

**LIIKENNEJÄRJESTELMÄN EMME-KUVAUKSEN KEHITTÄMINEN  
JOUKKOLIIKENTEEN SUUNNITTELUN TUEKSI**

Taina Haapamäki

Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun yhdys-  
kunta- ja ympäristötekniikan laitoksella professori  
Tapio Luttisen valvonnassa tehty diplomityö.

Espoo 20.5.2010

<b>Tekijä:</b>	Taina Haapamäki		
<b>Diplomityö:</b>	Liikennejärjestelmän Emme-kuvauksen kehittäminen joukkoliikenteen suunnittelun tueksi		
<b>Päivämäärä:</b>	20.5.2010	<b>Sivumäärä:</b>	97+6 liitt.
<b>Professori:</b>	Liikennetekniikka	<b>Koodi:</b>	Yhd-71
<b>Valvoja:</b>	Prof. Tapio Luttinen		
<b>Ohjaaja:</b>	DI Mervi Vatanen		
<b>Avainsanat:</b>	joukkoliikenteen suunnittelu, liikenteen mallinnus, joukkoliikenteen sijoittelu, vuorovälipohjainen joukkoliikenteen sijoittelu		
<p>Työn tarkoituksena oli kehittää liikennejärjestelmän kuvausta Emme-mallissa niin, että sijoittelulla tuotetut kuormitukset joukkoliikennelinjastossa vastaisivat paremmin todellisia matkustajamääriä. Joukkoliikennelinjaston kuormitustiedot ovat tärkeitä erityisesti joukkoliikenteen suunnittelun tarpeissa tutkittaessa vaihtoehtoisten linjastojen vaikutuksia matkustajamääriin.</p> <p>Emme on liikenteen sijoitteluohjelmisto, jonka vuorovälipohjainen sijoittelu sopii pitkän aikavälin joukkoliikennesuunnitelmien analysointiin. Joukkoliikennesijoittelu on Emmessä monimutkainen kokonaisuus, johon vaikuttavat sijoiteltavan matkustajakysynnän lisäksi linjaston kuvaustapa ja käytetyt sijoitteluparametrit. Emmen vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelu on monireittisijoittelu, jossa linjanvalinta perustuu optimaalisen strategian periaatteeseen. Matkustajat pyrkivät minimoimaan painotettua matka-aikaansa ja valitsevat sen perusteella pysäkin, jolle siirtyvät odottamaan ajoneuvoa. Liikennejärjestelmäkuvauksessa linjojen pysäkkien sijoitteluun on kiinnitettävä erityisesti huomiota.</p> <p>Työssä pohdittiin Emmen sijoittelulogiikan perusteella vaihtoehtoisia tapoja kuvata joukkoliikennejärjestelmä. Kuvaustapojen vaikutusta joukkoliikennesijoittelun tuloksiin testattiin keväiden 2008 ja 2009 aamuhuipputuntitilanteissa Pasila–Hakaniemi-joukkoliikennekorridorissa. Tarkasteluajankohtien välillä raitiolinja 9 aloitti toimintansa ja bussilinja 17 lopetettiin. Tarkasteluvuosien joukkoliikennetarjonnasta tehtiin Emmessä erilaisia kuvauksia ja niillä testisijoitteluja. Sijoittelun tuottamia matkustajanousijamääriä verrattiin matkustajalaskentojen mukaisiin nousijamääriin. Parhaat tulokset tuottivat kuvaukset, joissa raitiovaunu- ja linja-autoliikenteen pysäkkejä oli yhdistetty keskenään sen mukaan, mitkä pysäkeistä olivat toisiaan lähellä. Pysäkkejä yhdistelemällä matkustajat valitsivat useampia linjoja kuin lähtötilanteessa.</p> <p>Terminaalien kuvaustapaa havainnollistettiin kuvaamalla Pasilan juna-asema ja Helsingin rautatieasema mallissa yksittäisinä pysäkkeinä. Tutkimuksessa todettiin, että terminaalin kuvaustavalla on suuri vaikutus sijoittelutuloksiin. Pysäkkien yhdistäminen Emmessä vaikuttaa odotusajan lisäksi myös vaihdoista aiheutuviin vastuksiin kävelyetäisyyksien muutosten kautta.</p> <p>Liikennejärjestelmän kuvaustapa vaikuttaa mallissa käytettävien sijoitteluparametrien valintaan. Eri kuvaustavoilla ja sijoitteluparametreilla voidaan ohjata sijoittelua samaan suuntaan. Linjaston onnistunut kuvaus on kuitenkin perusedellytys mallin toiminnalle ja sopivien sijoitteluparametrien löytämiselle.</p>			

<b>Author:</b>	Taina Haapamäki		
<b>Thesis:</b>	Developing transport network coding guidelines in Emme for public transport planning purposes		
<b>Date:</b>	20.5.2010	<b>Number of pages:</b>	97+6 app.
<b>Professorship:</b>	Transportation engineering	<b>Code:</b>	Yhd-71
<b>Supervisor:</b>	Professor Tapio Luttinen		
<b>Instructor:</b>	M.Sc. Mervi Vatanen		
<b>Keywords:</b>	public transport network planning, transport modelling, transit assignment, headway-based transit assignment		
<p>The purpose of this study was to find ways to model the transport system in Emme so that the assignment results would correspond better to the actual passenger loads on transit lines. Passenger loads on route networks are important for transit planning purposes.</p> <p>Emme is a software tool for traffic and transit assignments. The headway-based transit assignment algorithm in Emme is best suitable for analysing long-range plans in public transport. Transit assignment in Emme is a complex that is affected not only by the demand assigned but also the network coding practices chosen and assignment parameters used. The headway-based transit assignment algorithm implemented in Emme is a multi-path assignment based on the concept of optimal strategy. The optimal strategy minimises the total travel time by assigning the trips on several lines or paths. On each node in Emme the optimal strategy chooses either a set of attractive lines or one outgoing auxiliary link. This feature needs to be taken into account when coding the network.</p> <p>Alternative network coding practices were developed in this study. The impacts of each way of coding on assignment results were examined on morning peak periods of spring 2008 and 2009 in transit corridor between Pasila and Hakaniemi in Helsinki. Between the study periods a new tram line started to operate and replaced a bus line in the corridor. Different models of the public transit network were coded and assigned. The numbers of passengers boarding on each examined bus stop were then compared to the actual numbers of passengers boarding. Network models where bus and tram stops close to each others were modelled as a single stop produced results most similar to the real numbers of boardings.</p> <p>The ways of modelling a transit terminal in Emme were illustrated by modelling Pasila train station and Helsinki railway stations as single stops in the transit network. The coding practices affected the number of passengers boarding in the terminal. The effect of merging transit stops in Emme network model on assignment is based on the waiting times shortened as well as the walking distances changed when changing network coding practices.</p> <p>The network coding practice affects the values of assignment parameters. The assignment results can be calibrated towards same results using different coding principles and assignment parameters. Succeeding in coding the network in the right way is prerequisite of finding assignment parameters that produce assignment results that resemble the actual travel behaviour.</p>			

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Helsingin kaupungin liikennelaitoksen (HKL), Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunnan (YTV) ja Ramboll Finland Oy:n tilauksesta. Vuoden 2010 alussa työn tilanneet toiminnot HKL:ssa ja YTV:ssa yhdistyivät Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymäksi (HSL). Työ on osa laajaa liikennetutkimusta (LITU 2008).

Haluan kiittää ohjaajaani Mervi Vatasta mielenkiintoisesta aiheesta ja tuesta työn aikana. Kiitos kuuluu myös työtovereilleni Ari Sirkiälle ja Jukka Räsäselle arvokkaista neuvoista, joita olen heiltä saanut. Kiitän myös työn valvojaa professori Tapio Luttista, ohjausryhmään kuuluneita henkilöitä ja haastateltuja asiantuntijoita.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani, sisaruksiani ja ystäviäni opiskelun ja etenkin diplomityön aikaisesta kannustuksesta. Suurin kiitos kuuluu puolisololleni Laurille väsymättömästä tuesta ja jännittävistä näkökulmista.

Espoossa 20.5.2010

Taina Haapamäki

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>ALKUSANAT</b> .....	<b>4</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO</b> .....	<b>5</b>
<b>LIITELUETTELO</b> .....	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>8</b>
1.1 TAUSTAA.....	8
1.2 TYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET .....	8
1.3 TUTKIMUSMENETELMÄT .....	9
<b>2 JOUKKOLIIKENTEEN SUUNNITTELU</b> .....	<b>11</b>
2.1 YLEISTÄ .....	11
2.2 JOUKKOLIIKENTEEN SUUNNITTELUN TASOT .....	12
2.3 JOUKKOLIIKENNE JÄRJESTELMÄNÄ .....	14
2.4 LINJASTOSUUNNITTELU.....	15
2.5 LINJOJEN LIKENNÖINNIN SUUNNITTELU.....	17
2.6 JOUKKOLIIKENTEEN PALVELUTASOTEKIJÄT .....	18
2.7 JOUKKOLIIKENNESUUNNITELMIEN ARVIOINTI .....	20
<b>3 LIIKENNE-ENNUSTEET</b> .....	<b>22</b>
3.1 YLEISTÄ .....	22
3.2 NELIVAIHEINEN LIIKENNE-ENNUSTEPROSESSI .....	22
3.2.1 <i>Yleistä</i> .....	22
3.2.2 <i>Matkatuotokset</i> .....	23
3.2.3 <i>Matkojen suuntautuminen</i> .....	24
3.2.4 <i>Kuluttavan valinta</i> .....	25
3.2.5 <i>Liikenteen sijoittelu</i> .....	29
<b>4 JOUKKOLIIKENTEEN LINJANVALINNAN MALLINTAMINEN</b> .....	<b>31</b>
4.1 ENSIMMÄISET SJOITTELUALGORITMIT .....	31
4.2 MATKUSTAJAMÄÄRIEN VAIKUTUS LINJANVALINTAAN .....	32
4.3 SATUNNAISEN HYÖDYN MAKSIMOINTI .....	32
4.4 ERITYYPPISTEN SJOITTELUKÄYTTÖ .....	33
<b>5 JOUKKOLIIKENTEEN SJOITTELU EMME-OHJELMISTOLLA</b> .....	<b>37</b>
5.1 YLEISTÄ .....	37
5.2 JÄRJESTELMÄN KUVAUS EMMESSÄ .....	38
5.2.1 <i>Emme-pankki</i> .....	38
5.2.2 <i>Verkko</i> .....	39
5.2.3 <i>Linjasto</i> .....	40
5.2.4 <i>Funktiot</i> .....	40
5.2.5 <i>Matriisit</i> .....	40
5.2.6 <i>Sijoittelun ohjaaminen Emmessä</i> .....	41
5.3 VUOROVÄLIPOHJAINEN JOUKKOLIIKENNESJOITTELU .....	43
5.3.1 <i>Yleiset periaatteet</i> .....	43
5.3.2 <i>Painotetun kokonaismatka-ajan muodostuminen</i> .....	44
5.3.3 <i>Sijoittelumalli (Spiess 1993)</i> .....	46
5.3.4 <i>Joukkoliikenteen sijoittelun ratkaisualgoritmi (INRO 2009)</i> .....	47
5.4 AIKATAULUPOHJAINEN JOUKKOLIIKENNESJOITTELU.....	49
5.5 YKSILÖSJOITTELU .....	51

<b>6</b>	<b>LIIKENJÄRJESTELMÄN EMME-KUVAUKSEN KEHITTÄMINEN .....</b>	<b>53</b>
6.1	LINJASTOKUVAUKSEN VAIKUTUKSET SIOITTELUTULOKSIIN .....	53
6.2	LIIKENJÄRJESTELMÄKUVAUKSEN JA SIOITTELUPARAMETRIEN VAIKUTUS OPTIMAALISEN STRATEGIAN MUODOSTUMISEEN .....	54
6.3	VUOROVÄLIPOHJAISEN JOUKKOLIIKENNESIOITTELUN OMINAISUUKSIA .....	58
6.3.1	<i>Sijoittelumallin herkkyys muutoksille .....</i>	<i>58</i>
6.3.2	<i>Yhden lähtöpysäkin ongelma .....</i>	<i>59</i>
6.4	JOUKKOLIIKENNETARJONNAN KUVAUKSEN KEHITTÄMINEN .....	61
6.4.1	<i>Tarjonnan ja kysynnän kuvauksen tarkkuustasot .....</i>	<i>61</i>
6.4.2	<i>Pysäkkien yhdistäminen.....</i>	<i>62</i>
<b>7</b>	<b>JOUKKOLIIKENTEE LINJASTOKUVAUKSEN TESTAAMINEN .....</b>	<b>64</b>
7.1	LINJASTON KUVAUSTAVAT HELSINGIN SEUDULLA .....	64
7.1.1	<i>Pääkaupunkiseudun linjastokuvauksen vaiheet.....</i>	<i>64</i>
7.1.2	<i>Helsingin metropolialueen uusi linjastokuvaus.....</i>	<i>64</i>
7.2	TUTKIMUKSEN EMME-AINEISTO .....	66
7.3	VERTAILUAINEISTO JA SEN KÄSITTELY .....	66
7.4	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	67
7.5	PASILA–HAKANIEMI-KORRIDORIN LINJASTON TARKASTELUT .....	68
7.5.1	<i>Korridorin kuvaus.....</i>	<i>68</i>
7.5.2	<i>Hakaniemi–Pasila-suunnan kuormitustarkastelut .....</i>	<i>68</i>
7.5.3	<i>Pasila–Hakaniemi-suunnan kuormitustarkastelut .....</i>	<i>71</i>
7.5.4	<i>Pysäkkien yhdistäminen Emme-kuvauksessa.....</i>	<i>74</i>
7.6	TERMINAALIN LINJASTOKOODAUKSEN TARKASTELU .....	74
7.6.1	<i>Tarkasteluun valittujen kohteiden kuvaus .....</i>	<i>74</i>
7.6.2	<i>Helsingin rautatieaseman koodaus .....</i>	<i>75</i>
7.6.3	<i>Pasilan juna-aseman koodaus .....</i>	<i>77</i>
7.6.4	<i>Terminaalien Emme-kuvaus .....</i>	<i>79</i>
<b>8</b>	<b>EMMEN VUOROVÄLIPOHJAISEN JOUKKOLIIKENNESIOITTELUN KÄYTTÖSUOSITUKSIA .....</b>	<b>81</b>
8.1	TARJONNAN KUVAAMINEN .....	81
8.1.1	<i>Järjestelmän kuvaus Emmessä .....</i>	<i>81</i>
8.1.2	<i>Pysäkkien yhdistäminen.....</i>	<i>81</i>
8.1.3	<i>Syöttö- ja kävelylinkkien koodaaminen .....</i>	<i>82</i>
8.1.4	<i>Vaihtoehtoisten koodaustapojen vaikutus tulostietojen esittämiseen .....</i>	<i>83</i>
8.2	POHDINTAA SIOITTELUPARAMETRIEN KÄYTÖSTÄ .....	83
8.2.1	<i>Yleistä sijoitteluparametrien käytöstä .....</i>	<i>83</i>
8.2.2	<i>Odotusaikaan vaikuttavat tekijät.....</i>	<i>84</i>
8.2.3	<i>Nousuaika ja nousuajan painokerroin .....</i>	<i>85</i>
8.3	SIOITTELULLA TUOTETTUIEN TIETOJEN HYÖDYNTÄMINEN.....	86
8.3.1	<i>Yleistä .....</i>	<i>86</i>
8.3.2	<i>Sijoittelutulosten hyödyntäminen joukkoliikenteen suunnittelussa.....</i>	<i>86</i>
8.3.3	<i>Sijoittelutulosten hyödyntäminen kysyntäennusteissa .....</i>	<i>87</i>
8.3.4	<i>Suunnittelijan ja Emme-käyttäjän vuorovaikutus.....</i>	<i>88</i>
8.3.5	<i>Emme-verkkojen ylläpito .....</i>	<i>88</i>
8.4	MUIDEN SIOITTELUTAPOJEN VAIKUTUS KOODAUSTAPOJEN VALINTAAN .....	89
<b>9</b>	<b>YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT .....</b>	<b>90</b>
9.1	YHTEENVETO .....	90
9.2	PÄÄTELMÄT .....	91
9.3	JATKOTUTKIMUSKOHTEET.....	93
	<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>94</b>
	<b>LIITTEET.....</b>	<b>98</b>

## **LIITELUETTELO**

LIITE 1. LISTA HAASTATTELUIHIN OSALLISTUNEISTA  
ASiantuntijoista

LIITE 2. EMMEN VUOROVÄLIPOHJAISEN Sijoittelumallin  
Määrittely

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Taustaa

Joukkoliikenteen linjastosuunnittelulla pyritään luomaan kattava ja hyvin palveleva linjasto, joka vastaa joukkoliikenteen käyttäjien matkustustarpeisiin. Suunnittelu vaatii tuekseen ennusteita joukkoliikennelinjojen käyttäjämääristä. Linjanvalintaa joukkoliikenteessä voidaan mallintaa liikenteen sijoitteluohjelmistoilla. Sijoittelun tuloksia hyödynnetään joukkoliikenteen suunnittelussa vertailtaessa erilaisia linjastoja.

