseksi (Rahmani ja Koutsopoulos 2012). Ammattimaisen liikenteen käyttäminen tietoläh-

teenä voi kuitenkin aiheuttaa nopeustutkimuksessa tilastollista harhaa (engl. bias), rajoittunutta otoskokoja tai alueellista kattavuutta johtuen liikennemuodon tunnuspiirteistä ja liiketoiminnallisuudesta (Herrera ym. 2010).

Aktiivisen kelluvan auton menetelmän vahvuuksina voidaan pitää havaintojen korkeaa laatua ja homogeenisyyttä. Kuljettajat voidaan ohjeistaa ja he voivat raportoida mittauksen aikaan vallinneita olosuhteita. Aktiivisen menetelmän heikkoutena on mittausaineiston keräämisen korkea kustannus suhteessa saatuun havaintomäärään (Perasto-Bernitz 2010). Tämän vuoksi otoskoko ja tulosten laatu saattaa jäädä liian heikoksi. Alhaisesta havaintomäärästä johtuen tulosten luotettavuus saattaa olla herkkä poikkeaville liikenne- tai sääolosuhteille.

Passiivisen kelluvan auton menetelmän ympärille voidaan rakentaa matka-ajan seurantajärjestelmä, jolla tietoa kerätään systemaattisesti. Tiedot, kuten ajoneuvon sijainti, nopeus ja matkustussuunta, lähetetään anonymisoituna laskentakeskukseen. Tietojen keruun, käsitteilyn ja yleistämisen kautta saatavia hyödyllisiä tietoja, kuten ajantasaisia sujuvuus- ja onnettomuustietoja, voidaan toimittaa reaaliaikaisesti liikenteessä oleville. (Leduc 2008). Matka-aikatiedon keruun kannalta etuja ovat tällöin alhaiset mittauskustannukset, havaintojen jatkuva saatavuus, automatisoitu tiedonkeruu standardisoidussa formaatissa sekä hetkellisen liikenteen poikkeustilanteen aktiivista menetelmää vähäisempi vaikutus lopputuloksen laatuun. Haittapuolia voivat olla järjestelmän korkeat aloituskustannukset, riippuvuus seurattavan laitteen käyttäjäkunnan laajuudesta sekä yksityisyydensuojakysymykset. (Liu ym. 2012). Mahdollisuudesta tuottaa luotettavaa matka-aikatietoa laajalla alueella on ollut aiemmin epäilyksiä. (List ym. 2014).

Paikannusmenetelmänä voidaan käyttää matkapuhelinpaikannusta tai satelliittipaikannusta, joiden perusteella ajoneuvon sijainti tieverkolla voidaan määrittää tarkasteluun nähden riittävän tarkasti ja usein. Satelliittipaikannus tarjoaa kaikista mittausmenetelmistä tarkimmat ja suorimmat matka-aikatiedot (List ym. 2014).

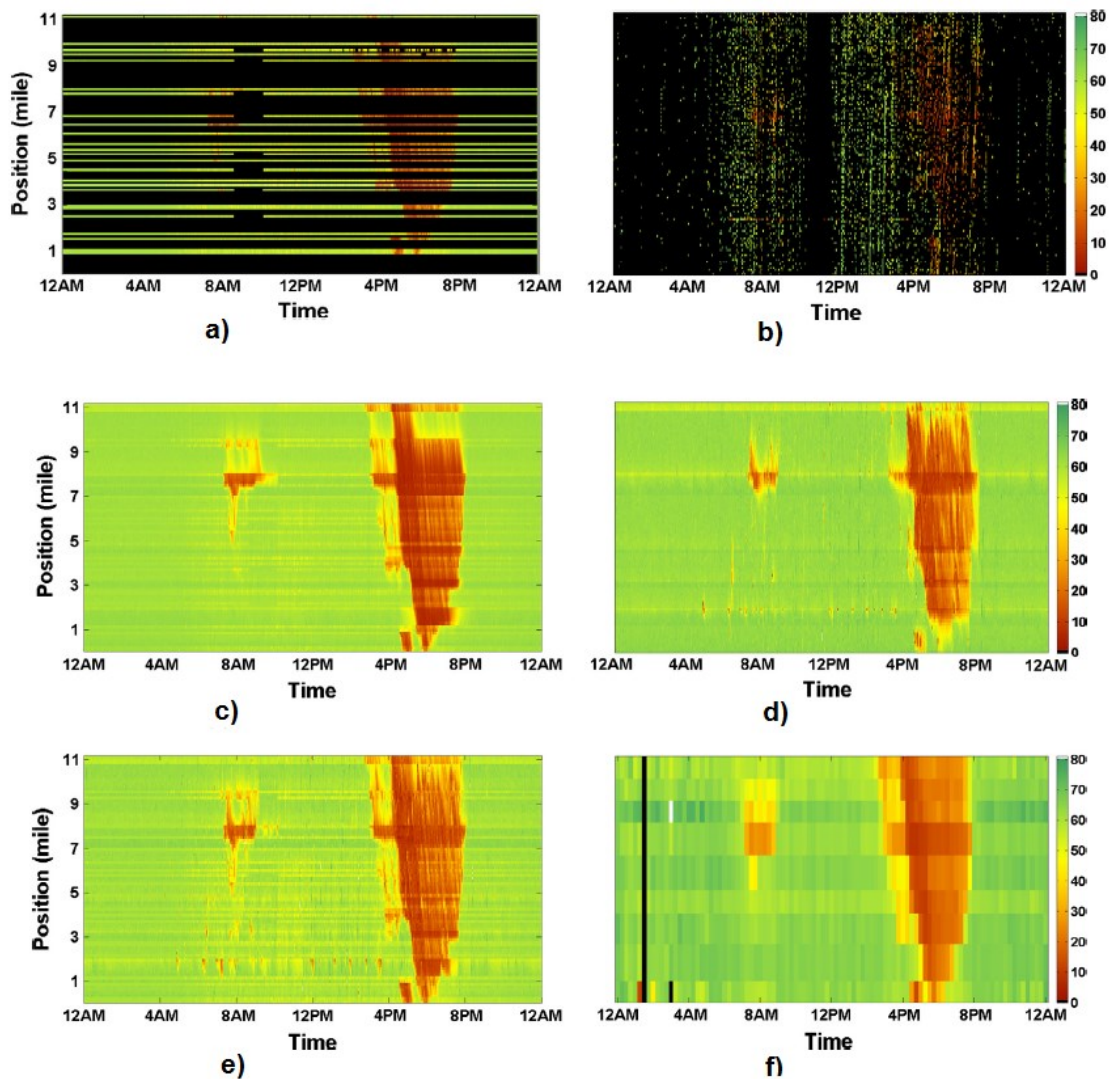
Matkapuhelinpaikannukseen perustuvan liikenteen seurantajärjestelmän etuja ovat matkapuhelinverkon hyvä alueellinen kattavuus, laitteiden suuri väestöllinen kattavuus sekä jo olemassa oleva tiedonsiirtoinfrastruktuuri. (Herrera ym. 2010). Huonoja puolia ovat varsin alhainen sijaintitarkkuus sekä sen suuri alueellisen vaihtelu. Tämän vuoksi matka-ajan luotettava määrittäminen on haastavaa.

VTT testasi vuonna 2012 pilotissaan, onko reaaliaikaista anonyymiä matka-aikatietoa mahdollista tuottaa liikenteen hallintaan tarkoituksiin matkapuhelinpaikannuksen avulla. Johtopäätöksenä oli, että 2G-verkkoa käyttävien puheluiden aikaisten soluvaihtojen seuranta ei tuota riittävän suurta havaintomäärää käyttötarkoitukseen. Kaikkien linkkien keskimääräinen havaintomäärä koko vuorokauden aikana 5 minuutin ajanjaksoa kohden vaihteli 0,5 ja 4,5 havainnon välillä. Toisena johtopäätöksenä mediaanimatka-ajan estimointia tulisi kehittää siten, että koko linkin mediaanimatka-aika laskettaisiin linkin osien matka-aikojen perusteella. (Innmaa ja Hätälä 2012).

3.4 Datafuusiomenetelmät

Datafuusiomenetelmillä pyritään yhdistämään eri lähteistä saatavaa, mahdollisesti eri yksiköistä esitettyä tietoa. Tietoja yhdistämällä pyritään lisäämään tiedon luotettavuutta ja luomaan tietoa, jota ei olisi mahdollista luoda vain yhdestä datalähteestä pääteltynä. Datafuusiomenetelmien avulla liikenneverkosta saadaan yhtä tietolähdettä kattavammat seurantatiedot ja vältetään yhden tietolähteen vikaantumisesta johtuvat järjestelmän toimintahäiriöt. (Tiehallinto 2003). Liikenteen sovelluksien datafuusioissa käytetyimpiä laskentamenetelmiä ovat neuroverkot, sumea logiikka ja Kalman-suodatus. Muita datafuusiotekniikoita ovat mm. Bayesilainen ja Dempster-Shafer -päätely. (Mattila 2003).

Patire ym. (2015) selvittivät datafuusion vaikutuksia matkanopeuksien laskennan laatuun. Datafuusion tavoitteena oli monimuotoisen datan tehokas käyttö ja liikenteen sujuvuuden arviointi myös siellä, missä suoria mittaustuloksia ei ole saatavilla tietyn sensorin perusteella. Kuvassa Kuva 8 on esitetty induktiosilmukan ja GPS-laitteiden nopeustuloksia suhteessa näistä fuusioituun. Osakuvassa 11e) näkyy datafuusion (fuusiomenetelmä: Ensemble Kalman Filter) lopputulos. Nopeuksien vaihtelut erottuvat muita teknologioita paremmin. Patiren ym. (2015) mukaan datafuusiolla päästään huomattavasti yhden sensorin käyttämistä parempiin lopputuloksiin. Matkanopeustutkimuksen kannalta datafuusiossa olennaisinta on kuitenkin se, ettei samaa ajoneuvoa lueta mukaan useaan kertaan.



Kuva 8 Datafuusion vaikutus matkanopeustiedon laatuun (Patire ym. 2015). a) Esisuodatettua induktiosilmukan nopeusdataa. b) Esisuodatettua GPS-pistenopeusdataa. c) Induktiosilmukoiden pistenopeuksista estimoituja matkanopeustuloksia d) GPS-matkanopeustuloksia e) Fuusiotulos f) Referenssiaineistona käytetty Bluetooth-matkanopeustulos.

3.5 Havaintojen lukumäärä ja ajallinen tiheys

Havaintojen lukumäärällä eli otoskoolla on suuri vaikutus saatavan matka-aikatiedon tarkkuuteen. Perasto-Bernitzin diplomityössä havaittiin, että kelluvan auton mittausten havaintomäärä 3–5 ei ole tilastollisesti riittävä niillä linkeillä, joilla variaatiokerroin on suuri.

Patire ym. (2015) selvittivät GPS-havaintojen vaadittua määrää luotettavien matkanopeustulosten saavuttamiseksi Yhdysvalloissa suoritetussa empiirisessä tutkimuksessa. Havaintoja kerättiin kolmelta Kaliforniassa sijaitsevalta tieosuudelta. Matkanopeuksia laskettiin fuusioimalla sekä kiinteästi asennettujen induktiosilmukoiden että GPS-pistehavaintoja, jotta myös fuusiossa käytettävien eri lähteiden merkitystä voitiin vertailla. Referenssiaineistona käytettiin Bluetooth-aineistoa. (Patire ym. 2015).

Patire ym. (2015) selvittivät seurattavien ajoneuvojen osuuden (engl. penetration rate) vaikutuksia matkanopeustuloksen luotettavuuteen varioimalla laskentaan mukaan otettavien ajoneuvojen lukumäärää ja vertailemalla saatavia matkanopeuksia Bluetooth-referenssidataan. Samoin sijaintihavaintojen ajallisen tiheyden (esim. 1 kerta/sekunti) vaihtelun vaikutusta matkanopeustuloksen luotettavuuteen arvioitiin. Havaintomäärän kasvattaminen vähensi keskimääräistä virhettä tulosten ja referenssidatan tulosten välillä enemmän kuin sijaintihavaintojen ajallisen tiheyden kasvattaminen. Tämä johtuu siitä, että saman ajoneuvon kaksi ajallisesti lähekkäistä nopeusarvoa ovat tyypillisesti vahvemmin korreloituneita kuin kahden eri ajoneuvon keskinopeudet samalla tieosalla. (Patire ym. 2015).

Matka-aikatutkimusta suunniteltaessa ja dataa analysoitaessa tulee ottaa huomioon saavutettava otoskoko. Vaikka otoskoko jäisi pieneksi, saattaa data silti olla käyttökelpoista tutkimuksissa, jotka eivät vaadi korkeaa tilastollista tarkkuutta. (Turner ym. 1998). Herrera ym. (2010) puolestaan arvioivat 2–3 % osuuden tienkäyttäjien matkapuhelimista riittävän tarkkojen liikennenopeuksien laskentaan, kun paikannus tapahtuu varsin epätarkalla verkko-paikannuksella.

Pääkadut (engl. arterial road) ovat selvästi maantiemäisiä olosuhteita haastavampia ympäristöjä matka-aikatiedon laadun kannalta, sillä niillä on usein liikennevaloja. Matkaajat jakautuvat poikkeaviin suurusluokkiin, sillä liikennevalot jakavat liikennevirran ajoitaisiin pulsseihin. Matka-aikojen jakauma voidaan kuvitella monihuippuisena. (Hu ym. 2016). Havaintoja tarvitaan selvästi enemmän kuin maanteiden linkeillä.

Havaintojen tarvittava määrä eli otoskoko voidaan määrittää keskihajonnan perusteella seuraavasta kaavasta aineiston ollessa normaalijakautunutta (Moore ym. 2009, Turner ym. 1998):

$$n = \left(\frac{z * \sigma}{m}\right)^2 \quad (4)$$

missä z = luottamusvälin määrittämä prosenttipiste (1,96 95 % luottamusvälille), σ = keskihajonta ja m = suurin sallittu virhe (tarkkuus).

Toisaalta havaintojen tarvittava määrä eli otoskoko voidaan määrittää variaatiokerroimen perusteella kaavasta (Moore ym. 2009, Turner ym. 1998):

$$n = \left(\frac{z * C}{a}\right)^2 \quad (5)$$

missä C = variaatiokerroin, z = 1.96 95 % luottamusvälille ja a = suhteellinen virhe. Variaatiokerroimella tarkoitetaan keskihajonnan suhteellista osuutta suureen keskiarvosta (Moore ym. 2009).

3.6 Kaupallinen sujuvuustieto

Nykyisellään liikenneviranomaiset keräävät liikenneinformaatiota pääosin kiinteistä sensoreista. Viestintäteknologioiden, GPS:n ja mobiili-internetin yleistynyt käyttö on mahdollistanut reaaliaikaisen ja laajamittaisen sijaintitiedon keruun sekä analysoinnin. Yksityiset yritykset saattavat entistä yleisemmin markkinoida tietoaineistoja julkisille toimijoille, kuten liikennetutkimuslaitoksille. Uudenlaiset kolmansien osapuolten tuottamat tietoaineistot asettavat myös liikenneviranomaisille uudenlaisia haasteita, liittyen aiempien käsittely- ja käyttökokemusten puutteeseen sekä suoran laaduntarkkailumahdollisuuden menettämiseen. (Patire ym. 2015).

List ym. (2014) mainitsevat, että kaupallinen matka-aikatieto voi olla laadukasta, mutta laskenta- ja laadunvarmistusmenetelmät ovat usein käyttäjälle läpinäkymättömiä. Tämä johtuu siitä, että kaupalliset toimijat haluavat säilyttää kilpailuetunsa, kuten fuusiomenetelmän tai laskennan periaatteet, salaisuutena. Arvioitaessa kaupallisen liikenneinformaation sopivuutta käyttötarkoitukseen on tarkasteltava, voidaanko tarvittavat asiat laskea tietoaineiston avulla ja onko data tarpeeksi laadukasta halutussa käyttötapauksessa. (List ym. 2014). Kaupallisen matka-aikatiedon laatua liikennevalo-ohjatuilla linkeillä ei ole tutkittu kattavasti (Cambridge systematics 2012).

Hu ym. (2016) mainitsevat, että laskentamenetelmien pitäminen liikesalaisuutena aiheuttaa ongelmia menetelmien tiedon luotettavuuden toteamisessa. Heidän suorittaman kirjallisuuskatsauksen perusteella kaupallinen matka-aikatieto on vastannut Yhdysvalloissa pääväylien osalta hyvin vertailuarvoja. Tarkastelluissa tutkimuksissa arvioidut linkit olivat pituudeltaan 5–150 kilometriä. vertailivat nimeltä mainitsemattomia yksityisen yrityksen matkanopeustietoa Bluetooth-referenssiarvoihin 3 viikon ajalta. He havaitsivat, että yksityisen yrityksen matka-ajat ja niiden varianssit olivat tyyppillisesti hieman referenssiarvoja pienempiä. Myös sujuvuuden muutokset aiempiin mittauksiin nähden olivat referenssiarvoja pienempiä, minkä vuoksi aineiston tulkittiin indikoivan sujuvuuden muutoksia referenssiaineistoa maltillisemmin. (Hu ym. 2016).

Liikennesektorin kannalta laajamittaisen sijaintitiedon keräämisen mahdollisina seurauksina voidaan pitää (International Transport Forum 2015):

- Ennennäkemätön datan määrä ja analysointi tulevat muuntamaan liikennealan toimintaa pysyvästi.
- Reaaliaikainen datan keruu lisää liikenneturvallisuutta.
- Ihmisiä ja heidän liikkeitään pystytään seuraamaan tarkkuudella ja laajuudella, jotka eivät ennen olleet mahdollisia.
- Liikenneviranomaisten tulee tarkastella dataa huolellisesti ymmärtääkseen, mitä sillä on mahdollista tehdä luotettavasti.
- Datavisualisoinnit ovat entistä tärkeämpiä päätöksenteon tukena.
- Tarkoituksella, opportunistisesti tai joukkoistetusti kerätty data synnyttää uutta tietoa liikennesuoritteista ja -virroista.
- Sijaintitiedon saatavuus luo uudenlaisia riskejä yksityisyydensuojalle.
- Sijaintitieto on henkilökohtaista ja vaikeaa anonymisoida tehokkaasti.
- Tiedon suojaus- ja salauskäytännöt kehittyvät selvästi datan keruu- ja käyttötapojen syntymistä hitaammin.

3.7 Tulkinta matka-aikatiedon keräämisen nykytilanteesta

Maailmalla käytössä olevia matka-aikatietojärjestelmiä on käsitelty Perasto-Bernitzin diplomityössä. Tuolloin maailmalla käytetyt kansalliset tai seudulliset reaaliaikaiset matka-aikatietojärjestelmät perustuivat lähipaikannukseen, kuten kamera- tai radiotaajuustunnistukseen. Tämän diplomityön aikana ei löydetty tietoa oleellisesti erilaisista maailmalla käytössä olevista matka-ajan seurantajärjestelmistä tai -palveluista.

Kirjallisuuden perusteella ei voida sanoa, että kelluvan auton menetelmillä saataisiin lähipaikannusta perempia matka-aikatuloksia. Havaittiin, että matka-aikatulosten laatu riippuu paikannustarkkuudesta, sijainnin päivityksen ajallisesta tiheydestä sekä käytettyjen laskentamenetelmien laadusta. Lisäksi laatu riippuu suuresti saatavasta havaintomäärästä, sillä havainnot muodostavat lähes aina vain otoksen perusjoukosta eli liikennevirrasta.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella HSL:n matkanopeustutkimukseen parhaimmalta vaikuttavat satelliittipaikannukseen, Bluetooth- tai radiotaajuustunnistukseen perustuvat mittausmenetelmät. Kameratunnistukseen liittyy kirjallisuuden perusteella joko säästä tai muusta toimintahäiriöstä johtuvaa toiminnan epävarmuutta niin Suomessa kuin ulkomailakin. Matkapuhelimien verkkopaikannuksen tarkkuus ei vaikuta riittävän matka-ajan luotettavaan määrittämiseen.

Matka-ajan mittaukseen sopivia paikannusmenetelmiä käytetään maailmalla myös määrittäessä tiemaksuja, joilla pyritään vaikuttamaan tieverkon kysyntään (HSL 2016). Ns. Ollilan työryhmä piti mahdollisena puoltaa sitä, että Suomessa siirryttäisiin tulevaisuudessa jatkuvaan paikannukseen perustuvaan kilometriveroon sen arvioitujen positiivisten vaikutuksen vuoksi (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013). Tällaisella muutoksella voisi olla suuri vaikutus myös laadukkaan matka-aikatiedon saatavuuteen.

4 UHAT YKSITYISYYDENSUOJALLE

Blumberg (2009) määrittää esseessään sijaintiyksityisyyden (engl. locational privacy) yksilön mahdollisuudeksi liikkua julkisessa tilassa sillä uskomuksella, ettei hänen liikkumistietojaan tallenneta järjestelmällisesti ja hänen tietämättään myöhempää käyttöä varten.

Järjestelmiä, jotka luovat ja tallentavat digitaalisia jälkiä ihmisten liikkeistä julkisessa tilassa on lukuisia. Esimerkiksi maksukortit, matkapuhelimet, mobiilisovellukset, langattomat tietoliikenneverkot, hakukoneet, kulkuavaimet, matkakortit ja parkkimittarit voivat tallentaa tietoa ihmisen liikkumisesta, vaarantaen samalla ihmisen sijaintiyksityisyyden. Tietojen avulla on mahdollista esittää seuraavia kysymyksiä tai etsiä niihin vastauksia (Blumberg 2009):

- Kävelitkö aborttiklinikalle?
- Kenen Bob Jacksonin luona olit?
- Kuinka myöhään olet tyypillisesti töissä?
- Kenen kanssa ex-tyttöystäväni käy ulkona?
- Missä kirkossa tai moskeijassa käyt?
- Miksi sihteerisi oli seurassasi?

Sijainti- ja aikatieto paljastavat ihmisen päivittäisen rytmin sekä paikat, joissa henkilö nukkuu, työskentelee tai vierailee usein. Tällaiset säännönmukaisuudet on todettu erittäin toistuviksi ja ennustettaviksi. Ihmisen liikerata on lähes yhtä identifioiva tunnistee kuin sormenjälki. (International Transport Forum 2015).

Montjoye ym. (2013) tutkivat, kuinka helposti puhelusijaintitietokannasta voidaan päätellä yksikäsitteisesti, minkä yksilön liikkumistietoja satunnaisesti valitut sijainti-aikaparit edustavat. Tietokanta sisälsi 15 kuukauden ajalta 1,5 miljoonan käyttäjän sijainnin lähtevien ja saapuvien puhelujen aikaan. Liikerata muodostuu yhden henkilön paikannetuista sijainneista. Sijaintitarkkuus oli tiedossa lähtökohtaisesti linkkitornin solun tarkkuudella ja kelloaika tunnin tarkkuudella. He havaitsivat, että tietämällä tietyn käyttäjän 4 satunnaista sijainti-aikaparia koko aikajaksolta voidaan päätellä oikea henkilö 95 %:ssa tapauksista.

Ihmiset pitävätkin heitä koskevaa sijaintitietoa hyvin arkaluontoisena tietona. Rohunen ym. (2014) selvittivät ihmisten suhtautumista henkilökohtaiseen informaatioon tarkastelemalla kirjallisuudessa käsiteltyjä käyttäytymismalleja (Privacy Behavior Models). Kirjallisuuskatsauksen perusteella henkilökohtainen informaation luovuttamishalukkuuteen vaikuttavat vahvimmin siitä saatavat koetut hyödyt, luottamus tiedon kerääjiin ja kokonaisprosessiin, tietoisuus tiedonkeruun ja -käsittelyn käytännöistä, hallintaoikeus, informaation arkaluontoisuus sekä henkilökohtaiset taipumukset. (Rohunen ym. 2014).

Rohunen ym. (2014) haastattelivat tutkimuksessa liikennedatapalvelun käyttäjiä ja taksi-kuljettajia palveluun liittyvistä yksityisyydensuojan kokemuksista. Lisäksi palvelun sidosryhmää kuultiin aluksi kokemusten yleiskuvan saavuttamiseksi. Sidosryhmän mukaan tarkkailtavat henkilöt eivät aina tiedä riittävän tarkkaan, mitä henkilökohtaista informaatiota kerätään, mihin tarkoituksiin informaatiota hyödynnetään ja kenellä on pääsy informaatioon. Moni haastateltava oli huolestunut yksityisyyssseikoista. Käyttäjät olivat huolestuneita etenkin informaation paljastumisesta kolmansille osapuolille sekä informaation käytöstä muihin kuin alkuperäisiin tarkoituksiin. Näistä piirteistä huolimatta käyttäjät olivat halukkaita luovuttamaan ajoinformaatiotaan näin saavutettavien henkilökohtaisten hyötyjen tai yhteisen hyvän vuoksi. (Rohunen ym. 2014).

Haastatellut käyttäjät eivät aina mielestään olleet riittävän tietoisia ajoinformaation keruun ja käsittelyn piirteistä. Palveluntarjoajan hyvän maineen todettiin vähentävän yksityisyydensuojaan liittyviä huolia. Palveluun liittyvä luottamus voi olla siirtyvää, kun käyttäjää luottaa ekosysteemin johonkin yksittäiseen organisaation tai henkilöön. Informaation keruuseen ja käsittelyyn liittyvä selkeä tiedotus sekä läpinäkyvyys antavat käyttäjälle paremmat valmiudet arvioida halukkuuttaan osallistua tiedonkeruuseen. Riippumattoman osapuolen suorittama ulkoinen tarkastus lisäsi luottamusta. (Rohunen ym. 2014).

Blumberg (2009) esittää ajatuksen sijaintipalveluiden tietojärjestelmistä, jotka sisältävät yksilön sijaintitietoa vain hetkellisesti, minkä jälkeen tieto tuhotaan. Liikennetutkimukseen ei välttämättä ole tarpeen kerätä nopeustietoa koko tieverkolta sekä yksilöä tarkasti ja jatkuvasti seuraten. Hoh ym. (2008) esittelevät konseptia, jossa määritellään etukäteen kiinnostuksen kohteena olevat tieverkon osat. Matkapuhelimeen tallennettu linkkikuvaus (engl. virtual trip line) mittaustieverkosta laukaisee sijaintitiedon siirtymisen serverille, kun ajoneuvo siirtyy mitattavalle tieosalle. Järjestelmän perusajatuksena on anonymisti siirretty nopeustieto tietyllä mittausvälillä. Tämän vuoksi virtuaalilinkkien sijaintien määritykselle esitetään kahden tyyppisiä rajoitteita; minimietäisyys kahden peräkkäisen linkin välillä sekä alueet, joilta ei etenkään kerätä matka-aikatietoa. Minimietäisyyttä käytetään, jotta matka-aikojen korrelaatioita peräkkäisillä segmenteillä ei voisi jälkikäteen hyödyntää matka-aikatietojen yhdistelyssä ja siten ajoreitin päättelyssä. Kyseessä on hajautettu tietojärjestelmä, jonka mikään osa ei sisällä tarkkaa tietoa sekä identiteetistä että sijainnista. Tällöin yksittäiseen järjestelmän osaan käsiksi pääseminen ei vielä mahdollista yksilön tarkan sijaintitiedon päättelemistä. (Hoh ym. 2008)

5 HSL:n MATKANOPEUSTUTKIMUS

5.1 HSL:n aiemmat matkanopeusmittaukset

HSL (aiemmin YTV) on mitannut ajoneuvoliikenteen matkanopeuksia pääkaupunkiseudulla jo vuodesta 1970. Matka-aikojen mittaukset on suoritettu toistuvasti samoilla pääteillä ja -kaduilla sekä samalla menetelmällä. Mittauksilla on tuotettu tietoa ajoneuvoliikenteen matkanopeuksista, matka-ajoista sekä viiveistä.

Mittaukset on aiemmin suoritettu pääasiassa joka toinen vuosi parittomina vuosina syksyllä. HSL:n lisäksi Helsingin Kaupunkisuunnitteluvirasto (KSV) sekä Liikenneviraston tietosasto ovat mitanneet matkanopeuksia aiempina vuosina Etelä-Suomessa. Mittauksia on suoritettu samana vuonna siten, että KSV:n mittaukset ovat ajoittuneet keväälle ja HSL:n syksyille. (Perasto-Bernitz 2010). HSL:n mittauksen lukumäärä oli vuonna 2009 KSV:n mittauksia pienempi, mutta niiden alueellinen kattavuus oli KSV:n mittauksia suurempi (Jaakkola 2012). Vuoden 2009 mittauksen eroja ja päällekkäisyyksiä on aiemmin käsitelty tarkemmin Perasto-Bernitzin diplomityössä ja Jaakkolan Pro gradu -tutkielmassa.

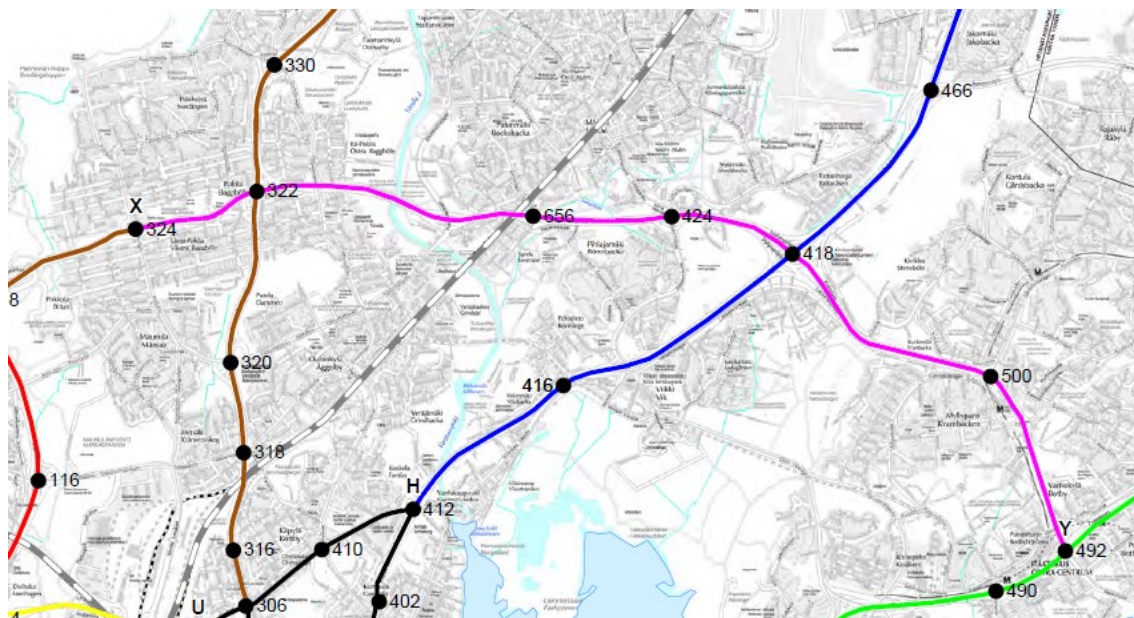
Ramboll Oy toteutti mittausajot ja aineiston käsittelyn vuosina 2009 ja 2011 HSL:n toimeksiannosta. Molemmat mittausajot toteutettiin aktiivisilla kelluvilla autoilla, jotka ajoivat liikennevirran seassa henkilöautoille tarkoitettuja kaistoja sekä liikennesääntöjä noudattaen. Kelluvat autot oli varustettu GPS-paikannuslaitteella sekä kannettavalla tietokoneella. Kellonajat ja sijaintitiedot tallentuivat GPS-laitteelta automaattisesti 2 sekunnin välein. Kiintopisteiden ohitusajat tallennettiin lisäksi käsin tietokoneen funktionäppäintä painamalla. (Perasto-Bernitz 2010). Linkkien alueellista kattavuutta parannettiin vuodesta 2009 määrittelemällä uusia linkejä vuonna 2011.

Mittaukset suoritettiin HSL-alueen eli Helsingin, Espoon, Vantaan, Kauniaisen, Sipoon, Keravan ja Kirkkonummen tieverkolla. Matka-aikaa tieverkostolla mitattiin ajamalla 19 reittiä molempiin suuntiin. Reitit on esitetty värikoodattuna liitteissä 3 ja 4. Matka-aikaa mitattiin kyseisissä liitteissä numeroitujen ja näkyvien kiintopisteiden välillä. Mittauksia suoritettiin kolmessa aikaryhmässä eli aamuruuhkaan, päiväliikenteen sekä iltaruuhkan aikaan. Reitit ajettiin läpi aikaryhmittäin ja suunnittain siten, että jokaisessa mittausryhmässä suoritettiin 3–5 mittausajoa (HSL 2012b). Mittausryhmä tarkoittaa tässä reitin, suunnan ja aikaryhmän yhdistelmää.

Matka-aikaa mitattiin mittausreitille määriteltyjen kiintopisteiden väleillä eli linkeillä (Kuva 9). Linkkien lopulliset matka-ajat laskettiin GPS-tuloksista tietyn aikaryhmän kaikkien mittausajoneuvojen matka-aikojen keskiarvona. Tuloksia kuitenkin esitettiin niin kutsutuilla yhdistetyillä linkeillä eli yhdistelemällä usean linkin mittaus tuloksia. Kuvan Kuva 9 tapauksessa lopulliset tulokset laskettiin esimerkiksi kiintopisteiden 322 ja 418 välille. Viivan väri sen sijaan kuvaa mittausreittiä, jolla tietty ajoneuvoryhmä mittasi matka-aikaa.

Mittausajankohdista todetaan 2011 tulosraportissa seuraavaa: ”Aamuruuhkan mittaukset aloitettiin pääosin klo 7.30–7.45. Säteittäisillä reiteillä aamuruuhka mitattiin kuitenkin niin, että keskustaan saavuttiin klo 8.00–8.30. Iltaruuhkan mittausajot aloitettiin klo 16.00–16.15. Päiväliikenteen mittausaika oli klo 9.30–14.30. Aamuruuhkaa mitattiin maanantaista perjantaihin ja iltaruuhkaa maanantaista torstaihin.” (HSL 2012b).

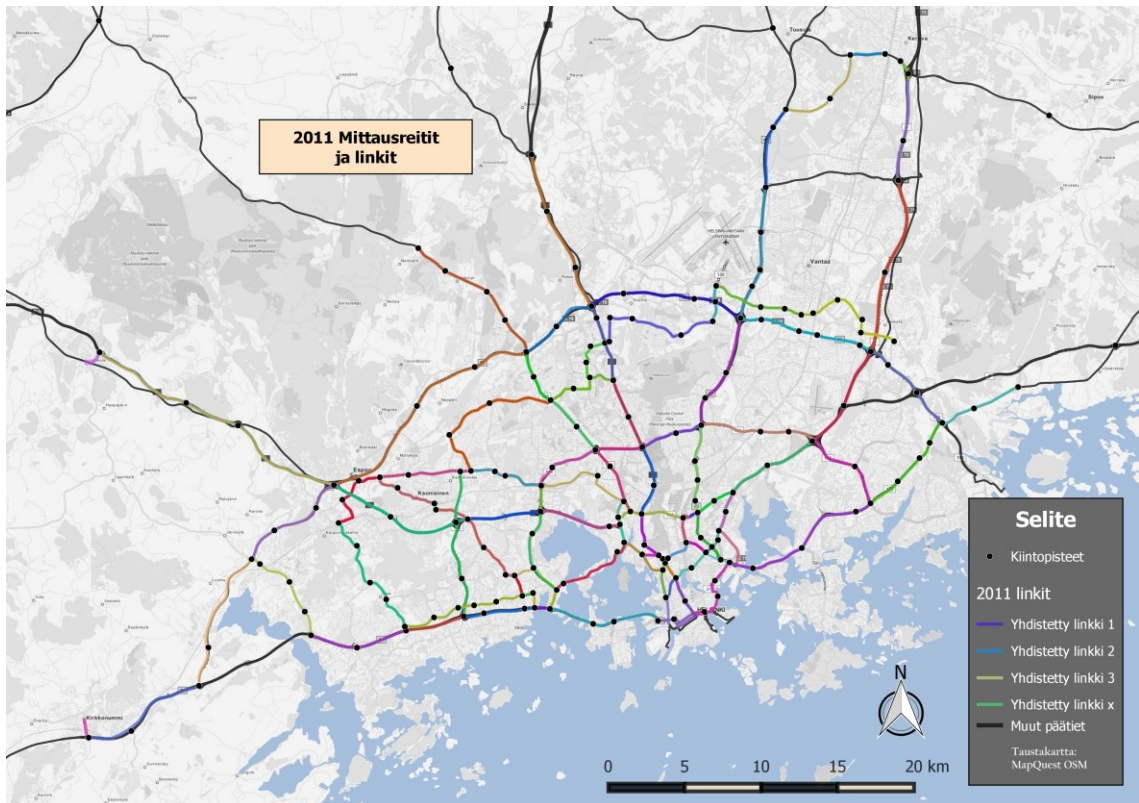
Linkkien mittaussuunnasta todetaan seuraavaa: ”Säteittäisillä reiteillä tehtiin mittauksia aamuruuhkassa Helsingin keskustan suuntaan ja iltaruuhkassa keskustasta pois päin. Poikittaisilla yhteyksillä kuten kehäteillä ruuhkasuunta ei ole yhtä selkeä kuin säteittäisillä väylillä. Poikittaisilla reiteillä mittauksia on tehty kaikkina ajankohtina molempiin suuntiin.” (HSL 2012b).



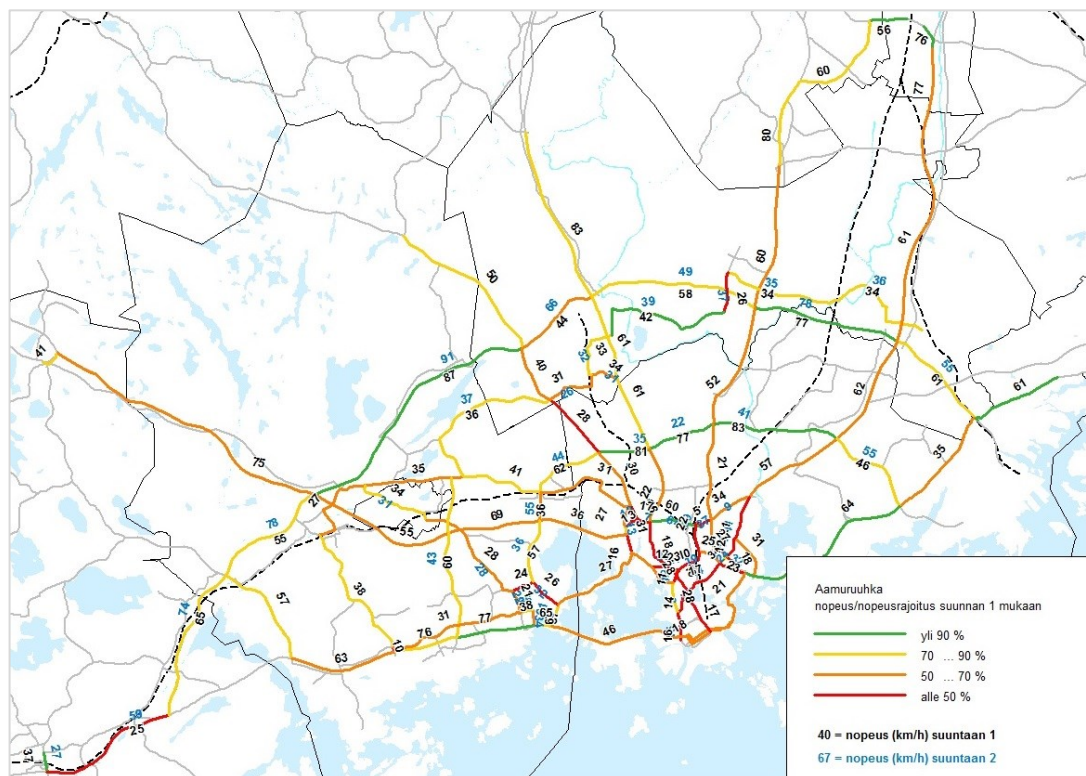
Kuva 9 Linkkien matka-ajan mittaamisen periaate vuonna 2011. (HSL 2012b).

