

22
.....
2016

Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamallit 2014

Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamallit 2014

HSL Helsingin seudun liikenne
Opastinsilta 6 A, 00520 Helsinki
PL 100, 00077 HSL
puhelin (09) 4766 4444
www.hsl.fi

Lisätietoja: Timo Elolähde, (09) 4766 4269 Pekka
Räty, (09) 4766 4259
etunimi.sukunimi@hsl.fi

Copyright: Kartat, graafit, ja muut kuvat HSL
Kansikuva: HSL / Heli Skippari

Helsinki 2016

Esipuhe

HSL:n ylläpitämän Helsingin seudun liikenne-ennustejärjestelmän ensimmäinen versio otettiin käyttöön vuonna 2010. Sitä hyödynnettiin mm. Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelman (HLJ 2011) laadinnassa ja sen osaselvityksissä, maankäyttö- ja verkkoselvityksissä, tie- ja joukkoliikenteen hinnoitteluselvityksissä sekä erilaisissa hanketason tarkasteluissa.

Saatujen kokemusten perusteella järjestelmää kehitettiin edelleen HLJ 2015-kierroksella. Liikennejärjestelmäkuvaukset tarkistettiin vuonna 2013. Lisäksi tehtiin selvitys, jossa tutkittiin erilaisia ajo-neuvoliikenteen viivytysfunktioita ja niiden toimintaa sijoittelussa.

Helsingin seudun työssäkäyntialueen sisäisen liikenteen kysyntämallit uudistettiin. Myös lentoaseman ja satamien matkustajaliikenteen sekä tavaraliikenteen ennustemenettelyä kehitettiin.

Uusi versio liikenne-ennustejärjestelmästä otettiin käyttöön kesällä 2014. Merkittävin käyttökohde on ollut Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelma (HLJ 2015) ja sen vaikutusarviot.

Tämän julkaisun on HSL:ssä koonnut ja toimittanut Timo Elolähde. Julkaisussa esitellään liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamallit ja se koostuu kahdesta osasta. Järjestelmän osien kehittäjät ja raportin kirjoittajat ovat:

D Liikennejärjestelmämallit

Markus Holm, Matti Keränen ja Atte Supponen (Trafix Oy)

Timo Elolähde (HSL)

Miikka Niinikoski (Strafica Oy)

E Viivytysfunktiot

Antti Räikkönen ja Tapani Särkkä (SITO Oy)

Atte Supponen ja Matti Keränen (Trafix Oy)

Henkilö- ja tavaraliikenteen kysynnästä on tehty oma julkaisunsa. Siinä ovat osat:

A Henkilöliikennemallit (HELMET 2.1)

B Lentoaseman ja matkustajasatamien henkilöliikenne

C Tavaraliikenteen kysyntä

Tiivistelmäsiivu

Julkaisija: HSL Helsingin seudun liikenne		Päivämäärä 30.12.2016	
Toimittajat: Timo Elolähde, Pekka Rätty			
Julkaisun nimi: Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamallit 2014			
Rahoittaja / Toimeksiantaja: HSL Helsingin seudun liikenne			
Tiivistelmä:			
Tässä julkaisussa kuvataan Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamalleja, joita päivitettiin 2013–2014. Kysynnästä on erillinen julkaisunsa. Helsingin seudun työssäkäyntialueella tarkoitetaan tässä laajaa 37 kunnan (2007 kuntajaolla) aluetta, johon kuuluvat pääkaupunkiseudun lisäksi koko muu Uudenmaan maakunta ja Riihimäen seutukunta. Suurimpien liikennevirtojen kuvaamisessa on hyödynnetty neliporrasmallia. Tie- ja katuverkot sekä joukkoliikennelinjastot päivitettiin syksyn 2012 tilanteen mukaisiksi. Autoliikenteen viivytysfunktiot vaihdettiin pituusriippuvaisiksi myös ylikysyntätilanteessa. Muut muutokset vuonna 2010 valmistuneeseen versioon ovat ruuhkamaksujen käsittelyssä ja raskaan liikenteen sijoittelussa. Myös kysyntämalleja päivitettiin mm. tavaraliikenteen osalta. D-osassa kuvataan Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikennejärjestelmästä tehtyjä tarjontamalleja. Niissä sekä auto- että bussiliikenne on kuvattu samalle katu- ja tieverkolle. Kuvaukset sisältävät myös raitiovaunu-, metro- ja lähijunaliikenteen sekä koko työssäkäyntialueen linja-auto- ja kaukojunaliikenteen. Kuvauksista saatiin mm. matka-aikatietoja kysyntämallityön lähtöaineistoiksi. Lisäksi ne muodostivat pohjan Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmassa (HLJ 2015) käytetyille ennustevuosien (2025, 2040 ja 2050) liikennejärjestelmämalleille. Sekä auto- että joukkoliikennesijoittelun tuloksia tutkittiin monipuolisesti. E-osassa esitellään autoliikenteen viivytysfunktioista tehtyä työtä, jossa selvitettiin neljän funktiojoukon sijoittelumuinaisuuksia järjestelmätasolla, linkeittäin ja valituilla yhteysväleillä, mm. matka-aikojen, -nopeuksien ja liikennemäärien avulla. Funktioiden suora vaikutus liikennemalliin ja ennusteisiin oli toinen selvityksen aihe. Työn tuloksena saatiin käsitys eri funktioiden ominaisuuksista ja suositus HELMET-mallissa käytettävistä sijoittelufunktioista. Myös jatkotutkimustarpeista annettiin suositus. Tutkitut vaihtoehdot olivat: 1) HSL:n alkuperäiset Davidsonin tyyppiset funktiot, joissa matka-aika on ylikysyntätilanteessa riippumaton linkin pituudesta, 2) leikatut funktiot, joissa keskinopeus linkillä on vähintään 30 % vapaasta nopeudesta, 3) alkuperäisten kaltaiset Davidsonin tyyppiset funktiot, joissa matka-aika riippuu linkin pituudesta myös ylikysyntätilanteessa ja 4) pituusriippuvaisiin funktioihin sovitettut konikaalifunktiot, jotka ovat matemaattisesti yksinkertaisempia ja tyylikkäämpiä mm. koska niiden derivaatassa ei ole epäjatkuvuuskohtaa.			
Avainsanat: liikenne-ennuste, tarjontamalli, liikennejärjestelmä, neliporrasmalli, kulkutapa, hinnoittelu, viivytysfunktio			
Sarjan nimi ja numero: HSL:n julkaisuja 22/2016			
ISSN 1798-6184 (pdf)		Kieli: Suomi	Sivuja: 176
ISBN 978-952-253-297-8 (pdf)			
HSL Helsingin seudun liikenne, PL 100, 00077 HSL, puhelin (09) 4766 4444			

Sammandragssida

[illegible]

Abstract page

Published by: HSL Helsinki Region Transport					
Edited by: Timo Elolähde, Pekka Rätty				Date of publication 30.12.2016	
Title of publication:					
Financed by / Commissioned by: HSL Helsinki Region Transport, Finnish Transport Agency, Centre for Economic Development, Transport and the Environment for Uusimaa, Ministry of Transport and Communications					
Abstract:					
Keywords: traffic forecast, supply model, transport system, four-step model, mode of travel, volume-delay function, pricing					
Publication series title and number: HSL publications 22/2016					
				Language: Finnish	Pages: 176
ISSN 1798-6184 (pdf)		ISBN 978-952-253-297-8 (pdf)			
HSL Helsinki Region Transport, P.O.Box 100, 00077 HSL, tel. +358 (0) 9 4766 4444					

Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamallit 2014

- D** Liikennejärjestelmämallit
- E** Viivytysfunktiot

Liikennejärjestelmämallit 2012



Tiivistelmä

Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikennejärjestelmästä tehtiin vuosina 2007–2010 tarjontamalleja, joissa sekä auto- että bussiliikenne kuvattiin samalle katu- ja tieverkolle. Kuvaukset sisälsivät myös HSL:n raitiovaunu-, metro- ja lähijunaliikenteen sekä koko työssäkäyntialueen linja-auto- ja kaukojunaliikenteen. Alue kattoi Uudenmaan maakunnan (ml. entinen Itä-Uudenmaan maakunta) sekä Riihimäen seutukunnan. Kuvauksista saatiin mm. matka-aikatietoja kysyntämallityön lähtöaineistoiksi. Lisäksi ne muodostivat pohjan Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmassa (HLJ 2011) käytetyille ennustevuosien 2020 ja 2035 liikennejärjestelmämalleille.

Lähtötietoina käytettiin silloin Digiroad-aineistoa, HSL:n joukkoliikennerekisteriä (JORE) ja valtakunnallista liikenneluparekisteriä (VALLU). Työssä kehitettiin konversiomenettely, jolla yksityiskohdaisista lähtötiedoista voidaan ohjelmallisesti muodostaa karkeampi kuvaus Emme-liikennesuunnitteluohjelmiston käyttämään muotoon. Ohjelmallisen käsittelyn vaiheiden välissä ja niiden jälkeen jouduttiin kuitenkin tekemään vielä paljon korjauksia ja tarkistuksia myös käsityönä. Yhtenä syynä tähän olivat lähtöaineistoissa, erityisesti Digiroadissa, olleet virheet ja puutteet.

Seuraavalla HLJ-kierroksella malleja kehitettiin edelleen. Konversiota ei enää edes yritetty, vaan muutokset tehtiin käsityönä.

HLJ 2015:ssä käytetty nykytilan liikennejärjestelmämalli kuvaa vuoden 2012 tilannetta. Siinä on otettu huomioon vuosien 2008–2012 aikana tapahtuneet muutokset liikennejärjestelmässä, mutta samalla on tarkennettu muutenkin kuvauksen periaatteita. Ennustevuosien 2020 ja 2035 kuvauksista muokattiin vuosien 2025, 2040 ja 2050 mallit.

Tehdyissä liikennejärjestelmämalleissa on 1 056 sijoittelualuetta, lähes 30 000 katu- ja tielinkkiä sekä noin 1 000 joukkoliikennelinjaa (suunnat erikseen). Aamuruuhkasta, iltaruuhkasta ja päiväliikenteestä on kustakin omat joukkoliikennelinjaston kuvauksensa. Jalankulku on mahdollista lähes kaikilla kaduilla ja teillä. Jalankulkulinkkejä lisättiin joihinkin terminaaleihin ja vastaaviin erityiskohteisiin. Pyöräilyverkon kuvausta ei tehty.

Työn yhteydessä testattiin kuvausten toimivuutta sekä auto- että joukkoliikennesijoittelussa mm. vertailemalla eri puolilta seutua valittujen alueiden välisiä matka-aikoja. Sekä kysyntä- että tarjontamallityössä päädyttiin jo vuonna 2009 siihen, että raskasta raideliikennettä (juna, metro) ei kuvata omana kulkutapavaihtoehtonaan, vaan erot bussi- ja raideliikenteen ominaisuuksissa otetaan sijoittelussa huomioon nousuajoissa.

Sijoittelu tehdään kultakin alueelta kaikille muille alueille. Ohjelma ei siis laske alueiden sisäisiä vastuksia (matka-aikoja, etäisyyksiä ym.), joten niiden määrittämiseen kehitettiin vuonna 2008 las-
kukaavat. Niitä ei enää päivitetty tällä kierroksella.

Sammandragssida

Under åren 2007–2010 gjordes utbudsmodeller för trafiksystemet i Helsingforsregionens pendlingsområde. I modellerna använder både bil- och busstrafiken samma gatu- och vägnät. Trafiksystemmodellerna inkluderar också HRT:s spårvagn-, metro- och lokaltågstrafik samt buss- och fjärrtågstrafiken i hela pendlingsområdet. Området omfattar Nylands landskap (inklusive f.d. Östra Nylands landskap) samt regionen Riihimäki. Tack vare trafiksystemmodellerna var det möjligt att kalkylera bl.a. restider, som användes som ingångsdata i efterfrågemodellarbetet. De bildade också en bas för trafiksystemmodellernas prognosår 2020 och 2035, som användes i Helsingforsregionens trafiksystemplan HLJ 2011.

Som ingångsdata användes informationssystemet om det finska väg- och gatunätet (Digiroad), HRT:s kollektivtrafikregister (JORE) och det riksomfattande trafiktillståndsregistret (VALLU). I arbetet konstruerades en konversionsmetod, som av detaljerad ingångsdata automatiskt kan bilda en grövre trafiksystemmodell, som kan användas i Emme-trafiksystemprogrammet. Mellan de olika skedena i datorbehandlingen och efter det sista programskedet var det dock nödvändigt att göra många manuella korrigeringar och ändringar. En orsak till detta var fel och brister i ingångsdatan, särskilt i Digiroad.

Trafiksystemmodellens nuläge beskriver situationen år 2008. För att testa modellerna gjordes trafiksystemmodeller för år 2030 med samma precision som för nuläget. För de fyra kommunerna i huvudstadsregionen motsvarade situationen år 2030 trafiksystemet såsom det är beskrivet i Huvudstadsregionens trafiksystemplan 2007 (PLJ 2007). På detta sätt kunde de gamla och nya trafikmodellernas resultat jämföras.

I de nya trafiksystemmodellerna finns det 1 056 zoner, nästan 30 000 gatu- och väglänkar samt ungefär 1 000 kollektivtrafiklinjer (motsatta riktningar separat). Det finns skilda beskrivningar av kollektivtrafiknätet under morgonrusningen, kvällsrusningen och mitt på dagen. Det är möjligt att gå på nästan alla gator och vägar. Gånglänkar har lagts till i några terminaler och motsvarande specialplatser. Man gjorde inte en separat modell för cykelnätverket.

I arbetet testades trafiksystemmodellernas funktionsduglighet i nätfördelningar av både bil- och kollektivtrafik genom att jämföra restiderna mellan några utvalda zoner i olika delar av regionen. Slutsatsen både i efterfråge- och utbudsmodellarbetet var, att det lönar sig inte att beskriva den tunga spårtrafiken (d.v.s. tåg och metro) som ett separat färdmedel utan att i stället iaktta buss- och spårtrafikens egenskaper genom påstigningstiderna.

Nätfördelningen görs från varje område till alla andra områden. Fördelningsalgoritmen beräknar således inte områdenas inre motstånd (restider, avstånd m.m.). För detta ändamål utvecklades en separat beräkningsformel.

[Abstract page](#)

In 2007-2010, transport system supply models were created for the Helsinki region commuting area. In the models, car and bus traffic share the same street and road network. The models include also HSL's tram, Metro and commuter train services as well as coach and long-distance train services in the commuting area. The area covers the province of Uusimaa (including the former province of Eastern Uusimaa) and the Riihimäki sub-region. The models provided, among other things, travel times used as input data for traffic demand models. They also formed the basis for the transport system models for forecast years 2020 and 2035 used in the Helsinki Region Transport System Plan (HLJ 2011).

The National Road and Street Database (Digiroad), HSL's Public Transport Register (JORE) and National Transport Licence System (VALLU) were used as input data. In the work, a conversion method was developed with which it is possible to programmatically create a rougher model in the format used by Emme transport planning software from detailed input data. However, a good deal of corrections and revisions had to be made manually between and after software phases. One reason for this was errors and deficiencies in the input data, in particular in Digiroad.

The model of the current transport system depicts the situation in 2008. On the basis of the model, a transport system model with the same precision was created for 2030 for the purposes of model testing. This model corresponds to the transport system of the four metropolitan area municipalities presented in the Helsinki Metropolitan Area Transport System Plan 2007 (PLJ2007). This enabled the comparison of the results of old and new traffic forecast models.

In the transport system models created, there are 1,056 zones, nearly 30,000 street and road links as well as some 1,000 public transport routes (directions described separately). Morning peak, evening peak and off-peak public transport route networks are each described separately. Walking is possible on nearly all streets and roads. Walking links were added to some terminals and other special places. The cycling network was not modelled.

In the course of the work, the performance of the models both in car and public transport assignment was tested for example by comparing travel times between zones chosen in different parts of the region. Both in the demand and supply modelling it was decided that no separate model is created for heavy rail traffic (train, Metro), but that the differences between bus and rail traffic characteristics are taken into account in boarding times.

Assignment is made from each zone to all other zones. In other words, the software does not calculate the impedances (travel times, distances, etc.) within the zones and thus, mathematical formulas were developed to calculate them.

Sisällysluettelo

Liiteluettelo	8
Kuvaluettelo.....	9
Taulukkoluetelo	10
1 Yleistä.....	11
1.1 Malleista.....	11
1.2 Verkon kuvausten käsitteitä.....	12
1.3 Joukkoliikenteen kuvaustavat	13
2 Nykytilanteen verkkomallin teko.....	14
2.1 Vuoden 2008 kuvauksen teko	14
2.2 Täydennys vuoden 2009 verkoksi	15
2.3 Ohjeita verkon käyttäjälle.....	16
2.3.1 Solmut, alueet ja aluesyötöt	16
2.3.2 Kulkuvälineet ja niiden nopeuksien määräytyminen	16
2.3.3 Uusien bussilinjojen luonti ja linkkien ominaisuuksien muuttaminen	17
2.4 Vuoden 2012 kuvauksen teko	17
2.4.1 Työn tausta ja tekijät.....	17
2.4.2 Virheiden korjaus.....	19
2.4.3 Liikenteen sijoittelu ruuhkattomalle verkolle	21
2.4.4 Tie- ja katuverkon korjaukset ja päivitykset.....	23
2.4.5 Bussilinjaston 2012 päivitys.....	26
2.4.6 Raideliikennekuvausten 2012 tarkistus	26
2.5 Taannutettu 2008.....	31
3 Ennustevuoden verkkomallin teko	33
3.1 Johdanto	33
3.2 Vuoden 2020 liikennejärjestelmä.....	33
3.3 HLJ 2015-vaihtoehdot.....	34
4 Kuvausten ominaisuuksia	35
4.1 Käytetty väylästä.....	35
4.2 Aluejako	35
4.3 Solmut.....	35
4.4 Kulutavat ja joukkoliikenteen ajoneuvotyypit	38
4.5 Linkit.....	38
4.5.1 Syöttölinkit	38
4.5.2 Linkkien ominaisuuksia.....	39
4.5.3 Ruuhkamaksut.....	41
4.6 Viivytysfunktiot	41
4.6.1 Autoliikenne.....	41
4.6.2 Joukkoliikenne.....	44
4.7 Kääntymiskiellot ja -vastukset.....	46
4.8 Jalankulun ja pyöräilyn verkkomallit.....	46
4.9 Joukkoliikenteen liikennejärjestelmämalli	46
4.9.1 Periaate	46
4.9.2 Linjatunnus	47
4.9.3 Nopeus	47
4.10 Eri vuosien kuvausten vertailua	48

5	Liikennejärjestelmän kuormitus ja testaus	49
5.1	Liikenne-ennustejärjestelmän toimintaperiaate	49
5.2	Autoliikenteen sijoittelut ja vastukset	49
5.2.1	Kuormitusperiaate ja tulossuureet	49
5.2.2	Raskas liikenne	50
5.2.3	Ruuhkamaksut	50
5.2.4	Sijoitteluparametrit	51
5.2.5	Kysyntämatriisit	51
5.3	Jalankulun ja pyöräilyn sijoittelut ja vastukset	51
5.4	Bussi- ja raideliikenteen erilliset sijoittelut ja vastukset	52
5.5	Joukkoliikenteen sijoittelut ja vastukset	52
5.5.1	Kuormitusperiaate ja tulossuureet	52
5.5.2	Sijoitteluparametrit	55
5.6	Vuoden 2012 liikennejärjestelmäkuvauksen tilastollinen testaus	56
5.6.1	Testauksesta	56
5.6.2	Testin tulokset	58
6	Vastusmatriisien käsittely	70
6.1	Odotusajan vaimennus	70
6.2	Sisäiset vastukset ja aggregoinnit	70
	Lähdeluettelo	71

Liiteluettelo

Liite 1.	Ulkosyöttöjen numerointi	73
Liite 2.	Sijoittelu- ja ennustealueet	74

Kuvaluettelo

Kuva 1. Nykytilanteen 2008 autoverkko koko työssäkäyntialueella.....	14
Kuva 2. Nykytilanteen 2008 autoverkko pääkaupunkiseudulla.....	15
Kuva 3. Vantaanportin katuverkon päivitys. Keltaisella värillä aiemmin luotu 2020 katuverkko ja vihreällä 2012 päivityksen verkko.....	19
Kuva 4. Yhteydet bussipysäkiltä katuverkkoon eritasoliittymässä.....	20
Kuva 5. VT25 ja VT3 eritasoliittymään korjattu puuttuvat ajoyhteydet moottoritielle.....	20
Kuva 6. Suora autoliikenteen syöttölinkki moottoritielle (funktioiluokka fd1).....	21
Kuva 7. Esimerkki yksittäisten matkojen sijoitteluista ja virheellisestä reitistä eritasoliittymässä. Kuvassa matkat sijoiteltu Helsingin keskustasta ulkosityöttöihin.....	22
Kuva 8. Teollisuuskadulla risteyksen puuttuva linkki vaikutti reitinvalintoihin jo etäältä.....	22
Kuva 9. Helsingin eteläisen kantakaupungit katuverkon päivitykset.....	24
Kuva 10. Junareittien mutkittelua Pasilassa.....	27
Kuva 11. Raitiovaunujen nopeudet aamuhuipputunnin aikana.....	31
Kuva 12. Esimerkki liittymien koodaustavasta. Vasemmalla tasoliittymiä, oikealla Kivikon eritasoliittymä.....	37
Kuva 13. Autoliikenteen viivytysfunktiot liikennemäärä–nopeus-akselistossa.....	42
Kuva 14. Autoliikenteen liikennemäärien ja joukkoliikenteen matkustajamäärien laskentalinjat. Joukkoliikenteestä laskentatietoa on saatavilla vain SISÄ- ja VÄLI-laskentalinjoilta.....	59
Kuva 15. Autoliikenteen liikennemäärien sirontakaavio linkillä (skenaario AHT 2012).....	60
Kuva 16. Histogrammi liikennemäärien erotusten jakaumasta (skenaario AHT 2012). Erotus on laskettu vähentämällä havaitut liikennemäärät mallin tuloksista.....	60
Kuva 17. Joukkoliikenteen matkustajamäärien sirontakaavio (skenaario AHT 2012).....	61
Kuva 18. Autoliikenteen ajoaikojen mittausreitit (Liikenteen sujuvuus Helsingissä vuonna 2011, Helsingin kaupunki).....	63
Kuva 19. Bussiliikenteen matka-aikojen mittausreitit.....	65
Kuva 20. Joukkoliikenteen matka-aikojen sirontakaavio (mallinnetut – todetut) (skenaario AHT 2012).....	66
Kuva 21. Joukkoliikenteen matka-aikojen sirontakaavio (ennuste– todetut) (skenaario AHT 2012).....	66
Kuva 22. Suhteellinen virhe väylän funktioluokan (vdf) kuvaajana (skenaario AHT 2012).....	67
Kuva 23. Ennuste- ja sijoittelualueet Helsingin seudulla.....	75

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Vuosina 2009–2012 toteutuneet suuret tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.	23
Taulukko 2. Vuosina 2009–2012 Helsingissä toteutuneet tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.	24
Taulukko 3. Vuosina 2009–2012 Espoossa toteutuneet tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.	25
Taulukko 4. Vuosina 2009–2012 Vantaalla toteutuneet tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.	25
Taulukko 5. Linjojen numerointi liikennöintialueen mukaan.	26
Taulukko 6. Metrolinjojen vuorovälit 2012.	27
Taulukko 7. Lähijunalinjojen vuorovälit 2012.	28
Taulukko 8. Lähijunalinjat 2012.	28
Taulukko 9. Kaukojunien linjat ja vuorovälit 2012.	29
Taulukko 10. Raitiovaunulinjojen vuorovälit 2012.	29
Taulukko 11. Raitiovaunulinjat 2012.	30
Taulukko 12. Solmunumeroavaruuden jako.	36
Taulukko 13. Solmujen attribuuttitiedot.	36
Taulukko 14. Pysäkkityypit (ui2) ja niiden selitykset.	37
Taulukko 15. Järjestelmäkuvauksessa käytettyjen kulkutapojen kuvaus.	38
Taulukko 16. Ajoneuvotyyppi, sitä vastaava kulkutapa ja kuvaus.	38
Taulukko 17. Syöttölinkkien kulkutavat.	39
Taulukko 18. Syöttölinkkien määrä sijoittelualuetta kohden (kaikki kulkutavat).	39
Taulukko 19. Sentroidien kytkemispaidat auto-, bussi- ja raitiovaunuverkon (kulkutavat c, b, B, t, P) kuvauksessa.	39
Taulukko 20. Linkkien kaistamäärät autoverkolla.	40
Taulukko 21. Autoverkon linkkityypit.	40
Taulukko 22. Tie- ja katuverkon linkkiattribuutit.	40
Taulukko 23. Raideliikenneverkon linkkiattribuutit.	40
Taulukko 24. Autoliikenteen viivytysfunktioiden parametrit funktioluokittain.	44
Taulukko 25. Joukkoliikenteen funktioiden bussien viiveparametrit funktioluokittain.	44
Taulukko 26. Joukkoliikennelinjojen attribuuttitiedot (matka aikojen yksikkö on minuutti).	47
Taulukko 27. Tilastotietoja aamuhipun auto- ja joukkoliikennejärjestelmien kuvauksista.	48
Taulukko 28. Tulokset ja tietolähteet.	56
Taulukko 29. Menetelmät tuloksittain.	57
Taulukko 30. Autoliikenteen liikennemäärät laskentalinjoittain (skenaario AHT 2012).	59
Taulukko 31. Autoliikenteen liikennemäärät linkeittäin (skenaario AHT 2012).	59
Taulukko 32. Joukkoliikenteen matkustajamäärät Helsingin kantakaupungin rajalla (VÄLI-laskentalinja) keskustan suuntaan (skenaario AHT 2012).	62
Taulukko 33. Joukkoliikenteen matkustajamäärät Helsingin niemen rajalla (SISÄ-laskentalinja) keskustan suuntaan (skenaario AHT 2012).	62
Taulukko 34. Autoliikenteen ajoajat säteittäisreiteillä (skenaario AHT 2012).	64
Taulukko 35. Autoliikenteen ajoajat poikittaisreiteillä (skenaario AHT 2012).	64
Taulukko 36. Bussiliikenteen ajoajat pysäkkiväleittäin (skenaario AHT 2012).	68
Taulukko 37. Autoverkon ulkosityöt (solmunumeroon lisättävä 39000).	73
Taulukko 38. Rautatieverkon ulkosityöt.	73
Taulukko 39. Sijoittelu- ja ennustealueiden koodit ja määrät.	74

1 Yleistä

1.1 Malleista

Malli on yksinkertaistettu todellisuuden kuvaus.

Liikenne-ennusteiden teossa tarvitaan kahta malliryhmää:

- Tarjontamallit eli liikennejärjestelmämallit, jotka kuvaavat mm. liikenneverkkoa, joukkoliikennelinjastoa ja niiden toimintaa. Kun verkkoa kuormitetaan kysyntämatriisilla, tuloksena saadaan mm. vastusmatriiseja eli matka-aikoja, kustannuksia tai etäisyyksiä alueelta alueelle.
- Kysyntämallit, joilla tuotetaan kysyntämatriisit eli alueparien väliset matkamäärät. Niihin kuuluvat mm. matkatuotosta, suuntautumista ja kulkutavanvalintaa kuvaavat mallit. Lisäksi voi olla apumalleja, joilla kuvataan esimerkiksi autonomistuksen kehittymistä. Työn tuloksena syntyneet kysyntämatriisit sijoitellaan verkolle reitinvalintamalleja käyttäen.

YTV:ssä tehtiin 1990–2007 noin neljän vuoden välein useita pääkaupunkiseudun liikennejärjestelmäsuunnitelmia (PLJ). Niiden laatimisessa tarvittiin tutkimustiedon lisäksi sekä kysyntä- että tarjontamalleja erityisesti pääkaupunkiseudun neljän kunnan alueelta.

Vuonna 2006 päätettiin, että seuraavan suunnitelman on katettava Helsingin seudun 14 kuntaa. Sen nimeksi tuli HLJ 2011 (Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelma). Niinpä oli tehtävä uudet mallit, joiden pohjaksi tarvittiin laaja liikennetutkimus LITU 2008. Helsingin seudun liikenteeseen vaikuttaa voimakkaasti myös alueen ulkopuolelta tuleva liikenne. Niinpä sekä tutkimus että uudet mallit oli syytä tehdä 14 kunnan seutua laajemmin eli koko työssäkäyntialueella. Seuraavalla, vuonna 2015 päättyneellä HLJ-kierroksella sekä kysyntä- että tarjontamalleja kehitettiin edelleen.

Tässä raportissa kuvataan vuosina 2013–2015 tehtyjen kysyntämallien estimoinnissa ja testauksessa (eli HELMET-mallien päivitystyössä) käytettyjen tarjontamallien ominaisuuksia.

Kysyntämallit estimoitiin vuosien 2007–2008 ja 2012 liikkumistutkimusten (HEHA) aineistosta. Tutkimus tehtiin vuosina 2007–2008 Helsingin seudun työssäkäyntialueella, joka kattoi 37 kuntaa Hangosta Loviisaan ja Riihimäelle asti. Kuntaliitosten takia kuntien määrä on myöhemmin pienentynyt. Syksyn 2012 tutkimus tehtiin vain Helsingin seudun 14 kunnan alueella. Aiemmat vastaavat tutkimukset, joita YTV teki 1988, 1995 ja 2000, kattoivat vain pääkaupunkiseudun neljän kunnan asukkaat. Kysyntämalleja kuvataan julkaisussa HSL 2016.

HSL:n liikenne-ennustejärjestelmä hyödyntää INRO Consultants Inc:n kehittämän Emme-ohjelmiston (INRO 1998) liikennejärjestelmäkuvausta ja matriisilaskentaa, joten osa termeistä on kyseisen ohjelmiston mukaisia. Emmellä ymmärretään tässä sekä uusinta Emme 4- että vanhempaa EMME/2-ohjelmistoa.

Tärkeä osa mallijärjestelmää ovat tarjontamallit eli tie- ja katuverkon sekä joukkoliikennelinjaston kuvaukset nyky- ja ennustevuosille. Aikaisemmin käytetyt kuvaukset laadittiin 1980-luvun lopussa pääkaupunkiseudun neljän kunnan alueelle, minkä jälkeen niitä aktiivisesti päivitettiin. Eri PLJ-kierroksilla tehtiin kuvauksia myös erilaisista tulevaisuuden liikennejärjestelmistä.

Liikennejärjestelmässä tapahtuneiden muutosten vuoksi liikenneverkkokuvaukset kaipasivat perusteellisempaa päivitystä. Myös pääkaupunkiseudun sukkulointialueen kasvu asetti vaatimuksia kuvausten laajentamiseksi vähintään nykyiselle työssäkäyntialueelle. Vuonna 2006 käynnistyneen työn yhteydessä haluttiin myös yhdistää joukkoliikenteen ja autoliikenteen verkkokuvaukset vastaamaan paremmin fyysistä todellisuutta. Näin toisaalta suuri bussien määrä kadulla hidastaa autoliikennettä, toisaalta autoliikenteen ruuhkautuminen hidastaa busseja, varsinkin kaduilla, joilla ei ole joukkoliikennekaistoja.

Vuonna 2006 tavoitteena oli laatia uudet liikennejärjestelmämallit ja menetelmä, jolla sekä liikenneverkkojen että joukkoliikennelinjastojen kuvaukset saadaan siirrettyä olemassa olevista tietolähteistä samaan Emme-tietokantaan. Konversiosta saatujen kokemusten perustella päätettiin tehdä tässä raportissa kuvattu mallien päivitys ja tarkistus käsityönä.

1.2 Verkon kuvausten käsitteitä

Solmut ovat pistemäisiä olioita, joilla on numero ja koordinaatit. Lisäksi solmulle voidaan antaa muitakin ominaisuuksia. Solmu voi olla joko tavallinen solmu (esimerkiksi liittymä tai pysäkki) tai osa-alueen keskus (sentroidi). Viimeksi mainitussa tapauksessa pisteellä kuvataan kokonaisen alueen ominaisuuksia, esimerkiksi eri lähtöpaikkoja ja niiden asukasmääriä.

Linkit kuvataan suunnattuina solmupareina, ts. linkki (i,j) on eri linkki kuin (j,i) . Tässä työssä linkki kuvaa kahden solmun (liittymä, pysäkki, osa-alue) välistä katu- tai tieosaa. Linkkeihin liittyy tiettyjä ominaisuuksia: pituus, kulkutapa, linkkityyppi (esim. tieluokka), kaistamäärä ja viivytysfunktion numero (vain autoliikenteelle) sekä mahdollisia käyttäjän antamia lisämuuttujia. Lisämuuttujissa voi olla esimerkiksi mitattuja nopeuksia.

Linkki on tavallinen linkki, jos sen kummassakin päässä on tavallinen solmu, ja syöttölinkki (aluesyöttö, konektori), jos sen toinen pää on osa-alueen keskus ja toinen tavallinen solmu. Syöttölinkki kuvaa siis kokonaisen alueen kaikkia yhteyksiä katuverkolle tai joukkoliikennejärjestelmään. Kahden osa-alueen keskusten välisiä suoria linkkejä ei ole.

Reitti eli polku on peräkkäisten, samaan suuntaan johtavien linkkien jono. Esimerkiksi linkkijono (i,j) , (k,j) , (k,l) ei ole reitti. Reitti voidaan ajatella myös solmujen jonona $(i-j-k-l)$ ja näin se Emmessä kuvataan, mutta ko. solmujen välillä on oltava linkit, joilla ko. kulkutapa on sallittu. Joukkoliikenteessä reitti on kiinteä eli se, jota linjan on määrä kulkea. Autoliikenteessä sen sijaan kahden alueen välillä voi olla useita reittejä, joista valitaan yksi tai useampia.

Joukkoliikennelinjalla on mm. kulkutapa, ajoneuvotyyppi ja reitti. Pysäkkisolmuissa voi matkustajia nousta ajoneuvoon ja siitä pois, joillakin pysäkeillä vain jompaakumpaa niistä, mutta liittymäsolmuissa ei kumpaakaan. Linjan vastus (esimerkiksi matka-aika) voi olla kulkutapa-, linja- tai linjasegmenttikohtainen. Emmessä (linja)segmentillä tarkoitetaan yhden linjan reittiä yhdellä linkillä eli kunkin linkin segmenttien määrä on sama kuin kyseistä linkkiä käyttävien linjojen määrä.

Matriisit ovat ennustejärjestelmässä käytettäviä taulukkomuotoisia esityksiä alueiden välisistä matkavastuksista (ajoista, etäisyyksistä, kustannuksista) tai matkojen määristä. Neliömatriisissa vaakarivejä on yhtä monta kuin pystyryivejäkin. Matriisien erikoistapauksia ovat vektorit (yksi vaakarivi ja monta pystyriiviä tai päinvastoin), joilla voidaan kuvata esimerkiksi alueiden asukasmääriä tai muita ominaisuuksia, ja skalaarit (vain yksi luku), joita käytetään mm. mallikertoimien ja matka-matriisien

nurkkasummien (matriisiin kaikki matkat yhteensä) tallettamiseen

Sijoitteluksi kutsutaan liikennejärjestelmän kuvauksen (tie- ja katuverkko, joukkoliikennelinjasto) kuorittamista kysyntämatriisilla (matkamäärät alueilta toisille). Tässä ennustejärjestelmässä se tehdään Emme-liikennesuunnitteluohjelmistolla. Tuloksena saadaan väylien liikennemäärät, joukkoliikennelinjojen matkustajamäärät ja alueiden väliset vastukset (mm. matka-ajat).

1.3 Joukkoliikenteen kuvaustavat

Emmessä (INRO 1998) voidaan kuvata joukkoliikennelinjasto kahdella tavalla.

Vuorovälipohjaisessa kuvauksessa kunkin aikajakson (esimerkiksi aamuhuipputunti) jokainen linja kuvataan vain kerran ajosuuntaa kohden. Linjalle annetaan reitti ja ko. aikajakson keskimääräinen vuoroväli. Sijoittelussa kysyntämatriisina on saman aikajakson kaikkien joukkoliikennematkojen määrä. Menetelmä sopii kaupunkimaisille alueille, joilla vuoroväli on pieni.

Aikataulupohjaisessa kuvauksessa jokaiselle linjalle koodataan kuvattavan aikajakson todelliset lähtöajat. Linjalle annetaan reitin lisäksi aikajakson ensimmäisen lähdön lähtöaika, vuoroväli ja lähtöjen määrä ko. vuorovälillä. Kun vuoroväli muuttuu, on tehtävä uusi linjan kuvaus.

Näin yhden linjan kuvaus kolmen tunnin aamuruuhkassa klo 6:00–8:59 voisi olla seuraavanlainen: Ensimmäinen lähtö on 10 minuuttia kuvattavan aikajakson alusta (eli klo 6:10), vuoroväli 13 minuuttia ja lähtöjen määrä yksi. Sen jälkeen 10+13 minuuttia aikajakson alusta eli klo 6:23 alkaen on 10 minuutin vuorovälillä viisi lähtöä, joista viimeinen klo 7:03. Sitten on yksi lähtö klo 7:14 eli 11 minuutin vuorovälillä ja sen jälkeen 7:25 alkaen taas viisi lähtöä 10 minuutin vuorovälillä, joista viimeinen klo 8:05. Klo 8:20 aikajakson alusta on kulunut 140 minuuttia. Silloin vuoroväli muuttuu 15 minuutiksi ja lähtöjä on kolme, joista viimeinen 8:50.

Koska vuorovälin tai lähtöajan minuuttien muuttuessa on usein siirtymiä (esimerkiksi edellä 11 minuutin vuoroväli) ja jokaista muutosta kohden on kuvattava koko linja reitteineen uudelleen, kuvauksen koko ja tilantarve kasvavat nopeasti. Kysyntä ei ole matriisimuodossa, vaan luettelo matkoista, jotka tiettyyn aikaan halutaan tehdä kultakin alueelta toisille alueille. Lähtö- tai saapumisajoille voi määritellä toleranssin eli hyväksyttävän epätarkkuuden. Sijoittelu muistuttaa siis reititiopashakua. Menetelmä sopii lähinnä kaukoliikenteeseen ja maaseutumaisille, suuren vuorovälin alueille.

Tässä työssä on käytetty vain vuorovälipohjaisia joukkoliikenteen kuvauksia ja sijoitteluja.

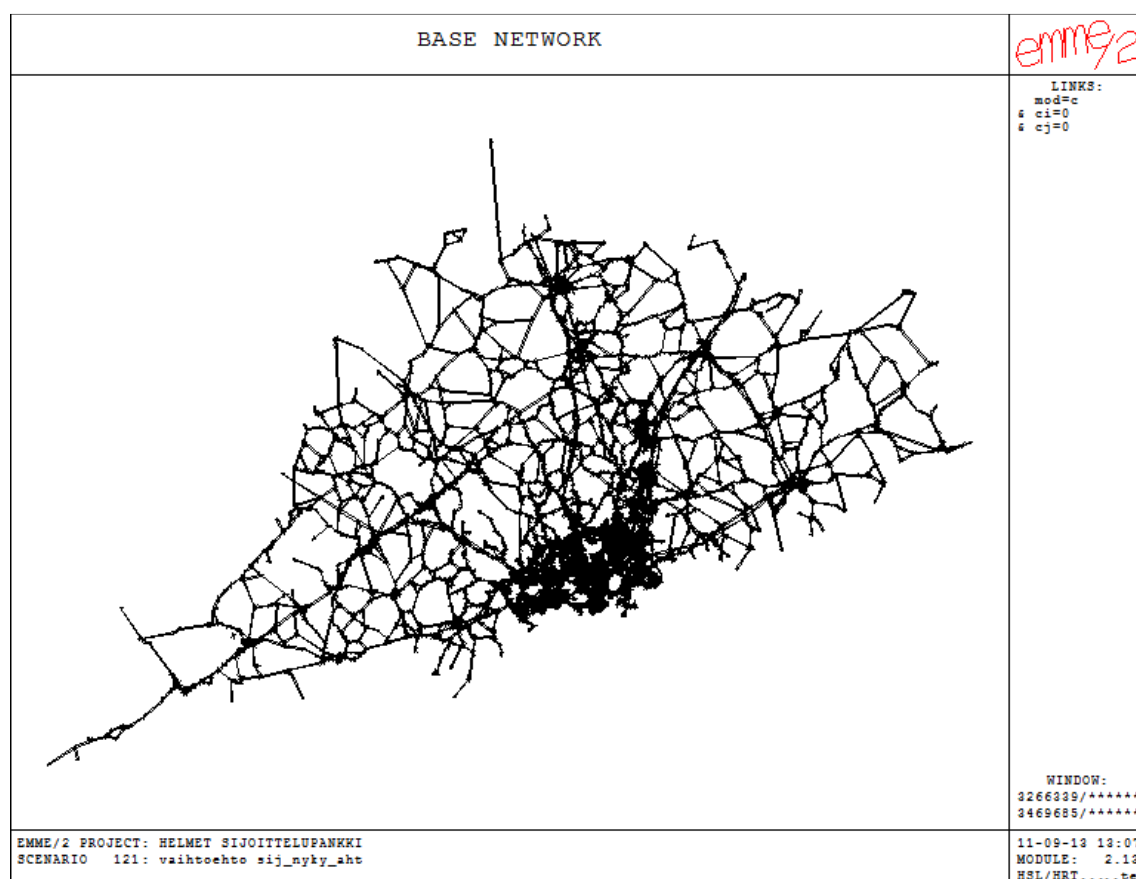
2 Nykytilanteen verkkomallin teko

2.1 Vuoden 2008 kuvauksen teko

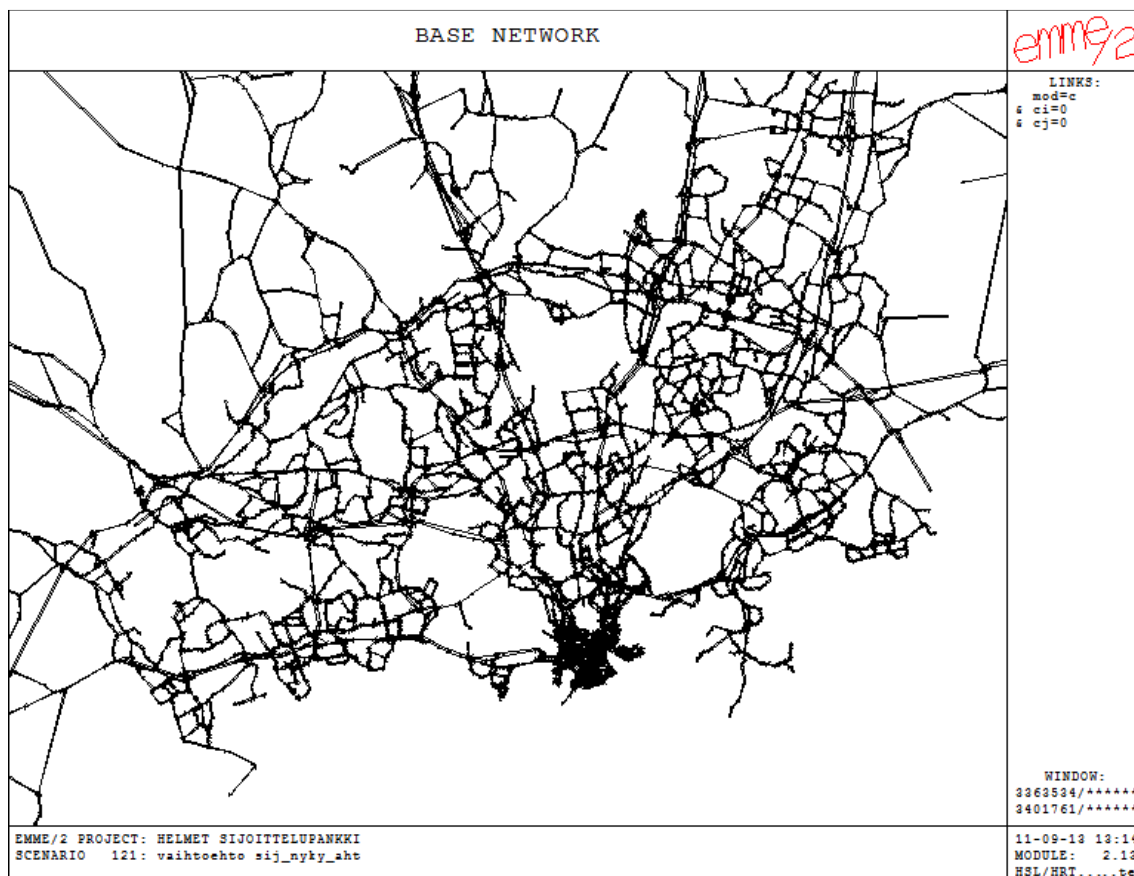
Verkkotyön määrittely aloitettiin jo 2006, jolloin ei vielä ollut tarkkaa kuvaa alueesta, jonka vuosien 2007–2008 laaja liikennetutkimus pitäisi kattaa ja jolle liikenne-ennusteita tarvitaan. Katsottiin kuitenkin, että alueen on oltava laajempi kuin HLJ 2011:ssä käsiteltävä 14 kunnan Helsingin seutu.

Erinäisten vaiheiden jälkeen kuvattava alue tarkentui kattamaan Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan maakunnat kokonaan sekä Riihimäen seudun. Näin mallityössä ja HLJ:ssä käytetyt liikennejärjestelmän kuvaukset on tehty samalle alueelle kuin vuoden 2007 liikkumistutkimus ja kysyntämallit, mitä havainnollistaa kuvissa 1 ja 2 oleva nykytilanteen 2008 autoliikenteen verkko (Elolähte ym. 2011).

Tie- ja katuverkon kuvaus tehtiin ohjelmallisella konversiolla Digiroad-aineistosta. Pääkaupunkiseudun joukkoliikennelinjaston kuvaus saatiin joukkoliikennerekisteristä (JORE) ja muun linjaston osalta valtakunnallisesta liikenneluparekisteristä (VALLU). Sekä Digiroad että JORE ovat hyvin yksityiskohtaisia, mm. solmuja on paljon. Emme-kuvauksia ei ole mahdollista eikä mielekästä käyttää niin paljon solmuja. Niinpä yksi Emme-solmu voi vastata useata Digiroad- ja JORE-solmua.



Kuva 1. Nykytilanteen 2008 autoverkko koko työssäkäyntialueella.



Kuva 2. Nykytilanteen 2008 autoverkko pääkaupunkiseudulla.

Konversioprosessi oli monivaiheinen. Se on kuvattu tarkemmin 28.10.2008 päivytyssä muistiossa Blummé ym. 2008. Emme-makroilla mm. korjattiin aineistossa olevia virheitä. Tarkistuksia tehtiin myös käsityönä konversiokierrosten välillä.

Konversio- ja tarkistusprosessia kaikkine vaiheineen kuvataan tarkemmin raportissa Elolähde ym. 2011.

2.2 Täydennys vuoden 2009 verkoksi

(Ote muistiosta Keränen ym. 2009a)

Vuoden 2008 kuvausta täydennettiin edelleen kuvaamaan syksyn 2009 tilannetta. Päivitykset perustuivat suunnitelmakuviin tai mahdollisiin ilmakuviin.

Tiet ja kadut:

- Uuden Turunväylän eritasoliittymät. Lähde: pääosin maps.google.fi –kartta.
- Espoonlahden eritasoliittymä. Lähde: suunnitelmakartta Espoo.fi sivustolta.
- Porintie Nummela–Turunväylä. Lähde: Tiehallinnon www-sivut.
- Länsiväylän Suomenojan sillalta 3. kaista itään Matinkylään saakka.
- Hakamaentie (valmistui 23.9.2009) eritasoliittymät ja bussireitit. Lähde: suunnitelmakartta Tiehallinnon www-sivuilta.
- Vuosaaren satama (valmistui 2008). Lähde: Maps.google.fi + Vuosaaren www-sivut.

- Raitiolinjojen 3 ja 9 muutokset. Uudet, talviaikataulukauden 2008–2009 aikana käyttöön otetut linjaosuudet ovat kaksisuuntaisina linkkeinä ajoradan vieressä. Lähde: HKL:n kartat.
- Kampin liikennejärjestelyt koodattiin Helsingin KSV:n www-sivuilta löytyvien liikennesuunnitelmapiirustusten perusteella.
- Teollisuuskadun parantaminen ja Tuusulanväylän kaistamäärän korjaus Kehä I pohjoispuolella.

Bussilinjastoja ei päivitetty vuoden 2007 tilanteesta.

2.3 Ohjeita verkon käyttäjälle

Otteita muistiosta Holm ym. 2009.

2.3.1 Solmut, alueet ja aluesyötöt

Alueet on alun perin muodostettu MapInfolla tehdyn aluejaon perusteella sijoittaen alueiden painopisteisiin sentroidit, jotka on yhdistetty syöttölinkeillä verkolle erityisesti edustamaan mahdollisimman hyvin kyseistä pistettä. Sentroidit eivät siis niinkään edusta aluetta ja sen maankäytön sijoittumista vaan paremminkin yhtä yksittäistä pistettä. Näin tehtiin siksi, että maankäyttö muuttuu ja silloin pitäisi myös sentroidien kohtia tarkistaa, jos haluttaisiin pysyä mahdollisimman aidossa kuvauksessa.

Alueet on syötetty pääasiassa lähimmille verkon solmuille geometrisesti laskettujen etäisyyksien mukaisilla linkeillä. Näin syöttöliikenne näkyy verkolla entistä paremmin ja vältetään sekavilta syöttölinkkien ”hämähäkinseittimäisiltä” kuvauksilta.

Sentroidien numeroavaruus kattaa välin 1–39 999. Autoliikenteen ulkosyöttöjen numerot alkavat 39 001:stä. Niitä on 36 ja ne sisältävät mahdollisuuden ulkosyöttökävelylle. Ulkosyötöt numerosta 39 300 (kolme kappaletta) lähtien ovat rautateiden ulkosyöttöjä.

Alueita lisättäessä tulee huomioida se, että matriisit sekoittuvat, jos sentroideja yksinkertaisesti lisätään vanhojen aluenumeroiden väliin. Sekoittuminen on kyllä vältettävissä työläällä menettelyllä, mutta suositeltavaa on, että aluenumeroinnista riippumatta uudet alueet lisätään alueille varattuun tilaan välille 39 400–39 999. Näin menetellen on myös helposti nähtävissä, mitkä alueet ovat jälkeenpäin lisättyjä ja mitkä ovat ”alkuperäisen” verkon aluejaon mukaisia. Ylipäänsä ei suositella, että samassa emmepankissa olisi useita aluejakoja.

Tämän raportin liitteenä 1 ovat ulkosyöttöjen selitteet.

2.3.2 Kulkuvälineet ja niiden nopeuksien määräytyminen

Henkilöautojen nopeus määräytyy valittujen funktioiden ja kaistamäärän mukaan liikennemäärän funktiona. Funktioiden parametrina on mm. linkin kapasiteetti. Vastaavasti bussien määrä linkillä vaikuttaa muiden ajoneuvojen nopeuksiin.

Jos bussikaistaa ei ole, bussien nopeus määritetään henkilöautoliikenteen nopeuden mukaan siten, että siihen lisätään kiinteä kilometrikohtainen viive kuvaamaan pysäkkien vaikutusta. Linkeillä,

joilla on bussikaista voimassa kyseisenä ajankohtana, nopeus määritetään vapaan nopeuden perusteella eikä se ole riippuvainen henkilöautojen määrästä.

Raitiovaunujen nopeus määritetään kuten aiemminkin *u11*-kentän arvoista *xyyzz*, jossa *xx* on aamuruuhkan, *yy* päivätunnin ja *zz* iltaruuhkan keskinopeus [km/h].

Junien ja metron nopeus on toteutettu sijoittamalla aikataulutietojen pohjalta kunkin linjan segmenttitietoihin *us1*-kenttään tieto peräkkäisten asemien välisestä matka-ajasta minuutteina. On huomattava, että tarkasteltaessa junien nopeuksia näkyy aika eli *timtr* vain pysäkkiä edeltävässä linkissä. Lisäksi junilla, jotka eivät pysähdy kaikilla asemilla, kahden pysähdyksen välinen matka-aika on yleensä laitettu vain yhdelle linkille (asemavälille), joten muilla linkeillä matka-aika on nolla.

Viivytysfunktioista on tarkempaa tietoa kohdassa 4.6 ja tämän julkaisun osassa E.

2.3.3 Uusien bussilinjojen luonti ja linkkien ominaisuuksien muuttaminen

Kun tehdään uusia bussilinjoja, korjataan vanhoja tai muutetaan linkkien ominaisuuksia, on tämän jälkeen ajettava funktiomakrojen 3, 4 ja 5 aamu-, päivä- tai iltaversio kyseistä aikaskenaariota vastaavasti. Nämä makrot luovat kullekin linjan segmentille vakion, joka viivytysfunktiossa lisätään linkin ajoaikaan, sekä valitsevat käytettävän viivytysfunktion bussikaistojen voimassaoloaikaan perustuen.

Linkkien ominaisuustietoja muutettaessa on hyvä tietää, että *u11*- ja *u12*-kenttien arvoja muuttamalla vaikutetaan funktioon eikä funktiomakroja tarvitse ajaa toimenpiteen jälkeen. Jos kuitenkin muutetaan tielinkin tyyppiä tai toiminnallista luokkaa, tulee linkin kysyntäfunktion valinta ajaa makroilla uudesta tai valita sopiva funktio manuaalisesti ja syöttää se linkin *vdf*-kenttään. Linkin funktiota valitessa tulee funktiotyön raportista (Keränen & Pesonen 2011) katsoa mahdolliset (luokalle ja tyyppille sopivat) funktiot, jotta ne säilyvät yhtenäisinä.

Kun luodaan uusia VALLU-bussilinjoja tai kaukojunalinjoja, tulee pääkaupunkiseudun alueen sisäiset matkat kieltää käyttämällä *noboa*- ja *noali*-segmenttitietoja (eli pysäkkien nousu- ja poistumiskieltoja).

2.4 Vuoden 2012 kuvauksen teko

Tämä luku perustuu julkaisemattomaan muistioon Holm, Supponen & Keränen 2013.

2.4.1 Työn tausta ja tekijät

Työn lähtötilanteena oli HSL:n käytössä oleva syksyn 2009 tilanteen mukainen kuvaus liikennejärjestelmästä. Kuvaus sisälsi tiedot muun muassa tie- ja katuverkosta kääntymiskieltoineen, raideliikenneverkosta sekä joukkoliikennelinjastosta. Työssä ne päivitettiin kuvaamaan syksyn 2012 liikennejärjestelmää, korjattiin raportoidut ja havaitut virheet sekä kehitettiin kuvausta monilta osin. Liikenneverkkojen ATK-kuvausten päivitys tehtiin Trafix Oy:ssä. Raideliikenteen (raitiovaunu, juna, metro) linjat ja linkit tarkistettiin HSL:ssä. Työ alkoi lokakuussa 2012 ja päättyi maaliskuussa 2013.

Vuosina 2007-2008 tehtiin edelliset liikenneverkkokuvaukset HSL:n liikenne-ennustejärjestelmään.

Mallin tuli palvella HLJ 2011 -työtä. Se tehtiin täysin puhtaalta pöydältä ja siinä hyödynnettiin digitaalisia aineistoja kuten Digiroadia ja VALLU-tietokantaa, jotka myöhemmin havaittiin puutteellisiksi tai virheelliseksi. Puutteet ja virheet johtivat suureen määrään käsin tehtyjä korjauksia. Koska aineistot olivat hieman vanhentuneet, jouduttiin kuvauksia myös päivittämään jo työn aikana, jotta vuoden 2009 tilanne saatiin kuvattua. Tämän työn uskottiin onnistuvan parhaiten siten, että mitään ei syötetä Emmeen ohjelmallisesti, vaan kaikki kulkee "ihmissuodattimen" läpi. Virheitä on todella vaikeaa löytää verkolta jälkikäteen etsimällä.

Työssä päivitettiin järjestelmäkuvaukset vuoden 2012 tilanteeseen ja korjattiin alkuperäisessä verkossa havaittuja puutteita, virheitä ja omituisuuksia.

Suurin yksittäinen mekaaninen työ oli linjastojen tarkistus HSL- ja VALLU-linjojen osalta. Päivitystyö oli kohtuullisen suoraviivaista päivitysten ja virheiden korjauksen osalta.

Jotta päivityksen ja kehittämisen tuloksia voitiin tulkita ja testata, tehtiin tilastollista testausta. Tämä oli erittäin oleellinen osa kokonaisuuden laadun varmistusta. Testit sisälsivät useita Emmestä tulos-tettavia ja tosimaailmasta mitattuja tekijöitä, joita voitiin verrata toisiinsa ennen ja jälkeen tehtyjä muutoksia.

Makrot

Päivityksessä tehdyt muutokset tallennettiin makroiin, jotka nimettiin tekemisjärjestyksessä juoksevilla numeroinnilla. Makroilla muokattiin vain tie- ja katuverkon kuvausta. Joukkoliikenteen muutoksia ei sisällytetty makroiin, joten makrot ajetaan tyhjälle verkolle ja päivitetty joukkoliikennelinjasto lisättiin verkolle tiedostosta.

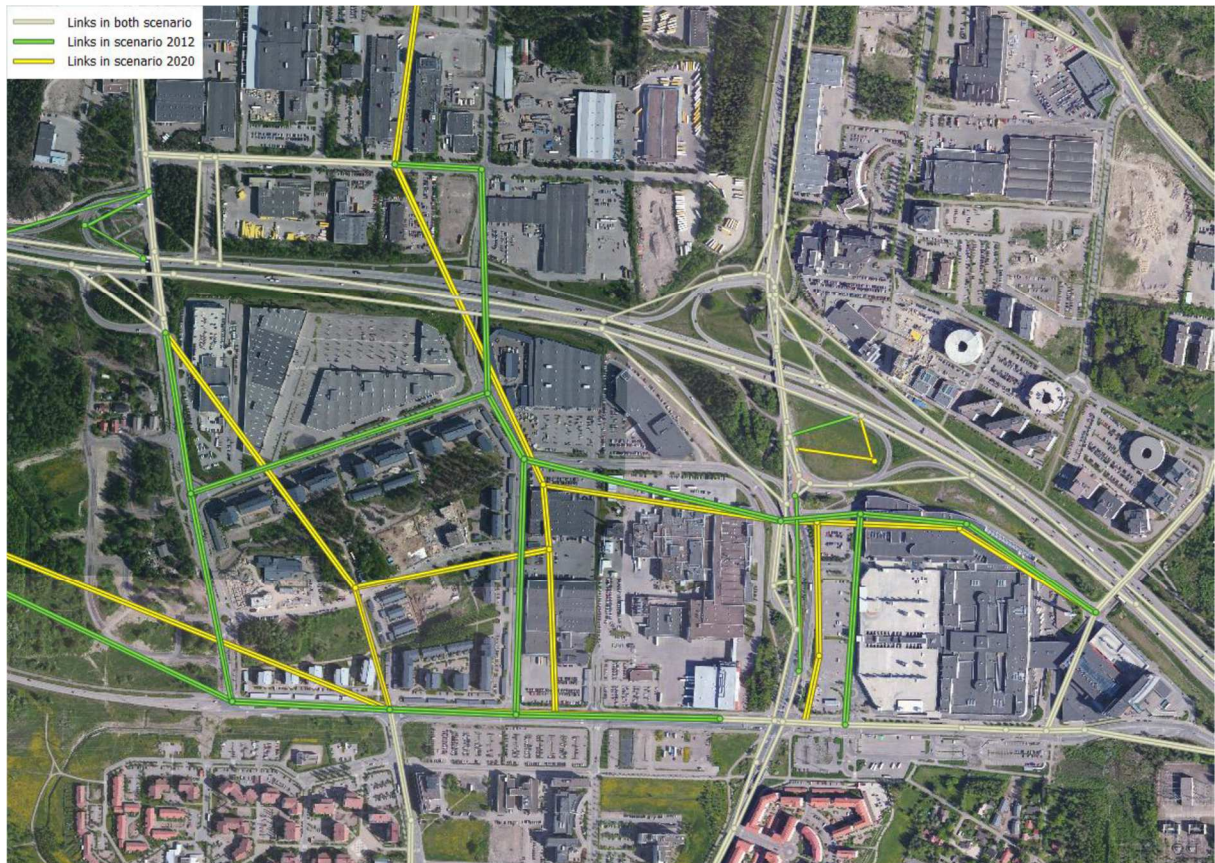
Kaikki makrot eivät ole ajettavissa tulevaisuuden verkoille. Makroista listattiin kuitenkin ne, joille tämä on periaatteessa mahdollista.

Muutoksia ajettaessa pitää skenaarioon luoda solmuille uusi extra-attribuutti *@bstop*. Tähän muut-tuun on tallennettu tieto bussipysäkeistä, joita on päivityksessä korjattu. Jos *@bstop* attribuutin arvo on suurempi kuin 0, solmu on bussipysäkki.

Päivityksen yhteensopivuus aiempien verkkojen kanssa

Päivityksessä käytetään aiemmista tulevaisuuden skenaarioista poikkeavia solmunumeroita, eikä päivitys sen vuoksi ole kaikilta osin yhteensopiva aiemmin HLJ 2011:n yhteydessä tehtyjen vuosien 2020 ja 2030 skenaarioiden kanssa. Tähän on kaksi syytä. Täydellisen yhteensopivuuden varmistaminen olisi tuonut liikaa rajoituksia päivitykselle eikä haluttuja tarkennuksia mm. eritasoliittymien osalta olisi voitu tehdä. On hyvä tiedostaa, että suurten joukkoliikennehankkeiden linjastosuunnitelmat ovat muuttuneet selvästi muutaman vuoden takaisesta ja niiden päivittäminen on joka tapauksessa edessä.

Toinen syy on se, että nykyverkolle 2008 sekä tulevaisuuden verkoille koodattiin tietyt hankkeet kohtuullisen epämääräistenkin suunnitelmakuvien perusteella. Nyt niitä päivitettäessä huomattiin, että koodauksen tarkkuus ei vastaa ihan muun verkon tasoa ja ne päätettiin mallintaa ilmakuvia avuksi käyttäen uudestaan. Esimerkkejä vuoden 2012 päivityksen ja aiemman 2020 verkon eroista kuvassa 3.



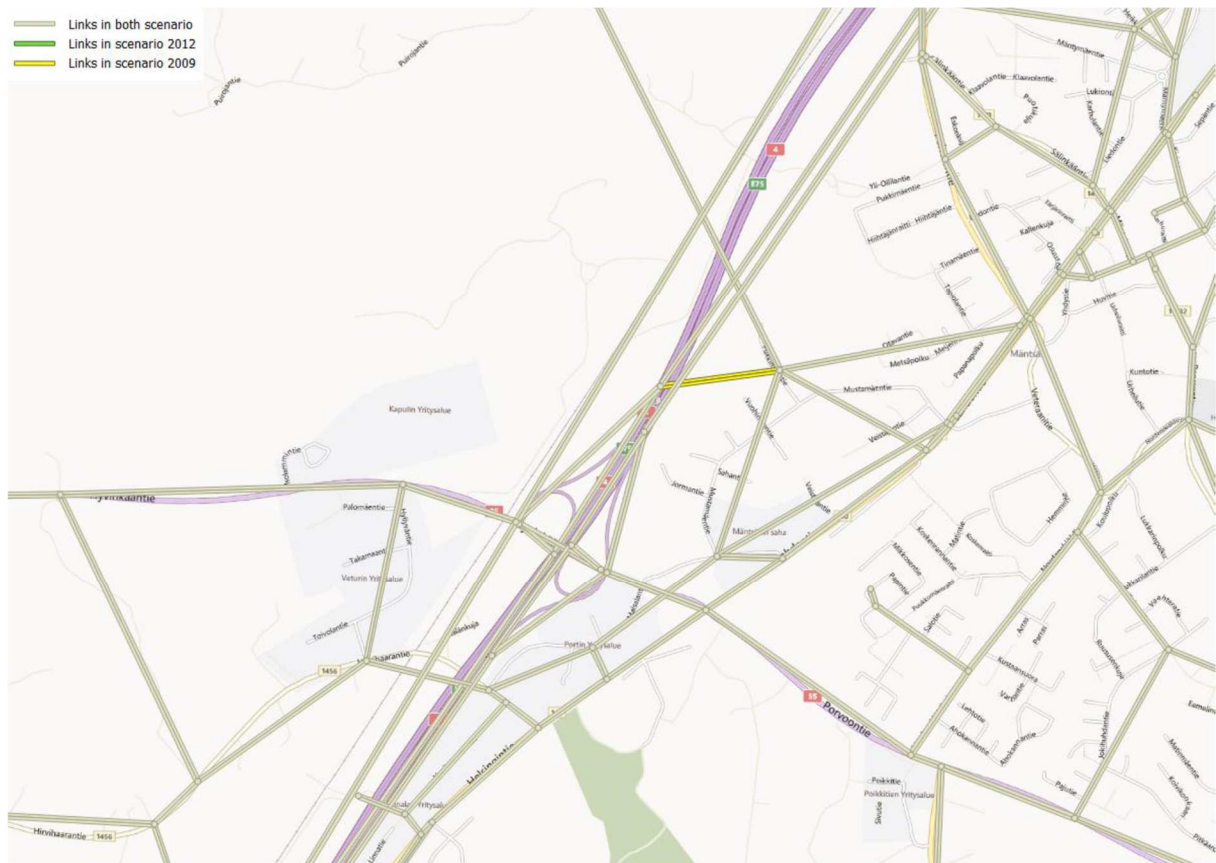
Kuva 3. Vantaanportin katuverkon päivitys. Keltaisella värillä aiemmin luotu 2020 katuverkko ja vihreällä 2012 päivityksen verkko.

2.4.2 Virheiden korjaus

Verkon virheitä korjattiin niiltä osin, kun niitä löytyi ja raportoitin. Systemaattisesti virheitä etsittiin tarkastelemalla tunnettuja ja yleisiä virhetyppejä. Lisäksi tarkasteluja tehtiin ruuhkattomilla sijoiteluilla, jossa tutkittiin pääväylillä yksittäisten matkojen käyttämien reittien järjestyttä.

Yleisiä virheitä, jotka käytiin läpi koko verkolta (muutoksia havainnollistetaan kuvissa 4–6):

- Kaikki moottoriteiden eritasoliittymät käytiin läpi ja korjattiin mahdolliset yhteyspuutteet.
- Eritasoliittymien korjauksen yhteydessä tarkastettiin bussipysäkit ja yhteydet bussipysäkeiltä katuverkkoon.
- Syöttölinkit käytiin systemaattisesti läpi ja poistettiin suorat syötöt teille, joiden funktio-luokka $vdf=1$.
- Linkkien $ul1$ ja $ul2$ miniarvot korjattiin siten, että minimissään $ul1$:n arvoksi voi tulla 500 ja $ul2$:n arvoksi vähintään 30.
- Bussikaistallisten linkkien kaistamääräksi korjattiin vähintään kaksi, jotta sijoittelussa ei tulisi nolalla jakoja. Mikäli katu on vain joukkoliikenteen käyttöön tarkoitettu, on tämä kuvattu poistamalla auto ("c") sallituista kulkumuodoista ("modes").
- Kantakaupungin kääntymiskiellot käytiin läpi ja korjattiin havaitut virheet.
- Kahden eritasossa kulkevan tien risteämiskohdat, jotka ovat aiemmin kulkeneet saman solmun kautta ja eroteltu kääntymiskielloilla, koodattiin kulkemaan eri tasoissa.