Joukkoliikennejärjestelmän ominaisuudet vaikuttavat kulkutavanvalintaan ja linjanvalintaan joukkoliikenteessä. Sijoittelumallissa joukkoliikennejärjestelmän kuvaus vaikuttaa linjojen kuormitukseen, joten liikennejärjestelmä on pyrittävä kuvaamaan tavalla, joka sopii käytössä olevaan sijoittelumenetelmään.

Emme on liikennesuunnitteluohjelmisto, jolla mallinnetaan reitinvalintaa henkilöauto- ja joukkoliikenteessä. Liikennemallissa kuvaus jaetaan yleensä kahteen osaan: tarjontamalliin ja kysyntämalliin. Ohjelma tarjoaa työkalut liikenteen kysynnän ja tarjonnan mallintamiseen, liikenteen sijoitteluun ja analysointiin. Tarjontamalli sisältää kuvauksen käytettävissä olevasta liikennejärjestelmästä. Kysyntää kuvataan matkamatriisilla, joka sisältää matkamäärät lähtö- ja määräpaikkojen välillä tarkasteluajanjaksolla. Emme sijoittelee kysynnän liikennejärjestelmään ja tulostaa matkustajamääriä kulkuvälineissä ja liikennemääriä väylillä.

Emme-ohjelmisto tarjoaa joukkoliikenteen sijoitteluun kaksi erilaista algoritmia. Perinteisempi keskimääräisiin vuoroväleihin perustuva sijoittelu on kehitetty kaupunkien joukkoliikenteen suunnittelun tarpeita varten. Sijoittelualgoritmin kehitystyön lähtökohtia ovat olleet kaupunkiliikenteelle tyypilliset tiheä vuoroväli ja säännöllinen liikennöinti. Toinen sijoittelualgoritmi, aikataulusijoittelu, mahdollistaa joukkoliikenteen aikataulujen sisällyttämisen joukkoliikenteen tarjontamalliin. Algoritmi soveltuu erityisesti vuoroväleiltään harvan ja epäsäännöllisen joukkoliikenteen mallintamiseen.

## 1.2 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Työn tarkoituksena on kehittää liikennejärjestelmän kuvausta Emme-mallissa niin, että sijoittelulla tuotetut kuormitukset joukkoliikennelinjastossa vastaisivat paremmin todellisia matkustajamääriä. Työssä tutkitaan joukkoliikennejärjestelmän linjakohtaista kuormittumista ja kuormittumiseen vaikuttavien tekijöiden vaikutus-



mekanismeja. Pääpaino on Emmen vuorovälipohjaisessa sijoittelussa. Työn taustalla ovat ongelmat eri joukkoliikennekulkutapojen kuormittumisessa joukkoliikennejärjestelmän Emme-kuvauksessa.

Työssä pyritään luomaan ohjeita Emmen käytölle joukkoliikenteen suunnittelun tarpeita varten. Samalla pyritään tunnistamaan Emmen mahdollisuudet ja rajoitukset joukkoliikenteen suunnittelun apuvälineenä ja arvioidaan joukkoliikennesijoittelun hyödyntämismahdollisuuksia joukkoliikennelinjaston suunnittelussa ja arvioinnissa. Työssä pohditaan vaihtoehtoisia tapoja kuvata joukkoliikennetarjonta niin, että malli kuvaisi paremmin todellista linjaston kuormittumista. Erityisesti kiinnitetään huomiota tarjontakuvaukseen ja sen tarkkuustasoon. Linjastokuvauksen osalta tavoitteena on tutkia ja luoda ohjeita verkon ja linjaston koodaukseen aikaisemmin käytettyjen kuvauseriaatteiden tuoman kokemuksen pohjalta. Tarkastelut tehdään pääkaupunkiseudun joukkoliikenneverkolla.

Liikenteen sijoittelu joukkoliikennejärjestelmään on kokonaisuus, jossa koodaustavat ja valitut parametrit yhdessä vaikuttavat liikenteen sijoittumiseen linjoille. Verkon laajuuden takia testaukseen valittuja koodaustapoja ei ole tässä työssä mahdollista toteuttaa koko verkolle vaan vain valituille verkon osille. Testit antavat kuitenkin suuntaa-antavaa tietoa siitä, miten sijoittelutulos muuttuu eri verkonkuvaustavoilla. Sijoitteluparametrien yksityiskohtainen arvojen määrittäminen vaatisi laajempaa tutkimusta ja parametrien estimointia. Tavoitteena on kuitenkin selvittää, miten kukin parametri vaikuttaa sijoittelutulokseen ja pohtia kunkin parametrin käyttöä sijoittelussa.

Sijoitteluun vaikuttavista tekijöistä on jätetty tarkastelun ulkopuolelle kysynnän muutokset. Matkamatriisi voi olla merkittävä sijoittelun tulosten virhelähde, mutta siihen ei ole mahdollista suoraan vaikuttaa linjastokuvauksen ja sijoitteluparametrien avulla.

### **1.3 Tutkimusmenetelmät**

Työssä käytetään tutkimusmenetelminä kirjallisuusselvitystä, asiantuntijahaastatteluja ja tapaustutkimuksia.

Tutkimuksen teoreettista taustaa kartoitetaan kirjallisuusselvityksellä. Kirjallisuusselvityksessä perehdytään sijoittelun taustalla oleviin tavoitteisiin ja teorioihin. Selvityksessä kartoitetaan joukkoliikenteen suunnittelun tasoja ja vaiheita. Liikenne-ennusteista esitetään nelivaiheinen liikenne-ennusteprosessi, jossa sijoittelusta saatavia tietoja käytetään lähtötietoina. Selvityksessä esitellään myös sijoittelualgo-

ritmien kehityspolkuja 70-luvulta nykyaikaan.

Joukkoliikenteen suunnittelijoiden ja mallintajien kokemuksia ja näkemyksiä sijoitteluohjelmiston käytöstä joukkoliikenteen suunnittelun tukena kartoitetaan asiantuntijahaastatteluin. Haastattelut toteutetaan teemahaastatteluina. Haastateltavat henkilöt on esitetty liitteessä 1.

Emmen vuorovälipohjaisen sijoittelualgoritmin ominaisuuksia havainnollistetaan yksinkertaisten testien avulla. Testien avulla tunnistetaan algoritmin ominaisuudet. Sijoittelumenetelmän ominaisuuksien tuntemisen perusteella luodaan koodausperiaatteita, joilla saadaan malli vastaamaan paremmin todellista matkustuskäyttäytymistä.

Koodausperiaatteita testataan tapaustutkimuksessa. Tutkimuksessa keskitytään Pasila–Hakaniemi-joukkoliikennekorridorin kuormituksen testaamiseen pääkaupunkiseudun joukkoliikennejärjestelmää kuvaavalla Emme-verkolla. Kuvauksen toimivuutta tutkitaan tarkastelussa linjastomuutoksen ennen- ja jälkeen-tilanteissa. Lähtötietoina tutkimuksessa käytetään HKL:n matkustajalaskentatietoja, joihin sijoittelun avulla tuotettuja matkustajien nousijamääriä verrataan.

Tapaustutkimuksissa tavoitteena on kehitettyjen koodaustapojen testaaminen. Tutkimuksessa otetaan huomioon linjastosuunnittelun ja kysyntäennustemallien erilaiset tarpeet, jotka osaltaan tuovat haasteita yhtenäisen kuvaustavan löytämiseen.

## 2 JOUKKOLIIKENTEEN SUUNNITTELU

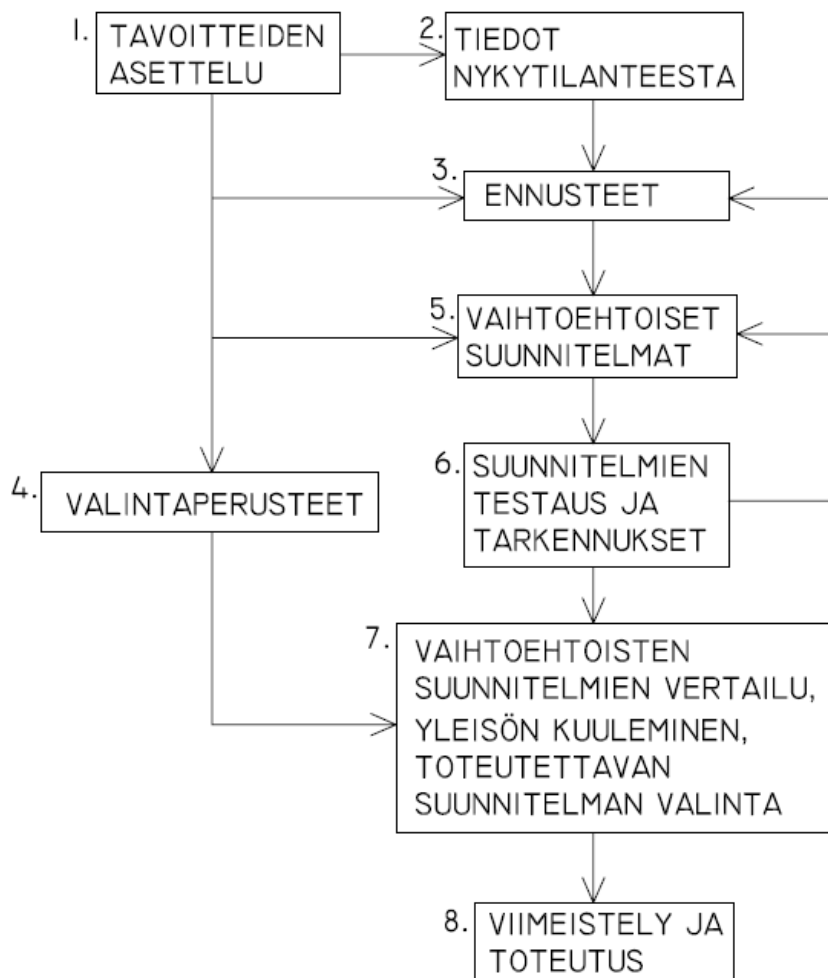
### 2.1 Yleistä

Joukkoliikenteellä tarkoitetaan henkilöiden kuljettamista suurehkoille henkilömäärille tarkoitetuilla liikennevälineillä. Joukkoliikenteessä ajoneuvot kulkevat tavallisesti tiettyä reittiä pitkin noudattaen tiettyä aikataulua. Joukkoliikenteellä on tärkeä merkitys liikennejärjestelmän tehokkuuden lisäämisessä, ympäristöhaittojen vähentämisessä ja kaikkien käytettävissä olevana peruspalveluna taajamissa. Joukkoliikenteen ylläpitäminen tukee kansallista tasa-arvoisuutta, sillä pitkällekin autoistuneessa yhteiskunnassa kaikki eivät voi kulkea henkilöautolla. (Ojala ja Pursula 1994.)

Joukkoliikenteen suunnittelun yksityiskohtaisuus vaihtelee yksittäisen linjan tai pysäkin tarkasteluista koko järjestelmätason tarkasteluihin. Linjaston suunnittelussa perustavoitteina ovat yleensä taloudellisuus ja hyvä palvelukyky. Hyväksi palveluksi koetaan nopeat, tiheävuoroväliset ja selkeät yhteydet tärkeimpiin kohteisiin. Käyttäjien tarpeisiin pystytään yleensä vastaamaan sitä paremmin, mitä suurempi joukkoliikenteen käyttäjämäärä ja kulkutapaosuus on. Järjestelmä saadaan yleensä toimimaan tehokkaasti, kun järjestelmän henkilösuorite on suuri. Niinpä suunnittelulla pyritään houkuttelemaan joukkoliikenteen käyttäjiksi mahdollisimman paljon matkustajia. (Ojala ja Pursula 1994, Kangas 2007, Vuchic 2005.)

Joukkoliikenteen suunnitteluprosessi sisältää erilaisia suunnitteluvaiheita riippuen suunnittelun tavoitteista, suunnitelman mittakaavasta, aikajänteestä ja muista tekijöistä sekä siitä, onko kyseessä uusi suunnitelma vai suunnitelman päivitys. Suunnitteluprosessi voidaan esittää sarjana peräkkäisiä vaiheita takaisinkytkentöineen (kuva 1). Yleisesti prosessi sisältää seuraavat vaiheet:

1. tavoitteiden asettelu tulevaisuuden joukkoliikennejärjestelmälle
2. nykytilanteen inventointi
3. muutosten ja tilanteen ennustaminen tarkasteluvuodelle
4. valintaperusteiden muodostaminen tavoitteiden perusteella
5. vaihtoehtoisten suunnitelmien kehittäminen
6. vaihtoehtojen kehittäminen ja testaus ottaen huomioon sen vaikutukset kaupunkikehitykseen
7. vaihtoehtoisten suunnitelmien vertailu valintaperusteiden ja yleisön kuulemisen perusteella. Toteutettavan suunnitelman valinta.
8. valitun suunnitelman viimeistely ja toteutus. (Vuchic 2004.)



Kuva 1. Joukkoliikenteen suunnitteluprosessin vaiheet takaisinkytkentöineen (Vuchic 2004).

## 2.2 Joukkoliikenteen suunnittelun tasot

Joukkoliikenteelle ei ole vakiintunut selkeää kansallisesti yhtenäistä suunnittelujärjestelmää. Tämä johtuu osittain erilaisista tavoitteista ja joukkoliikenteen erilaisesta luonteesta eri alueilla ja osaltaan erilaisista tavoista järjestää joukkoliikenne eri paikoissa. Suunnittelu voidaan jäsentää hierarkkisesti tasoittain ratkaistavien ongelmien, suunnittelun aikavälin tai alueellisen laajuuden mukaan. (Ernvall ja Luttinen 2009, Jalasto 2004.)

Suunnittelun aikavälin mukaan toimintakenttä voidaan jäsentää hierarkkisesti pitkän, keskipitkän ja lyhyen aikavälin suunnitteluun. Ongelmien merkityksen mukaan suunnittelu jaetaan *normatiiviseen* eli päämääräsuunnitteluun, *strategiseen* eli toimintalinjasuunnitteluun ja *operatiiviseen* eli toiminnan suunnitteluun. Normatiivinen suunnittelu edustaa pitkän aikavälin (yli 10 vuotta) suunnittelua, strateginen suunnittelu pitkän ja keskipitkän (3-6 vuotta) aikavälin suunnittelua ja operatiivinen keskipitkän ja lyhyen aikavälin (yleensä vuosi) suunnittelua. (Ernvall

2004.)

Normatiivinen suunnittelu tähtää yleisten tavoitteiden ja niiden keskinäisten suhteiden määrittelyyn. Normit ovat sääntöjä, joiden avulla arvoista tai yleisistä päämääristä voidaan johtaa vaihtoehtoisia ratkaisuja. Normatiivinen suunnittelu luo perustan strategisen suunnittelun ratkaisuvaihtoehdoille ja määrittää samalla niiden vertailukriteerit. Liikennesuunnittelussa normatiivinen suunnittelu käsittelee lähinnä liikennepoliittikan periaatteita. (Ernvall 2004.)

Strategisessa suunnittelussa yleisistä tavoitteista johdetaan täsmennetyt ja yksityiskohtaiset tavoitteet. Strategisessa suunnittelussa pyritään etsimään sellainen kehityspolku, joka parhaiten tyydyttää suunnittelulle ylemmältä tasolta asetetut tavoitteet. Strategisella tasolla pohditaan lähinnä liikennepoliittikan keinoja ja niistä johdettuja toimintalinjoja. Strateginen suunnitelma on pohja operatiiviselle suunnittelulle. (Ernvall 2004.)

Operatiivinen suunnittelu suuntautuu toteutukseen ja toimeenpanoon ja perustuu ylemmällä tasolla päätettyihin päämääriin ja tavoitteisiin. Liikennesuunnittelussa operatiivinen suunnittelu tarkoittaa lähinnä erillisten hankkeiden toteuttamissuunnittelua ja yksityiskohtaista suunnittelua. (Ernvall 2004.)

Joukkoliikenteen suunnittelun tasot voidaan määrittää myös alueellisen laajuuden mukaan. *Valtakunnantasolla* suunniteltavat asiat koskevat kansallisia tavoitteita, joita voivat olla yleiset palvelutasotavoitteet, kuten esimerkiksi peruspalvelutaso tai markkinaosuustavoite. *Seututasolla* edellytyksiä joukkoliikenteen järjestämiselle luodaan maankäyttösuunnitelmissa. Tilanne pätee myös toisin päin, sillä hyvillä joukkoliikenneyhteyksillä voi olla ratkaiseva merkitys maankäyttöpäätöksille, jolloin joukkoliikennejärjestelmällä vaikutetaan maankäyttöön. Seututason joukkoliikenteen suunnittelun keskeisin väline on vakiintumassa oleva palvelutasosuunnitelma. Suunnitelmassa julkinen valta määrittelee realistisen tavoitteen eri yhteysväleille ja matkaryhmille. *Liikennejärjestelmäsuunnitelmassa* määritetään seudun liikennepoliittiset tavoitteet ja siten myös joukkoliikenteen rooli seudulla. Liikennejärjestelmäsuunnitelmaan voidaan liittää yksityiskohtaisempia joukkoliikennettä koskevia osasuunnitelmia. Kaupungit, jotka ovat ottaneet taloudelliselle vastuulleen joukkoliikenteen, tekevät joukkoliikenteen pitkän tähtäimen järjestelmäsuunnitelman, jonka sisältönä on tavoiteltava markkinaosuus, palvelutaso, keskeiset linjastoratkaisut sekä erityistä kehittämistä edeltävät asiat. Muutaman vuoden välein uusittava *linjastosuunnitelma* sijoittaa reitit maastoon, määrittää vuoromäärät ja liikennöintiajan ulottuman. (Jalasto 2004.)