Mittaustulosten käsittelyn jälkeen Ramboll tuotti tuloksista tulosraportit, joilla keskimääräisiä matkanopeuksia esitetään karttapohjalla suhteessa nopeusrajoitukseen. Lisäksi tuloksia vertailtiin edellisvuosiin. Kiintopisteiden välisiä linkkien keskimääräisiä matka-aikoja yhdistettiin tuloskarttoja varten useasta linkistä koostuville yhdistetyille linkeille (Kuva 10). Tulokset esitettiin aikaryhmäkohtaisina sujuvuuskarttoina (Kuva 11). Suunta 1 tarkoittaa tässä Helsingin keskustaan ja kehäteillä itään suuntautuvaa liikennettä. Tällainen suunnan määritelmä ei ole tulkinnan kannalta yksikäsitteinen, minkä vuoksi molemmat ajosuunnat pyrittiin tällä kerralla kuvaamaan kartalla samanaikaisesti.

Edellisten mittauskertojen kaltainen aktiivinen kelluvan auton mittaus on osoittautunut käyttökelpoiseksi, mutta kustannustehottomaksi suhteessa saatavien havaintojen määrään (Perasto-Bernitz 2010). Perasto-Bernitz selvitti diplomityössään, voidaanko kelluvan auton menetelmän kamerajärjestelmän tuottamilla matka-aikatuloksilla korvata kelluvan auton mittausajot. Pääjohtopäätöksensä oli, että korvaus voitaisiin toteuttaa vain osittain sillä oletuksella, että kamerajärjestelmä toimisi testatun ajanjakson toimintaa luotettavammin. Toisena tärkeänä johtopäätöksensä oli, että 3–5 mittausajoa mittausryhmää kohden ei riitä tilastollisesti merkitsevien matka-aikatulosten saavuttamiseksi niillä linkeillä, joiden matka-aikojen variaatiokerroin on suuri.



Kuva 10 Vuoden 2011 mittauksen kiintopisteet ja yhdistetyt linkit.



Kuva 11 Aamuruuhkan matkanopeudet yhdistetyillä linkeillä syksyn 2011 arkivuorokautena (HSL 2012b).

5.2 Uuden tietolähteen vaatimukset

Uutta tietolähdettä alettiin etsiä aiemmin käytetyn aktiivisen kelluvan auton mittausmenetelmällä saatavien havaintomäärien vähäisyydestä ja kustannustehottomuudesta johtuen. Matka-aikatietojärjestelmien toiminnan monimutkaisuudesta johtuen järjestelmää ei ryhdytty kehittämään itse. Tavoitteena oli sen sijaan löytää valmis ja laadukas tietolähde, jonka tiedot perustuvat aiempaa suurempaan havaintomäärään. Kirjallisuuden perusteella parhaalta vaikutti taustaltaan lähitilapaikannukseen tai passiiviseen kelluvan auton menetelmään perustuva matka-aikatieto.

Vertailukelpoisuutta aiempiin tutkimuksiin pidettiin erityisen tärkeänä tavoitteena, sillä aiemmat mittaustulokset muodostavat pitkän aikasarjan. Vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi haluttiin lähtökohtaisesti tarkastella vähintään samoja linkkejä samaan aikaan vuodesta.

Uudenlaisen menetelmän tärkeimpinä laatutekijöinä pidettiin:

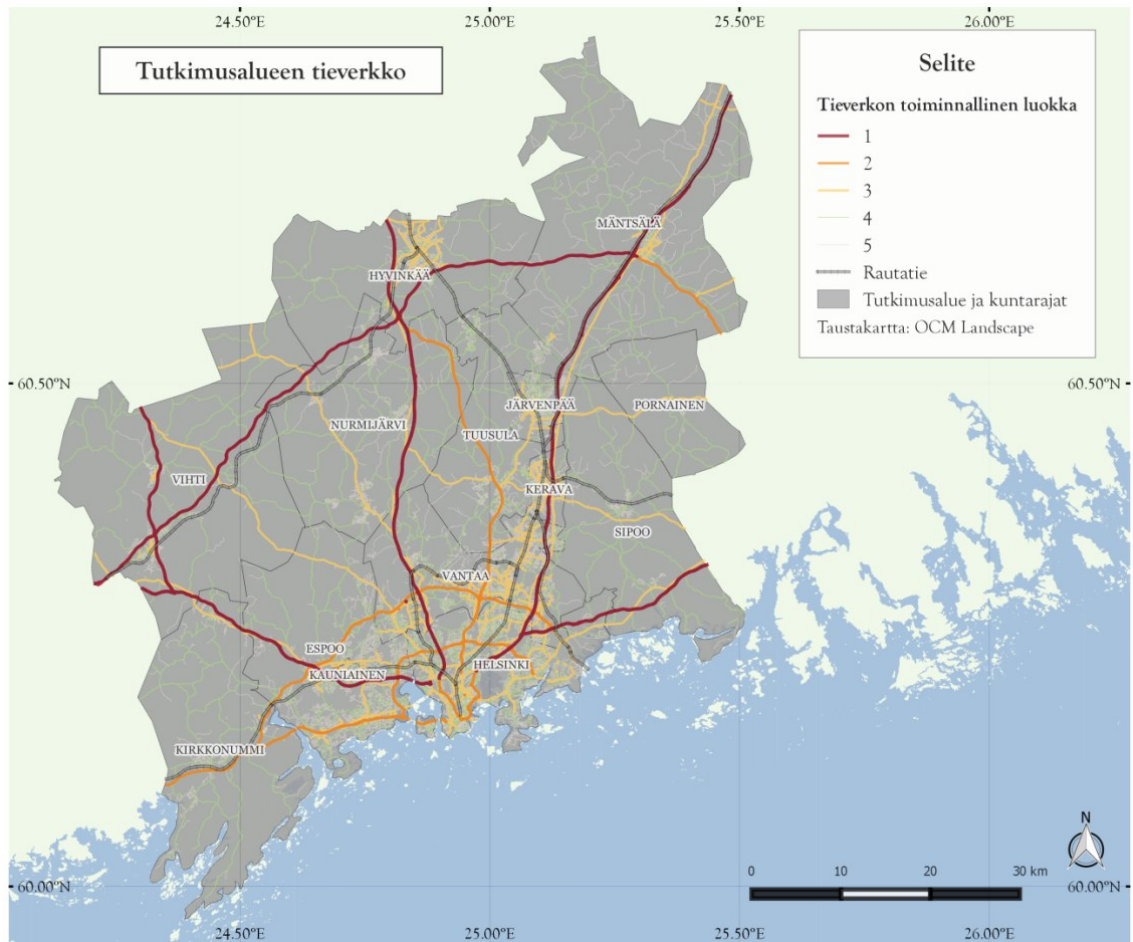
- 1) Aiempaa parempi tilastollinen luotettavuus eli suuremmat havaintomäärät
- 2) Tulosten vertailukelpoisuus aiempiin matkanopeustutkimuksiin
- 3) Aiempaa laajempi alueellinen kattavuus
- 4) Aiempaa alhaisemmat kustannukset
- 5) Aiempaa tarkemmat ajalliset vertailut
- 6) Aineiston olemassaolo myös tulevaisuudessa
- 7) Menetelmän helppo toistettavuus
- 8) Aiempaa selkeämpi esitystapa kartalla

5.3 Tutkimuksen lähtökohdat

Matkanopeustutkimuksella pyritään saamaan tietoa liikennetilanteen kehittymisestä pitkällä aikavälillä ja arvioimaan liikenneverkon parantamistarpeita. Liikennejärjestelmällinen kattavuus on aiemmin rajattu henkilöautoliikenteeseen.

Alueellisen laajuuden määrittivät HSL:n muodostaman Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmaan (HLJ) sisältyvät 14 kuntaa, eli Helsinki, Espoo, Vantaa, Kauniainen, Kirkkonummi, Järvenpää, Nurmijärvi, Tuusula, Kerava, Mäntsälä, Pornainen, Hyvinkää, Vihti ja Sipoo.

Tutkimusalueen tieverkko on esitetty kuvassa 12 toiminnallisen luokan mukaan jaoteltuna. Toiminnallinen luokka perustuu tien liikenteelliseen tärkeyteen, kuvaten väylän palvelutasoa liikenteelle. Aineistona käytettiin kansallista tieverkkoa kuvaavan Digiroad-aineiston julkaisua 2015/4, josta valittiin Uudenmaan toiminnalliselta luokaltaan 1–5 olevat tiet (1= Valtatie, 2= Kantatie tai seudullinen pääkatu. 3= Seututie tai alueellinen pääkatu, 4= Yhdystie tai kokoojakatu, 5= Liityntäkatu tai tärkeä yksityistie).



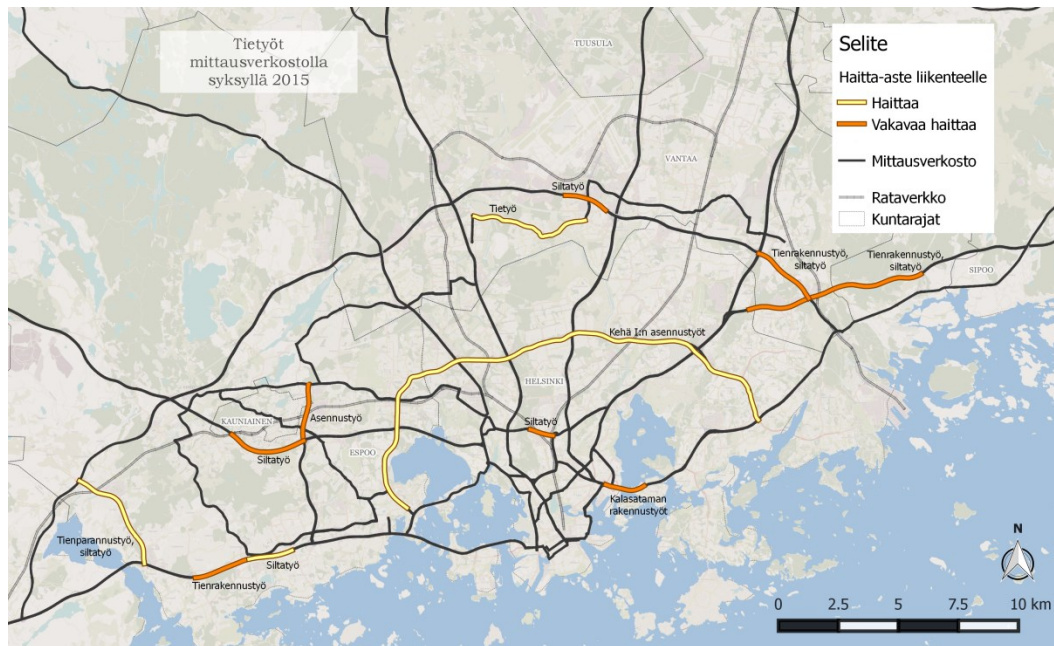
Kuva 12 Tutkimusalueen tieverkko toiminnallisen luokittelun mukaan (Digiroad 2015/4).

Liikennemäärät jakautuvat tutkimusalueen tieverkolla epätasaisesti (Liite 1 ja Liite 2). Kyseisissä kuvissa on esitetty vuoden 2014 ajoneuvoliikenteen keskimääräinen arkivuorokausiliikenne tutkimusalueella ja pääkaupunkiseudulla. Matkanopeustutkimuksessa tarkastellaan alueen pääväylien liikenteen sujuvuutta, joten liikennemäärätiedosta on hyötyä mitattavia teosia määritettäessä.

Matkanopeustutkimuksen ajankohta päätettiin säilyttää syys-lokakuulla, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia aiempien tulosten kanssa. Matkanopeustutkimuksessa pyritään kuvaamaan tyypillistä arkiliikennettä. Tämän vuoksi arkipäivistä valittiin maanantai, tiistai, keskiviikko ja torstai. Perjantain liikennemäärät ovat viikon suurimpia ainakin kesäaikaan (Luttinen 2005). Lopulta aineistoa päätettiin kerätä aikaväliltä 31.8.–3.11.2015. Autoton päivä tiistaina 22.9.2015 sekä peruskoulujen ja lukiodien loma- viikko viikolla 42 (12.–18.10.2015) päätettiin jättää pois tutkimuksesta, sillä kyseisten päivien liikenteen oletettiin poikkeavan ajankohdan tyypillisen arkivuorokauden liikenteestä.

Sääolosuhteet tutkimusaikana olivat liikenteen kannalla varsin hyvät ja selkeät (Liite 2, HSL Operatiiviset tutkimukset 2015). Tietoita oli tutkimusaikana käynnissä (Kuva 13). Tietöistä kerättiin tietoa syys-lokakuussa 2015 Liikenneviraston Liikennetilanne-palvelun kautta. Tietyöt saattoivat aiheuttaa matka-aikojen poikkeamia normaaliolosuhteissa. Suuri osa tietöistä oli ilmoitettu Liikennetilanne-palvelussa pitkäkestoisiksi, mutta ajoittaisiksi. Tällöin haittaa liikenteelle esiintyy vain tietynä tuntemattomana ajankohtana, mikä tekee

vaikutusten arvioimisesta hyvin haasteellista. Tietyöt otetaan tässä diplomityössä tulosten ja poikkeamien tulkinnessa huomioon vain kerätyn tiedon mukaisesti. Kalasataman rakennustyöt ovat vaikuttaneet alueen tiegeometriaan varsin huomattavasti.



Kuva 13 Tietyöt haitta-asteineen mittausverkostolla syksyllä 2015 (Liikennevirasto 2015, taustakartta OSM Humanitarian Data Model 2016).

6 VALMIIDEN TIETOAINEISTOJEN ARVIOINTI

Matka-aikatietoa haluttiin tällä tutkimuskerralla aiempaa laadukkaampana, laajemmalla alueelta sekä mahdollisimman pitkälle käsitellyssä formaatissa. Tämä johti siihen, että tarkastelut kohdistettiin jo olemassa oleviin julkisiin ja kaupallisiin tietoaaineistoihin. Laadun arvioimiseksi oli ensin määriteltävä, mitä laatu tarkoittaa liikenne- ja paikkatietoaaineistojen osalta.

6.1 Tietoaaineiston laatu

Tietoaaineiston laatu on moniulotteinen konsepti (Wand ja Wang 1996). Zhang ym. (2011) mukaan tietoaaineiston laatu riippuu yleisesti oikeellisuudesta, kattavuudesta, yhdenmukaisuudesta sekä aineistossa olevien virheiden ja ristiriitojen ratkaisemiseen kuluva ajasta. Tietoaaineiston sisällön laatu riippuu tiedon tuottamisessa käytettävien käsittelyprosessien suunnittelusta ja toteutuksen laadusta (Wand ja Wang 1996).

Kirjallisuudessa tietoaaineiston laatu jaetaan usein sisäiseen ja ulkoiseen laatuokomponenttiin. Sisäinen laatu tarkoittaa tietoaaineiston sisällön vastaavuustasoa täydelliseen aineistoon, eli siihen mitä tiedontuottajan oli määrä tuottaa. Ulkoinen laatu tarkoittaa tietoaaineiston vastaavuutta käyttäjän tarpeisiin ja toiveisiin tietyssä käyttötarkoituksessa. (Devillers ym. 2006).

Paikkatietoaaineistojen laadun hallintaa, mittaamista ja raportointia käsitellään kansainvälisissä ISO 19113, ISO 19114 ja ISO/TS 19138 -standardeissa. Suomessa on toteutettu kyseisiin standardeihin perustuva kansallinen julkishallinnon suositus JHS 160. Paikkatietoaaineistojen mitattavissa olevia sisäisiä laatutekijöitä ovat JHS 160 -suosituksen mukaan täydellisyys, sijaintitarkkuus, ajallinen tarkkuus, ominaisuustiedon oikeellisuus ja looginen eheys. Looginen eheys muodostuu tietoaaineiston sisällön, kuten topologian ja arvojen, sääntöjenmukaisuudesta. Tietoaaineiston laadun arvioimiseen liittyy usein vertailuasetelma (JHS 160). Tietoa voidaan verrata toiseen tietoon (engl. ground truth) eli referenssiarvoon, jonka laatu tunnetaan.

Ulkoisten laatutekijöiden varmistamista auttavat kuvailevat laatu tiedot, joita ovat esimerkiksi historiatiedot, käyttökokemukset ja käyttötarkoitus. Historiatiedot ilmaisevat tietoaaineiston tuotannon ja ylläpidon yhteydessä tehtyjä toimenpiteitä sekä tietojen alkuperän. Käyttökokemukset kertovat siitä, mihin ja millä onnistumisasteella tietoaaineistoa on käytetty tuottajan tai käyttäjien toimesta. Käyttötarkoitus ilmaisee, mihin tarkoitukseen tietoaaineisto on alun perin luotu. Tietoaaineistoa kuvailevat laatu tiedot on syytä dokumentoida mitattavien laatutekijöiden ohella. (JHS 160). Paikkatietoaaineistoa käytetään usein tietolähteenä ongelmanratkaisussa ja päätöksenteossa, joten tietoaaineiston sopivuus haluttuun käyttötarkoitukseen on erityishuomion arvoinen seikka. (Devillers ym. 2006).

Zhang ym. (2011) esittävät 4 laatukriteeriä GPS-pohjaiselle liikennetietoaaineistolle (Taulukko 2). Aineiston tulee ensinnäkin olla oikeellista, eli virheettömästi tuotettua, lähetettyä, koottua ja käsiteltyä. Toiseksi havaintoja tulee olla kattavasti ja riittävästi kerättyinä koko tieverkolta. Kolmanneksi, havaintojen tulee olla luonteeltaan yhdenmukaisia. Neljänneksi, GPS-havaintojen tulee olla minimaalisia siten, ettei havaintoja kerätä samassa ajoneuvossa sijaitsevasta useasta paikannuslaitteesta. (Zhang ym. 2011).

Taulukko 2. GPS-paikannukseen perustuvan matka-aikatiedon laatuksiteerit (Zhang ym. 2011).

Laatukriteeri	Rikkova tekijä
Oikeellisuus	Virheellinen nopeus, sijainti tai suunta
Kattavuus	Puuttuvat havainnot tieosalta
Yhdenmukaisuus	Havainnot pysäköidyistä ajoneuvoista
Minimaalisuus	Havainnot moneen kertaan samasta ajoneuvosta

Liikennemäärien epätasainen jakautuminen asettavat haasteita ensimmäisen ja toisen laatukriteerin täyttymiselle. Suuri osa havainnoista kohdistui tyypillisesti pienelle osalle segmenteistä. GPS-havainnot vaativat esikäsitteilyä, yhtenäistämistä ja yleistämistä, jotta niistä saadaan laadukkaita tietoaineistoja. Tällöin oikeellisuus ja minimalistisuus eivät ole suoraan lopullisen tietoaineiston käyttäjän havaittavissa. (Zhang ym. 2011).

HSL:n matkanopeustutkimuksessa pyritään määrittämään keskimääräisen matkanopeuden suhdetta vapaan nopeuden liikennevirtaan eli nopeusrajoitukseen. Keskimääräinen matkanopeus lasketaan linkin pituuden ja matka-ajan suhteena, joten molempien arvojen oikeellisuus on matka-aikatiedon oikeellisuuden lisäksi ensiarvoisen tärkeää. Myös nopeusrajoitustiedon oikeellisuus on hyvin tärkeää, sillä keskimääräistä matkanopeutta verrataan lopulta siihen.

6.2 Matka-aikaa kuvaavat tietoaineistot

Seuraavaksi vertaillaan empiirisesti diplomityön tekemisen aikana löydettyjä HSL:n tutkimusluetteloa koskevia matka-aikatietoaineistoja. Aineistoselvityksessä ilmeni, että kaupallista matka-aikatietoa on Suomessakin saatavilla. Havaittiin, että osa aineistoista on fuusioitu teknologialtaan monen tyyppisten sensorien mittauksista. Monen sensoriteknologian hyödyntämistä perustellaan suuremmalla havaintomäärällä ja siten aineiston laadun parantumisella. On syytä huomioida, että matkanopeudet on aineistoissa laskettu liikennevirran otoksen eli perusjoukon osajoukon liikkeistä.

Tietoaineistoja koskevat päätelmät muodostettiin tiedontuottajalta kysymällä sekä tuotesitteiden, empiiristen tutkimusraporttien, konferenssiesitysten ja testikäytön perusteella. Tietoaineistojen sisällöstä, käsittelyhistoriasta ja laskentatavoista löytyi varsin vähän yksityiskohtaista dokumentaatiota, mikä hankaloitti ja hidasti selvitystyötä. Laskentaan liittyvät tekniset seikat vaikuttavat olevan yrityssalaisuuksia. Salassapitosopimusten vuoksi kaikista aineistoista ei pystytty ilmaisemaan kaikkia asioita.

Ongelmallisesti havaintojen laitejakauma ei tyypillisesti ollut selvillä johtuen anonyymistä tiedonkeruusta. Kaikki tarkastellut tietoaineistot takseja lukuun ottamatta kuvaavat liikenteen sujuvuutta tietynä ajankohtana keskilukujen avulla. Yksityisyydensuoja ei ole tämän vuoksi uhattuna, sillä yksittäinen ajoneuvo ei ole millään tavalla erotettavissa keskiarvoista. Taksien osalta on tiedossa ajoneuvon tunniste, mutta työajalla tehdyt ajosuoritteet eivät liene arkaluontoista tietoa. Tiedontuottajien käyttämien käsittelyprosessien, salausratkaisujen ja tietoturvan laatua ei voitu arvioida, sillä tieto ei ole avoimesti saatavilla.

6.2.1 Digitraffic

Digitraffic on Liikenneviraston liikennetietopalvelu, jonka kautta on saatavissa ajantasaista mittaus tietoa liikenteestä Suomen teiden runkoverkolta. Digitraffic tarjoaa kähes reaaliaikaista informaatiota liikenteen matka-ajoista, matkanopeuksista, sujuvuudesta, häiriöistä ja säästä. Matka-aikatiedot perustuvat rekisterikilpiä tunnistavaan kamerajärjestelmään. Kamerajärjestelmän tuottamien matka-aikatietojen laatua arvioitiin kattavasti Perasto-Bernitzin diplomityössä syys–lokakuun 2009 osalta. Seurantajärjestelmää on pyritty uudistamaan matkapuhelinpaikannukseen pohjautuvaksi. Uudistetun palvelun käyttöönottoajankohdasta ei ollut varmuutta tämän diplomityön alkuvaiheilla.

Matka-aikatietona oli elokuussa 2015 saatavilla kunkin linkin osalta viimeisen 5 minuutin keskimääräiset matka-ajat, edellisen vuorokauden kaikkien 5 minuutin aikajaksojen medianiarvot ja edellisen päivän 12 viikon keskimääräinen sujuvuustieto kyseiseltä viikonpäivältä. Kyseisille tiedoille oli saatavilla myös vastaavat matkanopeusarvot. Käyttäjä voi hakea palvelusta myös LAM-mittauspisteiden keskimääräisiä pistenopeuksia.

Testikäytön perusteella Digitraffic:n matka-aikatiedot kattavat osan pääväylistä, mutta merkittävä osa HSL:n aiemmin mittaamista linkeistä jää seurantajärjestelmän ulkopuolelle. Kameroita on tiheimmin Helsingin, Vantaan, Espoon ja Kauniaisen alueella. Matka-aikatiedot lasketaan kahden kameran väliin jäävälle tieosalle, mitä pidettiin liian alhaisena tarkkuustasona. Kameralinkit eivät vastaa alku- ja loppupisteiltään HSL:n käyttämiä linkejä. Palvelun kautta voi hakea historiallisia matka-aikatietoja vain käyttöhetkeä edeltävän 12 vuorokauden ajalta, joten tulosten poimintaa täytyisi tehdä toistuvasti.

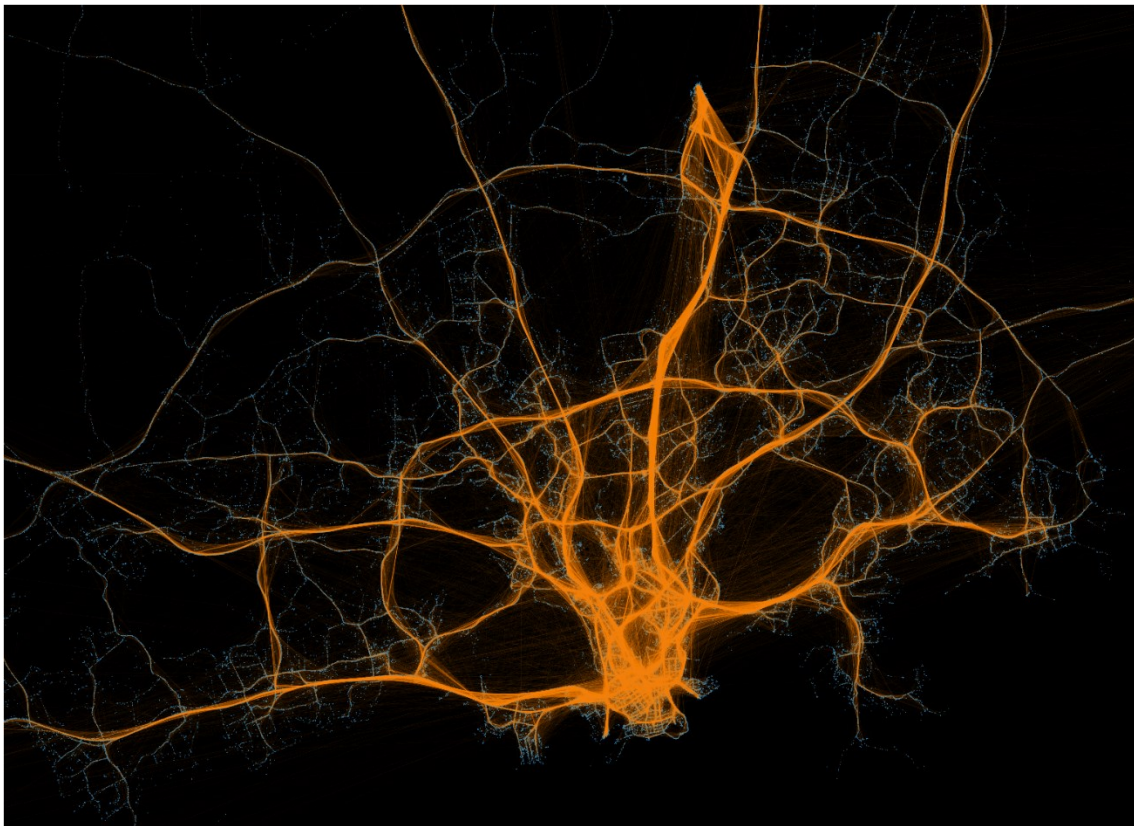
Tämän diplomityön tekemisen alkuvaiheessa matka-aikatietopalvelua oltiin uudistamassa matkapuhelinten verkkopaikannukseen perustuvaksi. Diplomityön tekemisen loppuvaiheilla selvisi, että Liikennevirasto ja tiedontuottaja ovat purkaneet ”Liikenteen anonyymi matka-aikatieto -palvelu Sujuva vuosille 2013–2018” -sopimuksen. Purkamisen johtui siitä, että palvelun tuottaman matka-aikatiedon laatu ei täyttänyt sille asetettua vähimmäistasoa (Liikennevirasto 2015b).

Kamerajärjestelmän kokonaisuus on muodostunut vanhasta ja uudesta kamerajärjestelmästä, jotka mittaavat eri linkkien matka-aikaa (Perasto-Bernitz 2010). Matka-aikatietoa oli tammikuussa 2016 saatavilla ainoastaan vanhan kamerajärjestelmän linkeiltä. Uuden kamerajärjestelmän toiminta lopetettiin kesällä 2014 muualta paitsi pääkaupunkiseudulta (Infotripla 2015). Vanha kamerajärjestelmä tulkittiin uutta kamerajärjestelmää epäluotettavammaksi Perasto-Bernitzin diplomityössä.

6.2.2 Taksi Helsingin taksit

Taksi Helsinki kerää jatkuvasti tietoa taksiensa sijainneista, sekä taksimatkojen alku- ja lähtöpisteistä. Takseissa on käytössä Digital Dispatch -yrityksen Vector 9000 -ajovälityspääte sekä navigaattorisovellus, joka tallentaa päällä ollessaan jatkuvasti ajoneuvon sijaintitietoa. Sijaintitiedot lähetetään palvelimelle, minkä myötä tilanne on seurattavissa reaaliajassa. Sijaintitietoa hyödynnetään muun muassa taksien kokonaistilannekuvan seurannassa sekä uusien kuljetusten ohjauksessa. Sijaintihavaintoja kerätään sekä taksin liikkeessä että ollessa paikallaan. Tietoa on kerätty vuodesta 2006 lähtien. Järjestelmä käsitti tämän diplomityön kirjoitusvaihteessa 1340 taksia. Sijaintitieto päivittyy noin 20 sekunnin – 5 minuutin välein riippuen taksin liikenopeudesta. Mitä nopeammin taksi liikkuu, sitä useammin sijaintitieto tallennetaan ja lähetetään palvelimelle. (Seila 2016)

Taksi Helsingiltä saatiin testiaineistoa yhdeltä vuorokaudelta 1.9.2011. Tietoaaineiston yksi rivi vastaa yhtä sijaintihavaintoa, jonka tietoja ovat auton tunniste, päivämäärä, kellonaika sekä maantieteelliset koordinaatit pituus- ja leveysasteena WGS84-koordinaattijärjestelmässä. Testiaineisto sisälsi n. 666 000 sijaintihavaintoa, jotka riittävät piirtämään pääkaupunkiseudun päätieverkon. Kun pisteet yhdistetään aikajärjestyksessä taksikohtaisesti, saadaan taksien ajoreitit visualisoitua suurpiirteisesti. Jokaisen taksin sijaintihavainnot yhdistettiin aikatiedon perusteella järjestyksessä toisiinsa siten, että jokaisen taksin ajoreitti saatiin esitettyä murtoviivana (engl. polyline). Tarkastelemalla liikeratoja visuaalisesti havaitaan taksien eniten käyttämät reitit (Kuva 14).



Kuva 14 Taksi Helsingin taksien liikeradat syyskuun 2011 ensimmäisenä vuorokautena.

Moni murtoviiva ylittää Helsinkiä ympäröiviä merialueita, mikä indikoi joko liian harvaa sijaintitiedon päivitystiheyttä tai virheellistä paikannustulosta. Arvio taksin todellisesta ajoreitistä saataisiin karttasovituksella, minkä jälkeen sijaintihavaintojen välillä kuljettu matka olisi laskettavissa ja matkanopeudet pääteltävissä. Paikallaan olon aikana kertyvät sijaintihavainnot tulisi suodattaa pois aineistosta, jotta matka-aikoja saataisiin laskettua oikein. Testiaineisto sisälsi myös varsin paljon epärealistisen kaukana edellisestä pisteestä sijaitsevia hajahavainnoja, jotka tulisi suodattaa pois.

Sijaintitiedon ajallisesti harvan päivitysvälin nähtiin luovan liikaa epävarmuutta verkostokuvaukseen sovituksessa. Esimerkiksi 60 km/h nopeudella liikkuva taksi etenee minuutissa kilometrin verran. Tämän vuoksi taksien GPS-sijaintitiedot eivät nykyisellään riitä matkanopeuksien laskentaan ilman edistyneiden verkostokuvaukseen sovitukseen sopivien laskentamenetelmien kehitystä. Mikäli sijainnin päivitystiheyttä kasvatettaisiin tulevaisuudessa, onnistuisi ajoreitin päättely huomattavasti luotettavammin. Mikäli takseja käytettäisiin tietolähteenä, tulisi matkanopeuksien laskennassa huomioida joukkoliikennekaistojen aiheuttamat poikkeamat henkilöautoliikenteeseen verrattuna.

6.2.3 TomTom

TomTom on hollantilainen navigointi-, liikenne- ja karttatuotteiden sekä GPS-urheilukellojen ja liikennettä koskevien tietokantaratkaisujen toimittaja. TomTom:n autonavigaattoreista ja navigaatiosovelluksista kertyviä matka-aikatietoja kerätään anonyymisti tietokantaan, jotta liikkujalle saataisiin luotettava arvio vallitsevasta ruuhkatilanteesta. Yksittäistä käyttäjää ei pystytä missään vaiheessa tunnistamaan. Navigaattoreihin tarjottavaa reaaliaikaista sujuvuustietoa parannetaan fuusioimalla tietokantaan aiemmin kertynyttä kyseistä ajanhetkeä koskevaa historiallista tietoa. (TomTom 2014). Fuusion tulosta hyödynnetään myös dynaamisessa reitityksessä, joka kertoo optimaalisimman reitin tietyllä ajanhetkellä.

TomTom:n laitteiden ja palveluiden käyttäjiä on maailmanlaajuisesti yli 350 miljoonaa. Nopeushavainnoja kertyy valmistajan laitteista 8 miljardia päivässä. Nopeushavainnoja kerätään Euroopassa ajoneuvoon sisäänrakennetuista navigaattoreista, erillistä navigaattoreista, ammattikuljettajien GPS-laitteista, valmistajan sekä 3. osapuolien matkapuhelinsovelluksista, induktiosilmukoista ja kameroista. (TomTom 2014). Historiallisia keskimääräisiä sujuvuustietoja tarjotaan hyödynnettäväksi esimerkiksi liikennesuunnittelussa ja -tutkimuksessa.

TomTom:n tarjoamista historiallista aineistoista tarkasteltiin Custom Travel Times (CTT) ja Custom Area Analysis (CAA) -nimisiä verkkopalveluita, joiden kautta on mahdollista hankkia haluamaansa aikaväliä koskevia liikenteen keskimääräisiä matka-aika- ja matkanopeustietoja. Kyseiset aineistot perustuvat ainoastaan autonavigaattorien tarkkaan GPS-paikannukseen. Palvelimelle siirrettävän sijaintitiedon ajallinen päivitystiheys on 2–3 sekuntia. (sähköposti Clements 2015). GPS-havaintojen sijaintiepätarkkuudesta johtuen alle 10 metriä tieverkon geometriasta poikkeavat havainnot sovitetaan vastaamaan tieverkkoa. TomTom:n mukaan heidän paikannuslaitteiden GPS-sirun sijaintitarkkuus 10 metriä parempi 95 % luottamusasteella. (TomTom 2014).

CTT-palvelusta saa kyselyä keskimääräisiä tietyn reitin matka-aikatietoja pisteiden A ja B välille korkeintaan 75 kilometrin matkalta. CAA-palvelusta käyttäjä voi hakea tieverkon matka-aikatietoja haluamallaan suorakulmaisella aluerajauksella. Laskentaan sisällytettävät segmentit määrittyvät toiminnallisen luokan perusteella. Molemmissa palveluissa käyttäjä määrittää ensin päivämäärät, joiden liikenne otetaan huomioon navigaattorilla varustettujen ajoneuvojen osalta. Sitten käyttäjä määrittää 15 minuutin tarkkuudella aikaikkunat eli aikaryhmät, joiden liikenteelle tietojärjestelmä laskee valittujen päivämäärien osalta keskimääräiset segmenttikohtaiset matka-aika- ja matkanopeustiedot. Yksi aikaryhmä voi siis sisältää tietoa esimerkiksi vuoden 2015 syys- ja lokakuun kaikkien maanantaiden liikenteen sujuvuudesta klo 7.30–8.00.

Tietojärjestelmä prosessoi tietopyynnön, minkä jälkeen tietoaineisto on ladattavissa vektorimuotoisena ESRI Shapefile- tai GML-paikkatietoformaateissa. Sujuvuustiedot ovat lopulta saatavilla lyhyille segmenteille, joiden pituus vaihtelee toisistaan.

HSL:n käyttötarkoitus huomioiden palveluiden hyvinä puolina voidaan pitää etenkin helpokäyttöistä latauspalvelua, tieverkollista kattavuutta, alueellista laajuutta, paikannuksen ja aikatiedon tarkkuutta sekä matka-aikatiedon ajankohdan kattavaa määrittämismahdollisuutta. Huonoina puolina pidettiin aikaryhmien rajoitettua määrää, tuntematonta ajoneuvojen tyyppiä, sekä otoksen rajoittuneisuutta TomTom-navigaattorien esiintymiseen ja käyttöön.

6.2.4 Muut tietoaineistot

HSL:n käyttöön sopivan matka-aikatiedon olemassaoloa selvitettiin ottamalla yhteyttä myös muihin lähes globaalisti toimiviin yrityksiin, joita olivat Google, HERE ja INRIX. Tietoaineistojen ei tulkittu soveltuvan HSL:n käyttötarkoitukseen. Syynä oli joko haluttomuus tiedon jakamiseen, aikarajausmahdollisuuden puuttuminen tai matka-aikatiedon laadun epävarmuustekijät. Lisäksi otettiin yhteyttä Nokia Networks ja Applen edustajiin, mutta heiltä ei saatu vastausta.

6.3 Valmiiden aineistojen sopivuus HSL:n käyttötarkoitukseen

Tässä kappaleessa esitetyt arviot kuvastavat kirjoittajan subjektiivista näkemystä aineistojen sopivuudesta käyttötarkoitukseen eli HSL:n matkanopeustutkimukseen. Kyseessä ei siis ole arvio aineiston tai matka-aikatiedon laadusta. Aineistojen kokonaislaatua on muutenkin mahdotonta vertailla absoluuttisesti, sillä ne on luotu hieman eri käyttötarkoituksiin. Täydellisen matka-aikatiedon sisältävä aineisto ei välttämättä sopisi lainkaan käytettäväksi, mikäli tietoaineiston ominaisuudet eivät vastaa tarpeisiin laajemminkin. Tämän vuoksi on tärkeää arvioida etenkin sopivuutta käyttötarkoitukseen eli matkanopeustutkimukseen.

Käytettävälle tietoaineistolle tunnistettiin matka-aikatiedon laadukkuuden lisäksi seuraavat sisältöä ja palvelua kuvaavat ominaisuudet:

- 1) Saatavilla historiallisesti ja vähintään edellisvuodelta
- 2) Vapaasti määritettävissä olevat aikaikkunat
- 3) Riittävä ajallinen tarkkuus, vähintään 15–30 minuutin ajanjaksoilta
- 4) Sopiva teknologia matka-aikamittausten taustalla
- 5) Hyvä dokumentaatio, joka herättää luottamusta
- 6) Riittävän lyhyet linkit, vähintään risteysväli
- 7) Alueellinen laajuus vähintään 14 kunnan alueelta
- 8) Tieverkollinen kattavuus vähintään vuoden 2011 mittausreittien mukaisesti
- 9) Sopiva tienkäyttäjäprofiili havaintojen taustalla (ei liikaa esimerkiksi raskasta liikennettä, takseja tai julkista liikennettä)
- 10) Tiedossa olevat havaintojen lukumäärät
- 11) Riittävät havaintomäärät jokaisella tieosalla ja jokaisella ajanjaksolla
- 12) Molemmat ajosuunnat eroteltavissa
- 13) Sopivia tilastollisia tunnuslukuja keskiarvon lisäksi (kuten mediaani, keskihajonta tai vinoutuneisuus)
- 14) Tietoaineiston saamisen helppous
- 15) Paikkatietoformaatti
- 16) Kohtuulliset hankintakustannukset
- 17) Palvelun jatkuvuus samanlaisena myös lähivuosina
- 18) Prosessoinnin helppous matkanopeustutkimuksessa

Laatukriteerien täyttymistä arvioitiin Digitraffic:n ja TomTom:n osalta värein (Taulukko 3). Taulokon vihreä väri tarkoittaa numeroidun kriteerin täyttymistä, keltainen osittaista täyttymistä ja punainen puuttellisuutta. Kysymysmerkki indikoi tulkinnassa esiintyvää epävarmuutta. Aineistojen ominaisuuksien sopivuutta käyttötarkoitukseen voitiin myös yleistää (Taulukko 4). Arviot perustuvat kysymysten ja aineistojen testikäytön perusteella tehtyyn tulkintaan.