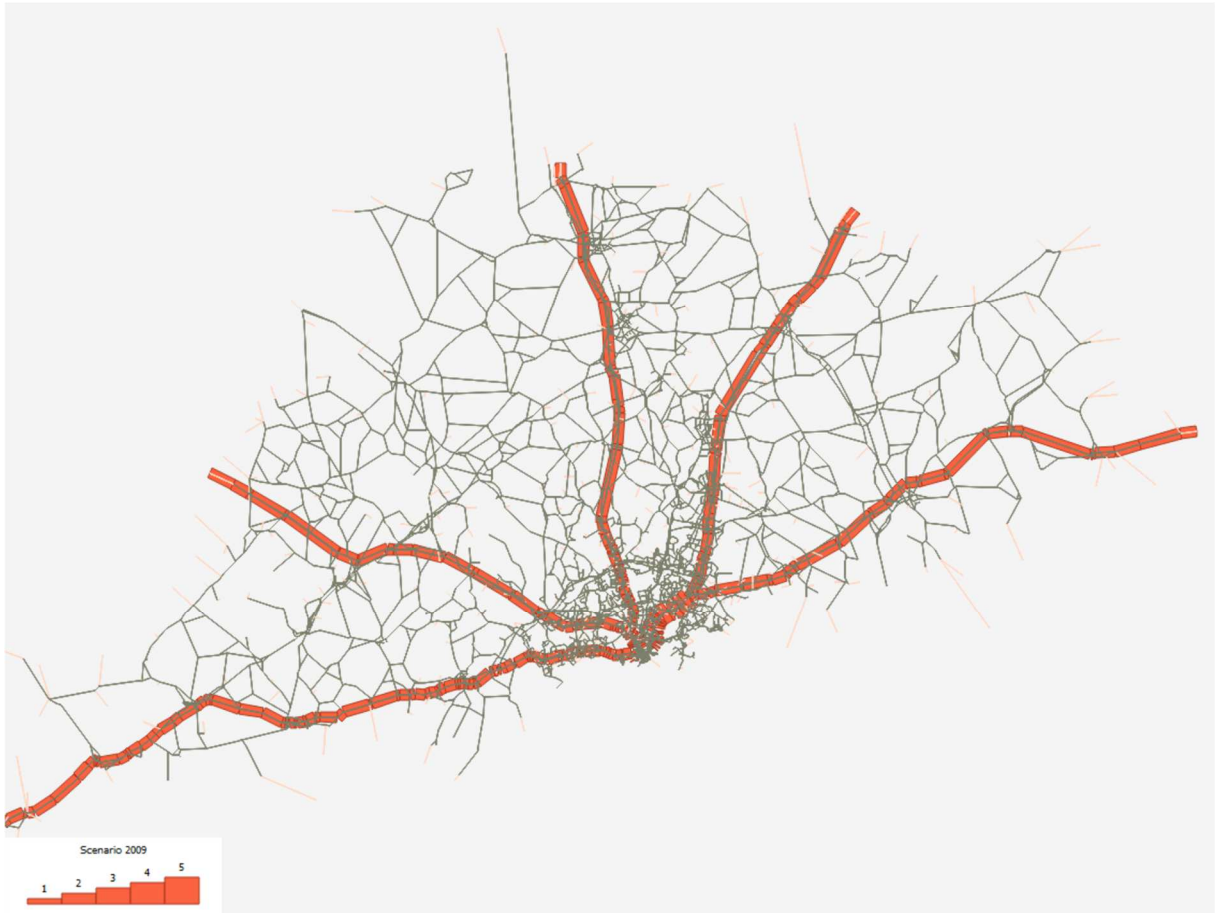
Kuva 6. Suora autoliikenteen syöttölinkki moottoritielle (funktioluokka fd1).

2.4.3 Liikenteen sijoittelu ruuhkattomalle verkolle

Liikenneverkon toimintaa testattiin ruuhkattomilla sijoitteluilla, joissa alueen keskusten välille asetettiin kulkemaan yksittäisiä matkoja, joiden reitinvalintaa tutkittiin silmäämääräisesti. Näin pyrittiin löytämään verkosta mahdollisia epäjatkuvuuskohtia ja muita virheitä. Sijoitteluissa tutkittiin matkat tärkeimpien keskusten välillä sekä matkoja ulkosityöttöalueilta Helsingin keskustaan. Yhteensä tutkittuja reittien lähtöpaikkoja ja määränpäitä oli 40. Ruuhkattomat sijoittelut tehtiin alkuperäiselle ja päivitetylle verkolle.

Pääosin sijoitellut yksittäiset matkat käyttivät oletettuja reittejä. Muutamassa sijoittelussa havaittiin kuitenkin virheitä ja lisätarkastelua vaativia reittivalintoja.

- Reitit käyttivät eritasoliittymien rampeja oikoreittinä myös ruuhkattomissa sijoitteluissa. Tämä virhe korjaantui ramppien koodausta korjattaessa. Ramppien nopeuksia korjattiin tämän perusteella.
- Moottoritieltä pois suuntautuvan rampin nopeudeksi asetettiin liittyttävän tien nopeus. Ruuhkautuneilla alueilla rampeilla on lisäksi kääntymiskiellot estämässä läpiajoa. Moottoritielle johtavan rampin nopeusrajoitus on yleisesti 80 km/h tai moottoritien nopeusrajoituksen mukainen.
- Reitit kulkivat keskusten välillä eri reittejä riippuen siitä mihin suuntaan ne olivat matkalla. Reitit tutkittiin ja muutamassa kohteessa löydettiin epäjatkuvuuksia risteyskohdissa.



Kuva 7. Esimerkki yksittäisten matkojen sijoitteluista ja virheellisestä reitistä eritasoliittymässä. Kuvassa matkat sijoitettu Helsingin keskustasta ulkosyöttöihin.



Kuva 8. Teollisuuskadulla risteyksen puuttuva linkki vaikutti reitinvalintoihin jo etäältä.

2.4.4 Tie- ja katuverkon korjaukset ja päivitykset

Suuret tiehankkeet

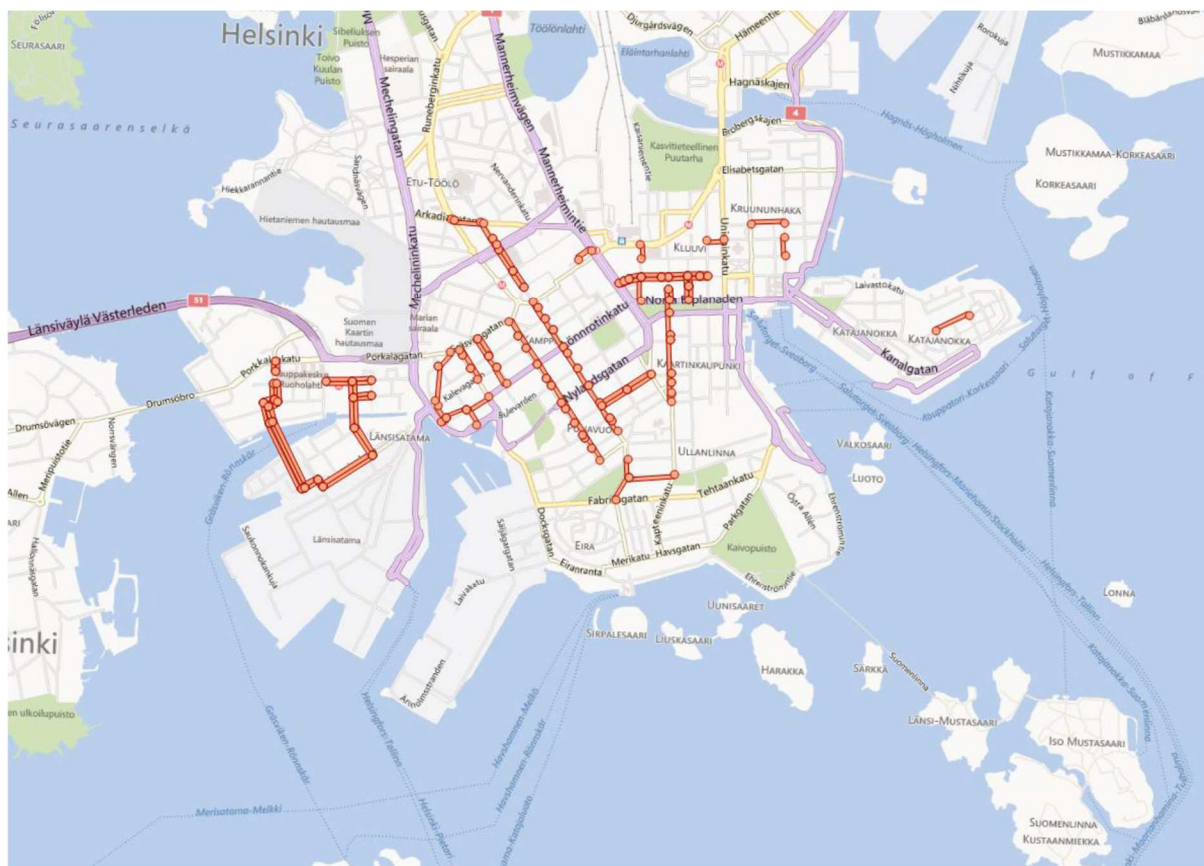
Suurista tiehankkeista päivityksen yhteydessä korjattiin sellaiset kohteet, joiden odotetaan valmistuvan vähintään seuraavan vuoden aikana päivitysajankohdasta. Mikäli hanke on syksyllä 2012 ollut keskeneräinen, on tilanne kuvattu Emme-verkkoon asettamalla keskeneräisille linkeille nopeusrajoituksia tai kieltämällä moottoriajoneuvoliikenne kokonaan. Keskeneräisille hankkeille tehtiin makrot, joilla tiet voidaan ottaa käyttöön.

Taulukko 1. Vuosina 2009–2012 toteutuneet suuret tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.

Hanke	Muutos	Keskeneräisyys
Leppävaaran eritasoliittymä	Kehä I:n ja Turunväylän eritasoliittymä päivitetty nykytilanteeseen	
Lintuvaaran eritasoliittymä	Tasoliittymä muutettu eritasoliittymäksi	
KT 51 Kirkkonummi–Kivenlahti	Päivitetty KT 51 eritasoliittymät Kirkkonummella sekä siihen yhdistyvä katuverkko	Hanke on osittain keskeneräinen. Tielle asetettu väliaikainen 60 km/h nopeusrajoitus välillä Jorvas–Kivenlahti
Kehä III, Vantaankoski–Lentoasemantie	Päivitetty Kehä III hankkeen ensimmäisen vaiheen laajennoksen loppuun	
Kilpilahden tieyhteys, Siipoo	Kilpilahden teollisuusalueen tieyhteys Porvoonväylälle ja eritasoliittymä	
VT2, Palojärvi–Nummelan eritasoliittymä	Tie välillä Palojärvi–Nummelan eritasoliittymä muutettu moottoritieksi eritasoliittymineen	

Helsingin päivitykset

Varsinaisesti uusia katuuyhteyksiä Helsingissä on melko vähän. Helsingin kantakaupungin liikennejärjestelyihin on kiinnitetty päivityksessä erityistä huomiota. Kantakaupungin katuverkossa on ollut useita epätarkkuuksia, joita on pyritty poistamaan. Helsingin kantakaupungin yksisuuntaiset kadut, ajokiellot, kääntymiset ja kaistamäärät käytiin läpi. Taulukossa 2 on esitetty Helsingin alueelle tehdyt verkon päivitykset.



Kuva 9. Helsingin eteläisen kantakaupungin katuverkon päivitykset.

Taulukko 2. Vuosina 2009–2012 Helsingissä toteutuneet tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.

Hanke	Muutos	Keskeneräisyys
Jätkäsaari	Jätkäsaaren katuverkkoa täydennetty ja Crusellin silta lisätty	
Kivikonlaita, Kivikko	Uusi katuuyhteys	

Espoon päivitykset

Taulukossa 3 on esitetty Espoon alueelle tehdyt katu- ja tieverkon päivitykset. Päivityksessä on mukana muutama keskeneräinen kohde, joiden rakentaminen on kuitenkin aloitettu. Keskeneräisyys on kuvattu taulukossa. Keskeneräisille hankkeille tehtiin makrot, joilla tiet voidaan ottaa käyttöön.

Taulukko 3. Vuosina 2009–2012 Espoossa toteutuneet tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.

Hanke	Muutos	Keskeneräisyys
Lintulaaksontie, Lintuvaara	Uusi tieyhteys	Keskeneräinen, aikataulusta ei tietoa. Autoliikenne kielletty linkillä.
Juvanmalmintie	Uusi tieyhteys	Keskeneräinen, aikataulusta ei tietoa. Autoliikenne kielletty linkillä.
Suurpellon eritasoliittymä	Uusi eritasoliittymä yhdistäen Kehä II:n Suurpellon katuverkkoon	Keskeneräinen, aikataulusta ei tietoa. Autoliikenne kielletty eritasoliittymässä.
Kivenlahden eritasoliittymä	Päivitetty Kivenlahden eritasoliittymä uusien liikennejärjestelyiden mukaiseksi	Hanke on toistaiseksi keskeneräinen, aikataulusta ei tietoa. Päivitys vastaa uusia järjestelyitä.
Vantinportti, Kauklahti	Päivitetty Vantinportin ja Vantinmäentien uudet katuyhteydet	
Painiityntie, Lintuvaara	Uusi tieyhteys	
Tillinmäentie, Tillinmäki	Uusi tieyhteys	
Sunankaari, Espoon keskus	Sunankaaren jatke Sunanniityntielle	
Rastasniityntie, Laaksolahti	Uusi tieyhteys	

Vantaan päivitykset

Taulukossa 4 on esitetty Vantaan alueelle tehty katu- ja tieverkon päivitykset. Päivityksessä on mukana muutama keskeneräinen kohde, joiden rakentaminen on kuitenkin aloitettu. Keskeneräisyys on kuvattu taulukossa. Keskeneräisille hankkeille tehtiin makrot, joilla tiet voidaan ottaa käyttöön.

Taulukko 4. Vuosina 2009–2012 Vantaalla toteutuneet tiehankkeet, jotka on kuvattu verkkoon.

Hanke	Muutos	Keskeneräisyys
Koivukylänväylä ja Leinelän katu- verkko	Koivukylänväylän jatke sekä Leinelän uudet kadut	
Nikinmäentie, Pohjois-Nikinmäki	Uusi tieyhteys Sipoontielle	Valmistuu kesällä 2013. Autoliikenne kielletty linkillä.
Valkoisenlähteen- tie, Tikkurila	Uusi tieyhteys yhdistäen Valkoisenlähteen- tien ja Läntisen Valkoisenlähteen tien	
Tarhurintie, Hiekkaharju	Uusi tieyhteys	
Valuuttakatu, Vantaanportti	Päivitetty Vantaanportin katuverkko	
Päiväkummuntie, Päiväkumpu	Päiväkummuntien jatke	
Jokiniementie, Jokiniemi	Jokiniementien jatke Heidehofintielle	

2.4.5 Bussilinjaston 2012 päivitys

HSLlinjasto

HSL linjojen osalta päivityksessä käytiin läpi jokaisen linjan reitit ja ne korjattiin syksyn 2012 mukaisiksi. Linjojen numerointi tehtiin syksyn 2012 mukaiseksi. Emmessä linjan ensimmäinen numero kuvaa linjan liikennöintialuetta. Numero on annettu seuraavan taulukon mukaisesti.

Taulukko 5. Linjojen numerointi liikennöintialueen mukaan.

Etuliite JOREssa	Liikennöintialue
1 XXXX	Helsingin sisäiset linjat
2 XXXX	Espoon sisäiset linjat ja seutulinjat Helsingistä Espooseen
3 XXXX	tulevaisuuden skenaarioissa Espoon metron liityntälinjat
4 XXXX	Vantaan sisäiset linjat ja seutulinjat Helsingistä Vantaalle
5 XXXX	poikittaisliikenteen seutulinjat
6 XXXX	Kirkkonummen sisäiset linjat ja seutulinjat
7 XXXX	U-linjat
8 XXXX	
9 XXXX	Keravan ja Sipoon sisäiset linjat ja seutulinjat

Linjat, joita ei liikennöidä tietyn skenaarion aikavälillä (esim. liikennöi iltapäivällä, mutta ei aamulla) on kuvattu verkolle vuorovälillä *hdwy=999*.

VALLU-linjasto

HSL:n toimivalta-alueen ulkopuolelle ulottuva ns. VALLU-linjasto käytiin läpi kuntakeskusten välisen linjojen osalta. Suuren lukumäärän vuoksi syistä kaikkia VALLU-linjoja ei voitu läpikäydä yksityiskohtaisesti. Päivityksessä keskityttiin keskusten välisien yhteyksien tarkastamiseen tietyt erityiskohteet (Helsinki-Vantaan lentokenttä, Kilpilahti) huomioiden. Linjastot käytiin pääsääntöisesti läpi Matkahuollon reittioppaan avulla.

Suurimmilta osin vanha linjastokuvaus on hyvin kohdallaan, mutta siitä huolimatta kymmeniä linjoja korjattiin. Suurimpana yksittäisenä muutoksena Porvoon linjat ovat siirtyneet maantieltä 170 valtatielle 7, mikä vähentää Söderkullan ja Etelä-Sipoon vuorotarjontaa. Kokonaan uusia linjoja on koodattu muutama kymmenen.

2.4.6 Raideliikennekuvausten 2012 tarkistus

Linjojen vuorovälit tarkistettiin syksyn 2012 mukaisiksi. Linjakuvauksiin lisättiin selkosanallinen reitikuvaus.

Metro (mode m)

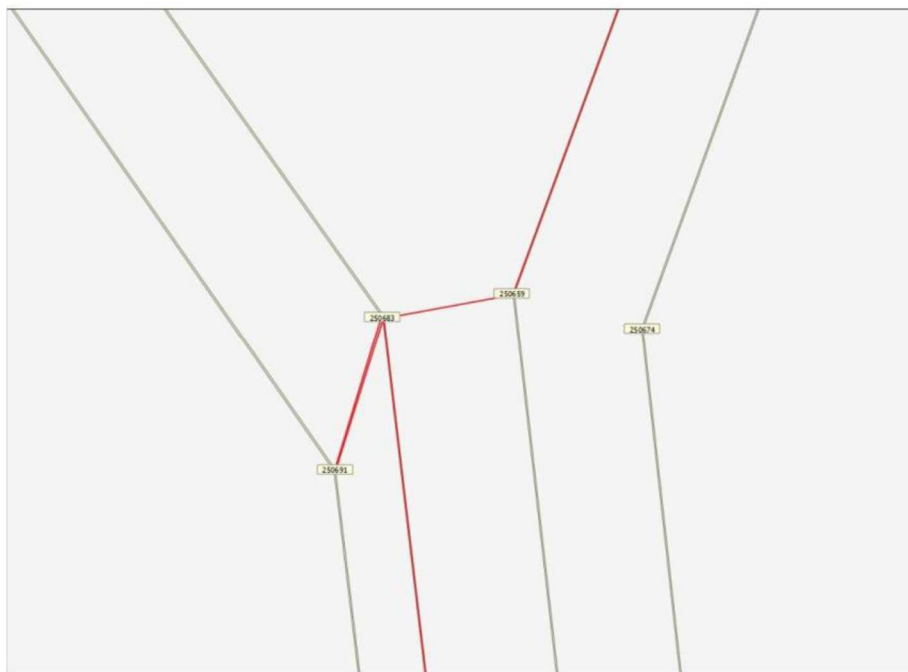
- Poistettiin tupla-asemasolmut (Kamppi, Kalasatama, Siilitie).
- Tarkistettiin asemien väliset ajoajat ja etäisyydet.
- Matka-ajat koodattiin minuutteina linjoihin asemaväleittäin.

Taulukko 6. Metrolinjojen vuorovälit 2012.

metrolinjojen vuorovälit	aamu	päivä	ilta
Ruoholahti-Mellunmäki (s1)	8	10	8
Mellunmäki - Ruoholahti (s2)	8	10	8
Ruoholahti-Vuosaari (s1)	8	10	8
Vuosaari - Ruoholahti (s2)	8	10	8

Juna (mode rR)

- Poistettiin tupla-asemasolmut. Pasila säilytettiin kuitenkin kahtena solmuna (ranta- ja pää-rata).
- Lisättiin Hangon asema.
- Tarkistettiin asemien väliset etäisyydet.
- Tarkistettiin ajoajat eri ajankohtien mukaan (pidemmän matkan junissa eroja eri ajankoh-tina).
- Matka-ajat koodattiin minuutteina linjoihin asemaväleittäin.
- Suunta 1 on Helsingistä ja suunta 2 Helsinkiin.



Kuva 10. Junareittien mutkittelua Pasilassa.

Vuoden 2009 verkossa pidemmän matkan junilla (linjatunnuksilla 5245, 5246, 5247, 5302, 5326, 5348, 5374 ja 5404) oli Pasilassa erilaisia kiertoajeluja siten, että ajettiin useamman laiturisolmun kautta esim. pääradalta rantaradan asemasolmuihin ja takaisin pääradalle. Linjakuvauksen pitäisi olla vain yhden solmun kautta. Vuoden 2012 linjastossa on korjaukset tehty. Junalinjat ja niiden vuorovälit syksyllä 2012 ovat seuraavissa taulukoissa.

Taulukko 7. Lähijunalinjojen vuorovälit 2012.

Vuoroväli (min)	aamu klo 7-9		päivä klo 9-15		ilta klo 15-18	
	s1	s2	s1	s2	s1	s2
A	10	10	20	20	10	10
E	30	24	30	30	30	30
U	40	30	60	60	36	60
S	120	-	60	60	180	60
Y	-	60	180	360	60	180
M	10	10	10	10	10	10
I	10	10	-	-	10	10
K	10	10	-	-	10	10
N	-	-	10	10	-	-
H	60	60	60	60	60	60
R	60	60	60	60	60	60
Z	60	60	60	60	60	60

Taulukko 8. Lähijunalinjat 2012.

Linja	Suunta	Reitti
A	s1	Helsinki - Leppävaara
	s2	Leppävaara - Helsinki
E	s1	Helsinki - Kauklahti
	s2	Kauklahti - Helsinki
U	s1	Helsinki - Kirkkonummi
	s2	Kirkkonummi - Helsinki
A	s1	Helsinki - Kirkkonummi
	s2	Kirkkonummi - Helsinki
Y	s1	Helsinki - Karjaa
	s2	Karjaa - Helsinki
M	s1	Helsinki - Vantaankoski
	s2	Vantaankoski - Helsinki
I	s1	Helsinki - Tikkurila
	s2	Tikkurila - Helsinki
K	s1	Helsinki - Kerava
	s2	Kerava - Helsinki
N	s1	Helsinki - Kerava
	s2	Kerava - Helsinki
H	s1	Helsinki - Riihimäki
	s2	Riihimäki - Helsinki
R	s1	Helsinki - Riihimäki
	s2	Riihimäki - Helsinki
Z	s1	Helsinki - Lahti
	s2	Lahti - Helsinki

Taulukko 9. Kaukojunien linjat ja vuorovälit 2012.

Vuoroväli (min)	aamu klo 7-9		päivä klo 9-15		ilta klo 15-18	
	s1	s2	s1	s2	s1	s2
Karjaa-Hanko	120	-	180	120	90	180
Hki-Hämeenlinna R	-	60	180	180	60	180
Hki-Hämeenlinna IC	60	40	60	60	60	60
Hki-Salo IC	60	60	60	60	60	60
Hki-Lahti IC	60	60	72	60	45	45
Riihimäki-Lahti	60	60	60	60	60	60

Raitiovaunu (mode t)

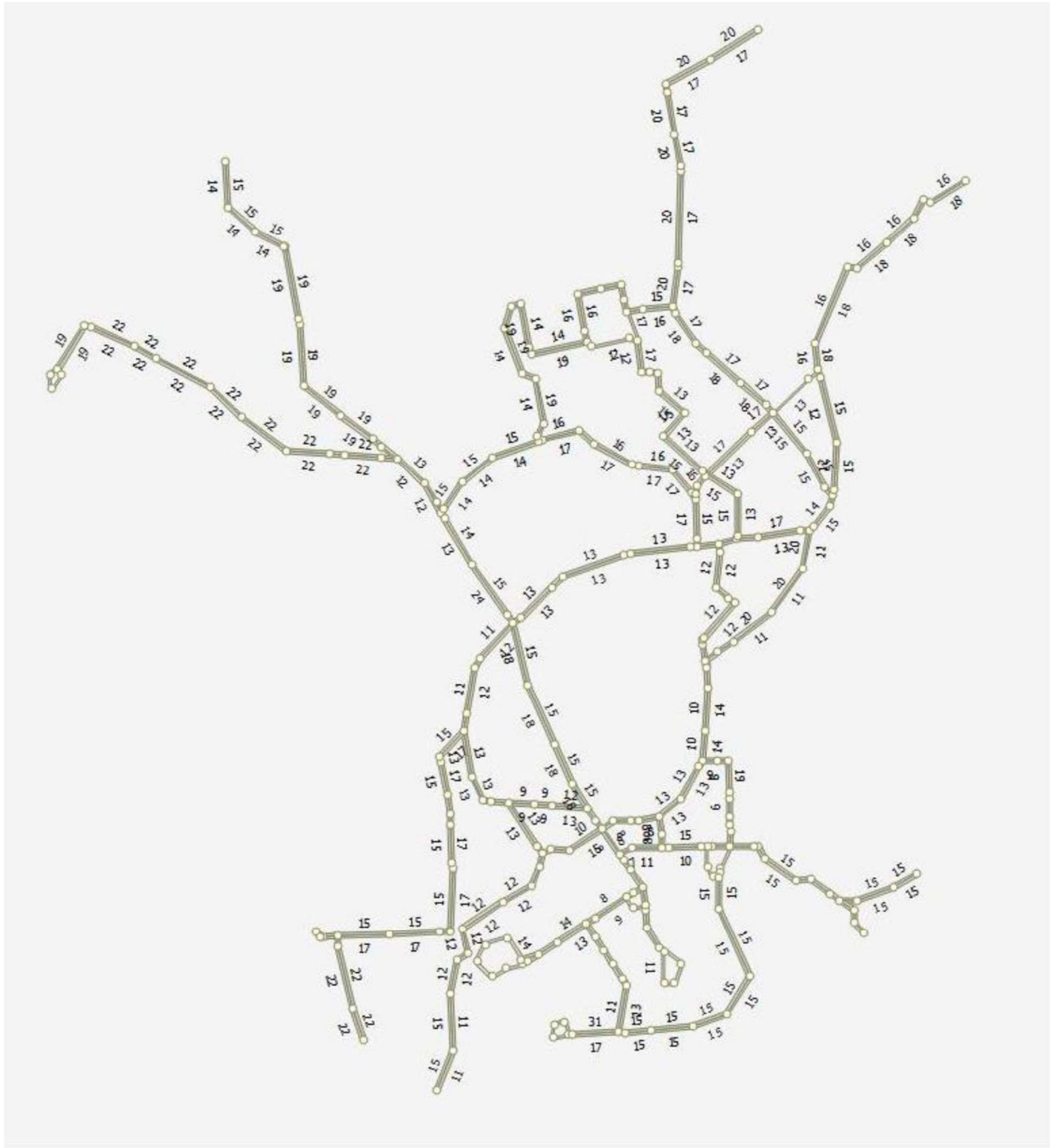
- Poistettiin tuplasolmut ja yhdistettiin pysäkit. Kelan, Kauppatorin ja Kallion virastotalon pysäkeillä on kuitenkin erilliset solmut.
- Muutettiin solmunumeroalueen ulkopuolella olevat solmut oikealla solmunumeroalueelle.
- Tarkistettiin etäisyydet karkealla tasolla.
- Syksyn 2012 mukaiset nopeudet koodattiin linkkien *ul1*-kenttään muodossa *xyyyzz*, missä *xx* on aamuruuhkan, *yy* päivätunnin ja *zz* iltaruuhkan keskinopeus [km/h].
- Raitiovaunulinkeiltä poistettiin jalankulku lukuun ottamatta Pasilan Radanrakentajantietä, jossa ei ole rinnakkaista ajoneuvolinkkiä.
- Korjattiin raitiovaunupysäkkien ja muiden solmujen *ui2* (1=pysäkki, 0=muu solmu esim. risteys).

Taulukko 10. Raitiovaunulinjojen vuorovälit 2012.

Vuoroväli (min)	aamu klo 7-9		päivä klo 9-15		ilta klo 15-18	
	s1	s2	s1	s2	s1	s2
1	-	-	22	22	-	-
1A	10	10	-	-	10	10
3B	10	10	10	10	10	10
3T	10	10	10	10	10	10
4	5	5	8,18	8,18	5,45	5,45
4T	-	-	90	90	60	60
6	8	8	10	10	8	8
7A	7,5	7,5	10	10	7,5	7,5
7B	7,5	7,5	10	10	7,5	7,5
8	8	8	10	10	8	8
9	10	10	10	10	10	10
10	5	5	7,5	7,5	5	5

Taulukko 11. Raitiovaununlinjat 2012.

Linja	Suunta	Reitti
1	s1 s2	Kauppatori - Käpylä Käpylä - Kauppatori
1A	s1 s2	Eira - Käpylä Käpylä - Eira
3B	s1 s2	Kaivopuisto - Kallio - Eläintarha Eläintarha - Töölö - Kaivopuisto
3T	s1 s2	Kaivopuisto - Töölö - Eläintarha Eläintarha - Kallio - Kaivopuisto
4	s1 s2	Katajanokka - Munkkiniemi Munkkiniemi - Katajanokka
4T	s1 s2	Katajanokan terminaali - Munkkiniemi Munkkiniemi - Katajanokan terminaali
6	s1 s2	Hietalahti - Arabia Arabia - Hietalahti
7A	s1 s2	Senaatintori - Töölö - Pasila Pasila - Senaatintori
7B	s1 s2	Senaatintori - Pasila Pasila - Töölö - Senaatintori
8	s1 s2	Jätkäsaari - Arabia Arabia - Jätkäsaari
9	s1 s2	Länsiterminaali - Pasila Pasila - Länsiterminaali
10	s1 s2	Kirurgi - Pikku-Huopalahti Pikku-Huopalahti - Kirurgi



Kuva 11. Raitiovaunujen nopeudet aamuhuipputunnin aikana.

2.5 Taannutettu 2008

Koska uusi vuoden 2012 kuvaus on tehty hiukan eri käsialalla ja periaatteilla kuin vanhat vuosien 2008 ja 2009 kuvaukset, vuoden 2012 kuvauksen pohjalta tehtiin myös uusi vuoden 2008 liikennejärjestelmän kuvaus, jossa voitiin ottaa huomioon työn aikana havaitut ja korjatut virheet. Työ tehtiin melko karkeasti poistamalla vuoden 2012 verkosta kuluneen vuosien 2008–2012 aikana valmistuneita merkittävimpiä hankkeita ja päivityksiä sekä siirtämällä verkolle vuotta 2008 vastaavat linjastot.

Palautus on tehty poistamalla verkolta hankkeet, jotka on rakennettu verkolle vuoden 2012 päivityksen yhteydessä. Kaikki palautetut hankkeet ovat lueteltuna edellä taulukoissa 1–4.

Verkon toiminnan kannalta merkittävimmät hankkeet ovat:

- KT51, välillä Kivenlahti–Kirkkonummi
- Kehä I, eritasoliittymät Leppävaaran ja Lintuvaaran kohdalla
- Kehä III, välillä Vantaankoski–Lentoasemantie
- VT7, Kilpilahden eritasoliittymä
- VT2, Palojärvi–Nummela
- Suurpellon liikennejärjestelyt.

Lisäksi Pasilanväylä on palautettu vuotta 2008 vastaavaan tilanteeseen, vaikka se on aiemmin ollut kuvattuna verkkoon valmiina, vuoden 2009 syksyä vastaavassa tilanteessa. Pasilanväylän tunneli avattiin liikenteelle 2.6.2009 eli se oli käytössä syksyllä 2009, mutta ei vielä syksyllä 2008.

Joukkoliikenteen linjastot on siirretty vuoden 2008 aiemmasta kuvauksesta, lukuun ottamatta raide-liikenteen verkkoa. Raideliikenteen linjat on siirretty vuoden 2012 päivitetystä kuvauksesta ja palautettu karkeasti vuoden 2008 linjastoa vastaavaksi.

3 Ennustevuoden verkkomallin teko

3.1 Johdanto

Luvussa 2 kerrotaan, miten järjestelmäkuvaukset päivitettiin vuoden 2012 tilanteeseen ja korjattiin alku- ja kuperäisessä verkossa havaittuja puutteita, virheitä ja omissuusia.

Seuraavaksi pyrittiin mallintamaan mahdollisimman tarkka ja viimeisimpään käsitykseen perustuva HLJ 2011:n mukainen vuoden 2020 ennustetilanne, jota muokattiin yhdenmukaiseksi nykyverkon 2012 kuvauksen koodausperiaatteiden kanssa. Myös vuoden 2035 liikennejärjestelmäkuvaukset muutettiin samojen periaatteiden mukaisiksi. Ne olivat pohjana varsinaisessa liikennejärjestelmätyössä (HLJ 2015) tarvittavien skenaarioiden kuvauksille. Vuoden 2020 kuvausta tarvittiin lisäksi liikenne-ennustejärjestelmän testauksessa.

Käytettävissä olevassa ajassa ei kyetty ottamaan huomioon HLJ 2011:n skenaarioiden muodostuksen jälkeen tehtyjä linjastosuunnitelmia, mm Vantaa, Kirkkonummi ja Pisara, poikittaisliikenne- ja runko-bussisuunnitelmat.

3.2 Vuoden 2020 liikennejärjestelmä

Mallien testauksessa käytettiin HLJ 2011 luonnoksen skenaariota 2020 tavoite, jossa infran rahoitus-taso on noin 370 Meur/v. Vaihtoehto sisältää ensinnäkin samat kustannustehokkaat hankkeet kuin niukkojen investointien vaihtoehto 2020 niukka.

HLJ 2011 luonnosvaiheen ja SOVA-tarkastelujen KUHA-hankepaketti sisältää seuraavat toimet:

- Jalankulun ja pyöräilyn infrastruktuuri
 - o Seuturaittiverkosto ja työmatkapyöräilyn laatukäytävät
 - o Maanteiden väylähankkeet
 - o Paikallisverkon täydentäminen ja parantaminen
- Älyliikenteen infrastruktuuri
 - o Päätie- ja pääkatuverkon seuranta- ja ohjausjärjestelmän kehittäminen
 - o Raideliikenteen toimintavarmuuden parantaminen
- Liityntäpysäköinti ja liityntäyhteydet
 - o Liityntäpysäköinnin kehittäminen Helsingin seudulla
- Bussi- ja tavaraliikenteen toimivuuden turvaaminen säteittäisväylillä
 - o Turunväylä (Vt1) Kehä II–Kehä III, bussi- ja tavaraliikenteen lisäkaistat
 - o Turuntie (Mt110) Leppävaara–Bemböle
 - o Vihdintie (Mt120) parantaminen Haaga–Kehä III, 1. vaihe, pysäkit ja bussikaistat
 - o Vihdintie (Mt120) Kehä III–Lahnus, 1. vaihe
 - o Hämeenlinnanväylä (Vt3) Rantarata–Kehä I, bussikaistat
 - o Hämeenlinnanväylä (Vt 3), Kehä I–Kaivoksela, bussikaistat
 - o Lahdenväylä (Vt4) Jokiniementien vaihtopysäkit, 1. ja 2. vaihe
- Päätieverkon liikenneturvallisuuden parantaminen
 - o Kt 45 Hyrylä–Rusutjärvi, keskikaiteellinen ohituskaistapari
 - o Kt 51, Kirkkonummi–Vuohimäki, keskikaiteellinen tieosuus
- Meluntorjunnan erillishankkeet
- Tavaraliikenteen palvelualueet

- Maankäytön kehittämistä tukevat tiehankkeet
 - o Keravantien (Mt148) parantaminen Savio–Lahdentie
 - o Itäväylä (Mt170) Itäkeskus–Kehä III
 - o Vt 25 parantaminen välillä Vt 3–Hyvinkään itäinen ohikulku
 - o Poikkitie (Mt 145) parantaminen Järvenpäässä
- Tie- ja katuverkon poikittaisyhteyksien kehittäminen
 - o Tiedelinja Otaniemi-Viikki (sis. Vallilanlaakson joukkoliikennekatu)
 - o Järvenpää–Nurmijärvi-yhteys (vaiheet 1-2).

Vuoden 2020 tavoiteverkko sisältää edellä kuvatun niukkojen investointien skenaarion lisäksi seuraavat toimet:

- Jokeri 2 -linjan vaatimat järjestelyt (50 M€)
- Kehä I pullonkaulojen poistaminen, 1. vaihe (150 M€)
- Länsimetron ja Kehäradan liityntäliikenteen järjestelyt
 - o Länsiväylällä ja katuverkossa (40 M€)
 - o Ruskeasannan asema (40 M€)
- Kehä III:n parantaminen (E18), 2. vaihe (250 M€)
- Pasila-Riihimäki -rataosuuden välityskyvyn nostaminen, 1. vaihe (160 M€)
- Kaupunkirata Leppävaara–Espoo (190 M€)
- Klaukkalan ohikulkutie (45 M€)
- Hyrylän itäinen ohikulkutie (40 M€)
- Pisara-rata (500 M€) ja kaupunkirataliikenteen vuorovälin tihentäminen (10->6 min)
- Metro Matinkylä–Kivenlahti (400 M€)
- Metro Mellunmäki–Majvik (700 M€)
- Raide-Jokeri (230 M€).

Tarkempia tietoja skenaarioista ja niille tehdyistä tarkasteluista on julkaisussa Pesonen ym. 2012.

3.3 HLJ 2015-vaihtoehdot

Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmatyössä (HLJ 2015) tehtiin erilaisia skenaarioita vuosille 2025, 2040 ja 2050. Niitä on tarkemmin kuvattu julkaisussa HSL 2015.

Tässä raportissa ja julkaisussa HSL 2016 kuvataan HSL:n liikenne-ennustejärjestelmää, jota käytettiin mm. näiden HLJ 2015-skenaarioiden analysointiin.

4 Kuvausten ominaisuuksia

4.1 Käytetty väylästä

Kuten edelliselläkin HLJ-kierroksella – ja toisin kuin YTV:n liikenne-ennustejärjestelmässä (Elolähde 2003) – sekä auto- että joukkoliikenne on kuvattu samalle pohjaverkolle. Helsingin keskustasta on kuvattu jopa liityntäkadut, muualla pääkaupunkiseudulla kokoojakadut/ yhdystiet ja seudun ulkopuolella alueelliset pääkadut/seututiet.

4.2 Aluejako

Kuvauksessa on pääkaupunkiseudulla 611, muulla Helsingin seudulla (10 kuntaa) 280 ja muulla LITU-alueella 165 osa-aluetta. Tässä ns. sijoittelualuejaossa on siis yhteensä 1056 osa-aluetta. Pääkaupunkiseudun sisällä aluejako on käytännössä lähes sama kuin aiempi pääkaupunkiseudun joukkoliikennejärjestelmän kuvauksissa käytetty 597-jako, mutta siihen on lisätty lounais-Sipoosta 14 aluetta.

Alueet numeroitiin siten, että kullakin vuoden 2007 kunnalla on oma tuhatlukualueensa (Helsinki 1000–1274, Espoo 2000–2171, ..., Loviisa 37 000). Sen jälkeen kuntien määrä on vähentynyt kuntaliitosten myötä, mutta tältä osin numerointia ei ole muutettu. Sijoittelualueen tuhatluku 1–37 on sama kuin ennustealuekoodin sataluku (esimerkiksi Helsinki 101–174, Espoo 201–238, ..., Loviisa 3701).

Vuonna 2013 aluejakoa tarkistettiin lähinnä Sipoossa kunnan omien tilastoaluerajojen mukaiseksi, mutta pieniä muutoksia tehtiin myös mm. Vihdissä ja Vantaalla. Sipoossa poistettiin neljä sijoittelualuetta (11002, 11006, 11008 ja 11030) ja tilalle tuli neljä uutta (11058–11061). Monen muunkin sijoittelualueen raja muuttui Sipoossa, mutta alueiden kokonaismäärä pysyi kuitenkin samana. Ennustealueiden määrä kasvoi yhdellä (1113). Vihdissä osa kahdesta sijoittelualueesta liitettiin kolmanteen alueeseen. Lisäksi tehtiin pieniä rajantarkistuksia Itä-Helsingissä (Östersundomin alueella), Espoossa, Vantaalla, Hyvinkäällä ja Pornaisissa. Näiden tarkistusten jälkeen sijoittelualueiden rajat yhtyvät paremmin ko. kuntien omiin tilastoaluerajoihin. Numeroinnista on tarkempaa tietoa liitteessä.2.

Lisäksi työssäkäyntialueen ulkorajalla ovat omilla koodeillaan 36 tienpäättä ja kolme radanpäättä, jotka kuvaavat ulkoista kysyntää. Niiden numerot ovat 39 001–39 036 ja 39 300–39 302 (katso liite 1).

Liikenne-ennustejärjestelmän tuottamia henkilöauto- ja joukkoliikenteen kysyntämatriiseja voidaan käyttää myös syöttötietona liityntäpysäköintimallissa, jonka toiminta perustuu siihen, että kustakin liityntäpysäköintialueesta on tehty oma sentroidinsa (Rahiala ym. 2017).

4.3 Solmut

Solmujen koodaamisessa käytetty koordinaatisto on projektiokaistan 27 (KKJ 3) mukainen. X-akseli kasvaa itään ja y-akseli pohjoiseen mentäessä. Koordinaatit ovat täydellisiä eli niissä on seitsemän numeroa. Yksikkönä on metri.

Solmunumerot 1–39 999 on varattu sentroideille, joista 39 000–39 099 ulkosyötöille. Koska sijoittelualueita on 1056 ja sen lisäksi 36+3 ulkosyöttöä, kuvauksissa on yhteensä 1095 sentroidia. Liityntäpysäköintialueita kuvaaville sentroideille on varattu numerot 39400–39599 (Rahiala ym. 2017). Tieverkon solmunumeroavaruus on välillä 40 000–250 000. Tieverkon solmunumeroavaruuden yläpäässä on käsin lisättyjä solmuja.

Vuoden 2008 verkon kuvauksessa solmunumero ei saanut olla suurempi kuin 260 000. Tämä johtui käytetyn konversio-ohjelman muistiavaruuden rajoituksesta. Niinpä alun perin rataverkon solmunumerot olivat raitiovaunuverkolla 250 003–250 330 sekä metro- ja junaverkoilla 250 532–250 824. Raitiovaunusolmuille jätettiin noin kahdensadan solmun puskuri uusia raitiovaunulinjoja varten. Myöhemmin nämä varaukset ovat osoittautuneet liian pieniksi, joten varsinkin ennusteskenaarioiden raidelinkkejä on koodattu monelle lukualueelle. Koska konversio-ohjelmaa ei enää käytetä, myös rajoitus on poistunut.

Solmunumeroinnissa on tähän mennessä käytetty (ennusteskenaariot mukaan lukien) seuraavia varauksia:

Taulukko 12. Solmunumeroavaruuden jako.

solmunumerot	selitys
1-38999	sentroidit, tavalliset
39000–39099	sentroidit, ulkosityöt
39400–39599	liityntäpysäköintialueet
40000–249999	katu- ja tieverkon solmut
250000–250499, 300055–300075, 300741–300777	raitiovaunuverkon solmut
250500–250649, 260000–261000, 300076–300098, 300734–300740	metroverkon solmut
250650–251000, 300530–300733, 300778–300779	junaverkon solmut

Taulukko 13. Solmujen attribuuttitiedot.

attribuutti	selitys
solmuattribuutti ui1	väliaikainen tieto, VAPAA
solmuattribuutti ui2	joukkoliikennepysäkin tyyppi ¹
solmuattribuutti ui3	väliaikainen tieto, VAPAA

¹ Katso pysäkkikoodit taulukosta 14.

Taulukko 14. Pysäkkityypit (ui2) ja niiden selitykset.

koodi	selitys
1	raitiovaunupysäkki
2	bussipysäkki paikallisliikenne
3	bussipysäkki kaukoliikenne
4	bussipysäkki paikallis- ja kaukoliikenne
5	bussipysäkki kaukoliikenne ja pikavuoro
6	bussipysäkki paikallis- ja kaukoliikenne (ml. pikavuoro)
7	ei tietoa
9	bussiterminaali (Digiroadin Palvelu-tilusta)
10	systemaattisesti generoitu pseudopysäkki

Tasoliittymät on pyritty kuvaamaan yhdellä solmulla kukin. Eritasoliittymissä on kuvattu myös rampit. Seuraavassa kuvassa on esimerkki liittymien koodaustavasta.



Kuva 12. Esimerkki liittymien koodaustavasta. Vasemmalla tasoliittymiä, oikealla Kivikon eritasoliittymä.

4.4 Kulkutavat ja joukkoliikenteen ajoneuvotyypit

Käytetyt kulkutavat on esitetty seuraavassa taulukossa. Joukkoliikenteen ajoneuvotyypit ja niitä vastaavat kulkutavat on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 15. Järjestelmäkuvauksessa käytettyjen kulkutapojen kuvaus.

kulkutapa	kuvaus
a	jalankulku (engl. auxiliary transit)
A	ulkoinen jalankulku
b	HSL-bussiliikenne
B	muu, VALLU-rekisteristä poimittu bussiliikenne
c	auto (engl. car)
m	metro
P	pikaraitiovaunu (vain ennusteverkko)
r	lähijuna
R	kaukojuna
t	raitiovaunu

Taulukko 16. Ajoneuvotyyppi, sitä vastaava kulkutapa ja kuvaus.

ajoneuvotyyppi	kulkutapa	kuvaus
1	B	VALLU vakiovuoro
2	B	VALLU pikavuoro
3	b	HSL-bussi
4	m	metro
5	r	lähijuna
6	R	kaukojuna
7	t	raitiovaunu
10	P	pikaraitiovaunu (vain ennusteverkko)

Emmessä on mahdollisuus määritellä useita autokulkutapoja (kuorma-auto, moottoripyörä tms.) ja sallia nämä vain osalla verkkoa. Tällöin on kuitenkin tehtävä myös vastaavat kysyntämatriisit. Tämä ominaisuus on otettu käyttöön tehtäessä kuorma-autojen sijoitteluja, mutta ei vielä linkkityypeissä.

4.5 Linkit

4.5.1 Syöttölinkit

Syöttölinkeillä eli konnektoreilla kuvataan alueen kaikkia yhteyksiä katuverkolle tai joukkoliikennejärjestelmään. Lyhyimpien syöttölinkkien pituus on vain 10 metriä ja pisimpien 13,4 kilometriä. Jotta alueelta toiselle pääsisi autolla, on syöttölinkillä sallittava autokulkutapa c. Joukkoliikennematkat taas tarvitsevat kulkutavalla a kuvattuja jalankulkuyhteyksiä alueiden ja pysäkkien välillä. Joillakin syöttölinkeillä on sallittu sekä autoilu että jalankulku. Sentroideja on yhteensä 1095, mutta osa niistä on kytketty moneen verkon pisteeseen, joten syöttölinkkejä on yli 3000. Tilastoja on seuraavissa taulukoissa.

Taulukko 17. Syöttölinkkien kulkutavat.

alue	auto (c)	jalankulku (a)	sekä a että c	yhteensä
nykytila 2012	91	2061	1065	3217
2020 tavoite	90	2054	1067	3211

Useimmissa tapauksissa alueelta lähtee enemmän kuin yksi syöttölinkki. Osa syöttölinkeistä päättyy liittymäsolmuun, osa niiden väliin. Tarkemmat tilastot ovat seuraavissa taulukoissa.

Taulukko 18. Syöttölinkkien määrä sijoittelualuetta kohden (kaikki kulkutavat).

syöttöjä	1	2	3	4	5	6	sentroideja yhteensä
nykytila 2012	153	228	314	337	60	3	1095
2020 tavoite	156	227	317	329	62	4	1095

Taulukko 19. Sentroidien kytkemispaidat auto-, bussi- ja raitiovaunuverkon (kulkutavat c, b, B, t, P) kuvauksessa.

skenaario	vain tien-pää	vain liittymä	vain liittymien väli	sekä liittymä että liittymäväli	sekä tien-pää että muu	muu yhdistelmä	Yht.
nykytila 2012	0	298	56	507	232	2	1095
2020 tavoite	0	304	55	509	225	2	1095

4.5.2 Linkkien ominaisuuksia

Lähes kaikilla tavallisilla linkeillä, joilla on sallittu henkilöautoilu, on sallittu myös jalankulku. Jalankulkuverkkoa on laajennettu erityisesti asemien ja terminaalien seuduilla sekä Helsingin keskustassa. Jalankulkulinkejä on lisätty myös joihinkin erityiskohteisiin (katso muistio Holm ym. 2009), jos on huomattu yhteyspuutteita.

Lyhyimpien tavallisten linkkien pituus on alle 10 metriä ja pisimpien 46,3 kilometriä. Linkkien kentät sisältävät seuraavaa tietoa:

- kaistamäärä (Bussikaista sisältyy ilmoitettuun kaistamäärään.)
- autoliikenteen viivytysfunktion numero (*vdf*)
- linkkityyppi (ks. taulukko 21)
- *ul1* = user data 1
 - o linkin yhden kaistan kapasiteetti (autoverkko)
 - o aamu-, päivä- ja iltaliikenteen keskinopeus (raitiovaunuverkko)
 - o ei käytössä (juna ja metroverkko)
- *ul2* = user data 2
 - o linkin vapaa nopeus (autoverkko)
 - o ei käytössä (raideliikenne)
- *ul3* = user data 3
 - o raskaiden ajoneuvojen liikennemäärä autoverkon linkillä (kuorma-autot ja lisäksi linja-autot, jos ei bussikaistaa)
 - o ei käytössä (raideliikenne).

Bussikaistan tyyppitieto otetaan huomioon viivytysfunktioissa, jolloin henkilöautoilta vähennetään yksi kaista bussikaistan voimassaoloaikana. Bussien nopeus bussikaistalla määritetään nopeaksoituksen perusteella eikä se ole riippuvainen henkilöautojen määrästä.

Taulukko 20. Linkkien kaistamäärät autoverkolla.

kaistoja	linkkejä 2012	linkkejä 2020 tavoite
1,0	22360	22572
2,0	4501	4633
3,0	532	679
4,0	35	60
yhteensä	27428	27944

Taulukko 21. Autoverkon linkkityypit.

tyyppi	selitys	linkkejä 2012	linkkejä 2020 tavoite
1	tavallinen linkki, ei bussikaistaa	24692	25070
98	ulkosyöttölinkki (vdf=99)	76	76
99	syöttölinkki (vdf=99)	2237	2239
100	ympäri vuorokautinen bussikaista	160	282
101	bussikaista aamuruuhkassa	9	9
102	bussikaista aamu- ja iltaruuhkassa	38	38
103	bussikaista ruuhka-aikoina ja päivällä, mutta ei illalla eikä yöllä	216	230
yhteensä		27428	27944

Taulukko 22. Tie- ja katuverkon linkkiattribuutit.

attribuutti	selitys
linkkityyppi	mahdollisen bussikaistan kuvaus
linkkiattribuutti ul1	linkin kapasiteetti (ajon/h/kaista)
linkkiattribuutti ul2	vapaa nopeus [km/h]
linkkiattribuutti ul3	raskaiden ajoneuvojen liikennemäärä [ajon/h]

Taulukko 23. Raideliikenneverkon linkkiattribuutit.

attribuutti	selitys
linkkiattribuutti ul1	raitiovaununlinkeillä: keskinopeudet [km/h] muodossa xxyyzz. (xx=aamuruuhka, yy=päiväliikenne, zz=iltaruuhka) juna ja metro: VAPAA
linkkiattribuutti ul2	VAPAA
linkkiattribuutti ul3	VAPAA

4.5.3 Ruuhkamaksut

Ruuhkamaksu kuvataan liikenneverkolle halutuille linkeille erilliseen extra-attribuuttiin *@hinta* yksikössä euroa/kilometri. Kun tämä kerrotaan linkin pituudella, saadaan linkin ajamisen hinta (euroissa) attribuuttiin *@ruma*. Attribuuttiin *@ruma* voidaan syöttää myös portilla maksettavan tietullin suuruus.

HLJ 2015:ssä tutkittiin myös liikenteen hinnoittelua, joten vuosien 2025, 2040 ja 2050 luonnosskenaarioissa (v1L) oli ruuhkamaksu, jonka suuruus vaihteli aikajakson mukaan 0–0,08 e/km. Nykytilanteen 2012 verkoilla ja vertailuvaihtoehdoissa (v0N) ruuhkamaksun suuruus oli 0 e/km.

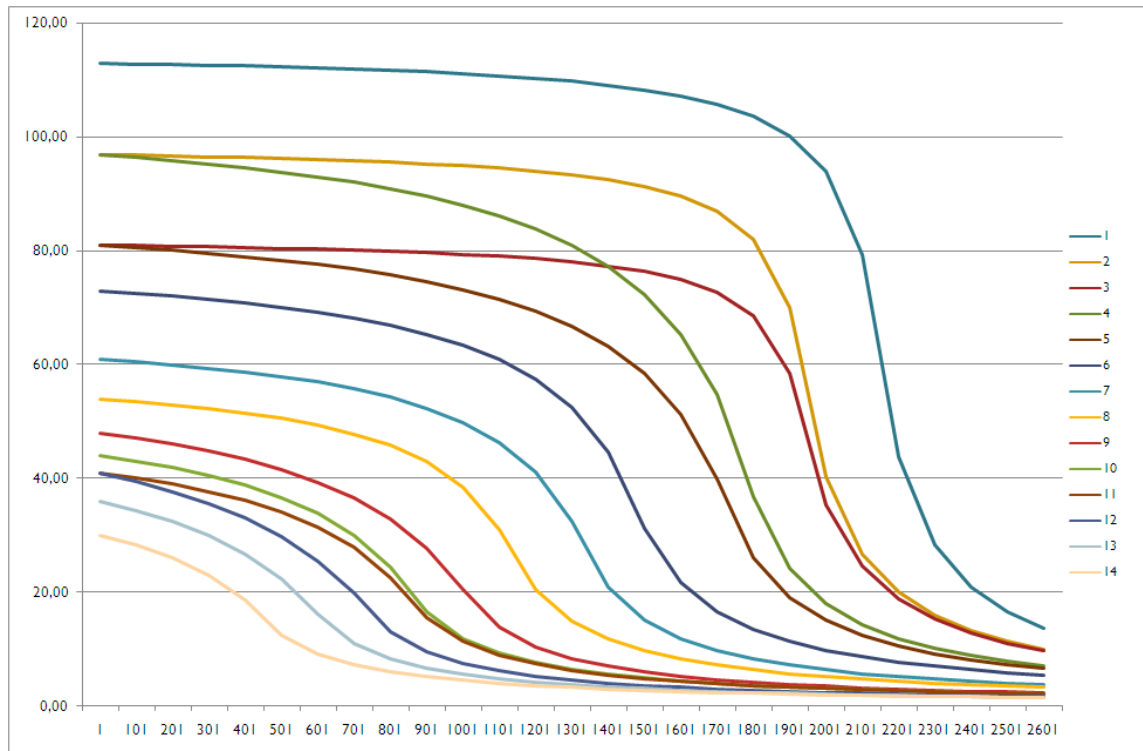
4.6 Viivytysfunktiot

4.6.1 Autoliikenne

Autoliikenteen viivytysfunktiot kuvaavat linkin kulkemiseen kuluvaan aikaan minuutteina liikennemäärän (*volau*), kaistamäärän (*lanes*) ja linkin pituuden (*length*) funktiona. Muita selittäjiä ovat linkin kapasiteetti, vapaa nopeus ja raskaiden ajoneuvojen liikennemäärä, jotka on talletettu linkin user data – kenttiin 1–3. Funktiot on tarkoitettu tuntiliikenteen tarkasteluun. Jos jostakin syystä halutaan kysyntämatriisina käyttää pitemmän tai lyhyemmän aikajakson matriisia, on funktioitakin muutettava vastavasti.

HLJ 2011:n yhteydessä havaittiin, että käytettäessä vuonna 2009 kehitettyjä ja funktioraportissa (Keränen & Pesonen 2011) kuvattuja funktioita ennusteprosessissa kulkutapaosuudet heilahtelevat iteraatiokierrosten välillä. Nopeana, mutta karkeana keinona otettiin käyttöön leikkuri, jonka ansiosta linkin keskinopeus ei voi laskea alle 30 prosenttiin vapaasta nopeudesta. Vuoden 2014 alussa tutkittiin tarkemmin, mistä ongelma johtuu ja olisiko se mahdollisuus välttää. Autoliikenteen viivytysfunktioiden vertailua ja tehdyin valinnan perusteita kuvataan tarkemmin osassa E.

Funktion numero ilmoitetaan linkkitiedostossa. Käytettyjen funktioiden kuvaajat (nopeus km/h liikennemäärän ajon/h/kaista funktiona) ovat seuraavassa kuvassa (Keränen & Pesonen 2011).



Kuva 13. Autoliikenteen viivytysfunktiot liikennemäärä–nopeus-akselistossa.

Funktioiden yhtälöt (matka-aika minuutteina kilometriä kohden) ovat alla. Funktiot *fd1–fd5* ovat taulukon 24 mukaisia perusfunktioita ja *fd6–fd10* vastaavia bussikaistallisten väylien funktioita, joissa linkin kaistamäärästä on vain vähennetty bussikaista. On huomattava, että perusfunktioita muuttamalla nopeusrajoituksen (vapaa nopeuden) ja kapasiteetin mukaan ja valmiiksi laskettuja perusfunktioita on 14 erilaista (numerot 1–14), jotka vastaavat taulukon 24 rivejä (graafinen esitys kuvassa 13).

Kaavoissa Emmen muuttujaan *ul1* on tallennettu linkin kapasiteetti [ajon/h], muuttujaan *ul2* vapaa nopeus [km/h] ja muuttujaan *ul3* raskaan liikenteen määrä [ajon/h]. *Length* on linkin pituus [km], *lanes* kaistamäärä, *volau* sijoittelun perusliikennemäärä [ajon/h] ja *volad* mahdollinen lisäliikennemäärä. Funktiolla *put* talletetaan välitulos ja funktiolla *get(n)* haetaan saman kaavan n:s välitulos. Kunkin kaavan kolmannella rivillä on ylikysyntätilannetta kuvaava suora, joka mm. HLJ 2011:stä saatujen kokeusten perusteella on muutettu pituusriippuvaiseksi (ks. osa E).

$$\begin{aligned}
 fd1 &= (put(60/ul2)*(1+0.02*put((volau+volad+ul3)/lanes)/ \\
 &\quad (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.975))*length + \\
 &\quad (get(2).gt.get(3))*(1.78*get(1)*length+0.0075*(get(2)-get(3))*length) \\
 fd2 &= (put(60/ul2)*(1+0.09*put((volau+volad+ul3)/lanes)/ \\
 &\quad (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.935))*length + \\
 &\quad (get(2).gt.get(3))*(2.29*get(1)*length+0.0085*(get(2)-get(3))*length) \\
 fd3 &= (put(60/ul2)*(1+0.1*put((volau+volad+ul3)/lanes)/ \\
 &\quad (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.915))*length + \\
 &\quad (get(2).gt.get(3))*(2.08*get(1)*length+0.011*(get(2)-get(3))*length)
 \end{aligned}$$

```

fd4 = (put(60/ul2)*(1+0.2*put((volau+volad+ul3)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.87))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.34*get(1)*length+0.014*(get(2)-get(3))*length)
fd5 = (put(60/ul2)*(1+0.3*put((volau+volad+ul3)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.81))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.28*get(1)*length+0.017*(get(2)-get(3))*length)
fd6 = (put(60/ul2)*(1+0.02*put((volau+volad+ul3)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.975))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(1.78*get(1)*length+0.0075*(get(2)-get(3))*length)
fd7 = (put(60/ul2)*(1+0.09*put((volau+volad+ul3)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.935))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.29*get(1)*length+0.0085*(get(2)-get(3))*length)
fd8 = (put(60/ul2)*(1+0.1*put((volau+volad+ul3)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.915))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.08*get(1)*length+0.011*(get(2)-get(3))*length)
fd9 = (put(60/ul2)*(1+0.2*put((volau+volad+ul3)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.87))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.34*get(1)*length+0.014*(get(2)-get(3))*length)
fd10 = (put(60/ul2)*(1+0.3*put((volau+volad+ul3)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.81))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.28*get(1)*length+0.017*(get(2)-get(3))*length)

```

Syöttölinkeillä on käytetty funktiota

```
fd99 = 1.3*length
```

Kaikilla autolinkeillä on käytetty jotakin yllä olevista funktiosta, mutta viime kädessä kaavan tulos riippuu linkkikohtaisten parametrin *ul1* ja *ul2* arvoista. Tätä mahdollisuutta säätää sijoittelun toimintaa onkin joissakin tapauksissa käytetty ja talletettu *ul1*- ja *ul2*-kenttiin muitakin arvoyhdistelmiä kuin seuraavassa taulukossa on esitetty.

Taulukko 24. Autoliikenteen viivytysfunktioiden parametrit funktioluokittain.

	Väyläluokka	Tarkennus	Viivytys-funktio	Nopeus- rajoitus (km/h)	Vapaa nopeus (km/h, ul2)	Vapaa nopeus (min/km)	Kapasiteetti S (ajon/h, ul1)	muoto- parametri J	Ylikysyntä- suoran alku (ajon/h)
1	Moottoritiet	moottoritie	fd1 (fd6)	120	113	0,531	2200	0,02	2145
2		moottoritie		100	97	0,619	2000	0,02	1950
3		moottoritie		80	81	0,741	2000	0,02	1950
4	Maantiet / Useam- pikaistaiset kau- punkiväylät erita- soliittymien	maantie/useampikaist	fd2 (fd7)	100	97	0,619	1900	0,09	1777
5		maantie/useampikaist		80	81	0,741	1850	0,09	1730
6		maantie/useampikaist		70	73	0,822	1600	0,09	1496
7	Useampikaistaiset pääkadut tasoliitty- min valoilla	us.kaist.,valot	fd3 (fd8)	70	61	0,984	1450	0,1	1327
8		us.kaist.,valot		60	54	1,111	1250	0,1	1144
9	Pääkadut	esikaup.pääk.ei valoja	fd4 (fd9)	50	48	1,250	1150	0,2	1001
10		esi.pääk.val/kesk.ei val		50	44	1,364	1000	0,2	870
11		esi.pääk.,val/kesk.ei val		40	41	1,463	1000	0,2	870
12	Kokooja/tonttika- dut	kesk.pääkatu, valot	fd5 (fd10)	50	41	1,463	900	0,3	729
13		kesk.kokooja		40	36	1,667	750	0,3	608
14		pienet tonttikadut		30	30	2,000	600	0,3	486

4.6.2 Joukkoliikenne

Joukkoliikenteen funktioita käytetään sijoittelussa segmenttikohtaisten matka-aikojen laskemiseen. Bussien (ml. kaukoliikenteen linja-autojen) nopeudet riippuvat ajoneuvoliikenteen nopeudesta siten, että jos bussikaistaa ei ole, ajoneuvoliikenteen sijoittelusta saatuun matka-aikaan lisätään vakiolla *a* kerrottu linkin pituus. Bussikaistallisilla linkeillä taas matka-aika on bussikaistaviivekertoimella *c* kerrottu ajoneuvoliikenteen vapaata nopeutta vastaava matka-aika. Muitakin parametrien arvoja kuin taulukossa esitetyt on joissakin tapauksissa käytetty.

Taulukko 25. Joukkoliikenteen funktioiden bussien viiveparametrit funktioluokittain.

				autoliikenne			ei bussikaistaa			on bussikaista		
	Väylä- luokka	Tarkennus	Viivy- tys- funktio	No- peus- rajoitus (km/h)	Vapaa nopeus (km/h, ul2)	Vap nop matka- aika (min/km)	Viive- ker- roin b	Bussi- nopeus (km/h)	Bussi- viive a (min/km) (us2)	Bussi- kaista- viiveker- roin c	Bussi- nopeus (km/h)	Bussiaika (min/km)
1	Moottoritiet	moottoritie	fd1 (fd6)	120	113	0,531	1,5	75,3	0,265	1,5	75,3	0,796
2		moottoritie		100	97	0,619	1,5	64,7	0,309	1,5	64,7	0,928
3		moottoritie		80	81	0,741	1,5	54,0	0,370	1,5	54,0	1,111
4	Maantiet / Useampi- kaiset kaupunkiva- ylät eritasoliittymi-	maantie /useampikaist	fd2 (fd7)	100	97	0,619	1,5	64,7	0,309	1,5	64,7	0,928
5		maantie /useampikaist		80	81	0,741	1,5	54,0	0,370	1,5	54,0	1,111
6		maantie /useampikaist		70	73	0,822	1,5	48,7	0,411	1,5	48,7	1,233
7	Useampi- kaiset pääkadut tasoliittymi- n valoilla	us.kaist.,valot	fd3 (fd8)	70	61	0,984	1,5	40,7	0,492	1,6	38,1	1,574
8		us.kaist.,valot		60	54	1,111	1,5	36,0	0,556	1,6	33,8	1,778
9	Pääkadut	esikaup.pääk, ei valoja	fd4 (fd9)	50	48	1,250	1,5	32,0	0,625	1,7	28,2	2,125
10		esi.pääk.val/kesk. ei val		50	44	1,364	1,5	29,3	0,682	1,7	25,9	2,318
11		esi.pääk.,val/kesk. ei val		40	41	1,463	1,5	27,3	0,732	1,7	24,1	2,488
12	Kokooja /tonttikadut	kesk.pääkatu, valot	fd5 (fd10)	50	41	1,463	1,5	27,3	0,732	1,7	24,1	2,488
13		kesk.kokooja		40	36	1,667	1,5	24,0	0,833	1,7	21,2	2,833
14		pienet tonttikadut		30	30	2,000	1,5	20,0	1,000	1,7	17,6	3,400

Emme-muotoiset bussifunktiot ovat:

$ft01 = us2 * length + timau$, kun linkillä ei ole bussikaistaa ($1 \leq vdf \leq 5$),

missä

$us2$ = funktiokohtainen bussiviive a (min/km) taulukosta 25,

$length$ = linkin pituus [km]

$timau$ = ajoneuvosijoittelun matka-aika (min).

$ft02 = us2 * length$, kun linkillä on bussikaista ($6 \leq vdf \leq 10$)

missä

$us2 = (60 * c) / (ul2.max.30)$

$ul2$ = ajoneuvojen vapaa nopeus [km/h]

c = bussikaistaviivekerroin, joka on

$c = 1,5$, kun $vdf = 6$ tai 7

$c = 1,6$, kun $vdf = 8$

$c = 1,7$, kun $vdf = 9$ tai 10

$length$ = linkin pituus [km].

Raitiovaunulinkkien user data -muuttujat sisältävät mitattuja joukkoliikenteen nopeuksia pakattuina siten, että kuusinumeroisen luvun kaksi ensimmäistä numeroa ovat aamuruuhkan, kaksi seuraavaa päiväliikenteen ja viimeiset kaksi iltaruuhkan nopeuksia [km/h]. Luvut on tarkistettu vastaamaan vuonna 2012 havaittuja keskinopeuksia. Viivytysfunktioissa $ft3$ – $ft5$ kenttä puretaan kokonaisosafunktiolla (int) ja jakojäännösoperaattorilla (mod) sekä muutetaan nopeus [km/h] matka-ajaksi (minuuttia).

Emme-muotoiset raitiovaunufunktiot:

$ft03 = (length / (int(ul1 / 10000))) * 60$, kun on aamuruuhka

$ft04 = (length / ((int(ul1 / 100)) .mod. 100)) * 60$, kun on ruuhkaton aika

$ft05 = (length / (ul1 .mod. 100)) * 60$, kun on iltaruuhka

missä

$ul1$ = lukuarvo, johon on pakattu peräkkäin raitiovaunujen nopeus [km/h] aamu-, päivä- ja iltaliikenteen aikana (esimerkiksi 182015)

Lähi- ja kaukojunien sekä metron funktiona on aikatauluista poimittu asemien välinen matka-aika (minuutteina), joka on talletettu segmenttimuuttujaan $us1$. Tieto on linjakohtainen.

$ft6 = us1$

missä

$us1$ = asemien välinen matka-aika (minuuttia).

Joukkoliikenteen viivytysfunktioita ei ole muutettu vuoden 2009 jälkeen. Niiden muodostamista kuvataan tarkemmin funktioraportissa (Keränen & Pesonen 2011).

4.7 Kääntymiskiellot ja -vastukset

Tärkeimmät kääntymiskiellot koodattiin. Niillä voidaan kuvata myös eritasoliittymien puuttuvia kääntymissuuntia.

Kääntymisvastuksilla voidaan kuvata tiettyyn suuntaan ajamisen tai kääntymisen vaatimaa lisäaikaa esimerkiksi liikennemäärän funktiona, mutta sellaisia ei toistaiseksi ole määritelty.

4.8 Jalankulun ja pyöräilyn verkkomallit

Toisin kuin YTV:n liikennejärjestelmämalleissa, erillistä jalankulku- ja pyöräilyverkon kuvausta ei muodostettu. Jalankulku (kulkutapa a) kumpaankin suuntaan on sallittu lähes kaikilla autolinkeillä. Perusteena oli muun muassa, että vaikka esimerkiksi moottoritiellä ei saakaan kävellä, sen vieressä kuitenkin useimmiten kulkee erillinen jalankulku- ja pyöräilyväylä. Paikallisesti tästä tulee joissakin tapauksissa (esimerkiksi Turunväylän itäpäässä) epätarkkuutta, joka jatkossa kannattaisi ehkä korjata.