## 2.3 Joukkoliikenne järjestelmänä

Mahdollisuudet joukkoliikenteen taloudelliseen hoitoon määritetään jo maankäytön suunnittelun ja toteutuksen yhteydessä. Joukkoliikenteen suunnittelun tulee kytkeytyä kaavoitusprosessiin. Ilman yhteenkytkentää kaavoitusvaiheessa on linjasto- ja liikennöintisuunnittelu myöhemmin lähes mahdotonta. Yhdyskunnan liikennejärjestelmän perusteet luodaan yleiskaavatasolla. Yleiskaavatasolla ratkaistaan syntyvän liikenteen määrä ja suuntautuminen sekä liikenneyhteyksien sijainti ja palvelutaso osoittamalla aluevaraukset eri käyttötarkoituksiin. Joukkoliikenneverkko tarkistetaan yleiskaavassa esitetyn verkon pohjalta. Alueen sijainnista, koosta ja muista tekijöistä riippuu, miten keskeinen joukkoliikenteen merkitys on. Asemakaavatasolla varsinaisen liikennesuunnittelun osuus on vähäinen. Detaljikaavoituksessa ylemmillä kaavatasoilla määritellyt tavoitteet toteutetaan yksityiskohtaisilla ratkaisuilla, kuten osoittamalla pysäkkien, kääntöpaikkojen ja pysäköintipaikkojen sijainti ja mitoitus. (Kallionpää 2010, Ojala ja Pursula 1994.)

Joukkoliikennejärjestelmää kehitettäessä on otettava perusteellisesti huomioon toimintojen sijoitus ja mitoitus sekä liikenne- ja reittijärjestelyjen toimivuus. Joukkoliikenne vaatii riittävän suuren käyttäjäkunnan ollakseen kannattavaa. Yhdyskuntarakenne ja maankäytön tehokkuus vaikuttavat merkittävästi joukkoliikennepalvelujen järjestämismahdollisuuksiin sekä tarvittavien joukkoliikennelinjojen määrään, muotoon ja pituuteen. (Ernvall 2004, Ojala ja Pursula 1994.)

*Liikennejärjestelmäsuunnittelu* on pitkän aikavälin strategista suunnittelua. Tavoitteena on valmistella keskeisten osapuolten kanssa yhteisesti hyväksytty suunnitelma liikennejärjestelmän kehittämiseksi. Suunnitelmassa käsitellään eri kulkumuotoja ja niiden keskinäistä työnjakoa, liikenteen ja maankäytön vuorovaikutusta, liikenneverkkoja, liikennejärjestelmän vaikutuksia, rahoitusta sekä liikennealan yhteistyömuotoja. Suunnittelun tuloksina saadaan liikennejärjestelmän kehittämistavoitteet, tavoitevuosien liikennejärjestelmän kuvaus, kehittämisstrategia, toimenpideohjelma ja aiesopimus. Joukkoliikenteen järjestelmäsuunnittelu voidaan jakaa koko järjestelmän suunnitteluun ja järjestelmän osien suunnitteluun. Koko järjestelmän suunnitelmissa käsitellään esimerkiksi taajamia, joissa reittien ja maankäytön vuorovaikutus on merkittävä. Järjestelmän osia suunniteltaessa käsitellään järjestelmän alueellisia osia tai joukkoliikennejärjestelmän osajärjestelmiä. Alueellisten osien suunnittelussa päätetään esimerkiksi kaupunkisektorin, liikennekorridorin, asuntoalueen tai keskustan liikenteen järjestämisestä. Osajärjestelmien suunnittelussa keskitytään yksittäisen liikennemuodon, terminaali- tai informaatiojärjestelmän suunnitteluun. (Sihto 2005, Ojala ja Pursula 1994.)

## 2.4 Linjastosuunnittelu

Taajamien joukkoliikenteessä ajoneuvoilla on tietyt aikataulut, joita ne noudattavat. *Reitti* on linjan kulku katu- tai tieverkossa. Reitin ja aikataulun muodostamaa palvelukokonaisuutta kutsutaan *linjaksi*. *Vuoro* on yksi joukkoliikennevälineen aikataulun mukainen liikennöinti lähtöpysäkiltä päätepysäkille. Joukkoliikennelinjan kahden peräkkäisen lähdön aikaeroa niiden lähtiessä linjan alkupisteestä kutsutaan *vuoroväliksi*. Linjan päätepysäkit ovat tavallisimpia ajantasauspaikkoja, joista vuorot lähtevät aikataulun mukaisesti liikkeelle. Ajantasauspaikkoja voi olla myös reitin varrella. *Linjastolla* tarkoitetaan joukkoliikennelinjojen muodostamaa kokonaisuutta. *Joukkoliikennekorridori* on tietty suunta, jonka liikenneverkkoa voidaan käsitellä kokonaisuutena. (Nokela ym. 1980, Ojala ja Pursula 1994.)

*Linjastosuunnittelu* on linjojen perustamista tai uudelleen järjestämistä koskevien päätösten valmistelua. Linjastosuunnittelussa pyritään aikaansaamaan kohdealueelle mahdollisimman taloudelliset ja palvelukykyiset joukkoliikenneyhteydet. Linjastosuunnittelu sisältää linjastorakenteen ja reittien suunnittelun. Lähtökohtana suunnittelussa ovat joukkoliikenteen matkustuskysyntä ja matkojen suuntautuminen, asetetut yhteys- ja palvelutasotavoitteet sekä taloudelliset resurssit. Suunnittelussa kiinnitetään huomiota erityisesti kävelyetäisyyksiin, matka-aikoihin ja väestöpohjaan. Linjastosuunnittelu voidaan nähdä matemaattisena optimointitehtävänä, jossa mahdollisimman pienillä kustannuksilla pyritään luomaan mahdollisimman hyvä palvelutaso ja samalla mahdollisimman suuri joukkoliikenteen kulkutapaosuus. (Ernvall 2004, Helke 2007.)

Lähi- ja paikallisliikenteen suunnittelu liittyy suunnittelun alueen kaavoitukseen, kuntasuunnitteluun, joukkoliikenteen järjestelmäs suunnitteluun ja liikennöitsijöiden toiminnansuunnitteluun. Suunnittelutarkkuus ja suunnitelman sisältö määräytyvät suunnittelun aikatahtäyksen ja käyttötarkoituksen mukaan. Linjastosuunnittelu ja alueen muu liikennesuunnittelu ovat vuorovaikutuksessa keskenään. (Ernvall 2004.) Linjastosuunnitteluvaiheessa poliittisten elinten tavoitteenasettelu ohjaa joukkoliikenteen resurssien käyttöä. Tavoitteenasettelussa voidaan määrittää vähimmäis- ja tavoiteohjeavot esim. matka-ajalle, vuorovälille, kävelyetäisyyksille, vaihdoille tai turvallisuus-, ympäristö- tai tavoitettavuusvaatimuksille. (Ojala ja Pursula 1994.)

Joukkoliikenteen linjastosuunnittelua tehdään lyhyellä, keskipitkällä ja pitkällä aikatahtäimellä. Pääkaupunkiseudulla pitkän aikavälin linjastosuunnittelu liittyy lähinnä suurten raideliikennehankkeiden tai uusien asuinalueiden liikenneyhteyksien suunnitteluun. Suunnitelmat ovat usein yleispiirteisiä ja niillä tutkitaan eri investointivaihtoehtojen toimivuutta. Muutokset keskipitkällä aikajänteellä kaupun-

kirakenteessa voidaan ennakoida melko tarkasti. Muutosten toteuttamiselle on myös riittävästi aikaa, mikäli muutos ei vaadi merkittäviä investointeja infrastruktuuriin. Keskipitkän tähtäimen linjastosuunnittelun aikajänne on pääkaupunkiseudulla hieman pidempi kuin viisi vuotta, sillä liikennöintisopimukset rajoittavat yksittäisen linjan muutoksia yleensä viideksi vuodeksi kerrallaan. Lyhyen tähtäimen linjastosuunnittelua tehdään tilanteissa, joissa tietty toiminto siirtyy alueelle, jonka joukko-liikennetarjonta on perustunut muunlaiseen maankäyttöön. Tällöin alueen joukko-liikennetarjontaa muutetaan toiminnon tarpeiden mukaan. (Kallionpää 2010, Kangas 2007.)

*Reittisuunnittelun* tavoitteena on määritellä kunkin linjan reitti, lähtö- ja määräpaikka, linjan pysäkit ja vaihtokohdat, vuoroväli ja liikennöintiajat. Keskeisiä lähtötieto- ja reittisuunnittelussa ovat matkustajakysynnän määrä vuorokauden eri aikoina sekä lähtö- ja määräpaikkajakauma. Suunnitteluun vaikuttavat myös palvelutason ohjeavrot liikennöintiajasta, kävelyetäisyydestä, vaihtojen määrästä ja vuorovälistä. Reittisuunnittelun ratkaisuilla vaikutetaan linjan palvelutasoon ja liikennöinnin kustannuksiin. (Ernvall 2004.)

Matka-aikaan ja palvelutasoon vaikuttavat keskeisesti *kävelyetäisyys* ja *vuoroväli*. Kävelyetäisyyteen voidaan vaikuttaa linjastorakennetta tai reittiä muuttamalla. Tavoitteena on, että kaikilla alueilla olisi ainakin yksi joukkoliikennelinja hyväksyttävällä etäisyydellä. Paremman vuorotiheyden saavuttamiseksi joudutaan kuitenkin usein hyväksymään pidemmät kävelymatkat. Vuoroväli vaikuttaa odotus- ja vaihtoaikoihin pysäkillä. Kun kysyntä on tasaista, tarjoaa säännöllinen vuoroväli mahdollisuuden tehokkaaseen liikennöintiin. Säännöllinen vuoroväli on myös matkustajien kannalta houkuttelevin vaihtoehto. (Vuchic 2005, Ernvall 2004.)

Linjan *kokonaispituus* ei saa olla liian suuri. Jos linjan ajoaika on pitkä, on se herkkä viivytyksille, ajoajat ovat epäluotettavia ja matkustusmukavuus kärsii. Reittisuunnittelun yhteydessä päätetään myös *pysäkkien määrä* ja *sijainti*. Linjalla pysäkit sijoitetaan kysynnän mukaan lähelle keskeisiä matkustuskohteita. Pysäkkivälin suurentaminen pidentää kävelymatkoja, mutta lyhentää ajoaikaa. Suunnittelussa tavoitteena tulisi olla kokonaismatka-ajan minimointi ottaen huomioon kävelyetäisyyksien ohjeavrot. (Ernvall 2004.)

Reittisidonnainen joukkoliikenne mahdollistaa matkustajille suoran yhteyden reitin varrella olevien paikkojen välille. Jos matkan lähtö- tai määräpaikka sijaitsee suoran yhteyden vaikutusalueen ulkopuolella, syntyy vaihtotarve. Vaihdoista aiheutuu matkustajille viivytystä, epämukavuutta ja mahdollisesti lisäkustannuksia. Vaihtojen järjestäminen tulee ottaa huomioon linjastoa suunniteltaessa etenkin keskusta-



alueilla. Vaihto voidaan järjestää siten, että linjojen aikataulut on sovitettu toisiinsa ja matkustaja voi vaihtaa yhteisillä pysäkeillä tai asemalla ilman pidempää odotusta. (Ernvall 2004.)

Linjastosuunnittelu voidaan jakaa kahteen *päätyyppiin*: nykyisen linjaston tarkistuksiin ja uusien alueiden linjaston suunnitteluun. Päätyypit eroavat toisistaan lähtövaatimustensa, lähtötietojen saatavuuden, työtapojen ja toteuttamistapojen osalta. (Kangas 2007.)

Tarkistettaessa nykyisiä linjastoja voidaan tärkeimpinä lähtötietoina pitää tietoja nykyisestä liikennöinnistä ja matkustuksesta. Maankäytön osalta tarkastellaan edellisen tarkistuksen jälkeen tapahtuneita muutoksia ja lähitulevaisuudessa odotettavissa olevia muutoksia. Muutokset samalla aikajänteellä palvelurakenteessa ja erityisesti koulu- ja terveydenhuoltopiireissä tarkastellaan. Muutokset linjastoon muuttavat matkustajien liikkumismahdollisuuksia ja niillä voi olla vaikutusta muuhun liikenteeseen ja jopa alueen viihtyisyyteen. (Kangas 2007.)

Uusien alueiden linjastoa suunniteltaessa tärkeimpiä lähtötietoja ovat suunnitellut maankäyttötiedot, suunnitellun liikenneverkon rakenne ja mahdolliset uuden alueen liikenteen suuntautumisenmusteet. Tarvittaessa käytetään tietoja ympäröivien alueiden nykyisestä liikennetarjonnasta ja matkustuskäyttäytymisestä. (Kangas 2007.)

## **2.5 Linjojen liikennöinnin suunnittelu**

Linjojen liikennöinnin suunnittelu sisältää *aikataulusuunnittelun*, *kaluston käytön suunnittelun* sekä *ajovuorosuunnittelun*. Suunnittelun lähtökohtina ovat reittisuunnittelussa linjalle päätetty reitti ja valittu liikennöinti-aika. Liikennöinnin suunnittelussa määritellään linjojen kierrosajat, vuorovälit ja vaunutarve eri liikennöintijaksoille. Aikataulusuunnittelussa määritellään linjojen lähtöajat. (Ernvall 2004.)

Linjan matkustajamäärä ja reitin ajoaika vaihtelevat vuorokauden eri aikoina. Liikennöintisuunnitelmaa laadittaessa vuorokausi jaetaan liikennöintijaksoihin. Joukkoliikenteen viikonpäivä- ja kausivaihtelu on merkittävää, ja liikennöinti- ja aikataulusuunnitelmat joudutaan laatimaan erikseen työpäivä-, lauantai- ja sunnuntailiikenteelle sekä talvi- että kesäkaudeksi. (Ernvall 2004.)

Linjaston, kierrosaikojen ja eri liikennöintijaksojen vuorovälien määrittelyn jälkeen voidaan aloittaa varsinainen aikataulusuunnittelu. Aikataulu laaditaan määrittämällä yksityiskohtaisesti ajettavat lähdöt ja niiden lähtöajat päätepysäkeiltä. Aikataulu-

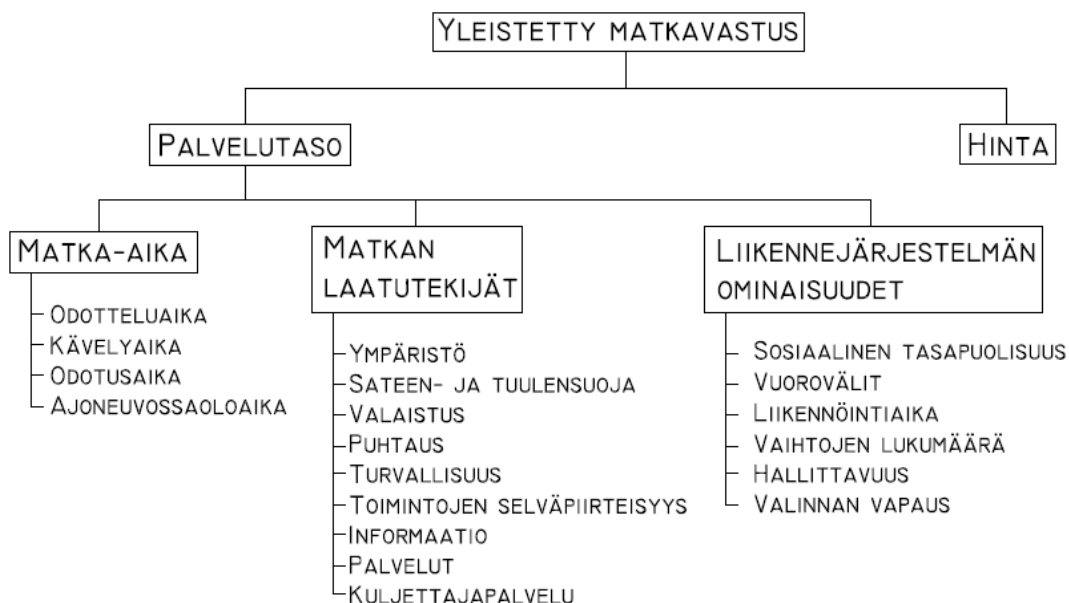
suunnittelussa otetaan huomioon töiden, koulujen ja muiden toimintojen alkamis- ja päättymisaajat. Aikataulusuunnittelussa on huolehdittava eri linjojen aikataulujen yhteensovittamisesta. (Ernvall 2004.)

Joukkoliikenteen kysyntä vaihtelee eri vuorokauden aikoina. Vaihtelevaan kysyntään vastaamiseksi ja kapasiteetin optimoimiseksi tarjonta on räätälöitävä vastaamaan mahdollisimman hyvin kysyntää. Tämä voidaan toteuttaa lyhentämällä vuoroväliä kysyntähuipun aikana tai käyttämällä tällöin matkustajakapasiteetiltaan isompia kulkuneuvoja. (Vuchic 2005.)