Taulukko 3 Kriteerien täytyminen eri aineistojen osalta

Kriteeri	Digitraffic v1	TomTom CAA/CTT
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9	?	?
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17	?	?
18		

Taulukko 4 Tarkasteluun otettujen paikkatietoaineistojen ominaisuuksien arviointia värikoodein (Vihreä = hyvä, keltainen = varsin hyvä, oranssi = välttävä, punainen = huono/puuttuva).

	Digitraffic v1	TomTom CTT/CAA
Alueellinen kattavuus		
Tieverkollinen kattavuus		
Ajalliset rajaushmahdollisuudet		
Havaintomäärien riittävyys		
Käyttäjäprofiilin sopivuus		
Historiahakujen mahdollisuus		
Ajallinen resoluutio		
Sopivuus matkanopeus-tarkasteluun		

Testikäytön perusteella tietoaaineistoista paljastui selkeitä eroja. Digitraffic-järjestelmän etuna on suuri havaintojen lukumäärä, maksuttomuus ja reaaliaikainen saatavuus rajapinnan kautta eli jatkuvasti päivittyvässä koneluettavassa muodossa. Haittapuolena sujuvuustiedot kattavat vain päätieverkon, koskevat varsin pitkiä tieosuuksia, eivätkä ole palvelun kautta vapaasti saatavilla menneiltä päivämääriltä. Selvityksen aikaan tietoa oli saatavilla vain vanhan kamerajärjestelmän linkeiltä. Aiemmissä HSL:n selvityksissä havaitut toimintahäiriöt eivät rohkaise järjestelmän hyödyntämiseen. Etenkin rajatun alueellisen kattavuuden vuoksi Digitraffic ei nykyisellään sovellu HSL:n matkanopeustutkimuksen tietolähteeksi. Digitraffic:n kehittymistä kannattaa kuitenkin seurata lähivuosina, sillä pyrkimys uudistaa järjestelmää on lupaava ennusmerkki matkanopeustutkimuksen kannalta.

TomTom-aineistojen hyviä puolia ovat palveluiden selkeä käytettävyys, kattavat päivämäärien ja aikaryhmien asettamismahdollisuudet, tieverkollinen kattavuus sekä monipuoliset tilastolliset tunnusluvut. Haittapuolina pidettiin hinnoittelumallia, aikaryhmien rajoitettua määrää, tuntematonta ajoneuvojakaumaa ja havaintojen määrän riippuvuutta navigaattorin käyttöaktiivisuudesta. CTT-aineiston ei lopulta tulkittu soveltuvan matkanopeustutkimukseen, sillä matka-aikatietojen hakemista yksi kerrallaan pidettiin CAA-aineiston käyttämistä vaikeampana ja kalliimpana ratkaisuna.

Selvityksen perusteella TomTom:n CAA-aineiston ulkoinen laatu on riittävää käyttötarkoitukseen. Se soveltuu ominaisuuksien perusteella matkanopeustutkimukseen toivotussa laajuudessa. Soveltuvuus on hyvää tasoa, vaikka joillain linkeillä ja tieverkon muilla osilla havaintomäärät jäävätkin toivottua alhaisemmaksi. Tietoaaineiston sisäisen laadun varmistamiseksi testiaineistolle täytyi vielä tehdä erinäisiä laatutarkasteluja.

6.4 TomTom-testiaineiston laatutarkastelut

Seuraavaksi arvioidaan testikäyttöön saadun tietoaineiston sisäistä laatua eli matkaneustiedon laatua referenssitietoon nähden.

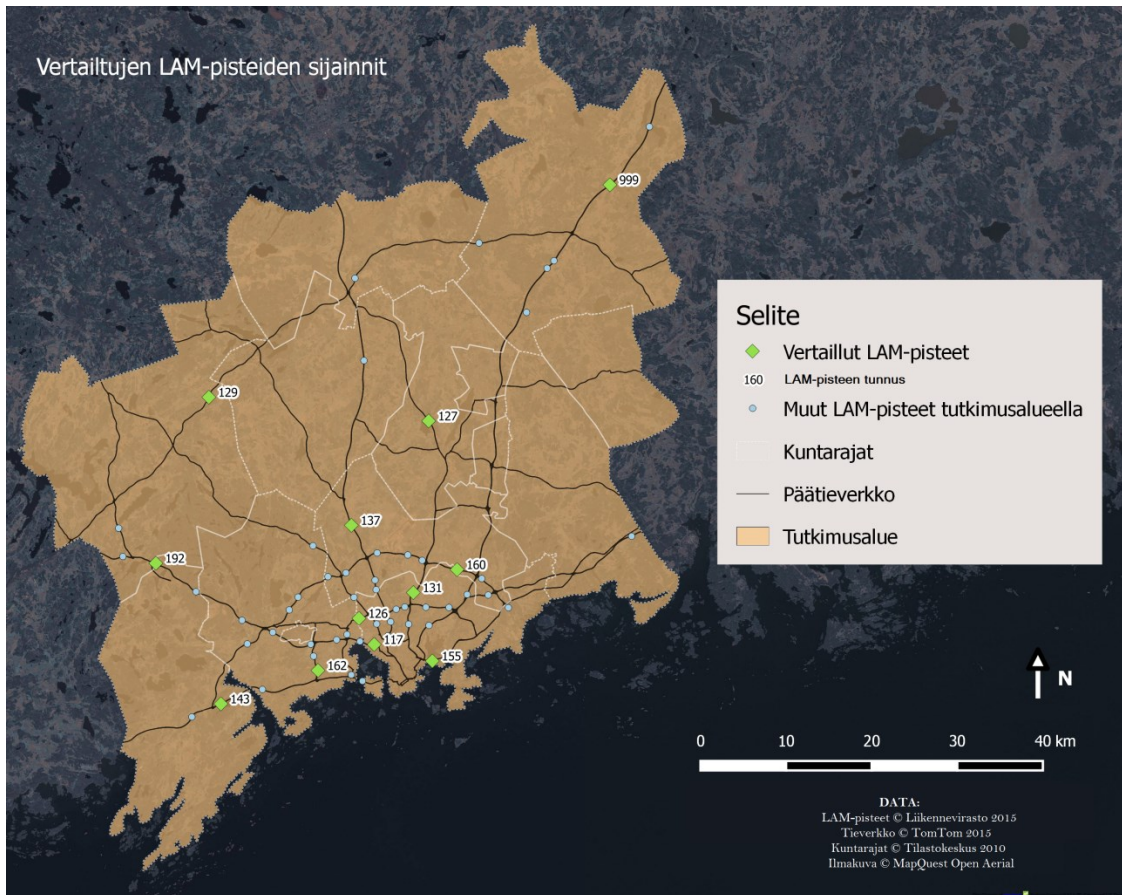
6.4.1 Vertailu LAM-pisteiden keskinopeuksiin

TomTom CAA-testiaineistoa saatiin koko tutkimusalueelta aineiston sopivuuden ja laadun arvioimiseksi. Testiaineisto oli ajanjaksolta 1.9.–1.10.2015, käsittäen havaintoja arkipäiviltä maanantai, tiistai, keskiviikko ja torstai. Havaintopäiviä sisältyi ajanjaksoon 19 kappaletta. Aikaryhmiksi valittiin 7.00–7.30, 7.30–8.00, 8.00–8.30, 8.30–9.00, 16.00–16.30, 16.30–17.00 sekä ”muut”. ”Muut”-aikaryhmä sisälsi edellä mainittujen aikaryhmien väliin ajoittuvan liikenteen keskimääräistä sujuvuustietoa.

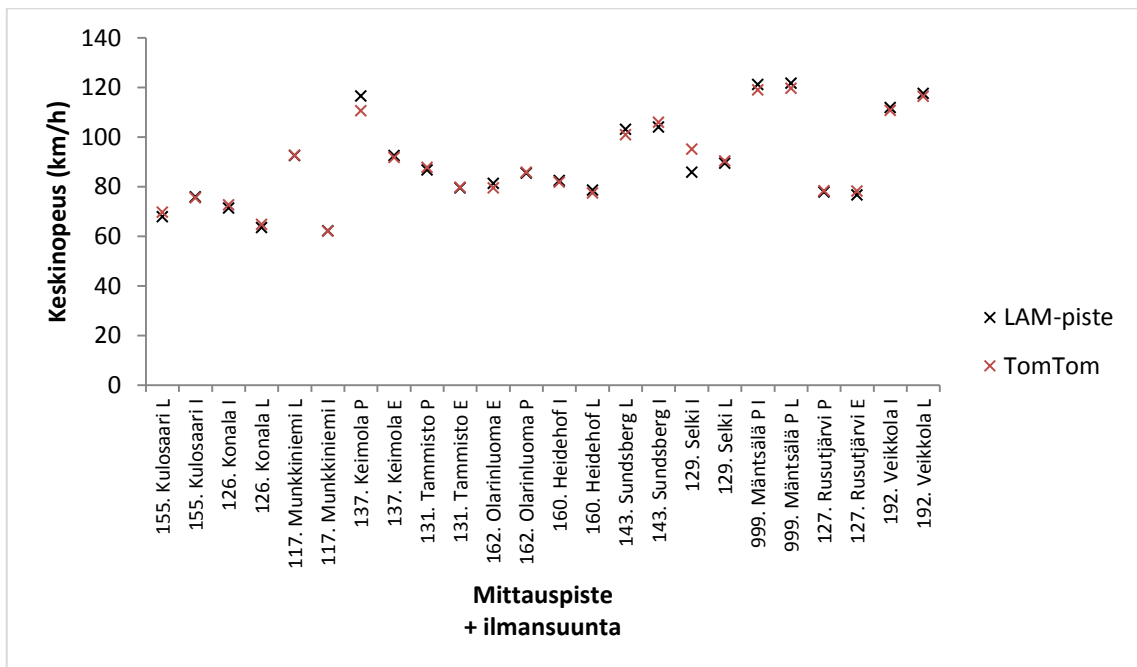
Vertailu tehtiin keskimääräisten pistenopeuksiin nähden, koska tässä vaiheessa ei vielä ollut käytettävissä matkaneus-referenssiarvoja. Keskimääräiset pistenopeudet haettiin Liikenneviraston Extranetin Tiira-portaalista 12 LAM-pisteen osalta. LAM-pisteiden sijainnit on esitetty kuvassa 15. Keskimääräiset pistenopeudet saatiin jokaiselle ajanjakson vuorokaudelle tuntikohtaisesti. Näistä laskettiin koko ajanjaksoa koskevat tuntikohtaiset havaintomäärillä painotetut pistenopeuksien aritmeettiset keskiarvot, joita käytettiin lopulta referenssiarvoina. LAM-aineistosta valittiin vain henkilöautoja ja pakettiautoja edustavat arvot.

Testiaineiston puolen tunnin aikaryhmien keskinopeuksista laskettiin koko tuntia koskeva havaintomäärällä painotettu keskiarvo. Testiaineistosta valittiin LAM-pistettä mahdollisimman lähellä oleva oikean suuntainen segmentti. Valitut segmentit olivat pituudeltaan n. 50–300 metriä.

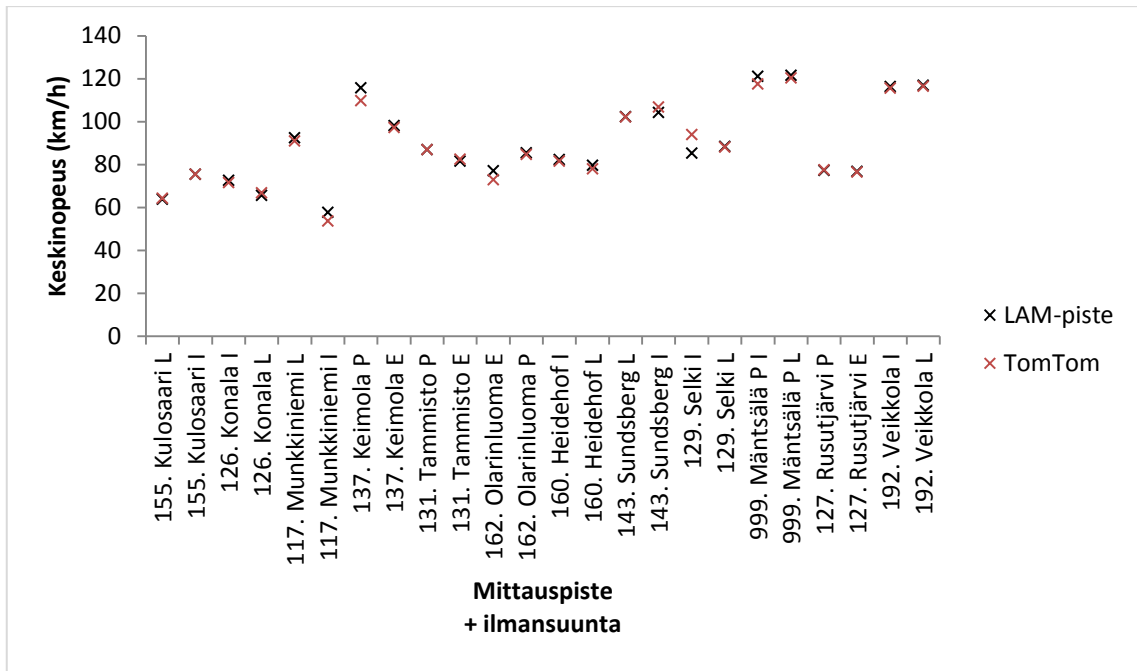
Laskennan tuloksena saadut keskimääräiset pistenopeudet ja keskimääräiset matkaneudet on esitetty molempien arvojen osalta kuvissa 16, 18 ja 19. Tulokset on ilmoitettu kuvissa erikseen molempiin ajosuuntiin. LAM-pisteen nimen perässä on ajosuuntaa kuvaava ilmansuunnan lyhenne P, E, L tai I.



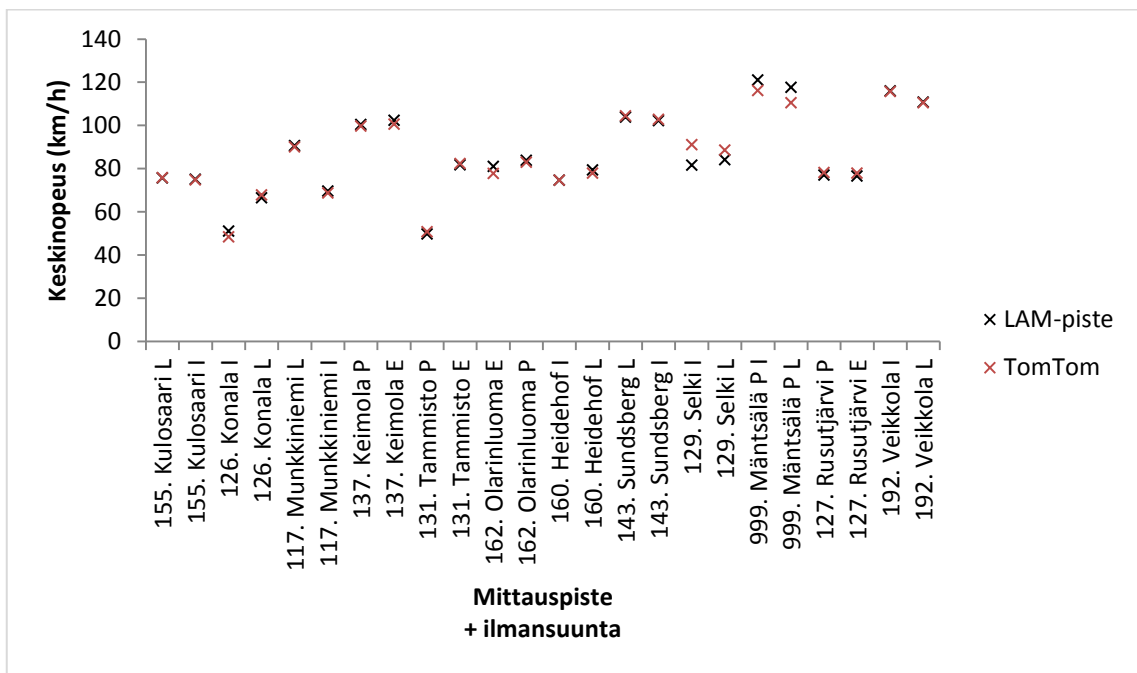
Kuva 15 Referenssiaineiston lähteenä käytettyjen LAM-pisteiden sijainti tutkimusalueella.



Kuva 16 Klo 7.00–8.00 keskinopeudet LAM-pisteen kohdalla LAM-aineistosta ja TomTom-testiaineistosta laskettuna.



Kuva 17 Klo 8.00–9.00 keskinopeudet LAM-pisteen kohdalla LAM-aineistosta ja TomTom-testiaineistosta laskettuna.



Kuva 18 klo 16.00–17:00 keskinopeudet LAM-pisteen kohdalla LAM-aineistosta ja TomTom-testiaineistosta laskettuna.

Taulukko 5 TomTom-testiaineiston keskimääräisen matkanopeuden suhteellinen poikkeama LAM-pisteen keskimääräisestä pistenopeudesta.

LAM-piste	Poikkeama (%) klo 7-8	Poikkeama (%) klo 8-9	Poikkeama (%) klo 16-17	Nopeus- rajoitus
155. Kulosaari L	2,55	0,59	0,29	70
155. Kulosaari I	-0,64	0,05	-0,43	70
126. Konala I	1,84	-1,40	-5,15	80
126. Konala L	1,94	1,70	2,20	80
117. Munkkiniemi L	0,23	-1,60	-0,65	60
117. Munkkiniemi I	-0,20	-7,07	-1,39	100
137. Keimola P	-5,06	-5,08	-0,74	120
137. Keimola E	-0,89	-0,93	-1,71	100
131. Tammisto P	1,20	0,08	2,26	80
131. Tammisto E	0,25	1,19	0,72	100
162. Olarinluoma E	-2,30	-5,45	-3,90	80
162. Olarinluoma P	0,39	-0,79	-1,14	80
160. Heidehof I	-0,71	-0,85	-0,08	80
160. Heidehof L	-1,60	-2,06	-1,83	80
143. Sundsberg L	-2,13	-0,09	0,57	100
143. Sundsberg I	1,93	2,45	0,56	100
129. Selki I	10,67	10,11	11,50	100
129. Selki L	0,92	-0,30	5,31	100
999. Mäntsälä P I	-1,86	-3,04	-4,07	120
999. Mäntsälä P L	-1,62	-0,97	-6,04	120
127. Rusutjärvi P	0,62	0,36	1,55	80
127. Rusutjärvi E	1,89	-0,50	1,69	80
192. Veikkola I	-1,03	-0,74	-0,19	120
192. Veikkola L	-0,94	-0,40	-0,29	120

Taulukossa 5 on esitetty TomTom-aineistosta laskettujen matkanopeuksien suhteellinen poikkeama LAM-keskinopeudesta sekä nopeusrajoitus mittauspisteen kohdalla. Esimerkiksi luku 2,55 tarkoittaa, että TomTom:n keskinopeusarvo on 2,55 % suurempi kuin LAM-pisteen arvo.

Tulokset vastaavat toisiaan hyvin taulukon värikoodattuja poikkeamia lukuun ottamatta. LAM-pisteen '129. Selki I' kohdalla keskinopeudet poikkeavat toisistaan eniten. Nopeusrajoitukset ovat samoja TomTom-aineistossa ja Digiroad-referenssiaineistossa.

Taulukossa 6 on esitetty molempien aineistojen havaintojen kokonaismäärä havaintoajan-jaksolla tiettyä tuntia kohden. Pienimpiä TomTom-havaintomäärät ovat LAM-pisteen '127. Rusutjärvi' ja '129. Selki' kohdalla. Suurimpia TomTom-havaintomäärät ovat LAM-pisteiden '126. Konala' ja '131. Tammisto' kohdalla.

Taulukko 6 Havaintojen lukumäärät havaintoajanjakson tietyn tunnin aikana.

LAM-piste	LAM klo 7–8	TomTom klo 7–8	LAM klo 8–9	TomTom klo 8–9	LAM klo 16–17	TomTom klo 16–17
155. Kulosaari L	29 823	134	30 872	115	11 897	85
155. Kulosaari I	13 874	51	15 905	70	53 275	131
126. Konala I	66 209	304	68 359	374	60 893	255
126. Konala L	70 590	199	68 804	346	67 830	226
117. Munkkiniemi L	16 877	49	20 860	100	36 560	124
117. Munkkiniemi I	40 903	91	35 576	160	22 970	106
137. Keimola P	26 509	92	22 077	58	63 818	62
137. Keimola E	66 818	137	52 113	166	29 752	150
131. Tammisto P	41 947	201	46 304	227	64 527	321
131. Tammisto E	69 966	341	59 564	315	56 568	266
162. Olarinluoma E	40 559	145	40 855	211	38 598	141
162. Olarinluoma P	43 813	136	44 784	207	38 362	161
160. Heidehof I	15 758	137	15 579	175	35 903	250
160. Heidehof L	26 678	210	24 004	209	21 696	196
143. Sundsberg L	7 780	16	9 752	44	21 523	82
143. Sundsberg I	24 530	102	19 110	122	11 472	36
129. Selki I	2 879	39	2 753	30	4 794	29
129. Selki L	4 617	21	3 509	26	3 599	37
999. Mäntsälä P I	11 877	84	12 960	118	23 221	141
999. Mäntsälä P L	18 048	102	13 972	112	14 992	113
127. Rusutjärvi P	5 510	16	4 498	27	11 344	40
127. Rusutjärvi E	10 830	32	7 805	30	6 500	30
192. Veikkola I	30 221	234	20 699	205	12 305	126
192. Veikkola L	10 308	112	9 812	101	29 821	205

LAM-arvot ovat keskimääräisiä pistenopeuksia, kun taas TomTom-aineiston keskinopeudet ovat noin 50–300 metrin mittaisille lyhyille segmenteille laskettuja matkanopeuksia. TomTom-aineistosta valittiin vertailuun LAM-pistettä lähin segmentti molempiin suuntiin. Kirjallisuusosiossa todettiin, pistenopeudet eivät vastaa koko tieosuuskien matkanopeuksia maantieliikennettä lukuun ottamatta. LAM-pisteet sijaitsevat maantiemäisissä olosuhteissa, joten tietoa voidaan pitää luotettavana.

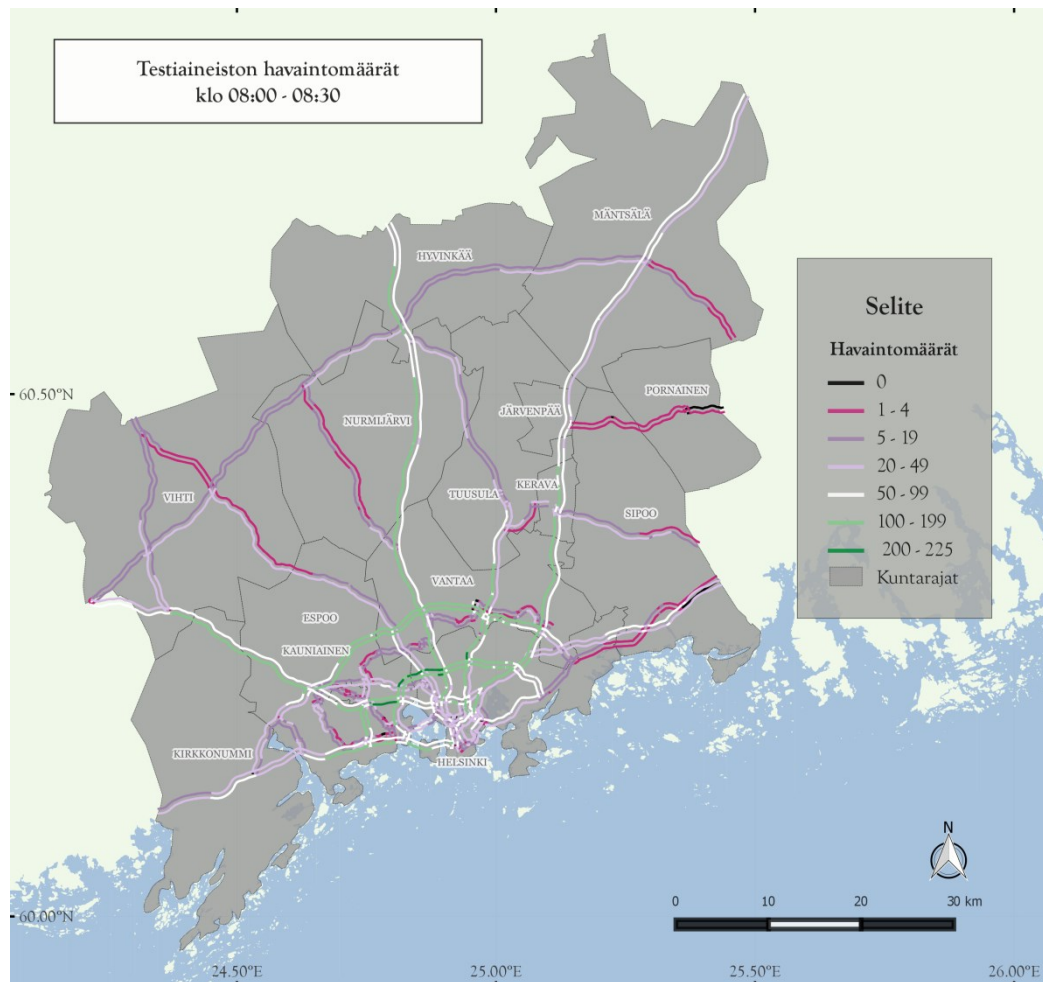
LAM-pisteiden keskimääräisten pistenopeuksien osalta mahdollisia virhelähteitä ovat ajoneuvotyypin luokittelu ja ajoittainen toimimattomuus. LAM-aineistossa oli lisäksi yksittäisiä päiviä ilman tulosta, minkä ei tässä vertailussa oletettu vaikuttavan merkittävästi koko ajanjakson keskiarvoon. Puuttuvia arvoja ei sisällytetty keskiarvon laskentaan.

Vertailu ei kuvasta TomTom-aineiston laatua koko linkkiverkolla. Etenkin liikennevaloja tai vähiten havaintoja sisältävät linkit puuttuvat vertailusta. Näillä linkeillä olisikin syytä tehdä tulevaisuudessa lisälaatutarkasteluja, joita ei nyt voitu tehdä sopivan referenssiaineiston puutteen vuoksi.

6.4.2 Havaintomäärien vaihtelu

Kuten aiemmin on todettu, matka-aikatiedon laatu riippuu paljon näytekoota eli havaintomääristä. Liikennemäärät vaihtelevat liikenneverkolla liikennesuoritteiden ja ajan mukaan, minkä seurauksena saatavat havaintomäärätkin vaihtelevat spatio-temporaalisesti. TomTom:n aineiston tapauksessa matka-aikatietoa kertyy lisäksi vain navigaattorin ollessa päällä. Matka-aikatiedon laatu ei tämän vuoksi ole homogeenistä, vaan spatio-temporaalisesti vaihtelevaa. Testiaineistosta tuotettiin HSL:n sisäiseen käyttöön aikasarjakartat, joiden perusteella pystyttiin arvioimaan näytemääriä ja niiden ongelmakohtia.

Kuvassa 19 on esitetty tarkastellun testiaineiston havaintomäärät suunnittain klo 8.00–8.30. Havaintomäärät linkkiä kohden vaihtelevat välillä 0–225 ollen korkeimmillaan Kehä I:llä ja Kehä III:lla sekä pääkaupunkiseudun säteittäisillä väylillä keskustan suuntaan. Havaintomäärät laskevat siirryttäessä pääkaupunkiseudulta tutkimusalueen ulkorajoja kohti. Havaintomäärien havaittiin olevan paikoin varsin vähäisiä. Joillain mittausverkoston segmenteillä havaintomäärät jäivät alle 5 havainnon tai jopa nolleen. Havaintomääräongelmat sijoittuvat enimmäkseen vuoden 2011 mittausverkoston ulkopuolelle.



Kuva 19 Testiaineiston havaintomäärät halutun tieverkon osalta klo 8.00–8.30.

Havaintomäärien vaihtelusta voidaan päätellä, että matka-aikatieto on laadukkainta matkanopeustutkimuksen kannalta tärkeimmillä eli runsasliikenteisillä väylillä. Mittaustuloksia saadaan näissä tapauksissa huomattavasti enemmän kuin aiemmalla kelluvan auton mittausmenetelmällä. Tässä selvityksen vaiheessa oli tiedossa, että lopullimm aineisto sisältäisi lähes kaksinkertaisen määrän havaintovuorokausia, mikäli aineisto hankittaisiin. Lisäksi yhdistettyjen aikaryhmät määritettiin tunnin mittaisiksi puolen tunnin sijasta. Tällöinkään ei kuitenkaan olisi täysin varmaa, saataisiinko matka-aikatietoa riittävästi jokaiselta määritellyltä linkiltä.

6.4.3 Keskihajonnan ja variaatiokertoimen ero

Vielä oli syytä tarkastella matkanopeuksien keskihajontaa tieverkolla. Kuten kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, liikenteen ruuhkautumistilanteeseen liittyvä nopeuksien keskihajonnan kasvaminen lisää havaintomäärien vaatimuksia. Ajoneuvojen nopeuksien keskihajonta on suurinta tieverkon osilla, joilla esiintyy esimerkiksi ruuhkaisuutta, liikennevaloja, risteyksiä tai kevyttä liikennettä.

Kuvassa 20 on esitetty TomTom-testiaineiston matkanopeuksien keskihajonnat ja variaatiokertoimet pääkaupunkiseudulla klo 8.00–8.30. Kuvaparista huomataan, että esimerkiksi Tuusulanväylän matkanopeuksien variaatiokerroin on varsin alhainen korkeasta keskihajonnasta huolimatta. Variaatiokertoimet ovat suurimpia kantakaupungissa ja yleisemmin liikennevalojen läheisyydessä, koska valojen vaihtumista odottavien ajoneuvojen matka-aika on erittäin suurta. Tilastollisen merkitsevyyden saavuttamiseksi havaintoja tarvitaan sitä enemmän, mitä suuremmaksi variaatiokerroin kasvaa.

6.4.4 Välitulkinta laadusta

TomTom-aineiston arvioitiin sopivan käyttötarkoitukseen eli matkanopeustutkimukseen. Sisäisen laadun arvioitiin paranevan riittävästi, kun havaintovuorokausia saataisiin koko tutkimusajanjaksolta. Kirjallisuuden perusteella segmenttien matka-aikatietoja voidaan summata varsin luotettavasti pidemmän linkin matka-ajan määrittämiseksi. Aineisto päätettiin hankkia.



Kuva 20 TomTom-aineiston matkanopeuksien keskihajonnat ja variaatiokertoimet pääkaupunki-seudulla klo 8.00–8.30.

7 HSL:n MATKANOPEUSTUTKIMUS 2015

Tässä luvussa kuvataan HSL:n vuoden 2015 matkanopeustutkimusta varten hankitulle lopulliselle TomTom:n Custom Area Analysis -paikkatietoaineistolle kehitetyt käsittely- ja laskentamenetelmät. Aineisto poikkeaa aiemmin käsitellystä testiaineistosta. Menetelmäkuvauksen jälkeen vertaillaan aluksi mahdollisina pidettyillä laskentamalleilla tuotettuja matkanopeusarvoja näitä vastaaviin matkanopeus-referenssiarvoihin. Luvun lopussa esitetään esimerkkejä sujuvuustuloksista karttojen ja lukuarvojen muodossa, sekä tulkitaan näitä tiedon laadun näkökulmasta.

7.1 Lopullisen tietoaaineiston ominaisuudet

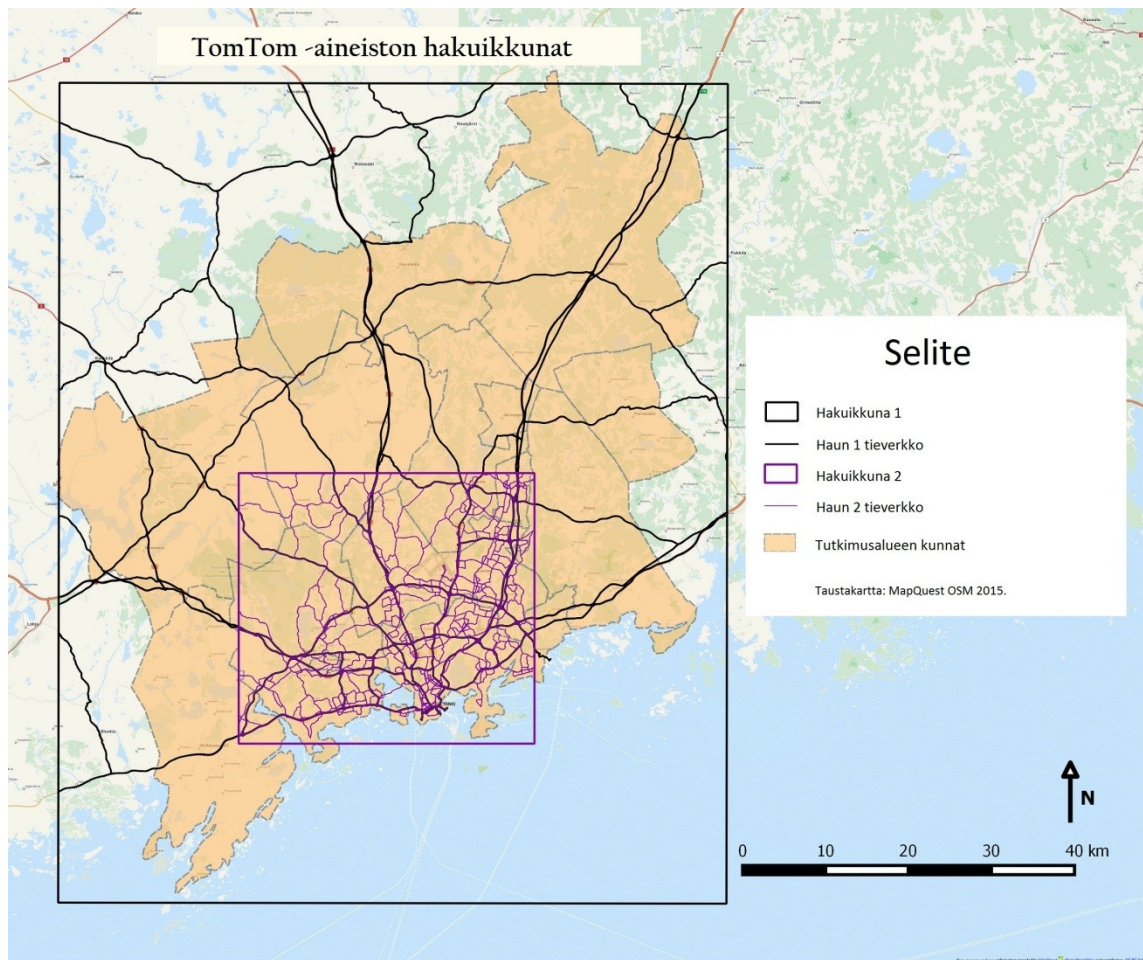
Hankittu TomTom-tietoaaineisto sisältää vuoden 2011 linkkien sekä nyt määritettyjen uusien linkkien keskimääräiset matka-aika- ja matkanopeustiedot syksyn 2015 osalta. Sujuvuustiedot koskevat tutkimusajanjakson 31.8.–3.11.2015 arkipäivien maanantai-torstai ajoneuvoliikennettä aikaryhmiin jaettuna ja TomTom-autonavigaattorien osalta. Aikaryhmien 7:ään rajoitettu lukumäärä koettiin ongelmaksi, joten aikaryhmät täytyi valita huolellisesti. Aikaryhmiksi valittiin lopulta vuoden 2011 aikaryhmiin ja HSL:n henkilöliikennettä kuvaavan HELMET 2.1 –liike-ennustemallin ruuhkatunteihin perustuen seuraavat aikavälit:

- 1 7.30–08.00
- 2 8.00–08.30
- 3 8.30–09.00
- 4 9.30–14.30
- 5 15.30–16.00
- 6 16.00–16.30
- 7 16.30–17.00

Aikaryhmien 1 ja 2 arvoista muodostetaan käsittelyprosessissa aikaväliä 7.30–8.30 vastaavat tulokset ja aikaryhmien 6 ja 7 arvoista aikaväliä 16.00–17.00 vastaavat tulokset. Näin tehdään, jotta päästään vertailukelpoisiin tuloksiin ja säilytetään silti puolen tunnin aikaryhmien tarkastelumahdollisuus. Yhdistys tehdään laskemalla aikaryhmien matka-ajoista havaintomäärällä painotettu aritmeettinen keskiarvo.

Hankittu tietoaaineisto koostuu lyhyistä segmenteistä, joille on geometrian lisäksi määritelty ominaisuustietona pituus, kesänopeusrajoitus, tieluokkakoodi, tien nimi sekä jokaisen aikaryhmän keskimääräiset matka-ajat ja matkanopeudet, matkanopeuksien keskihajonta ja keskimääräiset matkanopeudet 5 persentiiliyksiköin välein. Segmenttien pituus vaihtelee välillä 1–1552 metriä, keskiarvon ollessa noin 91 metriä.

Tietoaaineistossa kuvataan molemmat ajosuunnat erillisinä segmentteinä. Segmenttejä on joissain kohdin tieverkkoa päällekkäin. Aineistot haettiin hinnoittelumallista johtuen kahdella hakuikkunalla TomTom:n tieluokkakoodien perusteella (Kuva 21). Ensin haettiin koko alueelta ajoneuvoliikenteen kannalta tärkeimmät tiet eli tieluokat 0–3. Sitten haettiin pääkaupunkiseudulta muitakin tarvittavia teitä, joiden tieluokka on 4–5. Hakuikkunat rajattiin siten, että tietoa saatiin kaikilta tarvittavilta linkeiltä.