Jalankulkuverkkoa laajennettiin silti erityisesti asemien ja terminaalien seuduilla sekä Helsingin keskustassa. Jalankulkulinkkejä on lisätty myös joihinkin erityiskohteisiin, jos on huomattu yhteyspuutteita.

Lisäksi joukkoliikennejärjestelmän kuvauksessa on alueiden, pysäkkien ja asemien välillä syöttö- tai vaihtokävelylinkkejä.

Pyöräilyä ei ole määritelty erillisenä kulkutapana eikä siten tehty erillistä pyöräilyverkon kuvaustaan.

4.9 Joukkoliikenteen liikennejärjestelmämalli

4.9.1 Periaate

Jotta joukkoliikennelinjan voisi kuvata, on oltava määriteltynä

- kulkutapa, jota ko. linja edustaa
- linkit, joilla em. kulkutapa on sallittu ja joita pitkin linjan reitti kulkee
- ajoneuvotyyppi, jota ko. linjalla käytetään
- joukkoliikenteen viivytysfunktiot, jotka kuvaavat segmenttikohtaista vastusta. Viivytys voidaan koodata myös antamalla kulkutapa- tai linjakohtainen vakionopeus.

Emmessä (linja)segmentillä tarkoitetaan yhden linjan reittiä yhdellä linkillä eli kunkin linkin segmenttien määrä on sama kuin kyseistä linkkiä käyttävien linjojen määrä.

Linjat on koodattu enimmäkseen päälinjatasolla eli alalinjojen pienet reittipoikkeamat puuttuvat. Jos alalinjaa liikennöidään tiheällä vuorovälillä, on se kuitenkin koodattu erikseen. Toisaalta joitakin vähäliikenteisiä linjoja on yhdistelty.

Toisin kuin pääkaupunkiseudun aiemmissa liikennejärjestelmämalleissa, kumpikin ajosuunta on kuvattu erikseen. Niinpä mm. erot vuoroväleissä on voitu ottaa paremmin huomioon. Aamu-, ilta- ja päiväliikenteelle on omat linjastonsa.

4.9.2 Linjatunnus

Pääkaupunkiseudun sisäisillä linjoilla sekä Keravan, Kirkkonummen ja Sipoon linjoilla Emmen linjatunnus on sama kuin JORe:ssa eli muotoa *KNNNTS*, missä

- K* = linjaryhmä
 - 1 = Helsingin sisäinen linja
 - 2 = Espoon sisäinen tai sinne ajava seutulinja
 - 3 = lähiliikenteen juna, ennusteskennarioissa käytetty myös Espoon liityntälinjoilla
 - 4 = Vantaan sisäinen tai sinne ajava seutulinja
 - 5 = poikittaislinja
 - 6 = Kirkkonummen sisäinen tai sinne ajava linja
 - 7 = U-linja
 - 9 = Keravan tai Sipoon sisäinen tai sinne ajava linja
- NNNT* = linjatunnus (kolme numeroa ja mahdollisesti kirjain)
- S* = ajosuunta
 - 1 = Helsingistä poispäin tai idästä länteen
 - 2 = Helsinkiin päin tai lännestä itään.

Esimerkiksi bussilinjan 615T tunnus JORe:ssa ja Emmessä on 4615T2 (ajosuunta Lentoasemalta Helsinkiin), E-junan Kaukalahdesta Helsinkiin 3002E2 ja metrolinjan Ruoholahdesta Vuosaareen 1300V1. VALLU-linjojen (ml. Kirkkonummen linjasto) tunnuksen alussa on kirjain V ja sen jälkeen juokseva numero. Kaukojunien linjatunnuksissa on neljä numeroa, joista ensimmäinen on 5.

Tässä työssä ei koodattu linjoja, joiden tunnuksessa olisi ollut kaksi kirjainta. Jos sellaiselle on tarvetta, voidaan tunnuksen kaksi viimeistä merkkiä (*TS*) korvata ao. kirjainyhdistelmällä toiseen ajosuuntaan ja käyttää vastakkaiseen suuntaan päinvastaista järjestystä, esimerkiksi Helsingin sisäiselle linjalle 55AK toiseen suuntaan tunnusta 1055AK ja toiseen 1055KA.

4.9.3 Nopeus

Pääkaupunkiseudun sisäisille bussi- ja raitiovaunulinjoille on otsikossa annettu linjakohtainen oletusnopeus 30 km/h. Samaa arvoa on käytetty myös metro- ja kaupunkijunaliikenteelle. Vastaava oletus kaukojuna- ja VALLU-bussilinjoille on 80 km/h.

Taulukko 26. Joukkoliikennelinjojen attribuuttitiedot (matka aikojen yksikkö on minuutti).

attribuutti	selitys
headway	vuoroväli minuuteissa
description	pääkaupunkiseutu: linjan nro ja suuntanro VALLU ja VR: mistä-mihin ja suunta
jkl-linja-attribuutti ut1	pääkaupunkiseutu: 0 VALLU ja VR: 1. lähtöaika minuutteina keskiyöstä
jkl-linja-attribuutti ut2	pääkaupunkiseutu: 0 VALLU ja VR: lähtöjen lukumäärä
jkl-linja-attribuutti ut3	VAPAA
jkl-segmenttiattribuutti us1	Junilla ja metroilla: matka-aika edelliseltä pysäkiltä pysäkkiä edeltävällä segmentillä
jkl-segmenttiattribuutti us2	bussiliikenteen viivytys
jkl-segmenttiattribuutti us3	VAPAA

Koodauksessa on kuitenkin käytetty tarkempaa tapaa, jossa nopeudet (tai oikeastaan matka-ajat) annetaan segmenttikohtaisesti funktiona, joten oletusnopeus ei sijoittelussa tule käyttöön. Joukkoliikenteen viivytysfunktioista on tarkempi selostus kohdassa 4.6.2.

4.10 Eri vuosien kuvausten vertailua

Kunkin vaihtoehdon eli tarkasteluvuoden väylästä on joitakin poikkeuksia (mm. bussikaistan voimassaolo) lukuun ottamatta sama kaikille aikajaksoille. Erot ovat vain bussikaistojen voimassaolossa ja joukkoliikennelinjastossa. Seuraavassa taulukossa on liikennejärjestelmän kuvausten yksityiskohtaisuutta havainnollistavia lukuja.

Taulukko 27. Tilastotietoja aamuhuipun auto- ja joukkoliikennejärjestelmien kuvauksista.

	nykytila 2012	2020 tavoite
auto (c)		
tavallisia solmuja	12637	12887
tavallisia linkkejä	27428	27944
linkkipituus [km] 1)	14180,1	14345,6
bussi (b, B)		
tavallisia solmuja	11609	11865
linkkejä	25292	25840
linkkipituus [km] 1)	12900,9	13080,7
reittikatupituus [km] 2)	7165,4	7159,4
reittipituus [km] 3)	32639,7	25549,3
linjoja 4)	1259	997
raskas raide (m, r, R)		
tavallisia solmuja	96	132
linkkejä	190	270
linkkipituus [km] 1)	966,4	1079,7
reittikatupituus [km] 2)	846,2	950,2
reittipituus [km] 3)	1895,2	1986,1
linjoja 4)	34	27
raitiovaunu (t, P)		
tavallisia solmuja	273	365
linkkejä	540	738
linkkipituus [km] 1)	91,9	178,6
reittikatupituus [km] 2)	89,0	161,4
reittipituus [km] 3)	141,9	236,
linjoja 4)	20	26

- 1) niiden tavallisten linkkien yhteispituus (suunnat yhteensä), joilla ko. kulkutapa on sallittu
- 2) niiden tavallisten linkkien yhteispituus (suunnat yhteensä), joilla liikennöi vähintään yksi linja
- 3) kaikkien ko. kulkutavan linjojen reittien pituuksien summa (suunnat yhteensä)
- 4) kumpikin ajosuunta omana linjanaan.

5 Liikennejärjestelmän kuormitus ja testaus

5.1 Liikenne-ennustejärjestelmän toimintaperiaate

HSL:n ennustejärjestelmässä lasketaan liikenteen kysyntä (tuotos, kulkutavan valinta ja suuntautuminen eli määräpaikan valinta) *ennustealuejaossa*. Saadut matkamatriisit siirretään sijoittelupankkiin (eli sijoittelualuejaon emmebank-tietokantaan), jossa on kuvattu tarjonta eli tie- ja katuverkko sekä joukkoliikennelinjasto ja viivytysfunktiot. Matriisit hajotetaan jakoluvuilla *sijoittelualuejakoon* sekä tehdään reitinvalinta eli sijoittelu, josta saadaan mm. autoliikenteen liikennemäärät linkeittäin, joukkoliikenteen matkustajamäärät pysäkeillä ja linjoilla sekä vastusmatriisit eli matka-ajat ja etäisyydet alueparien välillä. Saadut sijoittelualuejaon vastusmatriisit aggregoidaan *ennustealuejakoon* laskemalla niistä jakoluvuilla painotettu keskiarvo ja siirretään ne ennustepankkiin (eli ennustealuejaon emmebank-tietokantaan), jossa ne ovat uuden ennustejärjestelmän syöttötietoina.

Matriisien numeroista ja muista ennustejärjestelmän yksityiskohdista kerrotaan tarkemmin teknisessä raportissa (Rantala & Elolähde 2015).

5.2 Autoliikenteen sijoittelut ja vastukset

5.2.1 Kuormitusperiaate ja tulossuureet

Edellä kuvattua liikennejärjestelmää eli autoliikenteen verkon kuvausta kuormitetaan kysyntämatriisilla, jossa ovat tietyn aikajakson (esimerkiksi aamuhuipputunnin) matkat kultakin alueelta muille alueille. Matriisiin on oltava lähtö-määräpaikkasuunnattu tuntiliikennematriisi, koska funktiotkin on suunniteltu kuvaamaan tuntiliikenteen vastuksia.

Funktiot kuvaavat linkillä kulkemisen tai liittymässä kääntymisen vastusta. Vastuksena voi olla esimerkiksi matka-aika, etäisyys, kustannukset tai näiden yhdistelmä (ns. yleistetty matkavastus). Tässä työssä linkin vastuksina on käytetty matka-ajan, etäisyyden ja mahdollisen ruuhkamaksun painotettua summaa eli yleistettyä matkavastusta. Linkin liikennemäärän on oletettu vaikuttavan linkin matka-ajan. Liittymiin on määritetty kääntymiskieltoja, mutta ei kääntymisvastuksia (katso kohta 4.7).

Sijoittelun tuloksena saadaan liikennemäärät ja nopeudet linkeittäin, erikseen lueteltujen liittymien kääntyvät virrat sekä vastusmatriisit eli matka-ajat tms. alueelta alueelle.

Emme-ohjelmiston käyttämä autoliikenteen sijoittelumenetelmä on kapasiteettirajoitettu tasapainosijoittelu. Niinpä voidaan käyttää liikennemäärästä riippuvaisia vastusfunktioita. Tällöin jonkin väylän ruuhkautuminen aiheuttaa sen, että osa liikenteestä siirtyy vaihtoehtoiselle reitille, joka puolestaan voi ruuhkautua. Tätä toistetaan, kunnes kunkin alueparin välillä kaikkien käytettyjen reittien vastukset (matka-ajat) ovat yhtä suuret. Kyseessä on siis käyttäjän optimi. Systeemioptimi saavutettaisiin, jos kaikkien tehtyjen matkojen vastusten summa olisi minimissään, vaikka se yksittäisellä matkalla merkitsisikin vastuksen kasvua (esim. matka-ajan pitenemistä). Käytetty sijoittelualgoritmi on kuvattu Emme-manuaalin (INRO 1998) luvussa 6.2.

Minimietäisyydet alueelta alueelle saadaan, kun viivytysfunktio on muotoa $fdnn = length$ liikennemäärästä riippumatta eli matka-aika [min] on yhtä suuri kuin etäisyys [km]. Tämä vastaa keskinopeutta 60 km/h eli 1 min/km. Kysyntämatriisina voidaan käyttää ykkösmatriisia (kaikki alkiot ykkösiä).

Käyttämällä ns. sivusijoittelua (additional options assignment) voidaan laskea myös kapasiteettirajoitetussa matka-aikasijoittelussa käytettyjen reittien keskipituudet (tai kustannukset). Nämä etäisyydet ovat hiukan suurempia kuin minimietäisyydet.

5.2.2 Raskas liikenne

HELMET 2.1 –työn yhteydessä raskaan liikenteen sijoittelua muutettiin siten, että tavaraliikenne sijoitellaan malliajon alussa pohjakysynnäksi, jota ei muuteta malliajon aikana. Sijoittelu tehdään siten, että tavaraliikenteen ajoneuvoluokittaiset matriisit sijoitellaan erikseen (multiclass assignment) ja eri ajoneuvoluokkien liikennemäärät talletetaan verkon linkeille ekstra-attribuutteihin. Kaikki ajoneuvoluokat sijoitellaan saman autokulkutavan ($mod=c$) verkolle. Koska kuorma-autot eivät ole ainoita ajoneuvoja kaduilla eivätkä siten voi valita reittejään täysin vapaasti, henkilöautoliikenteen matriisina käytetään samaa pohjakysyntämatriisia kuin henkilöliikenteen mallin vastusten laskennan ensimmäisellä iteraatiokierroksella.

Ajoneuvotyyppikohtaiset kuormitukset summataan yhteen ja niihin lisätään linja-autoliikenteen määrä ajoneuvoina linjastojen keskimääräisistä vuoroväleistä laskettuna niillä linkeillä, joilla ei ole erillistä bussikaistaa. Raskaan liikenteen kokonaismäärä (sisältäen myös pakettiauto- ja bussiliikenteen) talletetaan verkon $u/3$ -kenttään, josta sitä käytetään lisäkuormituksena henkilöautoliikennettä sijoiteltaessa.

Raskaan liikenteen sijoittelu mahdollistaa jatkossa raskaan liikenteen aiheuttaman vastuksen tarkemman huomioon ottamisen, koska raskaan liikenteen määrä voidaan tarvittaessa muuttaa henkilöautoekvivalenteiksi, jolloin sijoittelu voidaan tehdä aina henkilöautoliikenteen sijoittelun yhteydessä. Se edellyttäisi kuitenkin viivytysfunktioiden käyttämien kapasiteettiarvojen määrittelyä niin ikään henkilöautoekvivalenteina.

Eri kulkutapoja käyttämällä verkon eri osien käyttöä voidaan myös rajata raskaan liikenteen rajoitusten mukaisesti. Nyt rajoituksia ei ole kuitenkaan vielä tehty, minkä takia esim. Etelä- ja Länsisatamiin suuntautuva tavaraliikenne kuormittaa Töölön katuverkkoa todellista enemmän ja kuormitus on liian vähäistä varsinkin Kehä I:n länsipäässä.

5.2.3 Ruuhkamaksut

HELMET 2.1:ssä ruuhkamaksujen käsittely on lisätty osaksi mallijärjestelmää. Linkkien ruuhkamaksut näkyvät liikennemalleissa kulkutavan valinnassa, matkojen suuntautumisessa (logsumin kautta), autonomistuksessa (yleistettyjen vastusten kautta) ja tätä kautta edelleen matkatuotoksissa. Koska ruuhkamaksu vaikuttaa reitinvalintaan, se on otettu huomioon myös sijoitteluissa.

Autoliikenteen sijoittelun tuloksena tallennetaan etäisyysmatriisi, matka-aikamatriisi sekä ruuhkamaksumatriisi. Ruuhkamaksumatriisi viedään kysyntämalliin, jossa ruuhkamaksuja käsitellään matkakustannuksena. Käytännössä ruuhkamaksumatriisi lisätään kulkutavanvalintamallissa henkilöauton ajokustannukseen², jota kautta se vaikuttaa myös suuntautumismallin logsumiin.

² Toinen vaihtoehto olisi käsitellä ruuhkamaksua pysäköintikustannustyyppisenä. Aineistossa on kuitenkin vain vähän havaintoja, joissa pysäköintimaksu poikkeaa nolasta, joten estimointi ei olisi kovin luotettavalla pohjalla.

Ruuhkamaksu kuvataan liikenneverkolle halutuille linkeille erilliseen extra-attribuuttiin *@hinta* yksikössä euroa/kilometri. HELMET 2.1:ssä autoliikenteen sijoittelun yhteydessä reitinvalinnassa huomioidaan matka-ajan lisäksi myös matkan pituus tietyllä painokertoimella. Jotta ruuhkamaksu voidaan huomioida sijoittelussa reitinvalintaan vaikuttavana tekijänä, muodostetaan erillinen sijoittelussa käytettävä muuttuja, jossa linkin pituuteen lisätään ruuhkamaksu matka-ajaksi muutettuna niin, että matkan pituuden painokerroin suhteessa aikaan kumotaan ruuhkamaksun osalta. Ruuhkamaksu muutetaan matka-ajaksi ajan arvosta tehdyn oletuksen (10 euroa/tunti eli 0,166667 euroa/minuutti) perusteella.

Autoliikenteen sijoittelussa reitinvalinnassa matka-ajan lisätekijä muodostetaan seuraavasti:

$$\text{reitinvalinnan_lisätekijä} = \text{matkan_pituus} + \left(\frac{1}{\text{matkan_pituuden_paino}} \right) * \text{matkan_pituus} * \left(\frac{\text{ruuhkamaksu}}{\text{ajan_arvo}} \right)$$

missä *matkan_pituuden_paino* on sijoittelussa annettava matkan pituuden paino (mallijärjestelmässä oletuksena arvo 0,20 min/km).

Malliteknisistä syistä on linkkien ruuhkamaksuksi asetettava 0 euroa/km silloin, kun kuvataan tilannetta, jossa ruuhkamaksua ei ole. Perustellusta syystä on mahdollista käsitellä ruuhkamaksuja eri tavallakin; tällöin asia kannattaa asia mainita ennusteiden tulosten kuvauksen yhteydessä.

5.2.4 Sijoitteluparametrit

Autoliikenteen sijoittelussa reitinvalinnan kriteerinä ei ollut matka-aika sellaisenaan, vaan yleistetty matkavastus, joka muodostettiin kaavalla

$$\text{vastus} = \text{matka-aika} + \text{matkan_pituuden_paino} * \text{reitinvalinnan_lisätekijä}$$

missä *paino*=0,20 min/km (eli 12 snt/km) kaikille aikajaksoille. Paino perustuu asiantuntija-arvioon.

Sijoittelusta otettiin matka-aikojen lisäksi erikseen talteen omiin matriiseihinsa myös alueparien väliset etäisyydet ja ruuhkamaksut käytetyillä reiteillä.

5.2.5 Kysyntämatriisit

Nykytilan 2012 aamuhuippu-, iltahuippu- ja päivätunnin kysyntämatriisit saatiin nykyennusteesta 2012, joka oli laskettu edellisellä ennustejärjestelmäversiolla, joka estimoitiin vuosien 2007–2008 liikkumistutkimustutkimuksen aineistosta. Tavaraliikenteen kysyntämatriisien muodostamista kuvataan raportissa Niinikoski 2016.

5.3 Jalankulun ja pyöräilyn sijoittelut ja vastukset

Jalankulun vastukset laskettiin käyttämällä kysyntämatriisina ykkösmatriisia, sillä matka-ajat oletettiin liikennemääristä riippumattomiksi.

Jalankulkukuluttavan matka-ajat ja etäisyydet alueparien välillä laskettiin Emmen joukkoliikennesijoittelumoduulilla siten, että aktiivisena kulkutapana oli vain jalankulku (kulkutapa a), jonka painokerroin oli 1 ja muiden aikakomponenttien (odotus, nousu) paino nolla. Koska yhtään varsinaista joukkoliikennekulkutapaa ei ollut aktiivisena, myös "ajoajan" (in-vehicle) matriisissa (jos se olisi otettu talteen) olisi

ollut vain nollia. "Odotusajat" laskettiin vuorovälistä kertomalla se arvolla 0,01 (wait time factor). Vuoroväli taas oli korkeintaan 0,01. Sijoittelussa käsitellyt "joukkoliikennematkot" olivat siis kokonaan alueparien välistä jalankulkua pysäkillä toiselle katuja pitkin. Jalankulkunopeus oli 5,0 km/h.

Pyöräilyä ei käsitelty erikseen.

Kevyen liikenteen kulkutapamallien selittäjänä on etäisyyden logaritmi, jonka mallikonsultti on laskenut edellä mainittujen etäisyysmatriisien pohjalta.

5.4 Bussi- ja raideliikenteen erilliset sijoittelut ja vastukset

Vuoden 2008 mallijärjestelmän laadinnan yhteydessä selvitettiin mahdollisuutta tarkastella bussi- ja raideliikennettä omina kulkutapavaihtoehtoinaan. Sitä varten jouduttiin määrittelemään, mitä bussi- ja raideliikennematkoilla tarkoitetaan, koska yksittäinen joukkoliikennematka voi koostua useista eri joukkoliikennevälineillä kuljetuista osista. Olisi siis määriteltävä, onko raskaalla raideliikenteellä kuljettu pisin aika, pisin etäisyys, vähintään yksi asemaväli vai onko se peräti ollut ainoa joukkoliikennemuoto. Määrittely on olennainen, sillä se vaikuttaa tapaan, jolla bussi- ja raideliikenteen vastukset ja matkustajamäärät lasketaan mallissa.

Laadittiin laskentamenettely, jossa tehtiin useita sijoitteluja, joissa suosittiin vuorotellen bussi- ja raideliikennettä. Saaduista tuloksista koottiin määritelmän mukaiset bussivastukset ja raideliikennevastukset. Menettely oli monivaiheinen ja -mutkainen.

Vaikka olisi saatu aikaan erilliset bussi- ja raideliikenteen matkamatriisit, sijoittelua ei kuitenkaan olisi voitu pakottaa määritelmän mukaiseen reitinvalintaan muutoin kuin hyvin keinotekoisilla rajoituksilla, koska sijoittelumalli hakee kaikissa tilanteissa koko joukkoliikennejärjestelmästä aina käyttäjän kannalta edullisimman reitin riippumatta matkamatriisien taustalla olevasta määritelmästä.

Niinpä vuonna 2008 päädyttiin vaihtoehtoiseen toimintamalliin, jossa raideliikennettä ja bussiliikennettä käsitellään yhdessä joukkoliikenteenä, mutta matkustusmukavuuden erot otetaan huomioon eri joukkoliikennemuotojen matka-aikavastustuksissa.

Tehtyä valintaa ei katsottu tarpeelliseksi muuttaa seuraavallakaan HLJ-kierroksella.

Asiaa on pohdittu tarkemmin raportissa Pastinen ym. 2011 sekä muistioissa Keränen ym. 2009b ja Keränen 2009.

5.5 Joukkoliikenteen sijoittelut ja vastukset

5.5.1 Kuormitusperiaate ja tulossuureet

Joukkoliikenteen sijoittelussa kunkin alueparin välille etsitään mahdolliset strategiat eli reittiyhdistelmät. Kun vaihdot otetaan huomioon, mahdollisia yhdistelmiä on useita. Myös kysyntä jakaantuu usean reitin kesken eli reittiyhdistelmäksi.

Tavoitteena on minimoida kokonaisvastusta osa-alueväleittäin. Vastuksena on tässä työssä käytetty matka-aikaa, mutta se voisi olla myös esimerkiksi kustannus, etäisyys tai kaikkien kolmen yhdistelmä.

Emme valitse reittiyhdistelmän vertaamalla kaikkien mahdollisten reittiyhdistelmien kokonaisvastuksia toisiinsa. Vastus koostuu liityntäkävelyn vastuksesta (tässä siihen kuluva ajasta), odotusvastuksesta (riippuu linjojen vuoroväleistä), ajoneuvon nousuvastuksesta ja linjojen ajovastuksesta (esim. joukkoliikennevälineissä vietetystä ajasta). Vastuskomponentteja voidaan painottaa suhteessa ajovastukseen. Tässä työssä on käytetty painoja 1,5 (kävely- ja odotusajat) sekä 1 (nousuaika). Nousuvastus solmuissa riippuu puolestaan joukkoliikennemuodosta.

Suurin teoreettinen odotusaika saadaan, kun jaetaan 60 minuuttia ko. pysäkin kautta tunnissa kulkevien ja käypien (eli kohti määräpaikkaa vievien) joukkoliikennevuorojen määrällä. Keskimääräiseksi odotusajaksi voidaan ottaa vain osa (yleensä puolet) odotusajasta.

Jos vuorovälit ovat suuret, useimmat matkustajat katsovat aikataulusta sopivan pysäkillä tuloajan tai kyllästyvät odottamaan. Tämä voidaan ottaa huomioon pienentämällä muuttujan wait time factor arvoa. Samalla parametrilla voidaan kuvata myös liikenteen säännöllisyyttä. Pieni arvo vastaa hyvin säännöllistä liikennettä, esimerkiksi raskasta raideliikennettä, joiden lähtöajat ilmoitetaan kullekin asemalle. Suuri arvo taas kertoo, että lähtöajoissa on suuri hajonta. Usein käytetään arvoa 0,5 eli keskimääräinen odotusaika on puolet vuorovälistä. Tässä työssä on käytetty koko verkolla arvoa 0,3 ts. liikenne on katsottu melko säännölliseksi ja joukkoliikenteen käyttäjät eivät mene pysäkillä aivan satunnaisesti vaan katsovat aikatauluja.

Kysyntämatriisin matkustajat jaetaan vaihtoehtoisille reittiyhdistelmille ko. yhdistelmään kuuluvien ja ko. pisteen kautta kulkevien linjojen vuoromäärien suhteessa. Näin matka-aikakomponentit painottuvat matkustajaosuuksilla. Valinta on siinä mielessä lyhytnäköinen, että jaossa ei oteta huomioon matkan edellisten eikä myöhempien vaiheiden nousu-, odotus- tai ajoaikoja.

Eri reittiyhdistelmien kokonaismatka-aikoja vertaamalla löytyy edullisin yhdistelmä, jota ko. alueparin välisille matkoille käytetään. Matkustajat jaetaan reiteille valitun yhdistelmän mukaisesti. Kussakin solmussa valitaan alueparikohtaisesti joko linjayhdistelmä tai jalankulku, ei molempia.

On huomattava, että odotusajat tekevät matka-ajan epäsymmetriseksi. Toisin sanoen paras reittiyhdistelmä ja myös kokonaisaika alueelta p alueelle q voivat olla erilaiset kuin vastakkaiseen suuntaan.

On myös huomattava, että pienet muutokset linjan vuorovälissä tai nopeudessa voivat muuttaa valittua reittiyhdistelmää. Tällöin matka-aikakomponentit saattavat muuttua paljonkin, vaikka kokonaismatka-aika muuttuisi vain vähän.

Matkustaja voi vaihtaa linjalta toiselle, jos linjoilla on yhteinen pysäkki tai pysäkkien välillä on jalankululinkki. Ongelmia tuotti terminaalien koodaus. Vaihtoehdot ovat:

- Koodataan monta pistettä ja niiden välille syötöt (esimerkiksi bussipysäkillä metroasemalle). Tällöin vaihtojen kuvaus on lähempänä todellisuutta ja voidaan käyttää solmukohtaisia nousuaikoja. Haittana on, että kaikki kunkin alueparin väliset matkustajat joko vaihtavat tai eivät vaihda linjalta toiselle, ts. mitään jakoa näiden vaihtoehtojen välillä ei tehdä.
- Koodataan vain yksi piste, jonka kautta ääritapauksessa kulkevat kaikki joukkoliikennevälineet metroa ja rautatietä myöten. Tällöin alueparin väliset joukkoliikennematkat jakautuvat eri linjoille ja kulkutavoille, mutta vaihtotapahtumien kuvaaminen on vaikeampaa. Esimerkiksi solmukohtainen nousuvastus koskee kaikkia joukkoliikenteen kulkutapoja.

- Vaihtokävelylinkkiä voidaan kuvata myös pseudolinjalla, jolla on hyvin lyhyt vuoroväli ja kävelyä vastaava nopeus. Tällöin jako linjojen ja kulkutapojen kesken onnistuu, mutta matka-ajan painona käytetään samaa kuin ajoajalla, ei siis kävelyajan painoa. Lisäksi nousujen määrä kasvaa.

Tässä työssä on käytetty ensin mainittua tapaa.

Joukkoliikenteen sijoittelussa kaikki tietyn alueparin väliset joukkoliikennematkat syötetään vain yhdelle lähtöpysäkille, mutta sen jälkeen matkustajat voivat käyttää useita linjoja ja jopa montaa kulkutapaa. Samalta alueelta toiseen määräpaikkaan suuntautuvat matkat voivat kuitenkin käyttää toista lähtöpysäkkiä. Sijoittelu ei ole kapasiteettirajoitettu sen enempää väylien kuin joukkoliikennevälineidenkään suhteen. Siksi joukkoliikennevastusten laskemisessa voisi hyvin käyttää kysyntänä ykkösmatriisia (kaikki alkiot ykkösiä). Autoliikennesijoittelu kuitenkin on kapasiteettirajoitettu autokysynnän suhteen ja siitä saatava matka-aika vaikuttaa bussien matka-aikoihin, jos bussikaistaa ei ole. Lisäksi joukkoliikennesijoittelun tuloksena syntyy mm. listaus nousevista ja poistuvista matkustajista pysäkeittäin sekä kuormituksista linkeittäin. Siksi on hyödyllistä käyttää oikeata kysyntämatriisia ja ennustematriisiin sijoittelussa tämä on tietenkin jopa tarpeen.

Käytetty sijoittelualgoritmi on kuvattu Emme-manuaalin (INRO 1998) luvussa 6.3.

Joukkoliikennesijoittelu on tehtävä osana malliajoa, koska autoliikenteen kysyntä vaikuttaa autoliikenteen nopeuksiin ja bussien nopeudet taas riippuvat niistä. Vastaavasti bussien (ja kuorma-autojen) määrä linkillä vaikuttaa henkilöautojen käytössä olevaan kapasiteettiin ja nämä kaikki yhdessä linkkien keskinopeuksiin.

Joukkoliikenteen sijoittelu tuottaa em. listausten lisäksi seuraavat matriisit:

- painotettu kokonaismatka-aika
- ajoaika joukkoliikennevälineissä yhteensä
- liityntäkävelyajat yhteensä
- odotusajat yhteensä
- ensimmäinen odotusaika
- nousuajat yhteensä
- nousujen määrä.

Matriisien alkiot ovat keskimääräisiä aikoja tai nousumääriä alueelta alueelle.

Tulostettava kokonaismatka-aika on em. aikakomponenttimatriisien painotettu summa, jossa muita aikakomponentteja painotetaan suhteessa ajoaikaan. Jos halutaan todellinen kokonaismatka-aika, on laskettava yhteen em. aikakomponenttimatriisit ilman painoja. Näin tehtiinkin, vaikka painottomia joukkoliikenteen aikoja ei lopullisissa kulkutapamalleissa tarvittukaan, vaan yhtenä selittäjänä on painotettu kokonaismatka-aika.

5.5.2 Sijoitteluparametrit

Raportissa Elolähde ym. 2011 pohdittiin joukkoliikenteen sijoitteluparametrien määrittämistä ja tehtiin erilaisia testejä.

Tulosten perusteella päädyttiin kokeiluun, jossa odotus- ja kävelyajan painokertoimet pudotettiin 1,5:een ja kaikille joukkoliikennemuodoille annettiin ”pohjalle” nousuvastukseksi 1 minuutti. Bussilinjoille annettiin lisäksi linjan pituudesta epälineaarisesti riippuva lisävastus

$$1,5 \cdot \sqrt{\text{length}}$$

missä *length* on linjan pituus yhteen suuntaan kilometreinä.

On oletettavaa, että linjan pituus vaikuttaa esim. matka-ajan hajontaan, mutta ei kuitenkaan täysin lineaarisesti. Bussilinjojen nousuvastukselle asetettiin leikkuri 10 minuuttiin, mikä vastaa linjan pituudessa 36 kilometriä.

Saatiin siis seuraavat nousuvastukset (boarding time), jotka talletettiin linjakohtaiseen muuttujaan *ut3*:

bussille	$\min\{10; 1,5 \cdot \sqrt{\text{length}} + 1,0\}$
metro, juna	1,0
raitiovaunu	1,0

Seuraavasta taulukosta ilmenee nousuvastuksen suuruus eripituisilla bussireiteillä (yksi suunta):

reittipituus [km]	nousuvastus
1	2,5
3	3,6
5	4,4
10	5,7
15	6,8
20	7,7
30	9,2
36	10,0

Tavoitteena oli määritellä nousuvastus siten, että lyhyillä, aikataulut normaalisti hyvin pitävillä syöttölinjoilla nousuvastus jää selvästi pienemmäksi kuin esim. pitkällä seutulinoilla. Toisaalta nousuvastuseroksi junan ja keskivertobussilinjan välillä tavoiteltiin noin 5 minuutin suuruusluokkaa kirjallisuuskäytöiden ja aiemmin käytettyjen, toimiviksi havaittujen sijoitteluparametrien perusteella.

Tarkastelu on painottunut pääkaupunkiseudun joukkoliikenteeseen, jossa vuorotarjonta on kohtalaisen tiheää. Muualla työssäkäyntialueella voi tulla vastaan tilanteita, joissa vuoroväli on jopa tunteja. Tämän tyyppisissä tilanteissa on syytä harkita ensimmäisen odotusajan vaimentamista pitkien odotusaikojen osalta. Odotusajan leikkureiden käyttö ei ole suositeltavaa, koska tällöin malli ei reagoi lainkaan muutoksiin, jotka tapahtuvat maksimirajojen yläpuolella. Käytännössä vaimentaminen tapahtuu sijoittelun jälkeen komponentteihin jaettuja aikamatriiseja käsittelemällä (ks. luku 6.1).

Tarkastelujen perusteella suositeltiin joukkoliikenteen sijoitteluissa toistaiseksi seuraavia sijoittelu-parametreja:

ut3	/ boarding times (linjakohtaiset arvot, ks. edellä)
1	/ same wait time factor for entire network
0,3	/ wait time factor
1,5	/ wait time weight
1,5	/ auxiliary transit time weight
1	/ boarding time weight

Samoja parametreja käytetään myös liikenne-ennustejärjestelmän versiossa 2.1.

5.6 Vuoden 2012 liikennejärjestelmäkuvauksen tilastollinen testaus

Tämä luku perustuu julkaisemattomaan muistioon Holm, Supponen & Keränen 2013. Tarkempaa analyysia on erikoistyössä Supponen 2013.

5.6.1 Testauksesta

Testaus ja testatut suureet

Työn yhteydessä testattiin verkon sijoitteluja vertaamalla mallin ennustamia tuloksia todellisudessa havaittuihin tuloksiin. Tutkittuja tuloksia on neljää tyyppiä: liikennemäärät, autoliikenteen nopeudet, bussiliikenteen nousijamäärät ja bussiliikenteen nopeudet. Havaitut tulokset toimivat vertailuaineistona, joilla tarkastellaan sijoittelumallin kykyä tuottaa sijoittelussa oikeita liikennemääriä. Toisaalta sijoittelun tuottamat liikennemäärät edustavat myös kysyntämallin tuloksia ja ne kuvaavat koko ennustejärjestelmän toiminnallisuutta. Tuloksia on tarkasteltu aamuhuipputunnin aikajaksolta, koska sen arvellaan parhaiten kuvaavan liikenneverkon toimintaa ruuhkautuneessa tilanteessa.

Vertailuaineisto

Havaituilla tuloksilla tarkoitetaan tässä työssä todellisuudessa riippumattomasti laskettuja tuloksia liikenteen tilanteesta. Tietoa havaituista tuloksista on kerätty aiemmista raporteista, LAM-pisteiden mittauksista sekä matkakorttiaineistosta. Aineisto on kerätty pääosin vuosilta 2011 ja 2012. Käytetty ajanjakso on aamuhuipputunti, mikä määritellään tunnin ajanjaksoksi kello kuuden ja yhdeksän välillä aamulla. Tulokset ja niitä vastaavat tietolähteet on lueteltu seuraavassa taulukossa.

Taulukko 28. Tulokset ja tietolähteet.

Tulos	Lähde
<i>Autoliikenteen liikennemäärät</i>	<i>Helsingin liikenteen kehitys 2009, 2010, 2011 (Helsingin kaupunki), LAMPisteet (Liikennevirasto, syksy 2012)</i>
<i>Autoliikenteen nopeudet</i>	<i>Liikenteen sujuvuus Helsingissä vuonna 2011 (Helsingin kaupunki)</i>
<i>Bussiliikenteen nopeudet</i>	<i>Matkakorttiaineisto (HSL, syksy 2011)</i>
<i>Bussiliikenteen nousijat, raideliikenteen nousijat</i>	<i>Matkakorttiaineisto (HSL, syksy 2011), Helsingin liikenteen kehitys 2009, 2010, 2011 (Helsingin kaupunki), raideliikenteen profiililaskennat (HSL)</i>

Ennusteet

Mallin ennusteilla tarkoitetaan liikennemallin avulla tuotettuja tuloksia liikenteestä. Tulokset on tuotettu mallin 2008 aamuhuipputuntimatriisilla ja skenaariolla.

Metodi

Vertailu perustuu havaittujen ja mallin tuottamien tuloksien vertailuun graafisesti ja numeerisesti. Kirjallisuusselvityksessä selvisi, että tämänkaltaiselle analyysille ei ole olemassa yleisesti hyväksytyjä käytäntöjä, vaan käytännöt vaihtelevat tutkimusten välillä. Tässä työssä päädyttiin käyttämään useita erilaisia menetelmiä, joilla saadaan hyvä yleiskuva tulosten tarkkuudesta. Eri tulostyyppien vertailussa käytetyt metodeja on selitetty tarkemmin alla ja eri menetöt on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 29. Menetöt tuloksittain.

Tulos	Metodit
Autoliikenteen liikennemäärät	sirontakaavio, regressioanalyysi, virheiden jakauma, GEH-vertailuarvo
Autoliikenteen matka-ajat	15% suhteellinen virhe
Bussiliikenteen matka-ajat	sirontakaavio, regressioanalyysi, suhteellisten virheiden jakauma, alle 15% suhteellinen virhe
Bussiliikenteen nousijat alueittain	sirontakaavio, regressioanalyysi, virheiden jakauma, GEH-vertailuarvo

GEH -vertailuarvo – Liikennemääriä ja joukkoliikenteen nousijamääriä vertaillaan mallin tuloksiin GEH-vertailuarvon avulla. GEH-vertailuarvo on The UK Department of Transportin esittämä tapa havaittujen ja mallien tuottamien liikennemäärien vertailuun. GEH- arvo määritellään absoluuttisen ja suhteellisen virheen tulon neliöjuurena. GEH-arvolle on annettu suositusarvoksi yksittäisillä linkeillä korkeintaan 5. Seudullisessa mallissa 60–85 % linkeistä tulisi GEH-vertailuarvon olla korkeintaan 5. Kokonaiselle laskentalinjalle GEH-arvon tulisi suositusten mukaan olla alle 4. (The UK Department of Transport 1996).

$$GEH = \sqrt{\frac{(O_i - E_i)^2}{0.5 * (O_i + E_i)}}$$

missä O_i tarkoittaa havaittujen liikennemääriä linkillä i ja E_i mallin tuottamia liikennemääriä linkillä i . GEH –vertailuarvon on tarkoitus tehdä suuresti vaihtelevat liikennemäärien yksittäisarvot paremmin vertailukelpoisiksi keskenään. Esimerkiksi 20 yksikön virhe 100 yksikön tuotoksessa tuottaa arvoksi 2. Saman arvon tuottaa 90 yksikön virhe 2000 yksikön tuotoksessa.

Regressioanalyysi – Regressioanalyysi tarkastelee havaittujen tulosten ja ennusteiden vastaavuutta kokonaisuudessaan. Regressioanalyysin arvoille on annettu seuraavat suositukset: The UK Department of Transport suosittelee, että regressioanalyysin selityssasteen R^2 arvon tulisi olla yli 0,90 ja suoran kulmakertoimen tulisi olla 0,90 ja 1,10 välillä (The UK Department of Transport 1996). BartonAschman Associates and Cambridge Systematics esittävät puolestaan, että R^2 arvon tulisi olla suurempi kuin 0,88. Lisäksi sirontakaavion esittämät suuret poikkeavat arvot tulisi tutkia (BartonAschman Associates and Cambridge Systematics 1997).

Sirontakaavio –Regressioanalyysin graafinen tarkastelu paljastaa mahdollisia systemaattisia riippuvuuksia, jotka eivät käy ilmi numeerisesta regressioanalyysistä.

Virheiden jakauma – Virheiden jakaumia tutkitaan eri ominaisuuksien funktioina, jotta voidaan tunnistaa mahdollisia systemaattisia virheitä mallin toiminnassa. Liikenne- ja matkustajamääriä tarkastellessa on käytetty vertailuarvona absoluuttista erotusta havaittujen ja mallin ennustamien tuloksien välillä ja matka-aikatarkasteluissa on käytetty suhteellista erotusta. Suhteellista erotusta käytetään, jotta mitattavan osuuden pituuden vaikutus ei vaikeuta tulosten tarkastelua.

15% suhteellinen virhe –Matka-aikojen tarkastelussa mallin kehitystä tarkastellaan mittaamalla alle 15% suhteellisen virheen matka-ajassa tuottavien osuuksien määrää. Ohjeen mukaan ennustettujen ajoaikojen tulisi yhteysväleillä osua 15% vaihteluvälin sisään. (The UK Department of Transport 1996)

5.6.2 Testin tulokset

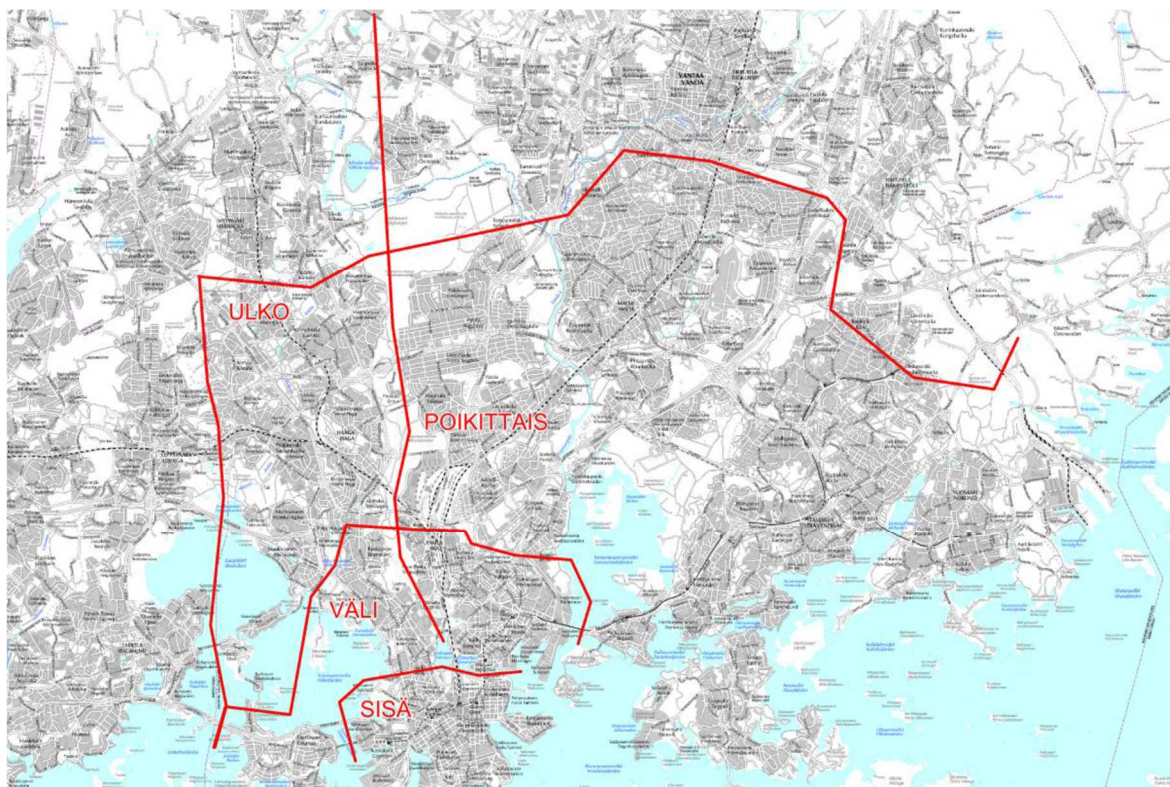
Autoliikenteen liikennemäärät

Autoliikenteen liikennemäärien vertailuun käytettiin LAM- mittausdataa sekä Helsingin liikenteen kehitys –raportista löytyviä tietoja huipputuntiliikenteestä. Havaittujen tulosten otos on melko kattava ja yhteensä tarkasteltavia kohteita on 162. Otos kattaa koko mallinnettavan alueen, mutta kohteita on kaikkein eniten Kehä III sisäpuoliselta alueelta. Tuloksia on tarkasteltu sekä linkkikohtaisesti että muodostamalla pääkaupunkiseudun alueelle kolme laskentalinjaa. Laskentalinjat on esitelty kuvassa 14.

Virheiden jakauman tarkastelu osoittaa, että mallin tulokset ovat kohteissa hieman yliarvioituja, minkä vuoksi virheiden jakauma on vino oikealle (kuva 16). Tarkemmassa analyysissä huomattiin, että liikennemäärät ovat yliarvioituja erityisesti keskustaan suuntaan sekä poikittaisilla pääväylillä. Sen sijaan matkat Helsingin keskustasta pois ovat aliarvioituja aamuhuipputunnin aikana.

GEH-arvoille on annettu suositukseksi, että laskentalinjoilla arvon tulisi olla alle 4 ja linkeillä yli 60 prosentilla arvo pitäisi olla alle 5. Nämä raja-arvot eivät täyty ennustearvoilla. On kuitenkin hyvä huomata, että mittaristo on hyvin tiukka suurille liikennemäärille ja laajalle makrotason liikennemallille. Regressioanalyysin selitysasteen arvosta $R^2 = 0,905$ voi huomata, että vaikka linkeittäin ennusteiden ja havaittujen tulosten väliset yksittäiset erotukset ovat suuria, on tulosten yleinen selittävyys hyvällä tasolla.

Kun samanlainen vertailu tehtiin 2009 liikenneverkon sijoittelutuloksille, huomattiin, että liikenneverkon päivittämisellä on melko pieni vaikutus havaittuihin virheisiin.



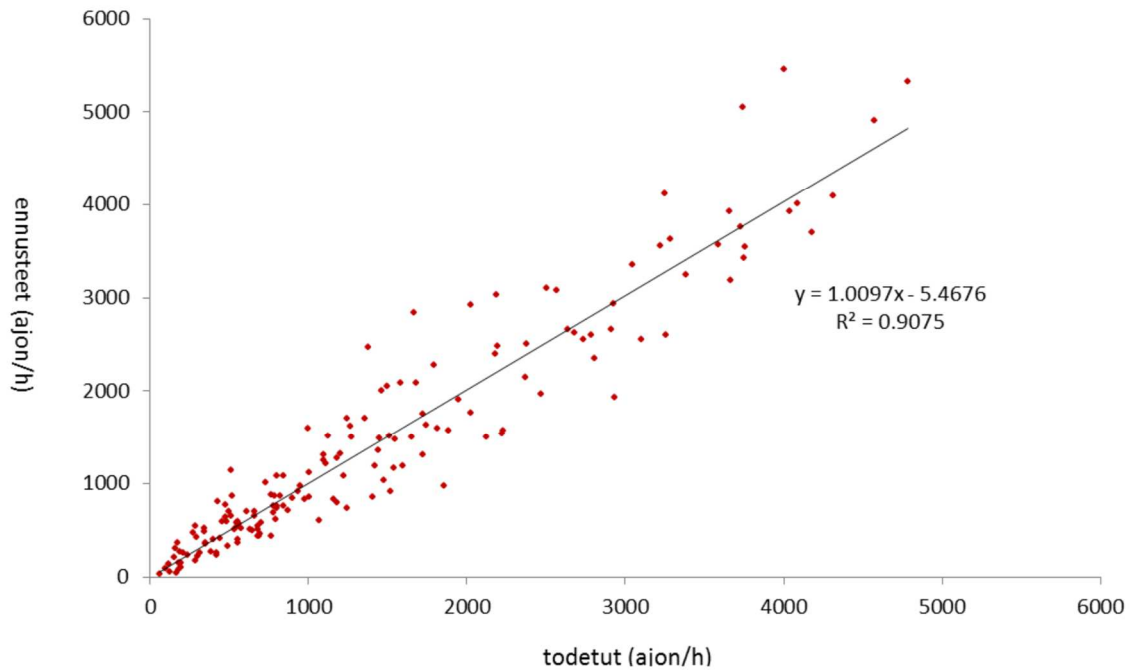
Kuva 14. Autoliikenteen liikennemäärien ja joukkoliikenteen matkustajamäärien laskentalinjat. Joukkoliikenteestä laskentatietoa on saatavilla vain SISÄ- ja VÄLI-laskentalinjoilta.

Taulukko 30. Autoliikenteen liikennemäärät laskentalinjoittain (skenaario AHT 2012).

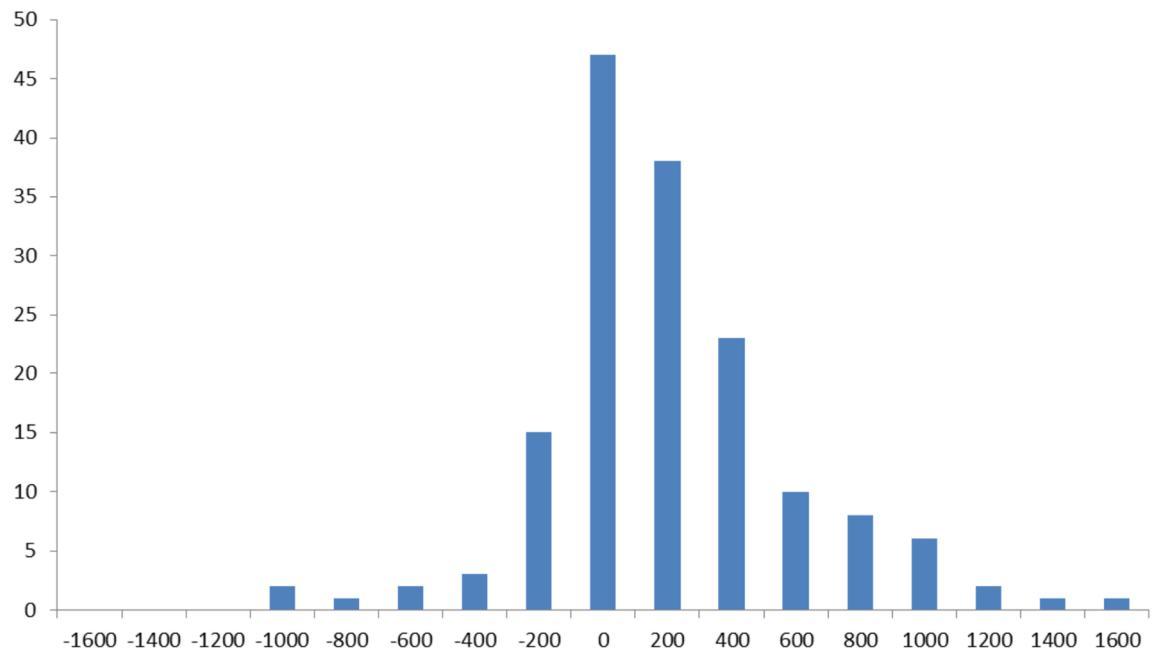
Laskentalinja	Suunta	Havaittu	Ennuste	Erotus (Ennuste– Havaittu)	GEH- vertailuarvo
POIKITTAIS	itään	14378	15365	987	8
POIKITTAIS	länteen	13571	14926	1355	11
SISÄ	keskustaan	11380	11026	-354	3
SISÄ	keskustasta	6918	5703	-1215	15
VÄLI	keskustaan	20534	22381	1847	13
VÄLI	keskustasta	9792	8473	-1319	14
ULKO	keskustaan	30978	32806	1828	10
ULKO	keskustasta	21603	18465	-3138	22

Taulukko 31. Autoliikenteen liikennemäärät linkeittäin (skenaario AHT 2012).

Linkkityyppi	Linkkien määrä	GEH alle 5 (%)	GEH alle 10 (%)
katu	38	45 %	79 %
poikittainen pääväylä	34	32 %	59 %
säteittäinen pääväylä	50	46 %	62 %
Kehä III ulkopuolinen säteittäinen	32	34 %	88 %
Kehä III ulkopuolinen poikittainen	8	50 %	88 %
KAIKKI	162	41 %	72 %



Kuva 15. Autoliikenteen liikennemäärien sirontakaavio linkillä (skenaario AHT 2012).

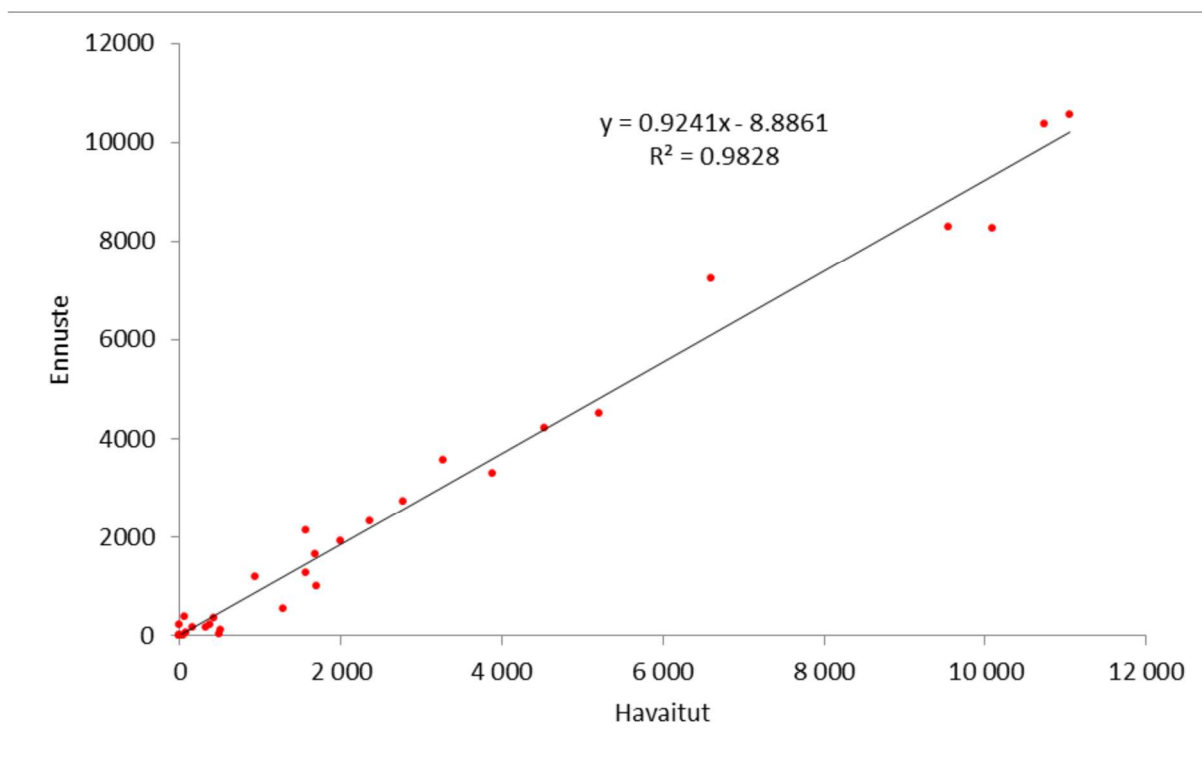


Kuva 16. Histogrammi liikennemäärien erotusten jakaumasta (skenaario AHT 2012). Erotus on laskettu vähentämällä havaitut liikennemäärät mallin tuloksista.

Joukkoliikenteen matkustajamäärät

Joukkoliikenteen matkustajamääriä tutkittiin laskentalinjoittain. Laskentalinjoja joukkoliikenteelle on kaksi Helsingin niemen rajalla (SISÄ-laskentalinja) sekä kantakaupungin rajalla (VÄLI-laskentalinja). Laskentalinjat on esitelty kuvassa 14. Ne kattavat kaikki joukkoliikennemuodot ja muodostavat siksi hyvän kokonaiskäsityksen kulkumuoto-osuuksista ja matkojen kokonaismäärästä. Laskentalinjoilla havaittuja tuloksia on saatavilla vain ruuhkasuuntaan, joten Helsingistä aamuhiipputunnin aikana poislähteviä matkamääriä ei voitu huomioida.

Keskimäärin joukkoliikenteen matkustajamäärät osuvat hyvin kohdalleen. Laskentalinjoista niemen rajalla matkustajamäärät ovat aliarvioituja ja ongelmia on kulkumuotojen välisessä työnjaossa. Raideliikenteessä on selvästi liian vähän matkustajia, mutta bussien kokonaismatkustajamäärät ovat melko kohdillaan. Tämä on mahdollisesti seurausta bussien liian suurista nopeuksista Helsingin keskustaan johtavilla bussikaistallisilla osuuksilla (kts. kohta Joukkoliikenteen matka-ajat).



Kuva 17. Joukkoliikenteen matkustajamäärien sirontakaavio (skenaario AHT 2012).

Taulukko 32. Joukkoliikenteen matkustajamäärät Helsingin kantakaupungin rajalla (VÄLI-laskentalinja) keskustan suuntaan (skenaario AHT 2012).

Kohde	Kulkumuoto	Huipputunti	Emme S2012	Erotus	GEH
Länsiväylä	bussi	5207	4521	-685	10
Meilahden silta	bussi	0	0	0	0
Munkkiniemen silta	bussi	1677	1644	-331	
Mannerheimintie	bussi	3273	3569	296	5
Ilmalankatu	bussi	59	365	306	21
Veturitie	bussi	80	50	-30	4
Ratapihantie	bussi	331	159	-172	11
Mäkelänkatu	bussi	2777	2728	-49	1
Hämeentien silta	bussi	3888	3289	-598	10
Hermannin rantatie	bussi	0	224	224	21
Kyläsaarenkatu	bussi	0	0	0	0
Kulosaaren silta	bussi	1287	545	-741	24
Rantarata	juna	6600	7243	643	8
Päärata	juna	10744	10363	-381	4
Kulosaaren silta	metro	11054	10569	-485	5
Munkkiniemen silta	raitiovaunu	433	339	-94	5
Mäkelänkatu	raitiovaunu	166	161	-4	0
Hämeentien silta	raitiovaunu	368	221	-147	9
Laskentalinja	Yhteensä	47943	45993	-1950	9

Taulukko 33. Joukkoliikenteen matkustajamäärät Helsingin niemen rajalla (SISÄ-laskentalinja) keskustan suuntaan (skenaario AHT 2012).

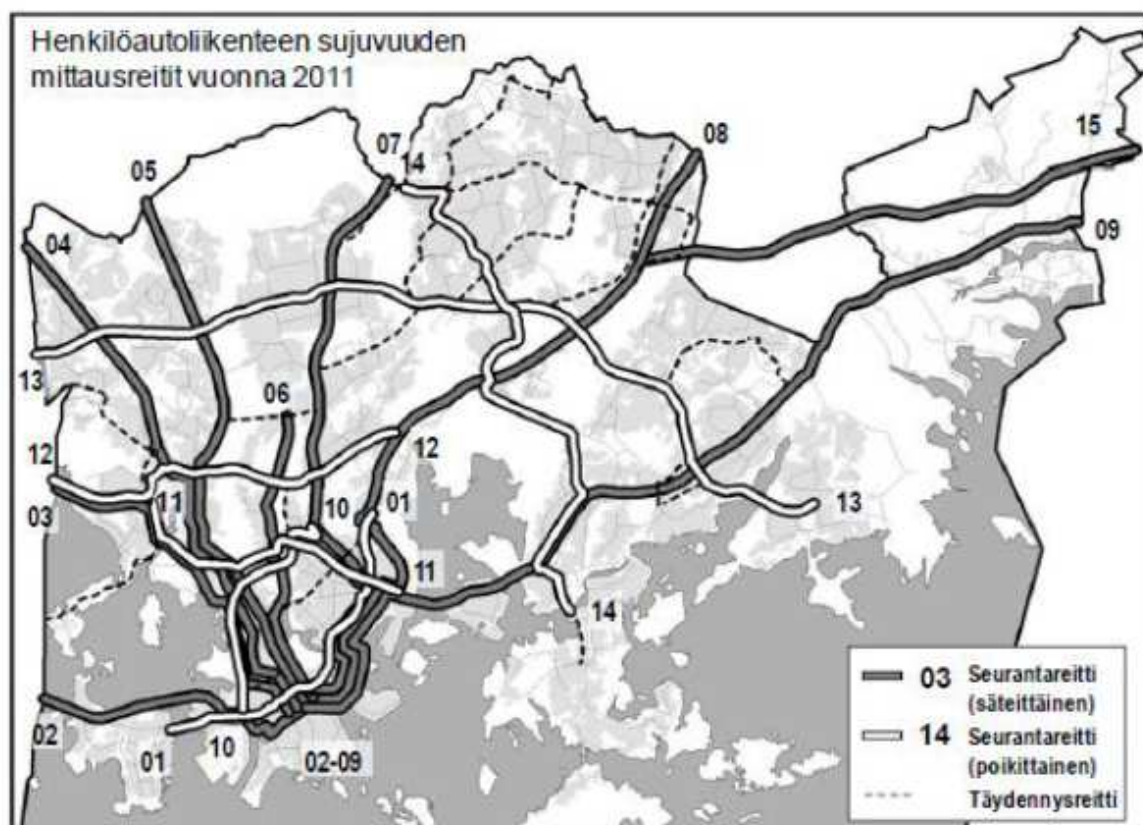
Kohde	Kulkumuoto	Huipputunti	Emme S2012	Erotus	GEH
Lauttasaaren silta	bussit	1572	2122	550	13
Lapinlahden silta	bussit	4537	4222	-315	5
Merikannontie	bussit	0	0	0	0
Mechelininkatu	bussit	43	0	-43	9
Runeberginkatu	bussit	938	1184	246	8
Töölönkatu	bussit	0	0	0	0
Mannerheimintie	bussit	1992	1910	-81	2
Pitkäsilta	bussit	2357	2321	-36	1
Hakaniemen silta	bussit	497	13	-484	30
Linnunlaulu	junat	10087	8254	-1833	19
Pitkäsilta	metro	9544	8280	-1265	13
Runeberginkatu	raitiovaunut	506	119	-386	22
Mannerheimintie	raitiovaunut	1700	992	-708	19
Pitkäsilta	raitiovaunut	1572	1272	-300	8
Laskentalinja	Yhteensä	35344	30690	-4654	26

Autoliikenteen matka-ajat

Autoliikenteen matka-aikojen tutkimisessa tarkasteltiin matka-aikoja pääkaupunkiseudun alueiden välillä. Tarkoituksena on varmistaa, että ennustetut matka-ajat ruuhkautuneen alueen sisällä ovat järkevällä tasolla ja edustavat todellisuuden tilannetta.

Lähteenä matka-aikatiedolle on toiminut Liikenteen sujuvuus Helsingissä vuonna 2011 -raportti, jossa on raportoitu keskimääräisiä ajoaikoja Helsingin sisäisille yhteysväleille. Mittauskertoja ajoajoille on kuudesta yhdeksään. Tarkasteltuja kohteita on yhteensä 17 (kuva 18). Numero kuvassa vastaa taulukoiden 34 ja 35 ensimmäisen sarakkeen tunnistetietoa.

Ennustetut autoliikenteen matka-ajat vastaavat hyvin havaintoja ja kriteeri 15% suhteellisesta virheestä täyttyy 14 kohteessa. Huomattavaa on, että matka-ajat Kehä I:stä pitkin Vuosaaresta Konaan ovat molempiin suuntiin ennustettu reilusti liian suuriksi.



Kuva 18. Autoliikenteen ajoaikojen mittausreitit (Liikenteen sujuvuus Helsingissä vuonna 2011, Helsingin kaupunki).

Taulukko 34. Autoliikenteen ajoajat säteittäisreiteillä (skenaario AHT 2012).

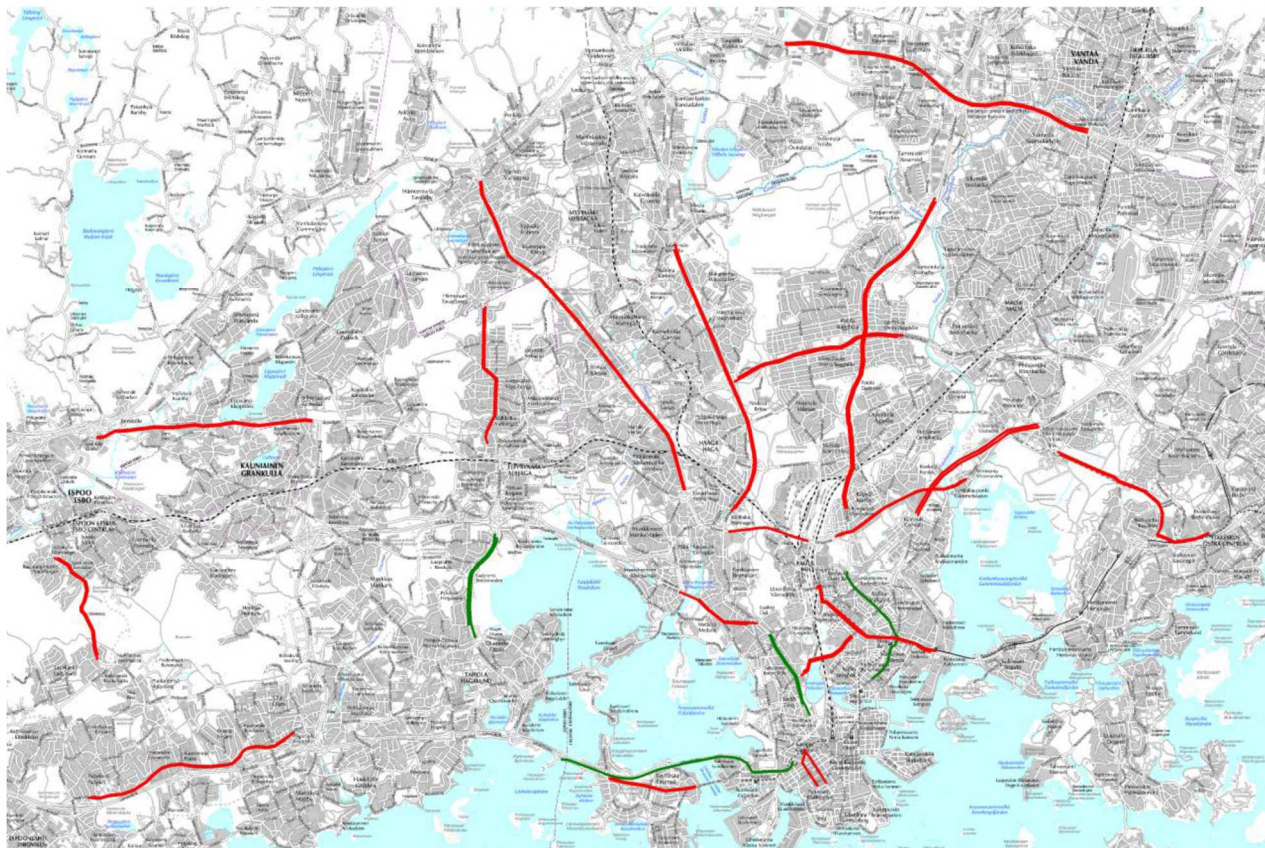
Tunniste	Lähtöpaikka	Määränpää	Havaitut	Ennuste	Suhteellinen erotus	15% kriteeri
2	Länsiväylä	Erottaja	14	14	1 %	KYLLÄ
3	Turunväylä	Erottaja	22	22	1 %	KYLLÄ
4	Vihdintie	Erottaja	32	28	-11 %	KYLLÄ
5	Hämeenlinnanväylä	Erottaja	26	27	2 %	KYLLÄ
7	Tuusulanväylä	Erottaja	24	26	6 %	KYLLÄ
8	Lahdenväylä	Erottaja	24	27	15 %	KYLLÄ
9	Itäväylä	Erottaja	31	32	2 %	KYLLÄ

Taulukko 35. Autoliikenteen ajoajat poikittaisreiteillä (skenaario AHT 2012).