## **2.6 Joukkoliikenteen palvelutasotekijät**

Joukkoliikenteen käyttäjälle olennaista on mahdollisuus siirtyä paikasta toiseen valitsemanaan ajankohtana. Päätökseen matkan toteuttamisesta vaikuttavat liikennepalvelujen olemassaolon ja kattavuuden lisäksi esimerkiksi matkan nopeus, hinta, tarpeettoman kävelemisen ja odottamisen välttäminen, matkanteon mukavuus ja maksamisen helppous. Myös mahdollisten jatkoyhteyksien on oltava toimivia. (Ojala ja Pursula 1994.)

Joukkoliikenteen palvelutaso on laaja ja monimuotoinen käsite. Tavoitteellinen palvelutaso ja palvelutasotekijät määritellään yleensä käyttäjän näkökulmasta. Näin määriteltynä palvelutaso on matkustajan kokemus tai potentiaaliselle käyttäjälle ilmenevä joukkoliikennejärjestelmän ja matkan kokonaislaatu. Palvelutasotekijöiden ja hinnan yhdistelmä muodostaa kokonaismatkavastuksen, jonka katsotaan kuvaavan sitä arvoa, jonka perusteella eri kulkutapojen edullisuutta kyseiseen matkustustarpeeseen vertaillaan. Yleistetyn matkavastuksen teoreettinen muodostuminen joukkoliikenteessä on esitetty kuvassa 2. (LVM 2006, LVM 2007a.)



Kuva 2. Yleistetty matkavastus joukkoliikenteessä (mukailten: Ojala ja Pursula 1994).

Yleistetty matkavastus muodostuu matkakustannuksista, matkan osavaiheiden kestosta, matkan laatutekijöistä ja järjestelmän palvelutaso-ominaisuuksista. Tekijät muutetaan yhteismitallisiksi, yleensä joko ajaksi tai rahaksi. Yhdistämistavan mukaan yleistettyä matkavastusta kutsutaan joko yleistetyksi matka-ajaksi tai yleistetyksi matkakustannukseksi. Matka-ajan osavaiheet muutetaan vertailukelpoiksi rasittavuuskertoimien avulla. Positiiviset matkaelämykset, laatu- ja palvelutekijät, vähennetään matkavastuksesta. (Ojala ja Pursula 1994.)

Joukkoliikenteen matka-aika koostuu seuraavista osatekijöistä: *odotteluaika*, *kävelyaika*, *odotusaika* ja *ajoneuvossaoloaika*. Odotteluaika johtuu siitä, että vuorovälin takia muuta ajankäyttöä on sovittava jo ennen pysäkillä menoa. Odotteluaika on aika, jonka matkustaja joutuu odottamaan esimerkiksi työpaikalla työajan jälkeen tai jonka johdosta hänen on tultava työpaikalle ennen työajan alkamista. Kävelyaika jakautuu lähtö-, saapumis- ja vaihtokävelyy. Lähtökävely on kävely paikalle, jossa henkilö nousee joukkoliikennevälineeseen ja saapumiskävely on poistumispysäkillä tai -terminaalista matkan määränpäähän. Vaihtokävely on kävely, jonka henkilö kävelee päästäkseen joukkoliikennevälineestä toiseen. Odotusaika on aika, jonka matkustaja odottaa pysäkillä, asemalla tai terminaalissa. Ajoneuvossaoloaika on aika, jonka matkustaja on joukkoliikennevälineessä sisällä. (LVM 2007a, Nokela ym. 1980, Ojala ja Pursula 1994).

Matkustajat kokevat joukkoliikennematkan eri osavaiheet erilaisina, mikä vaikuttaa

matkustajien reitti- ja yhteysvalintoihin. Eri yksilöt painottavat tekijöitä eri tavalla riippuen mm. sosioekonomisista taustatekijöistä. Tällaisia taustatekijöitä ovat mm. autonkäyttömahdollisuus, tulotaso, ikä ja sukupuoli. Eri tekijöiden painotuksiin vaikuttaa myös matkan tarkoitus. Työ- ja koulumatkoilla varmuus perillepääsyajasta on erityisen tärkeää. Painotuksiin vaikuttavat myös aiemmat kokemukset. Jos henkilöllä on tapana lukea lehteä työmatkallaan, voi hän pitää mahdollisuutta saada istumapaikka tärkeimpänä tekijänä. (Karhunen 1993.)

Joukkoliikenteen suunnittelun tavoitteissa palvelutasoa voidaan arvioida ja määritellä esimerkiksi kolmitasoisena mallina, jonka tasot ovat perustaso, tavoitetaso ja kilpailutaso. Perustasolla tyydytetään autottomien asukkaiden perusliikkumistarpeet ja yhdyskunnan toimintojen sijoittumisen aiheuttamat liikkumistarpeet, kuten koulu- ja työmatkat. Tavoitetasolla tarjotaan joukkoliikenteen palveluja kuntakoh- taisten tavoitteiden mukaisesti ja liikennöinti on selvästi kaupunkimaista paikallis- liikennettä. Kilpailutasolla joukkoliikenne pyritään järjestämään henkilöauton kanssa kilpailukykyiseksi kulkutavaksi ja tavoitteena on tasavertaisen liikennejärjes- telmän luominen. (Ojala ja Pursula 1994.)

## **2.7 Joukkoliikennesuunnitelmien arviointi**

Joukkoliikennehankkeiden vaikutuksia analysoidaan kannattavuuslaskelmien lisäksi vaikuttavuuden arvioinnilla, joka sisältää sekä määrällistä että laadullista arviointia. Lisäksi kuvataan ja arvioidaan toteutettavuuteen ja ajoitukseen vaikuttavia seikkoja. *Suunnittelua palvelevassa arvioinnissa* vaikutusten analysoinnin tarkoituksena on parantaa suunnitelmien laatua. Vaikutusten analyysillä haetaan vastausta esimerkik- si kysymykseen, miten asetetut palvelutasotavoitteet ja -normit saavutetaan tehok- kaimmin tai miten annetuilla resursseilla saavutetaan mahdollisimman hyvä palvelutaso. *Rahoitus- ja toteutus päätöstä pohjustavassa arvioinnissa* tarvitaan kattava vaikutettavuuden arviointi sekä kannattavuuslaskelma, jos sen edellytykset ovat olemassa. Tärkeitä ovat myös toteutettavuuden arviointi ja päätelmät. Analyys- sillä haetaan vastausta kysymykseen, kannattaako arvioitavat toimet toteuttaa. (LVM 2007b.)

Suunnitelmien yhteydessä arvioidaan ja arvioidaan palvelutasovaikutuksia: tarjon- taa, matka-aikaa, matkan laatutekijöitä, hintaa ja muita liikennejärjestelmäominais- suuksia. Matka-ajan absoluuttinen muutos voidaan arvioida suunnitelmien ja matkustajamääräennusteiden perusteella. Matka-ajan osista arvioidaan kävelyyn, odotukseen ja ajoneuvossaoloon kuluvaan aikaan. Liikennejärjestelmän ominaisuuksista arvioidaan linjaston kattavuutta, järjestelmän hallittavuutta, alueellista tasapuo- lisuutta, sosiaalista tasapuolisuutta, linjaston yhdistävyyttä ja optioarvoa. Linjaston

kattavuus ja yhdistävyys vaikuttavat mm. matkojen kävely- ja odotusaikoihin sekä vaihtojen määrään. (LVM 2007b.)

Rahoitus- ja toteutus päätös ei aina edellytä kannattavuuslaskelmaa. Kaupungeissa, jotka itse hoitavat joukkoliikenteen, hankkeen toteutuksen peruste voi olla myös tietyn imagon luominen, alueen houkuttelevuuden parantaminen tai maan arvonnousun edistäminen. (Kallionpää 2010.)

### **3 LIIKENNE-ENNUSTEET**

#### **3.1 Yleistä**

Liikenne-ennuste on tiettyihin oletuksiin perustuva arvio liikennemääristä tarkasteltavalla alueella, tieosalla, joukkoliikennelinjalla, jne. Liikenne-ennusteita tarvitaan antamaan kuva tulevaisuuden liikennejärjestelmän toiminnasta ja palvelukyvystä. Liikenne-ennusteiden tietoja tarvitaan suunniteltavien liikennehankkeiden teknisen mitoittamisen lähtötiedoiksi ja järjestelmän palvelutason suunnittelua varten. Liikenne-ennusteilla on tärkeä rooli liikennesuunnitteluun liittyvässä päätöksenteossa ja niitä tarvitaan maankäyttöä, liikennejärjestelmää ja liikennepolitiikka koskevien ratkaisujen vaikutusten arvioinnissa. Ennusteiden alueellinen laajuus vaihtelee valtakunnallisista ennusteista paikallisiin vain tiettyä hanketta varten tehtyihin ennusteisiin. (Karasmaa 2005.)

Liikenne-ennusteisiin liittyen on tehty runsaasti tutkimuksia. Ennusteiden luotettavuus on kuitenkin rajallinen, ja niiden toteutumista on tutkittu vain vähän. Pitkän aikavälin liikenne-ennusteissa on usein otettava kantaa asioihin, jotka ovat riippuvaisia myöhemmin tehtävistä poliittisista päätöksistä. Ennustaminen on sitä epävarmempaa, mitä pidemmän aikavälin ennusteesta on kyse. Ajan myötä myös ihmisten arvostukset ja asenteet muuttuvat ja tämä vaikuttaa myös matkustuskäyttäytymiseen. Ennusteita laadittaessa ja hyödynnettäessä on tärkeää tunnistaa tulosten epävarmuus. (Karasmaa ja Kurri 2008, Vuchic 2004.)

Korkeatasoista liikennejärjestelmän suunnittelua ei tulisi arvioida vain tiettyjen itsenäisten hankkeiden yhdistelmänä, sillä uusi järjestelmä myös tuottaa uusia matkoja ja vaikuttaa jopa maankäyttöön ja muuhun kehitykseen. Joukkoliikenteen suunnittelua ja kaupunkisuunnittelua voidaankin pitää toisiinsa vaikuttavina osina. Suunnittelun ei pitäisi perustua vain itsenäisiin trendeihin, vaan pidemmän aikavälin visioihin järjestelmän toiminnasta. (Vuchic 2004.)

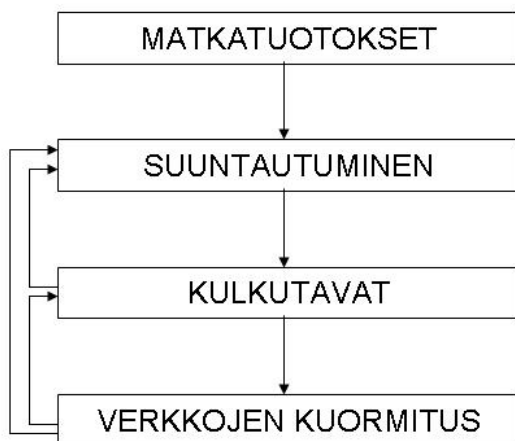
#### **3.2 Nelivaiheinen liikenne-ennusteprosessi**

##### **3.2.1 Yleistä**

Henkilöliikenteen kysynnän mallintamisessa on vallinnut neliporrasmalliksi kutsuttu lähestymistapa, jossa kysyntää mallinnetaan matkaperusteisesti. Neliporrasmalli on selkeytensä vuoksi yleisesti käytössä liikenne-ennusteita laadittaessa.

Malliennusteet perustuvat ajatukseen, että tietty maankäyttö synnyttää tietyn

liikenteen. Liikenne-ennusteprosessi sisältää yleensä neljä peräkkäistä vaihetta: matkatuotosten määrittäminen, matkojen jakaminen alueväleille, matkojen jakaminen kulkutavoille ja liikenteen sijoittelu eri reiteille (kuva 3). Liikennejärjestelmän ominaisuuksilla on vaikutusta matkojen suuntautumiseen, matkoilla käytettäviin kulkutapoihin ja reitinvalintaan sekä joltakin osin myös matkatuotoksiin. Esimerkiksi aiemmissa pääkaupunkiseudun liikennemalleissa ei kuitenkaan ole ollut takaisinkytkentää matkatuotoksiin asti, eli liikennejärjestelmän muutokset eivät ole vaikutta kokonaismatkamäärään. (Karasmaa 2005.)



Kuva 3. Nelivaiheisen liikenne-ennusteprosessi (Karasmaa 2005).

Neliporrasmallissa matkan tekemisen eri vaiheet ennustetaan omilla malleillaan, joko ryhmä- tai yksilömalleilla. Mallissa ei oleteta, että ihmiset noudattaisivat neliporrasmallin mukaista päätöksentekoketjua eli että ensiksi tehtäisiin matkapäätös ja sitten valittaisiin määräpaikka, vaan vaiheistus on tehty mallin yksinkertaistamiseksi. Todellisuudessa päätöksenteko perustuu ainakin harkinnanvaraisten matkojen osalta eri vaiheiden samanaikaisuuteen. Simultaaninen matkapäätös voidaan matemaattisesti esittää ehdollisten todennäköisyyksien avulla niin, että ehdollisten todennäköisyyksien järjestystä voidaan vaihtaa. Ennusteprosessin mallit estimoidaan eli parametrit määritellään nykyistä liikennekäyttäytymistä koskevien tietojen perusteella. (Karasmaa 2005.)

Neliporrasmallin eri vaiheet esitellään seuraavassa:

### 3.2.2 Matkatuotokset

Itse liikkuminen ei yleensä ole matkan tarkoitus, vaan liikkujalla on matkan tekemiseen jokin muu syy. Matkustuskäyttäytymistä voidaankin tarkastella matkan tarkoituksen ja matkustusajankohdan mukaan ja esimerkiksi suhteessa kotitalouden

kokoon, tulotasoon tai autonkäyttömahdollisuuteen. Matkat mallinnetaan matkaryhmittäin siksi, että eri tarkoituksissa tehdään eri määrä matkoja ja matkan tarkoitus vaikuttaa matkan ajankohtaan, suuntautumiseen ja kulkutapaan. Tavallisesti matkat ryhmitellään kotiperäisiin matkoihin ja ei-kotiperäisiin matkoihin. Osa-alueen matkatuotoksia arvioitaessa ja osa-alueiden välisiä liikennevirtoja määrittäessä sovelletaan yleensä nk. *generointi-attrahoointiperiaatetta*, jonka mukaan kotitaloudet tai osa-alueet generoivat matkoja, joita työpaikat ja ostoskeskukset attrahoivat eli vastaanottavat. *Matkatuotos* on yleisnimitys osa-alueen tuottamalle liikenteelle. Tuotosluku tai tuotoskerroin kuvaa matkojen määrää perusyksikköä kohti. (Karasmaa 2005.)

Osa-aluejakoa varten määritellään tarvittavien alueiden koko ja määrä tutkittavan ongelman luonteen mukaan. Mallin käyttötarkoitus ohjaa aluejaon määrittelemistä. Osa-alueiden on oltava kooltaan sellaisia, että lähtö- ja määräpaikat saadaan paikallistettua riittävän tarkasti ja että koko osa-alueelta on suunnilleen sama siirtymisaika päätieverkolle tai joukkoliikennejärjestelmään. Toisaalta liian tarkka aluejako huonontaa mallin käyttökelpoisuutta pidemmän aikavälin ennusteissa, joissa liikenteen kysyntään vaikuttavia tekijöitä ei voida ennustaa kovin pitkälle tulevaisuuteen. Osa-alueen koko ei myöskään saa olla liian suuri, sillä silloin alueelta lähtee liian monta syöttölinkkiä liikenneverkolle tai jonkin syöttölinkin liikennemäärä on huomattavasti suurempi kuin muiden syöttölinkkien. (Karasmaa 2005.)

Osa-aluetta muodostettaessa tärkein kriteeri on alueen maankäytön ja väestön homogeenisuus. Alueella ei saa olla fyysistä jakavaa elementtiä, kuten esimerkiksi jokea. Alerajojen tulee olla yhteensopivia mm. liikennelaskennoissa ja aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyjen rajojen kanssa. Osa-aluejako perustuu usein kunnan tilastoaluejakoon, jota sitten muutetaan tarpeen mukaan. Kuntien tilastoaluejaossa tiet toimivat usein alueiden jakajina ja erottavat alueet toisistaan. Jako ei aina palvele liikenne-ennustetta parhaalla mahdollisella tavalla, vaan liikenne-ennusteiden kannalta tiet tulisi käsitellä pikemminkin alueita yhdistävinä kuin erottavina tekijöinä. Erityisesti tämä vaikuttaa joukkoliikennesijoittelussa, jossa pysäkki palvelee tien kummallakin puolella olevia alueita. (Karasmaa 2005, Muotka 2009.)

### 3.2.3 Matkojen suuntautuminen

Matkatuotosten laskemisen jälkeen neliporrasmallin seuraava askel on matkojen suuntautuminen. Suuntautumista mallinnetaan yleensä gravitaatio- eli vetovoimamalleilla. Gravitaatiomallit muistuttavat piirteiltään Newtonin vetovoimamallia,



sillä niissä eri osa-alueiden välisten matkojen määrän ajatellaan olevan riippuvaisia lähtöalueelta syntyvien matkojen määrästä, alueiden välisestä etäisyydestä ja määräraipan toimintojen määrästä ja luonteesta. (Karasmaa 2005.)