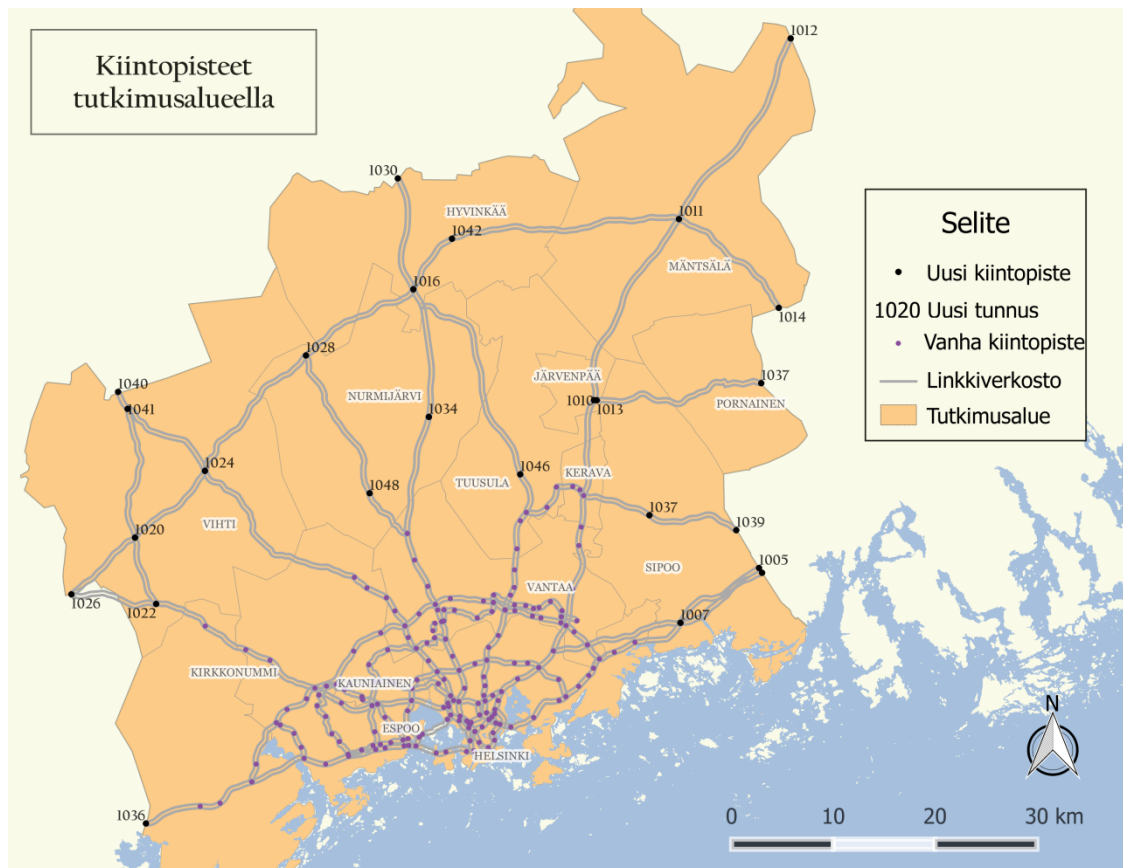


Kuva 21 Käsittelyprosessin lähtökohta eli hakuikkunoiden sisään jäävät tieverkkoaineistot.

7.2 Aineiston käsittelyprosessi

Raakamuotoinen aineisto ei lähtökohtaisesti vastannut aiempien matkanopeustutkimusten linkkejä, vaan sisälsi tietoa sujuvuuden alueellisesta vaihtelusta huomattavasti kattavammin ja lyhyemmistä osista eli segmenteistä koostuen. Tämän vuoksi oli kehitettävä prosessi, jolla saadaan identifioitua tietyille linkille kuuluvat segmentit ja laskettua näistä linkille yleistetyt sujuvuusarvot. Lisäksi mittausverkostoa laajennettiin kattamaan haluttu tieverkko luomalla uusia linkkejä ja kiintopisteitä (Kuva 22).

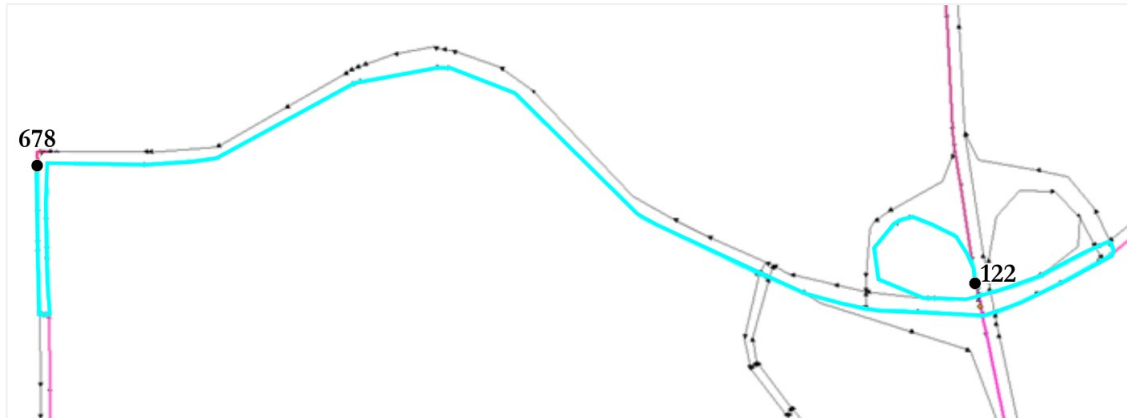
Aineiston käsittely ja laskennan automatisaatio toteutettiin kaupallisessa ESRI:n ArcGIS 10.2.2 -paikkatieto-ohjelmistoympäristössä. Käytössä oli ohjelmiston Advanced-tason lisenssi. Syitä ohjelmiston valintaan olivat laaja geoprosessointikirjasto, käytössä oleva lisenssi, reititysmahdollisuudet Network Analyst -lisäosalla sekä omien työkalujen toteuttamismahdollisuus ArcPy-skriptauksella. Avoimen lähdekoodin QGIS-ohjelmiston ei todettu riittävän reititystoiminnoiltaan. Avoimen lähdekoodin PostgreSQL-tietokantaohjelmiston PostGIS -laajennoksen pgRouting-toiminnallisuus saattaisi sopia reititystarkoituksiin, mutta tätä ei selvitetty. Lähes kaikki tämän diplomityön kartoista tuotettiin QGIS:llä monipuolisista ja moderneista visualisointiominaisuuksista johtuen. Murtoviivojen piirron pehmennyksestä (engl. smoothing) koettiin olevan suurta hyötyä karttojen laadun kannalta.



Kuva 22 Uudet ja vanhat kiintopisteet tutkimusalueella.

Tietyille linkille kuuluvien segmenttien identifiointi koko tieverkkoaineistolta toteutettiin optimoimalla lyhimpiä reittejä linkkien päätepisteiden välille. Tämä tehtiin ArcGIS:n Network Analyst –lisäosan Route –algoritilla, joka on ESRI:n mukaelma Dijkstran algoritmista. Reititystuloksista identifioitiin linkille kuuluvat segmentit käyttäen Network Analystin Copy Traversed Edges –toimintoa, jolla tallennettiin reititystulokseen sisältyvät segmentit linkkitunnusineen uudeksi tietokantatauluksi. Tämän taulun linkkitunnusten perusteella laskettiin matkanopeustutkimuksen lopulliset linkkikohtaiset tulokset tämän diplomityön osana ohjelmoidulla Python-skriptillä. Skripti suoritetaan ArcGIS-ympäristössä geoprosessointityökaluna eli graafisen käyttöliittymän avulla.

Reititystä varten täytyi ensin luoda paikkatietokuvaus aiempien matkanopeustutkimusten linkkien päätepisteistä, joita kutsutaan tästä lähtien reitityspisteiksi. Lähtökohtana reitityspisteiden luomisessa käytettiin aiemman mittauskerran kiintopistekuvauksia. Yksi kiintopiste kuvattiin yhtenä tai useana reitityspisteinä, sillä risteyksessä sijaitseva kiintopiste on tyypillisesti osa useaa linkkiä. Mikäli reitityspisteiden avulla luotu reitti ei vastannut haluttua linkkiä, lisättiin välipisteitä tai siirrettiin reitityspisteitä vastaamaan TomTom-tieverkkoa. Reititystä jatkettiin iteratiivisesti korjaten, kunnes reititystulokset vastasivat haluttuja linkkejä. Kuvassa 23 näkyy esimerkki reititysvirheestä, joka johtuu siitä, että molemmat reitityspisteet sijaitsevat ajosuunnan kannalta väärän segmentin puolella. Reitityspisteet täytyi tässä tapauksessa siirtää ajosuunnan mukaan oikeiden segmenttien kohdalle. Reitityspisteistä luotiin kaksi erilaista versiota. Ensimmäinen versio sisältää linkit tarkimmalla tasolla sekä reittien laajennokset. Toinen versio vastaa vuoden 2011 tuloskartoilta käytettyjä yhdistettyjä linkkejä. Tarkemmassa versiossa on yhteensä 1043 reitityspistettä.



Kuva 23 Esimerkki virheellisestä reititystuloksesta pisteestä 678 pisteeseen 122.

Reititustulosten korjaamisvaiheessa käytettiin apuna aiempien matkanopeustutkimusten suunnittelukarttoja, paikkatietoaineistoja, dokumentaatioita, teksti- ja taulukkomuotoisia reittikuvauksia sekä vuoden 2011 mittausajoneuvon GPS-paikannettuja ajoreittigeometrioita. Reititustulosten tarkastelu, korjaus ja hienosäätö olivat työmäärältään varsin suuria vaiheita. Reitituspisteitä voidaan tulevaisuudessa käyttää seuraavan matkanopeustutkimustutkimuksen toteuttamisessa. Mikäli tulevaisuudessa käytettävän tietoaiteiston tieverkon geometria on pysynyt samana, ei reitituspisteitä tarvitse muokata lainkaan.

Seuraavana vaiheena linkkiverkostoa jatkettiin tutkimusalueen rajalle saakka. Uudet kiintopisteet luotiin ja sijoitettiin tutkimusaluetta kuvaavia karttoja, ilmakuvia sekä liikennemäärätietoja hyödyntämällä. Pääperiaatteena oli se, että uudet linkit ovat mahdollisimman homogeenisiä liikennemäärän suhteen. Myös nopeusrajoitusten vaihtelua pyrittiin minimoimaan. Uusia kiintopisteitä sijoitettiin lopulta tieverkkokuvauksen tärkeisiin risteuksiin. Niille luotiin tunnuksset, jotka ovat aiemmista kiintopisteistä poiketen arvoltaan suurempia kuin 1000. Kuvasta 26 havaitaan, että uudet linkit ovat huomattavasti aiempia pidempiä. Tämä johtuu siitä, että uudet linkit sijoittuvat maanteille, joiden matka-ajan vaihtelu on kaupunkimaista liikennettä pienempää. Linkkejä syntyi lopulta 514 kappaletta. Vuonna 2011 oli käytössä 456 linkkiä ja 212 yhdistettyä linkkiä. Linkkien kokonaispituus oli vuonna 2011 688 kilometriä. Vuoden 2015 linkkien kokonaispituus on 1464 kilometriä, mikä merkitsee 112 % lisäystä kokonaispituudessa.

Linkkikohtaisten tunnuslukujen laskentaan kehitettiin prosessi ja ArcPy-skripti, joka laskee kullekin linkille kappaleessa 7.2.1 selitettävät keskiarvot ja muut tunnusluvut aikaryhmäkohtaisesti. Skripti valitsee yksi kerrallaan jokaiselle uniikille linkkitunnukselle kuuluvat segmentit, tallentaa segmentit uudeksi paikkatietoaineistoksi jälkitarkastelua varten sekä laskee linkille tunnusluvut. Linkkigeometriat ja niihin liittyvät tunnusluvut yhdistetään yhteiseksi paikkatietoaineistoksi, joka sisältää koko matkanopeustutkimukseen kuuluvan tieverkoston. Tieverkosto ei tässä vaiheessa ole topologisesti yhtenäinen, mutta riittää tulosten kartografiseen esittämiseen.

Käsittelyprosessi pääpiirteissään:

1. Tarkastele tietoaaineistoja silmämääräisesti. Kiinnitä huomiota etenkin siihen, että molemmat aineistot ovat oikean laajuisia ja tarvittu ominaisuustiedot löytyvät.
2. Liitä kaikkien aikaryhmien matka-aikataulut yhdistettyyn tieverkkoon tekemällä tietokantaliitos (Join-toiminto).
3. Yhdistä 2 tieverkkoa yhdeksi (Merge-toiminto).
4. Laske suuntakulma joka segmentille sen päätepisteiden koordinaattien perusteella.
5. Määritä joka segmentille digitointisuuntaa vastaava sallittu ajosuunta 'FT' verkostomallin luontia ja reititystä (vaihe 6 ja 9) varten.
6. Luo tieverkosta reitityskelpoinen verkostomalli (Network Dataset) sallitut ajosuunnat huomioiden.
7. Luo linkkien päätepisteitä kuvaavat reitityspisteet molempiin ajosuuntiin. Ominaisuustietoina ovat seuraavat kentät kentät:
 - o NRO: kiintopisteen tunnus
 - o RouteID: yksikäsitteinen linkkitunnus väliviivalla erotettuna. Tietyn tieosan eri ajosuunnilla on eri linkkitunnus, esim. 123–678 ja 678–123.
 - o order: reitityspisteen järjestysnumero linkillä.
 - o newRoute: 1, jos linkki luotiin vuonna 2015. Muuten 0. Uudet tunnistaa myös linkkitunnuksesta, mikäli siinä esiintyy kiintopisteen tunnus > 1000.
8. Järjestä reitityspisteet kasvavasti arvojen newRoute, RouteID ja order mukaan.
9. Reititä linkkejä vastaavat ajoreitit käyttäen reitityspisteitä, verkostomallia ja Network Analyst:n Dijkstran algoritmia.
10. Tarkasta reittigeometriat ja lisää välipisteitä tai siirrä reitityspisteitä.
11. Toista vaiheita 8-10, kunnes reititystulokset vastaavat haluttuja linkkejä.
12. Identifioi reittigeometrioihin kuuluvat segmentit ajamalla Network Analyst:n Copy Traversed Edges –toiminto Python-komentoikkunassa. Linkeille kuuluvat segmentit tallentuvat uudeksi tauluksi.
 - a. Liitä muodostuneeseen tauluun oikeat linkkitunnukset tekemällä tietokantaliitos.
 - b. Liitä muodostuneeseen tauluun vaiheen 5 jälkeinen taulu eli matka-aikatiedot. Tallenna taulu, jotta tiedot säilyvät.
13. Toista vaiheet 8–12 toisen ajosuunnan reitityspisteille.
14. Liitä kahden ajosuunnan TraversedEdges-tulokset yhdeksi aineistoksi (Merge-toiminto).
15. Tarkastele nopeusrajoituksia ja korjaa SQL-lauseilla selvimmän virheelliset.
16. Laske linkkikohtaiset tunnusluvut kehitettyä ArcPy-skriptiä käyttäen.
17. Yhdistä edellisten mittauskertojen matkanopeustulokset tekemällä tietokantaliitos RouteID:n perusteella.
18. Yhdistä edelliskohdan tulokset siistittyyn tieverkkokuvaukseen.
19. Luo liikenteen sujuvuutta ja tiedon laatua kuvaavat karttasarjat.

Käsittelyprosessi on seuraavalla kerralla huomattavasti helpompi samaa tieverkkokuvausta käytettäessä, kun reitityspisteet on jo kertaalleen luotu ja hienosäädetty. Käsittelyprosessista luotiin HSL:n käyttöön tarkempi tekninen ohje, joka sisältää yksityiskohtaisen kuvauksen aineiston käsittelyvaiheista.

7.2.1 Linkkikohtaisten sujuvuuslukujen laskentatavat

Seuraavaksi tarkastellaan TomTom-aineistosta laskettujen matkanopeuksien vastaavuutta Liikenneviraston matka-aikaa automaattisesti mittaavan kamerajärjestelmän tuloksiin 4 linkin osalta.

Kuten kirjallisuuskatsauksessa todettiin, lasketaan matkanopeus linkin pituuden ja matka-ajan osamääränä. Laskennan toteuttamisen kannalta tämä oli yksinkertaista. Tietoaineisto sisälsi matka-aikojen ohella myös matkanopeusarvojen keskilukuja sekä persentiilejä. Linkeille olisi hyvä laskea matkanopeuksien persentiileistä jakauma, joka kuvaa linkin matkanopeuksien jakaumaa. Laskenta ei onnistu nopeuksien keskilukuja summaamalla, sillä segmentit ovat eripituisia. Tästä syystä haluttiin arvioida empiirisellä kokeilulla, onnistuuko persentiilien laskenta painottamalla segmentin matkanopeutta segmentin pituudella. Lisäksi pidettiin tarpeellisena tarkastella, onko tuloksia tarpeen painottaa havaintomäärillä. Sujuvuustiedot olivat saatavilla sekä keskiarvona että mediaanina, joten matkanopeuksia koetettiin laskea 6 eri tavalla. Tulokset 1 ja 2 ovat painottamattomia perustuloksia. Tulokset 3 ja 4 laskettiin matka-aikoja havaintomäärillä painottaen. Tulokset 5 ja 6 laskettiin matkanopeuksia pituudella ja havaintomäärillä painottaen.

Linkille laskettiin seuraavat yleiset tunnusluvut segmenttien arvojen perusteella:

- Linkin metrimääräinen pituus
- Keskimääräinen nopeusrajoitus
- Keskimääräinen puolen tunnin aikaryhmän havaintojen lukumäärä
- Matka-aikojen keski- ja mediaaniarvojen summat
- Keskimääräinen matkanopeus ja mediaanimatkanopeus
- Keskimääräisen matkanopeuden suhde nopeusrajoitukseen
- Mediaanimatkanopeuden suhde nopeusrajoitukseen
- Keskimääräisen matkanopeuden ero vuosien 2011 ja 2009 tuloksiin
- Liikennemäärän variaatiokerroin (%) klo 9.30–14.30
 - o Lasketaan havaintomäärien keskihajonnan ja havaintomäärien keskiarvon osamääränä
 - o Korkea arvo indikoi heterogeenistä liikennemäärää tai virheellistä reititystä. Kummastakin syystä linkkiä olisi syytä muuttaa tulevaisuudessa.

Seuraavissa kaavoissa i on indeksi, joka merkitsee reitille kuuluvan segmentin indeksia.

Yksiköt $\left[\frac{m}{s}\right]$ muunnetaan muotoon $\left[\frac{km}{h}\right]$ kertomalla suhdeluvulla 3.6.

Olkoon H havaintomäärien summa ja N linkille osuvien segmenttien lukumäärä.

1. Keskimääräinen matkanopeus matka-aikojen keskiarvoista

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{segmentti_pituus}_i}{\sum_{i=1}^n \text{matka-aika_keskiarvo}_i}\right) * 3,6 \quad (6)$$

2. Keskimääräinen matkanopeus matka-aikojen mediaaniarvoista

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{segmentti_pituus}_i}{\sum_{i=1}^n \text{matka-aika_mediaani}_i}\right) * 3,6 \quad (7)$$

3. Keskimääräinen matkanopeus matka-ajan havaintomäärällä painotetuista keskiarvoista

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{segmentti_pituus}_i}{\left(\frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \text{havaintomäärä}_i * \text{matka-aika_keskiarvo}_i \right) * N} \right) * 3,6 \quad (8)$$

Nimittäjässä lasketaan havaintomäärällä painotettu matka-aikojen keskiarvo segmentille, joka skaalataan koko linkille kertomalla segmenttien lukumäärällä N.

4. Keskimääräinen matkanopeus matka-ajan havaintomäärällä painotetuista mediaaniarvoista

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{segmentti_pituus}_i}{\left(\frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \text{havaintomäärä}_i * \text{matka-aika_mediaani}_i \right) * N} \right) * 3,6 \quad (9)$$

Nimittäjässä lasketaan havaintomäärällä painotettu matka-aikojen mediaaniarvo segmentille, joka skaalataan koko linkille kertomalla segmenttien lukumäärällä N.

5. Pituudella ja havaintomäärällä painotettu matkanopeuden keskiarvo segmenttien matkanopeuden keskiarvoista

eli Matkanopeuksien keskiarvojen pituudella ja havaintojen lukumäärällä painotettu aritmeettinen keskiarvo.

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\text{matkanopeus_keskiarvo}_i * \text{segmentti_pituus}_i * \text{havaintomäärä}_i)}{\sum_{i=1}^n (\text{segmentti_pituus}_i * \text{havaintomäärä}_i)} \right) \quad (10)$$

6. Pituudella ja havaintomäärällä painotettu matkanopeuden keskiarvo segmenttien matkanopeuden mediaaniarvoista

eli Matkanopeuksien mediaaniarvojen pituudella ja havaintojen lukumäärällä painotettu aritmeettinen keskiarvo.

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\text{matkanopeus_mediaani}_i * \text{segmentti_pituus}_i * \text{havaintomäärä}_i)}{\sum_{i=1}^n (\text{segmentti_pituus}_i * \text{havaintomäärä}_i)} \right) \quad (11)$$

7.2.2 Laskentamallien tulosten laatutarkastelu

Laskentamallien sopivuuden arvioimiseksi täytyi niillä laskettuja matkanopeuksia vertailla referenssiarvoihin, jotka ovat tässä kappaleessa kamerajärjestelmän tuottamia keskimääräisiä matkanopeuksia. Vertailua tehdään 4 kameralinkin osalta. Linkkien perusominaisuuksia kuvataan sanallisesti ja kartalla, kun taas tulosten erot esitetään kuvaajien ja taulukoiden muodossa. Linkkikartoilla nähdään lisäksi linkin keskimääräisen matkanopeuden sisäistä vaihtelua linkille kuuluvilla segmenteillä. Huomion arvoista on se, ettei karttojen luokittelu ole reittien välillä sama.

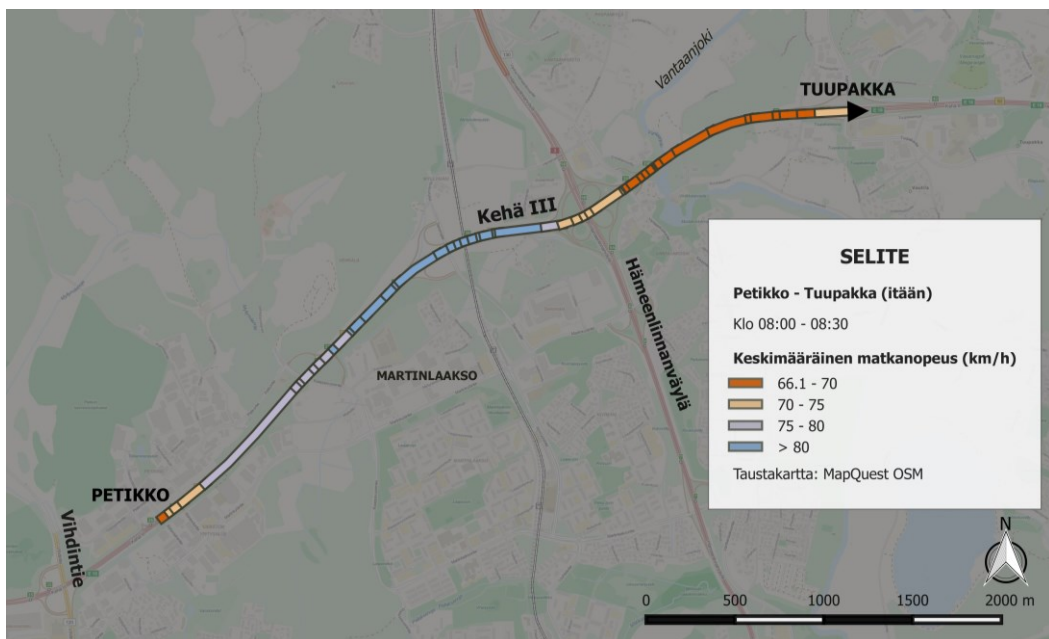
Referenssiaineistoksi saatiin työn loppuvaiheilla Liikenneviraston Digitraffic-palvelun matka-aikatietoja ja keskinopeuksia. Aineiston toimitti järjestelmää marraskuusta 2015 lähtien ylläpitänyt Solita. Referenssiaineistoa saatiin aikavälin 31.8.–29.10.2015 arkipäiviltä maanantai-torstai. Kyseinen ajanjakso sisältää 36 havaintopäivää, mutta matka-aikatietoja ei ollut saatavilla jokaiselle linkille ajanjakson jokaiselta päivältä. Puuttuvia havaintopäiviä oli kuitenkin korkeintaan muutama linkkiä kohden, joten referenssiaineiston ajallinen kattavuus vastaa hyvin hankittua TomTom-aineistoa. Referenssiaineisto sisälsi aluksi linkkien päiväkohtaisia 30 minuutin ajanjaksojen matka-aikojen ja matkanopeuksien keskiarvoja, jotka laskettiin Solitan toimesta niistä 5 minuutin keskiarvoista, joiden päivitysaikaleima osuu kyseisen puolen tunnin ajalle. Eri päivien 30 minuutin keskimääräisistä matkanopeuksista laskettiin koko aikavälille aritmeettinen keskiarvo. Tieto havaintojen lukumäärästä ei sisältynyt aineistoon. Matka-aikaa ei käytetty laskennassa, sillä linkkien pituudet eivät sisältyneet tietoaineistoon.

Laskentamallien tulokset on numeroitu kuvaajissa ja taulukoissa edeltävien laskentakaavojen mukaisesti. Laskentamallien 1 ja 2 tuloksia kutsutaan perustuloksiksi, sillä niitä ei ole painotettu mitenkään. Tulostarkastelussa haluttiin tulkita myös TomTom-aineistosta laskettujen keskimääräisten matkanopeuksien laatua. Kuvaajista ja taulukoista kannattaa huomioida etenkin laskentamallin 1 tulokset suhteessa referenssiarvoon, sillä nämä ovat määritelmältään samoja.

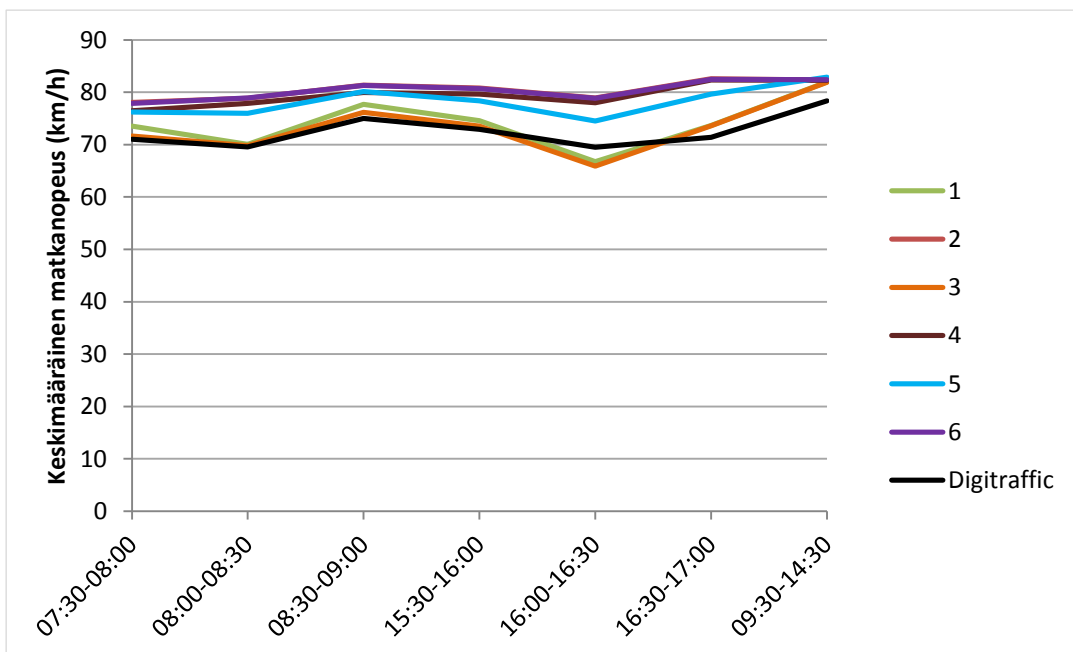
Kameralinkki 1. Petikko-Tuupakka

Kuvassa 24 on esitetty kameralinkki Petikko–Tuupakka ja TomTom-aineiston segmenttien keskimääräinen matkanopeus. Linkki sijaitsee Kehä III:lla itään päin suuntautuneena. Linkin pituus on n. 4650 metriä. Nopeusrajoitus on Digiroadin mukaan pääosin 80 km/h, mutta Hämeenlinnanväylän kohdalla n. 800 metrin matkalla 70 km/h. TomTom-aineistossa nopeusrajoitus on kauttaaltaan 80 km/h. Kameralinkillä ei ole liikennevaloja. Linkki alkaa Petikon asuinalueen Riihiniementien sillan kohdalla ja päättyy Tuupakan Katriinantien sillan kohdalla.

TomTom-aineiston matkanopeudet perustuvat linkillä keskimäärin 230 ajoneuvon tietoihin puolen tunnin aikaryhmää kohden. Linkille osuu 53 segmenttiä, joiden keskimääräinen pituus on 97 metriä. Segmenttien pituus vaihtelee välillä 7–746 metriä. Liikenteen sujuvuus on ollut alhaisinta kameralinkin loppuvaiheilla.



Kuva 24 Kameralinkin 1 TomTom-segmenttien keskimääräiset matkanopeudet.



Kuva 255. Kameralinkin 1 eri laskentamalleilla lasketut keskimääräiset matkanopeudet.

Taulukko 7 Kameralinkin 1 keskimääräiset matkanopeudet (km/h) eri laskentamalleilla laskettuna sekä referenssiarvo.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Digitraffic
7.30–8.00	73,54	78,05	71,62	76,44	76,24	77,89	70,99
8.00–8.30	70,04	78,85	69,78	77,89	75,97	78,90	69,55
8.30–9.00	77,70	81,34	76,15	79,98	80,13	81,28	75,02
15.30–16.00	74,56	80,78	73,53	79,64	78,37	80,68	72,90
16.00–16.30	66,77	78,92	65,90	78,01	74,49	78,82	69,51
16.30–17.00	73,68	82,55	73,57	82,36	79,65	82,47	71,39
9.30–14.30	81,97	82,32	81,91	82,27	82,90	82,40	78,34

Taulukko 8 Laskentamallien tulosten suhteellinen ero (%) saman aikaryhmän Digitraffic-referenssiarvoon kameralinkillä 1.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
7.30–8.00	3,59	9,94	0,88	7,67	7,40	9,72
8.00–8.30	0,70	13,37	0,32	11,99	9,22	13,44
8.30–9.00	3,57	8,43	1,51	6,61	6,80	8,34
15.30–16.00	2,28	10,81	0,86	9,24	7,51	10,67
16.00–16.30	3,95	13,53	-5,19	12,23	7,17	13,39
16.30–17.00	3,21	15,64	3,05	15,37	11,57	15,52

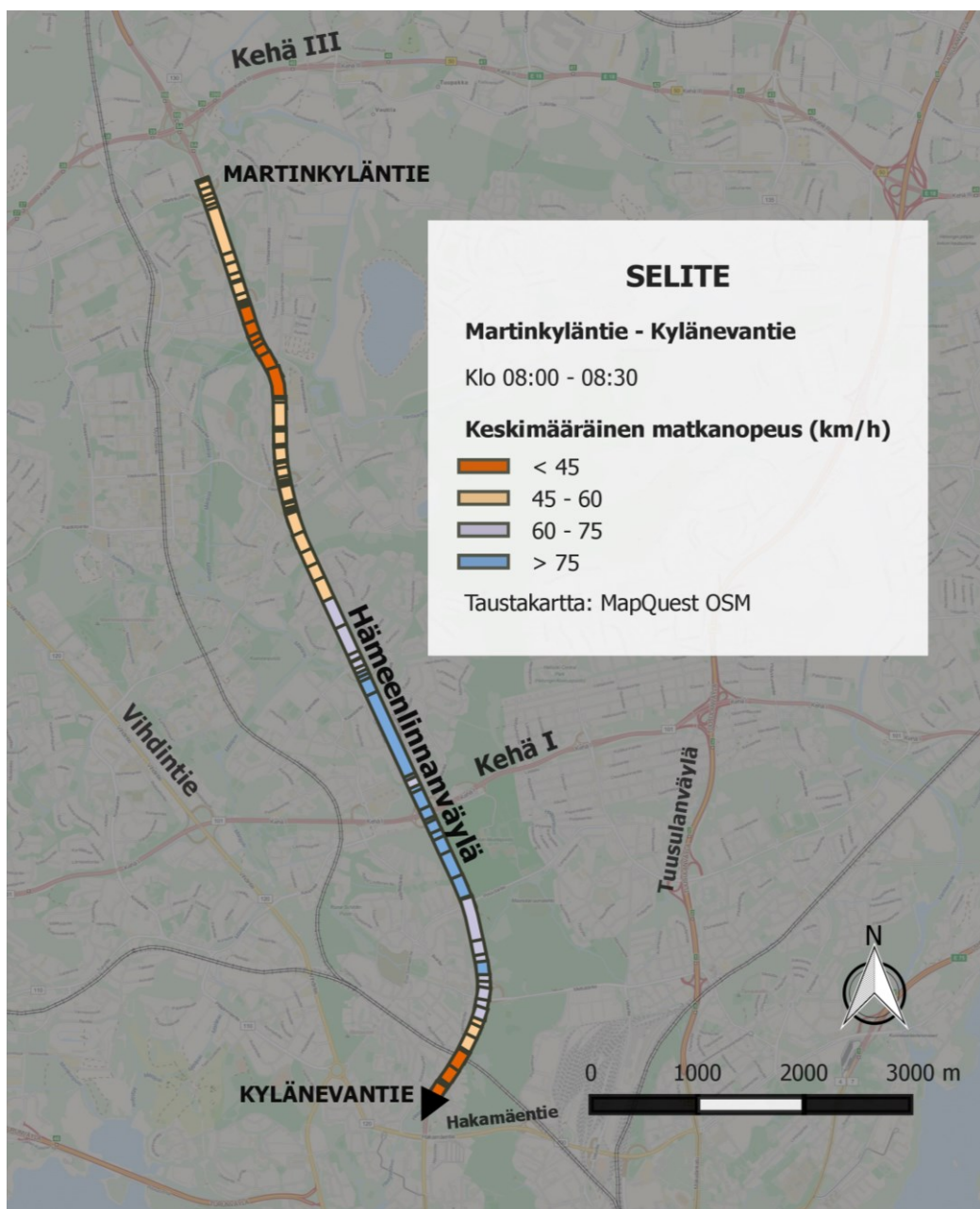
Taulukoiden 7 ja 8 perusteella laskentamallien 3 ja 1 tulokset ovat lähellä kamerajärjestelmän referenssiarvoa, sillä poikkeamaa on alle 5 %. Muiden laskentamallien tulokset poikkeavat selvemmin referenssiarvoista.

Keskimääräisten matkanopeuksien painottaminen sekä pituudella että havaintomäärällä tuottaa laskentamallissa 5 laskentamalleja 1 ja 3 korkeampia matkanopeuksia (Kuva 27). Yli 10 %:n poikkeama on tässä tapauksessa liikaa. Mediaaniarvoja hyödyntävien laskentamallien 2, 4 ja 6 keskimääräiset matkanopeudet ovat varsin selvästi muita arvoja korkeampia.

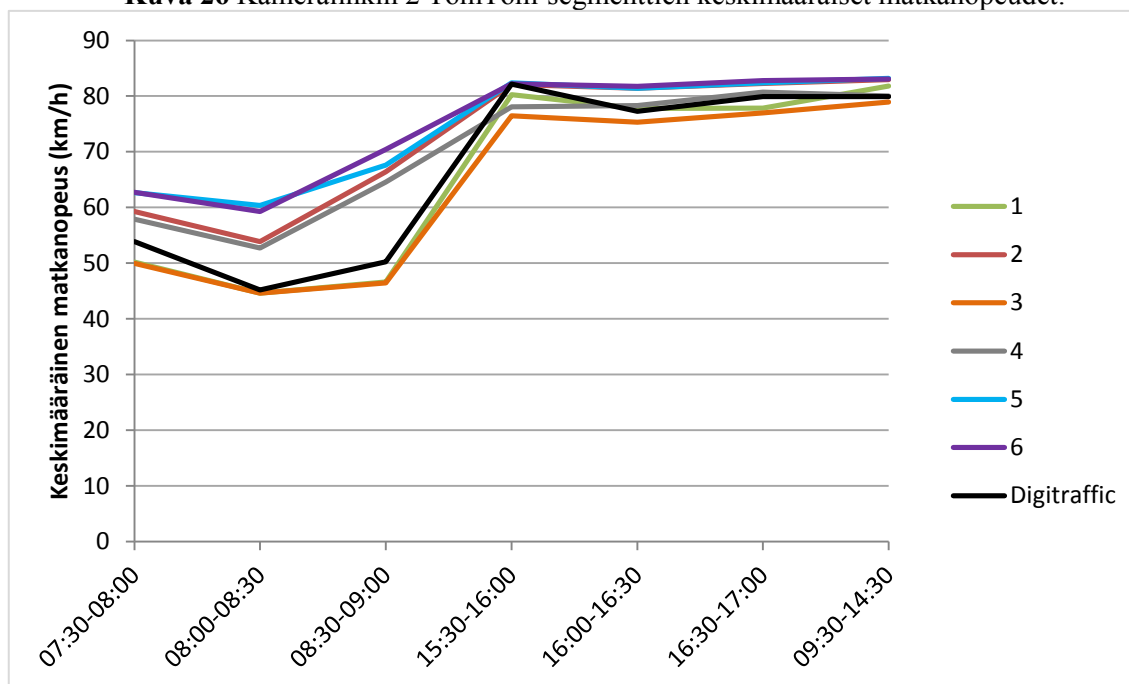
Kameralinkki 2. Martinkyläntie – Kyläneva

Kuvassa 26 on esitetty kameralinkki Martinkyläntie – Kyläneva, joka kulkee Hämeenlinnanväylää etelään päin. Linkin pituus on n. 9500 metriä. Nopeusrajoitus on 80 km/h. Linkillä ei ole liikennevaloja, mutta se loppuu noin 900 metriä ennen Hakamäentien liikennevaloja. Linkki alkaa Martinkyläntien sillan kohdalla ja päättyy Kylänevantien sillan kohdalla.

TomTom-aineiston matkanopeudet perustuvat linkillä keskimäärin 198 ajoneuvon tietoihin puolen tunnin aikaryhmää kohden. Linkille osuu 91 segmenttiä, joiden keskipituus on 105 metriä. Segmenttien pituus vaihtelee välillä 4–839 metriä. Segmenttien keskimääräiset matkanopeudet ovat alhaisimpia linkin alussa ja lopussa (Kuva 26).



Kuva 26 Kameralinkin 2 TomTom-segmenttien keskimääräiset matkanopeudet.



Kuva 27 Kameralinkin 2 eri laskentamalleilla lasketut keskimääräiset matkanopeudet.

Taulukko 9. Kameralinkin 2 keskimääräiset matkanopeudet (km/h) eri laskentamalleilla laskettuna sekä referenssiarvo.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Digitraffic
7.30–8.00	50,19	59,27	49,99	57,92	62,67	62,74	53,88
8.00–8.30	44,62	53,89	44,63	52,73	60,37	59,27	45,20
8.30–9.00	46,60	66,38	46,45	64,59	67,61	70,41	50,28
15.30–16.00	80,27	82,08	76,45	78,07	82,38	82,19	82,18
16.00–16.30	77,76	81,40	75,34	78,30	81,39	81,78	77,30
16.30–17.00	77,85	82,28	76,99	80,74	82,38	82,78	79,92
9.30–14.30	81,79	82,95	78,94	80,04	83,18	83,10	79,93

Taulukko 10 Laskentamallien tulosten suhteellinen poikkeama (%) saman aikaryhmän Digitraffic-vertailuarvosta kameralinkillä 2.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
7.30–8.00	-6,85	10,02	-7,21	7,50	16,33	16,45
8.00–8.30	-1,30	19,22	-1,26	16,65	33,56	31,13
8.30–9.00	-7,31	32,02	-7,62	28,46	34,47	40,05
15.30–16.00	-2,33	-0,12	-6,97	-5,00	0,25	0,01
16.00–16.30	0,60	5,31	-2,53	1,30	5,30	5,80
16.30–17.00	-2,59	2,95	-3,66	1,03	3,09	3,58
9.30–14.30	2,33	3,78	-1,23	0,14	4,07	3,97

Kuvan 27 sekä taulukon 9 ja 10 perusteella laskentamallien 1 ja 3 tulokset ovat varsin lähellä kamerajärjestelmän referenssiarvoa. Muut tulokset poikkeavat referenssiarvoista selvästi aamun aikaryhmissä.