	Lähtöpaikka	Määränpää	Suunta	Havaitut	Ennuste	Suhteellinen erotus	15% kriteeri
1	Hämeentie	Lauttasaarentie	länteen	22	21	-4 %	KYLLÄ
	Lauttasaarentie	Hämeentie	itään	20	19	-7 %	KYLLÄ
1	Mäkelänkatu	Mechelininkatu	länteen	16	14	-10 %	KYLLÄ
	Mechelininkatu	Mäkelänkatu	itään	15	12	-18 %	EI
1	Itäväylä	Turunväylä	länteen	17	14	-14 %	KYLLÄ
	Turunväylä	Itäväylä	itään	19	17	-11 %	KYLLÄ
1	Lahdenväylä	Turunväylä	länteen	19	16	-15 %	KYLLÄ
	Turunväylä	Lahdenväylä	itään	18	18	0 %	KYLLÄ
1	Vuotie	Kehä I	länteen	18	25	33 %	EI
	Kehä I	Vuotie	itään	17	21	20 %	EI

Joukkoliikenteen matka-ajat

Joukkoliikenteen matka-aikojen tarkastelussa pyrittiin saamaan tietoa joukkoliikenteen eri väyläluokkien nopeusfunktioiden toimivuudesta. Tämän vuoksi tarkasteluun on valittu alueparien välisten matka-aikojen tarkastelun sijaan lyhyempiä pysäkkivälejä, joiden funktioluokka on sama. Yhteensä kohteita valittiin tarkasteluun 39, joista 7 on bussikaistallisia kohteita. Seuraavaan kuvaan on merkitty punaisella värillä kohteet, joissa bussit ajavat muun liikenteen seassa ja vihreällä kohteet, joissa on erillinen bussikaista.

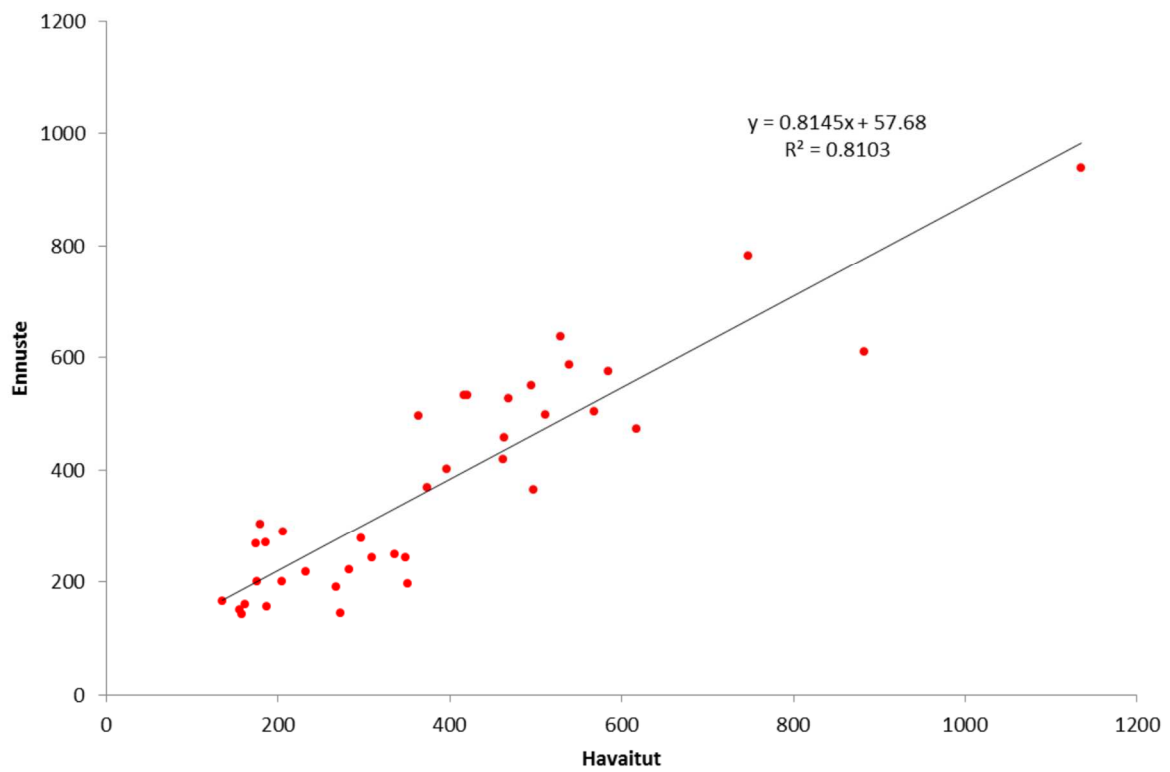


Kuva 19. Bussiliikenteen matka-aikojen mittausreitit.

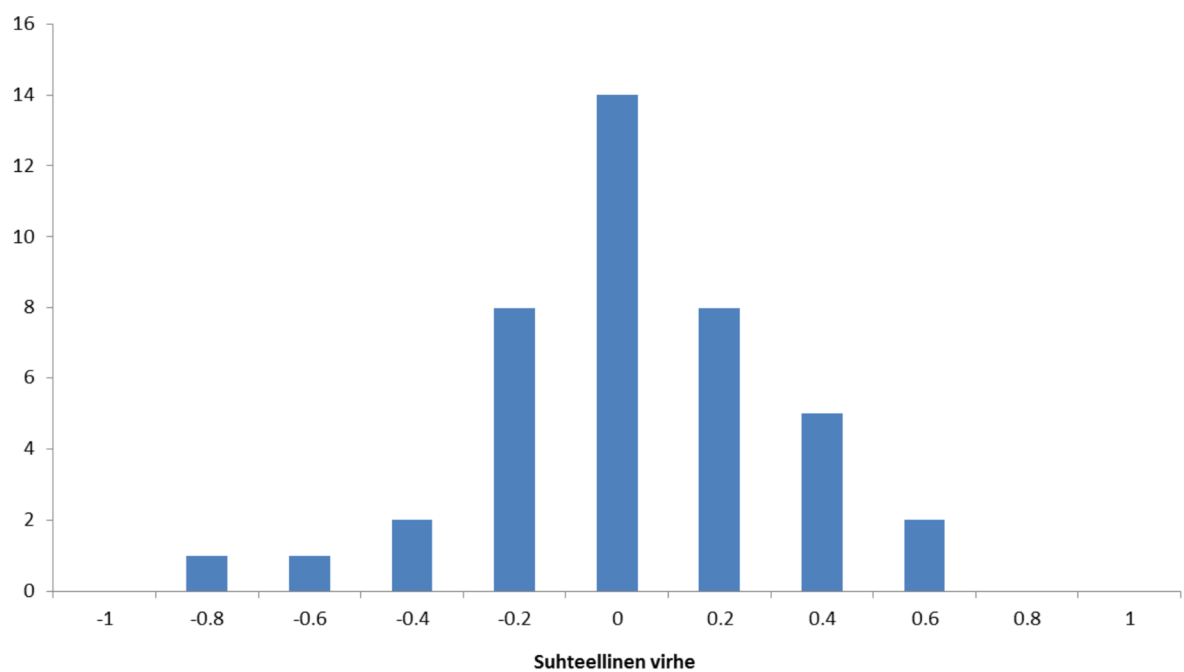
Tietolähteenä on toiminut vuoden 2011 syksyn matkakorttiaineistosta saatu nopeusdata. Mittaustuloksia kohdetta kohden on 15–250. Koska matka-ajat ovat satunnaisesti hajaantuneita ja otoksen lukumäärä on suuri, matka-aikojen vertailuluvuksi valittiin keskiarvo.

Tulokset osoittavat, että pääasiassa bussien matka-ajat ovat melko hyvin arvoituja, eikä ainakaan selkeää virhettä voi aineistosta osoittaa. Kuitenkin vain 56% ajoajoista jää alle 20% suhteellisen virheen. Jakauma on hieman vino oikealle, mikä viittaisi nopeuksien pieneen yliarviointiin. Sen sijaan bussikaistallisten osuuksien nopeuksissa vaikuttaisi olevan vääristymä, mikä myös tukee aiempaa käsitystä (kuva 21).

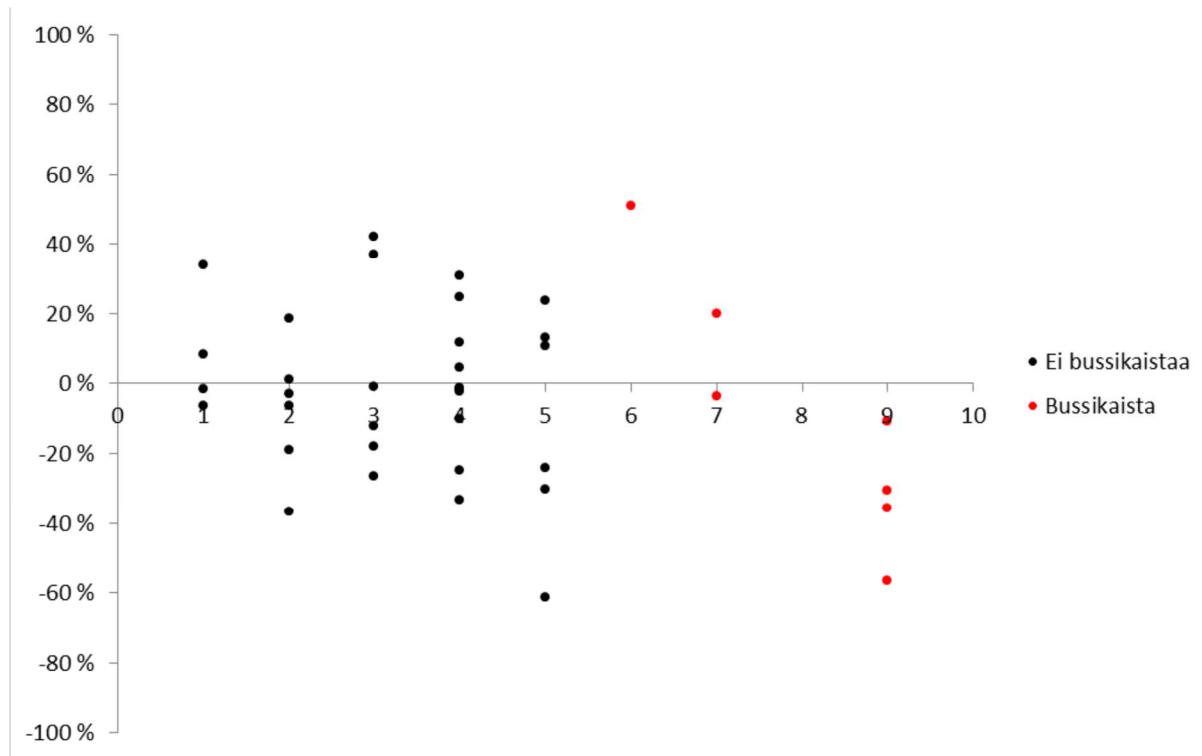
Bussikaistallisilla osuuksilla bussien ajoaika määritellään suhteessa ajoneuvoliikenteen vapaaseen nopeuteen väylällä. Suurilla väylillä bussien viivytyskerroin vaikuttaisi olevan liian suuri ja pienemmillä väylillä taas liian pieni.



Kuva 20. Joukkoliikenteen matka-aikojen sirontakaavio (mallinnetut – todetut) (skenaario AHT 2012).



Kuva 21. Joukkoliikenteen matka-aikojen sirontakaavio (ennuste– todetut) (skenaario AHT 2012).



Kuva 22. Suhteellinen virhe väylän funktioluokan (vdf) kuvaajana (skenaario AHT 2012).

Taulukko 36. Bussiliikenteen ajoajat pysäkkiväleittäin (skenaario AHT 2012).

Kohde	Pituus Havaittu	Ajoajan keskiarvo	Ajoajan mediaani	Pituus Ennuste	Ajoaika Ennuste	VDF	SUHT. ERO	EROTUS
Espoonväylä pohjoiseen	2,3	186	190	2,4	270	3	37 %	84
Espoonväylä etelään	2,4	175	166	2,5	268	3	42 %	94
Kuitinmäentie länteen	4,6	469	488	4,5	527	4	12 %	58
Kuitinmäentie itään	4,3	584	578	4,7	576	4	-1 %	-8
Helsinginkatu länteen	1,3	284	281	1,3	221	4	-25 %	-62
Helsinginkatu itään	1,4	204	234	1,4	200	4	-2 %	-5
Tukholmankatu itään	1,6	373	310	1,5	368	4	-1 %	-5
Tukholmankatu länteen	1,3	268	258	1,4	192	4	-33 %	-76
Aleksis Kiven katu itään	2,9	463	463	2,9	419	4	-10 %	-44
Aleksis Kiven katu länteen	3,0	748	738	3,0	783	4	5 %	35
Tuusulanväylä etelään	6,9	539	465	7,5	586	1	8 %	48
Tuusulanväylä pohjoiseen	6,9	463	436	7,0	457	1	-1 %	-6
Lahdenväylä etelään	3,2	206	177	3,5	289	1	34 %	84
Lahdenväylä pohjoiseen	3,2	232	182	3,0	218	1	-6 %	-14
Kehä III länteen	6,5	512	521	6,6	497	2	-3 %	-14
Hämeenlinnanväylä etelään	5,7	529	516	5,7	637	2	19 %	108
Hämeenlinnanväylä pohjoiseen	5,8	397	397	5,8	401	2	1 %	5
Vihdintie etelään	7,6	1135	1112	8,0	939	2	-19 %	-196
Vihdintie pohjoiseen	7,6	883	916	7,9	609	2	-37 %	-274
Turuntie itään	4,4	569	521	4,5	504	3	-12 %	-65
Turuntie länteen	4,4	617	513	4,5	472	3	-27 %	-145
Viikintie itään	4,0	364	385	4,0	497	4	31 %	133
Viikintie länteen	4,1	417	431	4,3	534	4	25 %	117
Hämeenkyliäntie etelään	2,6	495	493	3,1	551	5	11 %	56
Hämeenkyliäntie pohjoiseen	2,9	421	420	3,3	534	5	24 %	113
Lauttasaarentie itään	1,8	337	334	1,7	248	5	-30 %	-88
Lauttasaarentie länteen	1,7	309	312	1,7	243	5	-24 %	-66
Hakamäentie länteen	1,6	162	169	1,7	161	3	-1 %	-1
Hakamäentie itään	1,6	187	169	1,7	156	3	-18 %	-31
Kehä I itään	3,5	296	285	3,4	278	2	-6 %	-18
Albertinkatu etelään	0,8	176	174	0,8	201	5	13 %	25
Fredrikinkatu pohjoiseen	0,8	273	262	0,7	145	5	-61 %	-128
Porkkalankatu itään	0,8	158	151	1,0	142	9	-11 %	-16
Lansiväylä itään	4,2	180	229	4,2	303	6	51 %	123
Mannerheimintie pohjoiseen	1,8	349	329	1,9	243	9	-36 %	-106
Mannerheimintie etelään	1,5	351	308	1,5	196	9	-57 %	-155
Makelankatu etelään	2,7	497	507	2,7	365	9	-31 %	-132
Kehä I etelään	2,0	156	166	2,0	150	7	-4 %	-6
Kehä I pohjoiseen	2,2	135	131	2,2	165	7	20 %	30

Testauksen päätelmät

Testimenetelmää kokeiltiin nyt laajemmassa mittakaavassa ensimmäistä kertaa ja suuri osa testauksen kehittämisestä kohdistui sopivien tunnuslukujen ja niiden hyödyntämisen soveltamiseen. Testauksella haluttiin tutkia, onko mallin selittävyyden muutoksia mahdollista tarkkailla päivitysprosessin kuluessa.

Testauksessa käytettiin tarkoituksella monia vertailuarvoja, jotta voidaan tutkia myös vertailuarvojen vahvuuksia ja heikkouksia. Mahdollisuuksien mukaan testaukseen etsittiin vertailuarvoja, joille on olemassa vertailupohjaa myös muista vastaavista malleista. Erilaiset mittarit osoittautuivat hyödyllisiksi tapauskohtaisesti. Esimerkiksi joukkoliikenteen matka-aikojen osalta kaivattiin tietoa eri

funktioluokkien ja bussikaistojen matka-ajoista, jolloin virheiden jakaumien tarkastelu osoittautui hyödylliseksi. Toisaalta autoliikenteen matka-ajoille vastaava tarkastelu ei toiminut toivotun laisesti.

Testauksessa käytetty suure "GEH" on kehitetty kuvaamaan sekä suhteellista että absoluuttista eroa mallien välillä. HSL:n verkon mittakaavaan kansainvälisten esimerkkien suositusraja-arvot ovat liian tiukkoja. Tämä johtuu siitä, että verkon liikennemäärät ja mittakaava ovat suurempia. Se, kuinka tarkasti liikennemallin halutaan kalibroida kuvaamaan nykytilanteen kysyntää, on riippuvainen sen käyttötarkoituksesta. Ei välttämättä ole mielekästä tavoitella näin tiukat raja-arvot täyttävää nykytilanteen kuvausta. Koska kyseessä on yksi harvoista vertailuaineistoa tarjoavista mittareista, kannattaa myös GEH arvojen kehitystä jatkossa tarkastella.

Kun edellä esitettyä testausmenettelyä toistettiin liikenneverkkojen kuvausten päivitystyön yhteydessä, tuli selväksi, että verkkomalli on suhteellisen hyvä kuvaus todellisesta liikennejärjestelmästä, eikä pelkästään verkkoa muokkaamalla mallin selittävyttä saada yleisellä tasolla parannettua. Joitain erityiskohteita testausmenetelmän vertailu sen sijaan nosti esille, millä on myös pieniä verkollisen mittakaavan vaikutuksia (esim. Vihdintien nopeustaso, bussikaistojen nopeusfunktiot).

Verkon korjauksia tai päivitystä huomattavasti suurempi vaikutus selittävyyteen on kysyntämallilla. Tilastollinen testaaminen kannattaisi ainakin jossain määrin ulottaa myös kysyntämallin selittävyyden testaamiseen malleja kehitettäessä. Mielekkäiden raja-arvojen määrittely on tapauskohtaista ja riippuvaisia mallin käyttötarkoituksesta.

Menetelmä ja tulosten tulkinta ovat osa Atte Supposen Aalto-yliopistolle tekemää erikoistyötä (Supponen 2013).

6 Vastusmatriisien käsittely

Sijoittelujen jälkeen joukkoliikenteen vastusmatriiseja muokattiin ennen ennustepankkiin siirtämistä.

6.1 Odotusajan vaimennus

Jos linjan vuoroväli on suuri, laskennallinen odotusaika kasvaa suureksi. Todellisuudessa matkustaja odottelee siinä tilanteessa mieluummin muualla kuin pysäkillä. Niinpä ensimmäistä odotusai-
kaa ja sen myötä muitakin aikavastuksia korjattiin.

Ensimmäistä odotusai-
kaa vaimennettiin siten, että se korvattiin arvolla

$$vaim_1odo = (1odo * 5/3)^{0,8}$$

missä

$vaim_1odo$ = vaimennettu 1. odotusaika
 $1odo$ = joukkoliikennesijoittelun tuottama 1. odotusaika.

Koska 1. odotusaika on osa kokonaisodotusai-
kaa, vastaava korjaus tehtiin myös siihen

$$vaim_kokodo = kokodo - 1odo + (1odo * 5/3)^{0,8}$$

missä

$vaim_kokodo$ = vaimennettu kokonaisodotusaika
 $kokodo$ = joukkoliikennesijoittelun tuottama kokonaisodotusaika.

Myös painottamatonta ja painotettua kokonaisai-
kaa oli korjattava vastaavasti.

$$vaim_kokaik = ajoaik + kavaik + vaim_kokodo + nouaik$$

$$vaim_pkokaik = ajoaik + 1,5 * kavaik + 1,5 * vaim_kokodo + nouaik$$

missä

$vaim_kokaik$ = vaimennettu painottamaton kokonaisaika
 $vaim_pkokaik$ = vaimennettu painotettu kokonaisaika
 $vaim_kokodo$ = vaimennettu kokonaisodotusaika
 $ajoaik$ = joukkoliikennesijoittelun tuottama ajoaika
 $kavaik$ = joukkoliikennesijoittelun tuottama syöttö- ja vaihtokävelyaika
 $nouaik$ = joukkoliikennesijoittelun tuottama nousuaika.

6.2 Sisäiset vastukset ja aggregoinnit

Verkon kuvauksissa kukin osa-alueen keskussolmu (sentroidi) edustaa kokonaista kaupunginosaa tai muuta aluetta. Sijoittelu tuottaa vastukset alueilta kaikille muille alueille. Sen sijaan kunkin alueen sisäisiä matkoja ei käsitellä, joten alueiden sisäiset vastukset ovat nollia. Siksi sisäiset vastukset on laskettava erikseen.

Joukkoliikenteen kuvauksissa kullekin sijoittelualueelle laskettiin keskiarvo kahdesta luvusta: pienin kokonaisaika ko. alueelta kaikille muille alueille matkustettaessa ja vastaava arvo alueelle saapuvista. Saatu keskiarvo laitettiin sijoittelualuejaon matriisin lävistäjälle ennen aggregointia ennustealuejakoon. Näin nollat eivät ole mukana vääristämässä aggregointia. Autoliikenteen matriiseille vastaavaa täydennystä ei tehty.

Aika-, etäisyys- ja ruuhkamaksumatriisien aggregointi ennustealuejakoon tehtiin kertomalla sijoittelu-aluejaossa oleva matriisi jakolukuvektoreilla, joiden laskentaa on kuvattu kysyntämalliraportin Pastinen ym. 2016 luvussa 4.7.

Näin saatiin tulokseksi jakoluvuilla painotettu keskiarvo, joka on parempi kuin suora (painottamaton) keskiarvo, mutta toisaalta kuitenkin vakaampi kuin painottaminen joka kierroksella muuttuvilla matkamatriiseilla.

Luettaessa ennustealuejaossa olevia vastusmatriiseja kysyntämallien lähtötiedoiksi edellä laskettuja arvoja ei kuitenkaan käytetty sellaisenaan, vaan lävistäjällä olevat arvot eli ennustealueiden sisäiset vastukset korvattiin uusilla arvoilla kysyntämalliraportin Pastinen ym. 2016 kohdassa 6.3 kuvatulla tavalla. Myös hyvin suuria ja hyvin pieniä vastusarvoja muutettiin.

Lähdeluettelo

Blummé, Juho; Holm, Markus; Keränen, Matti & Särkkä, Tapani (2008). *Pääkaupunkiseudun ja sen työssäkäyntialueen Emme-kuvausten teko*. Julkaisematon muistio 28.10.2008. Matrex Oy & Trafix Oy.

Elolähde, Timo (2003). *Liikennejärjestelmämallit 2000*. Osa E julkaisussa *Pääkaupunkiseudun liikenne-ennustemallit 2000*. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2003:9. YTV pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta, Helsinki.

Elolähde, Timo; Blummé, Juho; Holm, Markus; Keränen, Matti & Pesonen, Hannu (2011). *Liikennejärjestelmämallit*. Osa C julkaisussa *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustemallit 2010*. HSL:n julkaisuja 33/2011, Helsinki.

Holm, Markus; Keränen, Matti & Blummé, Juho (2009). *Pääkaupunkiseudun ja sen työssäkäyntialueen EMME-verkkokuvauksen jatkotyön muistio 10/2008–2/2009 ja ohjeita verkon käyttäjille*. Julkaisematon muistio 10.2.2009. Trafix Oy.

Holm, Markus; Supponen, Atte & Keränen, Matti (2013). *HSL liikenneverkkojen ATK-kuvausten päivittäminen 2012*. Julkaisematon muistio 28.3.2013. Trafix Oy.

HSL (2015). *Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelma HLJ 2015*. HSL:n julkaisuja 3/2015.

HSL (2016). *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän kysyntämallit 2014*. HSL:n julkaisuja 21/2016, Helsinki.

INRO Consultants Inc. (1998). *EMME/2 User's Manual, Software Release 9*. Montreal 1998.

Keränen, Matti (2009). *Vastusten laskenta*. Julkaisematon muistio 13.5.2009, Trafix Oy.

Keränen, Matti; Holm, Markus & Lindholm, Sakari (2009a). *HST ennusteverkko 2030*. Julkaisematon muistio 24.8.2009. Trafix Oy

Keränen, Matti & Pesonen, Hannu (2011). *Liikennejärjestelmän viivytysfunktiot*. Osa D julkaisussa *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustemallit 2010*. HSL:n julkaisuja 33/2011, Helsinki.

Keränen, Matti; Voltti, Ville & Holm, Markus (2009b). *Esiselvitys raidevastusten laatimisesta pääkaupunkiseudun työssäkäyntialueelle*. Julkaisematon muistio 24.3.2009, Trafix Oy & Linea Konsultit Oy

Pastinen, Virpi; Rantala, Annika; Lehto, Hannu; Tuovinen, Samuel; Leppänen, Paula; Pesonen, Hannu; Rinta-Piirto, Jyrki; Moilanen, Paavo; Rahiala, Antti; Kurri, Jari; Elolähde, Timo & Rätty, Pekka (2011). *Henkilöliikennemallit (HELMET)*. Osa A julkaisussa *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustemallit 2010*. HSL:n julkaisuja 33/2011, Helsinki.

Pastinen, Virpi; Rantala, Annika; Pesonen, Hannu; Rinta-Piirto, Jyrki; Moilanen, Paavo; Rahiala, Antti; Elolähde, Timo & Rätty, Pekka (2016). *Henkilöliikennemallit (HELMET 2.1)*. Osa A julkaisussa *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän kysyntämallit 2014*. HSL:n julkaisuja 21/2016, Helsinki.

Pesonen, Hannu; Rahiala, Antti; Salomaa, Osmo & Laakso, Seppo (2012). *HLJ 2011 -skenaariot ja liikenne-ennusteet*. HSL:n julkaisuja 24/2012.

Rahiala, Antti; Pesonen, Hannu ja Rinta-Piirto, Jyrki (2017). *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liityntäpysäköintimallit 2016*. HSL:n julkaisuja xx/2017.

Rantala, Annika & Elolähde, Timo (2015). *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän (runkona HELMET 2.1) tekninen raportti*. Julkaisematon muistio 13.1.2015.

Supponen, Atte (2013). *Validating the assignment model of HSL Traffic Forecasting System*. Erikoistyö, Aalto yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu.

Liite 1. Ulkosyöttöjen numerointi.

Taulukko 37. Autoverkon ulkosyötöt (solmunumeroon lisättävä 39000).

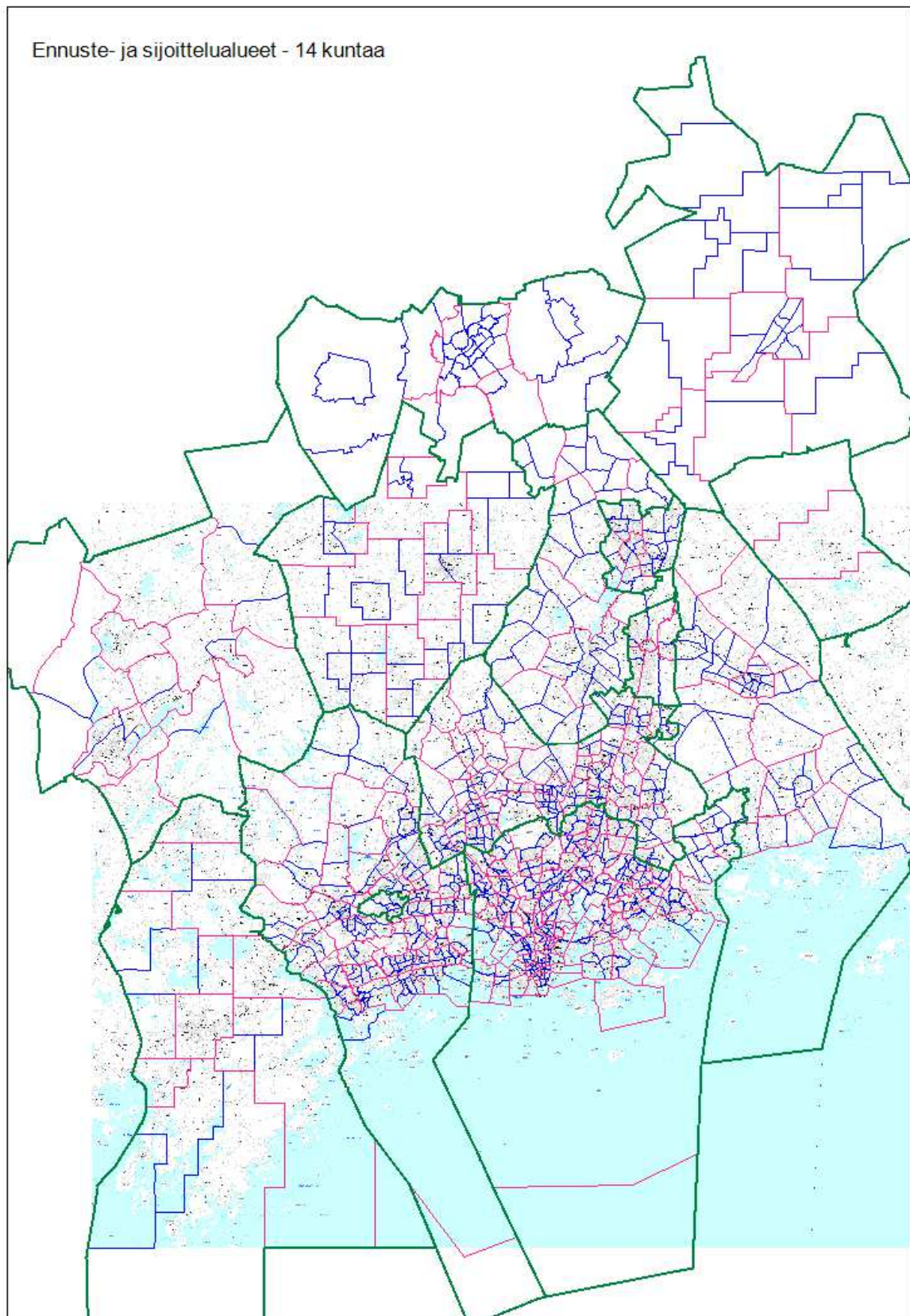
Solmunumero	Tienumero	2. Tienumero, jos tarpeellista	Tieosa (t) / kohdat	Solmu, johon syöttö liittyy	Solmu, johon syöttö liittyy
1	52	1011	5 / 3	163758	
2	186		9	138684	
3	1873		3	138732	
4	11085		1	138824	184840
5	Uusi 1 tie			184858	
6	Vanha 1 tie		16	142290	
7	11101		2	142322	
8	280		5	142443	
9	11161		1	142587	
10	2825	2	1 / 18	142413	
11	2824		5	70063	
12	2871		4	80688	
13	54		3	79582	
14	2873		1	250814	
15	2875		1	93237	
16	130		12	93247	92275
17	3		112	92853	
18	2891		1	93066	
19	290		7	88913	
20	13826	13849	1	87123	
21	54		14	88863	
22	13816		1	88172	
23	295		3	117784	
24	140		17	230801	
25	164		2	187615	
26	11769		1	231029	
27	11770		1	188937	
28	11801		1	109390	
29	1635		9	119766	
30	167		10	45685	
31	172		4	96171	
32	174	1734	4/1	96075	
33	6		120	47039	
34	176		2	48098	
35	7		22	52823	
36	4		115	208153	

Taulukko 38. Rautatieverkon ulkosyötöt.

solmunumero	solmu, johon syöttö liittyy	aseman nimi
39300	250811	Salo
39301	250814	Hämeenlinna
39302	250821	Lahti

Liite 2. Sijoittelu- ja ennustealueet.*Taulukko 39. Sijoittelu- ja ennustealueiden koodit ja määrät.*

kunnan nimi	kela-koodi	sijoittelualueet M2008		sijoittelualueet M2013 (vain erot)		ennustealueet M2008		ennustealueet M2013 (vain erot)	
		numerot	lkm	numerot	lkm	numerot	lkm	numerot	lkm
Helsinki	091	1000...1274	275			101...174	74		
Espoo	049	2000...2171	172			201...238	38		
Kauniainen	235	3000...3004	5			301	1		
Vantaa	092	4000...4158	159			401...437	37		
pks-kunnat yht.	4		611		611		150		150
Kirkkonummi	257	5000...5016	17			501...508	8		
Vihti	927	6000...6020	21			601...612	12		
Nurmijärvi	543	7000...7037	38			701...710, 712	11		
Tuusula	858	8000...8043	44			801...808	8		
Kerava	245	9000...9009	10			901...905	5		
Järvenpää	186	10000...10024	25			1001...1005	5		
Sipoo	753	11000, 11011,	54	11000	54	1101, 1103,	10	1101, 1103,	11
		11002...11008,		11003...11005		1105...1112		1105...1113	
		11013...11057		11007, 11011					
				11013...11029					
				11031...11061					
Mäntsälä	505	12000...12032	33			1201...1207	7		
Hyvinkää	106	13000...13034	35			1301...1305	5		
Pornainen	611	14000...14002	3			1401...1403	3		
muu seutu yht.	10		280		280		74		75
Hanko	078	15000...15007	8			1501	1		
Tammisaari	835	16000...16006	7			1601, 1602	2		
Pohja	606	17000...17007	8			1701	1		
Karjaa	220	18000...18005	6			1801, 1802	2		
Karjalohja	223	19000...19005	6			1901	1		
Inkoo	149	20000...20007	8			2001...2003	3		
Lohja	444	21000...21028	29			2101...2106	6		
Sammatti	737	22000...22004	5			2201	1		
Nummi-Pusula	540	23000...23014	15			2301	1		
Siuntio	755	24000...24007	8			2401...2403	3		
Karkkila	224	25000...25010	11			2501	1		
Loppi	433	26000...26003	4			2601	1		
Riihimäki	694	27000...27009	10			2701, 2702	2		
Hausjärvi	086	28000...28003	4			2801	1		
Pukkila	616	29000	1			2901	1		
Askola	018	30000...30002	3			3002	1		
Porvoo	638	31000...31019	20			3101...3108	8		
Myrskylä	504	32000	1			3201	1		
Pernaja	585	33000...33002	3			3301	1		
Liljendal	424	34000	1			3401	1		
Lapinjärvi	407	35000...35003	4			3501	1		
Ruotsinpyhtää	701	36000, 36001	2			3601	1		
Loviisa	434	37000	1			3701	1		
muut kunnat yht.	23		165		165		42		42
kaikki yhteensä	37		1056		1056		266		267



Kuva 23. Ennuste- ja sijoittelualueet Helsingin seudulla.

Viivytysfunktioiden vertailu



Tiivistelmä

Työssä tutkittiin autoliikenteen viivytysfunktioita ja selvitettiin neljän funktiojoukon sijoitteluominaisuuksia järjestelmätasolla, linkeittäin ja valituilla yhteysväleillä, mm. matka-aikojen, -nopeuksien ja liikennemäärien avulla. Funktioiden suora vaikutus liikennemalliin ja ennusteisiin oli toinen selvityksen aihe. Työn tuloksena saatiin käsitys eri funktioiden ominaisuuksista ja suositus HELMET-mallissa käytettävistä sijoittelufunktioista. Myös jatkotutkimustarpeista annettiin suositus.

Tutkitus vaihtoehdot olivat: 1) HSL:n alkuperäiset Davidsonin tyyppiset funktiot, joissa matka-aika on ylikysyntätilanteessa riippumaton linkin pituudesta, 2) leikatut funktiot, joissa keskinopeus linkillä on vähintään 30 % vapaasta nopeudesta, 3) alkuperäisten kaltaiset Davidsonin tyyppiset funktiot, joissa matka-aika riippuu linkin pituudesta myös ylikysyntätilanteessa ja 4) pituusriippuvaisiin funktioihin sovitettut konikaalifunktiot, jotka ovat matemaattisesti yksinkertaisempia ja tyylikkäämpiä mm. koska niiden derivaatassa ei ole epäjatkuvuuskohtaa.

Sijoittelun tuloksena saatavat matka-ajat riippuvat siitä, minkälaisia funktioita käytetään. Tästä seuraa, että myös aikakustannuksissa on eroa, mikä voi joissakin tapauksissa vaikuttaa siihen, mikä tutkittavista skenaariovaihtoehdoista osoittautuu parhaaksi.

Työn yhteydessä todettiin, että alkuperäisiä funktioita käytettäessä sijoittelun tasapainon löytäminen vaatii huomattavasti enemmän iteraatiokierroksia kuin muut funktiotyypit. Ruuhkautuneessa tilanteessa tulos riippuu siitä, kuinka monta lyhyttä linkkiä kullekin liittymävälille on koodattu. Käytettäessä leikattuja funktioita pääväylille ohjautuu sijoittelussa enemmän liikennettä kuin muilla funktiotyypeillä. Kun keskinopeus on laskenut 30 prosenttiin vapaasta nopeudesta, matka-ajat eivät enää kasva, vaan väylille mahtuu edelleen uutta liikennettä. Siksi leikattuja funktioita ei pidä käyttää. Pituusriippuvaiset ja konikaalifunktiot antavat hyvin samanlaisia tuloksia. Tulokset eivät riipu siitä, kuinka moneksi linkiksi kukin liittymäväli on pilkottu.

Sammandrag

I den här delen...

Abstract

In this part...

Sisällysluettelo

Liiteluettelo	6
Kuvaluettelo	7
Taulukkuuettelo	10
1 Lähtökohdat, tavoitteet ja raja	11
2 Verkot ja matriisit	11
3 Viivytysfunktio	12
3.1 Periaate	12
3.2 HELMET-mallin alkuperäiset funktio	14
3.3 HELMET-mallin leikatut funktio	15
3.4 Pituusriippuvaiset funktio	17
3.5 Sovelletut konikaalifunktio	18
4 Analyysit	21
4.1 Systeemitaso	21
4.2 Verkkotaso	26
4.3 Yhteysväleittäinen analyysi	35
4.4 Sijoittelun vakaus tasapainotilanteessa	36
4.5 Matka-aikamatriisien vakaus tasapainotilanteessa	37
4.6 Sijoittelutulosten vertailu funktiotyypeittäin	39
5 Johtopäätökset	40
6 Suositukset	42
Lähdeluettelo	43

Liiteluettelo

Liite 1. Konikaalifunktioiden sovitukset	44
Liite 2. Ajonopeus-, suorite- ja liikennemäärävertailua	47
Liite 3. Verkkotason analyysit – hajontakuvaajat	50
Liite 4. Matka-aikajakaumien vertailu	58
Liite 5. Funktiotyypit, aika-liikennemääräkuvaajat	62
Liite 6. Tarkastelussa käytetyt yhteysvälit	64
Liite 7. Matka-ajat sijoittelussa yhteysväleittäin	65
Liite 8. Matka-aikojen heilahtelu	69
Liite 9. Yhden iteraatioaskeleen vaikutus	72
Liite 10. Liikennemäärien ja nopeuksien vertailu funktioiden välillä	76
Liite 11. Hitausluku	78
Liite 12. Katkaisukriteerit sijoitteluissa	81
Liite 13. Matka-aikamatriisien vakaus tasapainotilanteessa	82
Liite 14. Tarkastellut funktio	87
Liite 15. Liikenne-ennustejärjestelmässä käytetyt autoliikenteen viivytysfunktio	90

Kuvaluettelo

Kuva 1. Punaisella linkit, joilla leikkuri on käytössä nykytilanteen liikennemäärillä ja –verkolla.	16
Kuva 2. Matka-aika-kuormituskuvaaja pituusriippuvaiselle- ja konikaalifunktiolle väylätyypillä 4 (f_d = pituusriippuvainen, f_c = konikaali).	19
Kuva 3. Keskinopeus-kuormituskuvaaja pituusriippuvaiselle- ja konikaalifunktiolle väylätyypillä 4 (f_d = pituusriippuvainen, f_c = konikaali).	19
Kuva 4. Ajokustannukset funktioittain (miljoonaa euroa / vuosi), worst case.	22
Kuva 5. Ajokustannukset eri skenaarioissa funktioittain (miljoonaa euroa / vuosi).	23
Kuva 6. Ajokustannushyödyt koko systeemissä.	23
Kuva 7. Miniminopeudet funktiotyypeittäin, worst case.	24
Kuva 8. Keskinopeudet funktiotyypeittäin, worst case.	24
Kuva 9. Maksimiliikennemäärät funktiotyypeittäin, worst case.	25
Kuva 10. Punaisella linkit, joilla leikkuri on käytössä worst case –skenaariossa.	25
Kuva 11. Liikennemäärien erotuskuva, Leikatut funktiot – alkuperäiset funktiot. Aht35 nykyverkolla.	26
Kuva 12. Liikennemäärien erotuskuva, Pituusriippuvaiset funktiot - konikaalifunktiot. Aht35 nykyverkolla.	27
Kuva 13. Liikennemäärien erotuskuva, konikaalifunktiot – alkuperäiset funktiot. Aht35 nykyverkolla.	28
Kuva 14. Linkkien liikennemäärien vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla leikatut funktiot [ajon/h].	29
Kuva 15. Linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla leikatut funktiot [km/h].	30
Kuva 16. Linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla pituusriippuvaiset funktiot [km/h].	31
Kuva 17. Linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailu: X-akselilla Pituusriippuvaiset funktiot, Y-akselilla konikaalifunktiot. [km/h].	32
Kuva 18. Linkkikohtaisten matka-aikojen vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla leikatut funktiot [min].	33
Kuva 19. Linkkikohtaisten matka-aikojen vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla konikaalifunktiot (min).	34
Kuva 20. Linkkikohtaisten matka-aikojen vertailu: X-akselilla Pituusriippuvaiset funktiot, Y-akselilla konikaalifunktiot (min).	34
Kuva 21. Mitattujen ajoaikojen minimi ja maksimi, sekä mallinnetut ajoajat reiteittäin.	36
Kuva 22. Eräiden yhteysvälien matka-ajat tasapainotilanteessa (matka-aikamatriiseissa).	37
Kuva 23. Eräiden yhteysvälien matka-aikojen (11 peräkkäistä iteraatiokierrosta) keskihajonta eri funktiotyypeillä sijoittelujen tasapainotilanteen saavuttamisen jälkeen.	38
Kuva 24. Alkuperäisten funktioiden peräkkäisten iteraatioiden (472...482) matka-aikojen vakaussijoittelun tasapainotilanteessa.	38
Kuva 25. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $v_{df} = 1$, f_c = konikaalifunktio, f_d = pituusriippuvainen funktio.	44
Kuva 26. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $v_{df} = 2$, f_c = konikaalifunktio, f_d = pituusriippuvainen funktio.	45
Kuva 27. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $v_{df} = 3$, f_c = konikaalifunktio, f_d = pituusriippuvainen funktio.	45

Kuva 28. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $v_{df} = 4$, f_c = konikaalifunktio, f_d = pituusriippuvainen funktio.	46
Kuva 29. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $v_{df} = 5$, f_c = konikaalifunktio, f_d = pituusriippuvainen funktio.	46
Kuva 30. Miniminopeudet funktioittain.	47
Kuva 31. Keskinopeudet funktioittain.	47
Kuva 32. Maksiminopeudet funktioittain.	48
Kuva 33. Aikasuoritteet funktioittain.	48
Kuva 34. Matkasuoritteet funktioittain.	48
Kuva 35. Keskimääräiset liikennemäärät funktioittain.	49
Kuva 36. Maksimiliikennemäärät funktioittain.	49
Kuva 37. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla leikatut funktiot [ajon/h].	50
Kuva 38. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla pituusriippuvaiset funktiot [ajon/h].	51
Kuva 39. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [ajon/h].	51
Kuva 40. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla leikatut funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [ajon/h].	52
Kuva 41. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla pituusriippuvaiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [ajon/h].	52
Kuva 42. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla leikatut funktiot [km/h].	53
Kuva 43. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla pituusriippuvaiset funktiot [km/h].	53
Kuva 44. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [km/h].	54
Kuva 45. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla leikatut funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [km/h].	54
Kuva 46. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla pituusriippuvaiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [km/h].	55
Kuva 47. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla leikatut funktiot (min).	55
Kuva 48. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla pituusriippuvaiset funktiot (min).	56
Kuva 49. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot (min).	56
Kuva 50. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla leikatut funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot (min).	57
Kuva 51. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla pituusriippumattomat funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot (min).	57
Kuva 52. Matka-aikajakaumien vertailu, alkuperäiset ja leikatut funktiot.	58
Kuva 53. Matka-aikajakaumien vertailu, alkuperäiset ja pituusriippuvaiset funktiot.	59
Kuva 54. Matka-aikajakaumien vertailu, alkuperäiset ja konikaalifunktiot.	59
Kuva 55. Matka-aikajakaumien vertailu, leikatut ja pituusriippuvaiset funktiot.	60
Kuva 56. Matka-aikajakaumien vertailu, leikatut ja konikaalifunktiot.	60
Kuva 57. Matka-aikajakaumien vertailu, pituusriippuvaiset ja konikaalifunktiot.	61

Kuva 58. Aika-liikennemääräkuvaaja, vdf = 3, ul1 = 1250, ul2 = 54, length = 0.3.	62
Kuva 59. Aika-liikennemääräkuvaaja, vdf = 3, ul1 = 1250, ul2 = 54, length = 1.	63
Kuva 60. Aika-liikennemääräkuvaaja, vdf = 3, ul1 = 1250, ul2 = 54, length = 3.	63
Kuva 61. Tarkasteluissa käytetyt mittausreitit.	64
Kuva 62. Matka-ajat reitillä Kehä I (itään). Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	65
Kuva 63. Matka-ajat reitillä Kehä I (länteen). Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	66
Kuva 64. Matka-ajat reitillä Hämeenlinnanväylä. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	66
Kuva 65. Matka-ajat reitillä Mannerheimintie. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	67
Kuva 66. Matka-ajat reitillä Kehä III (länteen) . Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	67
Kuva 67. Matka-ajat reitillä Turunväylä. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	68
Kuva 68. Matka-ajat reitillä Kustaa-Vaasantie - Mechelininkatu. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.	68
Kuva 69. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, alkuperäiset funktiot, 2012 matriisi.	70
Kuva 70. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, leikatut funktiot, 2012 matriisi.	70
Kuva 71. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, pituusriippuvaiset funktiot, 2012 matriisi.	70
Kuva 72. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, konikaalifunktiot, 2012 matriisi.	70
Kuva 73. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, alkuperäiset funktiot, 2035 matriisi.	71
Kuva 74. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, leikatut funktiot, 2035 matriisi.	71
Kuva 75. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, pituusriippuvaiset funktiot, 2035 matriisi.	71
Kuva 76. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, konikaalifunktiot, 2035 matriisi.	71
Kuva 77. Liikennemäärien erotus, kierros 15..16, alkuperäiset funktiot.	72
Kuva 78. Liikennemäärien erotus, kierros 30..31, alkuperäiset funktiot.	73
Kuva 79. Liikennemäärien erotus, kierros 100..101, alkuperäiset funktiot.	73
Kuva 80. Liikennemäärien erotus, kierros 15..16, pituusriippuvaiset funktiot.	74
Kuva 81. Liikennemäärien erotus, kierros 30..31, pituusriippuvaiset funktiot.	74
Kuva 82. Liikennemäärien erotus, kierros 100..101, pituusriippuvaiset funktiot.	75
Kuva 83. Liikennemäärien erotus (leikatut funktiot - alkuperäiset funktiot).	76
Kuva 84. Liikennemäärien erotus (konikaalifunktiot - alkuperäiset funktiot).	77
Kuva 85. Liikennemäärien erotus (pituusriippuvaiset funktiot - alkuperäiset funktiot).	77
Kuva 86. Hitausluku linkeittäin, alkuperäiset funktiot.	78
Kuva 87. Hitausluku linkeittäin, leikatut funktiot.	79
Kuva 88. Hitausluku linkeittäin, konikaalifunktiot.	79
Kuva 89. Hitausluku linkeittäin, pituusriippuvaiset funktiot.	80
Kuva 90. Vasemmalla Best relative gap ja oikealla Normalized gap - alkuperäiset funktiot.	81
Kuva 91. Vasemmalla Best relative gap ja oikealla Normalized gap – konikaalifunktiot.	81
Kuva 92. Vasemmalla Best relative gap ja oikealla Normalized gap - Pituusriippuvaiset funktiot.	81
Kuva 93. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, alkuperäiset funktiot.	82
Kuva 94. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, leikatut funktiot.	82

Kuva 95. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, pituusriippuvaiset funktiot.	83
Kuva 96. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, konikaalifunktio.	83
Kuva 97. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, alkuperäiset ja leikatut funktiot.	84
Kuva 98. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, alkuperäiset ja pituusriippuvaiset funktiot.	84
Kuva 99. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, alkuperäiset ja konikaalifunktio.	85
Kuva 100. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, leikatut ja pituusriippuvaiset funktiot.	85
Kuva 101. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, leikatut ja konikaalifunktio.	86
Kuva 102. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, pituusriippuvaiset ja leikatut funktiot.	86

Taulukkuuettelo

Taulukko 1. Sijoittelujen tunnuslukuja (iteraatiot max 200, gapit 0,001; 0,001).	21
Taulukko 2. Sijoittelujen tunnuslukuja (iteraatiot max 200, gapit 0,01; 0,01).	21
Taulukko 3. Systeemitason tunnuslukuja.	22
Taulukko 4. Mitatut ja mallinnetut ajoajat reiteillä.	35
Taulukko 5. Tunnuslukuja matka-aikamatriisien vakauden tarkastelusta.	37
Taulukko 6. Autoliikenteen viivytysfunktioiden parametrit funktioluokittain.	90

1 Lähtökohdat, tavoitteet ja raja

Työn lähtökohtana oli HSL:n liikenne-ennustejärjestelmässä havaittu ongelma, joka liittyi prosessin suppenemiseen (tarkemmin sanottuna kulkutapajakauman heilahteluun parillisten ja parittomien iteraatiokierrosten välillä), kun käytettiin malliraportissa (Keränen & Pesonen 2011) kuvattuja viivytysfunktioita. Ongelma oli pyritty ratkaisemaan vastusfunktioiden "leikkaamisella" siten, että linkin matkanopeus ei voi laskea alle 30 prosentin vapaasta nopeudesta. Ratkaisu toimi, mutta oli heuristinen ja brutaali. Voitiin kysyä miksi 30 prosenttia, miksei 20 prosenttia tai 35 prosenttia? Käytettäviä vastusfunktioita oli tämän takia syytä tutkia lisää.

Työn tavoitteena oli monipuolisesti ja riittävällä tarkkuudella selvittää neljän funktiojoukon (HSL:n alkuperäiset, leikatut, pituusriippuvaiset ja konikaalifunktiot) sijoitteluominaisuuksia järjestelmätasolla, linkeittäin ja valituilla yhteysväleillä, mm. matka-aikojen, -nopeuksien ja liikennemäärien avulla. Funktioiden suora vaikutus liikennemalliin ja ennusteisiin oli toinen selvityksen aihe. Työn tuloksena saatiin käsitys eri funktioiden ominaisuuksista ja suositus HELMET-mallissa käytettävistä sijoittelufunktioista. Myös jatkotutkimustarpeista on annettu suositus.

Vertailuun käytettiin Emme-ohjelmistoa (INRO 1998) sekä taulukkolaskentaohjelmia.

Sijoittelujen lopetuskriteereinä on käytetty suhteellisia ja absoluuttisia "gapejä", jotka saavutetaan tutkituilla funktiotyypeillä eri iteraatiomäärillä. Tällä on pyritty samaan tavoitteelliseen tarkkuuteen tasapainotilanteessa.

2 Verkot ja matriisit

Vertailussa on käytetty HSL:n uutta tarkistettua nykyverkkoa 2012 ja HLJ2011:n vuoden 2035 tavoitteellista ennusteverkkoa sekä niitä vastaavia uusia aamuhuipputunnin matriiseja. Sen lisäksi on laskettu ja verrattu väylähankkeiden laskennallisia hyötyjä worst case -skenaarion (vuoden 2035 kysyntä nykyverkolla) ja nykytilanteen välillä.

3 Viivytysfunktiot

3.1 Periaate

Tasapainosijoittelussa viivytysfunktiot ovat perusta, jonka pohjalta lasketaan matka-ajat ja joihin perustuu Emmessä tehtävä reitinvalinta (INRO 1998). Funktiot kuvaavat matka-ajan ja liikennemäärän välistä riippuvaisuutta. Tässä riippuvaisuussuhteessa oleellisin tekijä on linkin kapasiteetti, jolla tarkoitetaan suurinta liikennemäärää, joka voi mennä linkin läpi, yleensä tunnin aikana. Liikenneverkko koodataan siten, että linkin kapasiteetin määräävä piste on aina linkin loppupiste.

Jokaisella katu- ja tiejaksolla on omanlaisensa riippuvaisuus. Mallinnettaessa liikenneverkkoa pitäisi periaatteessa tuntea jokaisen linkin liikennemäärän ja matka-ajan välinen suhde. Käytännössä liikenneverkko on luokiteltu erityyppisiin väyläluokkiin, joille on määritetty viivytysfunktiot.

Käytännön matka-aika–liikennemäärämittauksissa on havaittu, että liikennevirran nopeus säilyy lähellä vapaan tilan nopeutta vielä hyvin suurilla liikennemäärillä. Kun liikennemäärät lähenevät kapasiteettia, laskevat nopeudet jyrkästi. Kun linkille saapuva liikennemäärä on kapasiteetissa, viivytyskyky romahtaa ja matka-ajat kasvavat. Tämän ilmiö tekee funktioista laakeita liikennemäärien ollessa selvästi kapasiteettia pienempiä ja nopeasti kasvavia lähellä sitä. Kapasiteetin ylittävillä liikennemäärillä funktion tehtävänä on lisätä kustannuksia linkkiä käyttäville virroille niin, että tasapainotilanteessa kapasiteettia ei enää ylitetä. Sijoittelussa tämä tarkoittaa sitä, että funktion laakeilla osilla suhteellisen suuretkin liikennemäärävaihtelut aiheuttavat vain pieniä muutoksia matka-aikoihin, mutta lähellä kapasiteettia pienetkin liikennemäärämuutokset aiheuttavat hyvin suuria matka-aikavaihteluita.

Tasapainosijoittelun kannalta edellä kuvattu voi aiheuttaa ongelmia sijoittelujen konvergoinnissa: toisilla funktioilla tarvitaan enemmän iteraatioita, toiset ovat tehokkaampia. Toisaalta mittaussaineistoon oikein sovitettut funktiot kuvaavat ruuhkautumisen vaikutuksia todenmukaisesti. Tasapainosijoittelu sinänsä ei voi kuvata tarkasti liikenteen ruuhkautumista, koska liikennevirrat sijoitellaan ”väkisin”, riippumatta siitä onko kapasiteettia vai ei. Hyvillä vastusfunktioilla saadaan kuitenkin riittäväällä tarkkuudella liikenteen matka-ajat liikennemalleja varten, etenkin jos liikenneverkon kapasiteetti riittää.

Käytettävillä funktioilla on olennainen merkitys liikenne-ennusteen tuloksiin ja sitä kautta liikennehankkeiden vaikutusten ja hyötyjen laskemisessa sekä hyöty-kustannussuhteen määrittämisessä.

Liikennemäärän ja matka-ajan riippuvaisuutta kuvaavissa funktioissa oleellisin tekijä on matka-aikojen käsittely, kun liikennemäärä ylittää linkin kapasiteetin. Tätä tilannetta ei voida mitata, mutta se on funktioiden tärkein ominaisuus. Siksi on aivan oleellista, että tämä ns. ylikysyntätilanne kuvataan funktioihin mahdollisimman oikealla tavalla. Tätä asiaa on tutkittu jo kauan ennen alkuperäisten HSL:n funktioiden kehittämistä (Keränen 1990). Kun liikennemäärät ovat pienempiä kuin linkin kapasiteetti, funktioiden sovittaminen havaintoaineistoon on yksinkertaista.

Ylikysyntää voidaan kuvata funktioissa kahdella tavalla. Ylikysynnän viivytys voi olla riippuvainen tai riippumaton linkin pituudesta. Ajatellaan yksittäistä katujaksoa, yhtä linkkiä. Tämän linkin kapasiteetti määräytyy linkin loppupisteen mukaan. Loppupisteen läpäisevä menevä liikennemäärä on vakio riippumatta siitä, kuinka pitkä linkki on. Siten linkillä jonottava liikenne liikkuu teorian mukaan

vakionopeudella, joka on täysin riippuvainen kapasiteettiarvosta. Siksi on teoreettisesti oikein määrittää sijoittelun viivytysfunktiot siten, että ne ovat ylikysynnän osalta pituusriippumattomia. Jos valitaan ylikysynnän osalta pituusriippuvaiset funktiot, niin tehdään oletus, että linkin pituus vaikuttaa linkin kapasiteettiin. Pituusriippuvaisilla funktioilla lyhyillä linkeillä mennään liian kovaa ja pitkillä linkeillä liian hiljaa.

Funktiot on tärkeää sovittaa mittausaineistoon. Funktioiden tehtävä on kuvata liikennemäärän ja matka-ajan riippuvaisuutta mahdollisimman todenmukaisesti myös ylikysyntätilanteen osalta. Ei voida ajatella, että funktiot kuvaavat epätodellisuutta. Mittausaineiston laatuun, johon funktiot sovitetaan, on oltava kriittisiä. Keskinopeus lasketaan linkin kulkemiseen tarvittavista matka-ajoista, ei piste kohtaisten nopeushavaintojen keskiarvona. Pistekohtaisia mittauksia voidaan käyttää täydentämään oikeita matka-aikamittauksia.

Mittaushavaintojen on oltava homogeenisia. Niiden on kuvattava liikennemäärien ja matka-aikojen riippuvaisuutta samanlaisissa olosuhteissa. Mittaukset on oltava peräisin hyvistä olosuhteista. Ne eivät saa sisältää lumisia, sateisia tai liukkaita olosuhteita. On myös tiedettävä, että mittausaineisto ei sisällä havaintoja, joissa on ollut häiriöitä, onnettomuuksia, tietöitä tai muita vastaavia liikennevirran käyttäytymiseen vaikuttaneita tekijöitä.

Voi tuntua, että edellä on liikaa korostettu funktioiden oikeellisuutta ja niiden estimoinnin tärkeyttä. Funktion kuitenkin ovat se tekijä, jonka perusteella hankkeita arvioidaan ja niiden kannattavuutta lasketaan. Jos funktiot ovat "sinnepäin", tuloksetkin ovat "sinnepäin"

Liikennemäärän ja matka-ajan riippuvaisuus ei muutu ajan mukaan. Ajoneuvot vievät tietyn tilan, joka on suhteellisen vakio ja kilometrille ei mahdu enempää ajoneuvoja, vaikka niiden tekniikka olisi ihan erilainen. Siten kehitettäessä viivytysfunktioita eteenpäin kannattaa hyödyntää myös vanhoja aineistoja.

On epävarmaa, voiko funktion muotoa muuttamalla parantaa HELMET-malliajojen suppenevuutta, ellei valita funktioita, jotka eivät kuvaa oikein ruuhkautumista. On mahdollista, että HELMET-mallien toiminnan takia pitää malliajojen syöttötietoina käytettävät vastukset laskea funktioilla, jotka ovat loivia ja jotka eivät tuota kovin suuria viivytyksiä. Lopulliset sijoittelut ennustetuilla kysyntämatriiseilla tehtäisiin "todellisilla" funktioilla. Etenkin, kun tehdään suoritepohjaisia analyysejä, on käytettävä funktioita, jotka tuottavat mahdollisimman todenmukaisia matka-aikoja. Hyöty-kustannussuhteiden määrittämisessä matka-ajoilla on hyvin suuri merkitys.

Funktioiden aika-liikennemääräkuvaajat on esitetty liitteessä 5. Funktiotyypeistä on käytetty seuraavia nimityksiä:

- Alkuperäiset funktiot – Alkuperäiset HSL mallityössä laaditut funktiot. Tällä hetkellä sijoittelussa käytössä olevat funktiot. Tarkempi selvitys funktioiden toiminnasta on luvussa 3.2.
- Leikatut funktiot – Alkuperäisten HSL mallityössä laadittujen funktioiden sovellus, joissa linkin matkanopeudet eivät voi laskea alle 30 prosentin vapaasta nopeudesta. Tällä hetkellä malliajoissa ja mallin estimoinnissa käytetyt funktiot. Tarkempi selvitys funktioiden toiminnasta on luvussa 3.3.
- Pituusriippuvaiset funktiot – Alkuperäisten HSL mallityössä laadittujen funktioiden kaltainen funktiosarja, joka huomioi linkin pituuden matka-ajan laskussa. Tarkempi selvitys funktioiden toiminnasta on luvussa 3.4.

- Konikaalifunktiot – pituusriippuvaisiin funktioihin sovitettut konikaalifunktiot. Tarkempi selvitys funktioiden toiminnasta on luvussa 3.5.

Funktioiden kaavat Emmen käyttämässä muodossa on esitetty liitteessä 14.

3.2 HELMET-mallin alkuperäiset funktiot

HELMET-mallityössä vuonna 2010 laadittiin liikennemäärän ja matka-ajan välistä riippuvaisuutta selittävät funktiot sekä ajoneuvosijoittelun että joukkoliikenteen sijoittelun tarpeisiin (Keränen & Pesonen 2011). Funktiot koodattiin Emme -ohjelmistoon.

Tuolloin kehitettiin aikaisemmin, jo vuonna 1990 laadittuja viivytysfunktioita (Keränen 1990). Alkuperäiset funktiot perustuivat kirjallisuustutkimukseen, jonka perusteella päädyttiin Davidsonin kehittämään matemaattiseen funktiomäärittelyyn. Davidsonin funktioilla on jonoteoreettinen tausta, joka tekee niistä hyvin soveltuvat liikennemäärän ja matka-ajan riippuvaisuuden kuvaamiseen. Niiden muoto on teoreettisesti hyväksyttävä, ne sopivat erityyppisille väylille ja niiden muotoa voidaan muokata monipuolisesti.

Suoraan Davidsonin kaavaan perustuvilla funktioilla on epäjatkuvuuskohta funktion kapasiteettipisteessä (viivytys menee siinä äärettömäksi). Tämän vuoksi Davidsonin kaavaan perustuvat funktiot tulee jakaa osiin ehtolausekkeita käyttäen. Ongelman korjaamiseksi alkuperäisiä funktioita kehitettäessä valittiin ylikysyntäsuoran alkupiste, joka on eri funktioille 0,81...0,975 kertaa linkin kapasiteetti. Ylikysyntäsuoran alkupistettä suuremmille liikennemäärille funktion kuvaaja on suora, jossa ei ole epäjatkuvuuskohtia. Davidsonin kaavan mukaisten funktioiden epäjatkuvuuskohtaan liittyvää ongelmaa on käsitelty samalla tavalla myös leikatuissa ja pituusriippuvaisissa funktioissa.

Alkuperäiset funktiot sovitettiin laajaan empiiriseen aineistoon. Havaintoaineistoa kerättiin pääkaupunkiseudulta, Tampereelta sekä Oulusta. Aineiston ongelmana oli ruuhkien vähäisyys vuoden 1989 tilanteessa.

Vuonna 2010 alkuperäistä funktiosarjaa yksinkertaistettiin ja funktioiden kuvausta laajennettiin maaseudun liikenneverkon osalta. Funktioiden muuttujat parametrisoitiin niin, että nyt linkeille koodataan parametreina vapaa nopeus ja kapasiteetti. Tämän ansiosta verkon koodaus toisaalta hankaloitui, kun linkkien osalta pitää olla enemmän tietoa, ja toisaalta monipuolistui, kun vapausasteita on enemmän. Laajennuksessa käytettiin hyödyksi aiempia Tielaitokselle kehitettyjä funktioita (Pesonen & Lahelma 1994). Kehitetyt funktiot ovat hyvin sovitettavissa erilaisille väylille. Linkkikohtaisten parametrien avulla voidaan hyödyntää erilaisia apumalleja tieverkon koodauksessa.

Liikenne-ennustejärjestelmässä käytetyt autoliikenteen viivytysfunktiot ja niiden parametrit ovat liitteen 15 taulukossa 6.

Funktioilla on selvä kapasiteettiraja, jota lähellä olevilla liikennemäärillä ajoneuvojen viivytykset kasvavat nopeasti. Ylikysyntäsuoran alkupisteen ylityksen jälkeen viivytysarvo kasvaa lineaarisesti. Funktioiden muoto kapasiteetin ylityksen jälkeen on suora, jonka sovituksessa on hyödynnetty aiemmin tehtyjä yksinkertaisia jonoteoreettisia viivytyslaskelmia. Ylikysyntäsuorien kulmakertoimet on määritetty funktioittain siten, että ne vastaavat suurin piirtein Davidsonin kaavan mukaisen funktion derivaattaa ylikysyntäsuoran alkupisteessä yhden kilometrin pituisella linkillä. Derivaatta on tar-

kalleen Davidsonin kaavan mukainen väylätyypeillä 1, 8 ja 10. Alkuperäisten funktioiden pituusriippumattomuuden takia kullakin väylätyypillä on yksi ominaispituus, jolla ylikysyntäsuoran alkupisteeseen ei muodostu taitepistettä. Tangenttipisteen määrittäminen on oleellisin asia funktioiden kehittämisessä. Periaatteena ylikysynnän käsittelyssä on määrittää yhden tunnin ajalta keskimääräinen viivytys eri liikennemäärillä.

Funktiolla on taipumus ohjata liikennettä pois ruuhkautuvista paikoista nopeasti kasvavan viivytysarvon seurauksena. Tämä vaatii entistä suurempaa tarkkuutta ja linkin ominaisuuksien tuntemusta verkkoa koodatessa. Kuormittuneessa tilanteessa yhteysvälin matka-aika on riippuvainen siitä, kuinka monen ja minkä mittaisen linkin avulla se on kuvattu, koska funktiot ovat pituusriippumattomia liikennemäärän kasvettua yli ylikysyntäsuoran alkupisteen. Alkuperäisten funktioiden matemaattinen kaava on esitetty kaavana (1), jossa

- T = autoliikenteen matka-aika
- L = linkin pituus
- v_0 = autoliikenteen vapaa nopeus
- J = parametri, joka vaikuttaa funktion kuvaajan muotoon liikennemäärän ollessa lähellä linkin kapasiteettia
- Q = liikennemäärä / kaista
- S = linkin kapasiteetti
- a, b = muotoparametreja
- k = ylikysyntäsuoran alkupisteen ja linkin kapasiteetin suhde ($k < 1$).

$$T = \begin{cases} \frac{L}{v_0} \left(1 + J \left(\frac{Q}{S-Q} \right) \right), & Q < k \cdot S \\ a \frac{L}{v_0} + b(Q - k \cdot S), & Q \geq k \cdot S \end{cases} \quad (1)$$

Joukkoliikenteen osalta luotiin uusi tapa sijoitteluihin. Bussien (ml. kaukoliikenteen linja-autojen) matka-ajat on sidottu ajoneuvosijoittelussa laskettuihin matka-aikoihin. Bussien matka-ajat lasketaan lisäämällä ajoneuvosijoittelun matka-aikaan väyläluokakohtainen vakioviivytys. Bussikaistaosuuksilla bussin nopeutena käytetään liikennemäärästä riippumatonta vakionopeutta.

Liikennevirrat sijoittuvat verkolle todellisen tuntuaisesti vastaten suhteellisen hyvin havaittuja määriä. Verkon hitaat kohdat vaikuttavat oikeilta. Vapaan nopeuden ja kapasiteetin koodaaminen linkkitiedoksi helpottaa verkon ominaisuuksien tarkempaa kuvausta sekä sijoittelujen jälkeistä analyysiä, mm. linkin kapasiteetin käyttöaste on helppo laskea.

3.3 HELMET-mallin leikatut funktiot

Vaikka HELMET-mallin alkuperäiset funktiot tuottavatkin sijoitteluissa verkolla todellisen tuntuisia liikennemääriä, malliprosessissa niihin liittyi ongelma. Kulikutapojen suhde heilahteli eikä konvergoinut niin kuin olisi haluttu. Tämä ongelma ratkaistiin kokemuseräisesti liittämällä alkuperäisiin funktioihin ehtolauseke: jos laskennallinen matkanopeus on linkillä pienempi kuin 30 prosenttia vapaasta nopeudesta, valitaan funktion arvoksi tuo raja-arvo.