Soveltamalla generointi-attraahointiperiaatetta saadaan vetovoimamalli, jota kutsutaan Voorhees-malliksi. Mallin mukaan osa-alueiden  $i$  ja  $j$  välinen liikennevirta on verrannollinen alueen  $i$  synnyttämien ja alueen  $j$  vastaanottamien matkojen kokonaismäärään. Etäisyyden vaikutusta matkojen määrään kuvataan matkavastus- eli etäisyysfunktion avulla. F-malli on Voorheesin sovellus tilanteeseen, jossa maankäyttö muuttuu, mutta liikenneverkko ei. Matkojen jakamiseen osa-alueiden välisiksi liikennevirroiksi voidaan käyttää myös logittimalleja. Niissä yhtenä selittäjänä on usein kulkutavanvalintamallista saatava nk. logsum-muuttuja, jolla kuvataan alueiden välisen matkustamisen hankaluutta. (Karasmaa 2005.)

### 3.2.4 Kulkutavan valinta

Matkalla käytettävä kulkutapa on riippuvainen henkilön ja matkan ominaisuuksista sekä liikennejärjestelmästä. Keskeisiä muuttujia ovat henkilön autonkäyttömahdollisuus sekä matkan kesto ja kustannukset eri kulkutavoilla. Nelivaiheisessa ennuste-prosessissa matkavastustietoja ei tiedetä ennen kuin matkat on jaettu eri kulkutavoille ja sijoitettu tieverkolle oletettujen matka-aika- ja kustannustietojen perusteella. Sijoittelusta saadut vastustiedot poikkeavat yleensä lähtöoletuksista ja ennusteprosessi on iteratiivinen. (Karasmaa 2005.)

Usein oletetaan, että ensiksi tehdään matkapäätös ja vasta sen jälkeen valitaan käytettävä kulkuneuvo. Todellisuudessa järjestys voi olla toinen: harkinnanvarainen matka päätetään tehdä vain, jos henkilöauto on käytettävissä. Pakollisilla työmatkoilla taas autottomilla ei usein ole muuta mahdollisuutta kuin käyttää joukkoliikennettä, jos kävelyä ja polkupyöräilyä ei voi pitää vaihtoehtoina matkan pituuden takia. (Karasmaa 2005.)

Ennen kulkutapamallien estimointia päätetään, kuinka monta vaihtoehtoa mallissa on ja miten vaihtoehdot suhtautuvat toisiinsa. Eri valintapäätökset voivat olla rinnakkaisia tai voidaan olettaa, että päätökset etenevät hierarkkisesti siten, että ensin tehdään esimerkiksi päätös siitä, käytetäänkö joukkoliikennettä vai autoa ja sitten joukkoliikenteen osalta päätös käytetäänkö bussia vai junaa. Ongelma liittyy vaihtoehtojen samankaltaisuuteen, ja toisinaan on pakko käyttää keinotekoisia puurakenteita vaihtoehtojen ja valinnan kuvaamiseksi. (Karasmaa 2005.)

Liikennetutkimusten tulosten perusteella matkojen kulkutapajakauma voidaan

määrittää eri ryhmittelyperustein, joista tärkeimmät ovat matkan tekijään, matkaan ja liikennejärjestelmään liittyvät ominaisuudet. Matkan tekijän ominaisuuksista on tärkein henkilöauton käyttömahdollisuus. Matkatuotoksia laskettaessa tarkastellaan usein erikseen autollisten ja autottomien kotitalouksien tai henkilöauton pääasiallisten käyttäjien ja muiden perheenjäsenten kulkutavan valintaa ja kulkutapajakaumia. Matkan ominaisuuksista kulkutapaan vaikuttavat sen tarkoitus, pituus ja suuntautuminen. Liikennejärjestelmän ominaisuuksista kulkutapajakaumaan vaikuttaa liikennejärjestelmän palvelutaso. (Karasmaa 2005.)

Kulkutavanvalinnan mallintamiseen käytetyt matemaattiset mallit voidaan jakaa ryhmämalleihin (aggregate model) ja yksilömalleihin (disaggregate model). Ryhmämallien selitettävä muuttuja on luonteeltaan keskiarvotietoa, yksilömallien taas yksittäistä valintaa koskeva. Aiemmin oli yleisesti käytössä ryhmämalleja, joiden parametrit estimoitiin homogeenisten väestöryhmien ja osa-alueiden keskiarvojen perusteella. Henkilöliikenteen mallintamisessa on kuitenkin 1980-luvulta lähtien siirrytty käyttämään yksilömalleja, joiden käyttäytymis- ja talousteoreettinen perusta on parempi kuin ryhmämallien. (Vuchic 2004, Karasmaa 2005.)

### *Valintamallin teoriaa*

Valintaa voidaan pitää peräkkäisiä päätöksiä sisältävän prosessin tuloksena. Valintaprosessi sisältää seuraavat askeleet:

1. valintaongelman määrittely
2. vaihtoehtojen muodostaminen
3. vaihtoehtojen ominaisuuksia kuvaavien muuttujien arvottaminen
4. valinta
5. valinnan toteutuminen. (Ben-Akiva & Lerman 1994.)

Valintakäyttäytymiseen ei aina sisälly kaikkia valintaprosessin askeleita. Valinta voidaan tehdä esimerkiksi vanhojen tottumusten perusteella. Valinta voidaan tehdä myös intuitiolla ottamatta selvää muista mahdollisista vaihtoehtoista tai saatetaan toistaa jonkun auktoriteettina pidetyn tekemä valinta. Tällaiset tilanteet voidaan käsittää valintaprosessina, jossa valintavaihtoehtoja on vain yksi. (Ben-Akiva & Lerman 1994.)

Valinnan tekemiseen vaihtoehtojoukosta tarvitaan päätöksentekosääntö. Sääntö kuvaa mekanismia, jota päätöksentekijä käyttää saatavissa olevan tiedon käsittelyyn ja valinnan tekemiseen. Päätöksentekosäännöt jaetaan neljään ryhmään:

- dominointi
- tyytyväisyys
- leksikaalisuus
- hyöty. (Ben-Akiva ja Lerman 1994.)

Vaihtoehto on dominoiva, jos se on muita vaihtoehtoja parempi vähintään yhdeltä ominaisuudeltaan ja jos se ei ole muita vaihtoehtoja huonompi minkään ominaisuuden suhteen. Dominointisääntö ei kuitenkaan aina johda valintaan, sillä aina ei löydy dominoivaa vaihtoehtoa. Sääntöä voidaan kuitenkin käyttää muiden vaihtoehtojen hylkäämiseen. (Ben-Akiva ja Lerman 1994.)

Tyytyväisyyskriteeriä käytettäessä asetetaan ominaisuuksille tietty tavoitetaso. Vaihtoehto voidaan hylätä, jos sen ominaisuuksista mikään ei saavuta tavoitetasoa. Tämäkään sääntö ei välttämättä johda yksittäisen vaihtoehdon valintaan, mutta yhdessä dominanssikriteerin kanssa saadaan ratkaisevampi sääntö. Tällöin valitaan vaihtoehto, jonka vähintään yksi ominaisuus saavuttaa tavoitetason ja jonka muut ominaisuudet ovat vähintään yhtä hyviä kuin muilla vaihtoehdoilla. (Ben-Akiva ja Lerman 1994.)

Leksikaalisia sääntöjä käytettäessä ominaisuudet asetetaan tärkeysjärjestykseen. Valinta kohdistuu vaihtoehtoon, joka on kaikkein houkuttelevin tärkeimmäksi koetun ominaisuuden suhteen. Jos näillä kriteereillä ei saada valittua yksittäistä vaihtoehtoa, tehdään valinta jäljelle jääneistä vaihtoehtoista toiseksi tärkeimmän ominaisuuden pohjalta. Tätä jatketaan kunnes päädytään yksikäsitteiseen valintaan. Leksikaalisia sääntöjä voidaan käyttää tyytyväisyysääntöjen kanssa: karsitaan valintavaihtoehdot, jotka eivät täytä tyytyväisyyskriteeriä tärkeimmän ominaisuuden osalta ja jos jäljelle jää useampi kuin yksi vaihtoehto, tutkitaan seuraavaksi tärkeintä ominaisuutta. (Ben-Akiva ja Lerman 1994.)

Valinta voidaan tehdä myös vaihtoehdoista saatavan hyödyn perusteella. Tällöin arvoiteltavien ominaisuuksien on oltava yhteismitallisia, eli attribuuttien vektorin on oltava palautettavissa skalaariksi. Vaihtoehtojen houkuttelevuutta kuvaa ominaisuuksista muodostettu hyötyfunktio ja valinta osuu vaihtoehtoon, joka maksimoi hyötyfunktion arvon. (Ben-Akiva ja Lerman 1994.)

Valinnan mallintaminen perustuu mikrotaloustieteen kuluttajan teoriaan. Teorian pohjalla on ajatus siitä, että rationaalinen kuluttaja valitsee vaihtoehdon, joka on hänelle mieluisin. Kuluttajan eri vaihtoehdoista saamaa hyötyä kuvataan hyötyfunktioilla. Matemaattisesti valintatilanne kuvataan optimointiongelmana, jossa kuluttaja maksimoi hyötyfunktion tuottamaa hyötyä. Valittavina ovat kaikki hyödykkeet,

jotka ovat kuluttajan saatavilla. Lisäksi ongelmaan kuuluu rajoitusehto: ostettujen tavaroiden yhteishinta ei saa ylittää käytettävissä olevaa rahamäärää. (Varian 1992.)

Talusteoriassa valintavaihtoehtojen joukko on yleensä jatkuva. Diskreetti valinta-teoria käsittelee tilannetta, jossa valittavien vaihtoehtojen lukumäärä on rajallinen.

Hyötyyn perustuvia päätöksentekosääntöjä sovelletaan liikennetekniikassa esimerkiksi logittimallissa, jota käytetään erityisesti kulkutavan- ja suuntautumisen mallintamisessa. Valintamallin hyötyfunktio kuvaa matemaattisesti eri matka-ajan, matkakustannusten ja palvelutason merkityksen matkustajan valintaan ja hänen kokemaansa hyötyyn.

### *Logittimalli*

Kulkutavanvalintaa voidaan mallintaa *logittimalleilla* tai suorilla kysyntämalleilla. Logittimalli on todennäköisyysteoreettinen yksilömalli, joka laskee vaihtoehtojen valinnan todennäköisyyden, kun yksilön ja vaihtoehtojen ominaisuudet tunnetaan. Kun valintaa mallinnetaan logittimalleilla voi kulkutavanvalinta sijaita mallistruktuurissa heti matkatuotosten määrittämisvaiheen jälkeen tai vasta suuntautumismallin jälkeen. Suoria kysyntämalleja käytettäessä matkatuotos, suuntautuminen ja kulkutavanvalinta mallinnetaan yhdellä kertaa. Kulkutapamallien määrittämiseksi on selvitettävä kulkutapaosuuksien tilastollisia riippuvaisuuksia matkaryhmittäin, kotitalouden ja liikennejärjestelmän ominaisuuksien mukaan. (Karasmaa 2005.)

Vaihtoehtojen valinnan todennäköisyys lasketaan niin kutsutun hyötyfunktion avulla. Hyötyfunktioilla kuvataan eri vaihtoehtojen ominaisuudet yksilön kannalta. Funktioilla lasketaan vaihtoehdoille skalaarinen arvo, jonka perusteella ne voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen. Hyötyfunktion arvoa kutsutaan yksilön vaihtoehdosta saamaksi hyödyksi. Päätöksentekijä pyrkii valinnallaan maksimoimaan hyötyään. (YTV 2005.)

Liikenne-ennusteissa on käytössä lineaarinen hyötyfunktio, joka on muotoa

$$V = \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_n x_{ni}, \quad (1)$$

jossa  $V_i$  on vaihtoehdon hyötyfunktio  
 $\beta_j$  on muuttujan  $x_j$  kerroin ( $j=1,2,\dots,n$ )  
 $x_{jk}$  on muuttujan  $x_j$  arvo vaihtoehdossa  $k$ . (Karasmaa 2005.)

$\beta_1, \dots, \beta_k$  ovat estimoitavat kertoimet. "Oikeiden" kertoimien oletetaan olevan

deterministisiä. Kertoimet estimoidaan yleensä suurimman uskottavuuden (maximum likelihood) menetelmällä. Perusajatuksena on valita tuntemattomat parametrit niin, että saatu otos on mallin mukaan mahdollisimman todennäköinen. (Karasmaa 2005.)

Kaikki kertoimet eivät välttämättä liity kaikkiin vaihtoehtoihin. Hyötyfunktion kertoimet ovat joko yleisiä tai vaihtoehtokohtaisia. Yleinen muuttuja esiintyy kaikkien tai ainakin kahden vaihtoehdon hyötyfunktiossa, vaihtoehtokohtainen muuttuja taas on mukana vain oman vaihtoehdonsa hyötyfunktiossa. Logittimallin mukaan vaihtoehdon valintatodennäköisyys  $P_i$  saadaan kaavasta

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j}} . \quad (2)$$

Valintatodennäköisyys on riippuvainen epälineaarisesti selittävistä muuttujista.

Mallin hyvyyteen vaikuttaa se, kuinka hyvin vaihtoehdot onnistutaan kuvaamaan eli saadaanko malliin mukaan valinnan kannalta olennaiset muuttujat. Puuttuvien tekijöiden vaikutus otetaan huomioon vaihtoehtokohtaisilla vakioilla, joita enimmäkseen on yksi vähemmän kuin vaihtoehtoja. (Karasmaa 2005.)

Soveltaessa logittimallia pitäisi periaatteessa jokaisen yksilön arvot sijoittaa siihen erikseen. Tavallisesti sitä käytetään kuitenkin ryhmämallin tavoin, eli siihen sijoitetaan tiettyjen väestöryhmien ja osa-alueiden keskimääräisiä ominaisuuksia esittävät arvot. (Karasmaa 2005.)

### 3.2.5 Liikenteen sijoittelu

Kulutavanvalinnan mallintamisen jälkeen tiedetään alueparikohtaiset kulkutapajakaumat, mutta kuljettava reitti ei ole vielä selvillä. Kullekin alueparille on yleensä useita mahdollisia reittejä. Sijoittelun tarkoitus on sijoitella matkat tietyille reiteille eli ennustaa liikennemäärät kullekin väylälle. (Vuchic 2004.)

Sijoittelussa tie- ja katuverkko mallinnetaan yleensä linkeillä ja solmupisteillä. Linkeillä kuvataan väyläosuuksia ja solmupisteillä liittymiä tai kohtia, joista liikenteen oletetaan tulevan verkolle. Sijoittelussa liikenneverkko kuormitetaan kysyntämatriisin mukaan. Reitinvalinnan perusteena käytetään matkavastusta, joka voidaan mitata matkan pituuden, matka-ajan tai yleistetyn matkakustannuksen avulla. Sijoittelumalleissa oletetaan yleensä, että matkustaja minimoi ajan ja matkan perusteella laskettua yleistettyä matkavastusta. (Karasmaa 2005.)

Vaikka sijoittelua käsitellään yleensä yksittäisenä vaiheena, se sisältää todellisuudessa seuraavat erilliset prosessit:

1. reitinvalinta kullekin alueparille
2. alueparien virtojen yhdistäminen kullakin linkillä
3. tarjontapuolen kapasiteettirajoitusten huomioonottaminen matkavastuksessa liikennemäärän funktiona
4. kunkin alueparin matkavastuksen määrittäminen. (Hensher ja Button 2000.)

Sijoittelumenetelmät voidaan jakaa muuttuvan reittivastuksen ja muuttumattoman reittivastuksen menetelmiin. Muuttumattoman reittivastuksen menetelmissä väylien tai joukkoliikennevälineiden välityskyvyille ei määritetä rajoituksia, vaan oletetaan, että liikennejärjestelmä voidaan mitoittaa sille tulevan liikennemäärän ja asetetun palvelutasovaatimuksen mukaan. Muuttuvan reittivastuksen menetelmissä kullekin linkille tai joukkoliikennelinjalle asetetaan tietty liikenteenvälityskyky ja linkin palvelutaso, esimerkiksi matka-aika, muuttuu liikennemäärän mukaan, kunnes löytyy tasapaino. (Karasmaa 2005.)

## 4 JOUKKOLIIKENTEEN LINJANVALINNAN MALLINTAMINEN

### 4.1 Ensimmäiset sijoittelualgoritmit

Joukkoliikenteen sijoitteluongelman ratkaisemiseksi on kehitetty useita erilaisia sijoittelualgoritmeja. Algoritmien kehityksen voidaan katsoa alkaneen 1960-luvun loppupuolella. Viimeisen 25 vuoden aikana on kehitetty useita erilaisia matemaattisia malleja kuvaamaan joukkoliikenteen käyttäjien reitin- ja linjanvalintaa. Ensimmäiset ongelman ratkaisemiseksi kehitetyt heuristiset algoritmit perustuivat yksinkertaisiin verkonkäsittelymenetelmiin kuten kaikki-yhdelle –menetelmään, jossa tietyn alueparin kaikki matkat sijoiteltiin matkavastukseltaan edullisimmalle reitille. Algoritmit perustuivat vastukseltaan pienimmän reitin etsimiseen ja ovatkin toimineet perustana myöhemmille tutkimuksille. (Karasmaa 2005, Liu ym. 2009.)

Suuri haaste joukkoliikennesijoittelumallin kehittämisessä on ollut linjanvalintakäyttäytymisen mallintaminen joukkoliikennepysäkillä, jolla pysähtyy useita kilpailevia joukkoliikennelinjoja. Kun palvelevia linjoja on useampi kuin yksi, matkustajat voivat nousta saapuvaan ajoneuvoon tai jäädä odottamaan toisen linjan ajoneuvoa saapuvaksi. Kunkin linjan odotusaika perustuu todennäköisyyteen ja matka-ajan minimoivia linjoja voi olla useita. (Liu ym. 2009.)