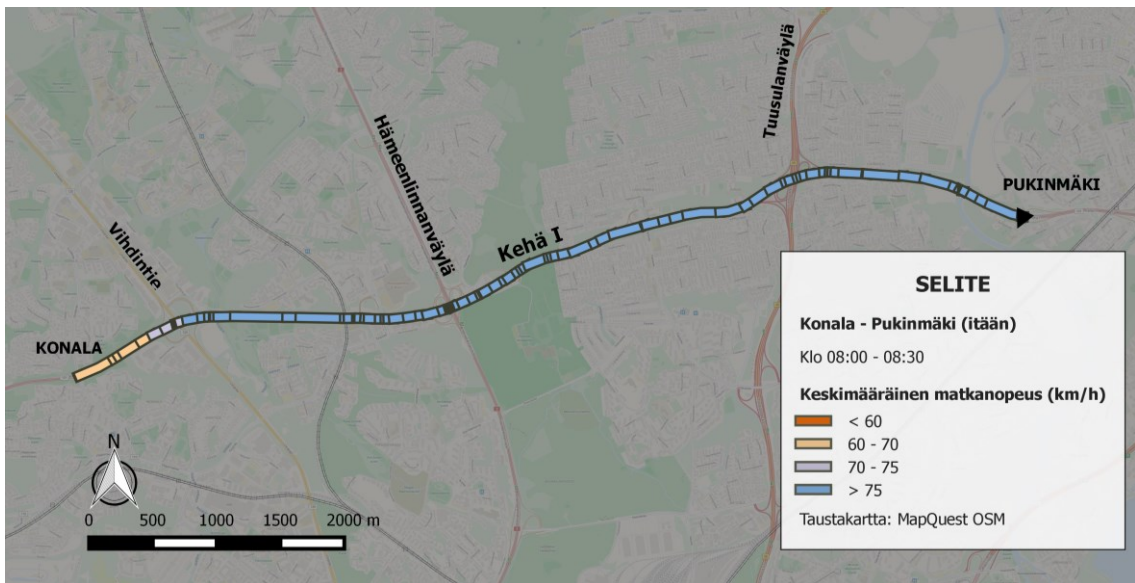
Linkki on aamulla ruuhkautunut loppupäästä varsin pahasti. Keskimääräiset matkanopeudet laskevat erityisen alhaisiksi klo 8.00–8.30. Iltapäivällä liikenne on ollut sujuvaa. Matka-aikojen mediaaniarvojen perusteella lasketut keskimääräiset matkanopeudet ovat aamun aikaryhmissä selvästi korkeampia kuin matka-aikojen keskiarvojen perusteella lasketut keskimääräiset matkanopeudet. Päivällä ja iltapäivällä mediaaniarvon perusteella lasketut keskimääräiset matkanopeudet ylittävät lievästi nopeusrajoituksen.

Segmenttikohtaisten keskimääräisten matkanopeuksien painottaminen sekä pituudella että havaintomäärällä tuottaa laskentamalleilla 5 ja 6 selvästi perustuloksia korkeampia keskimääräisiä matkanopeuksia kameranlinkille. Suurinta ero on aamun aikaryhmissä.

Kameralinkki 3. Konala – Pukinmäki

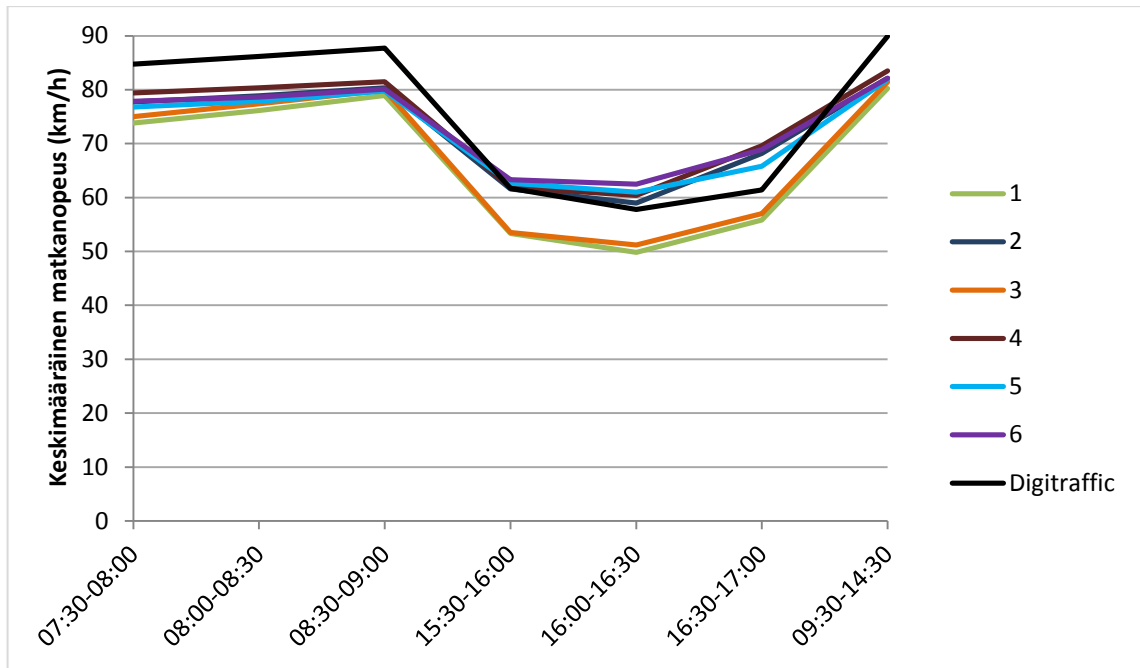
Kuvassa 28 on esitetty kameralinkki Konala-Pukinmäki, joka sijaitsee Kehä I:llä idän suuntaisesti. Linkin pituus on n. 8070 metriä. Nopeusrajoitus linkillä on 80 km/h. Linkillä ei ole liikennevaloja. Kaistamäärä on 2–3, kun liityntäkaistoja ei oteta huomioon. Linkki alkaa Konalantien kohdalla ja päättyy Pukinmäenkaaren sillan kohdalla.

TomTom-aineiston matkanopeudet perustuvat linkillä keskimäärin 284 ajoneuvon tietoihin puolen tunnin aikaryhmää kohden. Linkille osuu 95 segmenttiä, joiden keskipituus on 85 metriä. Segmenttien pituus vaihtelee välillä 4–408 metriä. Segmenttien keskimääräiset matkanopeudet olivat klo 8.00–8.30 tasaisen korkeita. Sen sijaan iltapäivällä sujuvuus oli alhaisempaa ja keskihajonta suurempaa, sujuvuuden ollessa huonoimmillaan klo 16.00–16.30.



Kuva 28 Kameralinkki 3 välillä Konala-Pukinmäki.

Laskentamallien tulokset poikkeavat referenssiarvoista aiempia linkkejä enemmän (Kuva 29, Taulukko 11 ja Taulukko 12). Kaikkien laskentamallien tulokset ovat aamulla ja päivällä selvästi alhaisempia kuin referenssiarvo. Iltapäivällä mediaanitulokset ovat jopa korkeampia kuin referenssiarvot. Laskentamallien 4 ja 2 tulokset ovat lähimpänä referenssiarvoa. Tulokset mukailevat kaikesta huolimatta hyvin referenssiarvojen ajallista muutosta. Linkin liikenne on kokonaisuutena aamulla huomattavasti iltapäivän tilannetta sujuvampaa.



Kuva 29 Kameralinkin 3 eri laskentamalleilla lasketut keskimääräiset matkanopeudet.

Taulukko 11 Kameralinkin 3 matkanopeudet eri laskentamalleilla laskettuna sekä referenssiarvo.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Digitraffic
7.30–8.00	73,82	77,73	75,01	79,39	76,81	77,87	84,76
8.00–8.30	76,15	78,84	77,39	80,35	77,86	78,65	86,14
8.30–9.00	78,94	80,37	79,93	81,47	79,74	80,12	87,74
15.30–16.00	53,31	61,59	53,48	61,88	62,64	63,28	61,71
16.00–16.30	49,84	58,97	51,20	60,40	60,98	62,46	57,77
16.30–17.00	55,80	68,18	57,02	69,62	65,82	68,90	61,41
9.30–14.30	80,22	82,15	81,39	83,52	81,89	82,12	89,91

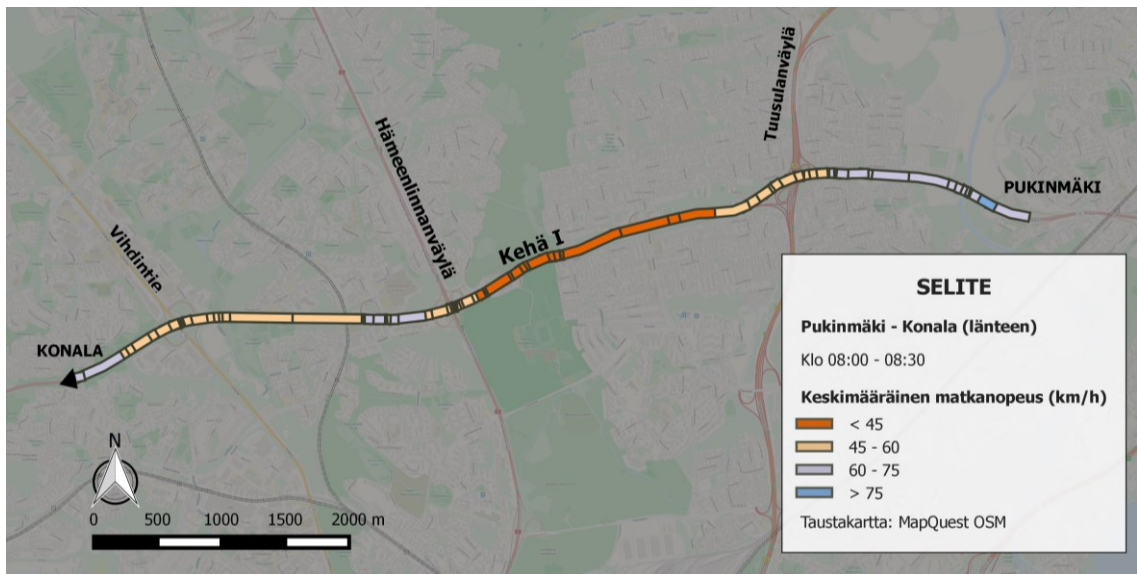
Taulukko 12 Laskentamallien tulosten suhteellinen ero (%) Digitraffic-referenssiarvoon kameralinkillä 3.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
7.30–8.00	-12,91	-8,29	-11,50	-6,33	-9,38	-8,13
8.00–8.30	-11,60	-8,48	-10,17	-6,73	-9,62	-8,70
8.30–9.00	-10,03	-8,39	-8,90	-7,15	-9,11	-8,68
15.30–16.00	-13,61	-0,19	-13,34	0,28	1,51	2,55
16.00–16.30	-13,72	2,08	-11,37	4,56	5,56	8,13
16.30–17.00	-9,13	11,03	-7,14	13,37	7,19	12,20
9.30–14.30	-10,78	-8,64	-9,48	-7,11	-8,93	-8,67

Kameralinkki 4. Pukinmäki-Konala (länteen)

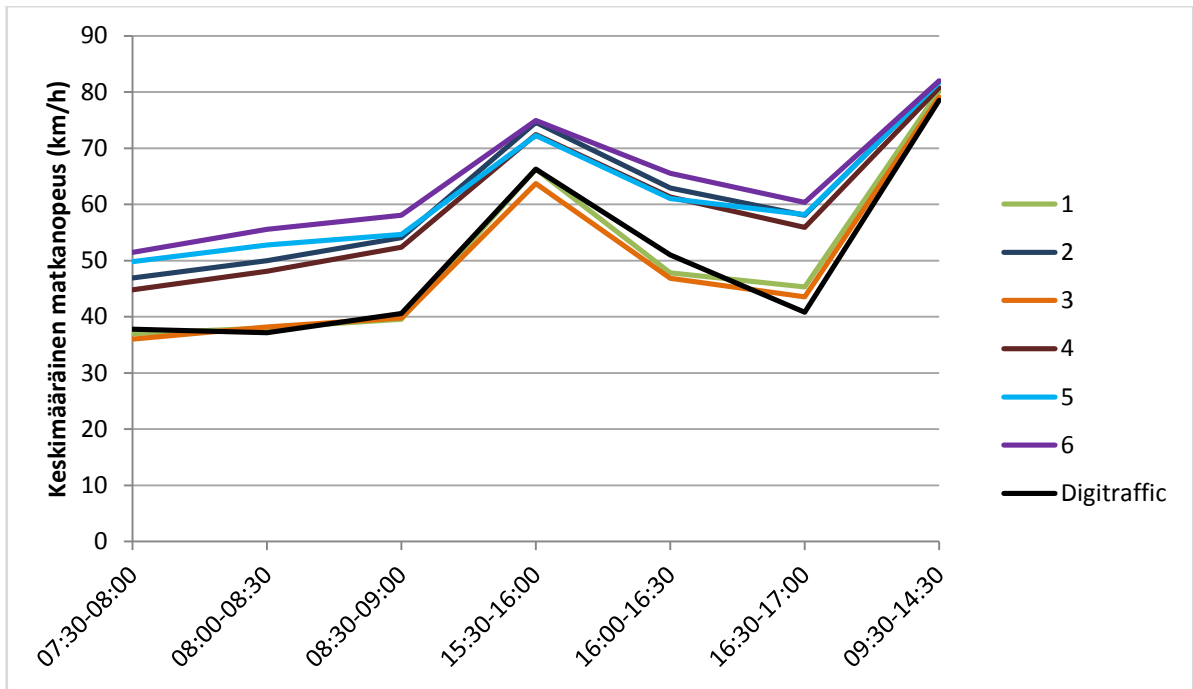
Kuvassa 30 on esitetty kameralinkki Pukinmäki - Konala, joka sijaitsee Kehä I:llä länteen päin. Reitin pituus on n. 8090 metriä. Nopeusrajoitus on linkillä 80 km/h. Linkki alkaa Pukinmäenkaaren sillan kohdalla ja päättyy Konalantien risteyksessä. Kyseessä on linkki 3 peilattuna.

TomTom-aineiston matkanopeudet perustuvat linkillä keskimäärin 276 ajoneuvon tietoihin puolen tunnin aikaryhmää kohden. Linkille osuu 85 segmenttiä, joiden keskipituus on 95 metriä. Segmenttien pituus vaihtelee välillä 4–544 metriä. Keskimääräiset matkanopeudet olivat klo 8.00–8.30 alhaisimpia Tuusulanväylän ja Hämeenlinnanväylän välillä (Kuva 30).



Kuva 30 Kameralinkki 4 ja matkanopeuksien vaihtelu.

Keskimääräistä matka-aikaa käyttävien laskentamallien 1 ja 3 tulokset ovat jälleen lähellä refenssiarvoja (Kuva 31, Taulukko 13 ja Taulukko 14). Segmenttien keskimääräisen matkanopeuden painottaminen pituudella tuottaa laskentamallilla 5 epäilyttävän korkeita arvoja. Mediaaniarvojen perusteella lasketut matkanopeudet ovat jälleen selvästi keskimääräisiä matkanopeuksia korkeampia. Mediaanituloksissa havaintomäärällä painottaminen tuottaa hieman perustuloksia alhaisempia matkanopeuksia.



Kuva 31 Kameralinkin 4 eri laskentamalleilla lasketut keskimääräiset matkanopeudet.

Taulukko 13 Linkin 4 eri laskentamallien matkanopeudet sekä referenssiarvo.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Digitraffic
7.30–8.00	37,00	46,89	36,05	44,78	49,81	51,49	37,81
8.00–8.30	38,02	49,96	38,22	48,08	52,78	55,57	37,17
8.30–9.00	39,56	54,09	39,81	52,38	54,68	58,09	40,57
15.30–16.00	66,28	74,58	63,69	72,42	72,27	74,93	66,25
16.00–16.30	47,83	62,89	46,86	61,30	61,05	65,52	51,02
16.30–17.00	45,33	58,05	43,53	55,89	58,18	60,38	40,82
9.30–14.30	80,18	81,87	79,09	80,72	81,74	81,97	78,53

Taulukko 14 Laskentamallien tulosten suhteellinen ero (%) Digitraffic-referenssiarvoon kameralinkillä 4.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
7.30–8.00	-2,15	24,02	-4,64	18,45	31,75	36,20
8.00–8.30	2,29	34,41	2,84	29,37	42,02	49,52
8.30–9.00	-2,48	33,34	-1,85	29,12	34,80	43,20
15.30–16.00	0,05	12,57	-3,86	9,31	9,09	13,10
16.00–16.30	-6,25	23,28	-8,15	20,16	19,66	28,42
16.30–17.00	11,04	42,20	6,63	36,90	42,52	47,90
9.30–14.30	2,10	4,26	0,71	2,79	4,09	4,38

7.2.3 Laskentamallien tulkinta

Vertailujen perusteella keskimääräistä matka-aikaa käyttävien laskentamallien 1 ja 3 tulokset vastaavat parhaiten referenssituloksia. Tämä vastaavuus oli odotettavissa, sillä referenssinä käytetty Digitraffic-aineisto sisältää matkanopeuksien keskiarvoja.

Perustulokset eli matka-ajan keskiarvon ja mediaaniarvon perusteella lasketut matkanopeudet poikkeavat toisistaan siten, että jälkimmäiset matkanopeudet ovat korkeampia. Tämä tarkoittaa sitä, että tarkasteltujen linkkien matka-ajat eivät noudata normaalijakaumaa, vaan jakaumissa esiintyy joitakin selvästi keskiarvoa korkeampia matka-aikoja. Keskiarvo muuttuu selvästi poikkeavien arvojen myötä huomattavasti etenkin silloin, kun otoskoko on pieni. Mediaaniarvo ei ole yhtä muutosherkkä selville yksittäisille poikkeamille.

Matka-ajan painottaminen havaintomäärällä laskentamalleissa 3 ja 4 vaikutti perustuloksiin vain vähän. Tämä selittyy osaltaan sillä, että matkanopeustutkimuksen linkit on lähtökohdaisesti valittu niin, että liikennemäärän vaihtelu olisi mahdollisimman pientä. Painottamisessa ei lopulta tuntunut olevan järkeä.

Matkanopeuden painottaminen sekä havaintomäärällä että segmentin pituudella laskentamalleissa 5 ja 6 aiheutti suurimmat muutokset perustuloksiin. Osa linkkien segmenteistä on hyvin lyhyitä, minkä vuoksi näiden vaikutus lopputulokseen jäänee pituudella painotetussa laskennassa turhan pieneksi. Kameralinkillä 4 poikkeama referenssiarvoista ja perustuloksista oli aivan liian suurta. Pituudella painottaminen ei tästä syystä vaikuta lainkaan toimivalta ratkaisulta.

Vertailun perusteella selvisi, että TomTom-aineistosta laskentamallin 1 ja 3 matkanopeudet vastaavat varsin hyvin kamerajärjestelmän matkanopeuksia. Kameralinkillä 3 poikkeama oli suurempaa, nouden yli 10 % suuruusluokkaan. Vastaavuus kertoo kuitenkin pääasiassa matka-aikatiedon hyvästä laadusta.

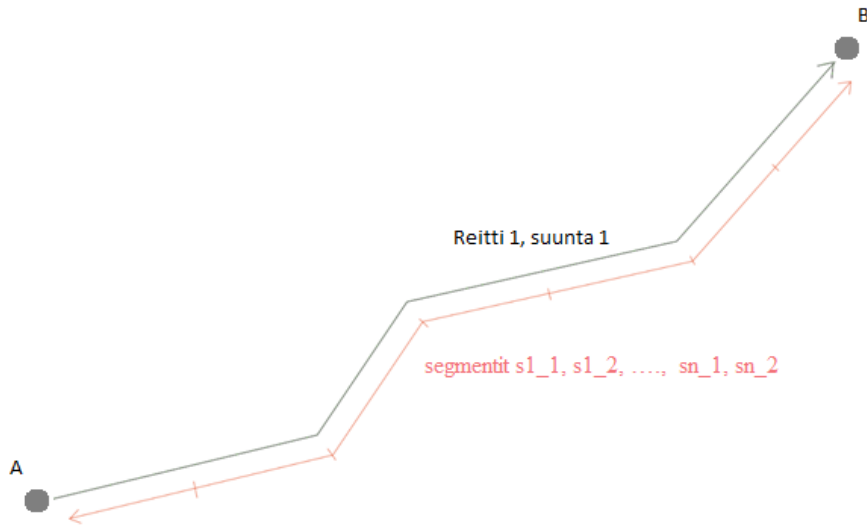
Lähtöaineiston arvojen painottaminen millään tavalla vaikutti tarkastelun perusteella turhalta ja tuloksia vääristävältä. Matkanopeudet päätettiin laskea matka-aikojen summan ja linkin kokonaispituuden suhteena. Mediaaniarvon käyttäminen tulosten esittämisessä vaikuttaa kirjallisuuden perusteella parhaalta käytännöltä.

Sen sijaan matkanopeuksien persentiiliarvojen yhdistely koko reitille ei vaikuta mahdolliselta menettelyltä, koska segmenttien vaihteleva pituus tulisi ottaa paremmalla tavalla huomioon. Jos persentiiliarvot kuvaisivat matka-aikaa, olisi yhdistely mahdollista ilman keinotekoisia painotuksia. Mikäli aineistoa hankitaan uudelleen, persentiiliarvot kannattaa vaatia matka-aikoina, joita voidaan summata. Tällöin myös laskentaskriptissä täytyy muuttaa muutaman rivin koodia.

Ongelmana laatutarkastelun kannalta oli referenssiaineiston vaikea saatavuus sekä epävarma laatu ja tuntemattomat havaintomäärät. Tämä luo epävarmuutta koko tehdyn tarkastelun luotettavuudelle. Voidaan kuitenkin sanoa, että TomTom-aineiston matka-aikatiedon laatu on hyvää käytössä olleisiin referenssiarvoihin eli sekä matkanopeuksiin että keskimääräisiin pistenopeuksiin verrattuna

Linkkikohtaisten matkanopeuksien Python-laskentaskriptiin jätettiin selkeyden vuoksi lopulta vain hyviksi havaitut laskentamallit 1 ja 3, sillä tulossarakkeita syntyy näinkin hyvin paljon.

7.2.4 Linkkejä vastaavien segmenttien määrittäminen ilman kaupallisia ohjelmistoja



Kuva 32 Esimerkki reitillä 1 sijaitsevista päällekkäisistä ja erisuuntaisista segmenteistä.

Mikäli tulevaisuudessa päädytään käyttämään samaa tai samankaltaista paikkatietoaineistoa, voitaisiin tietyille linkille kuuluvat segmentit määrittää myös ilman kaupallista Network Analyst -lisäosaa. Tämä vaatisi kuitenkin käsittelymenetelmien jatkokehitystä, sillä aineisto sisältää päällekkäisiä erisuuntaisia segmenttejä (Kuva 32). Pääperiaate voisi olla seuraava:

1. Valitse yksittäisen linkkigeometrian kanssa päällekkäiset segmentit.
2. Suodata pois väärän suuntaiset segmentit joko
 - a. manuaalisesti segmentin suuntakulman perusteella tai
 - b. kehitetyn algoritmin avulla.

Oikean suuntaisia segmenttejä ei voida suoraan valita vertailemalla yksittäisten segmenttien suuntakulmia linkin päätepisteiden perusteella laskettuun suuntakulmaan, sillä reitti voi olla mutkitteleva. Tämä seikka huomioden algoritmi voisi olla abstraktilla tasolla seuraavanlainen:

Määritä, löytyykö valituista segmenteistä yksikin toisen segmentin kanssa täysin tai osin päällekkäinen segmentti. Jos löytyy:

1. Laske segmentin suuntakulma.
2. Luo pistegeometria jokaisen linkille kuuluvan segmentin kummankin päätepisteen kohdalla.
3. Poista pistegeometrioista koordinaattiarvoiltaan identtiset.
4. Luo jokaiselle jäljellä olevalla uniikille pistegeometrialle uniikki ID.
5. Pilko linkkigeometria uniikeilla pisteillä.
6. Laske pilkottujen linkin osien suuntakulmat.
7. Luo bufferi pilkottujen linkin osien ympärille.
8. Etsi bufferin sisällä olevat segmentit.
9. Valitse segmentti, jonka suuntakulma täsmää linkin pilkottua osaa (esim. 0,1 asteen toleranssilla).

7.3 Liikenteen sujuvuuskarttojen sisältö

Kartta on informatiivinen tapa esittää monimutkaisiakin ilmiöitä. Lasketut liikenteen sujuvuustulokset visualisoitiin aikasarjakarttoina, jotka kuvaavat liikenteen sujuvuuden spatio-temporaalista muutosta, eli muutoksia alueen tai ajan suhteen. Tässä diplomityössä tehdyt kartat eivät ole lopullisia HSL:n matkanopeustutkimuksen karttoja, mutta toimivat lähtökohtana niille.

Vuoden 2009 ja 2011 raportin kartoilla esitettiin värikoodattuna sujuvuusluokka vain toiseen ajosuuntaan. Matkanopeudet esitettiin molempiin suuntiin silloin, kun tieto oli saatavilla. Ongelmana tässä esitystavassa on se, että katsojalle syntyy mielikuva samanlaisesta liikenteen sujuvuudesta molempiin ajosuuntiin, vaikkei sujuvuus todellisuudessa olisikaan samanlaista. Ensimmäisenä parannuksena päätettiin esittää sujuvuustieto molempiin ajosuuntiin. Toisena parannuksena lukuarvot pyrittiin nyt esittämään ilman, että ne peittäisivät toisiaan kantakaupungin alueella, missä linkejä on tiheästi. Kolmantena parannuksena matkanopeudet esitetään jokaiselle linkille, eikä vuoden 2011 tapaan yhdistetyille linkeille. Näin sujuvuuden vaihteluita voidaan tarkemmin arvioida visuaalisesti.

Tutkimusalueesta luotiin karttasarjoja 2 eri mittakaavatasolla. Ensimmäisen mittakaavan karttasarja sisältää vuoden 2011 mittausverkoston linkit. Näille linkeille esitetään sujuvuuden nykytila keskimääräisen matkanopeuden ja mediaanimatkanopeuden suhteen linkin keskimääräiseen nopeusrajoitukseen. Lisäksi tehtiin muutuskartat, joista ilmenee laskettujen matkanopeuksien absoluuttiset ja suhteelliset muutokset vuosiin 2011 ja 2009 verrattuna. Vuoden 2011 raportissa esitettiin ainoastaan matkanopeuden absoluuttinen muutos edelliseen mittaukseen nähden, joka ei kerro kaikkea tarpeellista muutoksen merkitsevyydestä.

Toisen mittakaavatasoisen karttasarja sisältää koko tutkimusalueen ja sen tärkeimmät tiet. Kartoilla ei näytetä kaikkia mittausverkostoon sisältyviä linkejä, jotta lopputulos olisi kartografisesti selkeä. Osa kantakaupungin linkeistä jätettiin pois näkyvistä. Tuloksia ei näillä verrata verrata vuoden 2011 tuloksiin, sillä nämä kattavat vain osan koko tutkimusalueesta.

Sujuvuustulokset esitettiin eri aikoina sekä keski- että mediaaniarvojen avulla laskettuina. Luokittelu ja väriskaala asetettiin vuosien 2011 ja 2009 mukaisesti, jotta tuloksia voisi verrata aiempiin. Väriskaala ei edusta hyvää kartografista käytäntöä ja olisi syytä korvata, jotta myös punaviher-värisokeat ihmiset pystyvät havaitsemaan tulokset. Väriskaalan käyttö oli nyt kuitenkin tarpeellista, jotta tuloksia olisi mahdollisimman helppo vertailla visuaalisesti aiempiin tuloksiin. Toisena perusteena oli, että valtaosa kaikista liikenteen sujuvuutta kuvaavista kartoista esitetään kyseisellä väriskaalalla.

Lisäksi raakamuotoisesta aineistosta tehtiin kahdella mittakaavalla karttasarjat, joista sujuvuusarvot ilmenevät aikaryhmittäin segmentin tarkkuudella. Kuvassa 34 on esimerkki tällaisesta. Myös linkkien keskimääräiset havaintomäärät esitettiin kahdella eri mittakaavalla jokaisessa aikaryhmässä. Kuvassa 41 on esimerkki havaintomääräkartasta.

Diplomityön osana luodut kartat suunniteltiin näytöltä luettaviksi, jotta niihin voisi sisällyttää riittävästi informaatiota, ilman että luettavuus kärsisi. Matkanopeutta kuvaavat numeroarvot täytyi esittää pienellä fontilla, jotta ne eivät peittäisi toisiaan. Tämän diplomityön kartoilta numeroarvot jätettiin liitteitä lukuun ottamatta pois.

Linkkejä jätettiin karttaesityksistä pois 14 kappaletta (Taulukko 15). Pois jättämiseen oli kolme erilaista syytä: liikenteen tai matka-aikatiedon puuttuminen ja visuaalinen irrallisuus. Taulukon 15 linkkien peilikuvat jätettiin myös pois. Esimerkiksi Tapiolan Merituulentien linkki 58-60 oli syksyllä 2015 suljettu liikenteeltä, minkä takia se ei sisältynyt aineistoon. Tämä johti linkin 16-58 pois jättämiseen, sillä linkki ei näyttänyt kartalla johtavan mihinkään. Kyseisten linkkien yhteenlaskettu pituus on noin 3,6 kilometriä, joten kyseessä ei ole merkittävä puute.

Taulukko 15 Kartoilta pois jätettävät linkit.

Linkkitunnus	Pois jättämisen syy	Tien nimi	Matka-aikatieto
58-16	irrallinen	Tapiolantie	On
58-60	puuttuva liikenne	Länsituulentie	Ei ole
678-450	puuttuu aineistosta	Myyrmäentie	Ei ole
450-452	irrallinen	Louhelantie	On
452-124	puuttuu aineistosta	Martinlaaksontie	Ei ole
711-712	puuttuu aineistosta	Veikkolantie	Ei ole
715-716	puuttuu aineistosta	Kirkkonummentie	Ei ole

Lopullista esitystä varten reititetyistä geometrioista tehtiin siistitty tieverkkokuvaus, sillä linkit saattoivat ristettyä toistensa kanssa, eivätkä yhdistyneet risteysten kohdalla toisiinsa. Kuvassa 33 näkyy linkkigeometrioiden siistimisen vaikutus esitystavan selkeyteen. Erisuuntaiset linkit kulkevat siistittyinä tasaisella etäisyydellä toisistaan. Etenkin Kalasataman linkit kuvan oikeassa reunassa kuvautuvat selkeämmin. Etelä-Helsingin linkeillä esitystapa antaa hieman virheellisen kuvan lännen suuntaisen linkin sijainnista, mutta esitystapaa pidettiin siitä huolimatta reititetyä versiota selkeämpänä. Siistiminen toteutettiin luomalla toisen ajosuunnan geometrisesti korjatuista linkeistä kopiot, joiden geometriat ja linkkitunnukset peilattiin. Linkkiparin geometriat ovat tuloksena päällekkäisiä, mutta ne saadaan visualisoitua siististi paikkatieto-ohjelmistojen geometrian siirtotoiminnolla (engl. Offset).



Kuva 33 Linkkigeometriat reitityksen mukaisesti ja siistittyinä.

7.4 Sujuvuuden muutosten tulkinta

Tässä kappaleessa esitetään muutama TomTom-aineistosta luotu liikenteen sujuvuutta kuvaava kartta. Lisäksi tulkitaan liikenteen sujuvuuden muutoksia suvuuskarttojen ja numeeristen tarkasteluiden avulla. Aamuliikenteellä tarkoitetaan tässä aamun yhdistettyä aikaryhmää (klo 7.30–8.30), päiväliikenteellä päivän aikaryhmää (klo 9.30–14.30) ja iltapäiväliikenteellä iltapäivän yhdistettyä aikaryhmää (klo 16.00–17.00).

Kuvat 34 ja 35 kuvastavat aineiston käsittelyn vaikutusta. Kuvassa 34 näkyy klo 7.30–8.00 –aikaryhmän käsittelemätön tieto, josta käsiteltiin kuvan 35 mukainen aiempia HSL:n matkanopeustutkimuksia vastaava yleistetty tulos. Käsittelemättömän tiedon perusteella liikenne näyttää sujuvammalta kuin käsitellyn tiedon perusteella. Tämä johtuu siitä, että linkin liikenne saattaa olla hyvin ruuhkautunutta vain sen pienessä osassa. Linkin matka-aikaa tuleekin tarkastella kokonaisuutena. Yleistettyä tietoa on silti syytä tarkastella yhdessä alkuperäisen tiedon kanssa, sillä nämä tiedot täydentävät toisiaan kasvattaen kokonaisuymmärrystä liikenteen sujuvuudesta.

7.4.1 Aamuliikenne (7.30–8.30)

Tuotettuja sujuvuuskarttoja tarkastelemalla huomataan, että aamuliikenteen sujuvuus on alhaista etenkin Helsingin kantakaupungin linkeillä (Kuva 36). Lisäksi huomataan sujuvuuseroja saman tieosan eri ajosuuntien välillä esimerkiksi Kehä I:n keskivaiheilla.

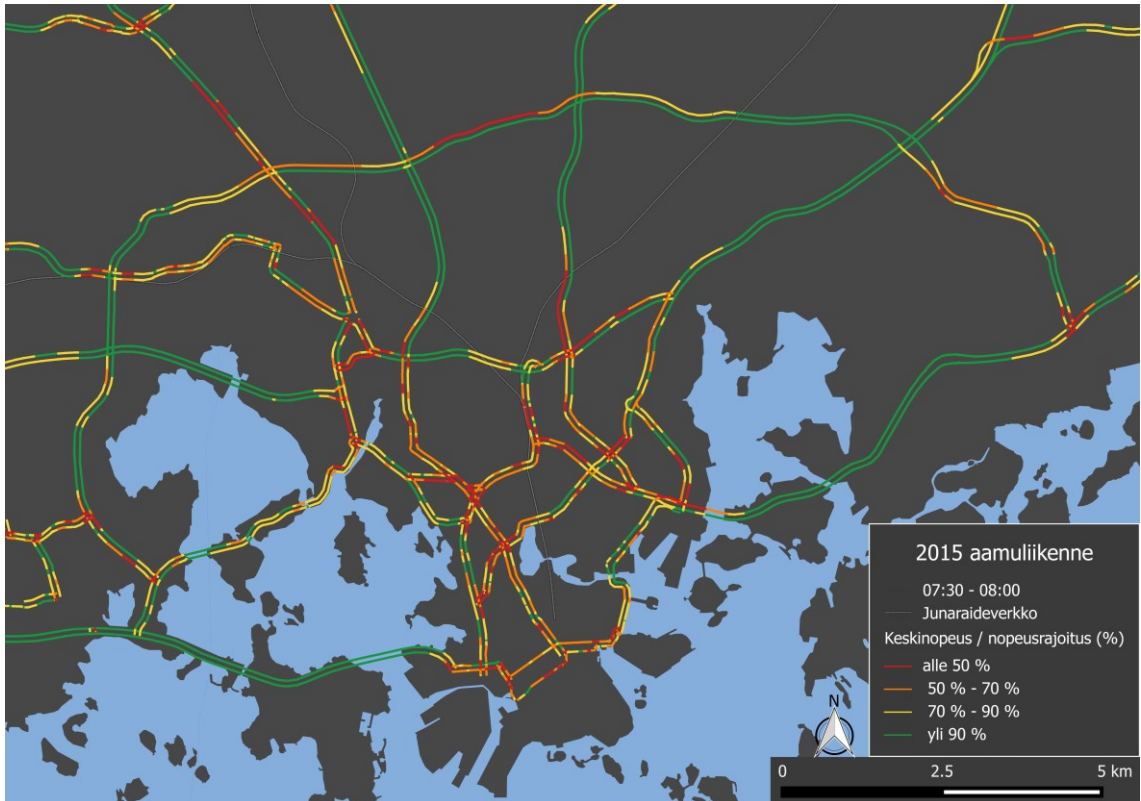
Liitteiden 6 ja 7 muutosarvoja tarkastelemalla huomattiin selviäkin yksittäisen linkin matkanopeuden muutoksia aiempaan verrattuna. Suurimmat parannukset aamuliikenteen matkanopeuksissa sijoittuvat Kirkkonummen linkeille sekä Turunväylän, Kehä I:n ja Kehä III:n keskivaiheille. Esimerkiksi Kirkkonummen suuret muutokset selittyvät sinne rakennetulla moottoritieellä. Vaikka liikennejärjestelyt poikkeavat eri vuosien välillä, ovat nämäkin sujuvuuden muutokset arvokasta tietoa matkanopeustutkimuksen kannalta.