Funktioiden matemaattinen kaava on muuten sama kuin kaava (1), mutta siihen on lisätty leikkuri kaavan (2) mukaisesti, jossa

- $T_{\max}$ = autoliikenteen suurin mahdollinen matka-aika
- L = linkin pituus
- v_0 = autoliikenteen vapaa nopeus.

$$T_{\max} = 0,30 \frac{L}{v_0} \quad (2)$$

Koska malliprosessissa käytetään leikattuja funktioita, myös liikennemalli on estimoitu niistä saaduilla arvoilla. Jos oletetaan, että alkuperäisten funktioiden aiheuttama heilahteluongelma malliprosessissa johtuu liian pienistä linkkinopeuksista (suurista matka-ajoista), funktioiden leikkaus on ollut oikean suuntainen toimenpide. Se ei kuitenkaan ole ollut elegantti ratkaisu optimointiongelmaan: jos liikennemäärät ovat suurempia kuin funktion leikkauspisteen, liikennemäärien muutokset eivät enää vaikuta matka-aikoihin ja on jopa mahdollista vähentää kapasiteettia linkillä, ilman että sillä on vaikutusta matka-aikaan ja kapasiteetin lisäyskin vaikuttaa vasta kun on saavutettu leikkausraja.

Kuvassa 1 on esitetty punaisella linkit, joilla leikkuri on käytössä nykytilanteen liikennemäärillä ja liikenneverkolla. Niillä nopeus on siis vähintään 30 prosenttia vapaasta nopeudesta, minkä vuoksi matka-ajat eivät voi kasvaa kovin suuriksi.



Kuva 1. Punaisella linkit, joilla leikkuri on käytössä nykytilanteen liikennemäärillä ja -verkolla.

3.4 Pituusriippuvaliset funktiot

Pituusriippuvaliset funktiot perustuvat samaan tutkimusmateriaaliin kuin alkuperäiset ja leikatut funktiot. Erona pituusriippuvalisten ja alkuperäisten funktioiden välillä on se, että pituusriippuvalisissa funktioissa funktion derivaatta on riippuvainen linkin pituudesta myös liikennemäärän ollessa suurempi kuin ylikysyntäsuoran alkupiste.

Kuten alkuperäiset funktiot, myös pituusriippuvaliset funktiot perustuvat Davidsonin kaavaan. Suoraan Davidsonin kaavan mukaisilla funktioilla on epäjatkuvuuskohta funktion kapasiteettipisteessä. Tämän vuoksi Davidsonin kaavaan perustuvat funktiot tulee jakaa osiin ehtolausekkeita käyttäen. Ongelman korjaamiseksi alkuperäisiä funktioita kehitettäessä valittiin ylikysyntäsuoran alkupiste, joka on eri funktioille 0,81...0,975 kertaa linkin kapasiteetti. Ylikysyntäsuoran alkupistettä suuremmille liikennemäärille funktion kuvaaja on suora, jossa ei ole epäjatkuvuuskohtia.

Funktioilla on selvä kapasiteettiraja, jota lähellä olevilla liikennemäärillä ajoneuvojen viivytykset kasvavat nopeasti. Ylikysyntäsuoran alkupisteen ylityksen jälkeen viivytysarvo kasvaa lineaarisesti. Funktioiden muoto kapasiteetin ylityksen jälkeen on suora, jonka sovituksessa on hyödynnetty aiemmin tehtyjä yksinkertaisia jonoteoreettisia viivytyslaskelmia. Ylikysyntäsuorien kulmakertoimet on määritetty funktioittain siten, että ne vastaavat suurin piirtein Davidsonin kaavan mukaisen funktion derivaattaa ylikysyntäsuoran alkupisteessä yhden kilometrin pituisella linkillä. Derivaatta on tarkalleen Davidsonin kaavan mukainen väylätyypeillä 1, 8 ja 10. Muilla väylätyypeillä ylikysyntäsuoran alkupisteeseen muodostuu taitepiste. Tangenttipisteen määrittäminen on oleellisin asia funktioiden kehittämisessä. Periaatteena ylikysynnän käsittelyssä on määrittää yhden tunnin ajalta keskimääräinen viivytys eri liikennemäärillä.

Pituusriippuvalisten funktioiden matemaattinen kaava on esitetty kaavana (3), jossa

- T = autoliikenteen matka-aika
- L = linkin pituus
- v_0 = autoliikenteen vapaa nopeus
- J = parametri, joka vaikuttaa funktion kuvaajan muotoon liikennemäärän ollessa lähellä linkin kapasiteettia
- Q = liikennemäärä / kaista
- S = linkin kapasiteetti
- a, b = muotoparametreja
- k = ylikysyntäsuoran alkupisteen ja linkin kapasiteetin suhde ($k < 1$).

$$T = \begin{cases} \frac{L}{v_0} \left(1 + J \left(\frac{Q}{S-Q} \right) \right), & Q < k \cdot S \\ a \frac{L}{v_0} + bL(Q - k \cdot S), & Q \geq k \cdot S \end{cases} \quad (3)$$

3.5 Sovelletut konikaalifunktiot

HELMET-malliin ovat sovitettavissa myös ns. konikaalifunktiot, joilla on laskennallisesti tiettyjä etuja. Artikkelissa Spiess 1990 määriteltiin "hyvin käyttäytyville" viivytysfunktioille vaatimukset, jotka pätevät edelleen:

- Funktio $f(x)$ on aidosti kasvava. Tämä on välttämätön edellytys, jotta sijoittelu suppenee yksikäsitteiseen tulokseen.
- $f(0) = 1$ and $f(1) = 2$. Nämä ehdot varmistavat yhteensopivuuden tunnettujen BPR-tyyppisten funktioiden kanssa. Kapasiteetti määritellään siis sinä liikennemääränä, jossa (ruuhkautunut) nopeus on puolet vapaasta nopeudesta.
- $f'(x)$ (derivaatta) on olemassa ja on aidosti kasvava. Tämä varmistaa, että funktio on konvekksi (ei välttämätön, mutta hyvin toivottava ominaisuus)
- $f'(1) = a$, jossa a vastaa BPR funktioiden eksponenttia eli parametria joka määrittelee kuinka nopeasti ruuhka vaikuttaa kapasiteetin saavuttamisen jälkeen.
- $f'(x) < M \cdot a$, missä M on positiivinen vakio. Viivytysfunktion jyrkkyys (nousukulma) on rajoitettu. Tämä tarkoittaa, että funktion arvot eivät kasva liian suuriksi, kun vol/cap-suhteet ($= x$) ovat yli 1 ja siten aiheuta epärealistisen suuria linkkiaikoja sijoittelun aikana (esim. yli kuukauden linkkiaikoja (pituus = 1km) saavutetaan jo 4-kertaisella kapasiteetin ylityksellä ja eksponentin arvolla 8)
- $f(0) > 0$. Tämä ehto takaa linkkivolyymien yksikäsitteisyyden. Se tekee myös sijoittelusta vakaan huolimatta koodauksen aiheuttamista pienistä matka-aikavirheistä ja jakaa liikenteen kilpaileville ruuhkautumattomille poluille niiden kapasiteettien suhteessa.
- $f(x)$:n arvojen laskeminen ei saisi kestää kauemmin kuin vastaavilla BPR-funktioilla.

Näiden periaatteiden pohjalta Spiess esitti konikaalifunktioiden käyttöä. Helmet-mallia varten tutkittiin myös alustavasti konikaalifunktioita ja todettiin niiden olevan periaatteessa käyttökelpoisia. Edellä mainituista syistä valittiin käytössä olevat funktiot (luku 3.2). Alkuperäisiä funktioita vastaavat konikaalifunktiot ovat suhteellisen helppoja tuottaa niin, että ne soveltuvat vertailuaineistoon ja hyödyntävät linkkien vapaata nopeutta ja kapasiteetteja. Konikaalifunktiot ovat pituusriippuvaisia.

Konikaalifunktioiden matemaattinen kaava on esitetty kaavana (4), jossa

- T = autoliikenteen matka-aika
- L = linkin pituus
- v_0 = autoliikenteen vapaa nopeus
- J = parametri, joka vaikuttaa funktion kuvaajan muotoon liikennemäärän ollessa lähellä linkin kapasiteettia
- Q = liikennemäärä / kaista
- S = linkin kapasiteetti
- α, β = muotoparametreja, joilla on kaavassa (5) esitetty yhteys.

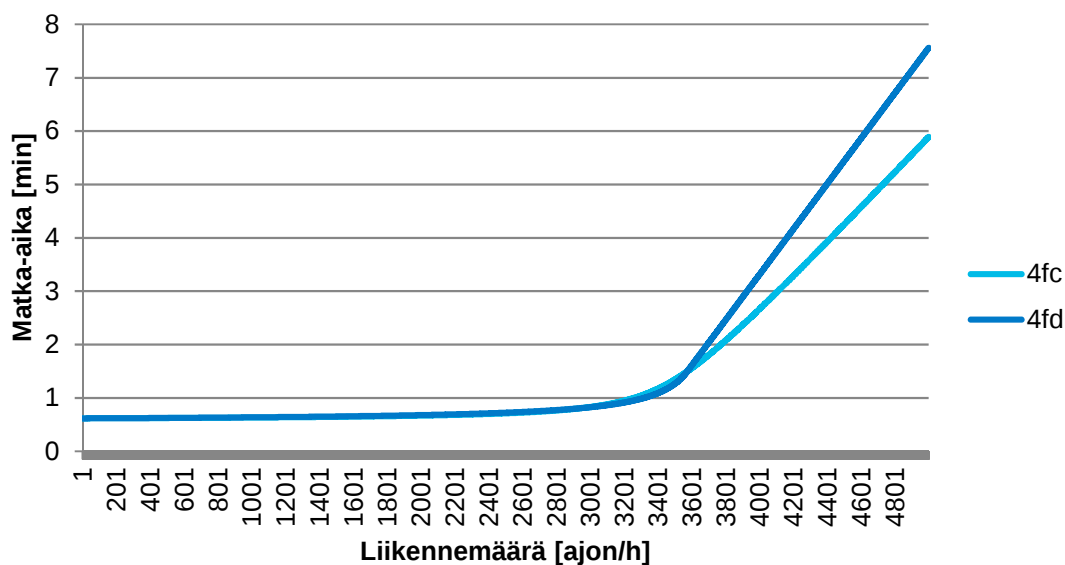
$$T = \frac{L}{v_0} \left(2 - \alpha \left(1 - \frac{Q}{S} \right) - \beta + \sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{Q}{S} \right)^2 + \beta^2} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2\alpha-1}{2\alpha-2}, \alpha > 1,0 \quad (5)$$

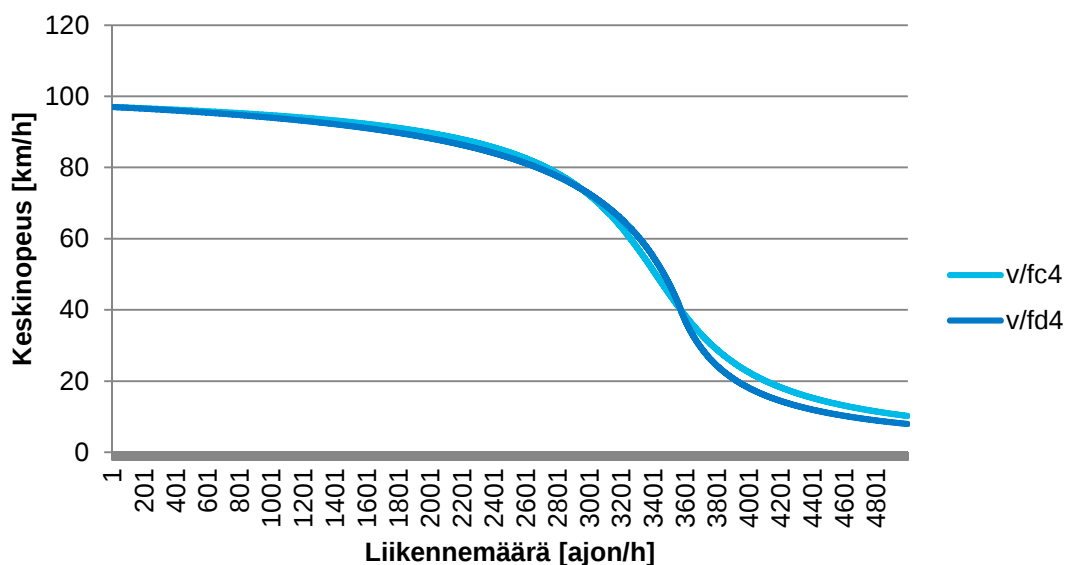
Konikaalifunktiot sovitettiin alkuperäisiin funktioihin funktioittain siten, että kukin funktio toteuttaa mahdollisimman hyvin kaikki sille kuuluvat väylätyypit. Sovitusta tehdessä tarkasteltiin liikennemääriä 0 ... 2,5 kertaa tarkastellun väylän kapasiteetti kilometrin mittaisella linkillä. Funktioiden 1, 2, 3,

E

6, 7 ja 8 osalta tarkasteltiin kaksikaistaista linkkiä ja funktioiden 4, 5, 9 ja 10 osalta yksikaistaista linkkiä. Sovittaminen tehtiin muokkaamalla konikaalifunktioiden α -arvoa ja kapasiteettia.



Kuva 2. Matka-aika-kuormituskuvaaja pituusriippuvaiselle- ja konikaalifunktiolle väylätyypillä 4 (fd = pituusriippuvainen, fc = konikaali).



Kuva 3. Keskinopeus-kuormituskuvaaja pituusriippuvaiselle- ja konikaalifunktiolle väylätyypillä 4 (fd = pituusriippuvainen, fc = konikaali).

Kuvissa 2 ja 3 on esitetty esimerkkinä liikennemäärän kasvun vaikutus linkkiä käyttävän liikenteen matka-aikaan ja keskinopeuteen alkuperäisiä- ja konikaalifunktiota käytettäessä väylätyypillä 4 (useampikaistainen maantie, kapasiteetti 1900 ajon/h/kaista, nopeusrajoitus 100 km/h). Kuvasta 2 nähdään, että matka-ajat vastaavat varsin hyvin toisiaan ylikysyntäsuoran alkupisteeseen asti, jonka jälkeen alkuperäisen funktion derivaattaa kasvaa huomattavasti konikaalifunktion derivaattaa

suuremmaksi ja alkuperäisen funktion matka-aika kasvaa suuremmaksi. Kuvasta 3 nähdään, että keskinopeuksien erot eri funktiotyyppejä käytettäessä ovat kuitenkin melko vähäisiä myös linkin ollessa ylikuormittunut. Kaikki konikaalifunktioiden sovitukset on esitetty liitteessä 1.

Koska konikaalifunktiot on sovitettu funktioittain, vastaavat ne parhaiten alkuperäisiä funktioita väylätyypeillä 2, 5, 10 ja 13. Väylätyypeillä 1, 4, 7, 9 ja 12 alkuperäisten funktioiden derivaatta on ylikysyntäsuoran alkupisteen jälkeen lähtökohtaisesti konikaalifunktioita suurempi ja väylätyypeillä 3, 6, 8, 11 ja 14 konikaalifunktioita pienempi.

4 Analyysit

4.1 Systeemitaso

Emme -sijoittelujen lopputuloksena saadaan systeemitasolta seuraavat tiedot: iteraatioiden lukumäärä pysäytyskriteereillä, keskimääräinen matka-aika, pysäytyskriteerien arvot viimeisen iteraation jälkeen.

Taulukko 1. Sijoittelujen tunnuslukuja (iteraatiot max 200, gapit 0,001; 0,001).

	iteraatiot	best rel gap	rel gap	average trip time	norm gap	abs gap	CPU time	stopping criteria	Iteraatiokierros, jolla päätymiskriteerit täyttyvät
Alkuperäiset	200	0,2444	0,00279	25,46	0,0710	13233	469,0	no. of iter.	>>1000
Leikatut	200	0,0344	0,00029	22,70	0,0066	1235	453,8	no. of iter.	939
Konikaalit	200	0,0352	0,00030	24,32	0,0074	1379	436,2	no. of iter.	749
Pituusriippuvaliset	200	0,0401	0,00033	23,87	0,0078	1457	452,6	no. of iter.	767

Taulukko 2. Sijoittelujen tunnuslukuja (iteraatiot max 200, gapit 0,01; 0,01).

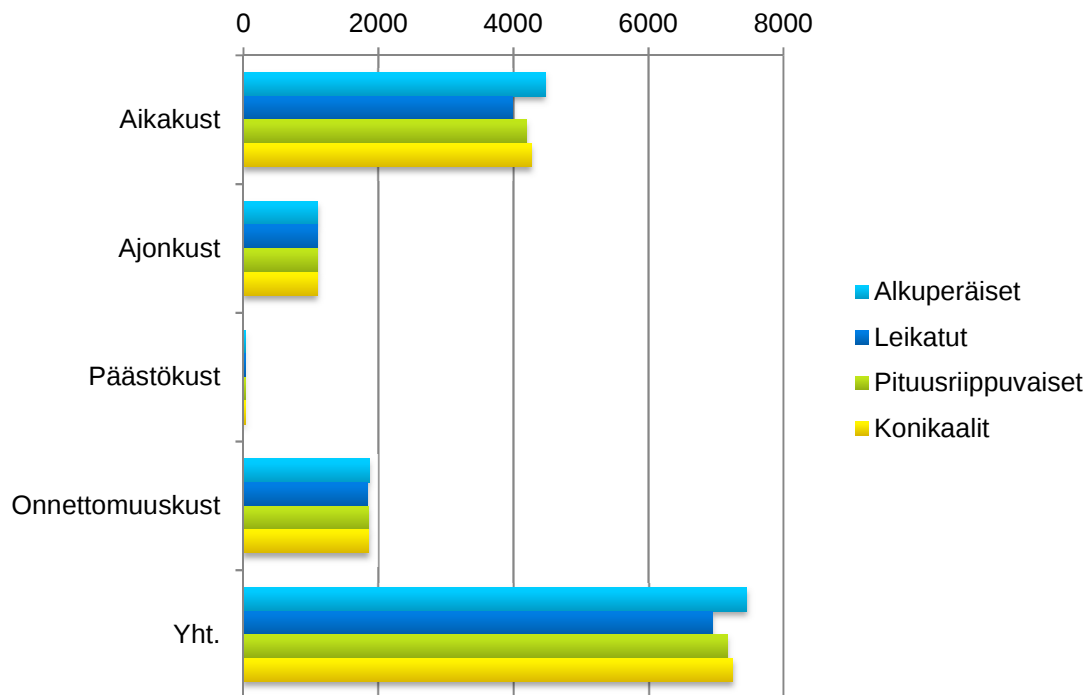
	iteraatiot	best rel gap	rel gap	average trip time	norm gap	abs gap	CPU time	stopping criteria	Iteraatiokierros, jolla päätymiskriteerit täyttyvät
Alkuperäiset	200	0.2444	0,00279	25,46	0,0710	13233	453,4	no. of iter.	472
Leikatut	153	0,0512	0,00062	22,70	0,0140	2611	357,0	Time diff.	153
Konikaalit	165	0,0497	0,00042	24,32	0,0102	1895	361,0	Time diff.	165
Pituusriippuvaliset	182	0,0477	0,00037	23,87	0,0089	1660	411,2	Time diff.	182

Edellä (taulukot 1 ja 2) on tutkittu funktioiden käyttäytymistä sijoittelussa. Havaitaan, että kaikki funktiotyypit vaativat erittäin tiukoilla pysäytyskriteereillä (0,001) yli 200 iteraatiota – konikaalifunktioita käytettäessä pysäytyskriteerit täyttyvät 749 iteraatiokierroksen jälkeen, pituusriippuvalisia funktioita käytettäessä 767 iteraatiokierroksen jälkeen ja leikattuja funktioita käytettäessä 939 iteraatiokierroksen jälkeen. Kun kriteereitä löysätään 0,01:een, alkuperäiset funktiot vaativat edelleen yli 200 iteraatiota (472), leikatut 153, konikaalit 165 ja pituusriippuvaliset 182 iteraatiota. Alkuperäiset funktiot vaativat siis n. kolme kertaa enemmän laskentaa kuin muut funktiot samaan tarkkuuteen pääsemiseksi. Sijoittelujen lopetuskriteereinä toimivien muuttujien arvojen kehitys sijoittelun edetessä on esitetty liitteessä 12. Keskimääräiseen matka-aikaan lisäiteraatioilla ei ole enää vaikutusta.

Taulukko 3. Systeemitason tunnuslukuja.

	Iteraatioita	Aikasuorite	Matkasuorite	Minimi-nopeus	Keskinopeus	Keskim. matka-aika
	(kpl)	(ajon-h)	(ajon-km)	[km/h]	[km/h]	(min)
Alkuperäiset	200	79030	3747591	0,2	47,4	24,0
Leikatut	200	70504	3731445	9,0	52,9	21,5
Konikaalit	200	75518	3730431	3,6	49,4	23,0
Pituusriippuvaiset	200	74143	3731059	3,0	50,3	22,6

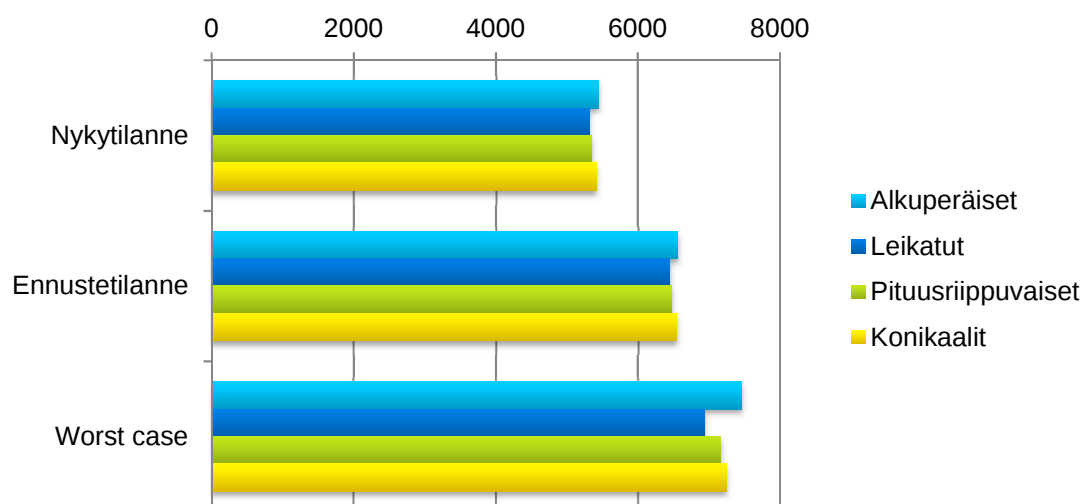
Sijoittelujen yhteenvedosta saadaan lisäksi linkki- ja funktiotyypeittäin matkasuorite (ajon-km), aika-suorite (ajon-h) sekä minimi, maksimi ja keskimääräiset linkkien liikennemäärät ja keskinopeudet (taulukko 3). Niiden perusteella, hyväksyttyjä yksikköarvoja käyttäen voidaan karkeasti laskea systeemitason vuotuiset ajokustannukset (ajoneuvo-, aika- ja onnettomuuskustannukset), liikenneturvallisuusvaikutukset sekä päästöjen määrä ja -kustannukset. Näistä voidaan vetää johtopäätöksiä eri funktiotyyppien vaikutuksista hyöty/kustannuslaskelmiin.



Kuva 4. Ajokustannukset funktioittain (miljoonaa euroa / vuosi), worst case.

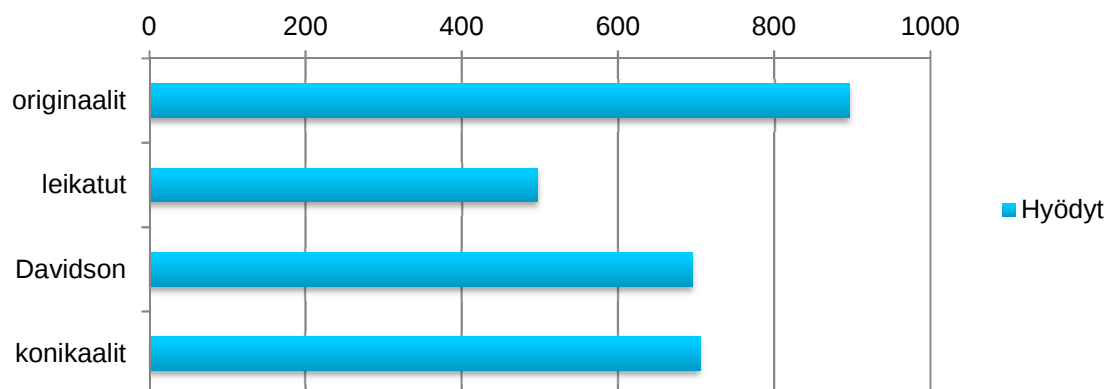
Ajokustannusten muodostuminen eri funktiotyypejä käytettäessä on esitetty kuvassa 4. Suurin kustannuserä ovat aikakustannukset, josta aiheutuvat myös suurimmat erot eri funktiotyypejä käytettäessä. Alkuperäisiä funktioita käytettäessä aikakustannukset ovat selvästi suurimmat ja leikatuja funktioita käytettäessä pienimmät.

E



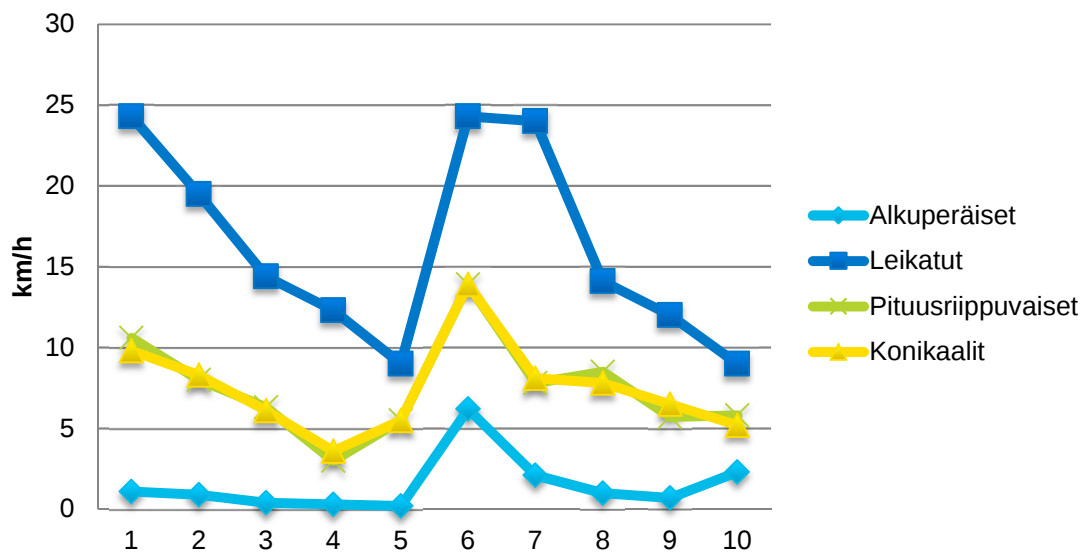
Kuva 5. Ajokustannukset eri skenaarioissa funktioittain (miljoonaa euroa / vuosi).

Ajokustannusten muodostuminen eri sijoittelutilanteissa funktiotyypeittäin on esitetty kuvassa 5. Kaikissa skenaarioissa ajokustannukset ovat suurimmat alkuperäisiä funktioita käytettäessä ja pienimmät leikattuja funktioita käytettäessä. Kustannuserot ovat suurimmat worst case -skenaariossa, jossa aamuhuipputunnin 2035 liikenteen kysyntä on sijoitettu nykytilanteen liikenneverkolle ja pienimmät vuoden 2035 ennuste- ja tavoiteverkkotilanteessa.



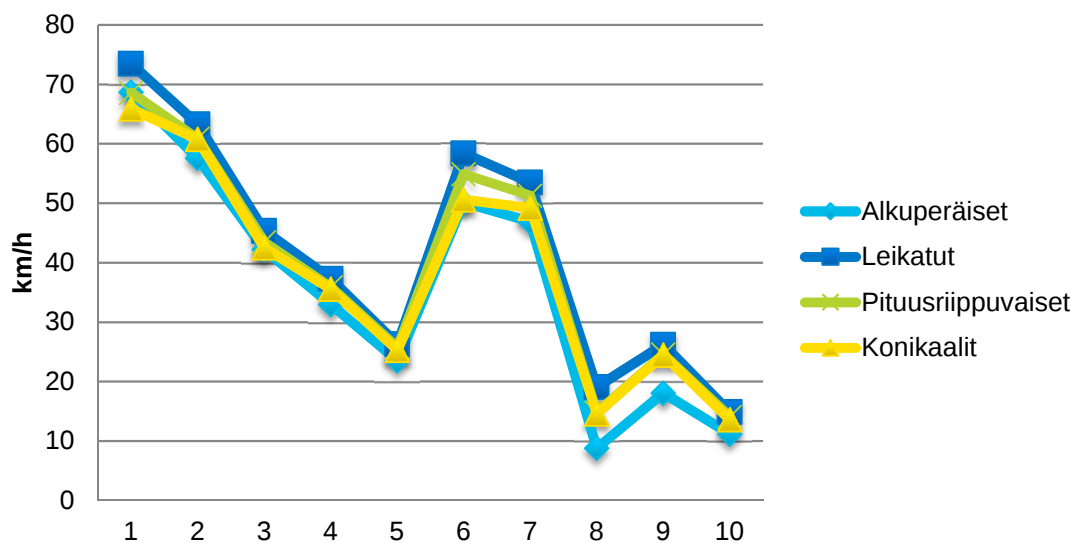
Kuva 6. Ajokustannushyödyt koko systeemissä.

Tavoiteverkon 2035 liikennehankkeiden ajokustannushyödyt koko systeemissä funktiotyypeittäin on esitetty kuvassa 6. Havaitaan, että käytetyllä funktiotyypillä on vaikutusta – alkuperäisten funktioiden mukaan hankkeilla saavutetaan noin 900 miljoonan euron ajokustannussäästöt vuodessa, kun leikatuilla funktioilla saadaan vastaavasti noin 500 miljoonaa euroa vuodessa. Konikaali- ja pituusriippuvaisilla funktioilla saadaan noin 700 miljoonaa euron säästöt vuodessa. Jos tarkastellaan pelkästään laskennallisia hyötyjä, alkuperäisillä funktioilla saavutetuilla arvoilla voidaan perustella 80 prosenttia suuremmat liikennehankkeet. ($900/500 = 1,8$)



Kuva 7. Miniminopeudet funktiotyypeittäin, worst case.

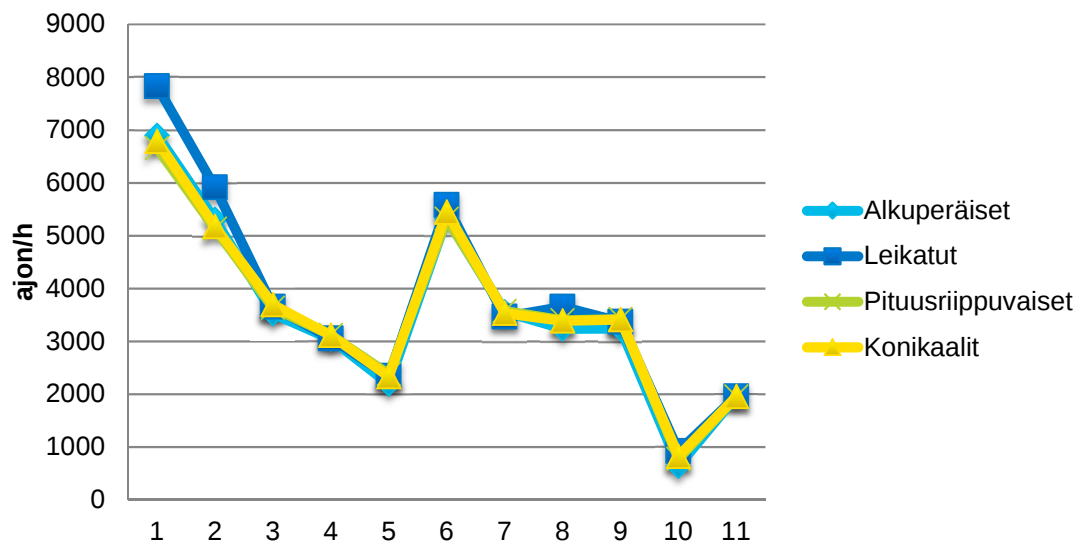
Aikakustannuserot selittyvät linkeillä esiintyvien ajonopeuksien eroilla eri funktiotyyppejä käytettäessä. Kuvassa 7 on esitetty linkeillä havaitut miniminopeudet funktioittain eri funktiotyyppejä käytettäessä worst case -skenaariossa. Kuvasta nähdään, että miniminopeudet ovat selvästi pienempiä käytettäessä alkuperäisiä funktioita ja suurimpia käytettäessä leikattuja funktioita. Konikaalifunktioita ja pituusriippuvaisia funktioita käytettäessä miniminopeuksien erot ovat vähäisiä.



Kuva 8. Keskinopeudet funktiotyypeittäin, worst case.

Eri funktioita käyttävillä linkeillä havaitut keskinopeudet funktiotyypeittäin worst case -skenaariossa on esitetty kuvassa 8. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin mininopeuksia tarkasteltaessa - alkuperäisiä funktioita käytettäessä ajonopeudet ovat pienimpiä ja leikattuja funktioita käytettäessä suurimpia.

E



Kuva 9. Maksimiliikennemäärät funktiotyypeittäin, worst case.

Lisää kuvia funktiotyyppien vertailuista on esitetty liitteessä 2.



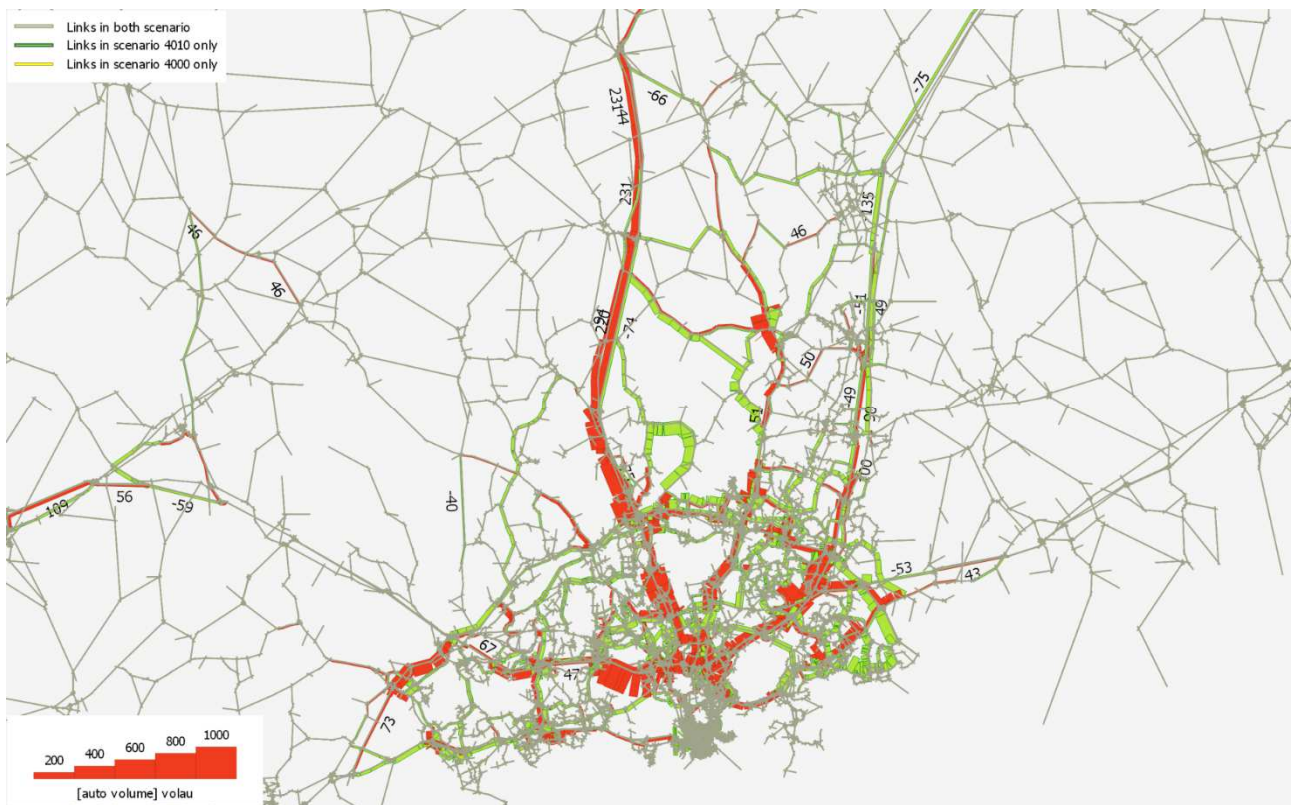
Kuva 10. Punaisella linkit, joilla leikkuri on käytössä worst case –skenaariossa.

Kuvassa 9 on esitetty eri funktioita käyttävien linkkien saamat maksimiliikennemäärät eri funktio-tyyppejä käytettäessä. Kuvasta nähdään, että leikattuja funktioita käytettäessä pääväylille (moottoritiet, maantiet ja useampikaistaiset kaupunkiväylät) sijoittuu enemmän liikennettä kuin muita funktiotyyppejä käytettäessä. Tämä on seurausta siitä, että leikattuja funktioita käytettäessä ylikuormittuneesta linkistä liikenteelle aiheutuva vastus ei enää kasva leikkurin tultua käyttöön. Kuvassa 10 on esitetty linkit, joilla leikkuri on käytössä worst case -skenaariossa.

4.2 Verkkotaso

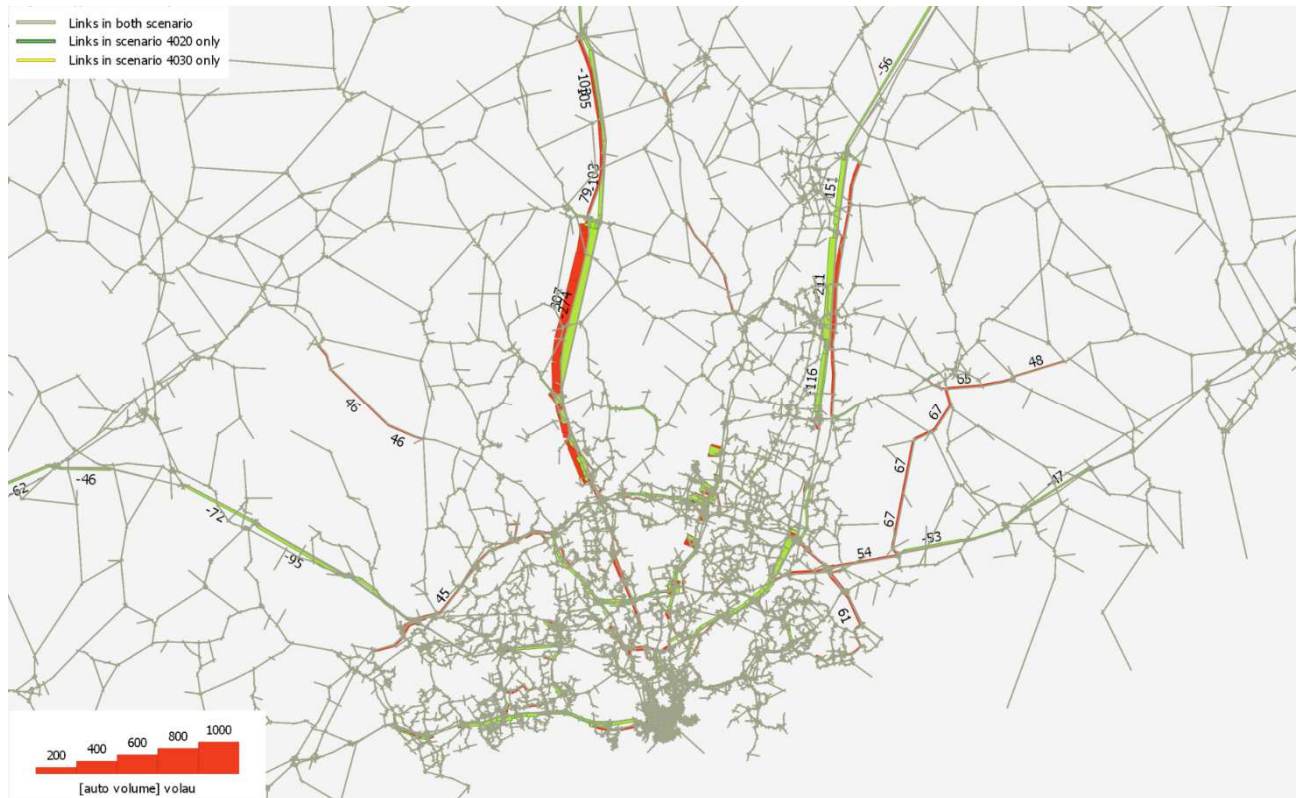
Verkkotason analyysit tehtiin worst case -skenaariona, jossa vuoden 2035 aamuhuipputunnin liikenne-ennuste on sijoitettu nykyverkolle.

Kuvassa 11 on esitetty erotuskuvassa liikennemäärien muutokset worst case -skenaariossa käytettäessä alkuperäisiä funktioita ja leikattuja funktioita. Leikattuja funktioita käytettäessä Helsingin sisääntuloväylille ja lähellä Helsingin keskustaa oleville vilkkaille poikittaisväylille sijoittuu selvästi enemmän liikennettä kuin alkuperäisiä funktioita käytettäessä. Vastaavasti suurten väylien rinnakkaisväylillä liikennemäärät ovat pienempiä leikattuja funktioita käytettäessä.



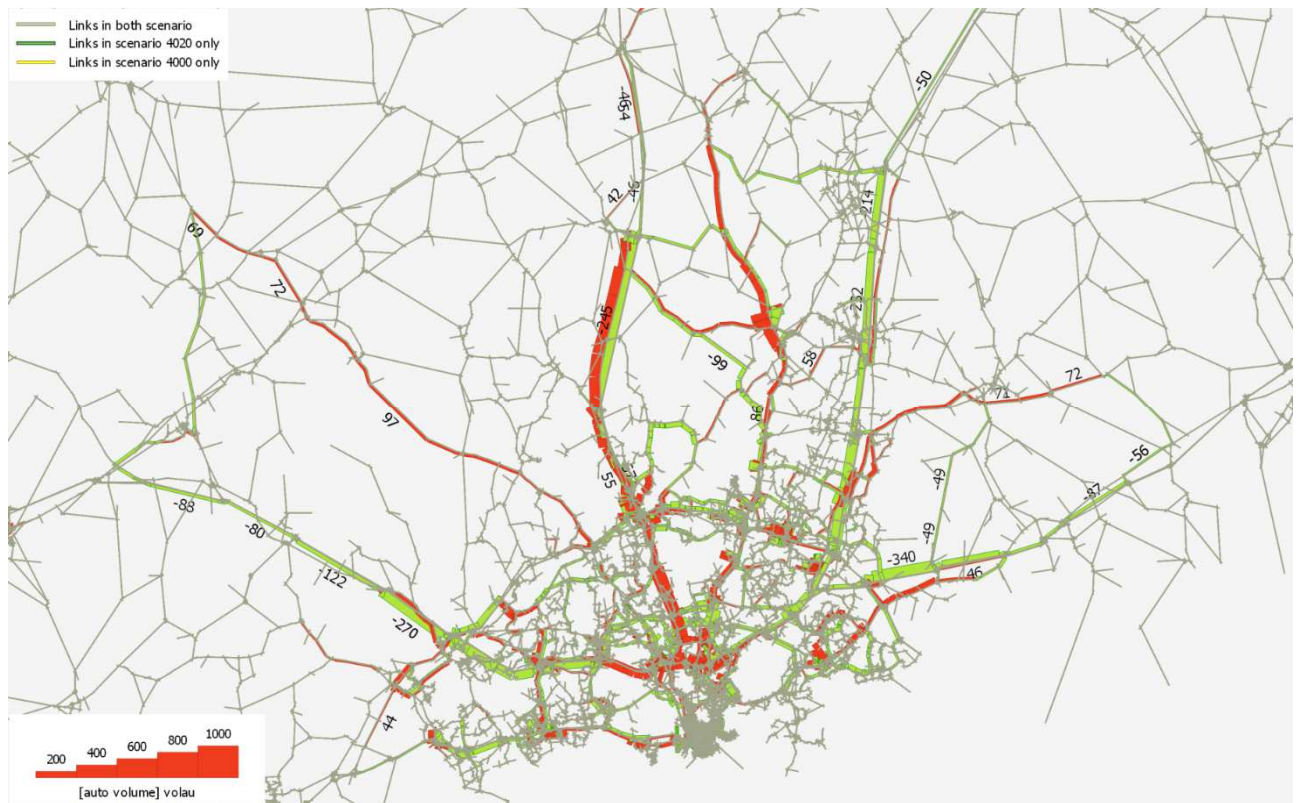
Kuva 11. Liikennemäärien erotuskuva, Leikatut funktiot – alkuperäiset funktiot. Aht35 nykyverkolla.

E



Kuva 12. Liikennemäärien erotuskuva, Pituusriippuvaliset funktiot - konikaalifunktiot. Aht35 nykyverkolla.

Kuvassa 12 on esitetty erotuskuvassa liikennemäärien muutokset worst case skenaariossa käytetäessä pituusriippuvaisia ja konikaalifunktioita. Liikennemäärien erot ovat seurausta funktioihin sovituksen aikana jääneistä eroista.



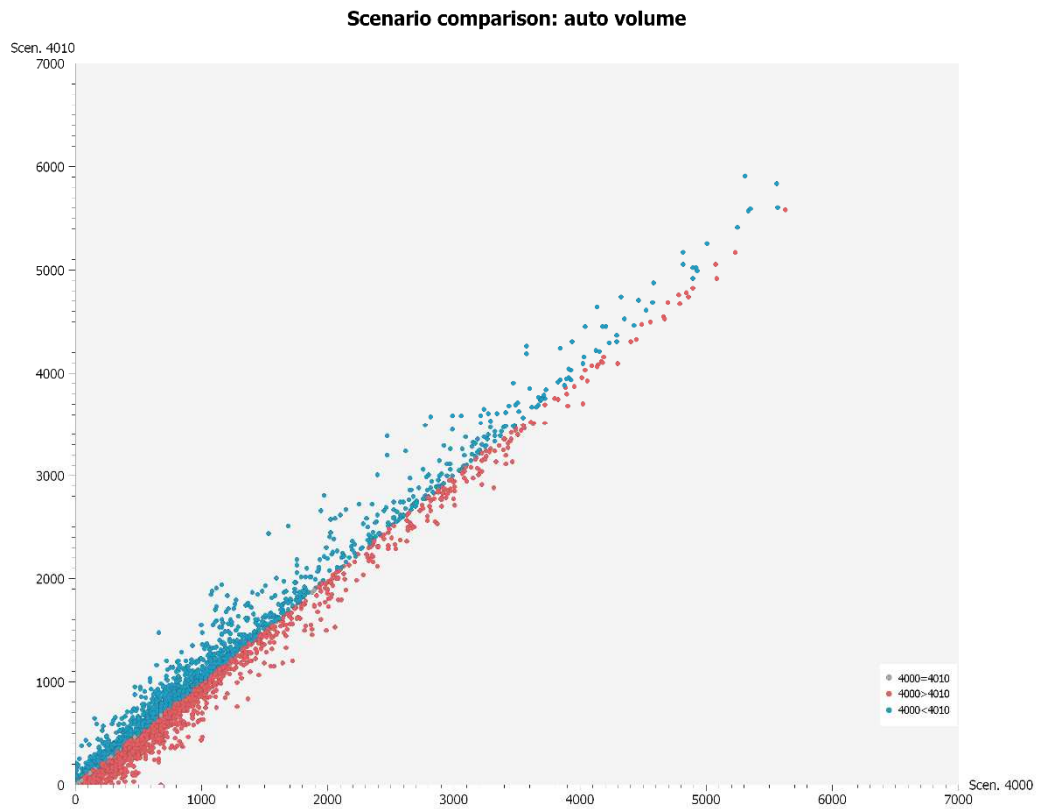
Kuva 13. Liikennemäärien erotuskuva, konikaalifunktiot – alkuperäiset funktiot. Aht35 nykyverkolla.

Kuvassa 13 on esitetty erotuskuvassa liikennemäärien muutokset worst case skenaariossa käytet-
täessä alkuperäisiä funktioita ja niihin sovitettuja konikaalifunktioita.

Kuvien 14...20 akseleilla näkyvät skenaarioiden numerot ovat:

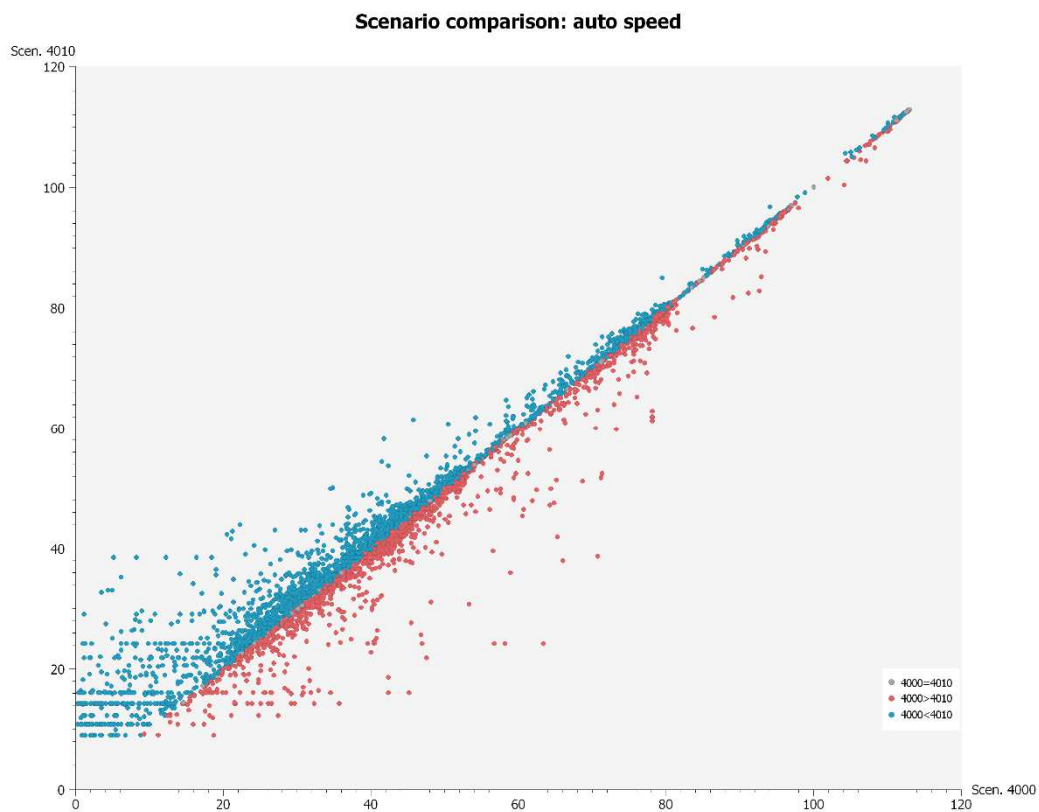
- 4000 alkuperäiset (pituusriippumattomat) funktiot
- 4010 leikatut funktiot
- 4020 konikaalifunktiot
- 4030 pituusriippuvaiset funktiot.

E



Kuva 14. Linkkien liikennemäärien vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla leikatut funktiot [ajon/h].

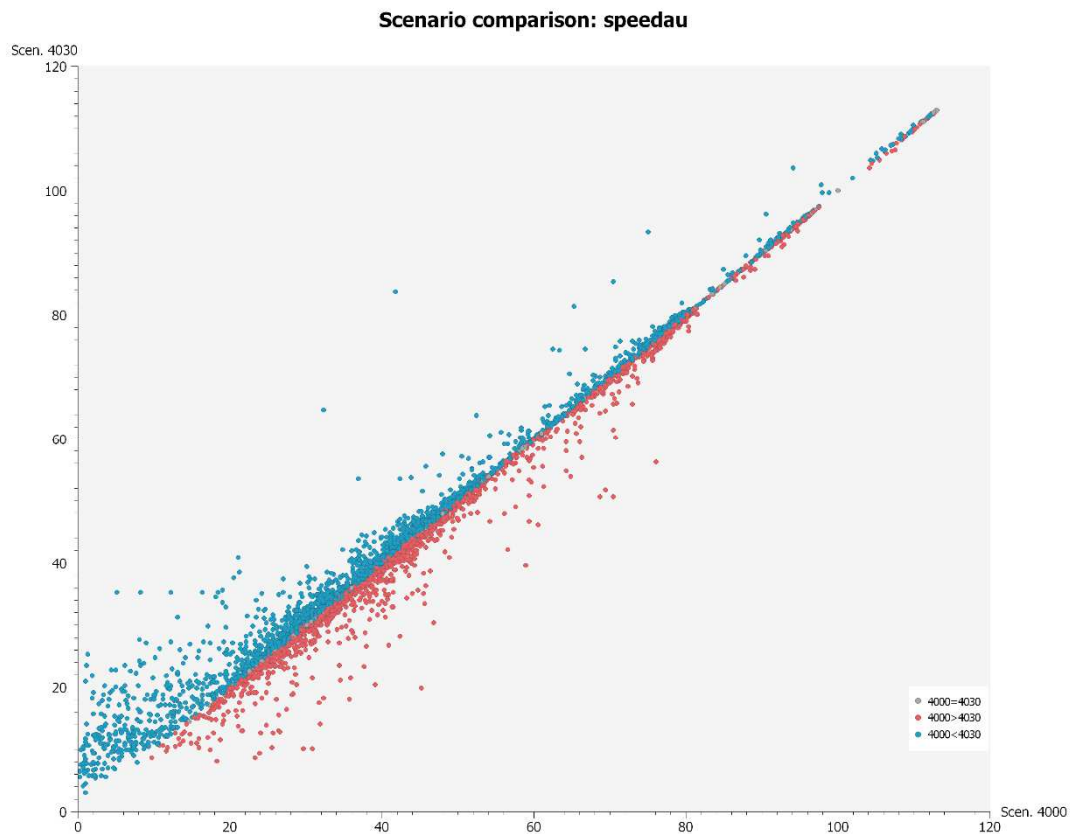
Kuvassa 14 on esitetty linkkikohtaiset liikennemäärät käyttäessä alkuperäisiä funktioita ja leikattuja funktioita. Leikattuja funktioita käyttäessä linkeillä, joilla liikennemäärät ovat suuria, liikennemäärät ovat hieman suurempia. Lisää linkkikohtaisten liikennemäärien vertailuja on esitetty liitteessä 3.



Kuva 15. Linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla leikatut funktiot [km/h].

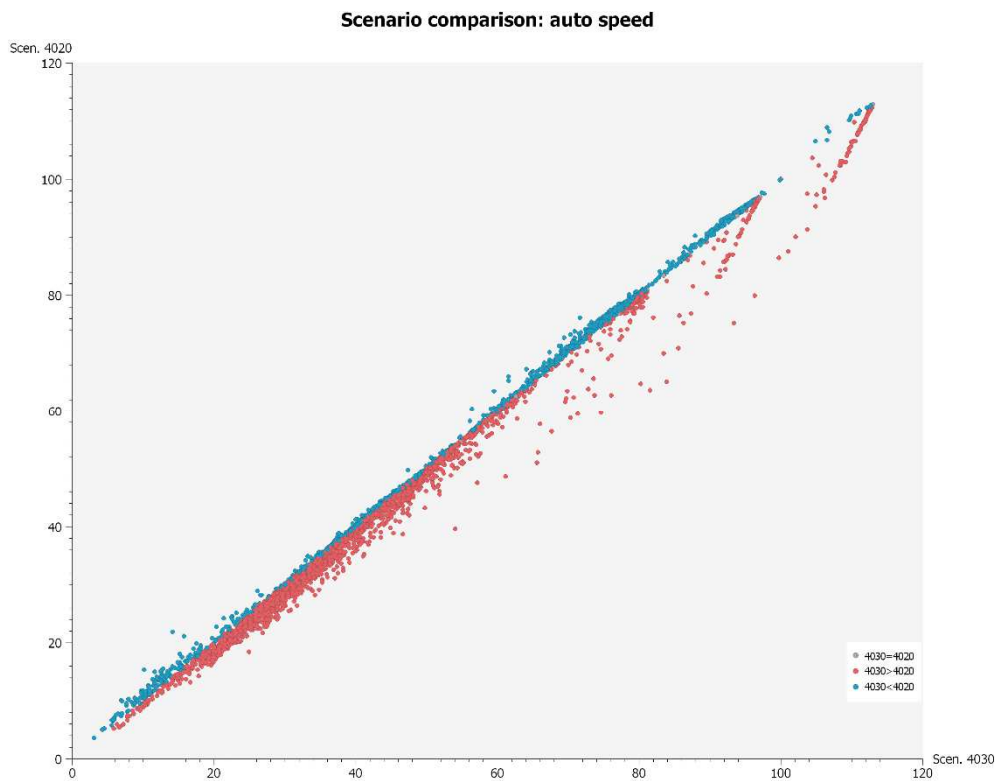
Kuvassa 15 on esitetty linkkikohtaiset ajonopeudet käyttäessä alkuperäisiä funktioita ja leikattuja funktioita. Nopeustasot, joilla leikkuri on käytössä eri väylätyypeillä, ovat selvästi nähtävissä vaakasuorina tasoina kuvaajan vasemmassa alakulmassa. Alkuperäisiä funktioita käyttäessä hyvin pienet ajonopeudet ovat varsin yleisiä, kun taas leikattuja funktioita käyttäessä alle 9 km/h ajonopeuksia ei esiinny lainkaan.

E



Kuva 16. Linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla pituusriippuvaiset funktiot [km/h].

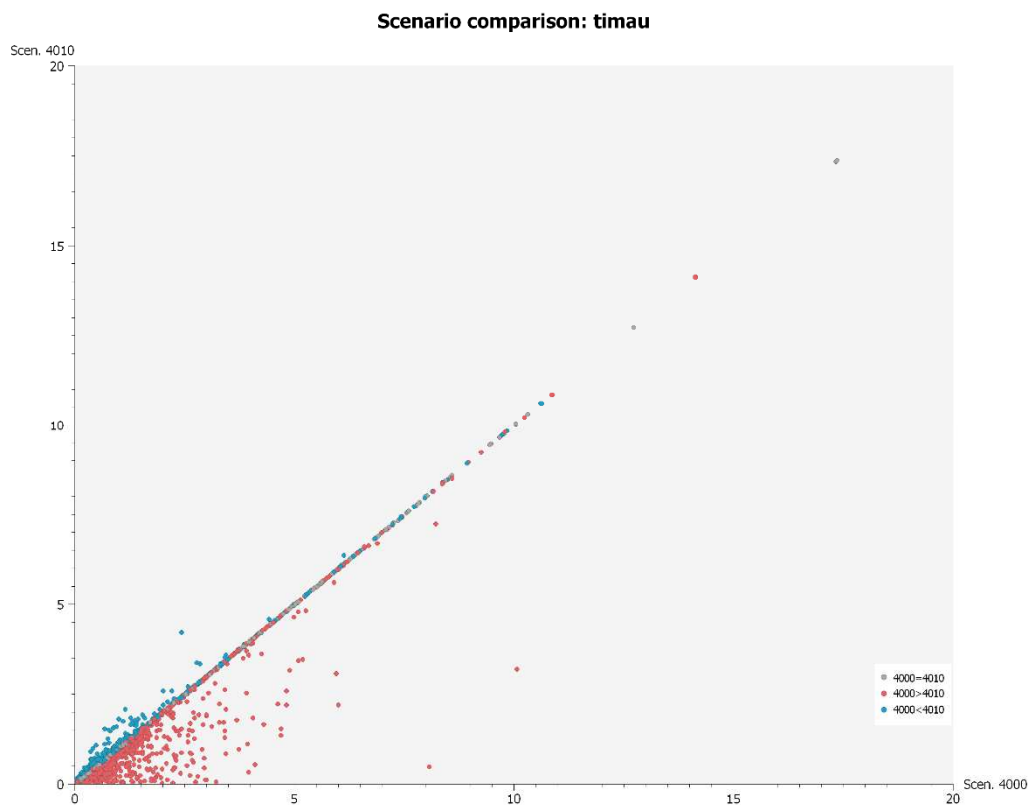
Kuvassa 16 on esitetty linkkikohtaiset ajonopeudet käyttäessä alkuperäisiä funktioita ja pituusriippuvaisia funktioita. Kuvasta nähdään, että hyvin pienet ajonopeudet ovat varsin yleisiä käytettäessä alkuperäisiä funktioita. Pituusriippuvaisia funktioita käytettäessä linkejä, joilla ajonopeus on alle 10 km/h, on varsin vähän. Kuvassa näkyvät "outlier-pisteet" vaatisivat tarkempaa analyysiä, esim. johtuvatko ne verkon koodauksesta.



Kuva 17. Linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailu: X-akselilla Pituusriippuvaiset funktiot, Y-akselilla konikaalifunktiot. [km/h].

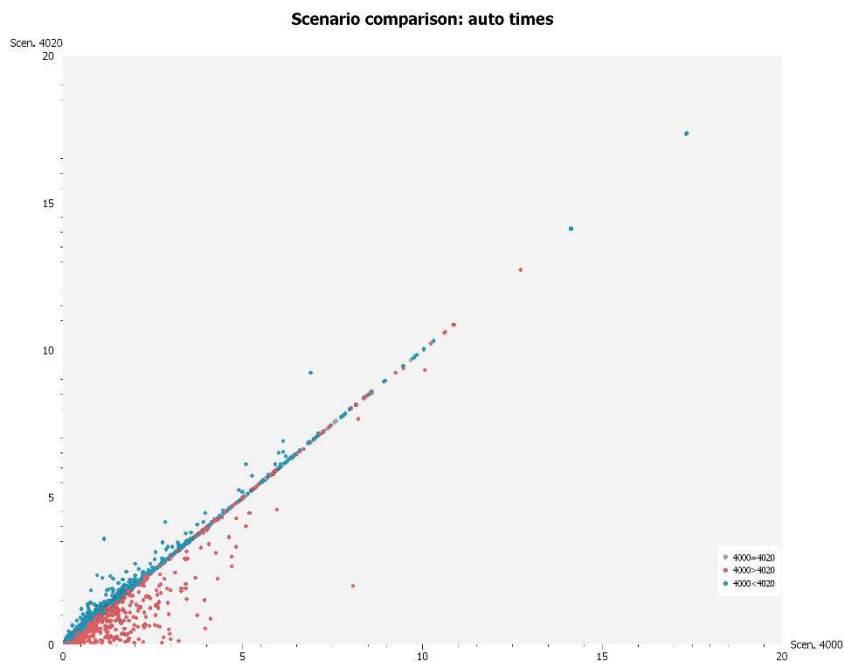
Kuvassa 17 on esitetty linkkikohtaiset ajonopeudet käytettäessä pituusriippumattomia funktioita ja konikaalifunktioita. Erot linkkikohtaisissa ajonopeuksissa ovat suhteellisen vähäisiä lukuun ottamatta funktioita fd1 käyttävien väylätyyppien 1, 2 ja 3 linkejä, joilla konikaalifunktioiden antamat ajonopeudet alkavat pudota nopeammin liikennemäärän kasvaessa. Linkkien kuormituksen kasvaessa linkeillä havaitut ajonopeudet lähestyvät toisiaan myös näiden väylätyyppien linkeillä. Lisää linkkikohtaisten keskinopeuksien vertailuja on esitetty liitteessä 3.

E

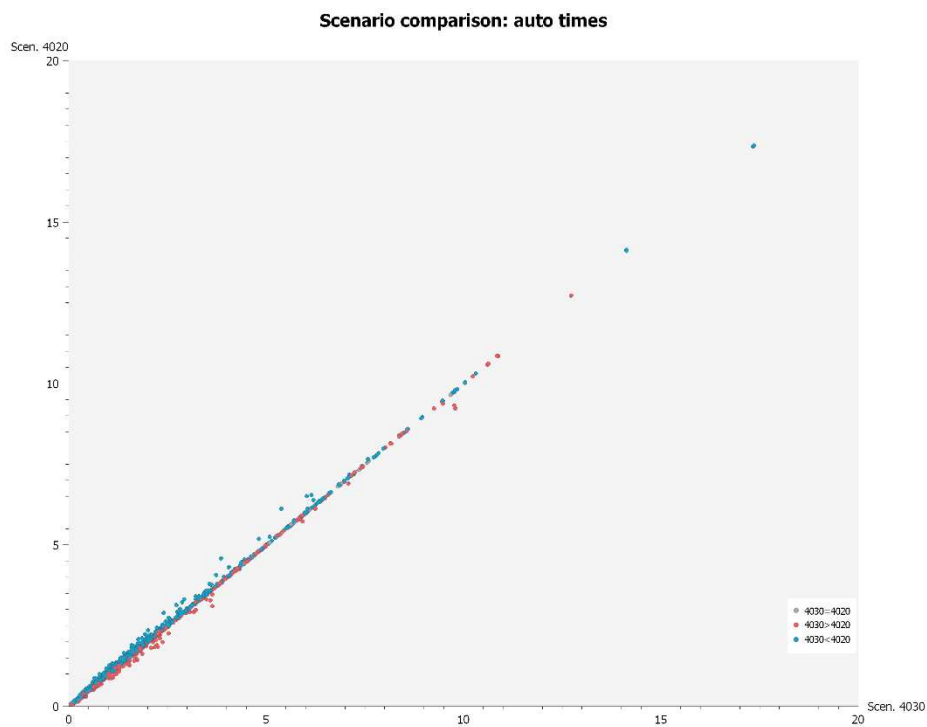


Kuva 18. Linkkikohtaisten matka-aikojen vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla leikattut funktiot [min].

Kuvassa 18 on esitetty linkkikohtaiset matka-ajat alkuperäisiä funktioita ja leikattuja funktioita käytettäessä. Kuvaajasta nähdään, että linkkikohtaisen matka-ajan ollessa alle viisi minuuttia alkuperäisiä funktioita käytettäessä esiintyy pidempiä matka-aikoja kuin leikattuja funktioita käytettäessä. Vastaava ilmiö on nähtävissä myös verrattaessa linkkikohtaisia matka-aikoja käytettäessä alkuperäisiä funktioita ja konikaalifunktioita (kuva 19). Kuvissa 18 ja 19 näkyvät "outlier-pisteet" vaatisivat tarkempaa analyysiä, esim. johtuvatko ne verkon koodauksesta.



Kuva 19. Linkkikohtaisten matka-aikojen vertailu: X-akselilla alkuperäiset funktiot, Y-akselilla konikaalifunktiot (min).



Kuva 20. Linkkikohtaisten matka-aikojen vertailu: X-akselilla Pituusriippuvaiset funktiot, Y-akselilla konikaalifunktiot (min).

E

Kuvassa 20 on esitetty linkkikohtaiset matka-ajat käytettäessä pituusriippuvaisia funktioita ja konikaalifunktioita. Linkkikohtaisissa matka-ajoissa ei ole merkittäviä eroja näitä funktiotyyppejä käytettäessä. Lisää linkkikohtaisten matka-aikojen vertailuja on esitetty liitteessä 3.

Liitteessä 4 on esitetty histogrammikuvia matka-aikajakaumien vaihtelusta eri funktiotyyppejä käytettäessä.