Chriqui ja Robillard (1975) määrittelivät ensimmäisinä selkeästi houkuttelevien linjojen joukon solmuparin välillä osajoukoksi joukkoliikennelinjoja, jotka minimoivat matkustajan todennäköisen matka-ajan, eli odotusajan odotusarvon ja ajoneuvossaoloajan. Menetelmä perustuu oletuksiin matkustajien satunnaisesta saapumisesta pysäkillä ja joukkoliikennelinjojen itsenäisistä vuorovälijakaumista ja näiden avulla luo optimaalisen osajoukon matemaattisella ohjelmoinnilla. Matkustajat sijoitellaan houkutteleville bussilinjoille niiden vuorotiheyksien suhteessa ja odotusajan odotusarvo bussipysäkillä on kääntäen verrannollinen vuorotiheyksien summaan. (Liu ym. 2009.)

Chriquin ja Robillardin menetelmää on laajennettu joukkoliikenneverkostoihin. Spiess esitteli 1984 strategian käsitteen, joka perustuu houkuttelevien linjojen joukon valintaan kussakin nousutilanteessa. *Strategia* on joukko sääntöjä, joita noudattamalla matkustaja pääsee määränpäähänsä. *Optimaalinen strategia* on strategia, joka minimoi matkustajan matka-ajan. (Liu ym. 2009.) Nguyen ja Pallottino lähestyivät myöhemmin ongelmaa graafiteoreettisesti ja ilmaisivat strategian suunnattuna ei-syklisenä graafina, joka yhdistää alueparin. Spiess ja Florian (1989) muotoilivat linjanvalinnan lineaarisen ohjelmoinnin ongelmaksi.

## 4.2 Matkustajamäärien vaikutus linjanvalintaan

Myös kulkuneuvojen, pysäkkien ja laiturien ruuhkautuminen voi vaikuttaa linjojen houkuttelevuuteen. Tungos kulkuneuvossa voi haitata matkustusmukavuutta, täyteen kulkuneuvon pääsy voidaan estää ja kulkuneuvon pysäkkiajat voivat kasvaa. Aiemmissa malleissa oletettiin, että matkustajamäärällä ei ole vaikutusta odotus- tai ajoneuvossaoloaikoihin. Klassinen käyttäjätasapaino liikenneverkossa on määritetty tilana, joissa kukaan matkustaja ei voi lyhentää matka-aikaansa siirtymällä toiselle reitille. Kaikilla matkustajilla oletetaan olevan sama matka-aika tietyllä reitillä. Ongelman ratkaisutekniikka kehitettiin laskentamalleilla 1960- ja 1970-luvuilla. Käyttäjäoptimin paradigma on sen jälkeen ollut vallitseva konsepti autoliikenteen sijoitteluongelmassa. 1980-luvun lopulta lähtien on käyttäjäoptimia sovellettu myös joukkoliikenteen sijoittelussa muuttamalla matkavastusta ja odotus- ja ajoneuvossaoloaikoja matkustajamäärän mukaan. (Liu ym. 2009, Wardrop 1952.)

Nguyen ja Pallottino (1988) ottivat mallissaan huomioon tungoksen kulkuvälineissä asettamalla matkavastuksen riippuvaiseksi reitin matkustajamäärästä. Spiess ja Florian (1989) tekivät optimaalisen strategian mallista epälineaarisen version, jossa matka-aika muuttuu liikennemäärän funktiona.

## 4.3 Satunnaisen hyödyn maksimointi

Satunnaisen hyödyn maksimointiin (random utility maximization, RUM) perustuvia diskreettejä valintamalleja on käytetty liikenteen kysynnän mallintamisessa 1970-luvulta lähtien. Satunnaisen hyödyn malleissa oletetaan, että päätöksentekijällä on täydellinen arvostelukyky. Päätöksentekijällä oletetaan kuitenkin olevan epätäydelliset tiedot ja siksi epävarmuustekijät on otettava huomioon. (Liu ym. 2009.) Nielsen (2000) esitti epävarmuustekijät, joihin stokastisissa linjanvalintamalleissa törmätään:

- Ihmisillä ei ole täydellistä tietoa liikenneverkostosta, mikä johtaa siihen, että he valitsevat rationaalisesti vain kokemiensa hyötyjen perusteella.
- Eri reittien matka-ajat vaihtelevat päivittäin.
- Eri reittejä valitaan vaihtelun vuoksi.
- Eri henkilöillä on eri mieltymykset.

Erilaiset oletukset satunnaistekijöiden jakaumasta ovat johtaneet siihen, että ongelman ratkaisuun on esitetty erilaisia ratkaisumalleja, muun muassa multinomista logittimallia. Satunnaisen hyödyn maksimointiin perustuvien mallien avulla



voidaan arvioida esimerkiksi matkustajan kokemaa ajan arvoa liikenteessä, matka-ajan, hinnan ja muiden ominaisuuksien vaihteluun liittyviä valinnan joustoja ja maksuhalukkuutta palvelumuutoksiin. Joukkoliikenteen sijoittelumalleissa satunnaisen hyödyn maksimointiin perustuvia valintamalleja on sisällytetty stokastisiin käyttäjäoptimin tasapainosijoittelumalleihin. (Liu ym. 2009.)

#### **4.4 Erityyppisten sijoittelumallien käyttö**

Joukkoliikenteen sijoittelumallit voidaan jakaa lähestymistavan perusteella staattisiin ja dynaamisiin malleihin. Staattisissa malleissa oletetaan matkojen jakautuvan tasaisesti tarkasteltavalle ajanjaksolle. Dynaamisissa malleissa otetaan huomioon myös matkan tarkka ajankohta.

Staattisia joukkoliikenteen sijoittelumalleja käytetään usein strategisessa ja pitkän aikavälin joukkoliikenteen suunnittelussa, vaikka monien kaupunkien joukkoliikennejärjestelmien tiedetään olevan kapasiteettiensa ääri rajoilla. Staattista lähestymistapaa on kritisoitu siitä, ettei se ota huomioon ruuhkautumisesta aiheutuvia pullonkauloja, eikä tarkasteluajan sisällä tapahtuvaa vaihtelua joukkoliikenteen kysynnässä. Oletus matkustajien tasaisesta saapumisesta pysäkillä voi johtaa ongelmiin myös kulkuneuvojen kuormitusluvuissa, jos joukkoliikenteen kysyntä vaihtelee suuresti tarkasteluajan sisällä. Tästä syystä viime vuosikymmenellä on otettu käyttöön dynaamiset liikenteensijoittelumallit. (Liu ym. 2009.)

Sijoittelumallit voidaan jakaa vuorovälipohjaisiin ja aikataulupohjaisiin malleihin. Useimmat staattiset mallit käyttävät vuorovälipohjaista lähestymistapaa kun taas suurin osa uusimmista dynaamisista malleista perustuu aikataulupohjaiseen tarjontamalliin. Aikataulupohjaiset sijoittelumallit käsittelevät joukkoliikennetarjontaa vuorolähtöisesti käyttäen oikeita ajoneuvojen lähtö- ja saapumisaikoja luodakseen ominaisuustietoja, joita voidaan käyttää nopeassa päätöksenteossa. Lähestymistavan avulla voidaan ottaa huomioon kysynnän ja tarjonnan, linjojen kuormituksen ja palvelutason muuttuminen ajan myötä. Aikataulupohjaisten mallit ottavat huomioon dynaamiset vaikutukset ja niiden avulla matkaa voi tarkastella myös spatiaalisesti. (Liu ym. 2009.)

Joukkoliikenteen sijoittelu on yleensä toteutettu vuorovälipohjaisesti kahdesta syystä: Tällainen lähestymistapa ei aseta lähtötiedoille yhtä tarkkoja vaatimuksia kuin aikataulupohjainen sijoittelu ja linjanvalintaongelma voidaan ratkaista helpommin tällä lähestymistavalla. Nämä ominaisuudet eivät kuitenkaan tee vuorovälipohjaisesta sijoittelusta aikataulupohjaista houkuttelevampaa vaihtoehtoa nykyliikenteen mallintamisessa. Informaatioteknologian ja tietokoneiden laskentatehon

nopean kehityksen myötä aikataulupohjaista joukkoliikennesijoittelua on nykyään mahdollista käyttää isompien ja korkeamman palvelutason joukkoliikenteen verkostoille kuin aiemmin. Myös säännöllinen ja paljon informaatiota sisältävä joukkoliikenneympäristö on vaikuttanut matkustajien reitinvalintakäyttäytymiseen, mikä huonontaa vuorovälipohjaisen sijoittelun käyttömahdollisuuksia nykyaikaisen reitinvalinnan mallintamisessa. (Liu ym. 2009.)

Jakamalla lähtö-määräpaikka-matriisi pienempiin osamatriiseihin kysynnän aikavaihtelun mukaan ja sijoittamalla se dynaamisella sijoittelualgoritmeilla voidaan mallintaa joukkoliikennejärjestelmän toimivuutta eri vuorokaudenaikoina. (Liu ym. 2009.)

Joukkoliikenteen sijoittelumallien kehitys pääpiirteissään on esitetty taulukossa 1. Tutkimusalueena joukkoliikenteen sijoitteluongelmalla on paljon yhteistä autoliikenteen sijoitteluongelman kanssa. Vertailtaessa henkilöauto- ja joukkoliikenteen sijoittelualgoritmien kehitystä voidaan nähdä, että autoliikenteen sijoittelu on ollut edelläkävijänä monissa joukkoliikenteenkin sijoitteluun ehdotetuissa mallinnustavoissa, esimerkiksi ruuhkautumisen vaikutuksia, epävarmuustekijöitä ja järjestelmän dynamiikkaa kuvattaessa. Eräs syy tähän voi olla se, että aiemmin henkilöautoliikenteeseen ja sen suunnitteluun kiinnitettiin enemmän huomiota kuin joukkoliikenteen suunnitteluun. Toinen syy myöhäisempään kehitykseen voi olla se, että henkilöautoliikenteen sijoitteluratkaisut eivät ole olleet suoraan siirrettävissä joukkoliikenteen reitinvalintakäyttämisen mallintamiseen. (Liu ym. 2009.)

Normatiivisten mallien käyttöä yksilöiden päätöksenteossa on kritisoitu käyttäytymistieteen suunnalta. Kriitikoiden mukaan matkustajat eivät todellisuudessa aina pyri hyödyn maksimointiin, eivät ole rationaalisia oppijoita eivätkä ole haluttomia ottamaan riskejä. Malleissa käytetyt oletukset käyttäytymisestä perustuvat vain harvoin käyttäytymistieteen olemassa oleviin teorioihin. (Liu ym. 2009.)

Perinteiset vuorovälipohjaiset tasapainosijoittelumallit on kehitetty pitkän aikavälin suunnittelua varten. Ne eivät sovi dynaamisen joukkoliikennejärjestelmän tarkasteluihin, joissa vaaditaan kykyä reaaliaikaiseen ongelmanratkaisuun. Perinteinen tasapainosijoittelu ja dynaaminen lähestymistapa perustuvat kilpaileviin filosofioihin: perinteinen tasapainosijoittelu perustuu oletukseen markkinatasapainosta, eristetyistä verkon tilasta, jossa vallitsevat tietyt rationaaliset käyttäytymissäännöt. Dynaaminen lähestymistapa perustuu oletukseen käyttäytymisen muuttumisesta, siitä, miten päivän  $n$  käyttäytymiseen vaikuttaa käyttäytyminen ja verkoston tila päivänä  $n-1$  ja aiemmin. (Liu ym. 2009.)

Sijoittelualgoritmit ja -mallit tarvitsevat yleistyäkseen myös ohjelmiston. Joukkoliikenteen sijoittelualgoritmeja on kehitetty paljon, mutta vain harvoja kehitetyistä algoritmeista on sisällytetty sijoitteluohjelmistoihin. Sijoittelumallin yleistymiseen ei vaikuta yksin mallin kyky kuvata todellisen maailman ilmiöitä, vaan myös ohjelmiston helppokäyttöisyys ja markkinointi. Tällä hetkellä yleisesti käytössä olevia joukkoliikenteen sijoitteluohjelmia ovat esimerkiksi Emme, Visum, Trips ja TransCAD.

Taulukko 1. Joukkoliikenteen sijoittelumallien kehitys (Liu ym. 2009).

Vuosikymmen	Lähestymistapa	Erityispiirteet		Luokka
1960, 1970	Kaikki yhdelle - sijoittelu	Vastukseltaan edullisimman reitin löytäminen		Staattinen joukkoliikennesijoittelu
1980	Strategia Solmuparin väliset yhteiset linjat	Linjanvalinta pysäkillä		
1990	Deterministinen tasapainosijoittelu	Matkustajamääristä riippuvat reitin ominaisuudet, ruuhkan vaikutukset	mukavuus	
			pysäkkiajat	
	Satunnaisen hyödyn maksimointi perustuen diskreetteihin valintamalleihin	Epävarmuudet matkustajakäyttämisen mallintamisessa	matkustajakertoimet	
			verkkokertoimet	
Stokastinen tasapainosijoittelu	Epävarmuudet ja ruuhkan vaikutukset			
2000	Ajan mukaan vaihtelevien kysyntämatriisien sijoittelu	Kysynnän ajallinen vaihtelu		Dynaaminen joukkoliikennesijoittelu
	Kysynnän tuntivaihtelun huomioonottavat dynaamiset mallit	Asteittainen kuormitus		
	Päivittäisen kysynnän vaihtelun huomioonottavat dynaamiset mallit	Päivittäinen reitin vaihto, lähtöajan säätäminen		
	Palvelun frekvenssiin perustuva verkonmuotoilu	Verkon muotoilu eri tarkkuustasoilla		
	Palvelun aikatauluun perustuva verkonmuotoilu			

## 5 JOUKKOLIIKENTEN SIOITTELU EMME-OHJELMISTOLLA

### 5.1 Yleistä

Emme-ohjelmiston joukkoliikennesijoittelua ja sen tuottamia tietoja hyödynnetään joukkoliikenteen suunnittelussa ja liikennemallien ja -ennusteiden laatimisessa. Suunnittelussa Emme-ohjelmistoa käytetään apuvälineenä linjastovaihtoehtojen vertailussa, saavutettavuusanalyyseissä, laajoissa järjestelmätarkasteluissa, strategisten hankkeiden arvioinnissa ja joukkoliikenteen laadun mittaamisessa. Sijoitteluilla tarkastellaan linjastomuutosten vaikutuksia matka-aikoihin, kulkutapaosuuksiin ja linjojen kuormituksiin. Emmeä käytetään myös linjamuutosten aiheuttamien vaikutusten analysointiin ja sijoittelutulosten avulla tutkitaan muutosten aiheuttamien hyötyjen ja haittojen jakautumista alueittain. Tulostietoja käytetään lähtötietoina yhteiskuntataloudellisissa laskelmissa. Liikenne-ennusteissa ja -malleissa käytetään lähtötietoina Emmessä tuotettuja liikennejärjestelmän ominaisuustietoja.

Merkittävien linjastomuutosten ja strategisten hankkeiden vaikutusten arvioinneissa, joissa hankkeen epäillään vaikuttavan kulkutavanvalintaan henkilöauton ja joukkoliikenteen välillä, liikennejärjestelmän uudet ominaisuustiedot viedään liikenne-ennustejärjestelmään ja joukkoliikenteen kysyntämatriisi tuotetaan uudelleen. Pienemmissä tarkasteluissa käytetään valmiiksi luotua kysyntämatriisia.

Emmessä on kaksi erityyppistä joukkoliikenteen sijoittelualgoritmia: vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelu ja aikatauluun pohjautuva joukkoliikennesijoittelu. Lisäksi yksittäisen alueparin matkojen tarkasteluun on oma sijoittelutapansa, joka perustuu vuorovälipohjaiseen sijoitteluun. (INRO 2009.) Joukkoliikenteen kuvaus on eri sijoitteluissa lähes identtinen ja eroaa vain joukkoliikenteen aikataulujen kuvaustavassa. (Partanen 2000.)

*Vuorovälisijoittelu* jakaa sijoiteltavat matkat usean reitin kesken odotettavissa olevan matka-ajan ja linjan vuorovälin perusteella. Vuorovälisijoittelualgoritmi on luonteelta staattinen. *Aikataulusijoittelu* on kehitetty vaihtoehdoksi vuorovälisijoittelun kannalta ongelmallisten, harvaliikenteisten ja vuoroväleiltään epäsäännöllisten liikenneverkkojen mallintamiseen (Partanen 2000). Emmen kolmas sijoittelutapa, *yksilösijoittelu* (disaggregate transit assignment), tarjoaa työkalun yksittäisen koordinaattiparin välisten matkojen sijoitteluun. Sijoittelu perustuu vuorovälipohjaisen sijoittelun tapaan optimaalisen strategian periaatteeseen, mutta eroaa perinteisestä vuorovälisijoittelusta siinä, että sijoiteltavien matkojen ei tarvitse alkaa ja loppua syöttöpisteeseen, vaan alku- ja loppupisteelle määritellään koordinaatit, jonka

jälkeen sijoiteltavat matkat alkavat ja loppuvat koordinaattien läheisiin solmu- tai syöttöpisteisiin (INRO 2009.)