Muutoskartoilta huomattiin seuraavia selkeitä keskimääräisen matkanopeuden kohoamia sekä vuoden 2011 että 2009 tuloksiin nähden:

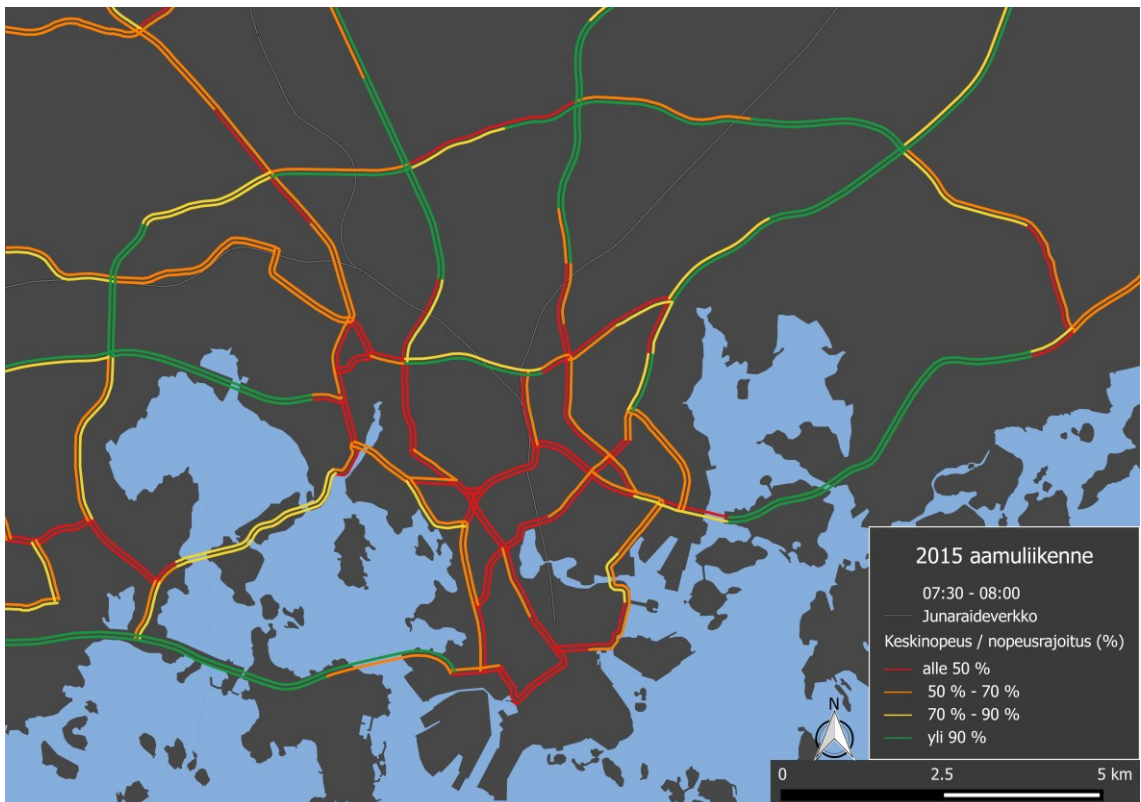
- Kehä III:n keskivaiheet molempiin suuntiin (jopa 50–130 %)
- Turunväylän itäpää idän suuntaan (Kehä I:n itäpuolella 60 %)
- Tuusulanväylän pää Kehä I:ltä Viikkiin (muutos 7–109 %)
- Kirkkonummen linkit. Uusi moottoritie on aiheuttanut jopa 58–304 %:n parannuksia.

ja seuraavia alenemia:

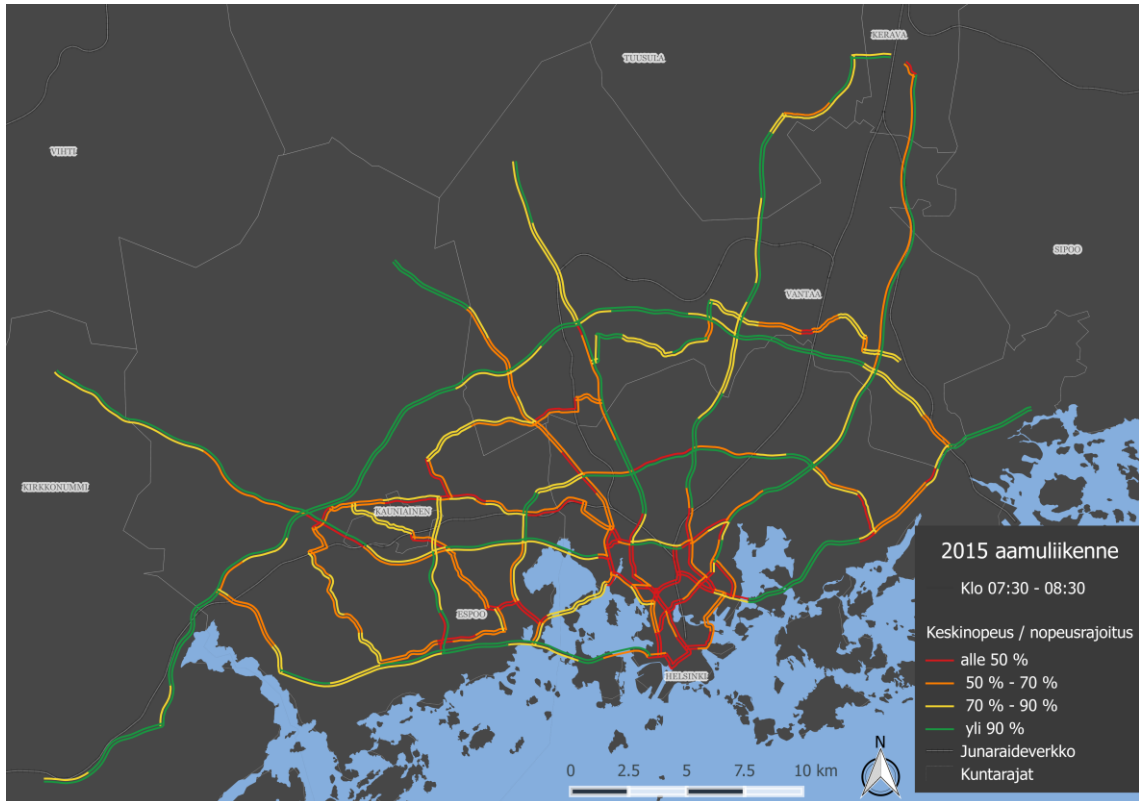
- Turunväylä Kehä III:n tuntumassa. Tietöitä oli käynnissä.
- Länsiväylä Matinkylän kohdalla. Tietöitä oli kesken ympäröivillä teillä, mikä heijastuu myös Länsiväylälle.
- Kalasatama. Täällä kohtaa esiintyi ongelmia tiedon laadussa, sillä paikkatietokuvaus vastaa rakennustyömaata edeltävää tilannetta.
- Porkkalankatu
- Kehä I Tuusulanväylän molemmin puolin



Kuva 34 Liikenteen sujuvuus raakamuotoisen aineiston perusteella vuoden 2011 linkkien alueella syksyllä 2015 klo 7.30–8.00.



Kuva 35 Kuva 34 tiedoista vuoden 2011 linkeille laskettu yleistetty sujuvuustieto syksyllä 2015 klo 7.30–8.00.



Kuva 36 Aamuliikenteen keskimääräisen matkanopeuksien suhde nopeusrajoitukseen syksyllä 2015.

Suurimmat positiiviset suhteelliset muutokset on esitetty taulukossa 16. Linkkien 717–718 ja 716–717 huomattavan muutoksen selittää Kirkkonummella vuonna 2013 valmistunut moottoritie. Suurimmat negatiiviset suhteelliset muutokset on esitetty taulukossa 17.

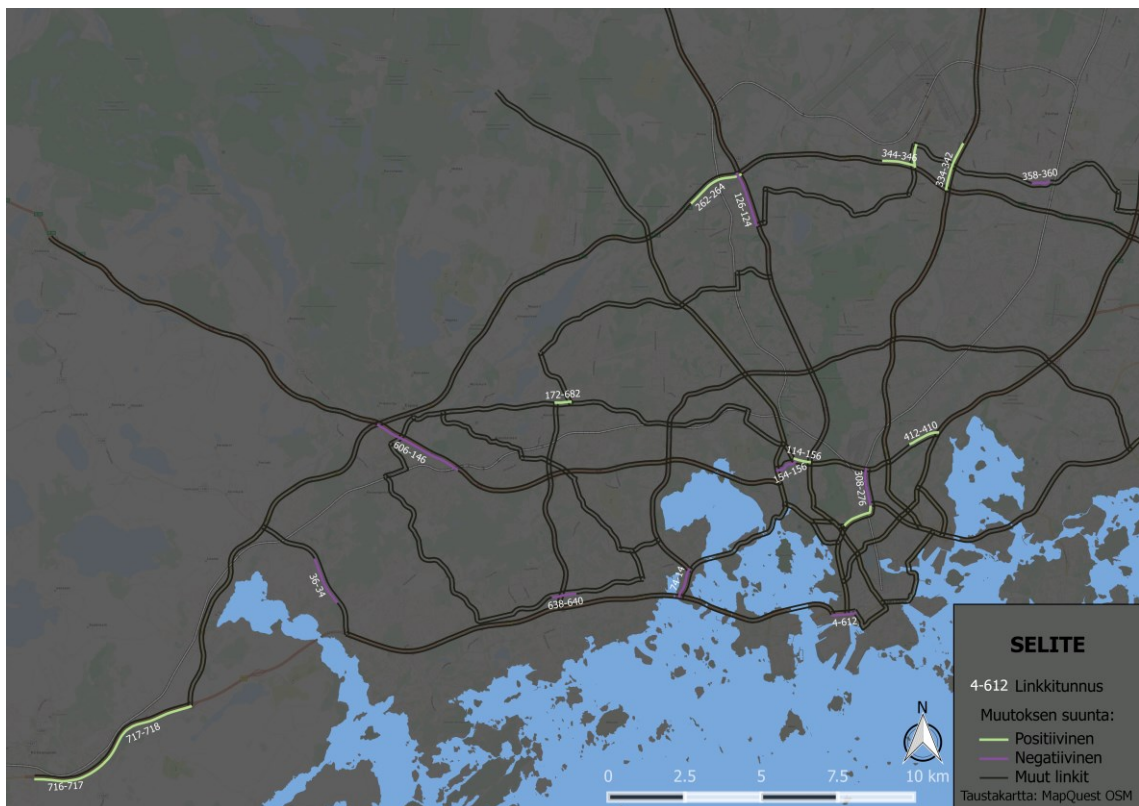
Taulukko 16 Suurimmat keskimääräisen matkanopeuden positiiviset suhteelliset muutokset vuosien 2015 ja 2011 välillä aamun yhdistetyssä aikaryhmässä (klo 7.30–8.30).

Linkki-tunnus	Matkanopeus 2015	Matkanopeus 2011	Muutos 2015–2011 (%)	Matkanopeus 2009	Nopeusrajoitus	Pituus (m)
717–718	101	25	304	-	100	3960
716–717	97	26	273	-	100	2050
114–156	19	7	171	11	50	540
334–342	90	35	157	70	100	1600
344–366	70	30	133	32	60	760
262–264	79	34	132	27	80	1940
276–270	23	10	130	23	50	1230
344–346	57	26	119	56	80	990
412–410	17	8	112	15	50	970
172–682	24	12	100	18	50	500

Taulukko 17 10 suurinta keskimääräisen matkanopeuden negatiivista suhteellista muutosta vuosien 2015 ja 2011 välillä aamun yhdistetyssä aikaryhmässä (klo 7.30–8.30).

Linkkitunnus	Matkanopeus 2015	Matkanopeus 2011	Muutos 2015–2011 (%)	Matkanopeus 2009	Nopeusrajoitus	Pituus (m)
4–612	12	31	-91	32	50	740
154–156	7	13	-51	20	40	670
308–276	11	22	-50	21	50	1740
606–146	22	44	-50	76	100	3060
126–124	41	75	-45	74	80	1210
638–640	23	42	-45	37	50	750
264–126	37	67	-45	68	80	610
36–34	40	69	-42	62	80	1670
358–360	15	24	-38	27	50	570
74–14	40	61	-34	55	60	950

Yllä olevien taulukoiden linkeillä 36-34, 606-146 ja 344-366 esiintyi tietöitä syksyllä 2015. Vuosien 2015 ja 2011 mitatun aamuliikenteen keskimääräisten matkanopeuksien suurimpien suhteellisten muutosten sijainnin perusteella välillä ei voida vetää johtopäätöksiä, sillä nämä ovat jakautuvat ympäri tieverkkoa (Kuva 37).



Kuva 37 Suurimpien keskimääräisten matkanopeuden suhteellisten muutosten sijoittuminen vuosien 2015 ja 2011 aamumittausten (klo 7.30–8.30) välillä.

7.4.2 Päiväliikenne (klo 9.30–14.30)

Päiväliikenteen sujuvuus on kuvan 38 perusteella jälleen alhaisinta kantakaupungin alueella. Kehä I:n liikenne on sujuvaa molempia päitä lukuun ottamatta. Kehä III:n liikenne on sujuvaa itäistä päätä lukuun ottamatta. Mediaanimatkanopeus on kantakaupungin osalta selvästi korkeampi. Tämä selittyy liikennevalojen aiheuttamalla lisämatka-ajalla.

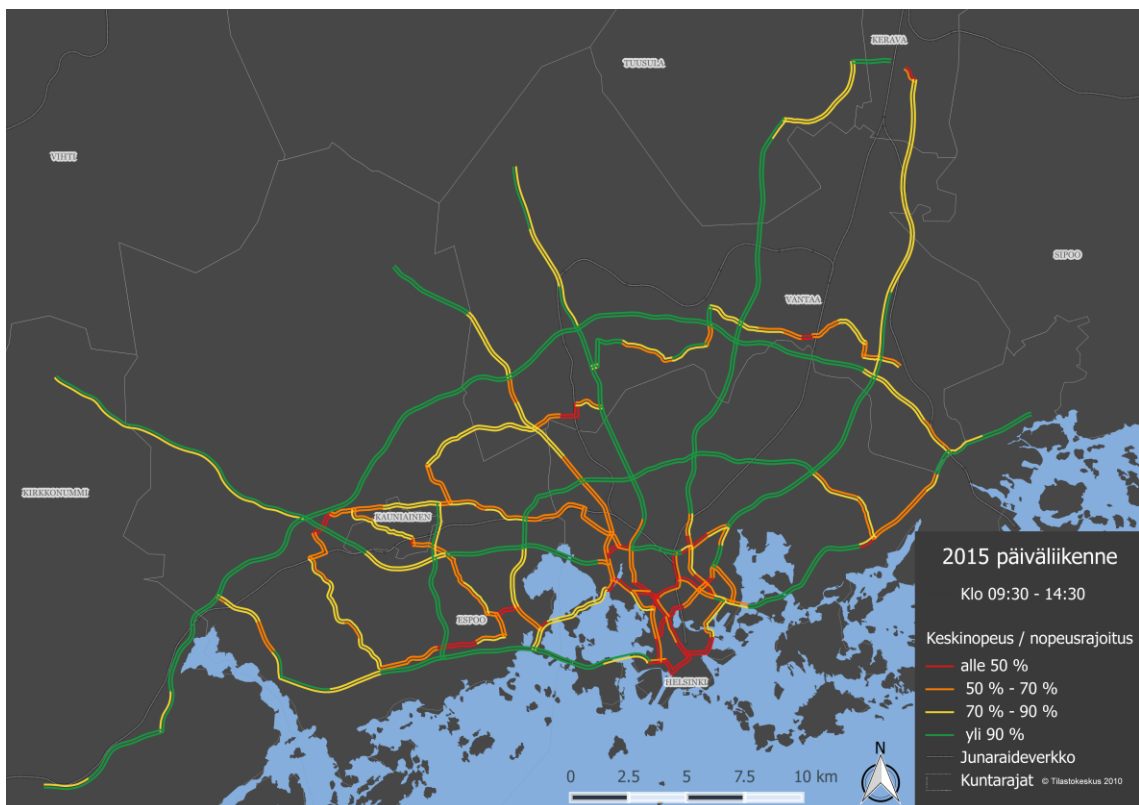
Tarkastelemalla suhteellisen muutoksen karttoja (Liite 7 ja Liite 8) huomataan sujuvuuden parannuksia vuosien 2011 ja 2009 tuloksiin verrattuna ainakin seuraavilla väylillä:

- Kehä III:n keskivaiheet molempiin ajosuuntiin
- Turunväylän itäpää
- Kehä I Leppävaaran tienoilla

ja seuraavia alenemia:

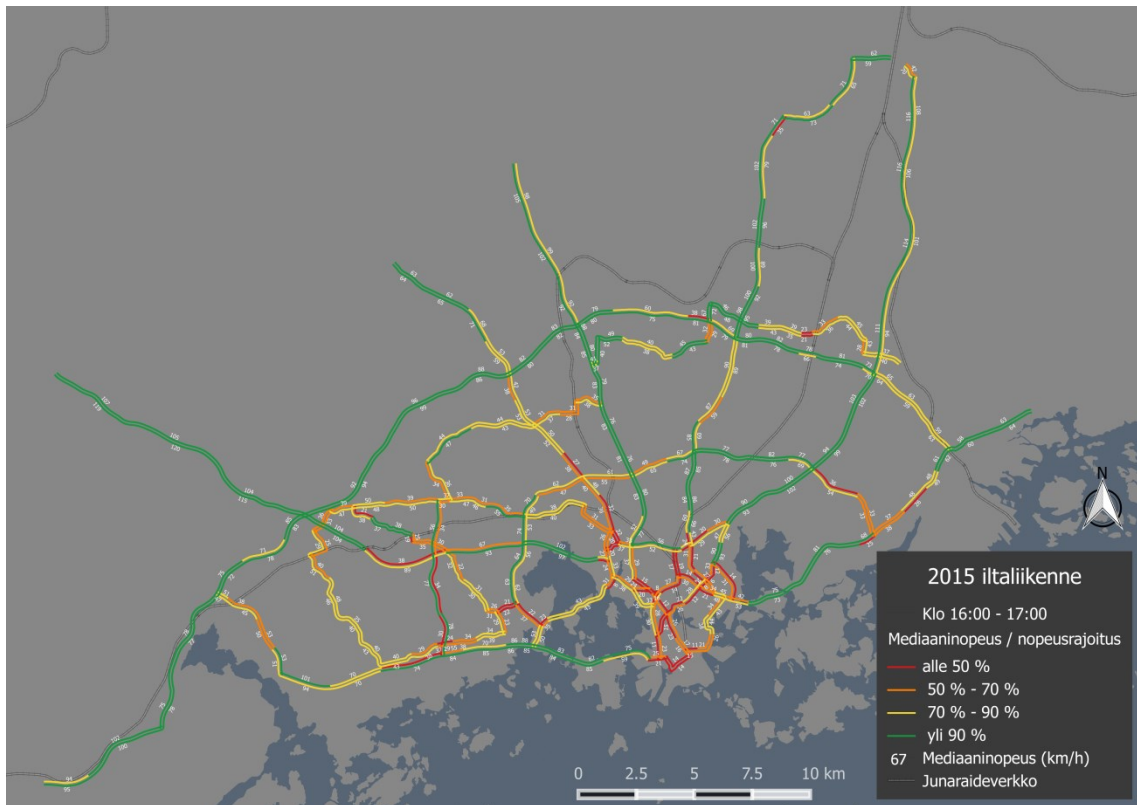
- Merituulentie
- Pitäjänmäentie
- Tapiola
- Vihdintie

Päiväliikenteen sujuvuus näyttää kartoilla selvästi aamuliikenteen sujuvuutta paremmalta, mikä on luonnollista tieverkon kysyntäerojen vuoksi.



Kuva 38 Päiväliikenteen keskimääräisen matkanopeuden suhde nopeusrajoitukseen vuoden 2011 linkeillä.

7.4.3 Iltapäiväliikenne (15.30–17.00)

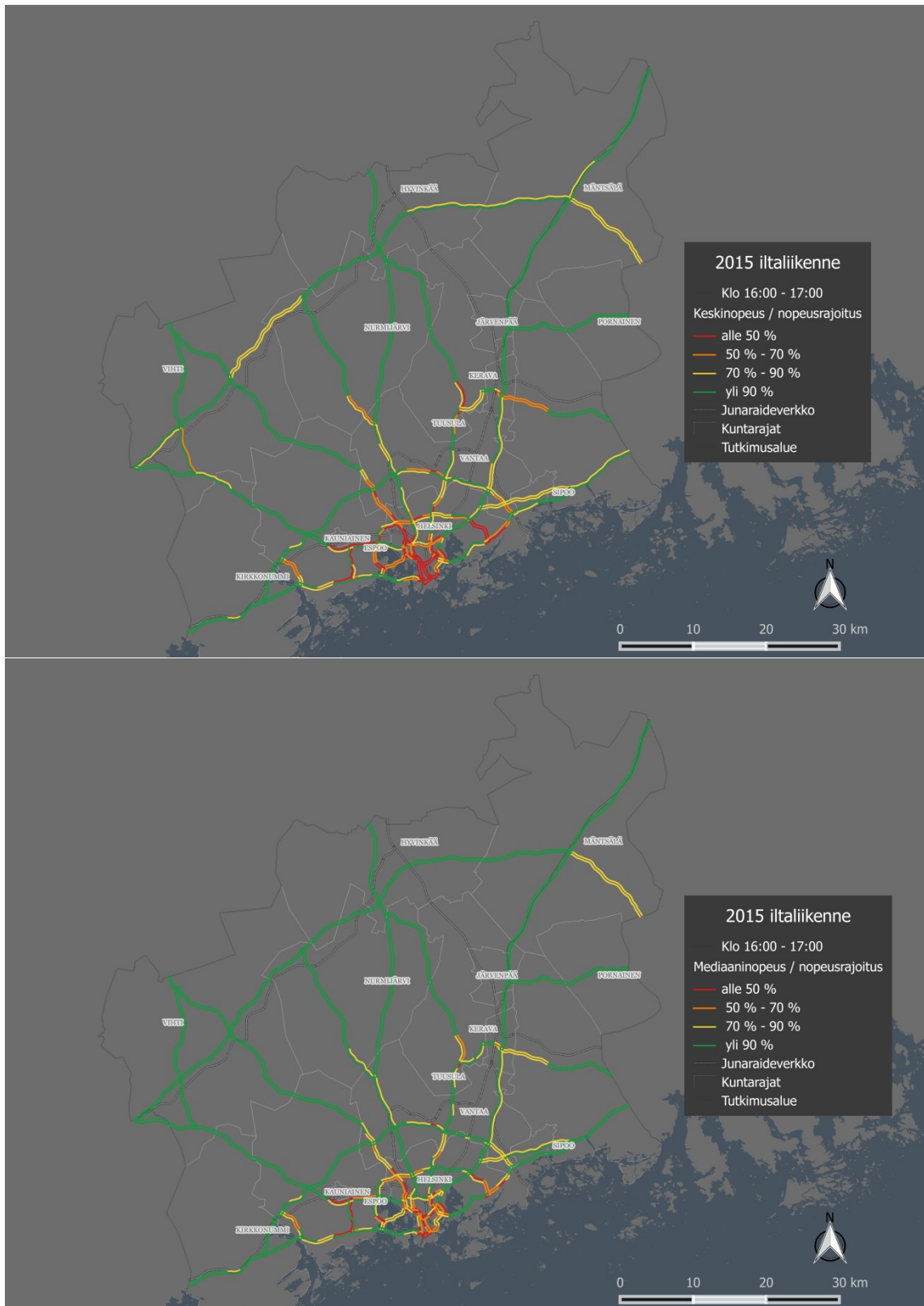


Kuva 39 Iltapäiväliikenteen sujuvuus syksyllä 2015 vuoden 2011 linkeillä.

Kuvassa 39 näkyy liikenteen sujuvuus mediaanimatkanopeuden perusteella esitettynä. Keskimääräisen matkanopeuden perusteella esitettynä sujuvuus näyttäyty yllä olevaa kuvaa heikompana.

Kuvasta 40 huomataan jälleen keskiarvon ja mediaaniarvon käyttämisen vaikutus koko tutkimusalueella, kun luokittelu pysyy samana. Liikenteen sujuvuus näyttäyty mediaaniarvojen perusteella keskiarvoja parempana, mutta alhaisimman sujuvuuden linkit erottuvat silti. Kehyskuntien keltaisten linkkien keskimääräinen matkanopeus on jäänyt juuri korkeimman sujuvuusluokan alarajan alle. Tulokarttojen luokittelulla on siis selvää merkitystä katsojalle syntyvän tulkinnan kannalta.

Iltapäiväliikenteen sujuvuus on kokonaisuutena aamuliikennettä heikompa, mikä havaitaan etenkin seuraavan osion numeerisista tarkasteluista.



Kuva 40 Tutkimusalueen iltapäiväliikenteen sujuvuus syksyllä 2015 keskinopeuden ja mediaaninopeuden perusteella.

7.4.4 Liikenteen sujuvuuden vaihtelu ja kokonaismuutos aiempiin matkanopeustutkimuksiin nähden

Liikenteen kokonaissujuvuuden vaihtelua vuoden 2015 aikaryhmien välillä tarkasteltiin kaikkien linkkien matka-aikojen keskiarvojen ja mediaaniarvojen summien avulla.

Vuoden 2015 keskimääräisten matka-aikojen kokonaissummat poikkeavat eri aikaryhmissä vuoden 2015 päiväliikenteestä (klo 9.30–14.30) taulukoiden 18 ja 19 mukaisesti. Aamuliikenteen yhdistetyn aikaryhmän (klo 7.30–8.30) koko tutkimusalueen linkkien keskimääräisten matka-aikojen summa on päiväliikenteeseen vastaavaa summaa n. 8 % suurempi ja vuoden 2011 linkeillä n. 16 % päiväliikenteen vastaavaa summaa suurempi. Iltapäiväliikenteen (klo 16.00–17.00) kokonaismatka-ajat ovat päiväliikenteeseen verrattuna koko tutkimusalueen linkeillä n. 20 % suurempia ja vuoden 2011 linkeillä n. 31 % suurempia. Matka-aikojen mediaaniarvojen summien erot ovat pienempiä, mutta samansuuntaisia. Taulukoista huomataan, että ruuhkautuminen on syksyllä 2015 ollut pahinta aikaryhmässä 16.00–16.30. Ruuhkautuminen on taulukoista päätellen voimakkaampaa HSL:n matkanopeustutkimuksen vanhoilla linkeillä kuin uusilla linkeillä.

Taulukko 18 Syksyn 2015 eri aikaryhmien matka-aikojen keskiarvojen ja mediaanien summien suhde päiväliikenteeseen (klo 9.30–14.30) kaikilla tutkimusalueen linkeillä.

Aikaryhmä	Poikkeama päiväliikenteen keskiarvojen summasta (%)	Poikkeama päiväliikenteen mediaaniarvojen summasta (%)
7.30–8.00	+7,06	+4,45
8.00–8.30	+10,08	+6,95
8.30–9.00	+8,58	+5,60
15.30–16.00	+17,42	+11,38
16.00–16.30	+21,71	+14,58
16.30–17.00	+17,35	+9,85
7.30–8.30	+8,16	+5,28
16.00–17.00	+19,59	+12,27

Taulukko 19 Syksyn 2015 eri aikaryhmien keskimääräisen matka-aikojen suhde päiväliikenteeseen (klo 9.30–14.30) kaikilla vuoden 2011 linkeillä.

Aikaryhmä	Poikkeama päiväliikenteen keskiarvojen summasta (%)	Poikkeama päiväliikenteen mediaaniarvojen summasta (%)
7.30–8.00	+13,3	+9,6
8.00–8.30	+18,4	+14,2
8.30–9.00	+16,8	+12,3
15.30–16.00	+26,6	+18,0
16.00–16.30	+34,2	+24,0
16.30–17.00	+28,6	+17,6
7.30–8.30	+15,5	+11,6
16.00–17.00	+31,3	+20,7

Liikenteen sujuvuuden kokonaismuutosta aiempiin tuloksiin nähden voitiin myös arvioida tarkastelemalla matka-aikojen kokonaissummien muutosta eri vuosien välillä. Eri aikaryhmien tulokset poikkeavat vuoden 2011 tuloksista taulukon 20 mukaisesti ja vuoden 2009 tuloksista taulukon 21 mukaisesti.

Linkkien summatut keskimääräiset matka-ajat ovat vuoteen 2011 verrattuna kasvaneet aamuliikenteessä 0,8 %, päiväliikenteessä 7,8 % ja iltapäiväliikenteessä 7,8 % (Taulukko 20). Vuodesta 2009 matka-ajat ovat kasvaneet aamuliikenteessä 10,7 %, päiväliikenteessä 6,5 % ja iltapäiväliikenteessä 12,9 % (Taulukko 21). Molempia taulukoita tarkasteltaessa on huomioitava, että vuoden 2015 eri aikaryhmien matka-aikasummat eivät ole vertailukelpoisia keskenään, sillä eri aikaryhmien arvot perustuvat eri määrään linkejä. Toisin sanoen aiemmin matka-aikaa mitattiin aamuliikenteessä eri ajosuuntaan kuin iltapäiväliikenteessä. Muutoksia tarkasteltaessa on lisäksi huomioitava, että osa muutoksista saattaa selittyä lievien menetelmäerojen ja aiempien mittausten vähäisen havaintomäärän aiheuttamalla epätarkkuudella.

Matka-ajat ovat tulosten perusteella siis jatkaneet kasvuaan HSL-alueen linkeillä eli kuvan 13 (s. 33) linkeillä. Myös Yle uutisoi 22.3.2016, että TomTom:n mukaan ”ruuhka-ajan matkojen kestot kasvoivat Helsingissä kalenterivuonna 2015 yhdellä prosenttiyksiköllä.” (Yle 2016).

Taulukko 20 Matka-aikojen kokonaismuutos vuosien 2015 ja 2011 välillä.

Aikaryhmä	Matka-aikojen keskiarvojen summa 2015 (sek.)	Matka-aikojen mediaaniarvojen summa 2015 (sek.)	Matka-aikojen keskiarvojen summa 2011 (sek.)	Keskiarvojen summan suhteellinen muutos (%)
7.30–8.30	46 099	37 783	45 755	+0,8
16.00–17.00	52 528	44 930	48 748	+7,8
9.30–14.30	52 609	40 903	49 935	+5,4

Taulukko 21 Matka-aikojen kokonaismuutos vuosien 2015 ja 2009 välillä.

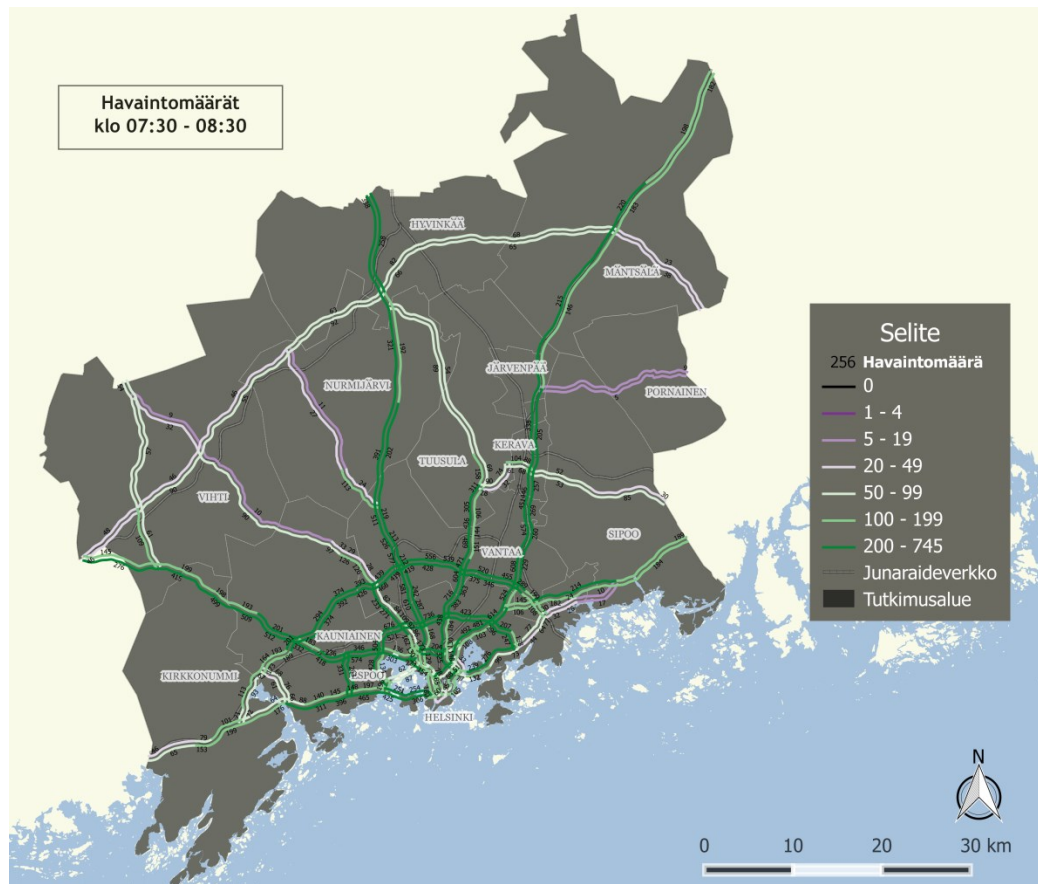
Aikaryhmä	Matka-aikojen keskiarvojen summa 2015	Matka-aikojen mediaaniarvojen summa 2015	Matka-aikojen keskiarvojen summa 2009	Keskiarvojen summan suhteellinen muutos (%)
7.30–8.30	43 202	35 130	39 030	+10,7
16.00–17.00	48 432	41 063	42 910	+12,9
9.30–14.30	49 480	38 066	46 450	+6,5

Liitteiden 6–11 muutoskarttojen perusteella linkkien keskimääräiset matkanopeudet ovat samaa suuruusluokkaa tai lievästi muuttuneita. Joukosta kuitenkin löytyy linkkejä, joilla keskimääräisen matkanopeuden suhteellinen muutos on jopa yli +100 % vuoteen 2011 tai 2009 verrattuna. Negatiiviset suhteelliset muutokset ovat pienempiä, korkeintaan -50–60 %. Negatiivinen muutos ei luonnollisesti voikaan olla yli 100 %:a.

Suuret suhteelliset muutokset keskimääräisessä matkanopeudessa saattavat johtua aiemmin käytetyn aktiivisen kelluvan auton menetelmän hyvin vähäisestä havaintomäärästä. Jos yksittäinen mittausajoneuvo on jäänyt liikennevaloihin, on keskiarvo muuttunut huomattavasti enemmän viiden otoksessa kuin usean sadan otoksessa. Myös tietöissä on voinut olla eroja eri vuosien välillä. Matkanopeustutkimuksen kannalta olisi hyvin tärkeää saada nykyistä mahdollisuutta paremmin tietoa mitattavilla linkeillä kesken olevista tietöistä ja niiden tarkoista vaikutusajoista.

7.4.5 Havaintomäärät suhteessa tilastollisiin minimimääriin

Kuvassa 41 on esitetty hankitun TomTom-aineiston sisältämät havaintomäärät aikaryhmässä 7.30–8.30. Havaintomäärien luokittelu on sama kuin testiaineiston havaintomääräkartalla (Kuva 19, s. 51), minkä perusteella huomataan, että havaintomäärät kasvoivat huomattavasti testiaineiston vastaavista arvoista. Ongelmia havaintomäärissä esiintyy kuvan 41 perusteella lähinnä kehyskuntien linkeillä. Matka-aikatiedon laatu ei kuitenkaan synny ainoastaan havaintomäärään suoraan verrannollisena, vaan riippuu etenkin linkin eli matka-aikojen vaihtelusta eli variaatiokertoimesta. Vuoden 2011 linkeillä havaintoja saatiin joka tapauksessa huomattavasti aiempaa viittä havaintoa enemmän (Kuva 42).

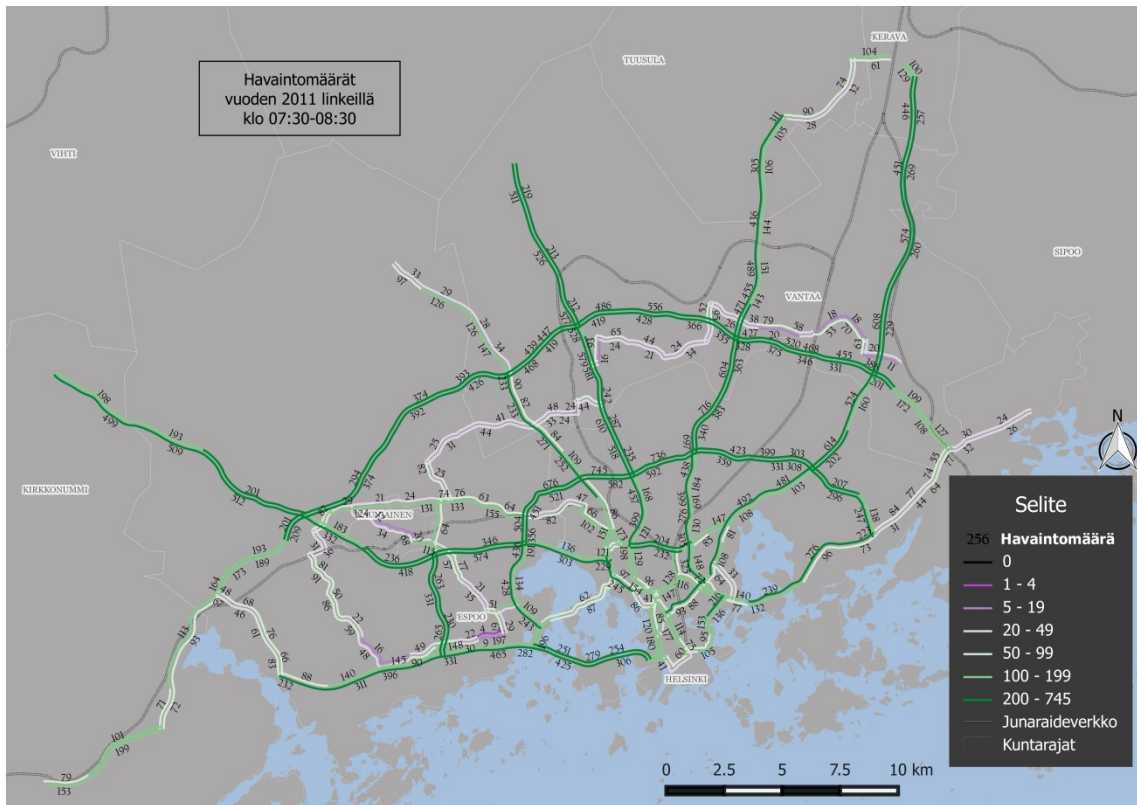


Kuva 41 Linkkien keskimääräiset havaintomäärät aamun yhdistetyssä aikaryhmässä

Taulukossa 22 on kuvattu havaintomäärien vaihtelua minimin, maksimin ja keskiarvon avulla. Keskiarvon ja maksimiarvon perusteella havaintomääriä on riittävästi joka aikaryhmässä. Eniten havaintoja aamun yhdistetyssä aikaryhmässä saatiin 745 kappaletta linkillä 118–182, joka on Kehä I:n Hämeenlinnanväylän ja Vihdintien välinen lännen suuntainen linkki. Minimiarvon ja tarkemman tarkastelun perusteella ilmeni linkkejä, joilla havaintomääriä ei kerry riittävästi käytetyllä menetelmällä. Aamun yhdistetyssä aikaryhmässä löytyi 7 linkkiä, joilla havaintomäärä jää alle kymmeneen. Nämä linkit ovat tunnuksiltaan 60–642, 1007–1005, 1013–1033, 1024–1041, 64–60, 1033–1013 ja 1007–700.

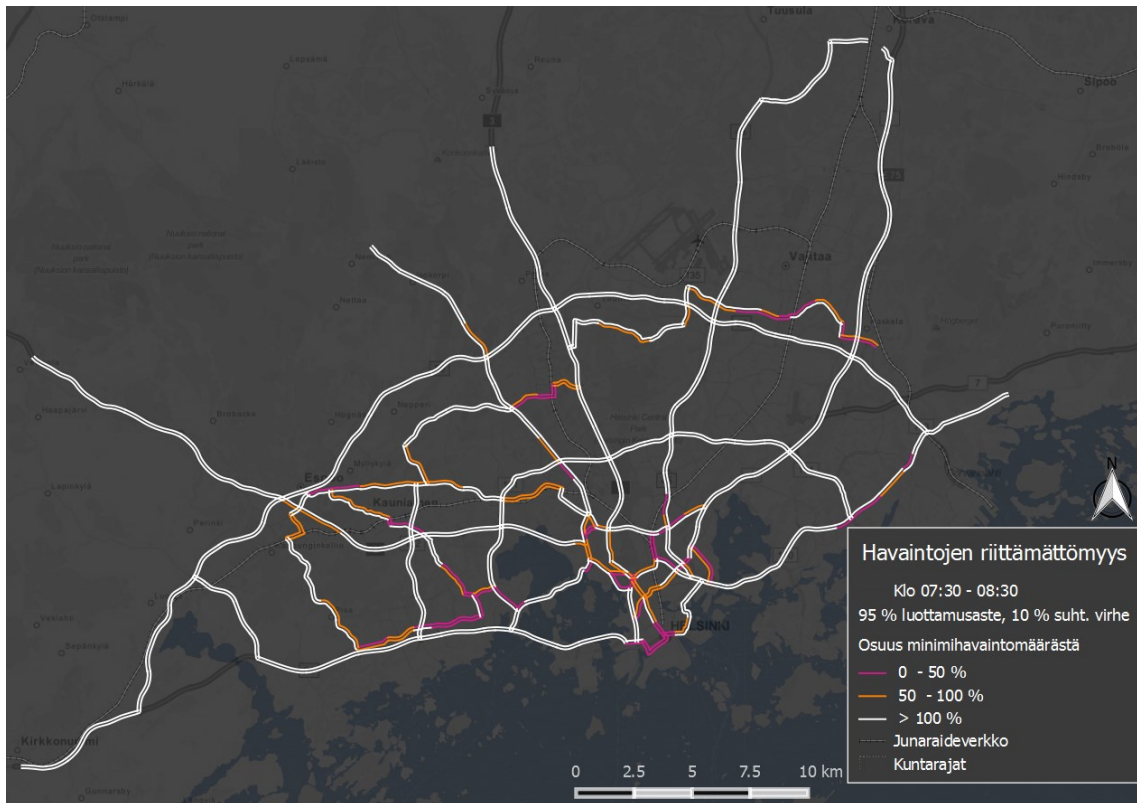
Taulukko 22 Linkkien havaintomäärien tunnuslukuja aikaryhmittäin.