4.3 Yhteysväleittäinen analyysi

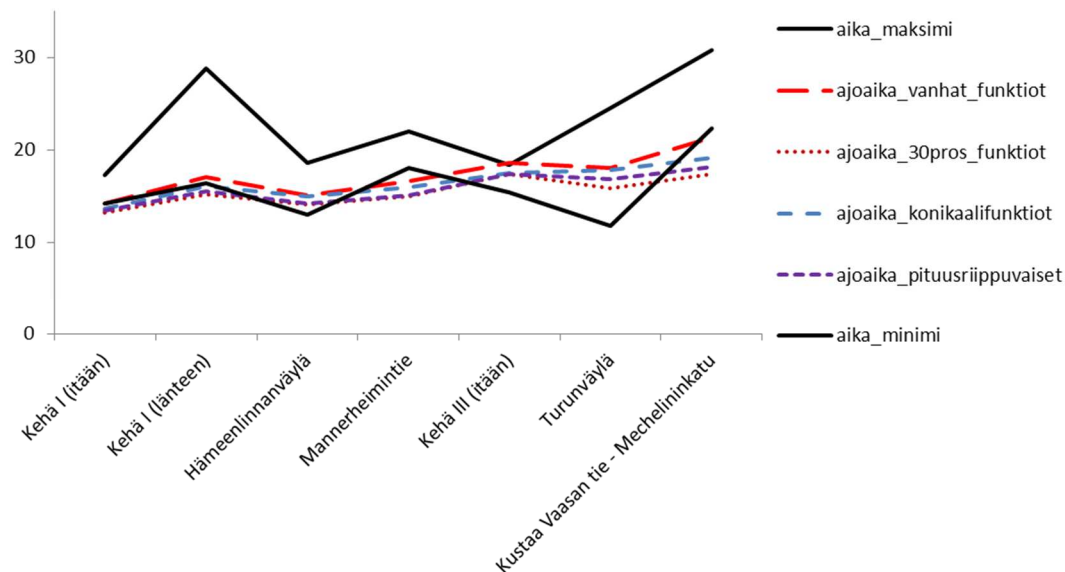
Funktioyppien tuottamia matka-aikoja tarkasteltiin yhteysvälittaisen analyysin avulla. Siinä yhteysvälien linkkien matka-ajat laskettiin yhteen. Matka-aikoja verrattiin keskenään ja lisäksi suhteessa mitattuihin matka-aikoihin reiteillä. Vertailu tehtiin vuoden 2012 matriisilla ja nykytilanteen verkolla. Tarkastellut yhteysvälit on esitetty liitteessä 6. Matka-aikojen vertailu yhteysväleittäin on raportoitu tarkemmin liitteessä 7.

Yleisesti voidaan todeta, että alkuperäiset funktiot tuottavat suurimmat matka-ajat, pituusriippuvaiset funktiot ja konikaalifunktiot tuottavat seuraavaksi suurimmat matka-ajat, ja leikatut funktiot tuottavat pienimmät matka-ajat yhteysvälistä riippumatta.

Mitattujen aikojen keskiarvo on yleensä suurempi kuin mallinnettujen (Taulukko 4). On kuitenkin huomattava, että mitattujen aikojen vaihtelu mittauksesta toiseen on selvästi suurempaa kuin mallinnettujen aikojen vaihtelu funktiotyppien välillä (kuva 21). Mittaustulokset ovat siis siinä määrin epätarkkoja, että johtopäätöksiä funktiotyppien paremmuudesta ei kannata perustaa näihin mittauksiin.

Taulukko 4. Mitatut ja mallinnetut ajoajat reiteillä.

Reitti	Väli	Mitatut ajoajat			Mallinnetut ajoajat			
		min	max	keskiarvo	vanhat funktiot	leikatut funktiot	pituusriippuvaiset	konikaalifunktiot
Kehä I (itään)	Pakilantie - Länsiväylä	14	17	15	14	13	13	14
Kehä I (länteen)	Länsiväylä - Pakilantie	16	29	21	17	15	15	16
Hämeenlinnanväylä	Kehä III - Hakamäentie	13	19	16	15	14	14	15
Mannerheimintie	Hakamäentie - Erottaja	18	22	20	17	15	15	16
Kehä III (itään)	Hämeenlinnanväylä - Itäväylä	15	18	17	19	17	17	18
Turunväylä	Kehä III - Huopalahdentie	12	25	17	18	16	17	18
Kustaa Vaasan tie - I	Koskelantie - Itämerenkatu	22	31	26	21	17	18	19



Kuva 21. Mitattujen ajoaikojen minimi ja maksimi, sekä mallinnetut ajoajat reiteittäin.

4.4 Sijoittelun vakaus tasapainotilanteessa

Sijoittelun vakautta tasapainotilanteessa analysoitiin kahdella tavalla. Ensin tarkasteluissa tutkittiin yhteysväleittäisten matka-aikojen kehittymistä sijoittelun aikana valituilla yhteysväleillä. Toiseksi tarkasteltiin sijoittelun lisäkierrosten vaikutusta liikennemääriin ja nopeuksiin. Tässä osassa tehtyjen tarkasteluiden tarkemmat kuvaukset löytyvät liitteistä 7, 8 ja 9.

Tarkasteltaessa matka-aikojen heilahtelua (liite 8) liitteessä 6 kuvatuilla yhteysväleillä, huomataan että sijoittelun vakaus vaihtelee funktiotyypeittäin. Yleisesti alkuperäiset funktiot tuottavat epävakaimmat sijoittelutulokset. Alkuperäisillä funktioilla matka-aikojen heilahtelu on suurempaa ja jatkuu selvästi pidempään kuin muilla funktiotyypeillä. Kuitenkin noin 100 iteraatiokierroksen jälkeen heilahtelu vähenee kaikilla yhteysväleillä noin +/- 0,5 minuuttiin (kuvat 69 ja 73). Leikatuilla funktioilla matka-aikojen vaihtelu vähenee samalle tasolle noin 30 kierroksen jälkeen (kuvat 70 ja 74). Pituusriippuvaiset ja konikaalifunktiot antavat tarkastelussa samankaltaisia tuloksia kuin leikatut funktiot ja tuottavat nopeammin konvergoituvat matka-ajat kuin alkuperäiset funktiot (kuvat 71, 72, 75 ja 76).

Kun tarkastellaan ylimääräisen sijoittelukierroksen vaikutusta liikennemääriin ja nopeuksiin (liite 9), havaitaan samankaltainen tulos edellisen tarkastelun kanssa. Pituusriippuvaisilla funktioilla sijoittelu näyttäisi saavuttavan nopeammin pienemmät vaihtelut kuin alkuperäisillä funktioilla. Kierroksilla 15..16 ja 30..31 voidaan vielä havaita melko selkeitä muutoksia liikenteen jakautumisessa ja nopeuksissa. Kun iteraatiokierrosten lukumäärä on 100..101, vaihtelu on molemmilla funktiotyypeillä melko pientä. Kuvat 77...82 esittävät liikennemäärien muutokset iteraatiokierrosten välillä molemmilla funktiotyypeillä.

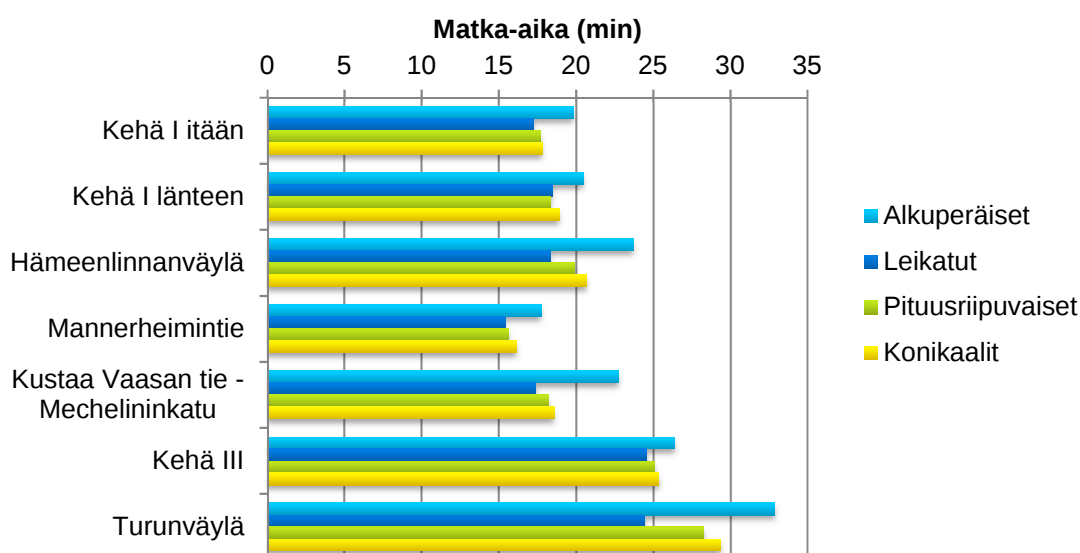
E

4.5 Matka-aikamatriisien vakaus tasapainotilanteessa

Matka-aikamatriisien vakautta tasapainotilanteessa tarkasteltiin jatkamalla sijoittelua iteraatiokierros kerrallaan 10 askeleen verran sijoittelun saavutettua lopetuskriteerit $\text{best relative gap} = 0,01 \%$; $\text{normalized gap} = 0,01$. Taulukossa 5 on esitetty oleellisia tunnuslukuja tarkastelusta. Alkuperäiset funktiot vaativat 472 iteraatiokierrosta tasapainotilan saavuttaakseen muiden funktiotyyppien saavuttaessa tasapainotilan 153...182 iteraatiokierroksen aikana.

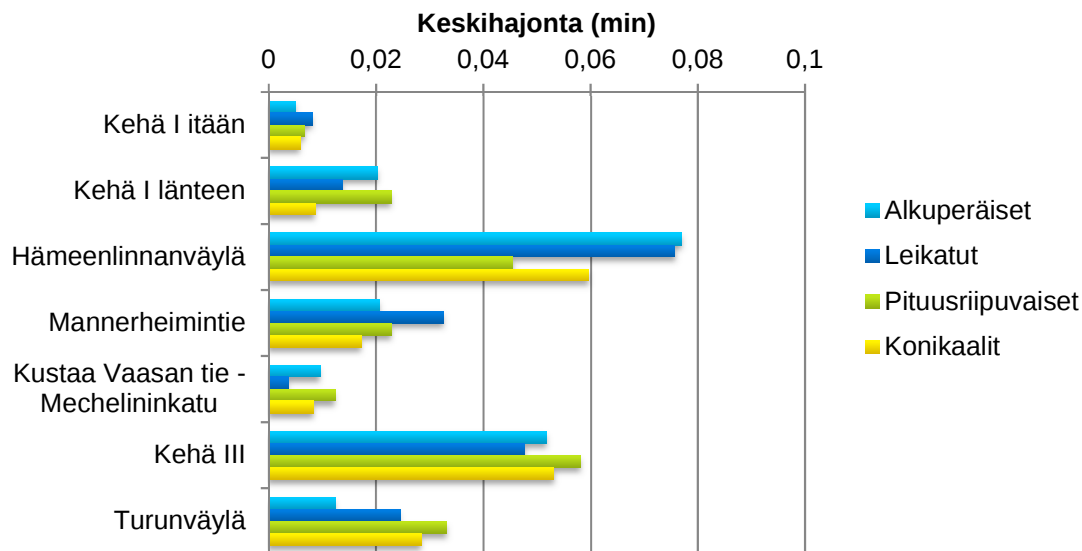
Taulukko 5. Tunnuslukuja matka-aikamatriisien vakauden tarkastelusta.

	Iteraatiokierrosten määrä	Keskihajonnan keskiarvo	Keskihajonnan STD
Alkuperäiset	472 ... 482	0,0133756	0,0197135
Leikatut	153 ... 163	0,0141715	0,0223097
Pituusriippuvaiset	182 ... 192	0,0158473	0,0232086
Konikaalit	165 ... 175	0,0147127	0,0203974

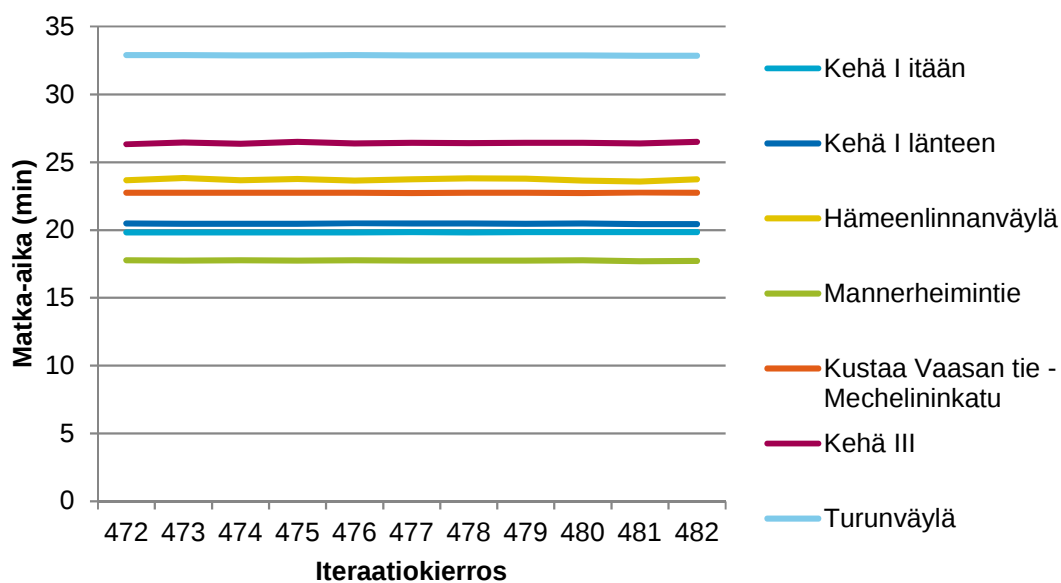


Kuva 22. Eräiden yhteysvälien matka-ajat tasapainotilanteessa (matka-aikamatriiseissa).

Kuvassa 22 on esitetty eri funktiotyyppejä käytettäessä liikennemallista saadut matka-ajat liitteessä 6 esitetyille yhteysväleille. Kuvassa 23 on esitetty samojen yhteysvälien matka-ajan keskihajonta yhdentoista peräkkäisen iteraatiokierroksen aikana tasapainotilan saavuttamisen jälkeen eri funktiotyyppejä käytettäessä.



Kuva 23. Eräiden yhteysvälien matka-aikojen (11 peräkkäistä iteraatiokierrosta) keskihajonta eri funktiotyypeillä sijoittelujen tasapainotilanteen saavuttamisen jälkeen.



Kuva 24. Alkuperäisten funktioiden peräkkäisten iteraatioiden (472...482) matka-aikojen vakaus sijoittelun tasapainotilanteessa.

Kuvassa 24 on esitetty tarkasteltujen yhteysvälien matka-aikojen vaihtelu peräkkäisillä iteraatiokierroksilla alkuperäisiä funktioita käytettäessä tasapainotilanteessa. Matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä on vähäistä kaikkia funktiotyyppejä käytettäessä tasapainotilan saavuttamisen jälkeen. Matka-aikojen vaihtelu tasapainotilan saavuttamisen jälkeen kaikilla eri funktiotyypeillä on esitetty tarkemmin liitteessä 13.

4.6 Sijoittelutulosten vertailu funktiotyypeittäin

Tarkasteluissa on verrattu myös erilaisten funktiotyypin tuottamia sijoittelutuloksia. Menetelmiä on kaksi: Ensin verrataan liikennemäärien eroja, kun liikenne sijoitellaan eri funktiotyypeillä.

Toiseksi tarkastellaan funktioiden tuottamia hitauslukuja linkeillä. Tarkastelujen avulla voidaan havainnollistaa eri funktiotyypin tuottamien matka-aikojen ja liikennemäärien eroja. Vertailumenetelmien tarkemmat kuvaukset ja kuvat on esitetty liitteessä 10 ja 11.

Liikennemäärien ja nopeuksien tarkastelu funktioiden välillä (liite 10) on tehty vertaamalla uusia funktiotyyppejä alkuperäisiin funktioihin. Tarkastelussa voidaan nähdä selvä ero liikenteen sijoittamisessa eri luokkien väylille. Leikatuilla funktioilla liikenne keskittyy merkittävästi enemmän moottoriteille sekä pääväylille. Koska leikkuri estää ajonopeuksia putoamasta alle 30 prosentin vapaasta nopeudesta, ruuhkautuminen ei pienennä samalla tavalla pääväylien nopeuksia, eivätkä ajoneuvot siirry käyttämään alempaa tieverkkoa. Muut vertailut funktiotyypit jakavat liikenteen tasapainoisemmin liikenneverkolle alkuperäisten funktioiden tavoin.

Hitausluku tarkoittaa nopeuden käänteislukua linkeillä ja sitä on käytetty paljastamaan missä eri funktiotyypin viivytykset syntyvät. Vertailtaessa eri funktiotyypin viivytyksiä (Kuva 86...Kuva 89), voidaan havaita:

- Alkuperäisten funktioiden viivytykset johtuvat pääosin lyhyille linkeille kertyvistä suurista viiveistä. Tämä johtuu siitä, että lyhyillä linkeillä funktioiden tuottama matka-aika kasvaa jyrkästi, kun liikennemäärä saavuttaa ylikysyntäsuoran alkupisteen.
- Leikattuja funktioita käytettäessä suuria viivytyksiä ei esiinny, koska linkkikohtaiset ajonopeudet eivät voi laskea alle 30 prosentin linkin vapaasta nopeudesta.
- Pituusriippuvaisten- ja konikaalifunktioiden matka-ajat eivät kasva alle kilometrin mittaisilla linkeillä alkuperäisiin funktioihin nähden yhtä jyrkästi suhteessa liikennemäärään ylikysyntäsuoran alkupisteen jälkeen, joten hitausluvut ovat pienempiä lyhyillä linkeillä.
- Pituusriippuvaisten ja konikaalifunktioiden hitausluvut ovat melko tarkkaan toisiaan vastavastavia ja suuret viivytykset osuvat melko tarkasti samoille linkeille.

5 Johtopäätökset

Alkuperäisiä funktioita käytettäessä matka-ajat ovat herkkiä liikennemäärien muutoksille oltaessa lähellä linkin kapasiteettia ja matka-aikojen linkeittäinen ja yhteysväleittäinen vaihtelu on selvästi suurempaa kuin muita funktiotyyppejä käytettäessä samalla iteraatioiden määrällä. Funktioiden käyttö on etenkin malliprosessissa epätaloudellista sijoittelujen vaatiessa moninkertaisen ajan muihin funktiotyyppeihin verrattaessa. Funktiotyyppiä käytettäessä on myös havaittu ongelmia kulkupaosuuksien suppenemisessa sijoittelun aikana.

Matka-ajat ovat kuormittuneilla linkeillä alkuperäisiä funktioita käytettäessä selvästi suurempia ja ajonopeudet pienempiä kuin muita funktiotyyppejä käytettäessä. Tämän vuoksi alkuperäisiä funktioita käytettäessä laskennalliset ajokustannukset ovat huomattavasti suurempia kuin muilla funktiotyypeillä.

Alkuperäiset funktiot ovat pituusriippumattomia, ts. funktion derivaatta ylikysyntäsuoran alkupisteen jälkeen ei ole riippuvainen linkin pituudesta. Tämän seurauksena liikenteen määrän kasvaessa yli ylikysyntäsuoran alkupisteen, sen ajonopeus on riippuvainen linkin pituudesta – lyhyemmillä linkeillä ajonopeudet ovat tällöin hitaampia. Yhteysvälin, jolla muut parametrit ovat samat, matka-aika on siis riippuvainen siitä, kuinka monen ja minkä pituisen linkin avulla se on kuvattu. Funktiotyyppiä käytettäessä tulisi siis tarkasti määritellä, minkä mittaisia linkkejä kullakin väylätyypillä tulee käyttää. Erityisesti tällä on vaikutusta, kun joukkoliikenteen pysäkit kuvataan liikenneverkolle erillisinä solmuina liittymien välittömässä läheisyydessä.

Leikattuja funktioita käytettäessä liikennemäärän kasvaminen ei enää lisää linkin matka-aikaa tai pudota ajonopeutta matkanopeuden pudottua alle 30 prosentin vapaasta nopeudesta. Matkanopeuden leikkurirajan alituksen jälkeen linkille voidaan lisätä liikennettä rajatta ilman, että sen palvelutaso laskee – samalla rinnakkaisille pienemmille väylille sijoittuu pienempi liikennemäärä kuin muita funktiotyyppejä käytettäessä. Leikattuja funktioita käytettäessä linkkikohtaiset ajonopeudet ovat selvästi suurempia ja matka-ajat lyhyempiä kuin muita funktiotyyppejä käytettäessä. Liikenteen kustannukset ovat vastaavasti selvästi pienimmät leikattuja funktioita käytettäessä, 55 prosenttia alkuperäisten funktioiden perusteella lasketuista ajokustannuksista.

Leikattujen funktioiden ylikysyntäsuoran alkupisteen ja leikkurin alkupisteen välinen osuus on samalla tapaa pituusriippumaton kuin alkuperäisten funktioiden - niihin siis liittyvät periaatteessa samat ongelmat kuin alkuperäisiin funktioihin, mutta leikkurin ansiosta niiden vaikutus sijoitteluprosessiin ja sen tuloksiin on vähäisempi.

Konikaali- ja pituusriippuvaisten funktioiden tuottamat tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Tarkkoja sijoittelun päättymiskriteereitä käytettäessä niiden erot ovat seurausta lähinnä funktioiden sovituksessa niihin jääneistä eroista. Molemmat funktiotyypit saavuttavat tasapainotilan selvästi alkuperäisiä funktioita ja hyvin tarkkoilla päättymiskriteereillä myös leikattuja funktioita vähäisemmällä iteraatiokierrosten määrällä – konikaalifunktiot konvergoivat hieman pituusriippuvaisia funktioita nopeammin.

Konikaalifunktiot ovat derivoitavia kaikilla liikennemäärillä ja käyttäytyvät hyvin sijoittelun aikana. Ne ovat myös matemaattisesti yksinkertaisia eikä niissä tarvita ehtolausekkeita.

E

Tarkastelussa käytettyihin pituusriippuvaisiin funktioihin muodostuu taitekohta ylikysyntäsuoran alkupisteeseen lukuun ottamatta väylätyyppejä 1, 8 ja 10 – funktiot on jaettu kahteen osaan ehtolausekkeiden avulla, ja useimmilla väylätyypeillä niiden derivaatat ovat erisuuria lähestyttäessä ylikysyntäsuoran alkupistettä eri suunnista. Tällä voi olla vaikutusta sijoittelun keston.

6 Suositukset

Funktioiden käyttö riippuu käyttötarkoituksesta. HELMET-mallissa funktioiden käyttö on sidoksissa kysyntämallien kertoimien estimointiin. Kysyntämallien syöttötietoina käytettävät vastukset pitäisi ajaa samoilla funktioilla, joita mallien estimoinnissakin käytettiin. Vaikutustarkastelut voidaan tehdä funktioilla, jotka kuvaavat mahdollisimman hyvin liikenteen todellista käyttäytymistä. Nyt käytössä olevalla verkon kuvauksella funktioiden antamat matka-ajat vastaavat kohtuullisen hyvin mitattuja matka-aikoja, alkuperäiset parhaiten ($-20\% \dots +12\%$ mitattujen yhteysvälien keskimääräisistä matka-ajoista, kuva 21), leikatut huonoiten ($-35\% \dots 0\%$). Ihannetilanteessa molempiin vaiheisiin käytetään samoja funktioita. Nykyaikaiset liikennetilanteen seurantomahdollisuudet (älypuhelimet, navigaattorit, havaitut matkanopeudet) antavat uusia mahdollisuuksia tarkentaa ja kalibroida funktioiden tuottamia matka-aikoja vastaamaan paremmin todellisuutta.

Alkuperäiset funktiot voivat olla käyttökelpoisia malliprosessissa ja sijoitteluissa, mikäli iteraatiokierroksia tehdään riittävästi, noin kolminkertainen määrä muihin tarkasteltuihin funktiotyyppeihin nähden. Funktioiden toimivuutta tällaisella iteraatioiden määrällä ei ole kuitenkaan vielä käytännössä testattu. Alkuperäisiä funktioita käytettäessä erittäin lyhyiden linkkien vaikutus matka-aikaan tulee huomioida.

Eri funktiotyyppien toimivuutta malliprosessissa on syytä tarkastella ja vertailla.

Leikattuja funktioita ei suositella käytettäväksi sijoitteluissa tai malliprosessissa. Suositeltavia funktiotyyppejä ovat konikaali- ja pituusriippuvaiset funktiot. Konikaalifunktiot ovat matemaattisesti kestäviä ja niitä käytettäessä saavutettiin tehdyissä tarkasteluissa tasapainotila vähäisimmällä iteraatiokierrosten määrällä. Pituusriippuvaiset funktiot perustuvat samaan tutkimusaineistoon kuin alkuperäiset funktiot. Konikaalifunktiot on sovitettu alkuperäisiin funktioihin.

Tässä työssä on tarkasteltu funktioiden tuloksia ja toimivuutta tarkkoja sijoittelun päättymiskriteerejä käytettäessä. Sijoittelun keston ja tulosten luotettavuuden kannalta optimaalisia päättymiskriteerejä tulee selvittää jatkossa tarkemmin. Sijoittelujen päättymiskriteereiksi sopivat esimerkiksi $\text{best relative gap} = 0,1\%$ ja $\text{normalized gap} = 0,03$.

Tällöin sijoittelun kesto on konikaali- ja pituusriippuvaisilla funktioilla noin sata iteraatiokierrosta ja alkuperäisillä funktioilla noin 260 iteraatiokierrosta. Sijoittelun tehokkuutta voidaan parantaa ratkaisevasti myös käyttämällä sijoittelun aikana useampaa prosessoria ja käyttämällä polkuperusteista sijoittelua (path-based traffic assignment). Polkuperusteinen sijoittelun käyttö vaatii, että sijoiteltavien matriisien nolla-alkiot korvataan pienillä, nollasta poikkeavilla arvoilla.

Yhteysväleittäisiä matka-aikoja tarkasteltaessa havaittiin, että liikennemallien avulla lasketut matka-ajat eroavat mittaustuloksista, mutta ottaen huomioon mittaustarkkuus ei kuitenkaan oleellisesti: joillain osuuksilla todelliset matka-ajat ovat mallinnettuja matka-aikoja lyhyempiä ja joillain pidempiä. Tarkastelluista yhteysväleistä kaksi kulkee Helsingin kantakaupungissa katuosuuksilla, joilla on runsaasti valo-ohjattuja liittymiä – molemmat osuudet olivat niiden kolmen yhteysvälin joukossa, joilla mallinnettujen matka-aikojen suhteellinen virhe mitattuihin nähden oli suurin. Valo-ohjatuista liittymistä aiheutuvia viiveitä voidaan kuvata väylän vapaata nopeutta laskemalla. Väylän kapasiteettia määrittäessä pitää huomioida liittymien välityskyky.

Liikennemalleista saatavien tulosten ja todellisen liikennetilanteen vastaavuutta voidaan parantaa päivittämällä käytetty väylätyyppiluokittelu ja eri väylätyypeille määritellyt oletusattribuutit.

Lähdeluettelo

INRO Consultants Inc (1998): *EMME/2 User's Manual, Software Release 9*. Montreal 1998.

Keränen, Matti (1990). *Liikennemäärä-viivytysfunktiot tasapainosijoittelumenetelmässä*. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö.

Keränen, Matti & Pesonen, Hannu (2011). *Liikennejärjestelmän viivytysfunktiot*. Osa D julkaisussa *Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustemallit 2010*. HSL:n julkaisuja 33/2011, Helsinki.

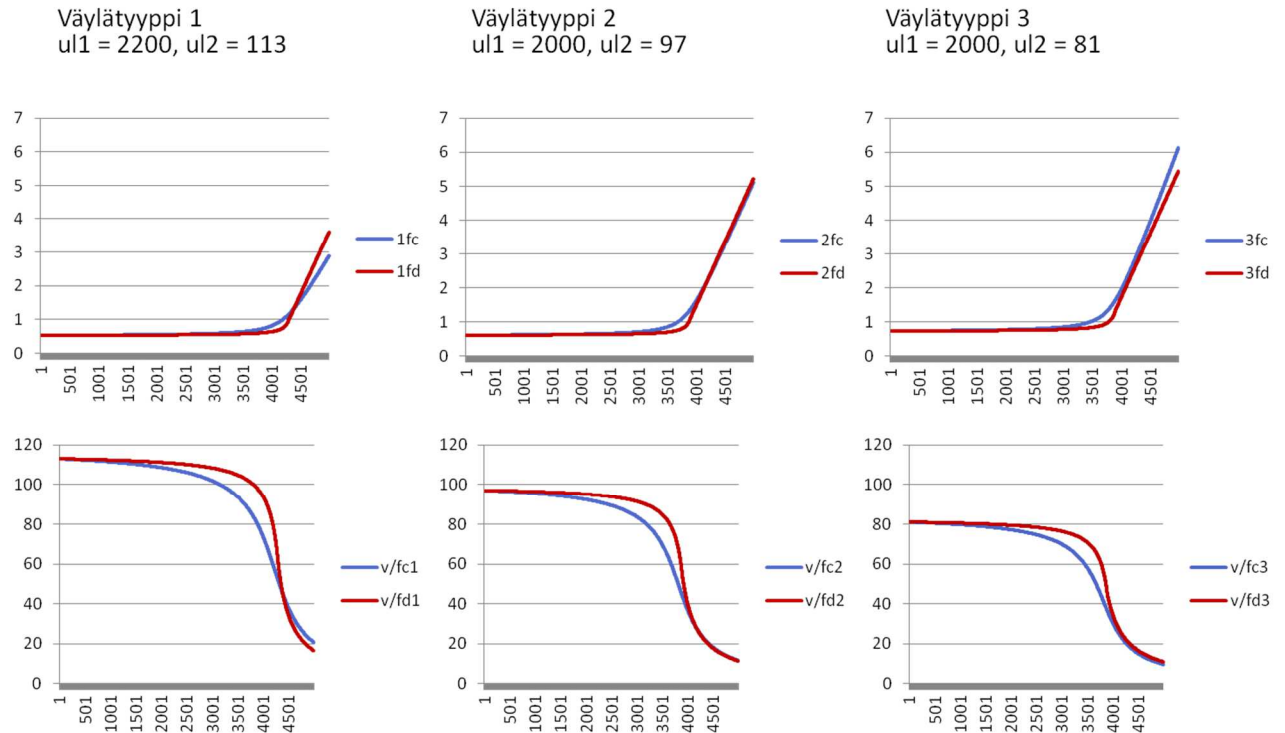
Pesonen, Hannu & Lahelma, Harri (1994). *Nopeus-liikennemääräfunktioiden muodostaminen LAM-aineistosta*. Tielaitoksen selvityksiä 22/1994.

Spiess, Heinz (1990). *Technical Note—Conical Volume-Delay Functions*. Transportation Science 24(2):153-158.

Vihervuori, Marko (2012). *Matkanopeudet HSL-alueella 2011*. HSL:n julkaisuja 25/2012.

Liite 1. Konikaalifunktioiden sovitukset

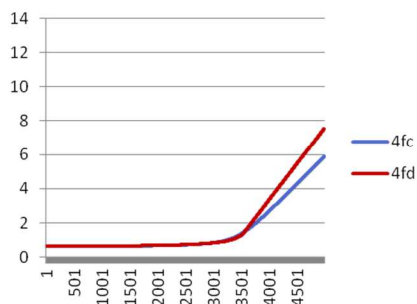
Kuvissa 25...29 on esitetty konikaalifunktioiden sovitukset funktioittain eri väylätyypeille. Kuvien ylemmällä kaaviorivillä on esitetty väylätyyppien liikennemäärä-matka-aikakuvaaja, jossa vaaka-akselilla on liikennemäärä [ajon/h] ja pystyakselilla matka-aika (minuuttia). Alemmalla kaaviorivillä on väylätyyppien liikennemäärä-ajonopeuskuvaaja, jossa vaaka-akselilla on liikennemäärä [ajon/h] ja pystyakselilla ajonopeus [km/h].



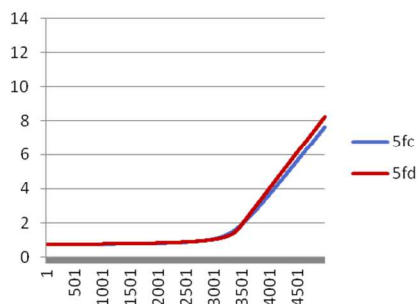
Kuva 25. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $vdf = 1$, fc = konikaalifunktio, fd = pituusriippuvainen funktio.

E

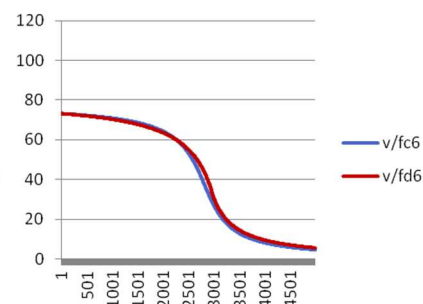
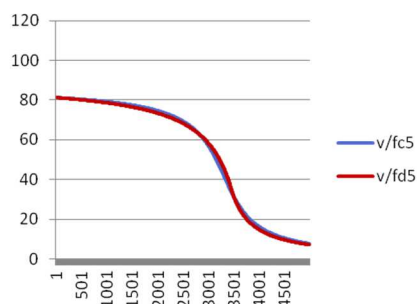
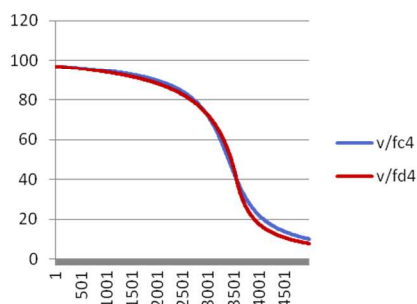
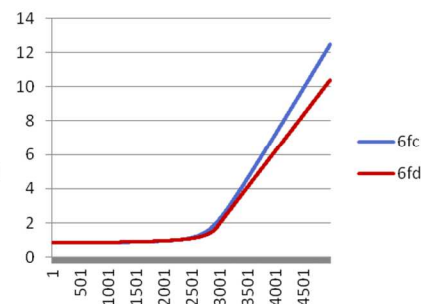
Väylätyyppi 4
ul1 = 1900, ul2 = 97



Väylätyyppi 5
ul1 = 1850, ul2 = 81

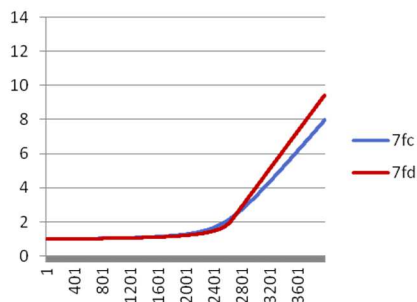


Väylätyyppi 6
ul1 = 1600, ul2 = 73

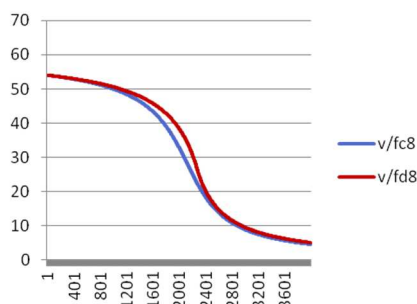
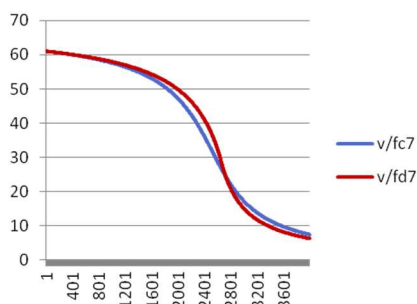
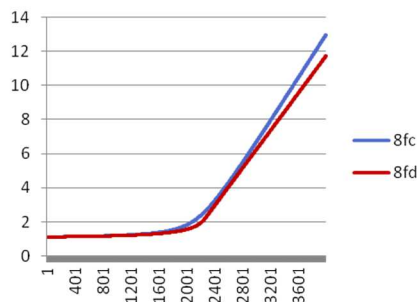


Kuva 26. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $vdf = 2$, fc = konikaalifunktio, fd = pituusriippuvainen funktio.

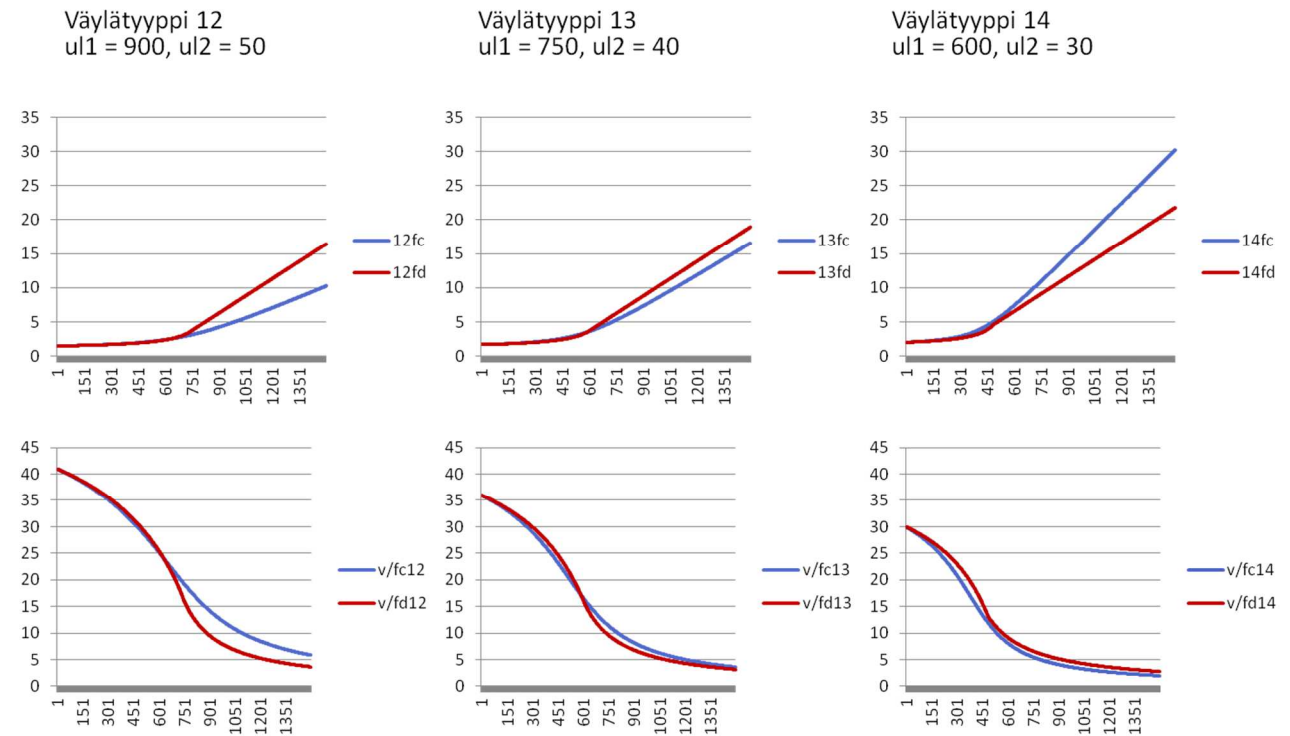
Väylätyyppi 7
ul1 = 1450, ul2 = 61



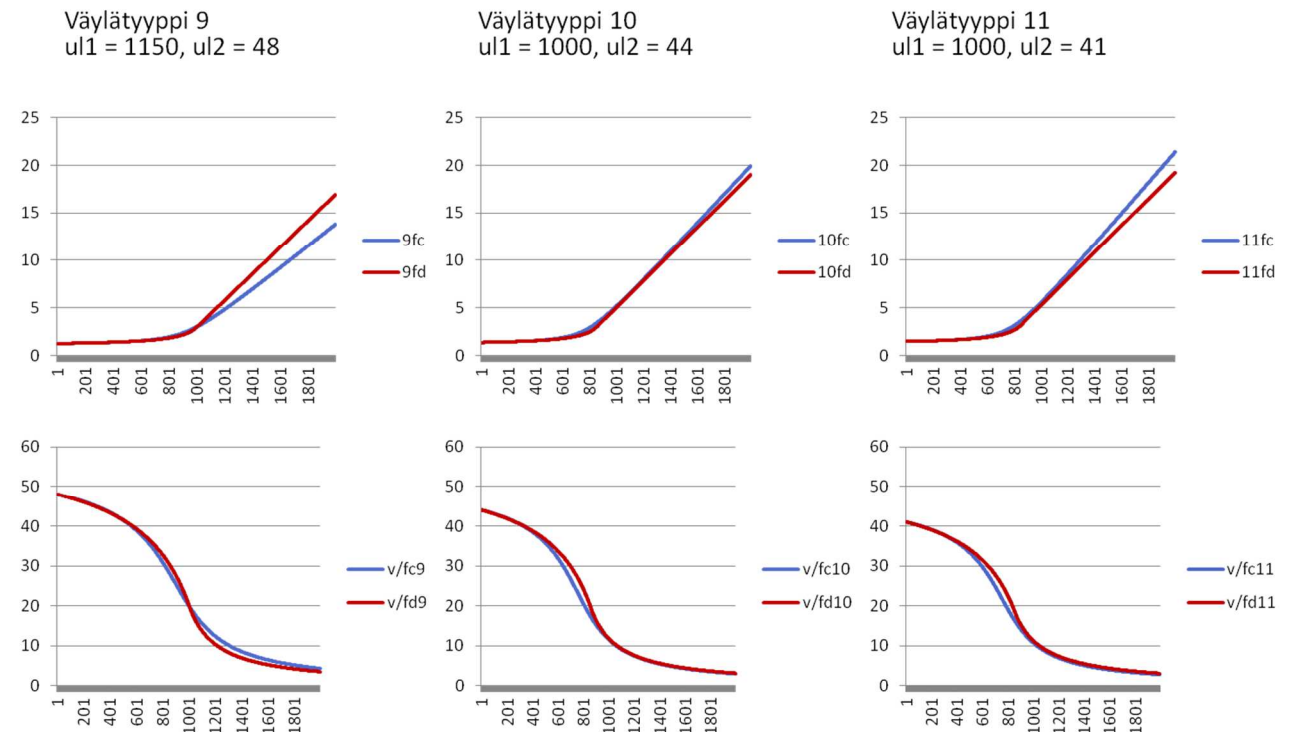
Väylätyyppi 8
ul1 = 1250, ul2 = 54



Kuva 27. Konikaalifunktioiden sovitukset, kun $vdf = 3$, fc = konikaalifunktio, fd = pituusriippuvainen funktio.



Kuva 28. Konikaalifunktioiden sovitus, kun $vdf = 4$, fc = konikaalifunktio, fd = pituusriippuvainen funktio.

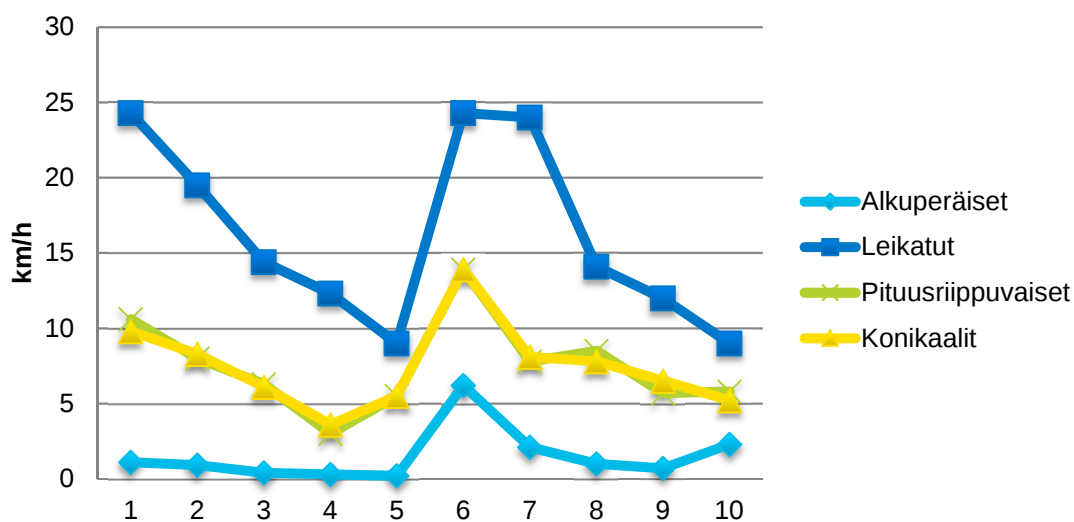


Kuva 29. Konikaalifunktioiden sovitus, kun $vdf = 5$, fc = konikaalifunktio, fd = pituusriippuvainen funktio.

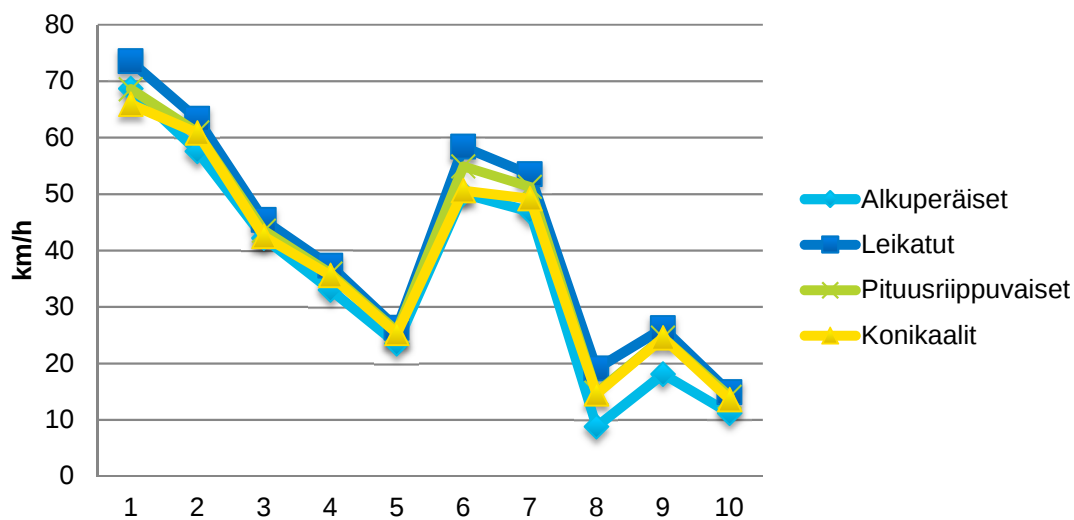
E

Liite 2. Ajonopeus-, suorite- ja liikennemäärävertailua

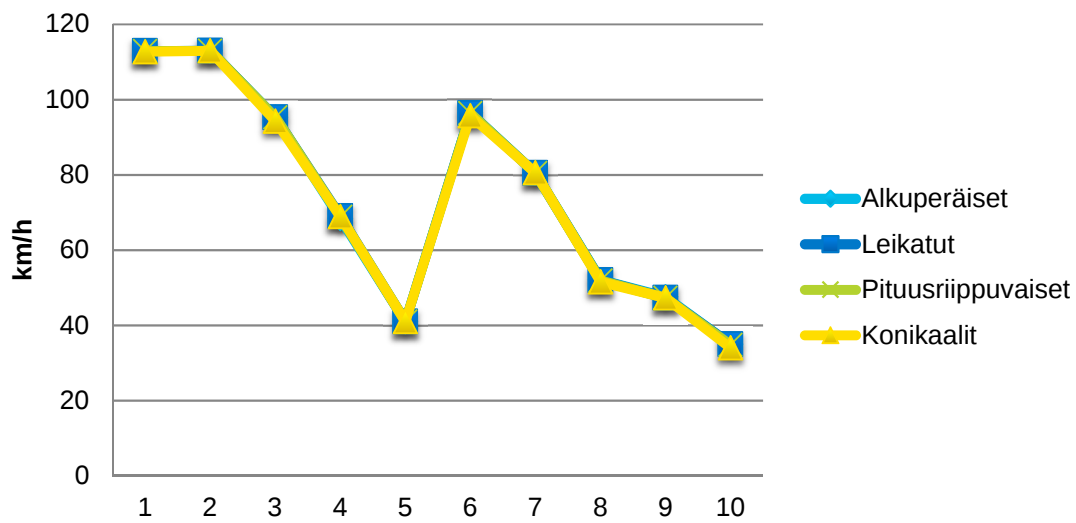
Kuvissa 30...32 on esitetty linkeille muodostuvat minimi- keski- ja maksiminopeudet funktioittain worst case -skenaariossa, jossa nykyverkolle on sijoitettu vuoden 2035 aamuhuipputunnin liikennetarve. Kuvassa 33 on esitetty linkeillä muodostuva aikasuorite ja kuvassa 34 matkasuorite funktioittain. Kuvassa 35 on esitetty linkeille muodostuvat keskimääräiset liikennemäärät ja kuvassa 36 maksimiliikennemäärät funktioittain.



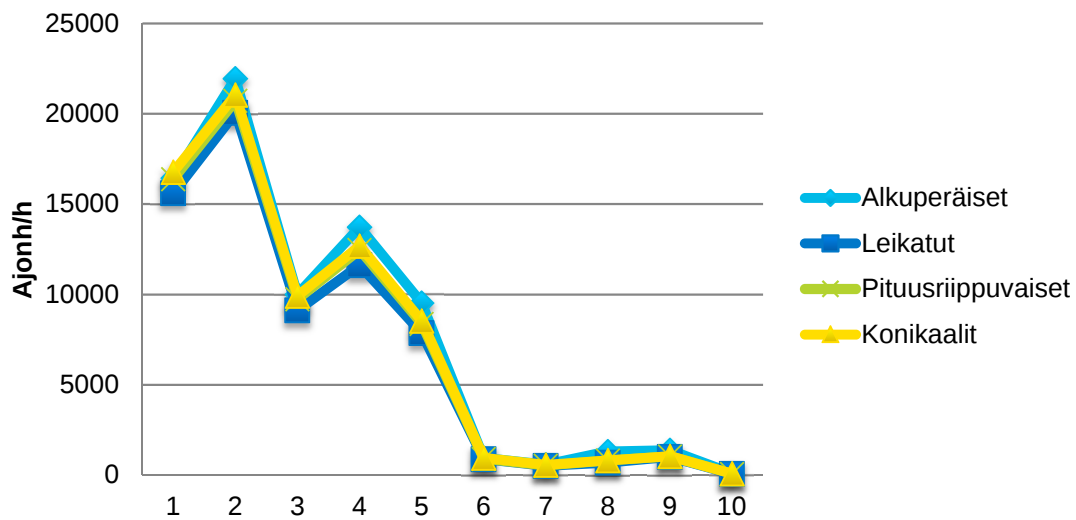
Kuva 30. Miniminopeudet funktioittain.



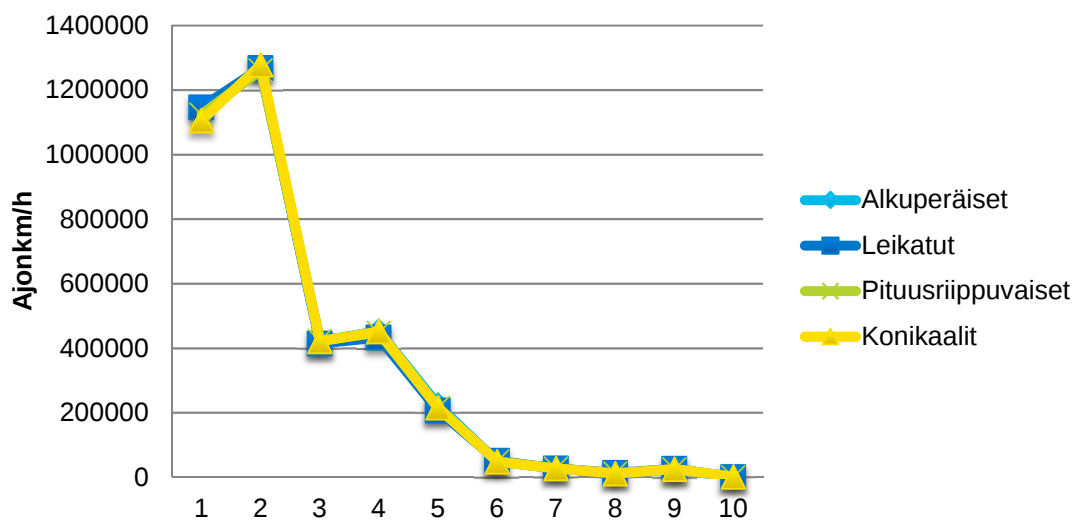
Kuva 31. Keskinopeudet funktioittain.



Kuva 32. Maksiminopeudet funktioittain.

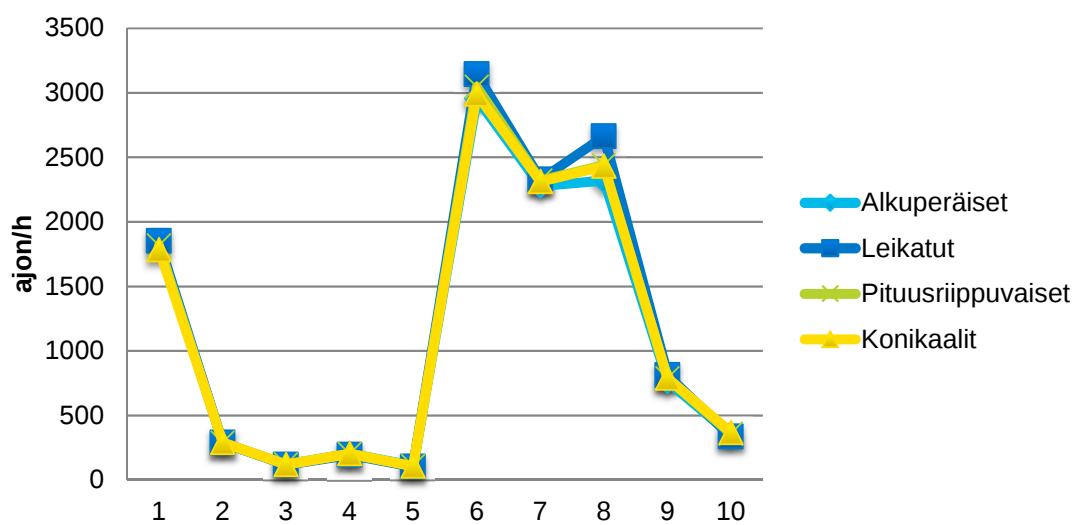


Kuva 33. Aikasuoritteet funktioittain.

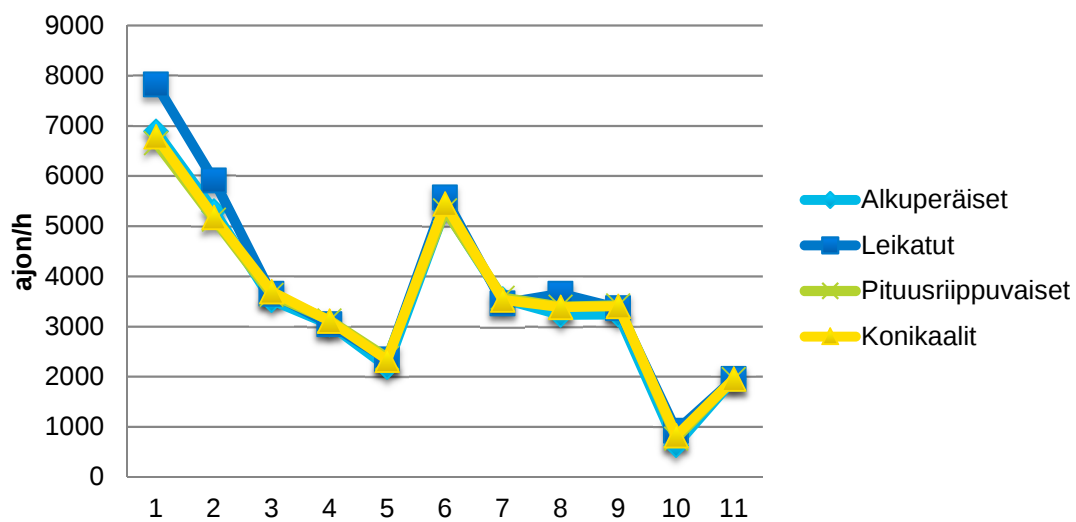


Kuva 34. Matkasuoritteet funktioittain.

E



Kuva 35. Keskimääräiset liikennemäärät funktioittain.



Kuva 36. Maksimiliikennemäärät funktioittain.

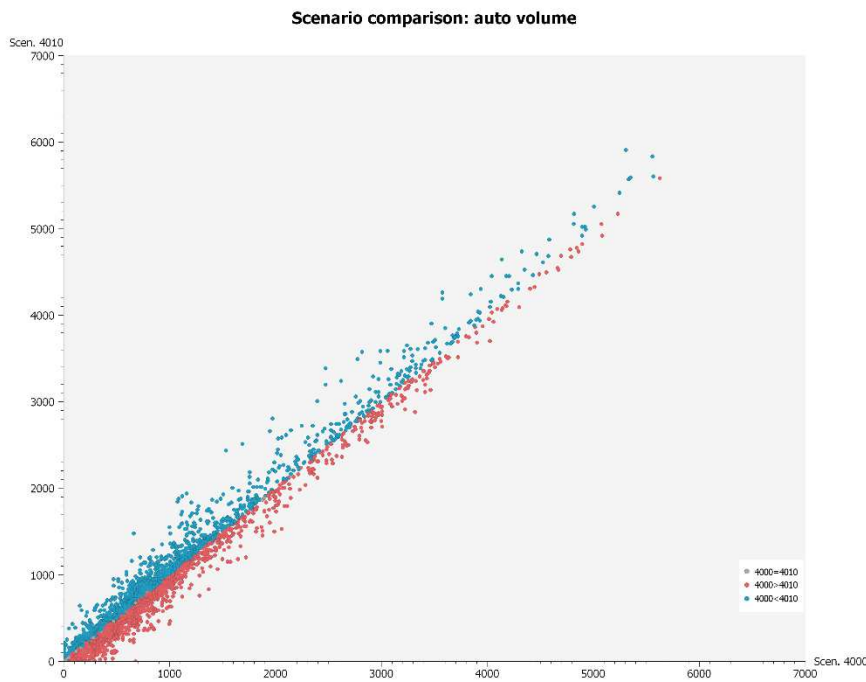
Liite 3. Verkkotason analyysit – hajontakuvaajat

Kuvissa 37...41 on vertailtu linkkikohtaisia liikennemääriä eri funktiotyyppejä käytettäessä. Kuvissa 42...46 on vertailtu linkkikohtaisia ajonopeuksia eri funktiotyyppejä käytettäessä. Kuvissa 47...51 on vertailtu linkkikohtaisia matka-aikoja eri funktiotyyppejä käytettäessä. Kaikki tarkastelut koskevat worst case -skenaariota, jossa vuoden 2035 aamuhuipputunnin liikennetarve on sijoitettu nykyverkolle.

Kuvien 37...51 akseleilla näkyvät skenaarioiden numerot ovat:

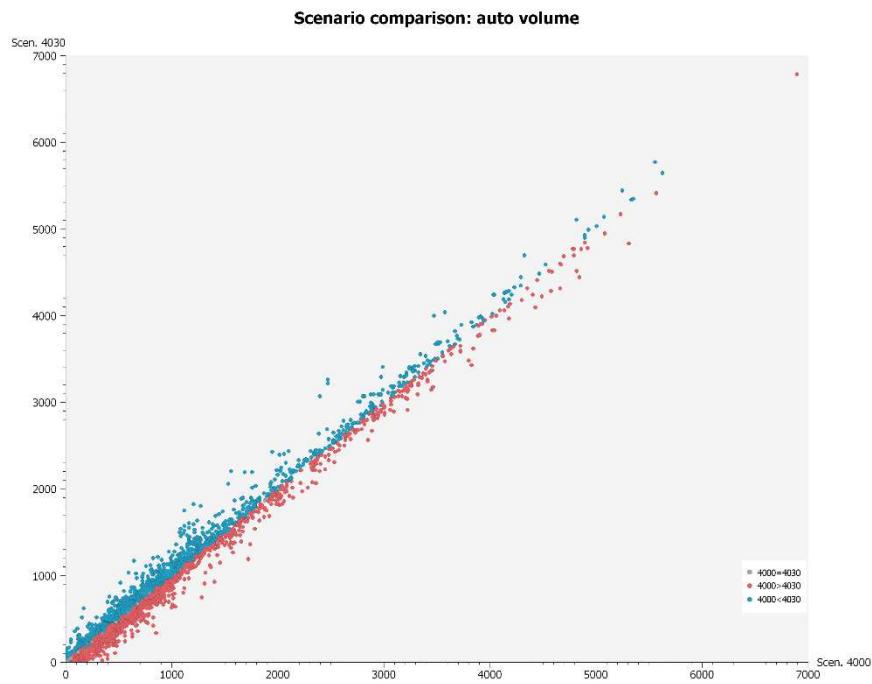
- 4000 alkuperäiset (pituusriippumattomat) funktiot
- 4010 leikatut funktiot
- 4020 konikaalifunktiot
- 4030 pituusriippuvaiset funktiot.

Linkkikohtaiset liikennemäärät

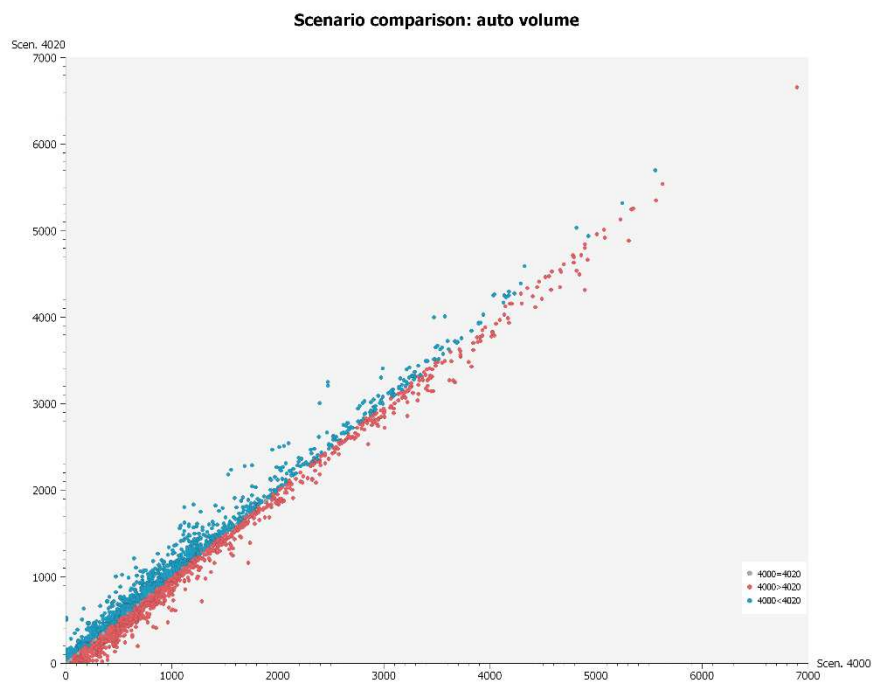


Kuva 37. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla leikatut funktiot [ajon/h].

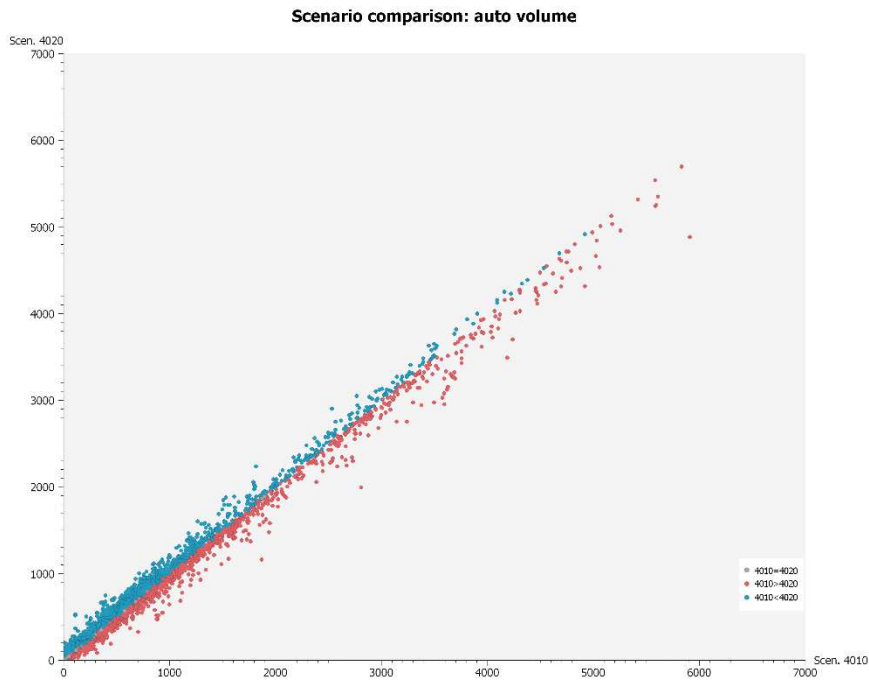
E



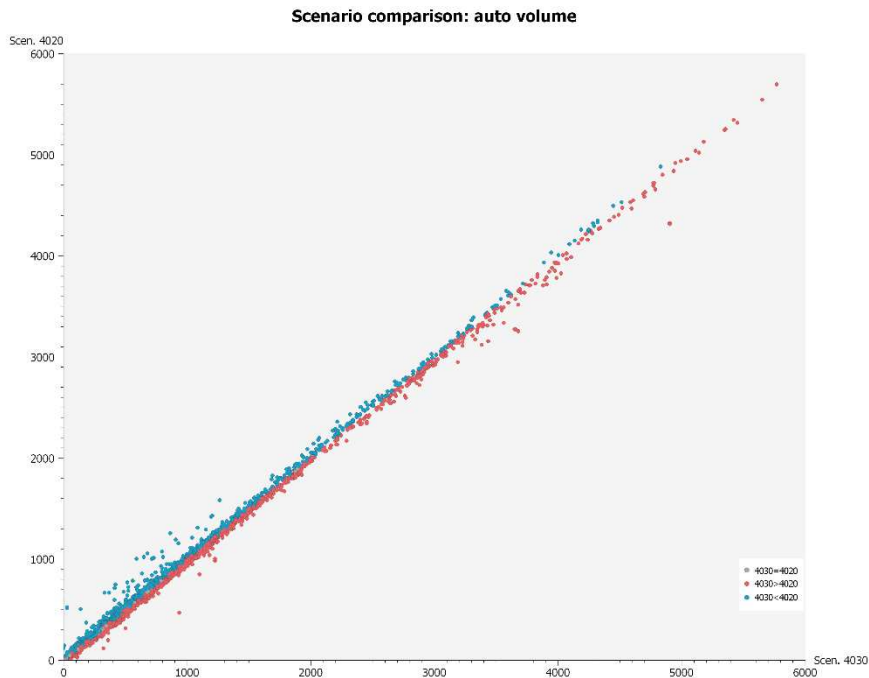
Kuva 38. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla pituusriippuvaiset funktiot [ajon/h].



Kuva 39. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [ajon/h].



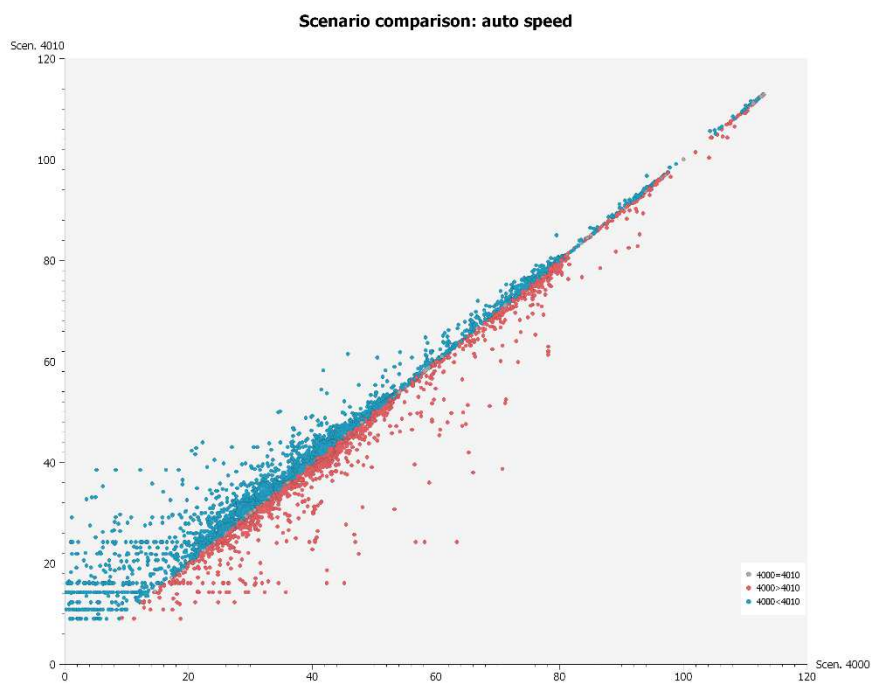
Kuva 40. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla leikatut funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [ajon/h].