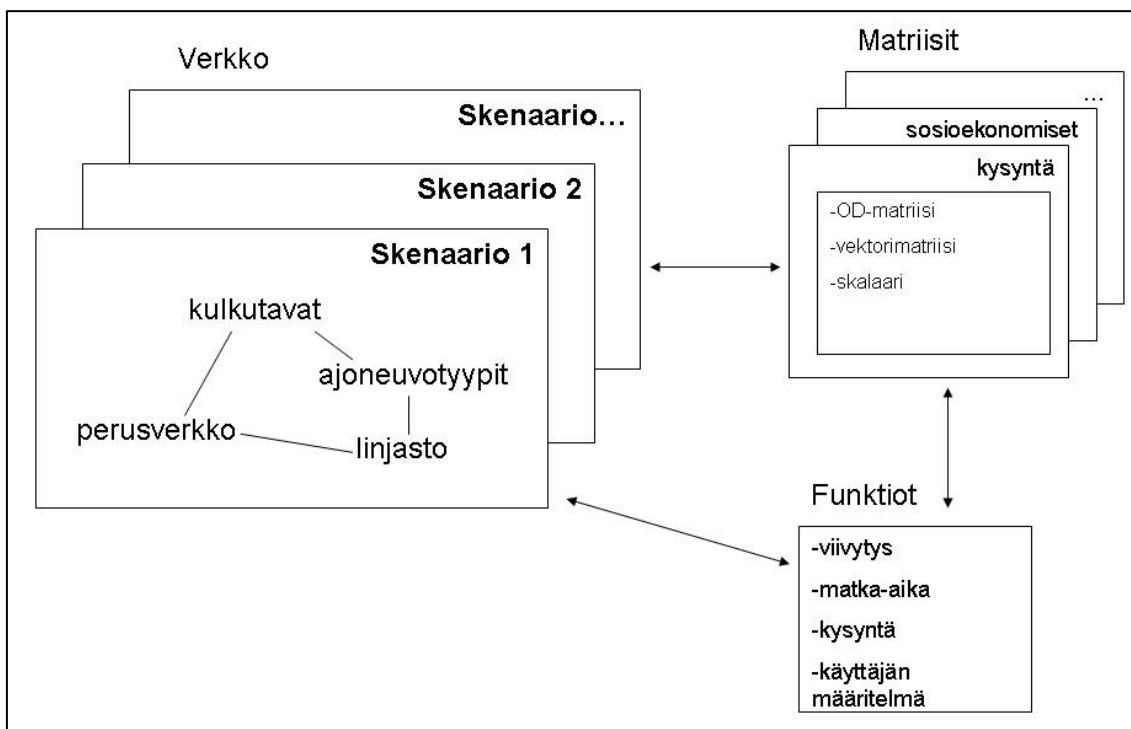
Emmen joukkoliikennesijoittelu ei ole kapasiteettirajoitettu, eli linjojen matkustajamäärillä ei ole vaikutusta linjanvalintaan. Lähestymistapa sopii tilanteisiin, joissa suunnitteluprosessin tavoite on tarjota ajoneuvoissa tarpeeksi kapasiteettia kullekin reitin valinneelle matkustajalle. Kulkuneuvojen matkustajakapasiteetti voidaan kuitenkin ottaa huomioon käyttämällä matka-aikafunktioita, joissa kulkuneuvojen matkustajamäärä vaikuttaa matka-aikaan. Tähän tarkoitukseen on kehitetty erillinen Emme-makro, jonka toiminta perustuu Frank-Wolfen algoritmiin. (Spiess 1993.)

Emme-ohjelmistoa kehittävä ohjelmistoyritys INRO on ilmaissut aikomuksensa lisätä Emmeen uuden logittimalliin perustuvan sijoittelutavan. Uuden sijoittelutavan hyviin puoliin lukeutuu se, että siinä tietyn alueparin matkustajat voivat hakeutua useammalle kuin yhdelle alkupysäkillä. Uuden sijoittelutavan tarkkaa ilmestymisajankohtaa ei ole kuitenkaan vielä määritelty. (Florian 2010.)

## **5.2 Järjestelmän kuvaus Emmessä**

### **5.2.1 Emme-pankki**

Emmessä liikennesuunnittelussa tarvittavat tiedot on varastoitu projektikohtaisiin tietopankkeihin, Emme-pankkeihin. Emme-pankin pääkomponentit ovat verkko, matriisit ja funktiot. Pankin rakenne on esitetty kuvassa 4. Yhdessä Emme-pankissa voi olla useita skenaarioita, joilla kuvataan erilaisia tilanteita ja visioita tarkastelualueella, esimerkiksi liikenneverkon kehitystä eri vuosina tai eri linjastovaihtoehtoja. Kysyntämatriisit ja funktiot ovat kaikille skenaarioille yhteiset, mutta eri skenaarioilla voi olla eri linjastot ja kulkutapa- ja ajoneuvotyypimääritelmät. (INRO 2009, Korhonen 1998.)



Kuva 4. Emme-pankin rakenne (INRO 2009).

### 5.2.2 Verkko

Emmessä liikenneverkko koostuu solmuista ja niitä yhdistävistä linkeistä. Perusverkko voidaan rakentaa Emmessä interaktiivisesti tai se voidaan tuoda ohjelmaan valmiina tiedostona. Tutkittava alue jaetaan osa-alueisiin, joiden välisten matkojen sijoittumista verkolle tutkitaan. Joukkoliikenteelle ja autoliikenteelle on mahdollista käyttää samaa verkkoa, mutta yleensä käytetään erillisiä ja jopa erilaisia verkkoja. (INRO 2009, Korhonen 1998.)

*Solmuja* on kahta eri tyyppiä: osa-aluekeskukset eli sentroidit ja tavalliset solmut. Solmuilla on numero, koordinaatit ja muistipaikat kolmea käyttäjän määrittelemää muuttujaa varten. (INRO 2009.)

Solmut voidaan yhdistää toisiinsa *linkeillä*. Linkkiä, joka yhdistää syöttöpisteen ja tavallisen solmun, kutsutaan *syöttölinkiksi* tai konektoriksi. Tavalliset linkit yhdistävät muita solmuja ja kuvaavat liikenneverkkoa. Linkin ominaisuuksia ovat sen pituus, linkillä sallitut kulkutavat, linkityyppi, kaistamäärä ja viivytysfunktion numero sekä kolme lisämuuttujaa. Linkin kaistamäärällä ja viivytysfunktiolla on lähinnä merkitystä vain autosijoittelussa. (INRO 2009.)

Joukkoliikennekuvauksessa on käytössä kaksi *kulkutapatyyppiä*: joukkoliikennekulkutavat (transit modes) ja liityntäkulkutavat (auxiliary transit modes). Linkeille, jotka sallivat joukkoliikennekulkutavat, voidaan asettaa kulkemaan joukkoliikenne-

linjoja. Liityntäkulkutapana on yleensä kävely. *Ajoneuvotyypit* kuvaavat ajoneuvoja tai niiden yhdistelmiä, joita voidaan käyttää joukkoliikennelinjoilla. Ajoneuvotyyppi voi liittyä vain yhteen kulkutapaan. Jos samaa ajoneuvotyyppiä halutaan käyttää kahdessa eri kulkutavassa, on se määritettävä molempiin erikseen. Yhteen kulkutapaan voidaan kuitenkin liittää useita ajoneuvotyyppisiä, esimerkiksi tavallinen bussi ja nivelbussi. (INRO 2009, Korhonen 1998.)

### 5.2.3 Linjasto

Joukkoliikennelinjalla kuvataan säännöllistä joukkoliikennepalvelua määrättyllä reitillä. Määrittäessä joukkoliikennelinjaa ilmoitetaan linjan numero, kulkutapa, ajoneuvotyyppi, oletusnopeus, vuoroväli ja nimi.

Linjan yksittäistä linkkiosuutta (solmuväliä) kutsutaan *segmentiksi*. Samalla linkillä voi kulkea useita linjoja, mutta segmentti on linjakohtainen. Segmenteille voidaan linjakuvauksessa määrittää käytettävä matka-aikafunktio. Mikäli matka-aikafunktiota ei määritetä, käytetään sijoittelussa linjalle määritettyä oletusnopeutta. Linjan viimeisen segmentin j-solmussa on aina ajantasauspiste. Linjaston pysäkit määritetään segmenttien tiedoissa siten, että segmentin muuttujien avulla määritellään, saako segmentin i-solmussa nousta ajoneuvoon tai poistua ajoneuvosta. Segmentille voidaan määrittää pysäkkiaika, joka kuvaa pysäkillä kuluvaa aikaa. (INRO 2009, Korhonen 1998.)

### 5.2.4 Funktiot

Funktioilla kuvataan verkon ominaisuuksien vaikutusta liikenteeseen. Funktiolla voidaan kuvata esimerkiksi liikennemäärän vaikutusta matka-aikaan. Joukkoliikennettä varten Emmessä on joukkoliikenteen matka-aikafunktio, joka määrää matka-ajan linjasegmentillä. Funktion muuttujina voivat olla linkin pituus, linjan oletusnopeus, käyttäjän määrittelemä linkin, segmentin tai solmun ominaisuus tai linjan ajoneuvotyyppi. Matka-aika voidaan myös sitoa vastaavan linkkiä käyttävän henkilöautoliikenteen matka-aikaan, jos henkilöautoliikenteen ja joukkoliikenteen sijoitteluun käytetään samaa verkkokuvausta. (INRO 2009, Korhonen 1998.)

### 5.2.5 Matriisit

Kunkin alueen matkatuotos ja matkojen suuntautuminen voidaan esittää taulukkomuodossa, jota kutsutaan yleisesti kysyntämatriisiksi. Kysyntämatriisin elementteinä ovat osa-alueiden väliset matkamäärät aikayksikössä. Matriisit ovat yhteisiä kaikille saman Emme-pankin skenaarioille, joten eri skenaarioiden verkoissa on



syötä käyttää samaa aluejakoa. Useimmiten tietyn skenaarion liikenneverkko kuormitetaan kysyntämatriisilla, joka vastaa tarkasteluajanjakson kysyntää.

Matriiseihin voidaan tallettaa tietoa myös joukkoliikennejärjestelmän aluekohtaisista ominaisuuksista, esimerkiksi osa-alueiden välisten matkojen pituuksista tai matka-ajoista. Kuljutavan valinta henkilöauton, kevyen liikenteen ja joukkoliikenteen välillä tehdään yleensä jo ennen kuin matkustuskysyntä tuodaan Emmeen ja joukkoliikennejärjestelmä kuormitetaan vain joukkoliikennematkoilla. Tällöin tuotu kysyntämatriisi kuvaa ainoastaan joukkoliikenteen kysyntää. Tarkasteluita varten osa-alueita voidaan ryhmittää isommiksi alueiksi. Tämä mahdollistaa alueiden välisten matkojen ja sijoittelutulosten tutkimisen karkeammalla tasolla.

Matriisit voivat olla muodoltaan kokonaisia matriiseja, lähtöpaikka- tai määräpaikkavektoreita tai skalaareja. Kokonaisilla matriiseilla voidaan kuvata kysyntää tai muita ominaisuuksia alueparien välillä kuvaukseen valitussa aluejaossa. Lähtöpaikka- tai määräpaikkavektoreilla voidaan kuvata alueiden ominaisuuksia, esimerkiksi matkatuotosta, aluekohtaisesti niin, että kutakin lähtö- tai määräpaikkaa kuvataan yhdellä luvulla. Skalaariin voidaan tallettaa yksittäinen luku. Emme-ohjelmiston matriisilaskuri ei noudata täysin totuttuja matriisilaskusääntöjä, vaan laskutoimitukset tehdään alkioittain.

#### 5.2.6 Sijoittelun ohjaaminen Emmessä

Kysynnän sijoittelua ohjataan Emmessä sijoitteluparametrien avulla. Matkakomponenttien painokertoimilla vaikutetaan optimaalisen strategian määrittämiseen kullekin alueparille. Parametreilla kuvataan matkustajien kokemaa vaivaa aikayksikköä kohden eri matkanosissa suhteessa ajoneuvossaoloaika koettuun vaivaan.

*Tehollinen vuoroväli* voi olla linjan todellinen vuoroväli sellaisenaan tai yleisen maksimiarvon kanssa. Tehollisena vuorovälinä voidaan käyttää myös matkustajan kokemaa vuoroväliä. Tällöin koettu vuoroväli voidaan tallentaa kunkin linjan tai linjasegmentin muuttuunaan. Tehollista vuoroväliä käytetään sijoittelussa odotusajan laskemisessa ja linjojen kuormituksessa. Yleensä odotusajan oletetaan olevan puolet tehollisesta vuorovälistä. Vuorovälille voidaan myös asettaa maksimi, jos vuoroväli on hyvin harva ja oletetaan, että matkustajan sovittaa matkansa joukkoliikenteen aikataulujen mukaan. Vuorovälin maksimin käyttöä ei kuitenkaan suositella, sillä sijoittelussa matkustajat sijoittellaan houkutteleville linjoille tarkasteluajanjakson vuorotiheyden suhteissa. Kun vuorovälin maksimi on käytössä, matkustajien jakauma linjoille vääristyy ja harvaliikenteiset vuorot saavat suhteellisesti liian suuren osan matkustajista. Tällöin harvaliikenteisten linjojen vuorovälimuutoksilla

ei ole myöskään vaikutusta sijoittelutuloksiin. (Korhonen 1998, Partanen 2000.)

*Odotusajan kerroin* on parametri, jota käytetään odotusaikojen laskemiseen. Odotusaika lasketaan kertomalla solmun kautta kulkevien houkuttelevien linjojen yhdistetty vuoroväli odotusajan kertoimella. Kertoimelle voidaan antaa arvo väliltä 0,01-1,00. Kun palvelutaso oletetaan tasaiseksi, käytetään parametrille usein arvoa 0,5. Tämä perustuu oletukseen, että odotusajan odotusarvo on puolet vuorovälistä. Suurempia arvoja voidaan käyttää, kun palveluvälit ovat epätasaisia. Pienempiä arvoja on käytetty, kun odotetaan matkustajien tuntevan aikataulut hyvin tai kun kyseessä on järjestetty vaihto. Odotusajan kerroin voidaan määrittää kullekin solmulle erikseen tai se voi olla sama koko verkolla. (INRO 2009, Korhonen 1998.)

*Nousuaika* on joukkoliikennevälineeseen nousemisesta aiheutuva vastus. Nousuajalle voidaan määrittää arvo välillä 0,00-999,99 minuuttia. Nousuaika voi olla sama koko verkolla tai se voidaan määrittää erikseen linja- tai solmukohtaisesti. Sijoittelun yhteydessä määritellään käytetäänkö koko verkolla samaa nousuaikaa, linjakohtaista, solmukohtaista vai linja- ja solmukohtaista nousuaikaa. Kun käytössä on linja- ja solmukohtainen nousuaika, on nousuaika solmun ja linjan nousuaikojen summa. (INRO 2009.)

Joukkoliikennesijoittelussa minimoitava painotettu kokonaismatka-aika koostuu kävely-, odotus-, nousu- ja ajoneuvossaoloajasta. Kävely-, odotus- ja nousuajoille määritellään painokertoimet suhteessa ajoneuvossaoloaikaan. Ajoneuvossaoloajan paino on siis 1 ja muut komponentit saavat painot väliltä 0,00-999,99. (Korhonen 1998.)

Painokertoimilla vaikutetaan optimaalisen strategian muodostumiseen. Painottamaton kokonaismatka-aika usein lyhenee, kun optimaaliseen strategiaan kuuluvien linjojen joukko sisältää useita linjoja eikä pelkästään nopeinta linjaa. Mitä suurempi painokerroin odotusajalla on, sitä suuremmaksi muodostuu optimaaliseen strategiaan valittavien linjojen joukko. Jos odotusaika koetaan erityisen epämukavaksi, ollaan valmiita valitsemaan hitaampiakin tapoja päästä määräpaikkaan. Vastaavasti mitä pienempi odotusajan paino on, sitä harvempi linja tulee valituksi optimistrategiaan, sillä pysäkillä ollaan valmiita odottamaan nopeinta linjaa. (INRO 2009, Korhonen 1998.)

Optimaaliseen strategiaan valittavien linjojen määrään vaikuttaa myös vaihtoehtojen hajontakerroin (spread factor). Kerrointa ei yleensä käytetä ja se on oletusarvoisesti 1. Hajontakerroimelle voidaan antaa arvoja välillä 0,01 ja 999,99, kuitenkin niin, että odotusajan painokertoimen tulo voi enintään 0,01 ja 999,99. Hajontakerroin

toimii kuten odotusajan painokerroin, eli sillä voidaan käyttää odotusajan säätämiseen niin, että matkustajat valitsevat harvempia tai useampia linjoja optimaaliseen strategiaan. Kun hajontakerroin on käytössä sijoittelussa, odotusaika pysäkillä lasketaan odotusajan kertoimen, optimistrategiaan valittujen linjojen yhdistetyn vuorovälin, odotusajan painokertoimen ja hajontakertoimen tulona. (Lebel 2010.) Hajontakertoimen vaikutukset voidaan tuoda sijoitteluun jo pelkästään odotusajan painokertoimen avulla, joten jatkossa tässä työssä keskitytään odotusajan painokertoimen, ei näiden kahden kertoimen yhdessä aiheuttamiin, vaikutuksiin sijoittelussa.