	7.30– 8.30	16.00– 17.00	7.30– 8.00	8.00– 8.30	8.30– 9.00	9.30– 14.30	15.30– 16.00	16.00– 16.30	16.30– 17.00
2011 linkit minimi	4	19	1	3	2	41	8	8	6
2011 linkit maksimi	745	824	402	365	368	2771	348	383	441
2011 linkit keskiarvo	190	201	92	98	92	697	94	98	104
Uudet linkit minimi	4	9	2	3	3	33	2	4	5
Uudet linkit maksimi	415	410	214	200	212	1062	174	188	238
Uudet linkit keskiarvo	115	131	57	57	52	410	59	65	66
Kaikki linkit minimi	4	9	1	3	2	33	2	4	5
Kaikki linkit maksimi	745	824	402	365	368	2771	348	383	441
Kaikki linkit keskiarvo	180	192	87	93	87	658	89	93	98



Kuva 42 TomTom-havaintomäärät syksyllä 2015 aamun yhdistetyssä aikaryhmässä vuoden 2011 linkkien osalta.

HSL:n kelluvan auton mittausten otoskoon vähimmäismääriä arvioitiin Perasto-Bernitzin diplomityössä. Suurin käytetty variaatiokerroin oli 40 %. Variaatiokertoimet ovat TomTom-aineiston perusteella kuitenkin huomattavasti korkeampia liikennevalojen vaikutuspiirissä sijaitsevilla linkeillä. Esimerkiksi vuoden 2011 mittausverkostolta löytyi 17 linkkiä, joiden matkanopeuden variaatiokerroin oli yli 100 % aikaryhmässä 8.00–8.30. Tällöin kaavan 5 (s. 26) perusteella lasketut tarvittavat havaintomäärät nousevat joillain linkeillä todella suuriksi.



Kuva 43 Linkit, joiden TomTom-havaintomäärä ei täytä tilastollista minimihavaintomäärää klo 7.30–8.30.

Jokaiselle linkille saatiin laskettua kokeellinen minimihavaintomäärä jokaiselle aikaryhmälle kaavasta 5, jota voitiin verrata toteutuneeseen havaintomäärään. Minimihavaintomäärät laskettiin 95 % luottamusasteen sekä 10 ja 5 % suhteellisen virheen vaatimisyhdistelmällä. Laskennassa käytettiin Moore ym. (2009) kaltaisesta oletuksesta, että matka-ajat olisivat normaalijakautuneita. Tämä ei kirjallisuuden mukaan kuitenkaan pidä paikkaansa.

Kuvassa 43 on esitetty valkoisesta poikkeavalla värillä linkit, joiden havaintomäärä ei täytä ajankohdan matkanopeuksien variaatiokertoimien (estimaatin) perusteella johdettua minimihavaintomäärää ehdoilla 95 % luottamusaste ja 10 % suhteellinen virhe. Kuvasta havaitaan, että liikennevalojen ympäristössä havaintojen lukumäärä on nykyin liian alhainen, johtuen lähinnä korkeasta matkanopeuksien variaatiokertoimesta. Linkejä on 118 kappaletta eli varsin paljon. Havaintoja tarvittaisiin näiltä linkeiltä enemmän tilastollisesti merkitsevän lopputuloksen saamiseksi. Mikäli suhteellisen virheen halutaan olevan esimerkiksi 5 %, tarvitaan havaintoja nelinkertainen määrä 10 % suhteelliseen virheen minimihavaintomäärään. Toisin sanoen vuoden 2011 mittausajojen määrät ovat olleet selvästi liian alhaisia. Päivän aikaryhmässä havaintomäärät ylittävät pääosin 95 % luottamusasteen ja 5 % suhteellisen virheen vaatimuksilla lasketun minimihavaintomäärän.

Minimihavaintomäärät ovat ristiriidassa kirjallisuudessa esiintyvien mielivaltaisten oloisten ”nyrkkisääntöjen” tai kaavalla 5 laskettujen vaatimusten kanssa (esim. Turner ym. 1998, taulukko 3-4). Kirjallisuudessa esiintyvät minimihavaintomäärät ovat yleensä nyt laskettuja pienempiä. Asia vaatisi jatkotutkimusta.

7.4.6 Laskennan ja vertailuasetelman epätarkkuudet

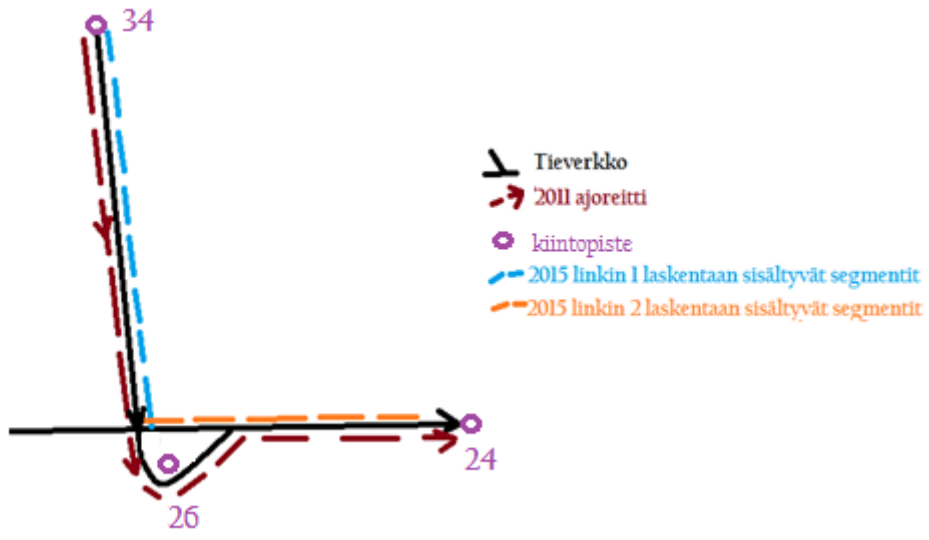
Laskentaskripti sisältää yhden tietoisien virheiden. Mikäli reitityspiste sijoittuu segmentin puoliväliin, sisällytetään segmentin pituus ja matka-aika kokonaisuudessaan käsiteltävän linkin sujuvuuslaskentaan. Tehtyjen virhetarkastelujen perusteella linkin laskentaan sisällytetyt segmentit ovat kokonaispituudeltaan keskimäärin 3 % reititettyä geometriaa pidempiä, mikä tarkoittaa keskimäärin n. 80 metrin liiallista pituutta linkkiä kohden. Käytännössä syntyvä virhe on lopulta hyvin pientä, sillä teoriaosuuden mukaan peräkkäisten segmenttien liikenteen sujuvuus on vahvasti korreloitunutta. Lisäksi virheen vaikutus pienenee entisestään, sillä reitityspisteitä sijoitettiin tämä seikka mielessä niin, ettei ylimääräisiä segmenttejä tulisi mukaan tietyn linkin laskentaan. Tämä virhe jätettiin siksi, että laskentaskripti olisi tulevaisuudessa yhteensopivampi erilaiselle aineistolle ja laskennalle ilman Network Analyst -lisäosaa.

Käytetty matka-aikatieto on mittausteknisesti hieman erilaista kuin aktiivisen kelluvan auton mittausaineisto. Vuonna 2011 kelluva auto ajoi liikennesääntöjen mukaisesti ja aina oikeanpuoleista kaistaa, kun taas TomTom-aineisto sisältää usean kaistan liikennevirran matka-aikatietoa. Lisäksi jälkimmäinen kuvastaa ihmisten todellista ajokäyttäytymistä. Nämä ovat nyt kokeillun ja vuoden 2011 mittausmenetelmän välisiä selkeitä eroja, joita ei voi välttää minkään joukkoistetun liikenneinformaation keruumenetelmän kohdalla. Ero kuvastanee ohjeistettua mittausaistia paremmin vallitsevaa todellisuutta.

Aineiston sujuvuusarvojen laskentavaiheeseen sisältyneiden ajoneuvojen tyyppijakaumasta ei ollut saatavilla tietoa. Esimerkiksi mahdollinen taksien liiallinen määrä ilmensi siten, että joukkoliikennekaistojen linkkien sujuvuus näyttäytyisi aineistossa todellisuutta parempana. Tehtyjen paikkatietotarkastelujen perusteella joukkoliikennekaistoja sisältävillä linkeillä poikkeamaa matkanopeudessa on vain vähän aiempien vuosien tuloksiin. Lisäksi matkanopeuden muutokset olivat kyseisillä linkeillä sekä lievän positiivisia että negatiivisia. Tässä kohden tarkasteltiin eroa vuoden 2011 aamun ja päivän tuloksiin. Vaikuttaa siis siltä, että taksien osuus TomTom-aineiston laskentaan sisältyneistä ajoneuvoista on vähäinen.

Kehitetty laskentaskripti on yksinkertainen, sillä se vain summaa keskimääräisiä matka-aikoja. Menetelmän luotettavuutta ei lopulta pystytty todentamaan liikennevalo-ohjatuilla linkeillä referenssiarvojen puuttumisesta johtuen.

Poikkeamaa tuloksiin syntyy myös muutaman linkin päässä, joilla on aiempina vuosina tehty kustannustehokkuuden vuoksi kompromisseja mittausajoreiteissa. Toisin sanoen kaikkia linkkejä ei ole aiemmin mitattu niiden loogiseen päätepisteeseen saakka, vaan on saatettu kääntyä ramppia pitkin mittaamaan seuraavaa eri ilmansuuntaan johtavaa linkkiä (Kuva 44). Esimerkiksi linkillä 26–24 mittauksen alku suoritettiin vuonna 2011 liittymäramppia pitkin. Nyt matka-aikatietoa oli saatavilla erikseen sekä linkin 26–24 että linkin 34–26 koko pituudelta. Uusi ratkaisu kuvastaa aiempaa paremmin erillisten linkkien sujuvuutta. Tällaisia eroja havaittiin myös linkeillä 708–709 ja 709–708.



Kuva 44 Matka-ajan mittaus- ja laskentaperiaatteen ero vanhan ja uuden menetelmän välillä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön tekemisen aikana huomattiin, että laadukas todellista matka-aikaa kuvaava informaatio on sekä monimutkaista luoda, harvinaista että arvokasta. Havaittiin, että laadukasta matka-aikatietoa on saatavilla HSL:n matkanopeustutkimuksen tutkimusalueelta, mutta varsin vähän. Aiemmalle kelluvan auton mittausmenetelmälle on joka tapauksessa syntynyt varteenotettava vaihtoehto, johon kuuluvat kaupalliset tietoaaineistot. Tietoaaineistoja tuottavat pääosin yksityiset yritykset. Ongelmallisesti kaupallisen matka-aikatiedon taustalla olevista laskenta- ja käsittelymenetelmistä on vaikeaa saada kattavaa tietoa. Tämä selittyy pitkälti yrityssalaisuuksilla. Lisäksi havaintojen taustalla oleva ajoneuvojen tyyppijakauma ei tyypillisesti ole selvillä, mikä selittyy tiedontuottajien ihmisten yksityisyydensuojaa alusta alkaen kunnioittavan anonyymien tiedonkeruun tavoitteella. Tästä johtuen tarkastellut aineistot eivät uhkaa yksityisyydensuojaa.

Matka-aikatiedon laadun spatio-temporaalinen vaihtelu asettaa tekee laadun arvioinnista ensiarvoisen tärkeää. Selvityksen perusteella TomTom:n aineisto tulkittiin tällä tutkimuskerralla riittävän laadukkaaksi. Aineiston laatu vaikuttaa riittävältä ja aiempaa paremmalta tarkastelluilla tieosilla. Aineiston laatua ei kuitenkaan voitu arvioida kantakaupungissa, liikennevalo-ohjatuilla tai vähiten liikennöidyillä linkeillä, sillä minkäänlaista referenssitietoa ei ollut saatavilla. Erot aiempien vuosien tuloksiin eivät pääasiassa vaikuta epäilyttävän suurilta.

Kelluvan auton aktiiviset mittausajot eivät edelleenkään tarjoa hyvää vaihtoehtoa koko tutkimusalueen matka-aikatiedon mittaamiseen, sillä nyt käytettyjen linkkien myötä mittausverkosto on yli kaksinkertaistunut pituudeltaan. Monien linkkien matkanopeuksien variaatiokertoimet havaittiin kokeellisessa osiossa selvästi aiempien tarkasteluiden oletuksia suuremmiksi, eli mittausajojen lukumäärää tulisi kasvattaa hyvän tilastollisen merkittävyyden saavuttamiseksi selvästi aiempia oletuksia enemmän.

Keskimääräisen matka-aikatiedon perustuminen ihmisten todellisiin ajosuoritteisiin saa aikaan sen, että keskimääräiset matkanopeudet voivat jopa ylittää nopeusrajoituksen. Sama havaittiin Perasto-Bernitzin diplomityössä kamerajärjestelmän tulosten osalta. Tämän realiteetin vuoksi mittausasetelma ei ole täysin sama kuin aiemmassa aktiivisen kelluvan auton menetelmässä, jossa mittausauton kuljettajilla oli selkeät ohjeet ajaa oikeaa kaistaa nopeusrajoituksen mukaisesti. Lisäerona kaikki tarkastellut paikkatietoaaineistot kuvaavat usean kaistan liikennetilannetta yhtenä kokonaisuutena. Pelkän satelliittipaikannuksen sijaintitarkkuus ei nykyisin käytössä olevilla laskentamenetelmillä ole riittävää kaistanvaihtojen tunnistamiseen. Kaistanvaihtojen tunnistamiseen tarvittaisiin esimerkiksi hybridipaikannusmenetelmien parempaa hyödyntämistä, tienvarsitunnisteita tai kehittyneempiä laskentamenetelmiä. Tarkkuuteen saattaa olla tulossa parannuksia jo lähitulevaisuudessa hybridisatelliittipaikannuksen yleistymisen, satelliittipaikannuksen laskennallisten korjausmallien kehittämisen ja itseohjautuvien autojen teknologian kehittämisen myötä.

Matkanopeustutkimukseen riittävän tarkkoja paikannuslaitteita on joka tapauksessa autoissa ja ihmisten mukana jatkuvasti enemmän. TomTom-aineisto säilynee saatavilla niin kauan kuin ihmiset käyttävät TomTom-navigaattoreita ja aineistolle on kaupallista kysyntää. Minkä tahansa matka-aikatietoaaineiston säilyvyyttä voidaan kuitenkin pitää riskitekijänä HSL:n matkanopeustutkimuksen toistettavuudelle.

Nyt käytetyn uudenlaisen tietolähteen suurimpia etuja aiempiin kelluvan auton mittauksiin nähden ovat mahdollisuus kerätä mittausaineisto jälkikäteen, selvästi suuremmat havaintomäärät, suurempi tieverkollinen kattavuus sekä sujuvuuden tarkempi erottelukyky. Liikenteen ”pullonkaulojen” sijainnit näyttäytyvät alkuperäisessä aineistossa aiempia matkanopeustutkimuksia tarkemmin, eivätkä sulaudu kokonaisuuteen. Heikkouksia aiempaan menetelmään verrattuna ovat poikkeusolosuhdetiedon, kuten tietöiden, kirjaamismahdollisuuden puuttuminen sekä pieni epävarmuus esimerkiksi kulkumuotojakautuman ja säilyvyyden suhteen.

Mittausverkostolla on edelleen linkkejä, joilla havaintomäärät jäävät tilastollisesti liian alhaisiksi esimerkiksi puolen tunnin vertailuihin, johtuen suuresta matka-aikojen vaihtelusta liikennevalojen läheisyydessä. Ratkaisuna havainnointiajanjaksoa tai aikaryhmiä voisi pidentää. Joka tapauksessa vaikuttaa siltä, että valmiita paikkatietoaineistoja käyttämällä saadaan tuotettua aiempia kelluvan auton mittauksia laadukkaampaa ja monikäyttöisempää tietoa liikenteen sujuvuuden vaihteluista.

Hankitun matka-aikatiedon laatua oli vaikea arvioida valtateiden ulkopuolella, sillä vertailutietoa ei löydetty. Tätä varten täytyisi tulevaisuudessa kehittää mittausasetelma, jossa ongelmalliseksi arvioitujen teiosien matka-aikoja mitattaisiin samalla aikavälillä kuin kaupallista aineistoa on tuotettu. Vertailumittausasetelmänä voisi toimia esimerkiksi lähipaikannus tai aiemman kaltainen aktiivisen kelluvan auton mittaus.

Laadun spatio-temporaalisen vaihtelun vuoksi havaintomäärien silmämääräistä tarkastelua on syytä tehdä hiukan myös seuraavissa matkanopeustutkimuksissa ennen hankintaa, sillä paikannuslaitteiden käyttöön perustuvien tietoaineistojen havaintomääriä ei voi ennustaa varmasti tulevaisuuden osalta.

Aineiston käsittely oli kattavasta testikäytöstä ja suunnittelusta huolimatta työlästä, sillä aineistolle täytyi ohjelmoida käsittelyskriptejä, luoda aiemman mittausasetelman mukaisia paikkatietoaineistoja sekä testata lopullisen yleistetyt tiedon laatua. Tulevaisuudessa vastaavan aineiston käsittely on luodun prosessin myötä helpompaa. Käsittelyvaihe kuitenkin kevenisi, mikäli tiedontuottaja tuottaisi matka-aikatiedon suoraan haluttujen kiintopisteiden välille. Samalla matka-aikatiedon laatu todennäköisesti paranisi nyt tuoteusta. Tarkka segmenttikohtainen matka-aikatieto mahdollistaa kuitenkin sujuvuuden alueellisen vaihtelun tarkastelun.

Jatkossa kehitettävää on tietöitä koskevan laadukkaamman tiedon etsimisen, liikennevalo-ohjatujen linkkien tulosten laadun arvioisen, paremman karttojen väriskaalan kehittämisen ja paremman linkkien keskihajonnan laskemismenetelmän saralla.

Kaiken kaikkiaan selvityksessä havaittiin, että ajoneuvoliikenteen keskimääräistä matka-aikaa lyhyinä segmentteinä kuvaavasta paikkatietoaineistosta on teknisesti mahdollista laskea linkeille aiempia matkanopeustutkimuksia vastaava tulos, kunhan matka-aikatieto on laadukasta ja tietoaineisto sopivaa. Havaittiin myös, että nyt hankitun matka-aikatiedon perusteella on mahdollista tuottaa laadukkaita keskimääräisiä matkanopeuksia, jotka vastaavat varsin hyvin käytössä ollutta referenssitietoa. Laatutarkasteluiden ja selvästi aiempaa suurempien havaintomäärien perusteella nyt käytettyä menetelmää voidaan pitää aiempaa kelluvan auton mittausmenetelmää luotettavampana.

9 YHTEENVETO

Diplomityön päätavoitteena oli arvioida, onko HSL:n matkanopeustutkimuksen kannalta syntynyt aiempaa aktiivisen kelluvan auton menetelmää parempaa tapaa arvioida ajoneuvoliikenteen keskimääräistä matka-aikaa. Työssä selvitettiin, miten matka-aikatietoa voidaan kerätä paikannusmenetelmien avulla automaattisesti, mistä tekijöistä matka-aikatiedon ja siitä laskettavan matkanopeustiedon laatu riippuu, sekä mikä on keskimääräisen matka-aikatiedon nykytila HSL:n tarpeiden kannalta.

Kirjallisuusosiossa havaittiin, että matka-aikaa voidaan automaattisesti mitata kiintopiste-parien välillä tai jatkuvan paikannuksen avulla koko tieverkolta. Paikannuskelpoisten mobiililaitteiden kasvanut määrä on tehnyt jälkimmäisestä vaihtoehdosta mahdollista, minkä ansiosta on syntynyt kaupallisia matka-aikaa kuvaavia paikkatietoaineistoja.

Matka-aikatiedon laatu riippuu yleisistä ja linkkikohtaisista tekijöistä. Tärkeimpiä yleisiä tekijöitä ovat saavutettava liikenteellinen kattavuus, paikannusmenetelmän sijaintitarkkuus ja laskentamenetelmien laatu. Tärkeimpiä linkkikohtaisia tekijöitä ovat eri aikoihin saavutettavat havaintomäärät ja matka-ajan variaatiokerroin eli vaihtelu linkillä. Variaatiokerroimet ovat suurimmillaan ruuhkatilanteessa ja liikennevalo-ohjatuilla linkeillä. Mitä suurempaa vaihtelu on, sitä enemmän havaintoja tarvitaan tilastollisesti merkitsevän matka-aikatiedon luomiseksi. Lisäksi on joukko laatutekijöitä, jotka ratkaisevat tietoaineiston soveltuvuutta käyttötarkoitukseen.

Diplomityön kokeellisessa osiossa havaittiin, että laadukasta matka-aikatietoa on monimutkaista tuottaa ja vaikeaa löytää sopivassa. Joitakin tietoaineistoja löydettiin HLJ-alueelta. TomTom:n matka-aikatietoaineiston laatua tarkasteltiin aineistoista tarkimmin. Aineiston havaittiin sopivan HSL:n matkanopeustutkimukseen sekä laadun että ominaisuuksien osalta.

Paikkatietomuotoiselle aineistolle kehitettiin toistettavissa oleva käsittelyprosessi, jolla saadaan tuotettua aiempiin matkanopeustuloksiin nähden yhteensopivaa keskimääräistä sujuvuustietoa. Käsittelyprosessin myötä syntyneet tulokset voidaan esittää aikasarjakartoina HSL:n matkanopeustutkimuksessa.

Laatutarkasteluissa havaittiin, että TomTom-aineistosta lasketut linkkikohtaiset matkanopeudet vastaavat pääväylillä varsin hyvin LAM-pisteiden ja kamerajärjestelmän referenssiarvoja. Kantakaupungin linkeille laskettujen matkanopeuksien laatua oli vaikeaa arvioida, sillä minkäänlaisia referenssiarvoja ei ollut saatavilla. Uudet tulokset vaikuttavat kuitenkin uskottavilta ja perustuvat huomattavasti aiempaa suurempaan havaintomäärään. Kokeellisen osion lopussa määritetyt minimihavaintomäärät eivät edelleenkaan ole tilastollisesti täysin riittäviä kaikilla kantakaupungin linkeillä, mutta silti huomattavasti kelluvan autovan mittausajaja suurempia.

Tehtyjen tarkastelujen perusteella matka-ajat ovat jatkaneet kasvuaan vuodesta 2009 ja 2011. Kehitetyllä tutkimusmenetelmällä tulkittiin päästävän kokonaisuudessaan aiempaa luotettavampaan tulokseen, vaikkakin liikennevalo-ohjatuilla linkeillä tarvittaisiin jatkotutkimuksena laadunvarmistusta ja enemmän havaintoja. Diplomityössä saatuja tuloksia voidaan käyttää HSL:n vuoden 2015 matkanopeustutkimuksessa.

LÄHDELUETTELO

- Cambridge systematics. 2012. Travel Time Data Collection white paper. Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida.[Viitattu 12.8.2015].
- Carrion, C. & Levinson, D. 2012. Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Transportation Research Part A* 46 (2012), s.720–741. Verkkojulkaisu. [Viitattu 5.1.2016]. Saatavissa: <http://nexus.umn.edu/papers/VORReview.pdf>
- Clements, M., Noto, G. & Brouwer, J. 2015. TomTom. De Ruyterkade 154, 1011 AC Amsterdam, Hollanti. Sähköpostikeskustelut 3.7.2015–14.10.2015.
- Dawsen, C.J. 2011. *Geographic Information Systems*. New York. Nova Science Publishers. ISBN 9781620819050.
- De Smith, M., Goodchild, M. & Longley, P. 2015. *Geospatial Analysis*. 5. painos. Verkkoversio. [Viitattu 26.5.2016]. Saatavissa: <http://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html>
- Devillers, R. & Jeansoulin, R. 2006. *Fundamentals of Spatial Data Quality*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-ISTE, 2010. ProQuest ebrary. [Viitattu 24.7.2015] ISBN: 9780470394816.
- Dijkstra, E. 1959. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik* 1, s. 269-271. DOI 10.1007/BF01386390.
- Dodge, S., Weibel, R. & Forootan, E. 2009. Revealing the physics of movement: Comparing the similarity of movement characteristics of different types of moving objects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(6), s. 419-434.
- Euroopan komissio. 2011. Opinion 13/2011 on Geolocation services on smart mobile devices. WP 185 (16.5.2011). Verkkojulkaisu. [Viitattu 19.12.2015]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/justice/data-protection/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2011/wp185_en.pdf
- Federal Highway Administration. 2005. *Traffic congestion and reliability: Trends and advanced strategies for congestion mitigation*. Cambridge Systematics Inc. and Texas Transportation Institute, College Station, TX.
- Federal Highway Administration. 2012. *Traffic Data Collection in Rural Areas*. <http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop13029/fhwahop13029.pdf>
- Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C., Fukuda, D. 2008. *Travel time variability - definition and valuation*. DTU Transport. ISBN 978-87-7327-175-9.
- Galati, S.R. 2006. *Geographic Information Systems Demystified*. Boston. Artech House. ISBN 9781580535380.
- Geurs, K. T. & van Wee, B. 2004. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *25 Journal of Transport Geography* 12: 2.

- GSMA Intelligence. 2015. The Mobile Economy. Verkkojulkaisu. [Viitattu 29.12.2015]. Saatavissa: http://www.gsamobileeconomy.com/GSMA_Global_Mobile_Economy_Report_2015.pdf
- Hemminki, S., Nurmi, P. & Tarkoma, S. 2013. Accelerometer-Based Transportation Mode Detection on Smartphones. Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. s. 13.
- Herrera, J., Work, D., Herring, R., Xuegang, B., Jacobson, Q. & Bayen, A. 2010. Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment. Transportation Research Part C 18 (2010), s. 568–583. DOI 10.1016/j.trc.2009.10.006
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2008. GNSS - global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, galileo, and more. Springer. Wien, Itävalta. 516 s.
- HSL. 2012a. Helsingin seudun liikenne –kuntayhtymä -perussopimus 1.1.2012. Verkkojulkaisu. [Viitattu 28.12.2015]. Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/hsl_perussopimus.pdf
- HSL. 2012b. Matkanopeudet HSL-alueella 2011. Julkaisu 2012/25. [Viitattu 13.1.2016]. Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/25_2012_netti.pdf
- HSL. 2015. Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelma HLJ 2015. HSL:n julkaisuja 3/2015. ISSN 1798-6184 (pdf) / ISBN (pdf) 978-952-253-249-7. [Viitattu 29.6.2015]. Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/2015-03-03-hlj_2015-raportti.pdf
- HSL. 2016. Ajoneuvoliikenteen hinnoittelun teknistoiminnallinen selvitys. HLJ 2015 jatkoselvitys. Verkkojulkaisu. [Viitattu 16.4.2015]. Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/hsl_julkaisu_4_2016_ajoneuvoliikenteen_hinnoitteluselvitys_teknistoiminnallinen.pdf
- Hu, J., Fontaine, M. & Ma, J. 2016. Quality of Private Sector Travel-Time Data on Arterials. Journal of Transportation Engineering Vol 142:4. ISSN: 1943-5436. Verkkojulkaisu. [Viitattu 27.4.2015]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1061>.
- Infotripla. 2015. Kehräsaari B, 33200 Tampere, Suomi. Puhelinkeskustelu 3.11.2015.
- Innamaa, S., Lanne, L., Vanhanen, L. & Pursula, M. 2002. Pääteiden lyhyen aikavälin matka-aikaennusteet. Tiehallinnon selvityksiä 5/2002. Oy Edita Ab. Helsinki 2002. ISSN 1457-9871. ISBN 951-726-863-7. Verkkojulkaisu. [Viitattu 15.4.2016]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200739-02.pdf>
- Innamaa, S. & Hätälä, E. 2012. Floating mobile data pilot in the Helsinki Metropolitan Area – Validation of travel time data. VTT Technology 50. ISBN 978-951-38-7877-1. Verkkojulkaisu. [Viitattu 3.9.2015]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T51.pdf>

- International Transport Forum. 2015. Big Data and Transport: Understanding and assessing options. Verkkojulkaisu. [Viitattu 19.12.2015]. Saatavissa: http://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_bigdata_0.pdf
- Isukapati, I., List, G., Williams, B. & Karr, A. 2012. Synthesizing route travel time distributions from segment travel time distributions. Artikkeliluonnos. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Verkkojulkaisu. [Viitattu 8.1.2015]. Saatavissa: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/rfp138/102trb-2013_comonotonicity-v8c.pdf
- Izadpanah, P. 2010. Freeway Travel Time Prediction Using Data from Mobile Probes. University of Waterloo, Civil and Environmental Engineering. Doctoral Thesis. [Viitattu 15.7.2015]. Saatavissa: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/5629>
- Jaakkola, T. 2013. Paikkatietopohjainen menetelmä autoilun ajoaikojen ja kokonaismatka-aikojen mallintamiseen – esimerkkinä pääkaupunkiseutu. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. Geotieteiden ja maantieteen laitos.
- JHS 160. Paikkatiedon laadunhallinta. 2006. Muokattu 5.10.2012. Verkkojulkaisu. [Viitattu 3.2.2016]. Saatavissa: <http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS160/JHS160.pdf>
- Kallberg, V-P., Luoma, J., Mäkelä, K., Peltola, H. & Rajamäki, R. 2014. Ajonopeuden liikenneturvallisuus- ja ympäristövaikutukset. VTT Technology 197. ISBN 978-951-38-8191-7. Verkkojulkaisu. [Viitattu 4.2.2016]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>
- Karimi, H.A. 2014. Big data: techniques and technologies in geoinformatics. CRC Press 2014. ISBN: 978-1-4665-8651-2.
- Kaplan, E.C. & Hegarty, C.J. 2006. Understanding GPS - Principles and Applications. 2. painos. ISBN 1-58053-894-0. Artech House, Norwood, Boston, USA. 703 s.
- Koskinen, K., Salonen, N., Leskinen, T., Liukkonen, O. 2014. Liikenteen tietoaineistot ja tunnusluvut. Liikenneviraston selvityksiä 2/2014. ISSN 1798-6664. Verkkojulkaisu. [Viitattu 17.1.2016]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2014-02_liikenteen_tietoaineistot_web.pdf
- Leduc, G. 2008. Road traffic data: collection methods and applications. JRC Technical Notes, Working Papers on Energy, Transport and, Climate Change, N.1. Verkkojulkaisu. [Viitattu 21.9.2015]. Saatavissa: <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=1839>
- Liikenne- ja viestintäministeriö. 2013. Oikeudenmukaista ja älykästä liikennettä. Työryhmän loppuraportti. Julkaisuja 37/2013. Verkkojulkaisu. [Viitattu 26.5.2016]. Saatavissa: <http://www.lvm.fi/documents/20181/799435/Julkaisuja+37-2013/f04de992-beb1-4ff4-b716-24f70614b50e?version=1.0>

- Liikennevirasto. 2015a. Liikennetilanne-tietopalvelu. [Käyty 5.9. ja 17.10.2015]. Saatavissa: <http://liikennetilanne.liikennevirasto.fi/>
- Liikennevirasto. 2015b. Verkkotiedote 18.12.2015. [Viitattu 12.1.2016]. Saatavissa: <https://github.com/finnishtransportagency/digitraffic/wiki>
- List, G., Williams, B., Roupail, N. 2014. Guide to Establishing Monitoring Programs for Travel Time Reliability. Transportation Research Board. SHRP 2 Report S2-L02-RR-1. ISBN 978-0-309-12973-2. Verkkojulkaisu. [Viitattu 3.12.2015]. Saatavissa: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2_S2-L02-RR-2.pdf
- Liu, X., Chien, S. & Kim, K. 2012. Evaluation of floating car technologies for travel time estimation. Journal of Modern Transportation. Vol 20:1. s. 49-56. DOI 10.1007/BF03325777
- Lou, Y, Zhang, Z., Zheng, Y., Xie, X., Wang, W., Huang, Y. 2009. Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories. In Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM, New York, NY, USA. s. 352-361. DOI 10.1145/1653771.1653820. Verkkojulkaisu. [Viitattu 15.7.2015]. Saatavissa: <http://doi.acm.org/10.1145/1653771.1653820>
- Mattila, H. 2003. Linkkikohtaisen liikennetilanteen ajantasainen arviointi. Tiehallinnon selvityksiä 61/2013. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-179-7. Verkkojulkaisu. [Viitattu 21.8.2015]. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fits/julkaisut/hanke3/LILI_Tieh_VALMIS_verkkoversio.pdf
- McCloy, K.R. 2006. Resource management information systems: remote sensing, GIS and modelling. 2nd edition. London. CRC Press. 575 s. ISBN: 9780415263405.
- Moore, D., McCabe, G. & Craig, B. 2009. Introduction to the practice of statistics. 6. painos. Purdue University. New York 2009. ISBN 978-1-4292-1623-4.
- OECD. 2007. Managing Urban Traffic Congestion. European Conference of Ministers of Transport. OECD Publishing, Paris, France. ISBN 978-92-821-0128-5. Verkkojulkaisu. [Viitattu 13.7.2015]. Saatavissa: <http://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/07congestion.pdf>
- Perasto-Bernitz, O. 2010. Pääkaupunkiseudun matka-aikatutkimusten yhteensovittaminen. Diplomityö. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. 104 s.
- Pilli-Sihvola, E., Tarkiainen, M., Vilkmann, A. & Hautala, R. 2011. Paikkasidonnaiset liikenteen palvelut. VTT. ISSN 1459-7683. Verkkojulkaisu. [Viitattu 11.3.2016]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/sites/pastori/Pastori_Teknologia.pdf
- Porter, J., Kim, D., Park, S., Saeedi, A. & Magaña, M. 2012. Wireless Data Collection System for Travel Time Estimation and Traffic Performance Evaluation.

- Rahmani, M. & Koutsopoulos, H. 2013. Path inference from sparse floating car data for urban networks. *Transportation Research Part C*. s. 41-54.
DOI 10.1016/j.trc.2013.02.002
- Rajamäki, R 2012. Matkanopeudet kaksikaistaisilla pääteillä. Seurantatietojen käyttö liikenneturvallisuustyössä. *VTT Technology* 6. ISSN 2242-122X. Verkkojulkaisu. [Viitattu 22.1.2015]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T6.pdf>
- Rohunen, A., Markkula, J., Heikkilä, M. & Heikkilä, J. 2014. Open Traffic Data for Future Service Innovation – Addressing the Privacy Challenges of Driving Data. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*. Vol 9:3. s. 71-89.
- Salonen, M. Analysing spatial accessibility patterns with travel time and distance measures: novel approaches for rural and urban contexts. Väitöskirja. Helsingin yliopisto. Geotieteiden ja maantieteen laitos. Unigrafia. Helsinki 2014. 58 s. ISBN 978-952-10-9466-8.
- Schaefer, M. & Woodyer, T. 2015. Assessing absolute and relative accuracy of recreation-grade and mobile phone GNSS devices: a method for informing device choice. *Vol. 47:2*, s. 185–196. DOI: 10.1111/area.12172
- Seila, J. 2016. Helsingin Taksi-Data Oy. Keskustelu 1.9.2015 ja sähköpostikeskustelu 27.5.2016.
- Tekniikan Sanastokeskus ry. 2002. Paikannussanasto. ISSN 0359-5390. Verkkojulkaisu. [Viitattu 3.5.2016]. Saatavissa: <http://www.tsk.fi/tiedostot/pdf/paikannussanasto.pdf>
- Tiehallinto. 2008. Tieliikenteen toimivuuden määrittely, tunnusluvut ja mittaaminen. Tiehallinnon selvityksiä 7/2008. Edita Prima Oy, Helsinki 2008. ISSN 1459-1553. [Viitattu 20.4.2016]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/3201088_Tieliikenteen_toimivuuden_maarittely.pdf
- Tilastokeskus. 2015. Väestön tieto- ja viestintätekniikan käyttö 2015. Verkkojulkaisu. [Viitattu 29.12.2015]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/sutivi/2015/sutivi_2015_2015-11-26_fi.pdf
- TomTom. 2014. Big (Traffic) Data - Probe Data Analytics and Processing for Traffic Information, Traffic Planning and Traffic Management. Data Forum 2014. Konferenssiesitelmä. Verkkojulkaisu. [Viitattu 20.7.2015]. Saatavissa: <http://2014.data-forum.eu/person/ralf-peter-schaefer.html>
- Transportation Research Board. 2013. Analytical Procedures for Determining the Impacts of Reliability Mitigation Strategies. SHRP 2 Report S2-L03-RR-1. ISBN 978-0-309-12926-8. Verkkojulkaisu. [Viitattu 5.1.2015]. Saatavissa: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2_S2-L03-RR-1.pdf
- Turner S, Eisele W, Benz R & Holdener D (1998). Travel time data collection handbook. Office of Highway Information management. Federal Highway Administration, U.S. Department of transportation. 320 s. FHWA-PL-98-035.

- Rainio, A. 2000. VTT:n tiedotteita 2037. Henkilökohtainen navigointi Markkinat, teknologiat ja sovellukset. Otamedia Oy. Espoo 2000. ISSN 1235-0605 Verkkojulkaisu. [Viitattu 20.8.2015]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2037.pdf>
- Wand, Y., Wang, R. 1996. Anchoring data quality dimension in ontological foundations. *Communications of the ACM*. New York, NY, USA. Vol. 39, nro. 11. s. 86-95. DOI 10.1145/240455.240479.
- Yle. 2016. ”TomTom: Helsingin ruuhkat pahenivat viime vuonna”. *Verkko-uutinen* 22.3.2016. [Käyty 24.3.2016]. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/tomtom_helsingin_ruuhkat_pahenivat_viime_vuonna/8759842
- YTV. 1996. Matka-aikatutkimus v. 1995. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 1996:5. Paperinen julkaisu.
- Zandbergen, P. 2009. Accuracy of iPhone Locations: A Comparison of Assisted GPS, WiFi and Cellular Positioning. *Transaction in GIS*, Vol 13, pp. 5-25. University of New Mexico. Department of Geography. ISSN: 1361-1682. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2009.01152.x.
- Zhang, C., Zheng, Z., Zhang, F. & Ren, J. 2011. Multidimensional traffic GPS data quality analysis using data cube model. *Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*. International Conference on 2011. s. 307-310.
- Zliobaite, I. & Khokhlov, M. 2016. Optimal estimates for short horizon travel time prediction in urban areas. *Intelligent Data Analysis*. ISSN 1088-467X. [Viitattu 15.3.2016]. Saatavissa: <http://arxiv.org/abs/1507.08444>

LIITELUETTELO

Liite 1. Liikennemäärät koko vuoden arkiliikenteen keskiarvona 14 kunnan pääväylillä (HSL 2014).

Liite 2. Pääkaupunkiseudun pääväylien liikennemäärät koko vuoden arkiliikenteen keskiarvona (HSL 2014).

Liite 3. HSL:n matka-aikamittausten mittausreitit, kiintopisteet ja linkit syksyllä 2011 (HSL tarjouspyynnön liite 2011).

Liite 4. HSL:n matka-aikamittausten mittausreitit, kiintopisteet ja linkit Helsingin osalta syksyllä 2011 (HSL tarjouspyynnön liite 2011).

Liite 5. Vuoden 2015 arkipäivien sää tutkimusaikana (HSL Operatiiviset tutkimukset 2015).

Liite 6. Aamuliikenteen (klo 7.30–8.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2011 syksyn välillä.

Liite 7. Päiväliikenteen (klo 9.30–14.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2011 syksyn välillä.

Liite 8. Iltapäiväliikenteen (klo 16.00–17.00) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2011 syksyn välillä.