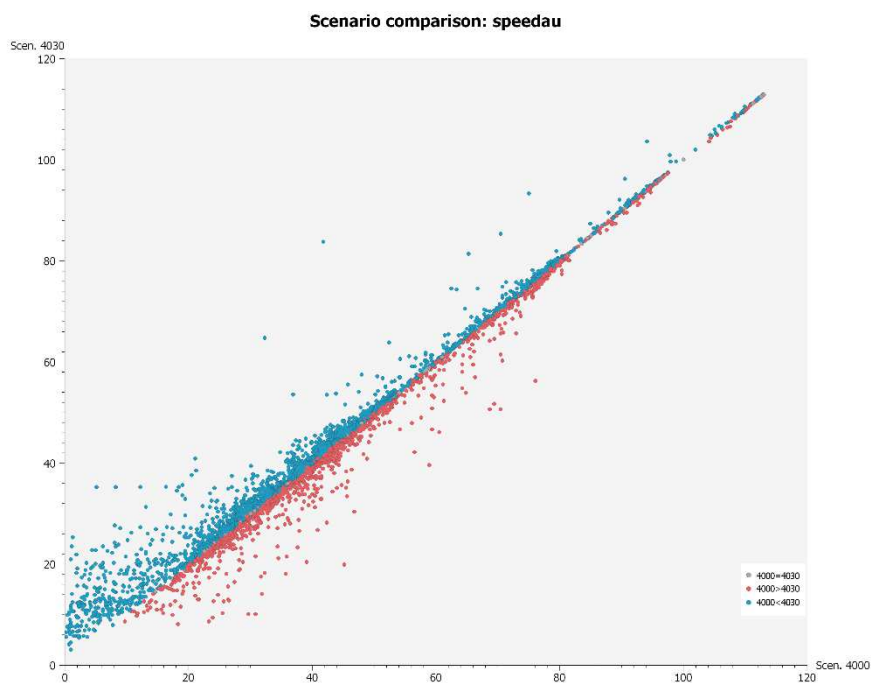
Kuva 41. Linkkikohtaisten liikennemäärien vertailu, vaaka-akselilla pituusriippuvaliset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [ajon/h].

E

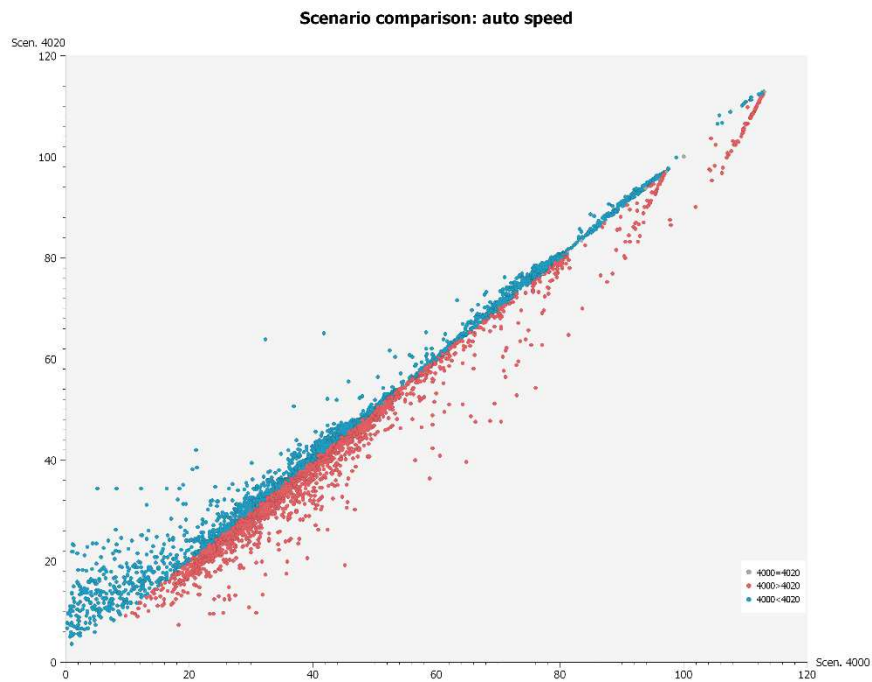
Linkkikohtaiset ajonopeudet



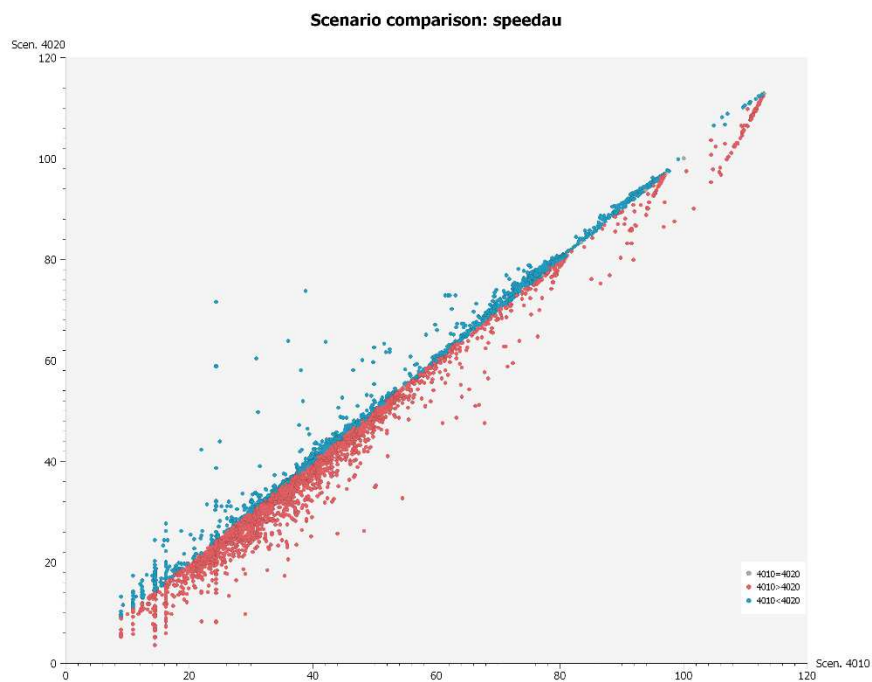
Kuva 42. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla leikatut funktiot [km/h].



Kuva 43. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla pituusriippuvaiset funktiot [km/h].

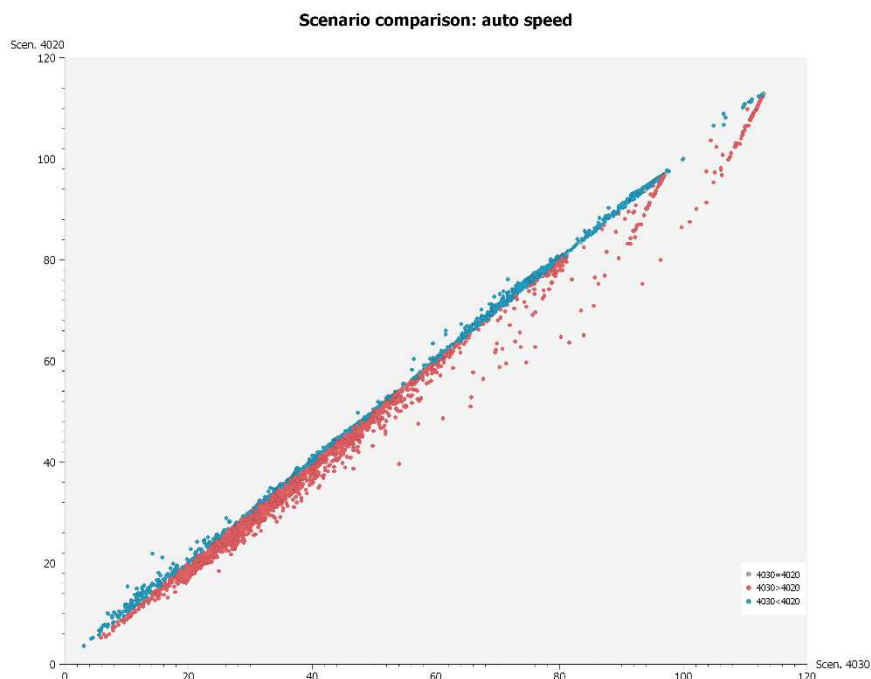


Kuva 44. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [km/h].



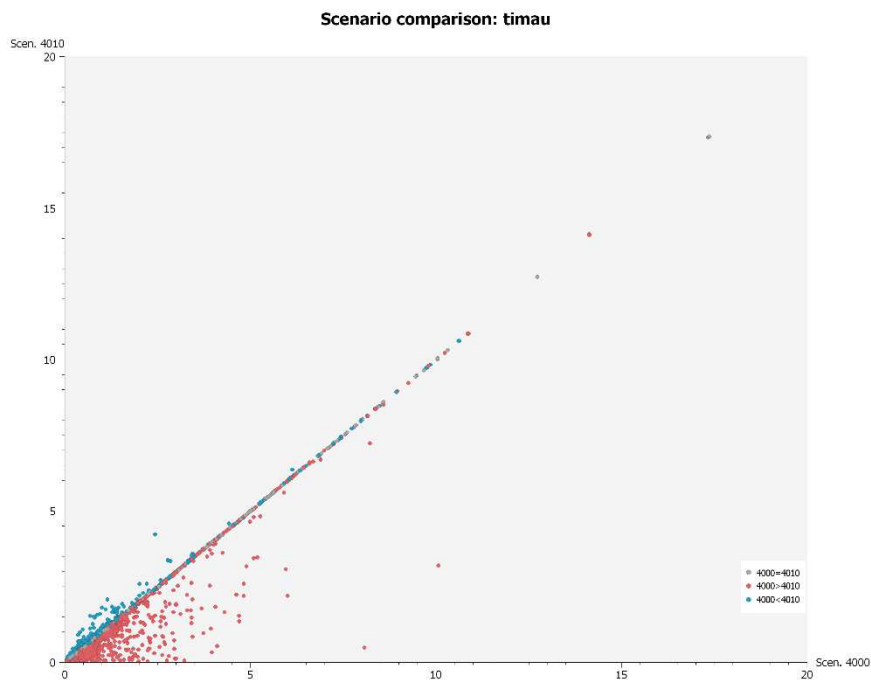
Kuva 45. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla leikatut funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot [km/h].

E

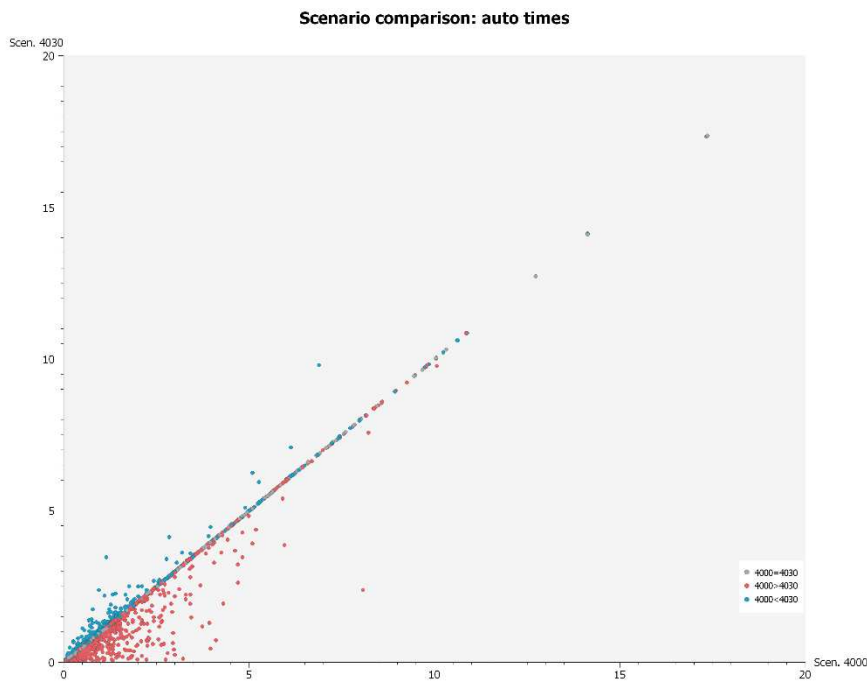


Kuva 46. Linkkikohtaiset ajonopeudet, vaaka-akselilla pituusriippuvaset funktiot, pystyakselilla koonikaalifunktiot [km/h].

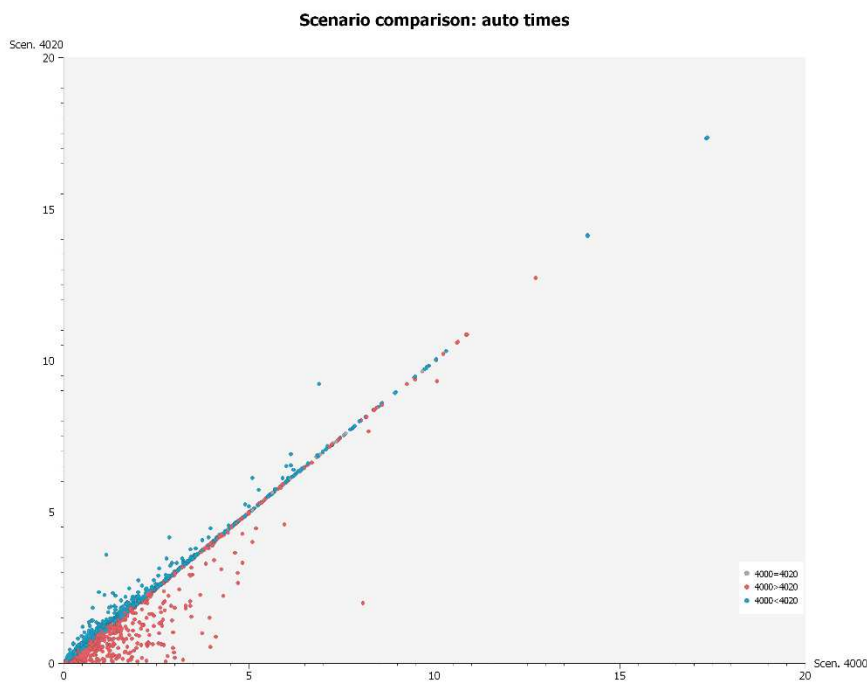
Linkkikohtaiset matka-ajat



Kuva 47. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla leikatut funktiot (min).

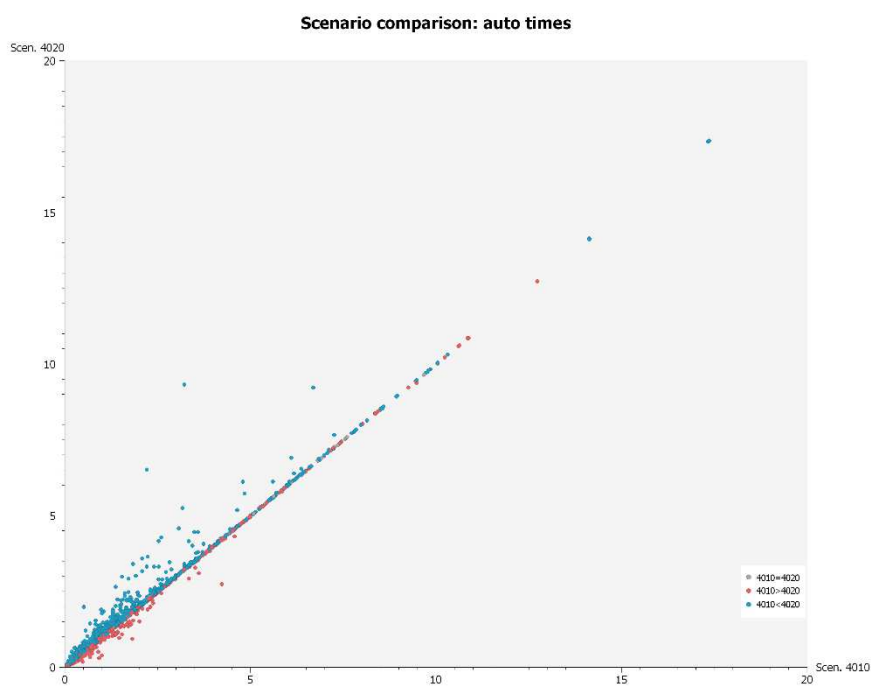


Kuva 48. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla pituusriippuvaiset funktiot (min).

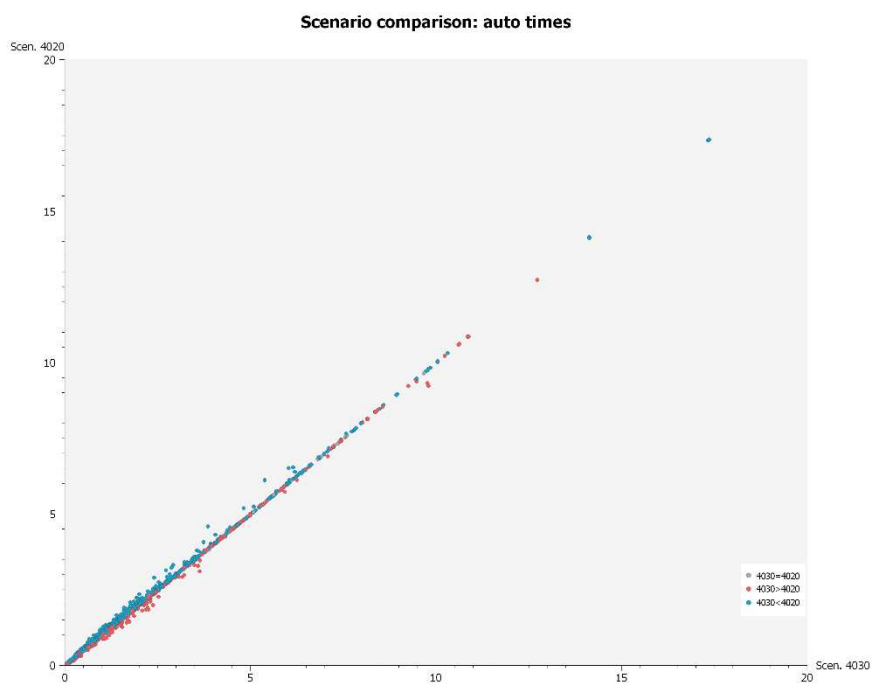


Kuva 49. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla alkuperäiset funktiot, pystyakselilla konikaalifunktio (min).

E



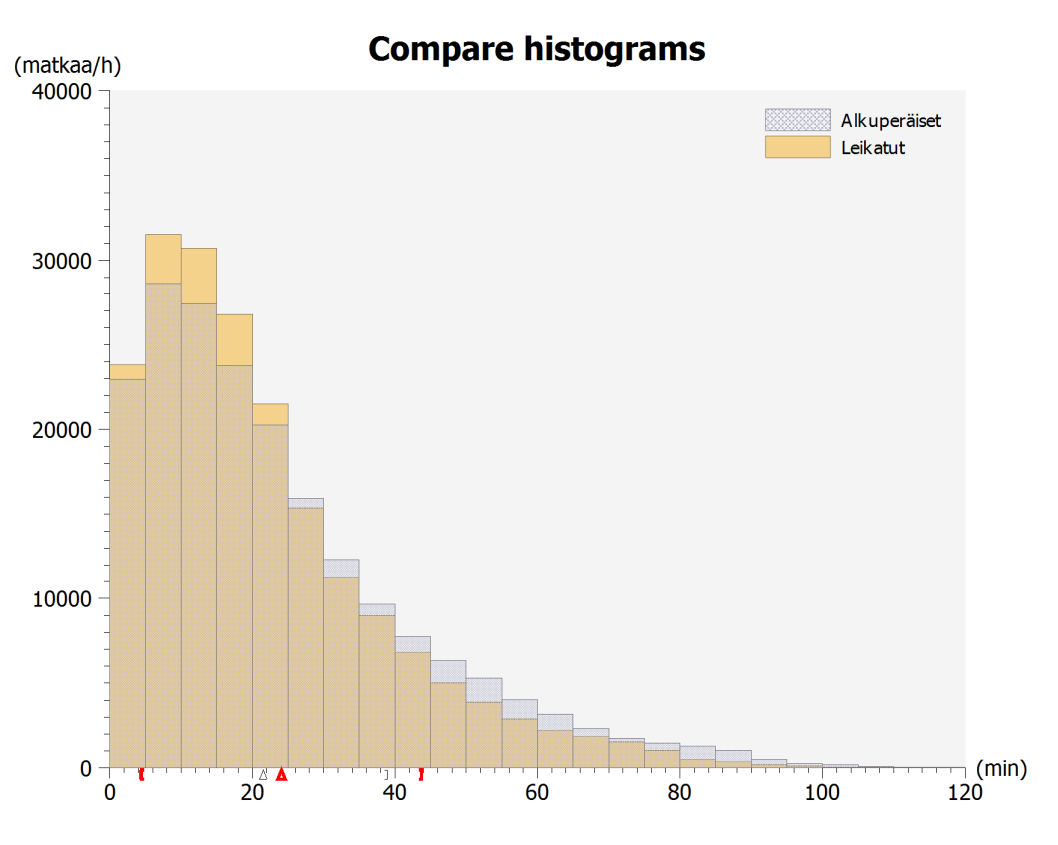
Kuva 50. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla leikatut funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot (min).



Kuva 51. Linkkikohtaiset matka-ajat, vaaka-akselilla pituusriippumattomat funktiot, pystyakselilla konikaalifunktiot (min).

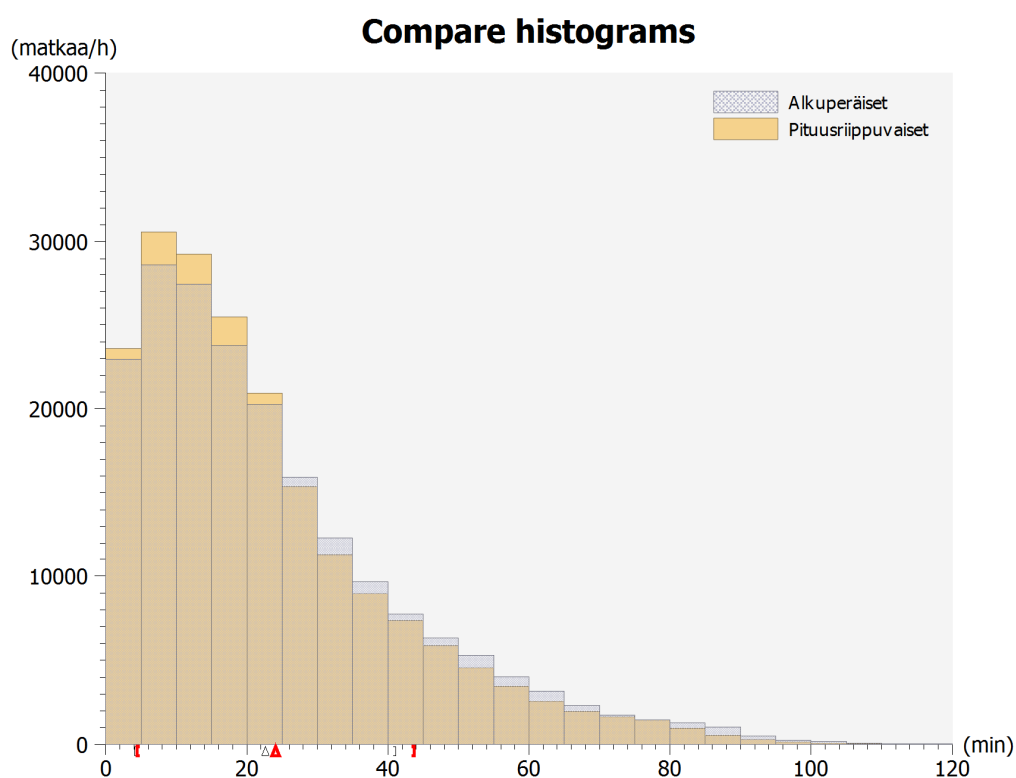
Liite 4. Matka-aikajakaumien vertailu

Kuvissa 52...57 on vertailtu matka-aikajakaumia eri funktiotyyppejä käytettäessä. Vaaka-akselilla on matkan kesto (minuuttia) ja pystyakselilla matkojen määrä [ajon/h]. Vertailut koskevat worst case -skenaariota.

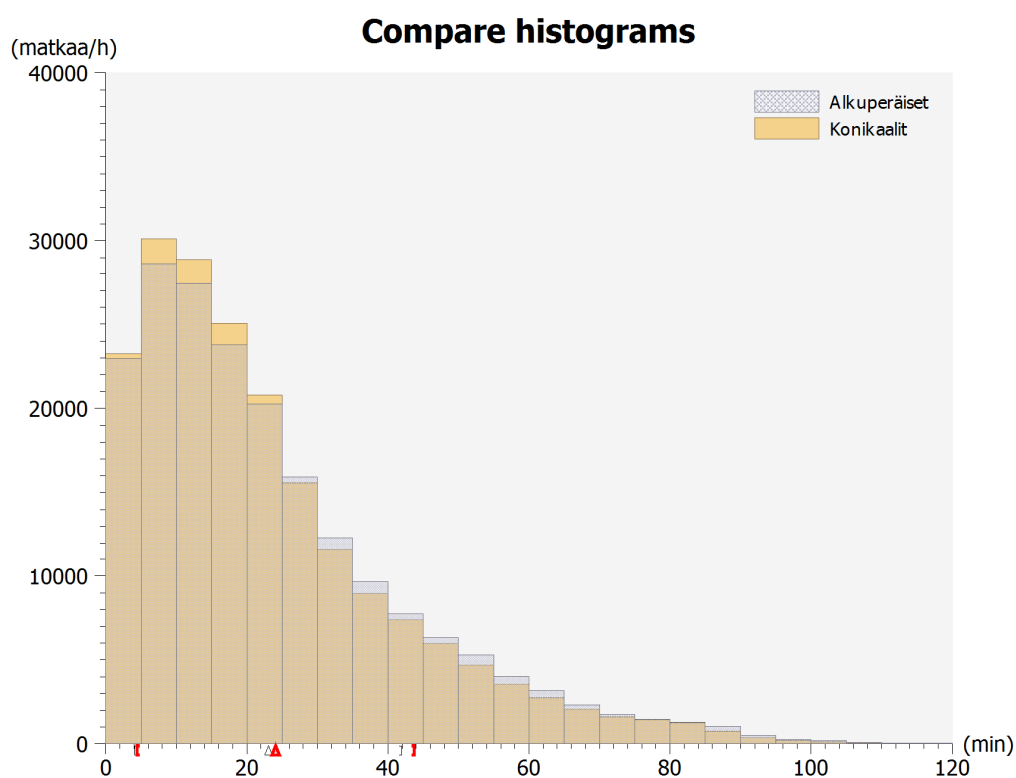


Kuva 52. Matka-aikajakaumien vertailu, alkuperäiset ja leikatut funktiot.

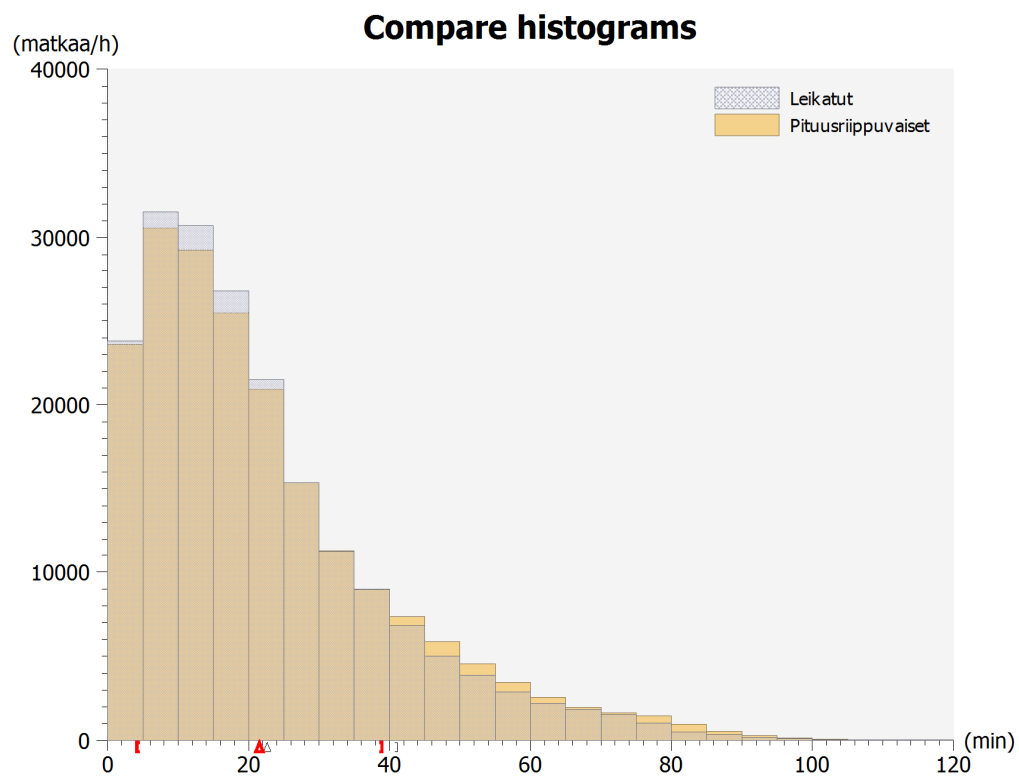
E



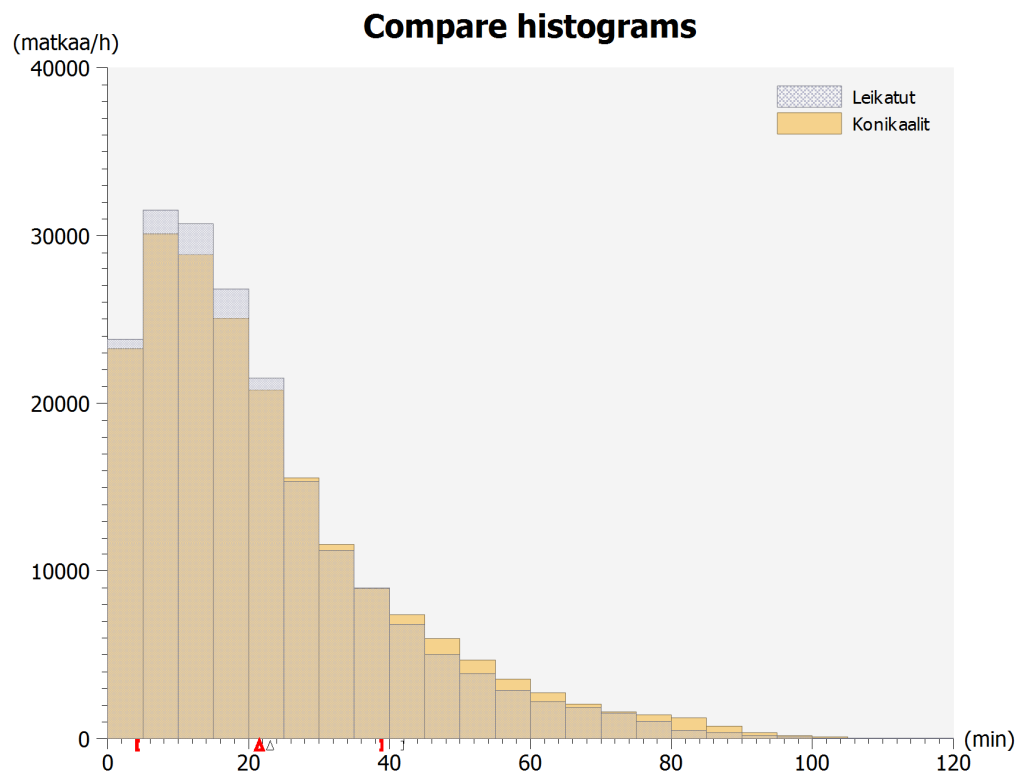
Kuva 53. Matka-aikajakaumien vertailu, alkuperäiset ja pituusriippuvaiset funktiot.



Kuva 54. Matka-aikajakaumien vertailu, alkuperäiset ja konikaalifunktiot.

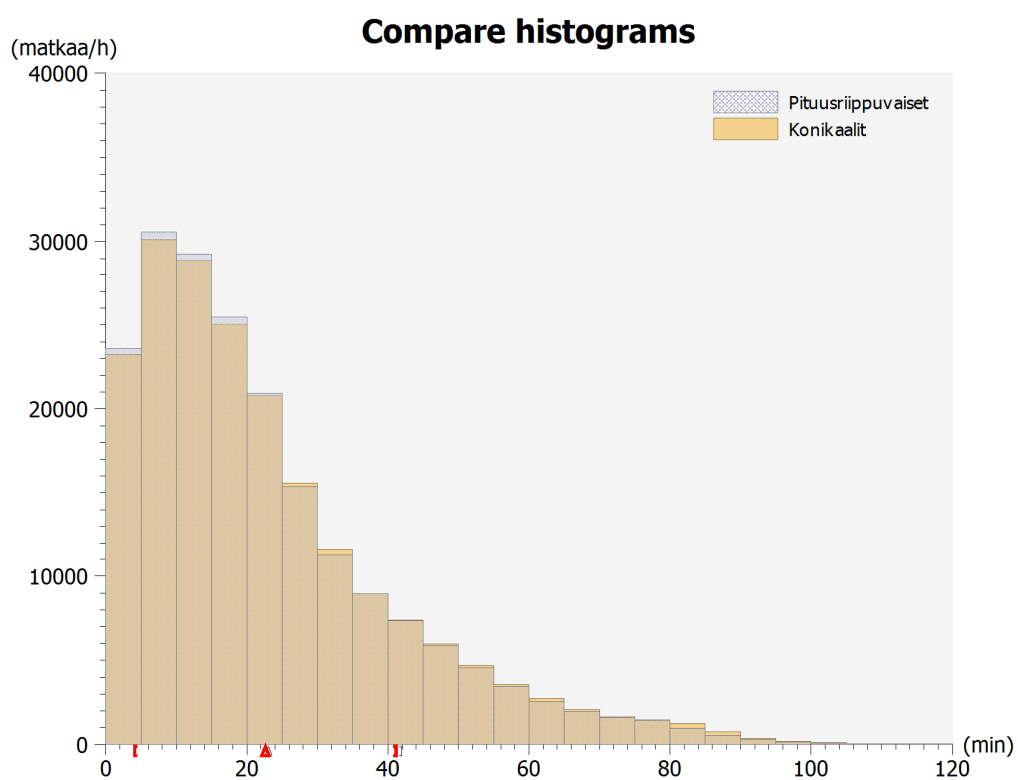


Kuva 55. Matka-aikajakaumien vertailu, leikatut ja pituusriippuvaiset funktiot.



Kuva 56. Matka-aikajakaumien vertailu, leikatut ja konikaalifunktiot.

E



Kuva 57. Matka-aikajakaumien vertailu, pituusriippuvaiset ja konikaalifunktiot.

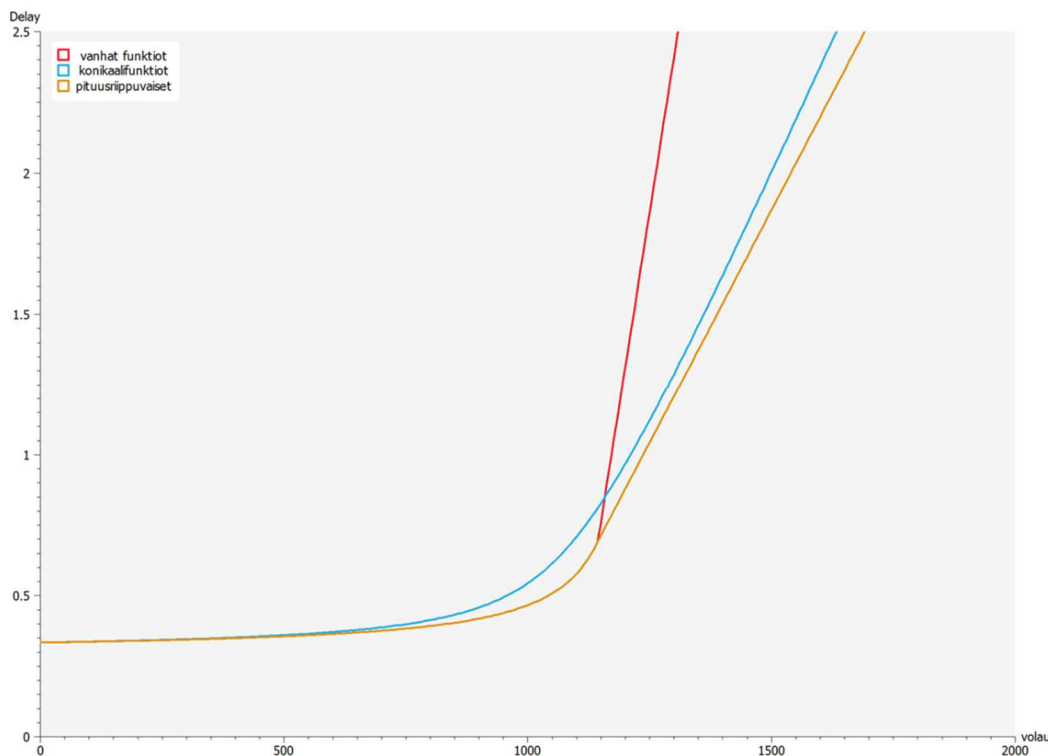
Liite 5. Funktiotyypit, aika-liikennemääräkuvaajat

Kuvat 58...60 esittävät työssä tarkasteltavien funktioiden aika-liikennemääräkuvaajat erilaisilla linkkien pituuksilla. Esimerkkinä toimivan linkin muut parametrit (vdf , $ul1$, $ul2$) on pidetty samoina kaikissa kuvissa. Kuvissa esiintyvä seliteteksti ”vanhat funktiot” tarkoittaa alkuperäisiä funktioita.

Kun linkin pituus on 0.3 km (kuva 58), alkuperäisten funktioiden kuvaaja kasvaa jyrkästi, kun kapasiteetipiste on saavutettu. Pituusriippuvaisilla funktioilla ja konikaalifunktioilla kasvu on tässä tapauksessa hitaampaa. Tämä ominaisuus selittää miksi alkuperäisillä funktioilla matka-aika kasvaa lyhyillä linkeillä suureksi.

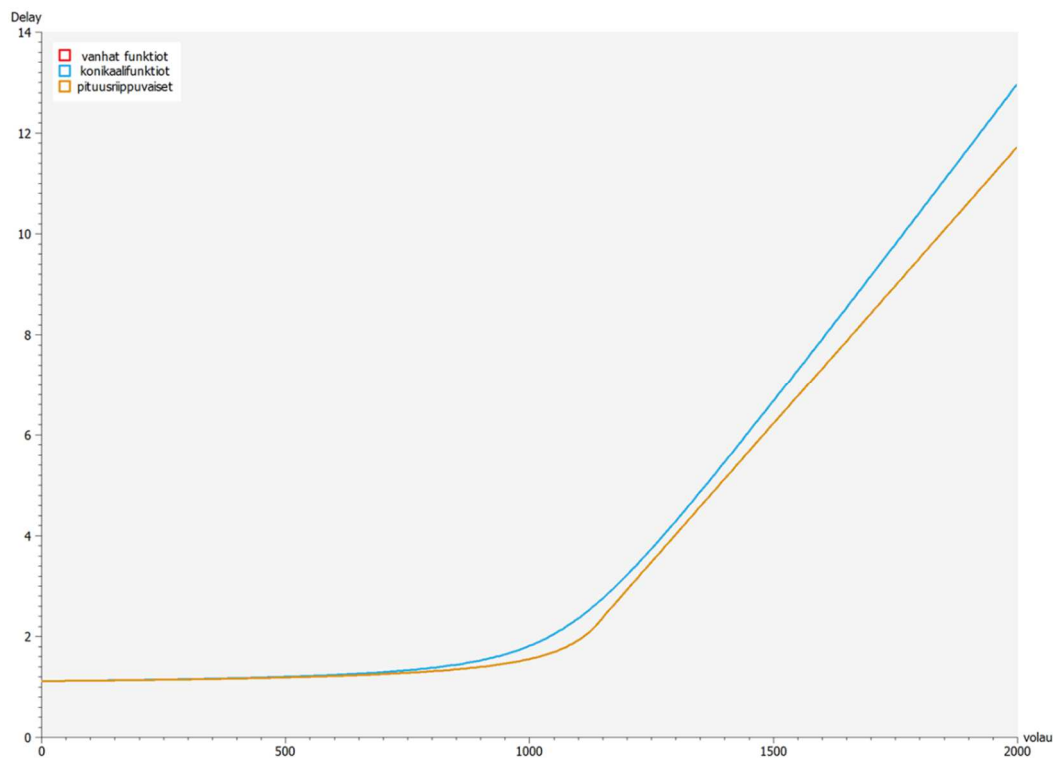
Kilometrin pituisella linkillä (kuva 59) alkuperäisten funktioiden kuvaaja yhtyy pituusriippuvaisten funktioiden kuvaajaan.

Kolmen kilometrin pituisella linkillä (kuva 60) alkuperäisten funktioiden kuvaaja kasvaa kapasiteettipisteen jälkeen hitaammin kuin pituusriippuvaisilla ja konikaalifunktioilla. Viivytykset alkuperäisillä funktioilla ovat siis pitkillä linkeillä pienempiä kuin pituusriippuvaisilla funktioilla ja konikaalifunktioilla.

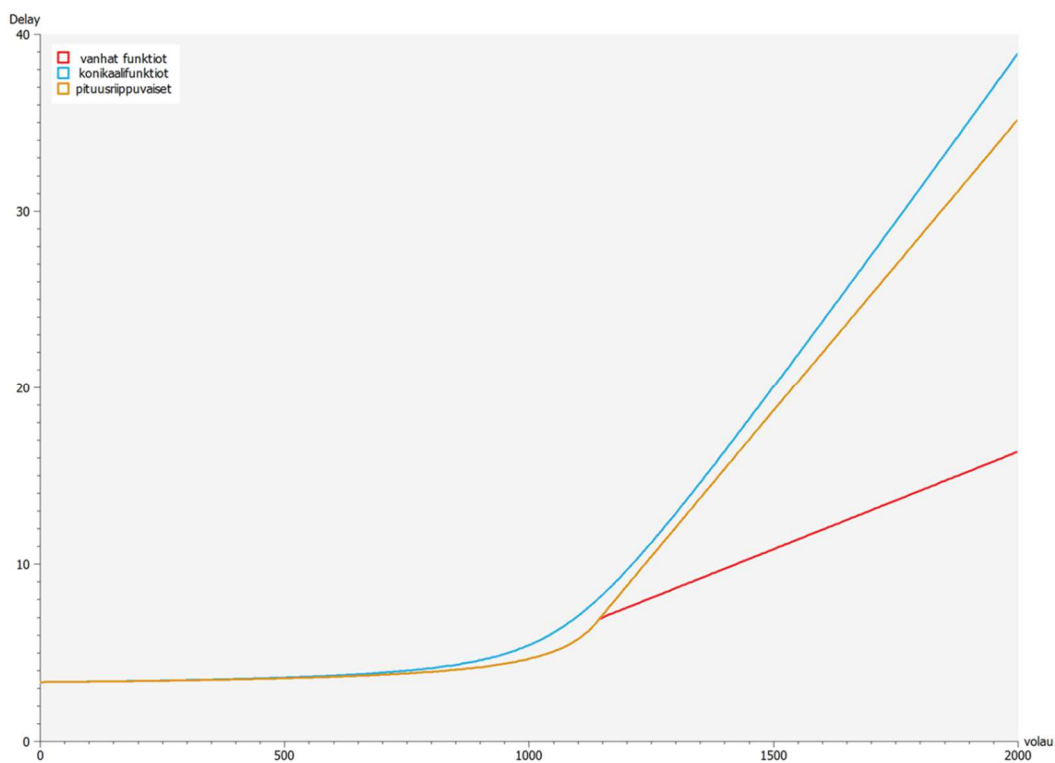


Kuva 58. Aika-liikennemääräkuvaaja, $vdf = 3$, $ul1 = 1250$, $ul2 = 54$, $length = 0.3$.

E



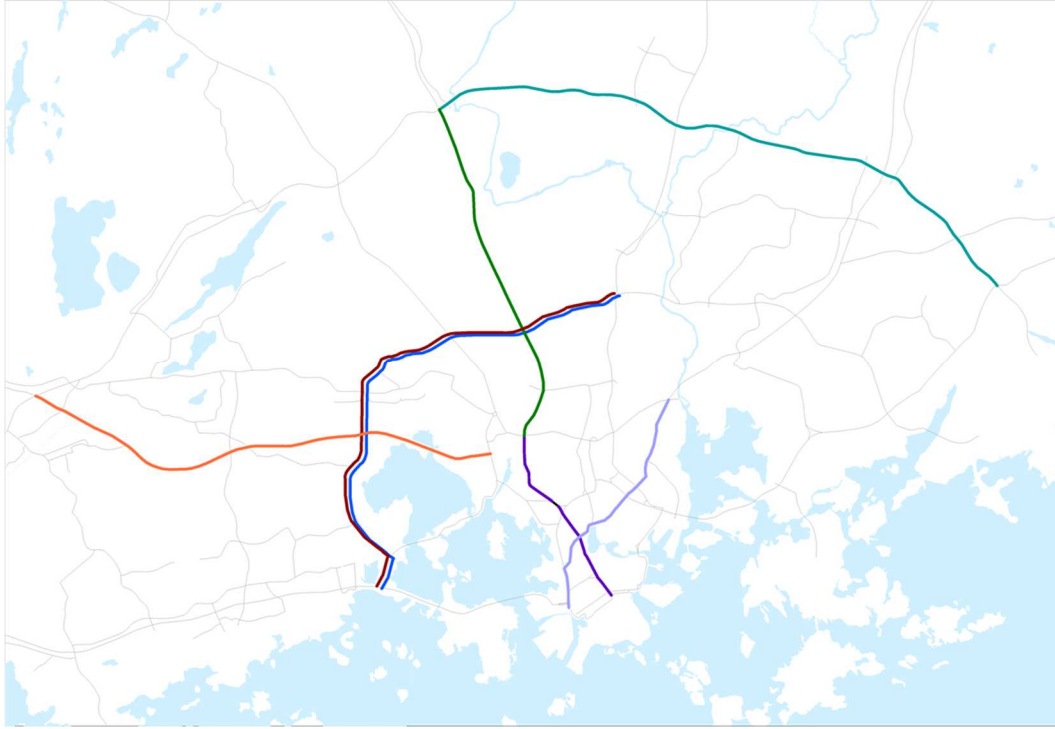
Kuva 59. Aika-liikennemääräkuvaaja, $vdf = 3$, $ul1 = 1250$, $ul2 = 54$, $length = 1$.



Kuva 60. Aika-liikennemääräkuvaaja, $vdf = 3$, $ul1 = 1250$, $ul2 = 54$, $length = 3$.

Liite 6. Tarkastelussa käytetyt yhteysvälit

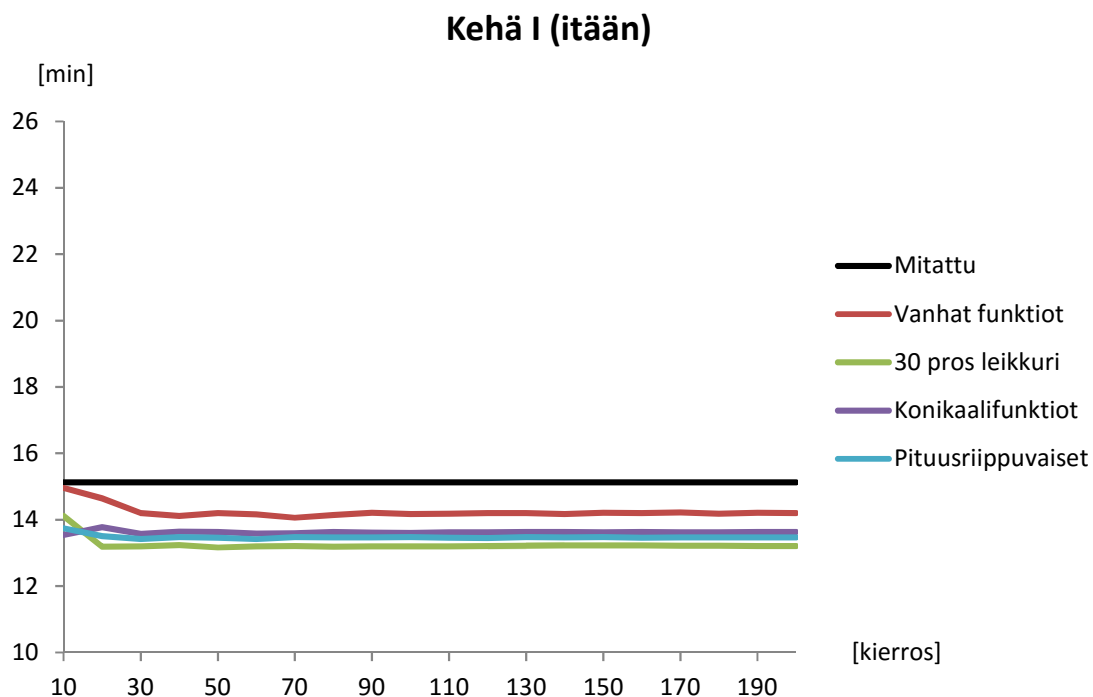
Kuvassa 61 esitetään yhteysväleittäisessä analyysissä käytetyt mittausreitit. Tarkasteltavat yhteysvälit on valittu siten että saatavilla on myös mitattuja havaintoja matka-ajasta. Mitatut matka-ajat ovat peräisin julkaisusta Matkanopeudet HSL alueella 2011 (Vihervuori 2012). Mitatut ajat on kerätty kelluvan auton menetelmällä ja jokaisen reitin otos sisältää 4...6 mittauksetta.



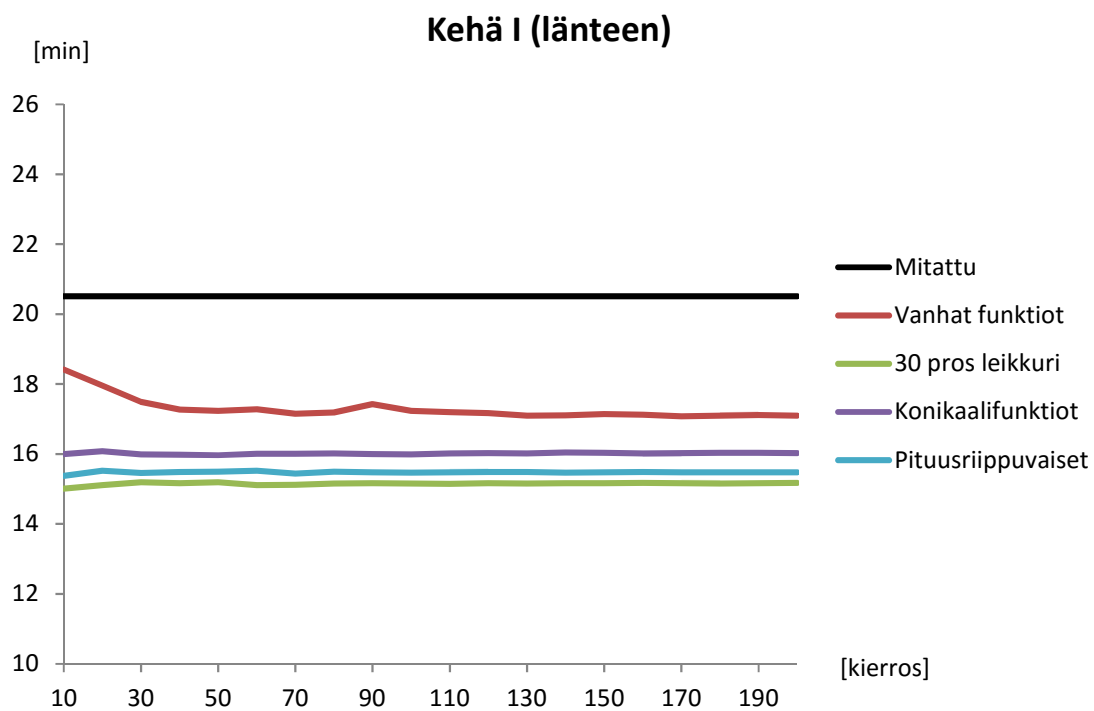
Kuva 61. Tarkasteluissa käytetyt mittausreitit.

Liite 7. Matka-ajat sijoittelussa yhteysväleittäin

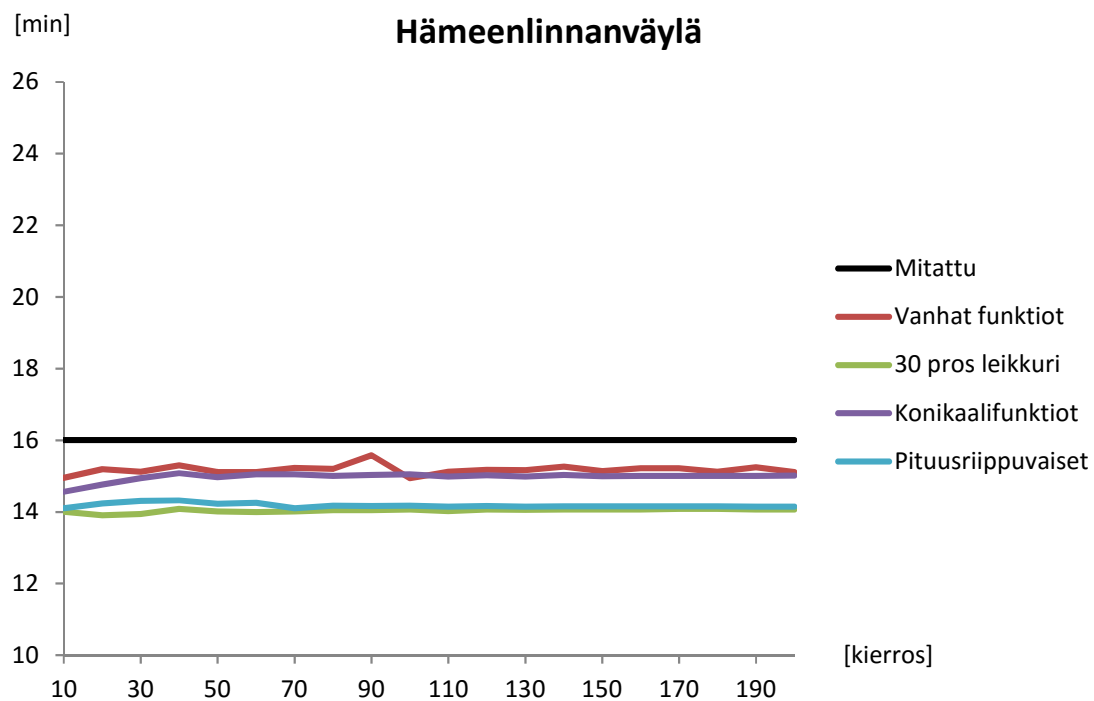
Kuvat 62...68 esittävät matka-aikoja yhteysväleittäin iteraatiokierrosten funktiona. Alkuperäisiin funktioihin on kuvateksteissä viitattu nimellä "Vanhat funktiot" ja leikattuihin funktioihin nimellä "30 pros leikkuri". Kuvissa on esitetty myös mitattu keskiarvo (Vihervuori 2012). Kuvia lukiessa on huomattava, että matka-aikojen hajonta mitatun keskiarvon ympärillä on suurta, eikä mitattua keskiarvoa siksi pidä tulkita todelliseksi tai "oikeaksi" ajaksi. Sijoittelu on tehty vuoden 2012 matriisilla, 200 iteraatiokierroksella ja nykyverkolla. Kuvaajien pystyakseli on katkaistu – esitettynä ovat matka-ajat välillä 10...26 minuuttia.



Kuva 62. Matka-ajat reitillä Kehä I (itään). Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.

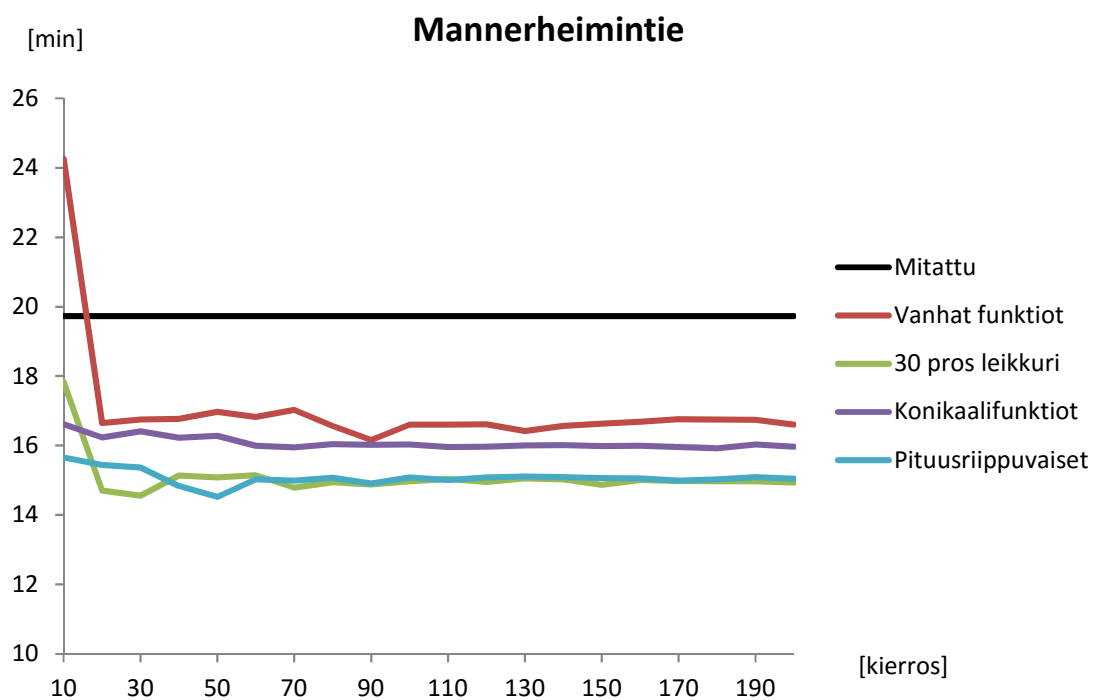


Kuva 63. Matka-ajat reitillä Kehä I (länteen). Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.

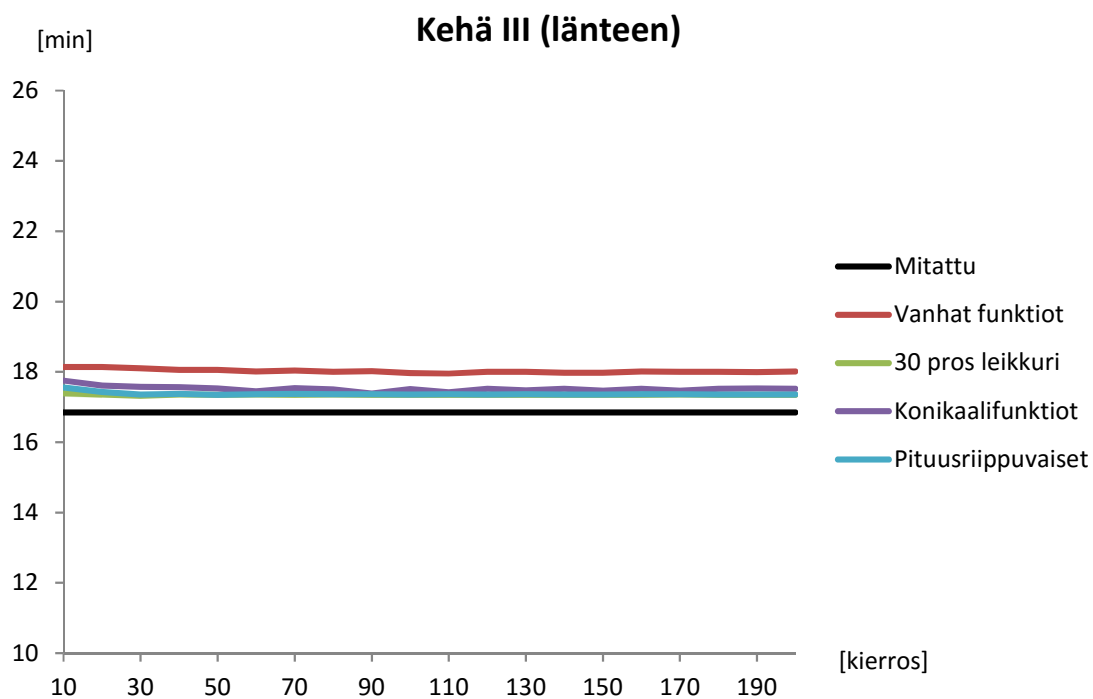


Kuva 64. Matka-ajat reitillä Hämeenlinnanväylä. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pysty-
akseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.

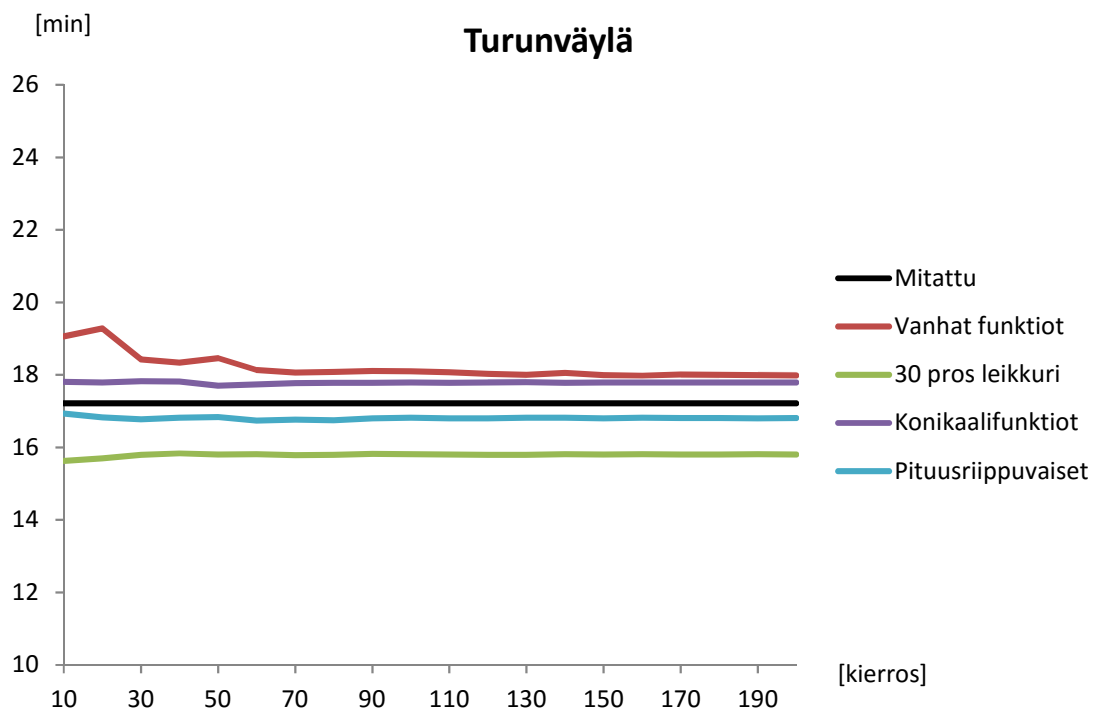
E



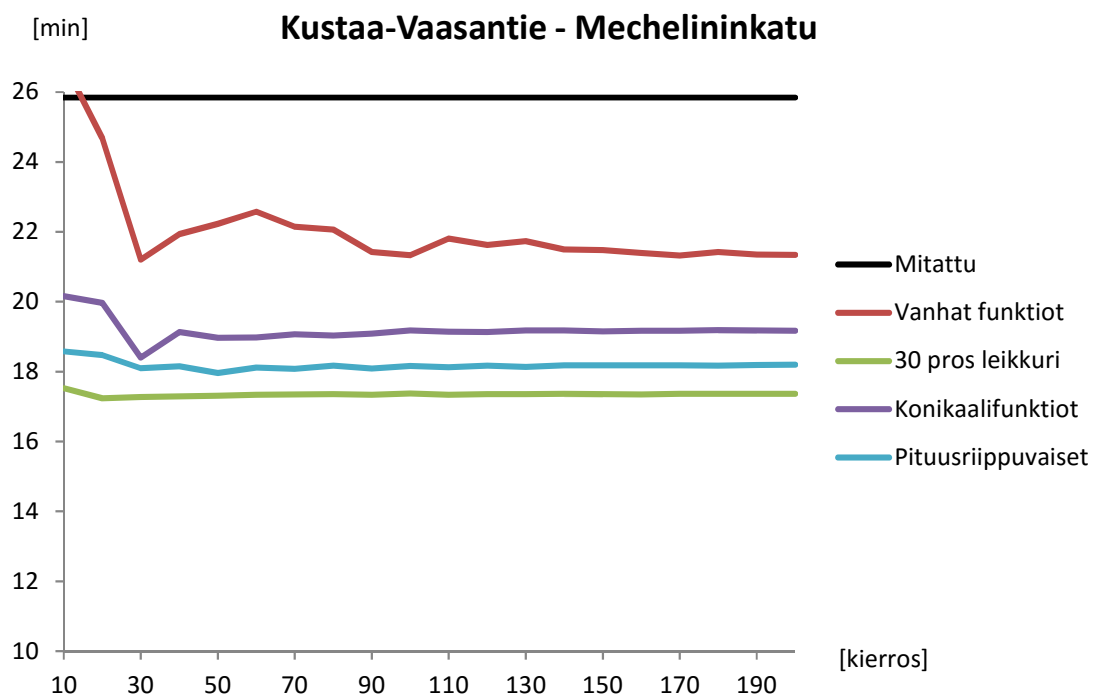
Kuva 65. Matka-ajat reitillä Mannerheimintie. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.



Kuva 66. Matka-ajat reitillä Kehä III (länteen) . Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.



Kuva 67. Matka-ajat reitillä Turunväylä. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.



Kuva 68. Matka-ajat reitillä Kustaa-Vaasantie - Mechelininkatu. Funktioiden välisten erojen esiintuomiseksi pystyakseli on katkaistu 10 minuutin kohdalta.

Liite 8. Matka-aikojen heilahtelu

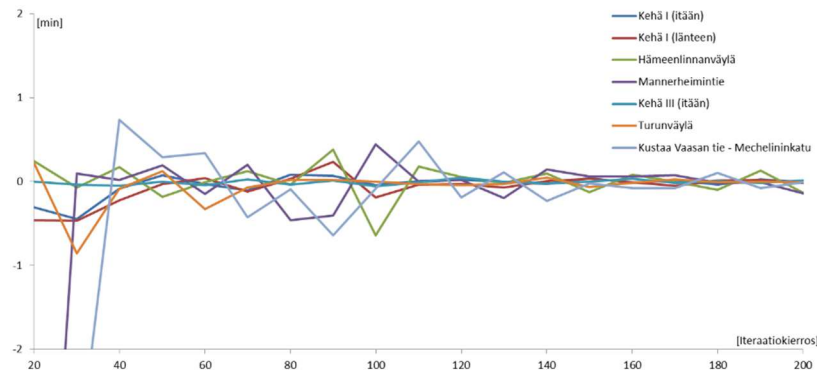
Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä kuvaa tasapainotilanteen vakautta sijoittelun edetessä. Yhteysväleittäisen analyysin matka-ajat kuvaavat melko hyvin sitä kuinka paljon matka-ajat heilahtelevat verkolla tehtävillä matkoilla. Yhteysvälin tarkastelu vähentää yksittäisten ruuhkautuvien linkkien vaikutusta kokonaismatka-aikaan ja kuvaa sitä heilahtelua, jolla on vaikutusta ennustemallien vastusmatriiseihin.

Analyysiin valittiin seitsemän ruuhkaiseksi tiedettyä yhteysväliä, joiden kokonaismatka-ajat tallennettiin 10 sijoittelukierroksen välein. Näin saatiin tietoa siitä millaisia matka-ajat ovat eri funktioilla ja kuinka matka-ajat pitkällä ruuhkaisilla yhteysväleillä heilahtelevat sijoittelun edetessä. Vaihtelua sijoittelukierrosten välillä tarkasteltiin vuoden 2035 kysyntämatriisilla ja nykyverkolla, joka edustaa 'worst case' skenaariota. Tässä skenaariossa liikenteen ruuhkautuminen on suurta ja matka-aikojen heilahtelu siksi voimakkainta.

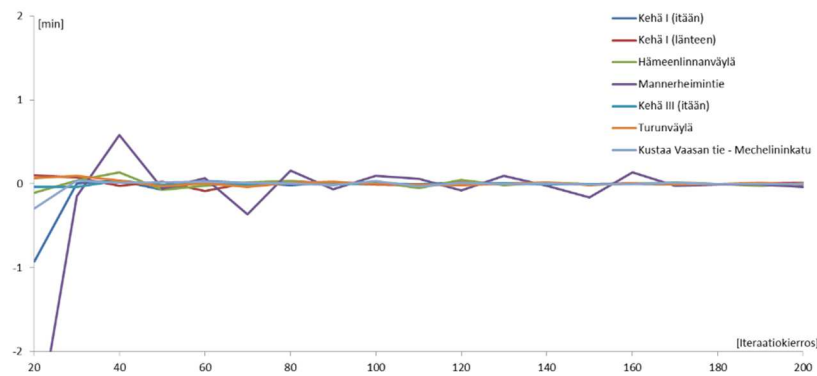
Matka-aikojen heilahtelua tutkittiin vertailemalla matka-aikoja 10 iteraatiokierroksen välein. 'Heilahtus' on laskettu erotuksena:

$$timau_k - timau_{k-10}, \quad (6)$$

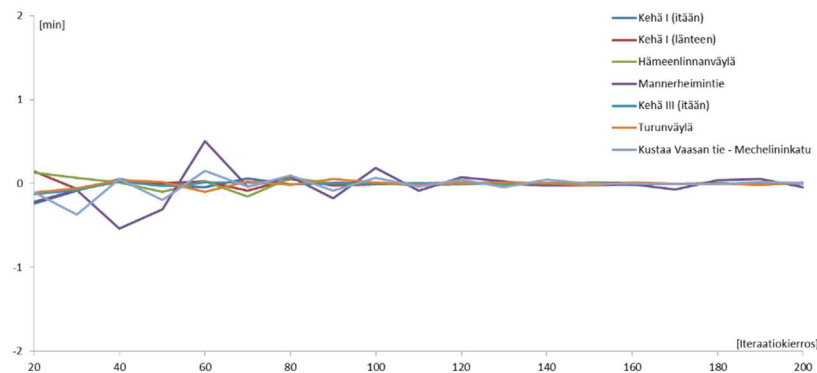
missä $k = \text{kierros}$ $k = 20, 30, 40 \dots$



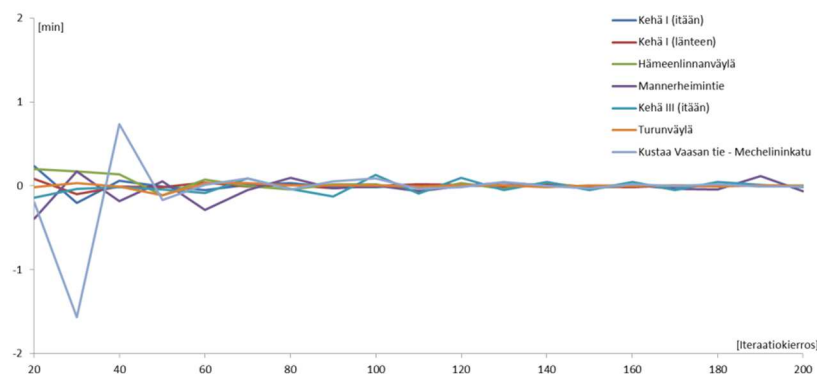
Kuva 69. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, alkuperäiset funktiot, 2012 matriisi.



Kuva 70. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, leikatut funktiot, 2012 matriisi.

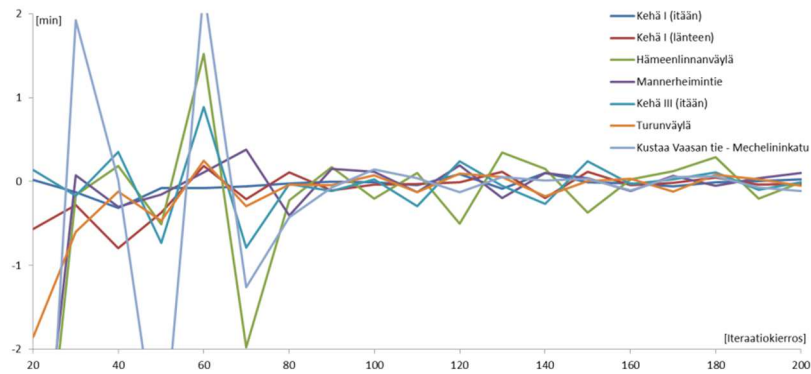


Kuva 71. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, pituusriippuvaiset funktiot, 2012 matriisi.

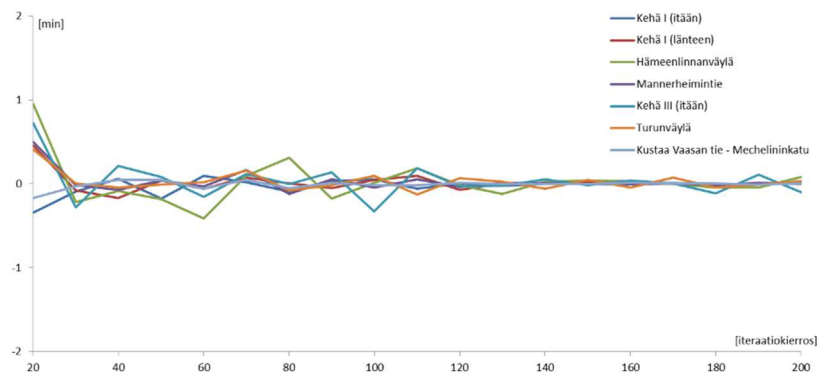


Kuva 72. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, konikaalifunktiot, 2012 matriisi.

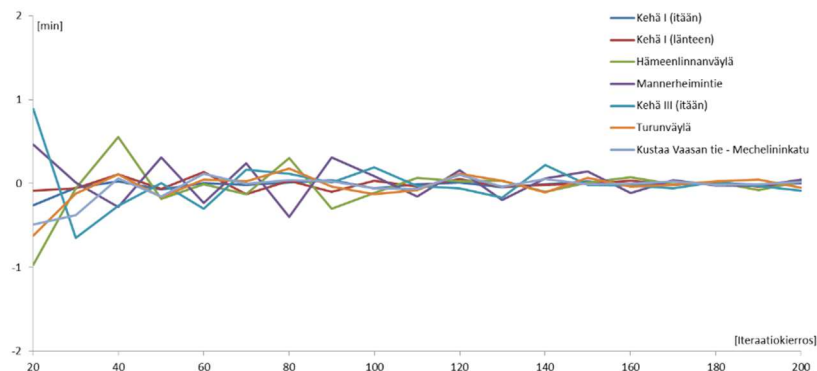
E



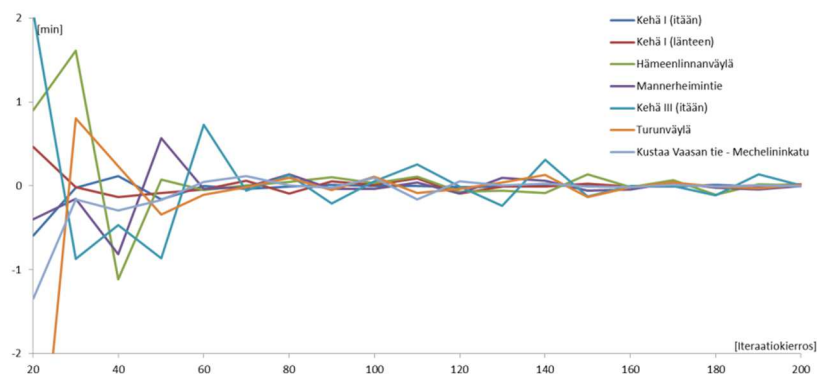
Kuva 73. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, alkuperäiset funktiot, 2035 matriisi.



Kuva 74. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, leikatut funktiot, 2035 matriisi.



Kuva 75. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, pituusriippuvaiset funktiot, 2035 matriisi.



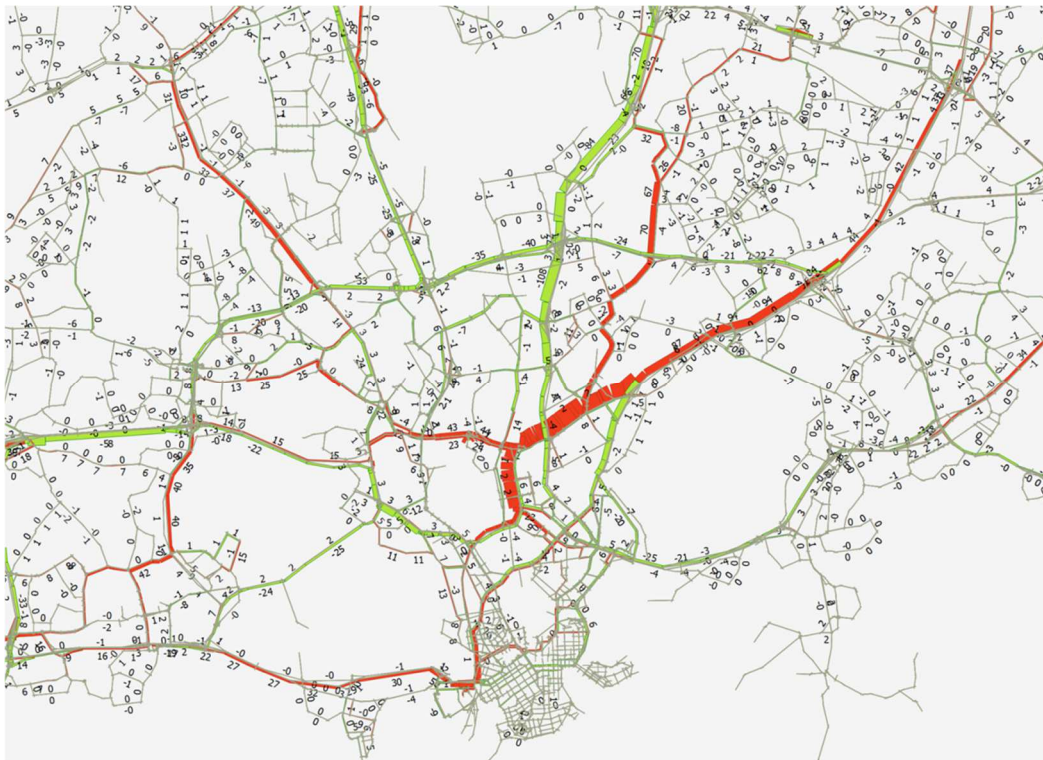
Kuva 76. Matka-aikojen heilahtelu yhteysväleillä, konikaalifunktiot, 2035 matriisi.

Liite 9. Yhden iteraatioaskeleen vaikutus

Sijoittelun vakautta tasapainotilanteessa on tarkasteltu seuraamalla yhden iteraatioaskeleen vaikutusta liikennemääriin ja nopeuksiin liikenneverkolla. Tarkastelu on tehty erilaisilla kierroslukumäärillä ja kahdella funktiotyypillä ja se kuvaa kuinka paljon yksi lisäkierros vaikuttaa liikennemäärien jakautumiseen ja nopeuksiin verkolla. Kuvat 77...82 esittävät liikennemäärien muutokset verkolla.

Vertailut on tehty alkuperäisille ja pituusriippuvaisille funktioille kierrosten 15..16, 30..31 ja 100..101 välillä. Sijoittelu on tehty vuoden 2035 kysyntämatriisilla ja nykyverkolla, eli 'worst case' skenaariolla.

Alkuperäiset funktiot

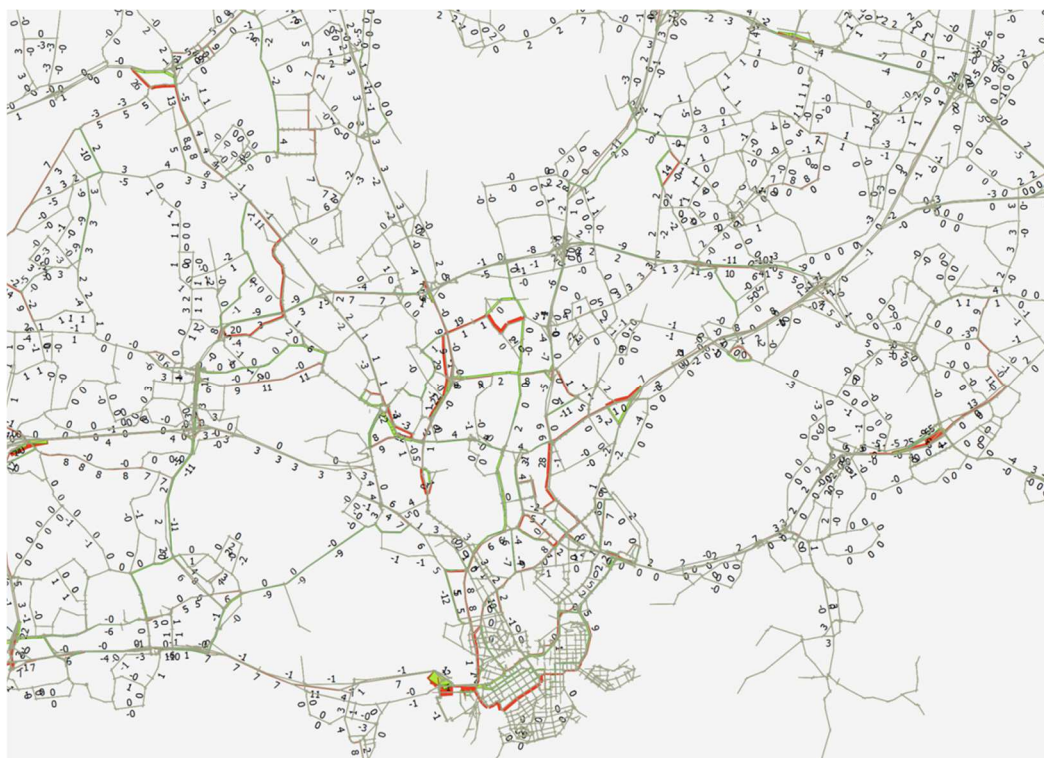


Kuva 77. Liikennemäärien erotus, kierros 15..16, alkuperäiset funktiot.

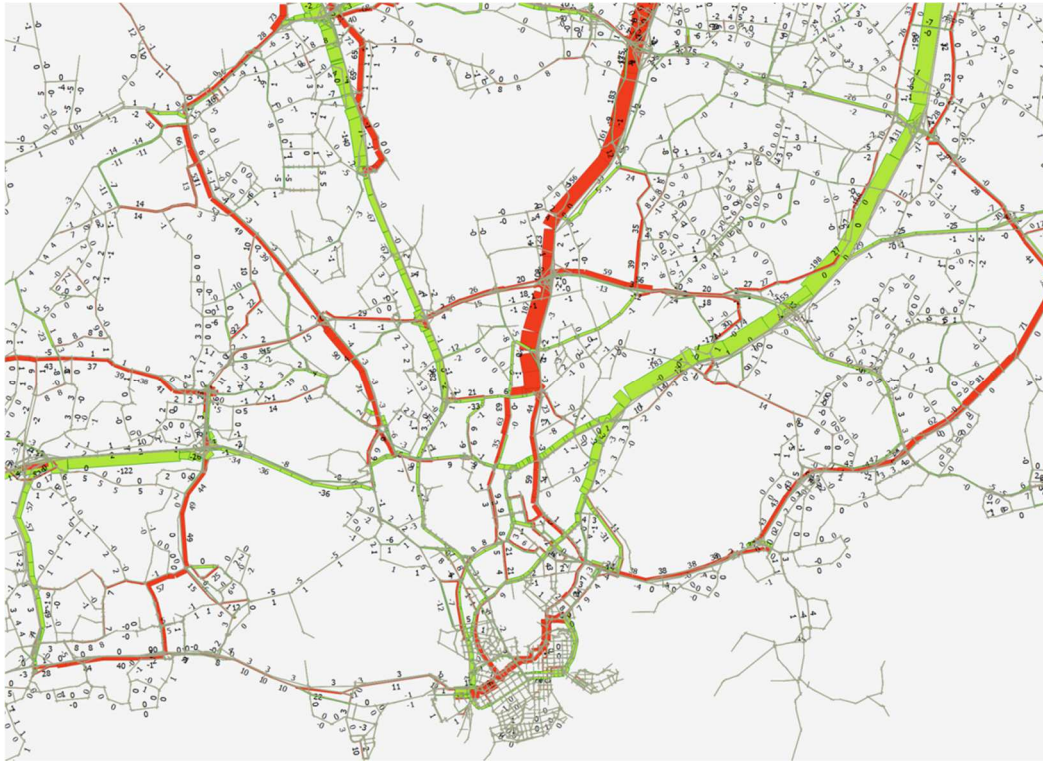
E



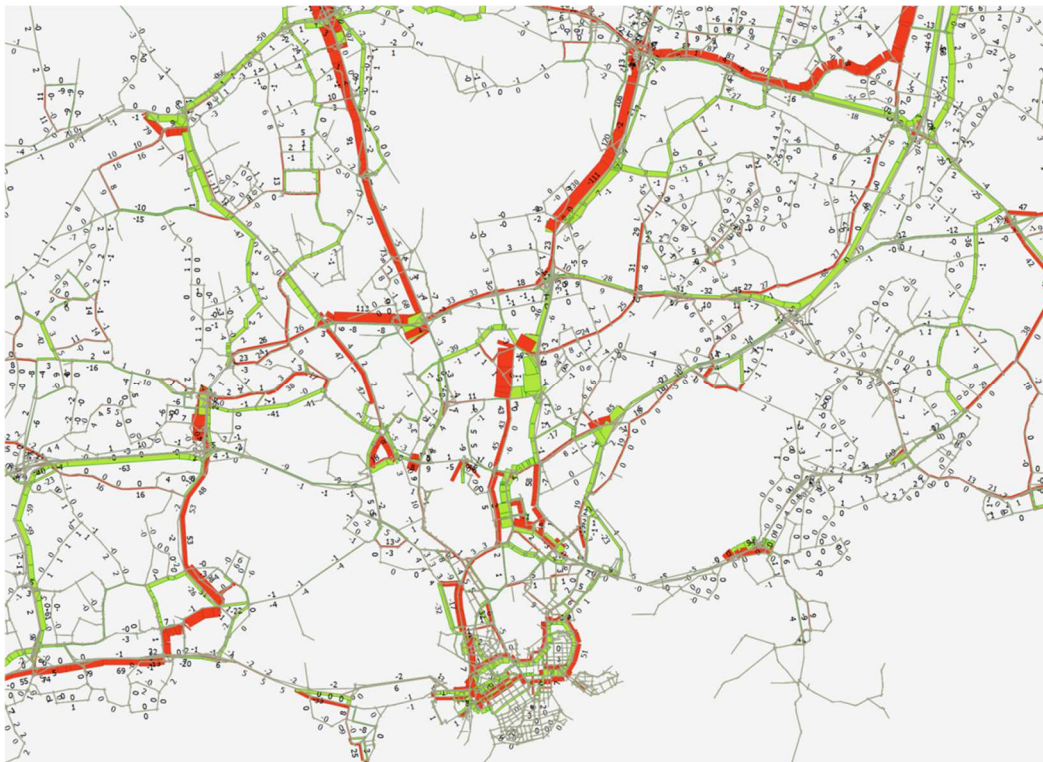
Kuva 78. Liikennemäärien erotus, kierros 30..31, alkuperäiset funktiot.



Kuva 79. Liikennemäärien erotus, kierros 100..101, alkuperäiset funktiot.

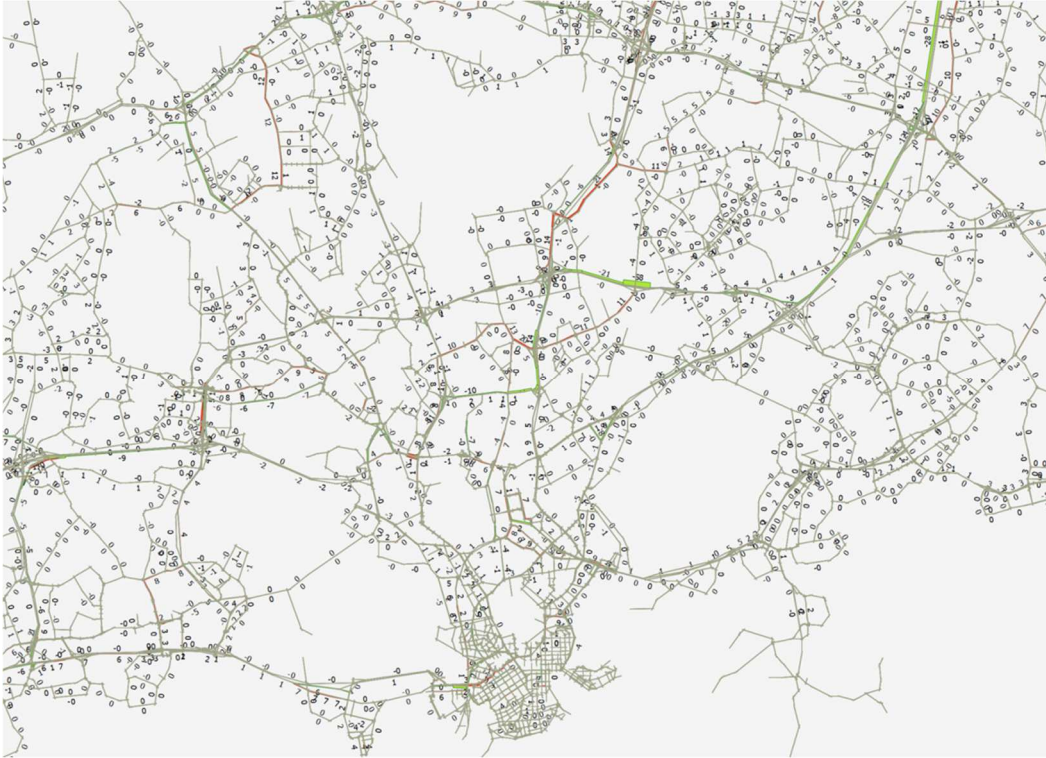
Pituusriippuvaliset funktiot

Kuva 80. Liikennemäärien erotus, kierros 15..16, pituusriippuvaliset funktiot.



Kuva 81. Liikennemäärien erotus, kierros 30..31, pituusriippuvaliset funktiot.

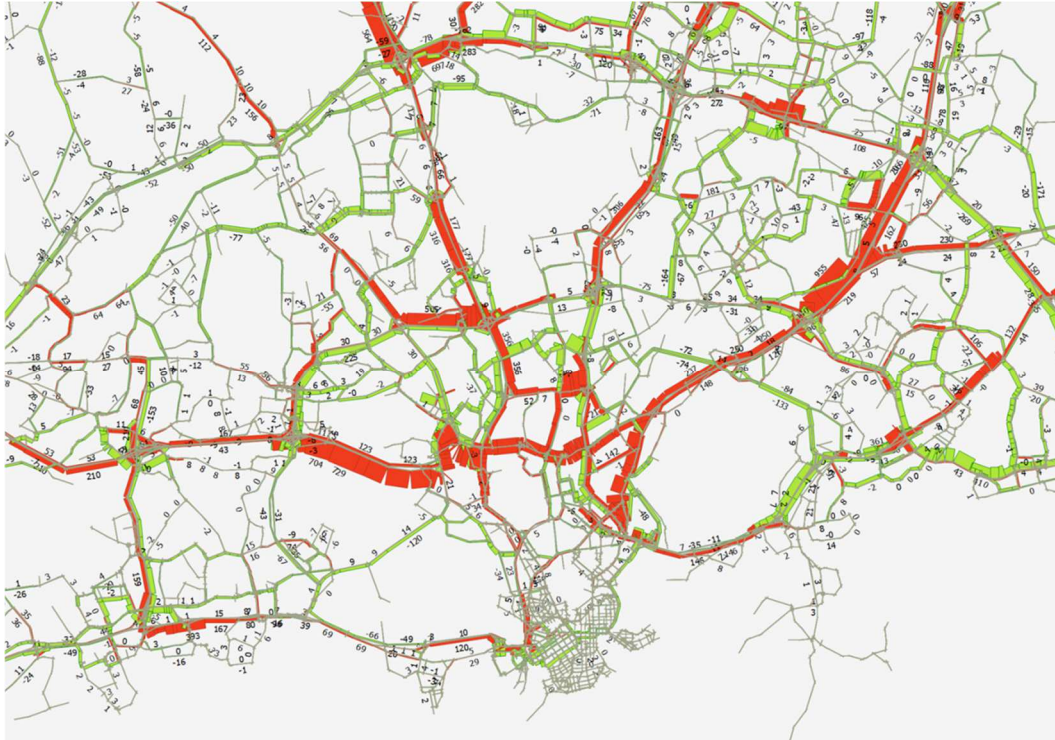
E



Kuva 82. Liikennemäärien erotus, kierros 100..101, pituusriippuvaiset funktiot.

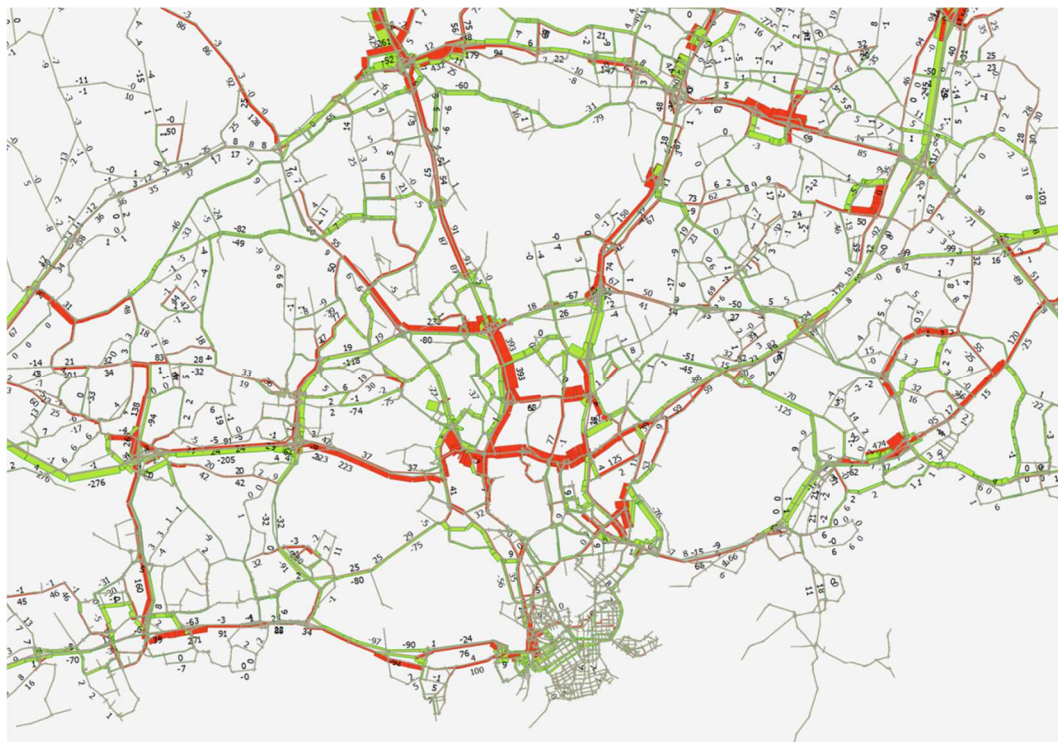
Liite 10. Liikennemäärien ja nopeuksien vertailu funktioiden välillä

Funktioiden tuottamien tulosten eroa on tarkasteltu sijoittelemalla liikenne vuoden 2035 kysyntä-matriisilla nykyverkolle ja vertailemalla eroja liikennemäärissä ja nopeuksissa linkeillä. Kuvat 83...85 esittävät ajoneuvoliikenteen liikennemäärien ja nopeuksien erotuksia linkeillä, kun iteraati-oita on ajettu 100 kierrosta. Kuvissa uusia funktioita verrataan alkuperäisiin sijoittelufunktioihin.

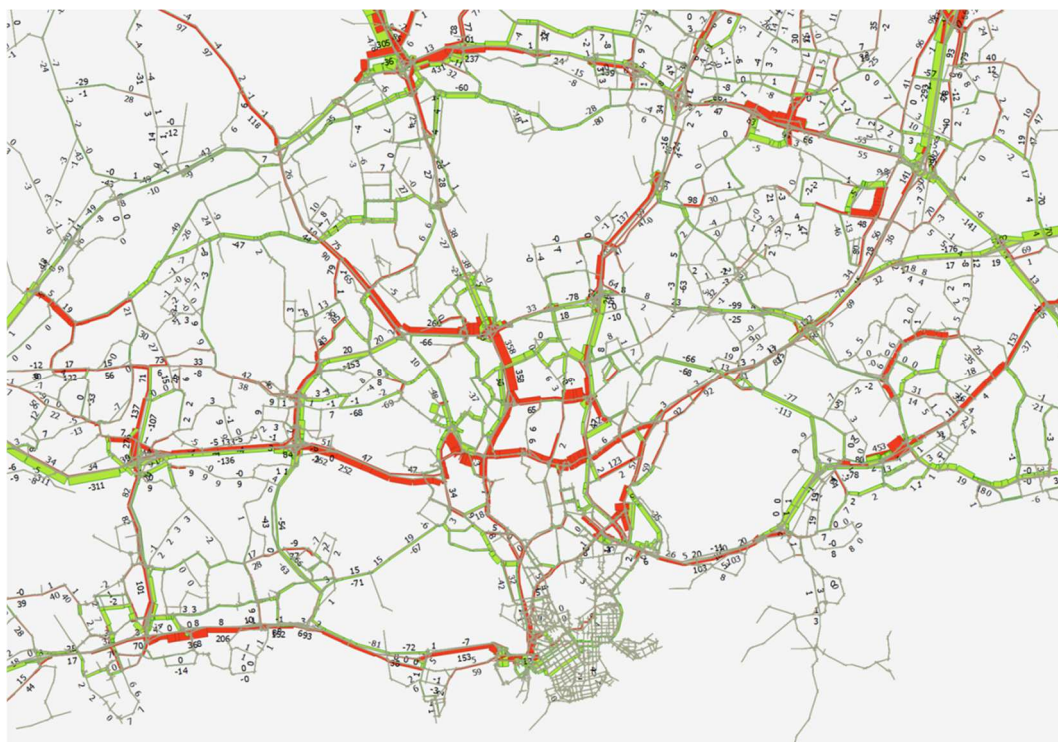


Kuva 83. Liikennemäärien erotus (leikatut funktiot - alkuperäiset funktiot).

E



Kuva 84. Liikennemäärien erotus (konikaalfunktiot - alkuperäiset funktiot).



Kuva 85. Liikennemäärien erotus (pituusriippuvalaiset funktiot - alkuperäiset funktiot).

Liite 11. Hitausluku

Hitauslukua on käytetty paljastamaan missä eri funktiotyyppien viivytykset syntyvät. Kuvissa esitetty hitausluku on nopeuden käänteisluku, eli pieni nopeus tarkoittaa suurta arvoa ja korkeaa palkkia linkillä. Sijoittelu on tehty 100 iteraatiokierroksella, vuoden 2035 kysyntämatriisilla ja nykyverkolla, eli 'worst case' skenaariolla. Tarkastelusta on rajattu pois linkit, joilla nopeus on yli 15 km/h.



Kuva 86. Hitausluku linkeittäin, alkuperäiset funktiot.

E



Kuva 87. Hitausluku linkeittäin, leikatut funktiot.



Kuva 88. Hitausluku linkeittäin, konikaalifunktiot.

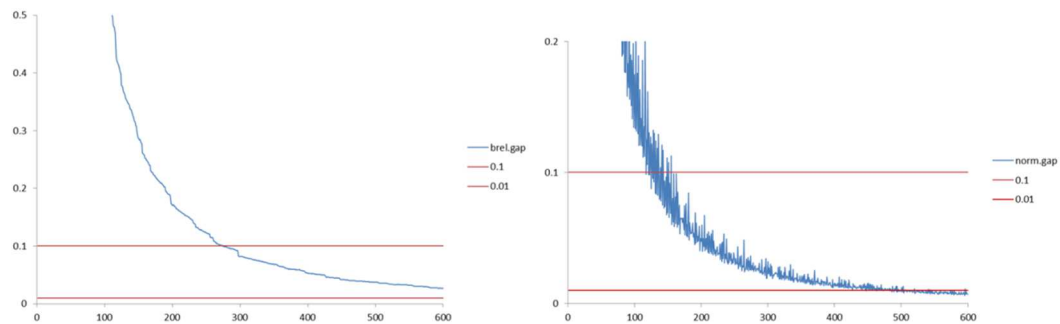


Kuva 89. Hitausluku linkeittäin, pituusriippuvaiset funktiot.

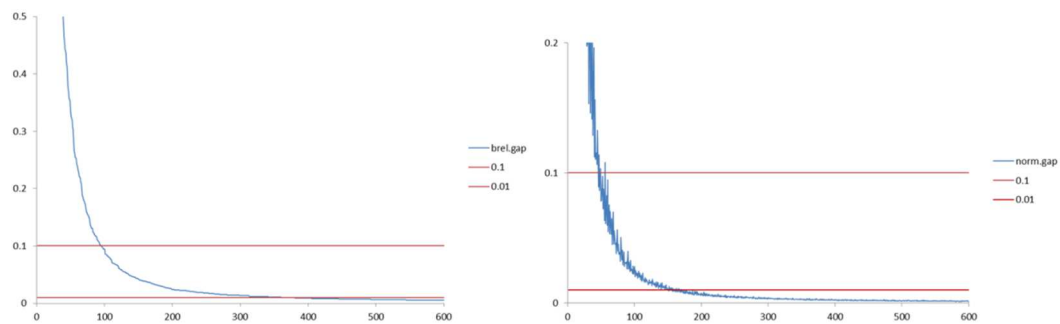
E

Liite 12. Katkaisukriteerit sijoitteluissa

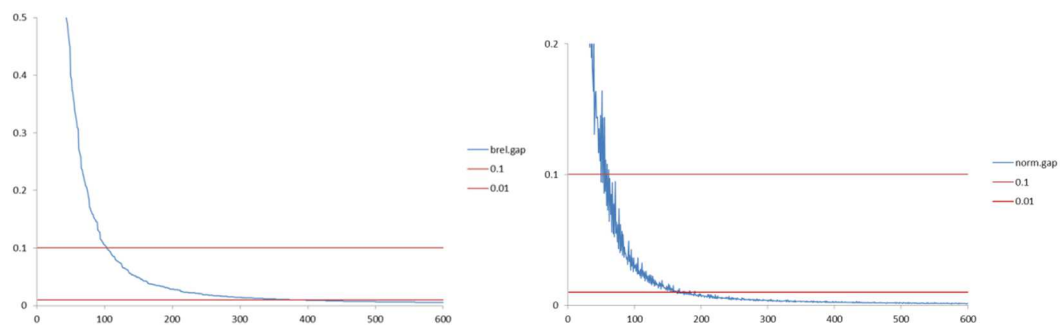
Kuvat 90...92 esittävät katkaisukriteereinä toimivien 'Best relative gap' ja 'Normalized gap' muuttujien suuruutta sijoittelun edetessä. Kuvien avulla voidaan seurata, kuinka monella iteraatiolla katkaisukriteerit saavutetaan eri funktiotyypeillä. Kuviin merkattu punaisella viivalla mahdolliset katkaisukriteerit 0.1 ja 0.01. Sijoittelu on tehty 600 iteraatiokierroksella, vuoden 2035 kysyntämatriisilla ja nykyverkolla, eli 'worst case' skenaariolla.



Kuva 90. Vasemmalla Best relative gap ja oikealla Normalized gap - alkuperäiset funktiot.



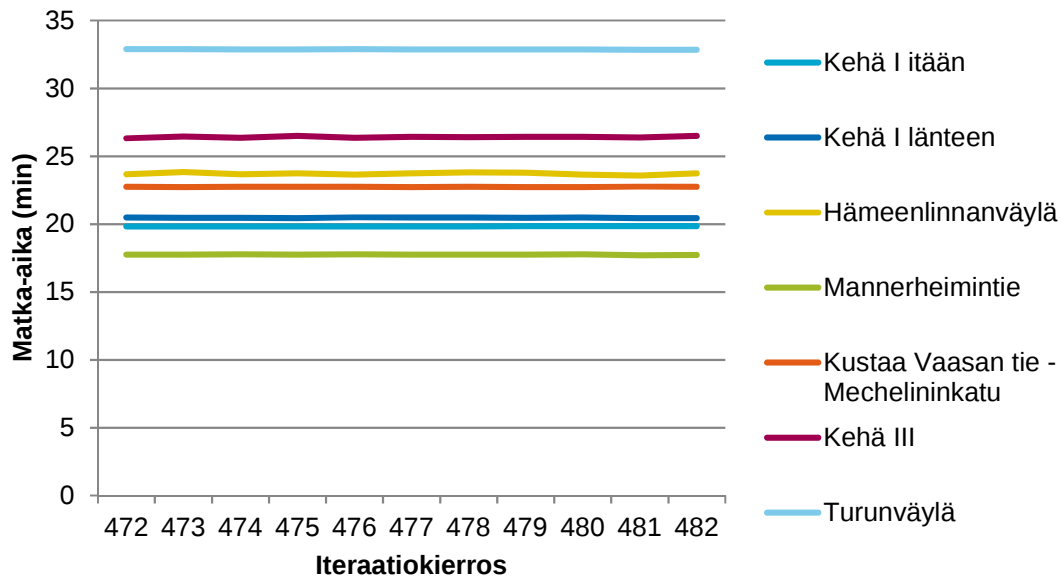
Kuva 91. Vasemmalla Best relative gap ja oikealla Normalized gap – konikaalifunktiot.



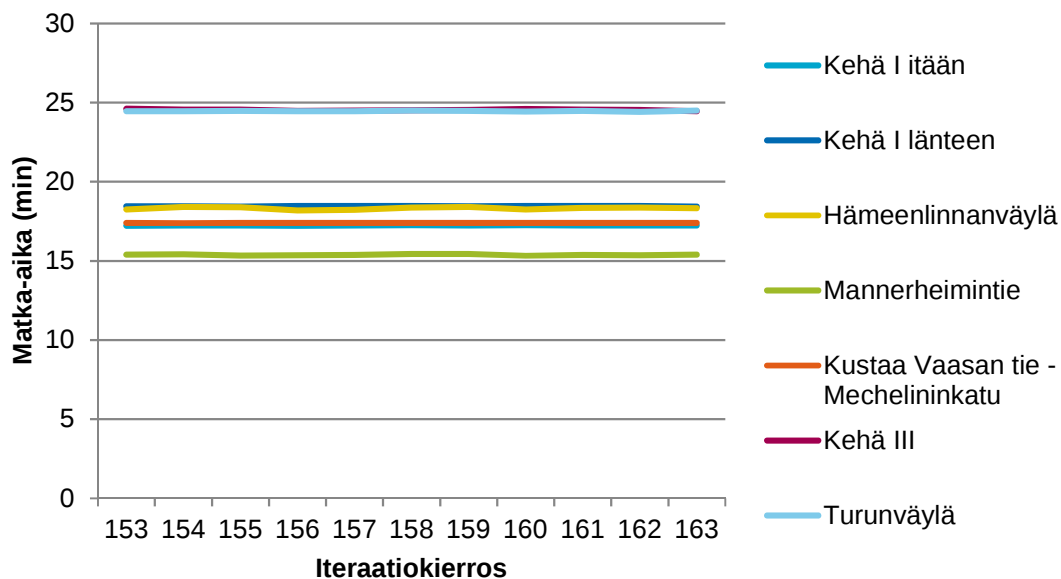
Kuva 92. Vasemmalla Best relative gap ja oikealla Normalized gap - Pituusriippuvaiset funktiot.

Liite 13. Matka-aikamatriisien vakaus tasapainotilanteessa

Kuvissa 93...96 on esitetty yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu eri funktiotyyppejä käytettäessä liitteessä 6 esitellyillä yhteysväleillä iteraatiokierroksella, jolla pysäytyskriteerit saavutetaan ja kymmenellä sitä seuraavalla iteraatiokierroksella. Kuvissa 97...102 on vertailtu matkamäärillä painotettuja matka-aikojen keskihajontoja samoilla iteraatiokierroksilla. Vaaka-akselilla on keskihajonta (minuuttia) ja pystyakselilla matkojen määrä [ajon/h]. Tarkastelut on tehty worst case -skenaarioon liittyen.

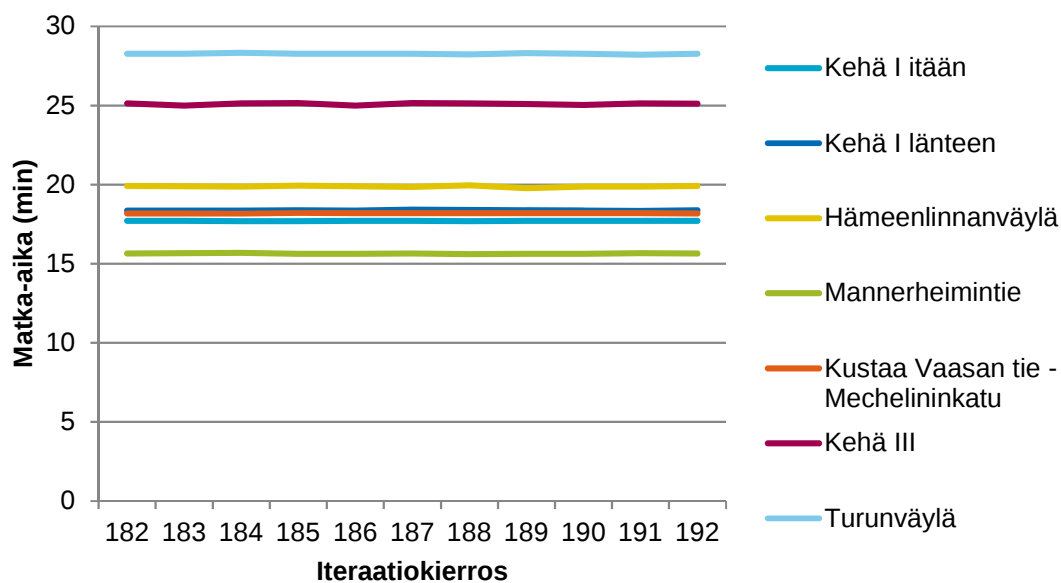


Kuva 93. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, alkuperäiset funktiot.

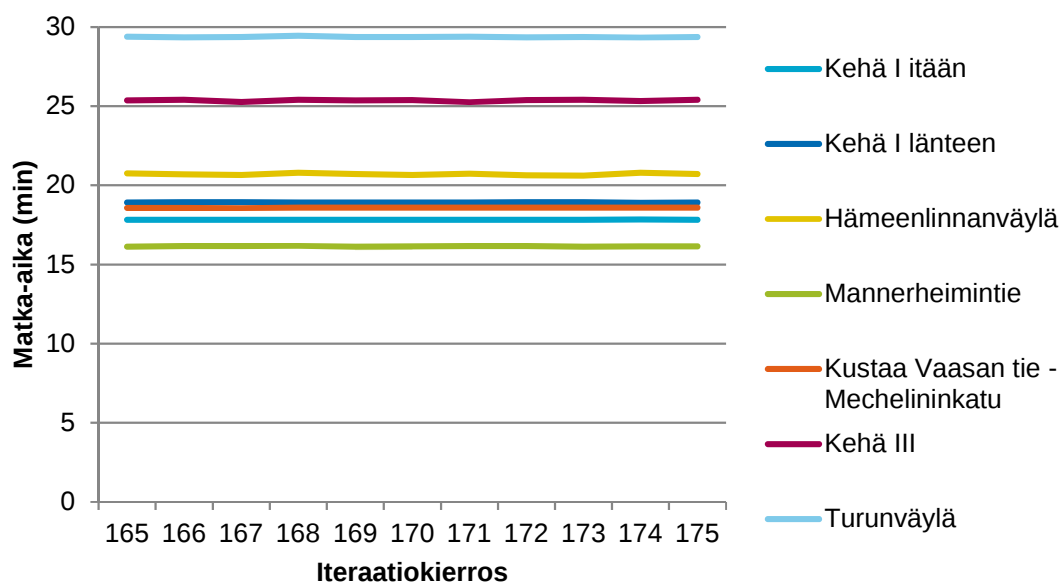


Kuva 94. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, leikatut funktiot.

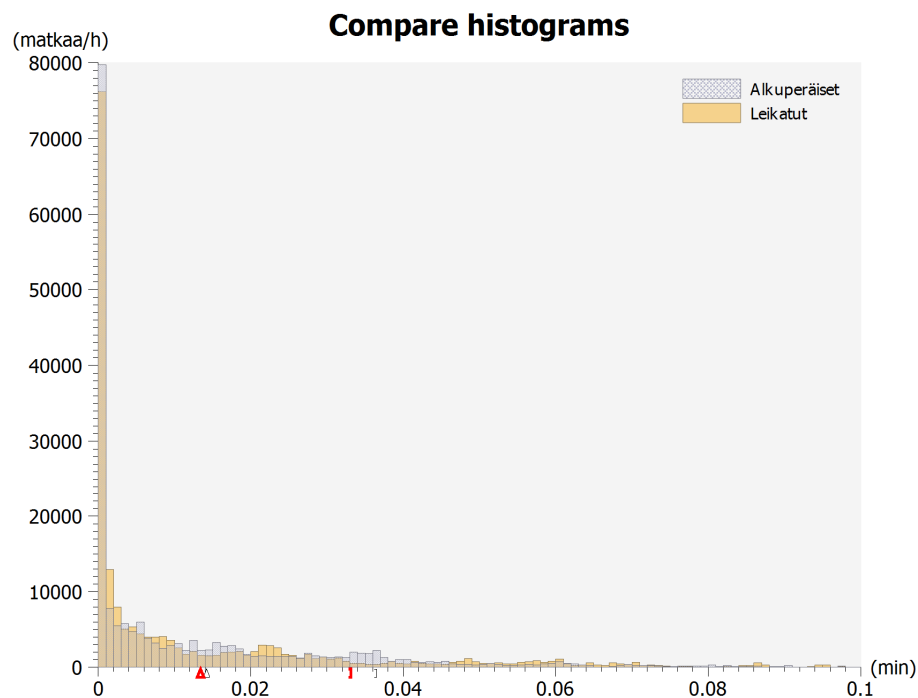
E



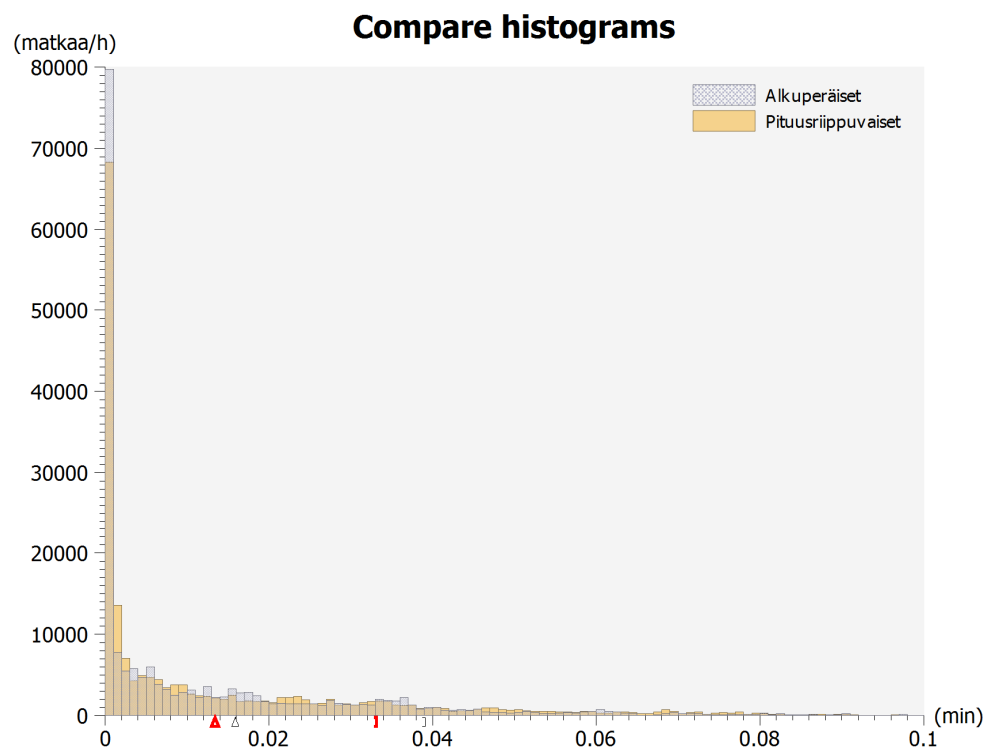
Kuva 95. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, pituusriippuvaliset funktiot.



Kuva 96. Yhteysväleittäisten matka-aikojen vaihtelu iteraatiokierrosten välillä tasapainotilanteessa, konikaalifunktiot.

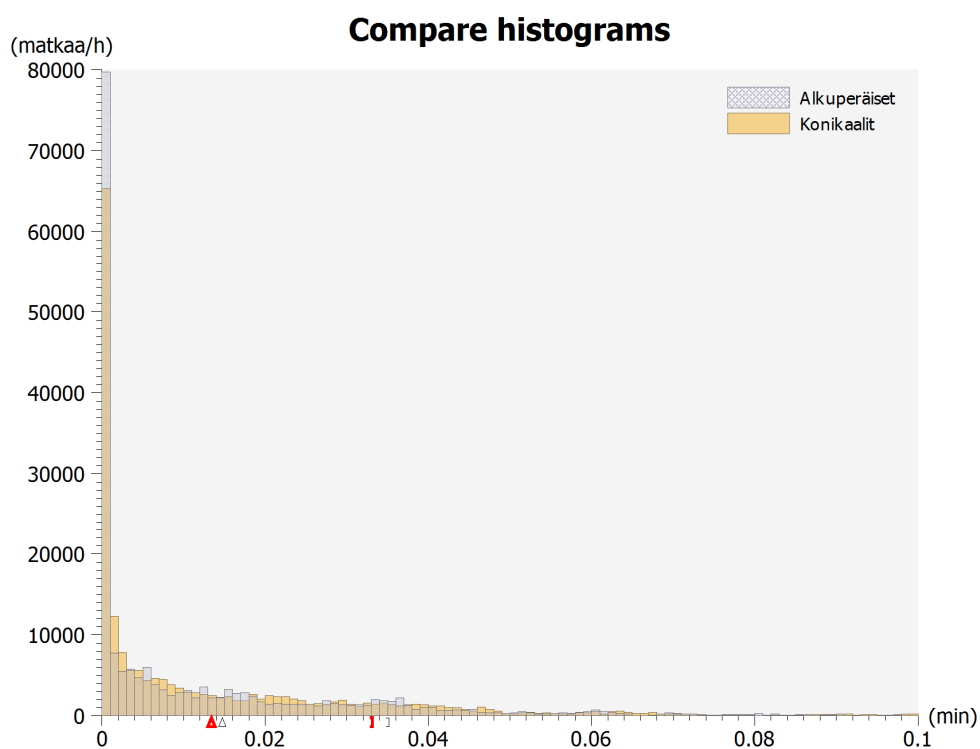


Kuva 97. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, alkuperäiset ja leikatut funktiot.

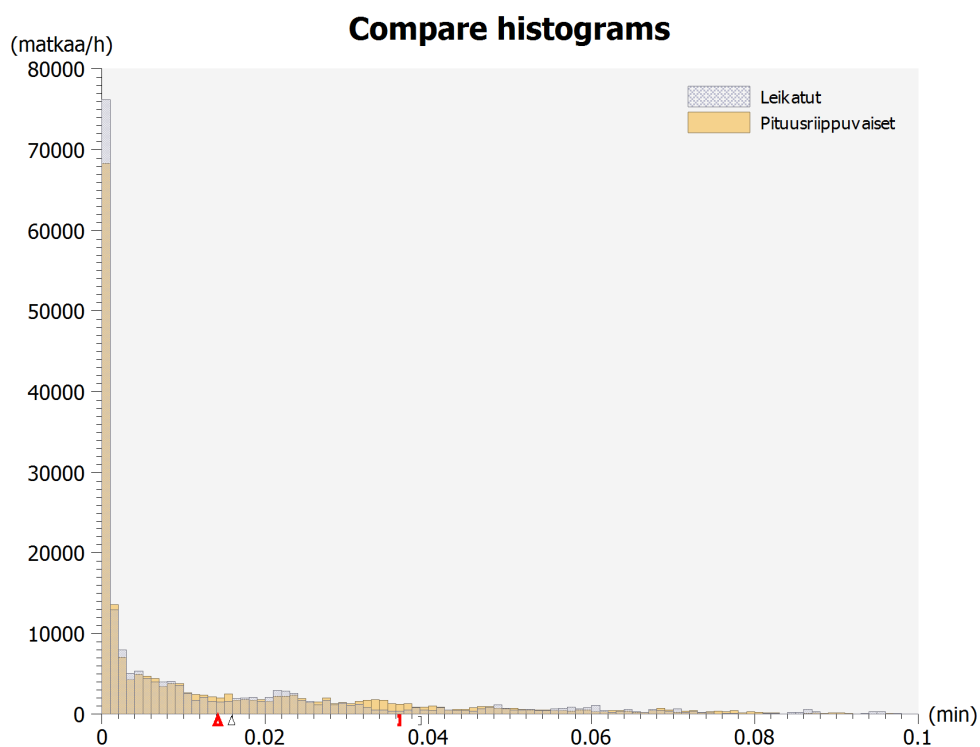


Kuva 98. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, alkuperäiset ja pituusriippuvaiset funktiot.

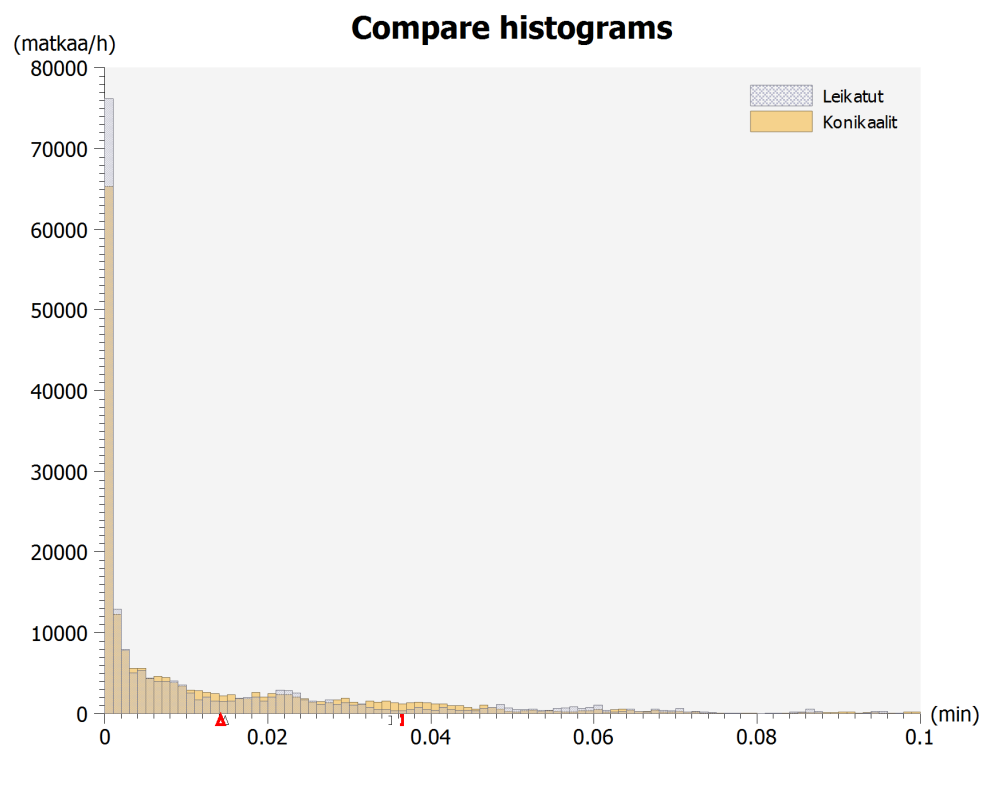
E



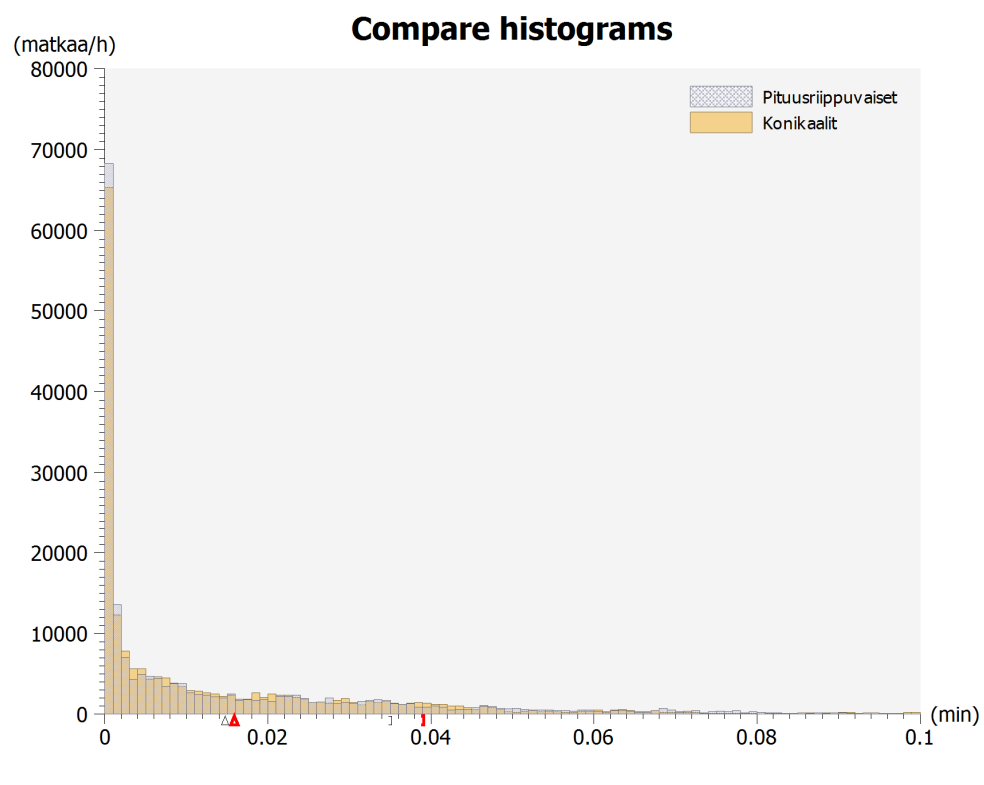
Kuva 99. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, alkuperäiset ja konikaalifunktiot.



Kuva 100. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, leikatut ja pituusriippuvaiset funktiot.



Kuva 101. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, leikatut ja konikaalifunktiot.



Kuva 102. Matka-aikojen keskihajonta (min) tasapainotilan saavuttamisen jälkeisillä iteraatiokierroksilla, pituusriippuvaiset ja leikatut funktiot.

Liite 14. Tarkastellut funktiot

Kaavoissa Emmen muuttujaan *ul1* on tallennettu linkin kapasiteetti [ajon/h], muuttujaan *ul2* vapaa nopeus [km/h] ja muuttujaan *ul3* raskaan liikenteen määrä [ajon/h]. *Length* on linkin pituus [km], *lanes* kaistamäärä, *volau* sijoittelun perusliikennemäärä [ajon/h] ja *volad* mahdollinen lisäliikennemäärä. Funktiolla *put* talletetaan välitulos ja funktiolla *get(n)* haetaan saman kaavan n:s välitulos.

Funktiot *fd1–fd5* ovat perusfunktioita ja *fd6–fd10* vastaavia bussikaistallisten väylien funktioita, joissa linkin kaistamäärästä on vain vähennetty bussikaista.

Alkuperäiset funktiot

```

fd1 = ((put(60 / ul2) * (1 + .02 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .975))*length +
      (get(2).gt. get(3)) * (1.78 * get(1)*length + .0075 * (get(2) - get(3))))
fd2 = ((put(60 / ul2) * (1 + .09 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .935))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.29 * get(1)*length + .0085 * (get(2) - get(3))))
fd3 = ((put(60 / ul2) * (1 + .1 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .915))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.08 * get(1)*length + .011 * (get(2) - get(3))))
fd4 = ((put(60 / ul2) * (1 + .2 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .87))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.34 * get(1)*length + .014 * (get(2) - get(3))))
fd5 = ((put(60 / ul2) * (1 + .3 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .81))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.28 * get(1)*length + .017 * (get(2) - get(3))))
fd6 = ((put(60 / ul2) * (1 + .02 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .975)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (1.78 * get(1)*length + .0075 * (get(2) - get(3))))
fd7 = (((put(60 / ul2) * (1 + .09 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .935)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.29 * get(1)*length + .0085 * (get(2) - get(3)))))
fd8 = (((put(60 / ul2) * (1 + .1 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .915)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.08 * get(1)*length + .011 * (get(2) - get(3)))))
fd9 = (((put(60 / ul2) * (1 + .2 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .87)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.34 * get(1)*length + .014 * (get(2) - get(3)))))
fd10 = (((put(60 / ul2) * (1 + .3 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .81)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.28 * get(1)*length + .017 * (get(2) - get(3)))))
fd98 = length * 1.3
fd99 = length * 1.3

```

Leikatut funktiot

```

fd1 = ((put(60 / ul2) * (1 + .02 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .975))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (1.78 * get(1)*length + .0075 * (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd2 = ((put(60 / ul2) * (1 + .09 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .935))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.29 * get(1)*length + .0085 * (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd3 = ((put(60 / ul2) * (1 + .1 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .915))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.08 * get(1)*length + .011 * (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd4 = ((put(60 / ul2) * (1 + .2 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .87))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.34 * get(1)*length + .014 * (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd5 = ((put(60 / ul2) * (1 + .3 * put((volau + volad) / lanes) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .81))*length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.28 * get(1)*length + .017 * (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd6 = ((put(60 / ul2) * (1 + .02 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .975)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (1.78*get(1)*length + .0075* (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd7 = (((put(60 / ul2) * (1 + .09 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .935)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.29*get(1)*length + .0085* (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd8 = ((put(60 / ul2) * (1 + .1 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .915)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.08*get(1)*length + .011* (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd9 = ((put(60 / ul2) * (1 + .2 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .87)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.34*get(1)*length + .014* (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd10 = ((put(60 / ul2) * (1 + .3 * put((volau + volad) / ((lanes - 1) .max. .8)) /
      (ul1 - get(2)))) * (get(2) .le. put(ul1 * .81)) *length +
      (get(2) .gt. get(3)) * (2.28*get(1)*length + .017* (get(2) - get(3))))).min.(60*length/(ul2*.3))
fd98 = length * 1.3
fd99 = length * 1.3

```

Pituusriippuvaiset funktiot

```

fd1 = (put(60/ul2)*(1+0.02*put((volau+volad)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.975))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(1.78*get(1)*length + 0.0075*(get(2)-get(3))*length)
fd2 = (put(60/ul2)*(1+0.09*put((volau+volad)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.935))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.29*get(1)*length + 0.0085*(get(2)-get(3))*length)
fd3 = (put(60/ul2)*(1+0.1*put((volau+volad)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.915))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.08*get(1)*length + 0.011*(get(2)-get(3))*length)
fd4 = (put(60/ul2)*(1+0.2*put((volau+volad)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.87))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.34*get(1)*length + 0.014*(get(2)-get(3))*length)

```

E

```

fd5 = (put(60/ul2)*(1+0.3*put((volau+volad)/lanes)/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.81))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.28*get(1)*length + 0.017*(get(2)-get(3))*length)
fd6 = (put(60/ul2)*(1+0.02*put((volau+volad)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.975))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(1.78*get(1)*length + 0.0075*(get(2)-get(3))*length)
fd7 = (put(60/ul2)*(1+0.09*put((volau+volad)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.935))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.29*get(1)*length + 0.0085*(get(2)-get(3))*length)
fd8 = (put(60/ul2)*(1+0.1*put((volau+volad)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.915))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.08*get(1)*length + 0.011*(get(2)-get(3))*length)
fd9 = (put(60/ul2)*(1+0.2*put((volau+volad)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.87))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.34*get(1)*length + 0.014*(get(2)-get(3))*length)
fd10 = (put(60/ul2)*(1+0.3*put((volau+volad)/((lanes-1).max.0.8))/
      (ul1-get(2))))*(get(2).le.put(ul1*0.81))*length +
      (get(2).gt.get(3))*(2.28*get(1)*length + 0.017*(get(2)-get(3))*length)
fd98 = length * 1.3
fd99 = length * 1.3

```

Konikaalifunktiot

```

fd1 = length*(60/ul2)*(0.953973-put(11.86325*(1-volau/lanes/(ul1-80.09567))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.094172))
fd2 = length*(60/ul2)*(0.939862-put(9.314217*(1-volau/lanes/(ul1-180.6562))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.123892))
fd3 = length*(60/ul2)*(0.904756-put(6.249673*(1-volau/lanes/(ul1-170.7211))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.199559))
fd4 = length*(60/ul2)*(0.851576-put(4.368724*(1-volau/lanes/(ul1-220.1920))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.318878))
fd5 = length*(60/ul2)*(0.719267-put(2.781055*(1-volau/lanes/(ul1-180.0184))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.640276))
fd6 = length*(60/ul2)*(0.953973-put(11.86324*(1-volau/((lanes-1).max.0.8)/(ul1-80.09675))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.094172))
fd7 = length*(60/ul2)*(0.939862-put(9.314217*(1-volau/((lanes-1).max.0.8)/(ul1-180.6595))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.123893))
fd8 = length*(60/ul2)*(0.904755-put(6.249634*(1-volau/((lanes-1).max.0.8)/(ul1-170.7265))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.199561))
fd9 = length*(60/ul2)*(0.851577-put(4.368760*(1-volau/((lanes-1).max.0.8)/(ul1-220.1890))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.318874))
fd10 = length*(60/ul2)*(0.719276-put(2.781055*(1-volau/((lanes-1).max.0.8)/(ul1-180.0184))) +
  sqrt(get(1)*get(1)+1.640276))
fd98 = length * 1.3
fd99 = length * 1.3

```

Liite 15. Liikenne-ennustejärjestelmässä käytetyt autoliikenteen viivytysfunktiot

Viivytysfunktiot ja niiden parametrit ovat seuraavassa taulukossa (Keränen & Pesonen 2011).
Funktioita *fd1–fd5* käytetään, jos kadulla tai tiellä ei ole bussikaistaa, ja funktioita *fd6–fd10*, jos sillä on bussikaista. Jälkimmäisessä tapauksessa kaistamäärästä (*lanes*) vähennetään yksi.

Taulukko 6. Autoliikenteen viivytysfunktioiden parametrit funktioluokittain.

	Väyläluokka	Tarkennus	Viivytys-funktio	Nopeus- rajoitus [km/h]	Vapaa nopeus (km/h, ul2)	Vapaa nopeus (min/km)	Kapasiteetti S (ajon/h, ul1)	muoto- parametri J	Ylikysyntä- suoran alku [ajon/h]
1	Moottoritiet	moottoritie	fd1 (fd6)	120	113	0,531	2200	0,02	2145
2		moottoritie		100	97	0,619	2000	0,02	1950
3		moottoritie		80	81	0,741	2000	0,02	1950
4	Maantiet / Useampi- kaistaiset kaupunki- väylät eritasoliitty- min	maantie/useampikaist	fd2 (fd7)	100	97	0,619	1900	0,09	1777
5		maantie/useampikaist		80	81	0,741	1850	0,09	1730
6		maantie/useampikaist		70	73	0,822	1600	0,09	1496
7	Useampikaistaiset pääkadut tasoliitty- min valoilla	us.kaist.,valot	fd3 (fd8)	70	61	0,984	1450	0,1	1327
8		us.kaist.,valot		60	54	1,111	1250	0,1	1144
9	Pääkadut	esikaup,pääk,ei valoja	fd4 (fd9)	50	48	1,250	1150	0,2	1001
10		esi,pääk, val/kesk.ei val		50	44	1,364	1000	0,2	870
11		esi,pääk, val/kesk.ei val		40	41	1,463	1000	0,2	870
12	Kokooja/tonttikadut	kesk.pääkatu, valot	fd5 (fd10)	50	41	1,463	900	0,3	729
13		kesk.kokooja		40	36	1,667	750	0,3	608
14		pienet tonttikadut		30	30	2,000	600	0,3	486

HSL:n julkaisuja 22/2016

ISSN 1798-6184 (pdf)

ISBN 978-952-253-297-8 (pdf)



HSL Helsingin seudun liikenne
Opastinsilta 6A, Helsinki
PL 100, 00077 HSL
puh. (09) 4766 4444
etunimi.sukunimi@hsl.fi



HRT Helsingforsregionens trafik
Semaforbron 6 A, Helsingfors
PB 100 • 00077 HRT
tfn (09) 4766 4444
fornamn.efternamn@hsl.fi