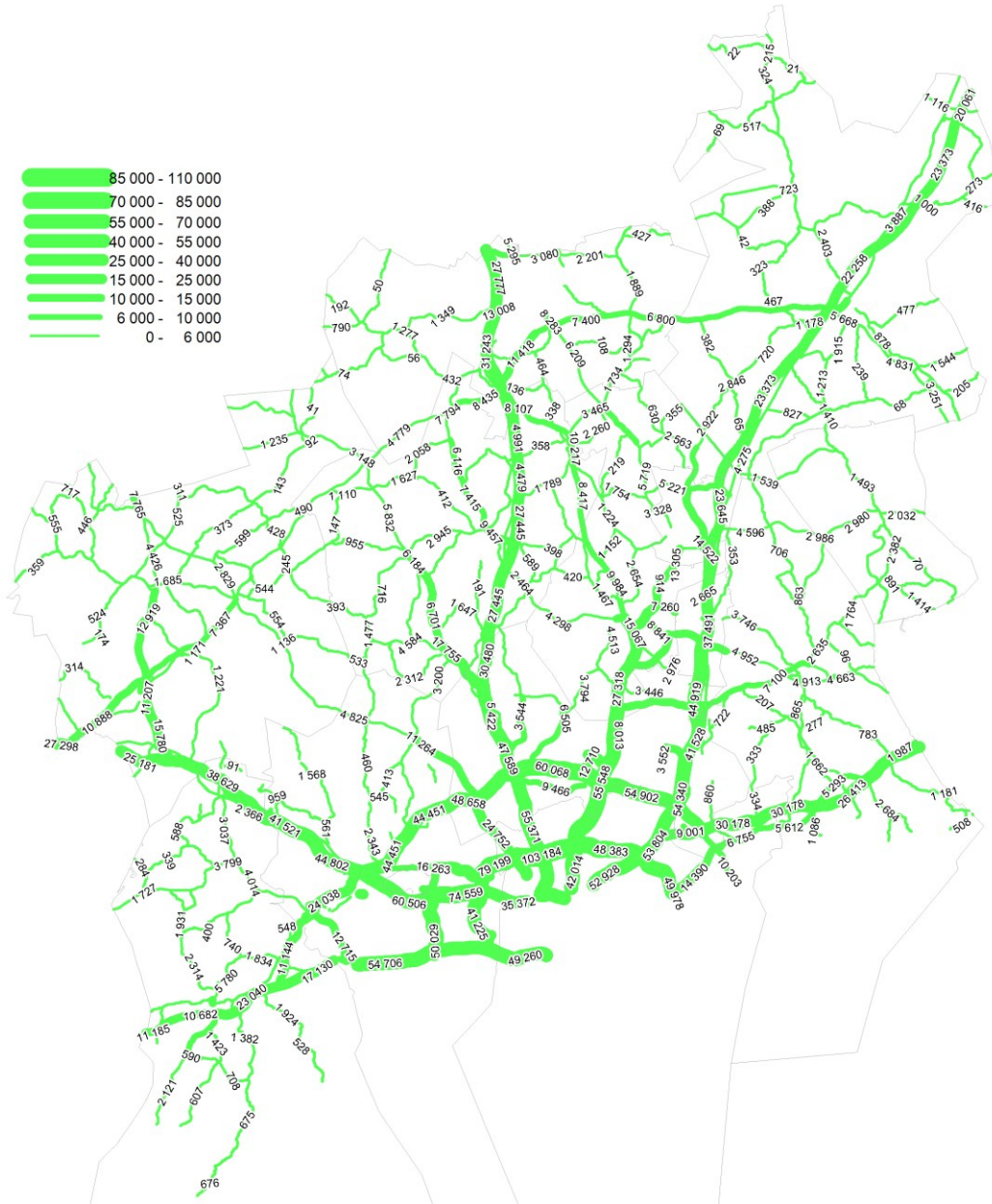
Liite 9. Aamuliikenteen (klo 7.30–8.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2009 syksyn välillä.

Liite 10. Päiväliikenteen (klo 9.30–14.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2009 syksyn välillä.

Liite 11. Iltapäiväliikenteen (klo 16.00–17.00) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2009 syksyn välillä.

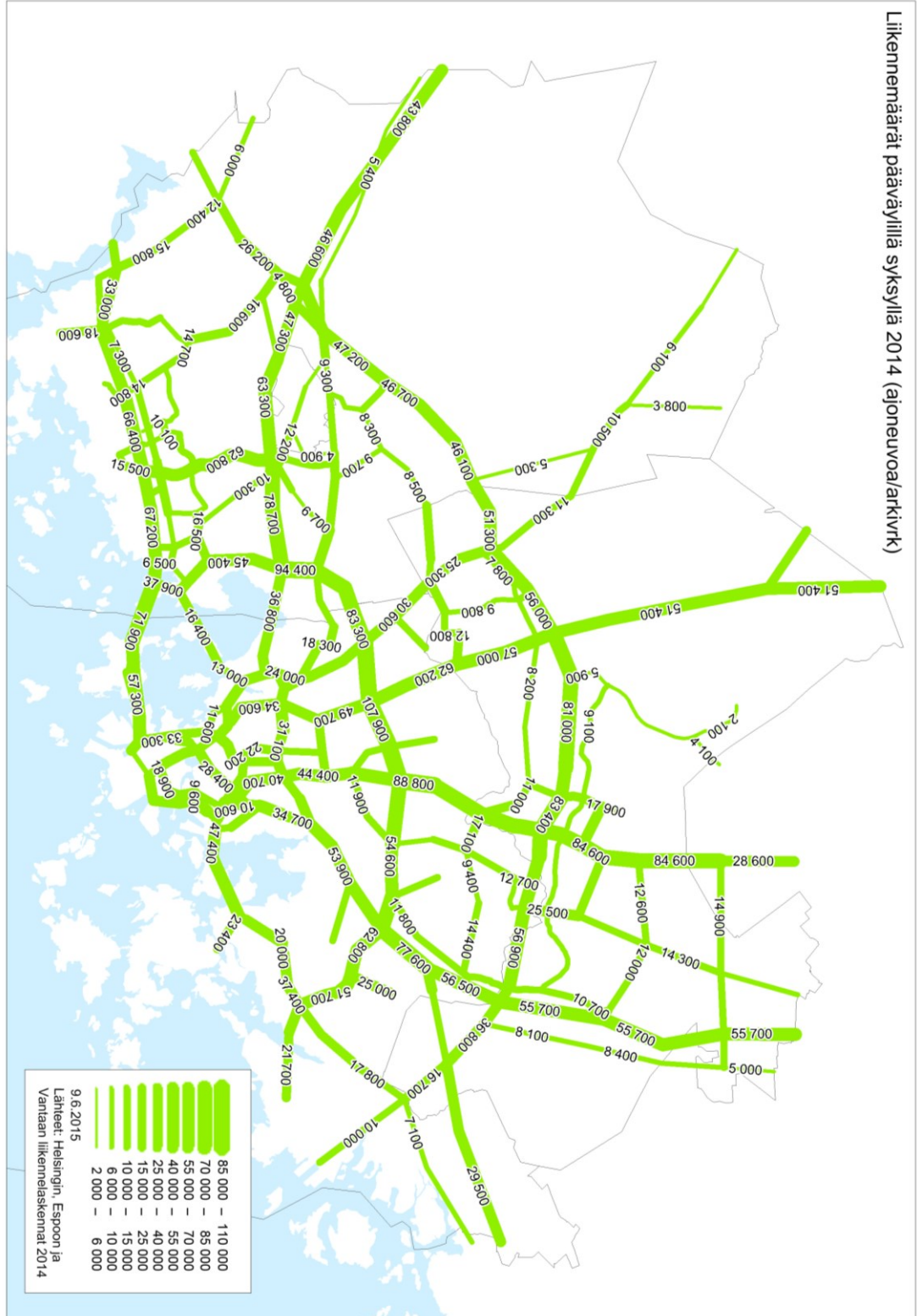
Liite 1. Liikennemäärät koko vuoden arkiliikenteen keskiarvona 14 kunnan pääväylillä (HSL 2014).

**Liikennemäärät KAVL 2014
(koko vuoden arkiliikenteen ka)**



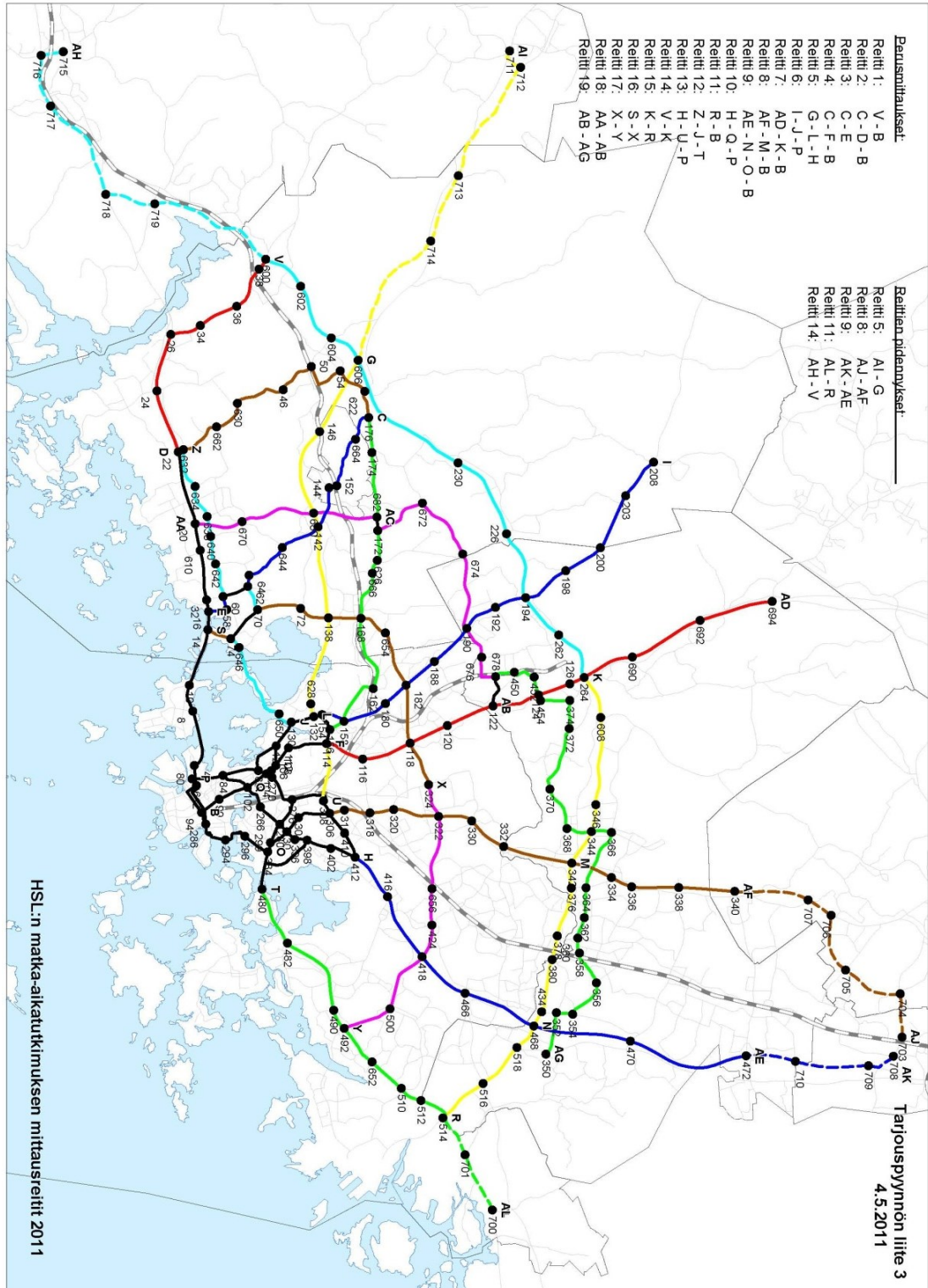
6.3.2015
Lähde:
Tierekisteri 1.1.2015
Uudenmaan ELY

Liite 2. Pääkaupunkiseudun pääväylien liikennemäärät koko vuoden arkiliikenteen keskiarvona (HSL 2014).

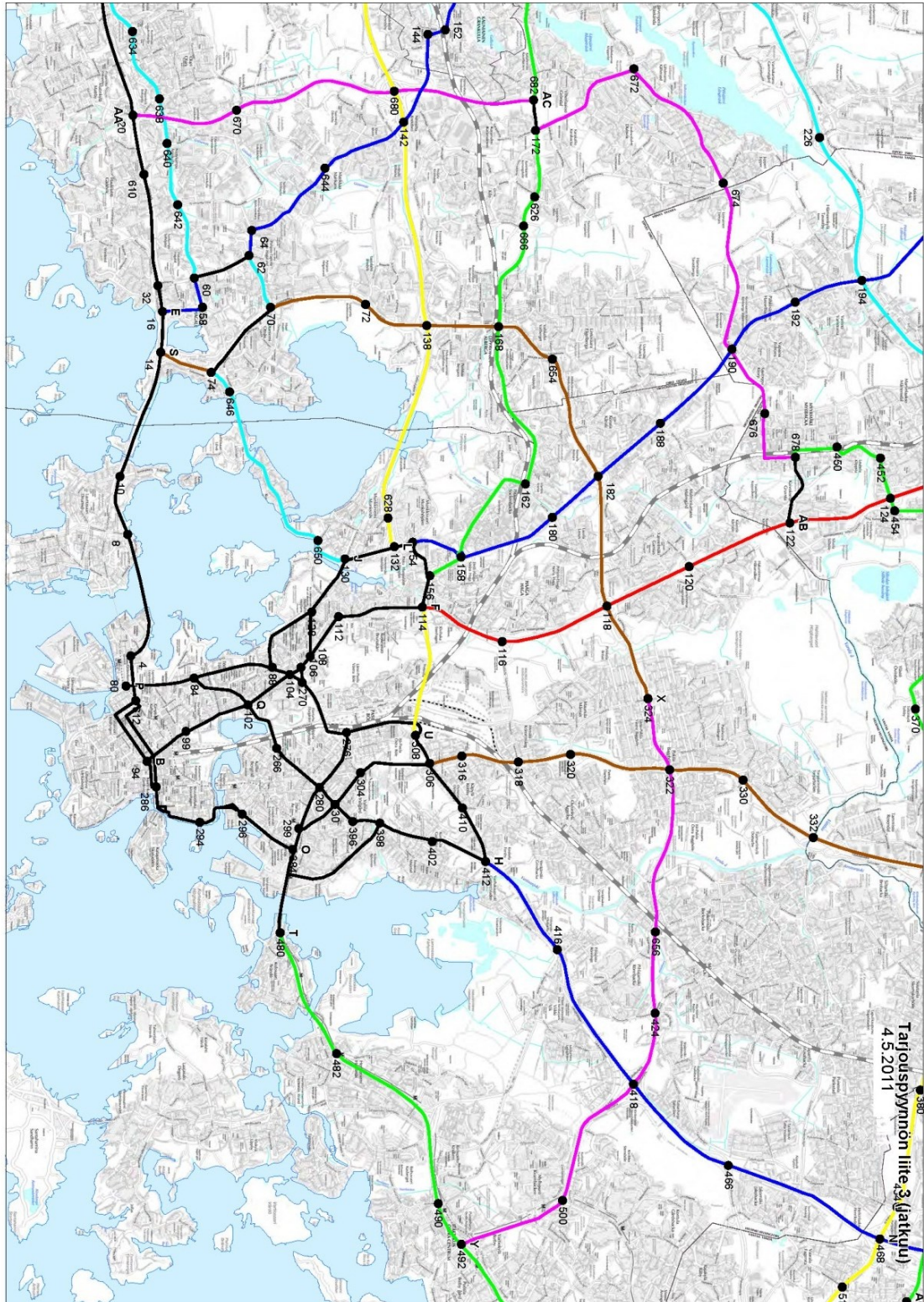


Liite 3 (1/1)

Liite 3. HSL:n matka-aikamittausten mittaussreitit, kiintopisteet ja linkit syksyllä 2011 (HSL tarjouspyynnön liite 2011).



Liite 4. HSL:n matka-aikamittausten mittaussreitit, kiintopisteet ja linkit Helsingin osalta syksyllä 2011 (HSL tarjouspyynnön liite 2011).

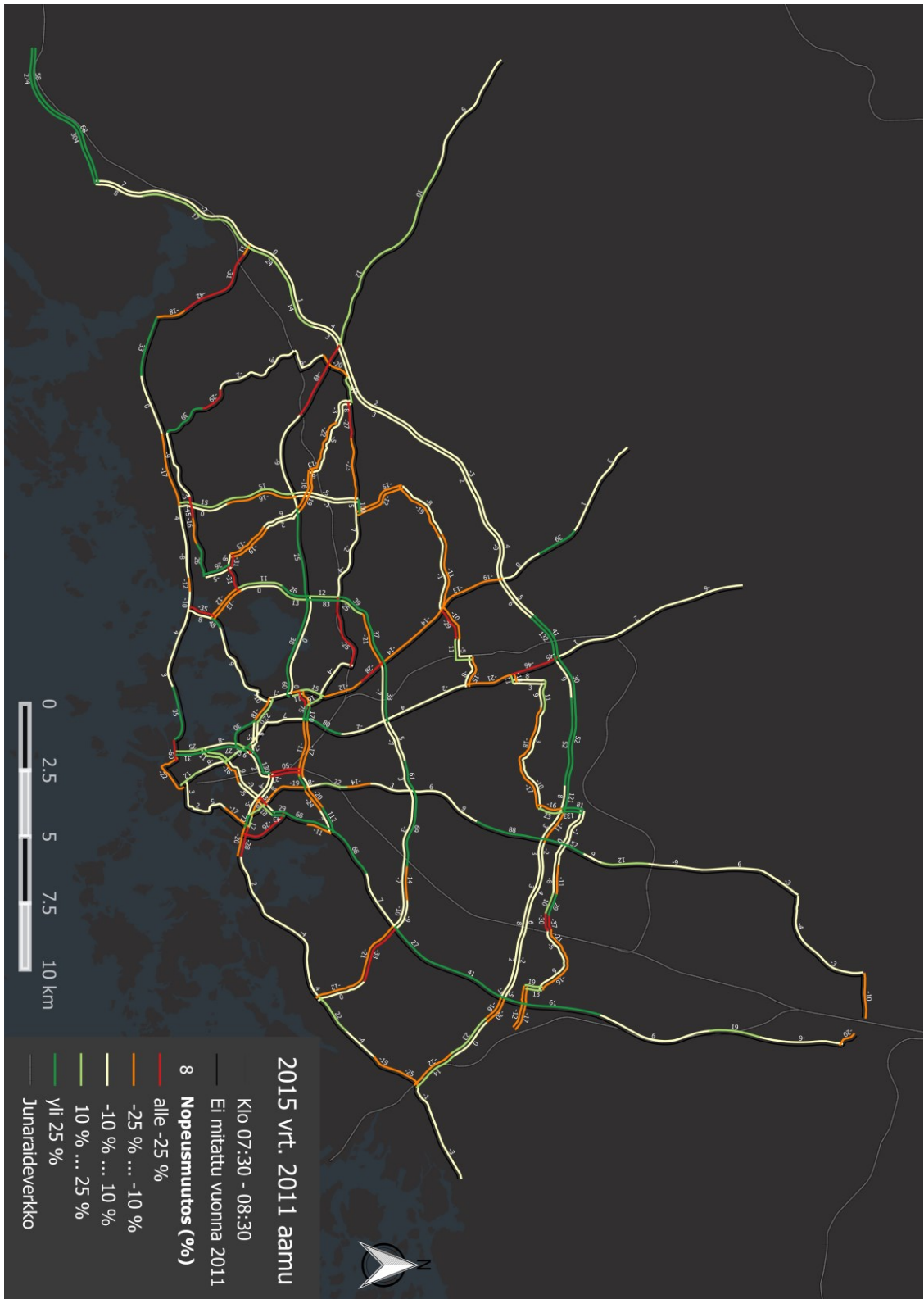


Liite 5 (1/1)

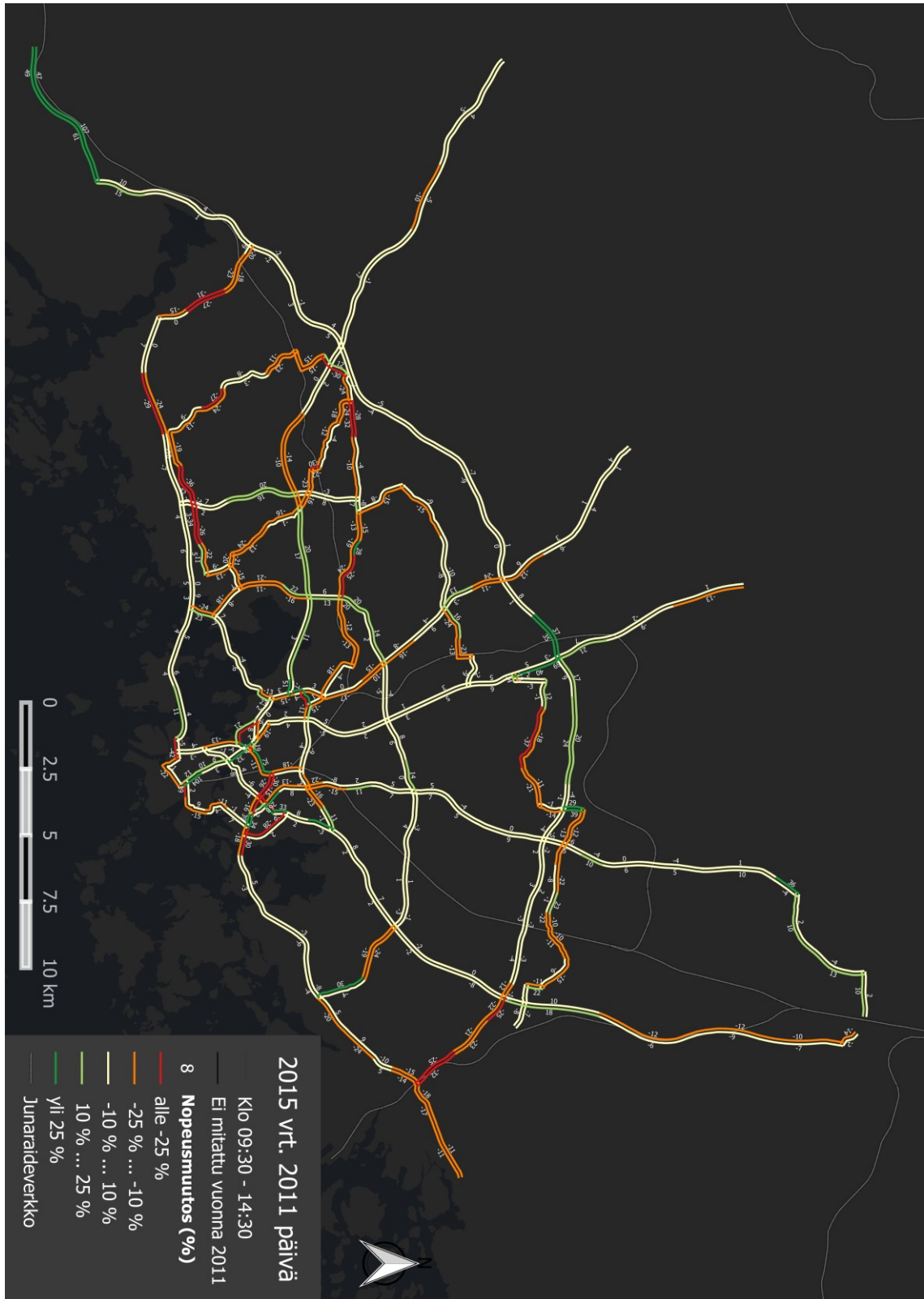
Liite 5. Vuoden 2015 arkipäivien sää tutkimusaikana (HSL Operatiiviset tutkimukset 2015).

ELOKUU		2015		SYYSKUU		2015		LOKAKUU		2015		MARRASKUU		2015	
PAIVA	sää	lämpötila kio 13		PAIVA	sää	lämpötila kio 13		PAIVA	sää	lämpötila kio 13		PAIVA	sää	lämpötila kio 13	
01/09/2015	LA	selkeää	18	01/10/2015	TO	piivista	14	01/11/2015	SU	selkeää					
02/09/2015	SU	puoliplivista	15	02/10/2015	KE	selkeää	14	02/11/2015	MA	selkeää					
03/09/2015	MA	mekkin selkeää	14	03/10/2015	TO	mekkin piivista	14	03/11/2015	TI	selkeää					
04/09/2015	TI	selkeää	19	04/10/2015	PE	selkeää	19	04/11/2015	KE	mekkin piivista					
05/09/2015	KE	mekkin piivista	18	05/10/2015	LA	mekkin selkeää	8	05/11/2015	TO	mekkin piivista					
06/09/2015	TO	mekkin piivista	18	06/10/2015	SU	piivista	6	06/11/2015	PE	mekkin piivista					
07/09/2015	PE	selkeää	23	07/10/2015	MA	piivista	13	07/11/2015	LA	mekkin piivista					
08/09/2015	LA	selkeää	16	08/10/2015	TI	mekkin selkeää	16	08/11/2015	SU						
09/09/2015	SU	selkeää	15	09/10/2015	KE	selkeää	5	09/11/2015	MA						
10/09/2015	MA	selkeää	23	10/10/2015	TO	selkeää		10/11/2015	TI						
11/09/2015	TI	puoliplivista	17	11/10/2015	SU	selkeää	9	11/11/2015	KE						
12/09/2015	KE	puoliplivista	23	12/10/2015	MA	puoliplivista	9	12/11/2015	TO						
13/09/2015	TO	mekkin selkeää	16	13/10/2015	PE			13/11/2015	PE						
14/09/2015	PE	mekkin selkeää	20	14/10/2015	KE			14/11/2015	LA						
15/09/2015	LA	selkeää	16	15/10/2015	TO			15/11/2015	SU						
16/09/2015	SU	selkeää	15	16/10/2015	MA	mekkin piivista	9	16/11/2015	MA						
17/09/2015	MA	selkeää	21	17/10/2015	LA			17/11/2015	TI						
18/09/2015	TI	selkeää	22	18/10/2015	SU	mekkin selkeää	10	18/11/2015	KE						
19/09/2015	TI	selkeää	19	19/10/2015	MA	mekkin selkeää	8	19/11/2015	TO						
20/09/2015	KE	selkeää	22	20/10/2015	TI	mekkin piivista	8	20/11/2015	PE						
21/09/2015	TO	selkeää	22	21/10/2015	KE	mekkin selkeää	8	21/11/2015	LA						
22/09/2015	PE	puoliplivista	21	22/10/2015	LA	mekkin piivista	9	22/11/2015	SU						
23/09/2015	SU	selkeää	16	23/10/2015	MA			23/11/2015	MA						
24/09/2015	MA	selkeää	22	24/10/2015	TI	mekkin selkeää	15	24/11/2015	TI						
25/09/2015	TI	mekkin piivista	22	25/10/2015	KE	mekkin selkeää	16	25/11/2015	KE						
26/09/2015	KE	mekkin piivista	18	26/10/2015	TO	puoliplivista	15	26/11/2015	TO						
27/09/2015	TO	puoliplivista	19	27/10/2015	MA	selkeää	9	27/11/2015	PE						
28/09/2015	PE	mekkin piivista	16	28/10/2015	TI	selkeää	7	28/11/2015	LA						
29/09/2015	LA	mekkin piivista	13	29/10/2015	KE	selkeää	5	29/11/2015	SU						
30/09/2015	SU	selkeää	10	30/10/2015	PE	selkeää	2	30/11/2015	MA						
31/09/2015	MA	selkeää	19	31/10/2015	LA	selkeää	0	31/11/2015	MA						

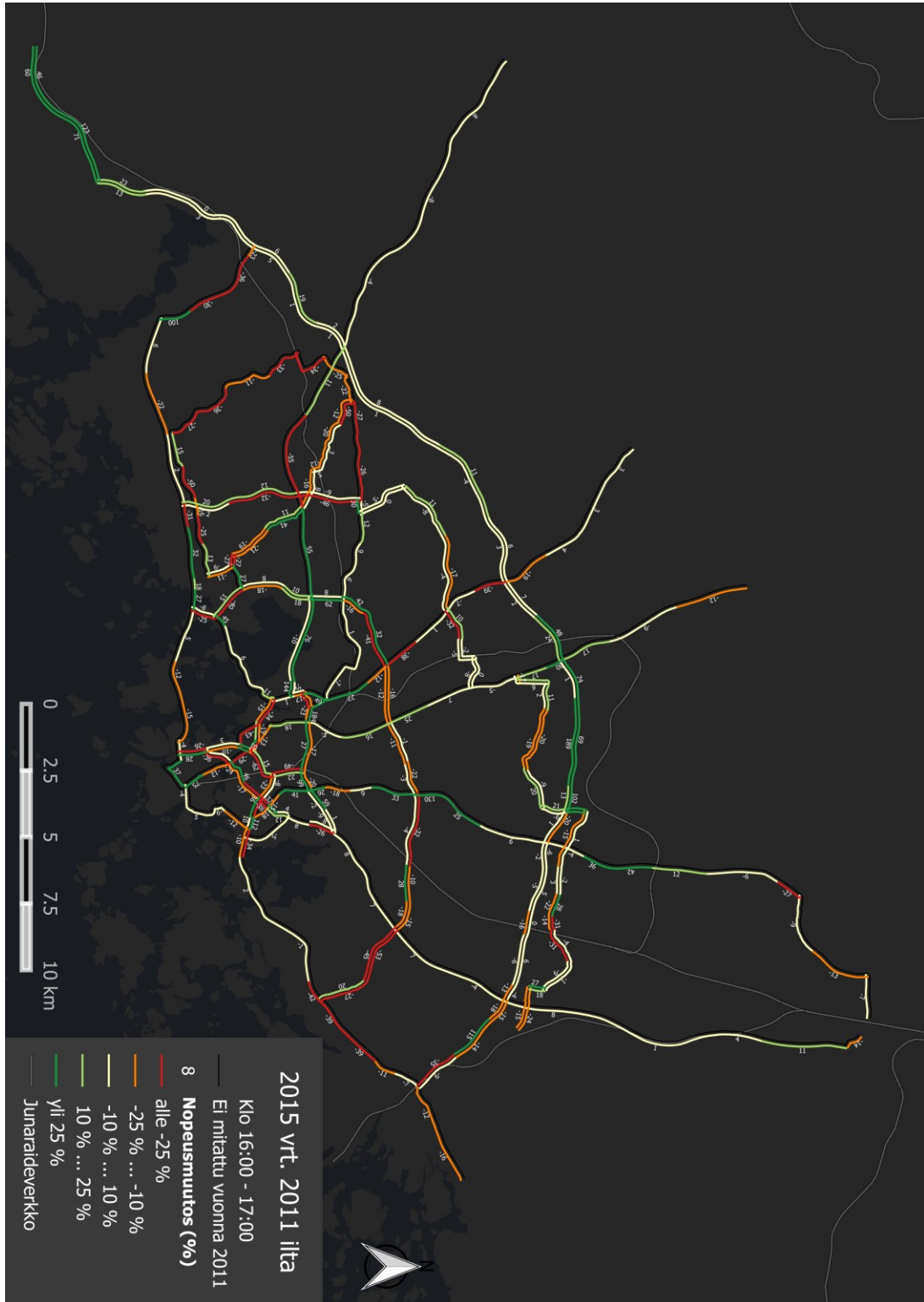
Liite 6. Aamuliikenteen (klo 7.30–8.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2011 syksyn välillä.



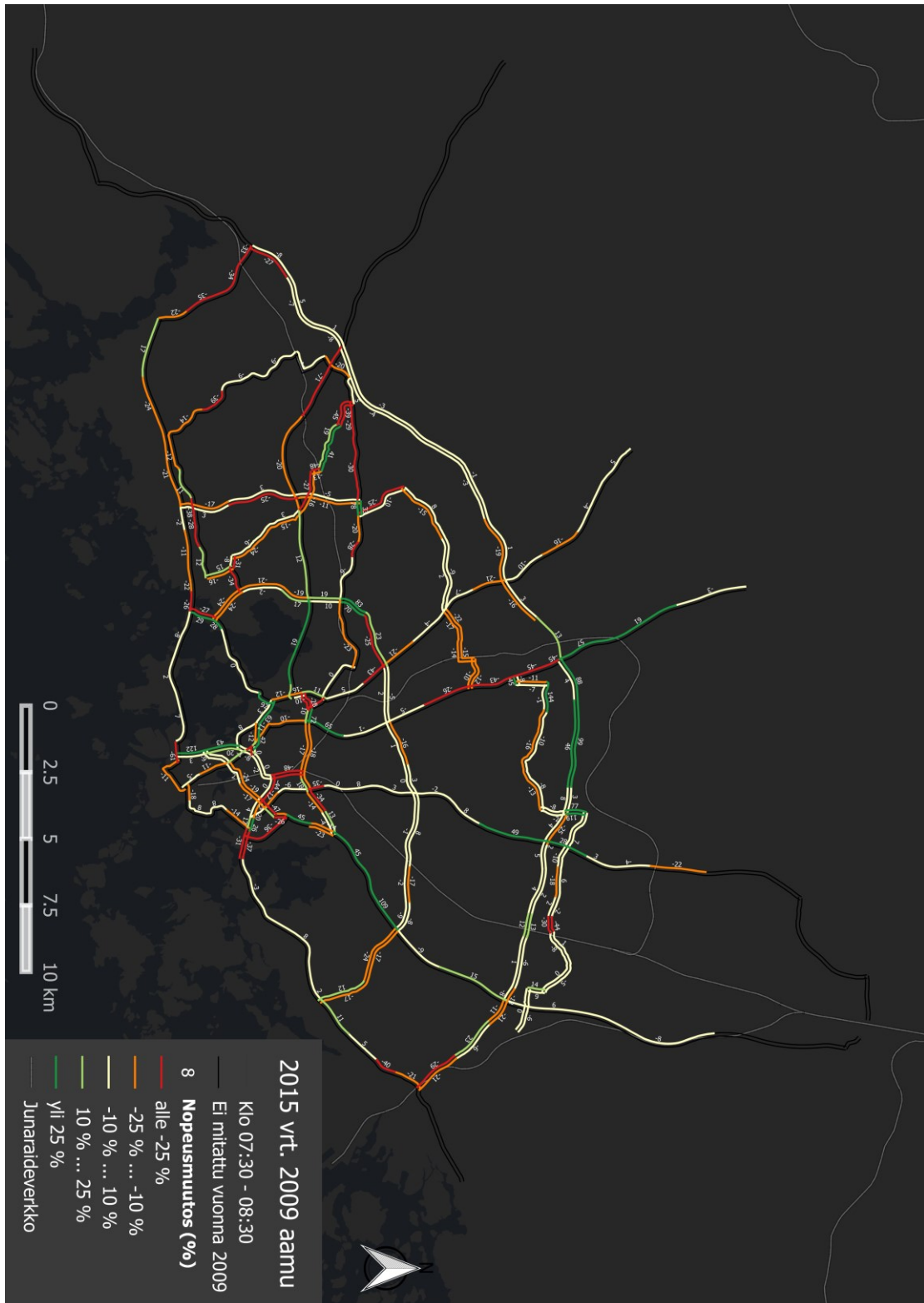
Liite 7. Päiväliikenteen (klo 9.30–14.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2011 syksyn välillä.



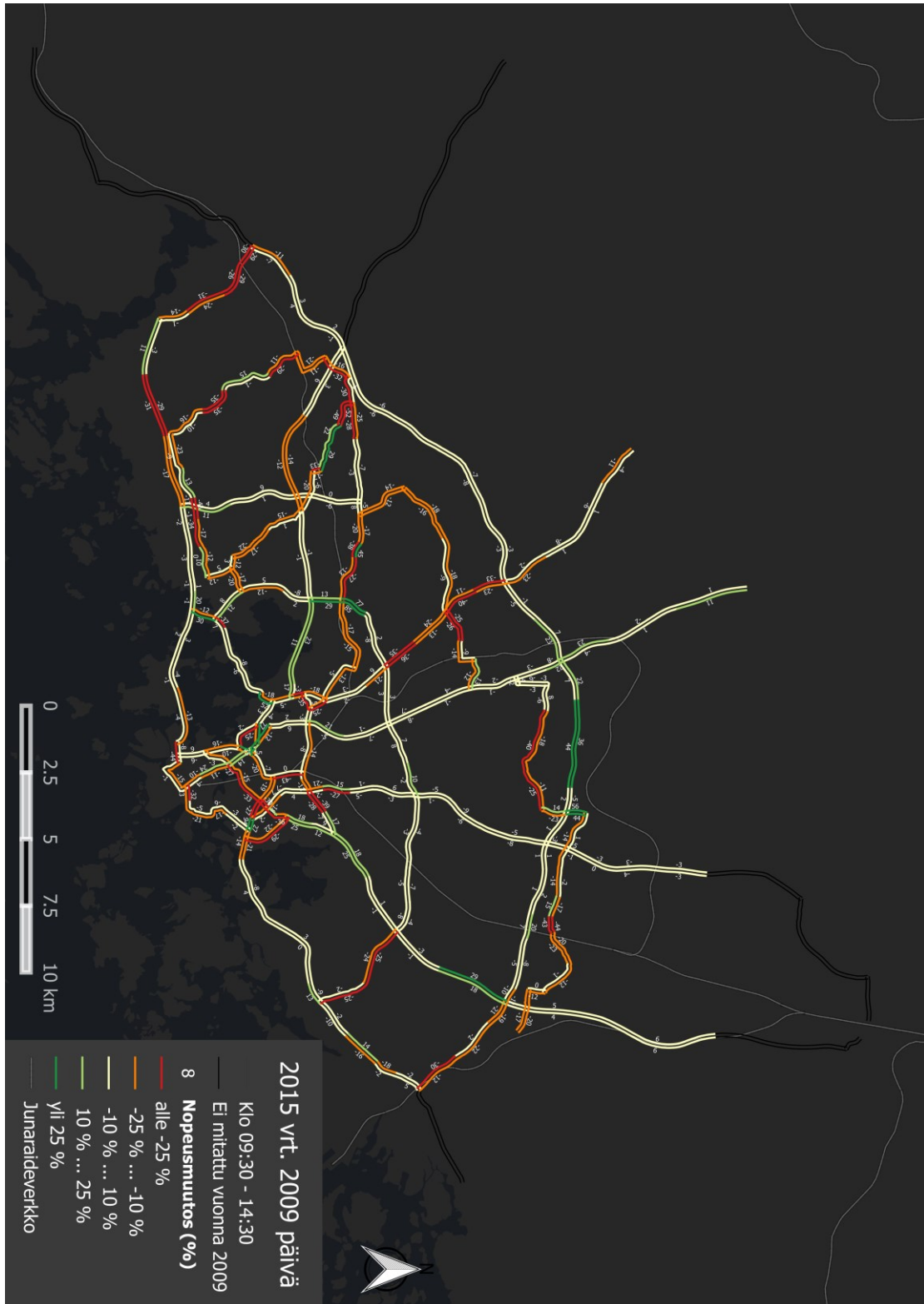
Liite 8. Iltapäiväliikenteen (klo 16.00–17.00) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2011 syksyn välillä.



Liite 9. Aamuliikenteen (klo 7.30–8.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2009 syksyn välillä.



Liite 10. Päiväliikenteen (klo 9.30–14.30) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2009 syksyn välillä.



Liite 11. Iltapäiväliikenteen (klo 16.00–17.00) keskimääräisten matkanopeuksien suhteellinen muutos vuosien 2015 ja 2009 syksyn välillä.