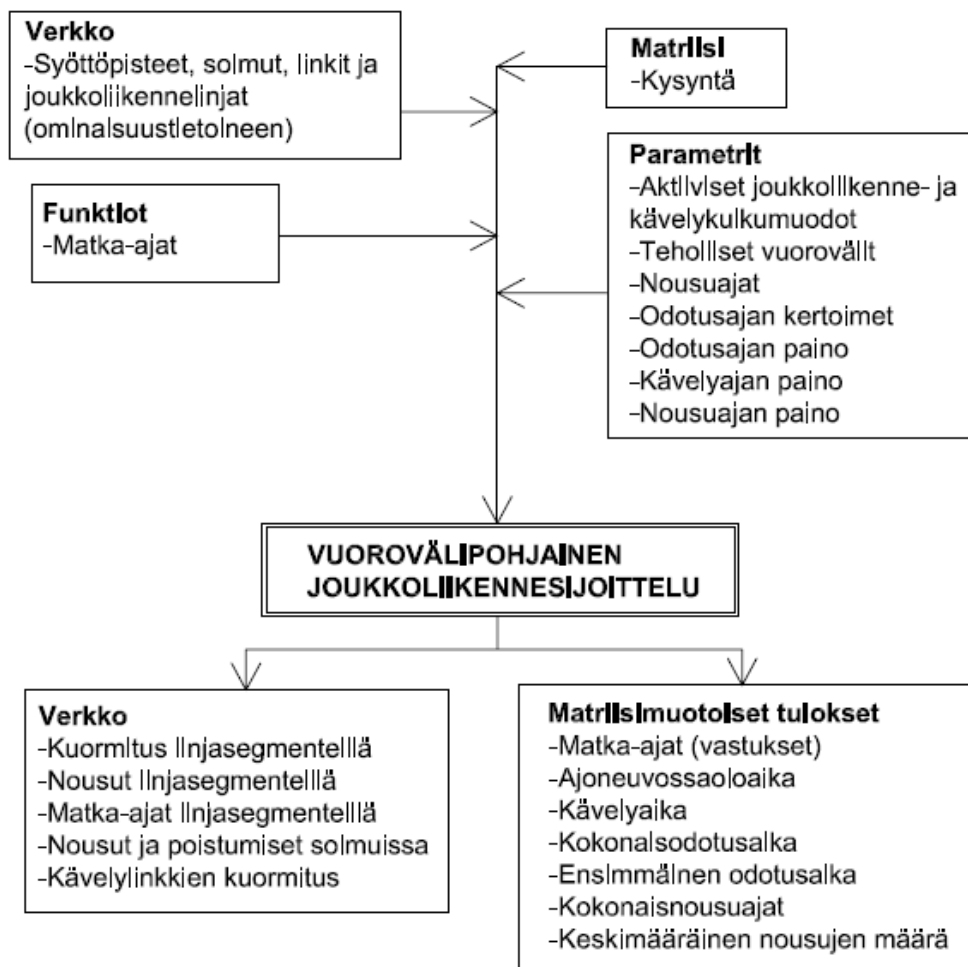
Sijoittelun tulokset ovat riippuvaisia myös verkon ja linjaston kuvaustavoista. Kuvaustarkkuudella voidaan vaikuttaa linjojen kuormittumiseen hyvinkin paljon, Myös esimerkiksi syöttölinkkien sijoituksella, eli sillä, miten osa-alueiden matkat on syötetty liikenneverkolle, on suuri vaikutus sijoittelutuloksiin.

Oleellisesti linjojen kuormituksiin verkolla vaikuttaa myös sijoitettava kysyntämatrissi.

### **5.3 Vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelu**

#### **5.3.1 Yleiset periaatteet**

Vuorovälipohjainen joukkoliikenteensijoittelualgoritmi pyrkii minimoimaan joukkoliikennematkustajien painotettua matka-aikaa aluepareittain. Kokonaismatka-aika koostuu kävelyajasta, odotusajasta, nousuajasta ja ajoneuvossaoloajasta. Komponenteille voidaan antaa eri painoarvoja. Painotettua kokonaismatka-aikaa minimoidaan sijoittelussa jakamalla matkat tietyin periaattein useammalle kuin yhdelle reitille. Vuorovälipohjaisessa sijoittelussa matkustaja valitsee painotetun matka-ajan minimoivan alkupysäkin, jolle siirtyy odottamaan. Pysäkillä ensin saapuva ajoneuvo määrää, mitä reittiä matkustaja lopulta käyttää. Matkustajan kannalta tietyllä pysäkillä houkuttelevia reittejä ovat kaikki ne reittivaihtoehdot, joiden matka-aika ilman odotusaikaa on lyhyempi kuin matka-ajaltaan nopeimman reitin odotusajan ja matka-ajan odotusarvo. Matkat jaetaan houkutteleville linjoille tarkastelujakson vuorotiheyksien suhteessa.



Kuva 5. Vuorovälipohjaisen joukkoliikennesijoittelun syöttötiedot ja tulosteet (INRO 2009).

Kuvassa 5 on esitetty vuorovälipohjaisessa joukkoliikennesijoittelussa tarvittavat syöttötiedot ja sijoittelun tulostiedot.

### 5.3.2 Painotetun kokonaismatka-ajan muodostuminen

Emmen vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelu perustuu optimaalisen strategian käsitteeseen. Strategia on joukko sääntöjä, joita noudattamalla matkustaja pääsee määränpäähensä. Valittavina olevien strategioiden määrä riippuu siitä, mitä tietoa matkustajalla on saatavilla matkansa aikana. Jos matkan aikana ei saada lisää liikenneinformaatiota, käytettävä reitti valitaan strategian perusteella. (INRO 2009.)

Joukkoliikennematka voidaan jakaa pienempiin matkanosiin. Matka voi sisältää kaikki tai osan seuraavista komponenteista:

- siirtyminen lähtöpaikasta pysäkille tai asemalle

- joukkoliikennevälineen odottaminen
- matkustus joukkoliikennevälineessä
- poistuminen joukkoliikennevälineestä
- kävely pysäkiltä toiselle vaihdon yhteydessä
- kävely pysäkiltä määräpaikkaan. (Spiess ja Florian 1989.)

Kullekin matkanosalle määritellään vastus aikayksiköissä. Painotettu kokonaismatka-aika ( $I$ ) koostuu kävelystä lähtöpäässä syöttölinkillä ( $I_{ao}$ ), odotuksesta ( $I_w$ ), noususta ( $I_b$ ), ajoneuvossaolosta ( $I_r$ ) ja kävelystä muilla kuin syöttölinkeillä ( $I_a$ ):

$$I = \sum I_a + \sum I_w + \sum I_b + \sum I_r . \quad (3)$$

Painotettu kävelyaika linkillä lasketaan kaavalla

$$I_o = \frac{l_{co}}{v_a} * w_a , \quad (4)$$

jossa  $l$  on linkin pituus (km)  
 $v_a$  on kävelykulkutavan nopeus (km/h)  
 $w_a$  on kävelyaajan painokerroin.

Painotettu odotusaika lasketaan kaavalla

$$I_w = \left( \sum \frac{1}{hw_t} \right) * wtf * w_w , \quad (5)$$

jossa  $hw_t$  on linjan t vuoroväli (h)  
 $wtf$  on odotusajan kerroin  
 $w_w$  on odotusajan painokerroin.

Painotettu nousuaika lasketaan kaavalla

$$I_b = bt * w_b , \quad (6)$$

jossa  $bt$  on nousuaika (min)  
 $w_b$  on nousuajan painokerroin.

Ajoneuvossaoloaika lasketaan kaavalla

$$I_r = \sum \left( \frac{l_l}{v_l} + dwt \right) , \quad (7)$$

jossa  $l_i$  on linkin (segmentin) pituus  
 $v_i$  on linjan nopeus  
 $dwt$  on pysähdysaika.

Vaihtoehtoisesti ajoneuvossaoloaika voidaan laskea matka-aikafunktion avulla. Tällöin ajoneuvossaoloaika segmentillä on matka-aikafunktion palauttama arvo, joka ei välttämättä ole riippuvainen linjalle asetetusta nopeudesta. Tähän lisätään vielä mahdollinen pysähdysaika kullakin segmentin pysäkillä.

### 5.3.3 Sijoittelumalli (Spiess 1993)

Sijoittelumallin yksityiskohtainen määrittely on esitetty liitteessä 2.

Mallin matemaattisen kuvauksen helpottamiseksi joukkoliikennejärjestelmä esitetään solmu/linkki-tyyppisenä verkostona, jossa solmujoukko  $i \in I$  yhdistetään linkkijoukolla  $a=(i,j) \in A$ .  $A_i^+$  on solmusta  $i \in I$  lähtevien linkkien joukko ja  $A_i^-$  on solmuun  $i \in I$  saapuvien linkkien joukko.

Kuhunkin linkkiin  $a$  liitetään matka-aika tai -kustannus  $c_a$  ja palvelufrekvenssi  $f_a$ . Solmujen  $i$  ja  $j$  välinen kysyntä on  $g_{ij}$ .

Tämän tyyppisessä verkkoesityksessä joukkoliikennelinjojen kuvauksessa linjojen reitit sisältyvät verkkotopologiaan. Solmujen joukko ei sisällä vain katu- ja raideverkoston fyysisiä solmuja vaan myös ylimääräisen solmun kunkin linjan kullekin pysäkillä. Vastaavasti linkit on jaettu useisiin luokkiin, kuten nousu-, poistumis-, ajoneuvossaolo- ja kävelylinkit. Vain nousulinkit sisältävät odotusta, eli vain niille on äärellinen frekvenssi  $f_a$ . Kaikkia muita linkkejä palvellaan jatkuvasti ( $f_a = \infty$ ).

Pelkistetyssä esityksessä ei siis joukkoliikennelinjoja kuvata niinkään erillisinä linjoina vaan linkkeinä. Esityksessä ei matkustaja odotakaan bussia, vaan enemmänkin sitä, että nousulinkkiä palvellaan.

Odotusaika solmussa riippuu houkuttelevien linkkien joukosta  $\overline{A}_i^+ \subseteq A_i^+$ , toisin sanoen joukosta solmusta lähteviä linkkejä, joista matkustaja valitsee linkin (nousee linjan ajoneuvoon), jota palvellaan ensimmäisenä. Mille tahansa houkuttelevien linkkien joukolle  $\overline{A}_i^+$  solmussa  $i$ , yhdistetty odotusaika on verrannollinen näiden linkkien yhdistettyyn vuoroväliin kaavalla

$$W(\overline{A}_i^+) = \frac{\alpha}{\sum_{a \in \overline{A}_i^+} f_a}, \quad \alpha > 0, \quad (8)$$

ja todennäköisyys lähteä solmusta  $i$  linkkiä  $a$  pitkin on

$$P(\overline{A_i^+}) = \frac{f_a}{\sum_{a' \in \overline{A_i^+}} f_{a'}} , a \in \overline{A_i^+} \quad (9)$$

Nyt mikä tahansa strategia päästä määräpaikkaan  $r$  on määritetty vastaavalla osajoukolla houkuttelevia linjoja  $\overline{A} \subseteq A$ .

*Optimaalinen strategia* määräpaikan saavuttamiseen on se, joka minimoi painotetun matka-ajan. Strategian kustannus on linkkien matka-aikojen  $c_a$  summa painotettuna todennäköisyyksillä matkustaa linkkiä  $a$  pitkin ja odotusaika solmuissa  $i$  painotettuna todennäköisyyksillä matkustaa solmun  $i$  kautta. Muuttumattoman reittivastuksen mallissa matkojen sijoittelussa kaikista lähtöpaikoista määräpaikkaan  $r$  optimaalisen strategian mukaan on kyse seuraavan lineaarisen optimointiongelman ratkaisemisesta

$$\text{Min} \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{i \in I} \omega_i \quad (10)$$

edellyttäen, että

$$\sum_{A_i^+} v_a - \sum_{A_i^-} v_a = g_{ir}, \quad i \in I \quad (11)$$

$$v_a \leq f_a \omega_i, \quad a \in A_i^+, i \in I \quad (12)$$

$$v_a \geq 0, \quad v_a \geq 0 \quad (13)$$

jossa  $\omega_i$  on kokonaisodotusaika solmussa  $i$ .

#### 5.3.4 Joukkoliikenteen sijoittelun ratkaisualgoritmi (INRO 2009)

Emmen vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelualgoritmi on kaksivaiheinen. Seuraavassa on esitetty yleinen ratkaisualgoritmi. Emmessä sovellettu algoritmi poikkeaa yleisestä algoritmista hieman. Sovellettu algoritmi hyödyntää Emmessä käytettyjä tietorakenteita, joiden avulla käsitellään joukkoliikennelinjoja ja liityntäkulkutapoja.

Ensimmäisessä vaiheessa määritetään optimaalinen strategia  $\overline{A}^*$  määränpääsolmusta kaikkiin lähtösolmuihin, lasketaan odotettavissa olevat kokonaismatka-ajat  $u_i^*$  jokaisesta solmusta  $i \in I$  määränpääsolmuun  $r$ . Algoritmin toisessa vaiheessa

kysyntä sijoitellaan verkolle optimaalisen strategian mukaan.

Vaihe 1: Optimaalisen strategian etsiminen

### 1.1 Alustus

$$\begin{aligned}u_i &= \infty, i \in I - \{r\}, u_r = 0; \\f_i &= 0, i \in I; \\S &= A; \bar{A} = \emptyset.\end{aligned}$$

jossa  $u_i$  on todennäköinen matka-aika solmusta  $i$  määränpääsolmuun  $r$   
 $f_i$  on solmun  $i$  valittujen linjojen yhdistetty frekvenssi  
 $S$  on linkkijoukko (linjajoukko), jota ei ole vielä tutkittu  
 $\bar{A}$  on optimaalinen strategia.

### 1.2 Tutki seuraava linkki

Jos  $S = \emptyset$ , niin lopeta  
muuten etsi  $a = (i, j) \in S$  joka toteuttaa ehdon  
 $u_j + c_a \leq u_{j'} + c_{a'}, a' = (i', j') \in S;$   
 $S = S - \{a\}.$

Joukosta  $S$  valitaan määränpääsolmua lähin linkki (linja). Tarkastellaan aikaa  $u_j + c_a$ , eli matka-aikaa linkin (linjan) lähtösolmusta määränpäähän ilman odotusaikaa solmussa  $i$ . Jos  $u_j + c_a$  on pienempi kuin solmuun  $i$  liittyvä nykyinen aika  $u_i$ , otetaan linkki (linja)  $a$  mukaan optimaaliseen strategiaan ja muuttujat  $u_i$  ja  $f_i$  päivitetään.

### 1.3 Päivitä solmun tiedot

Jos  $u_i \geq u_j + c_a$  niin  
jos  $f < \infty$  (odotusaika mukana)  
 $u_i = (f_i u_i + f_a (u_j + c_a)) / (f_i + f_a)$   
 $f_i = f_i + f_a, \bar{A} = \bar{A} + \{a\};$   
muuten ( $f = \infty$ , ei odotusaikaa mukana)  
 $u_i = u_j + c_a$   
 $f_i = \infty; \bar{A}_i^+ = \{a\}.$

Käsiteltäessä solmun  $i$  muuttujaa  $u_i$  ensimmäisen kerran, saadaan  $f_i * u_i = 0 * \infty$ . Tällöin noudatetaan yleistä tapaa, jonka mukaan  $0 * \infty = 1$ . Kun  $\alpha \neq 1$  käytetään  $0 * \infty = \alpha$ . Kun kaikki linkit (linjat) on tutkittu, algoritmin ensimmäinen vaihe päättyy.



Vaihe 2: kysynnän sijoittelu optimaalisen strategian mukaan

## 2.1 Alustus

$$v_i = g_i; i \in I.$$

## 2.2 Kuormitus

Suorita jokaiselle linkille  $a \in A$  pienenevässä järjestyksessä  $(u_j + c_a)$

jos  $a \in \bar{A}$  niin  $v_a = (f_a / f_i)v_i$ ,

$$v_j = v_j + v_a;$$

muuten  $v_a = 0$ .

Kysyntä  $g_i$  solmusta  $i$  määränpään sijoitellaan verkolla optimaalisen strategian mukaan. Jokaiselle linkille (linjalle)  $a \in \bar{A}$  jaetaan tietty osuus solmun liikennemäärästä  $v_i$  vuoromäärän suhteessa.

## 5.4 Aikataulupohjainen joukkoliikennesijoittelu

Emmen joukkoliikenteen aikataulupohjainen sijoittelualgoritmi on luonteeltaan dynaaminen. Joukkoliikenteen aikataulut sisällytetään joukkoliikenteen tarjontamalliin ja kysynnän, eli jokaisen sijoiteltavan matkan ajankohta määritellään. Aikataulusijoittelussa jokainen parametreiltaan toisista poikkeava matka sijoitellaan erikseen. (Partanen 2000.)

Aikataulupohjainen joukkoliikennesijoittelu perustuu seuraavaan oletukseen: Jokaisella matkustajalla on täydellinen tieto aikatauluista ja halu lähteä lähtöpaikasta (tai saapua määräpaikkaan) määriteltynä ajankohtana. Matkustaja valitsee reitin, joka minimoi matkan kokonaisvastuksen. Sijoittelu ei välttämättä minimoi kokonaismatka-aikaa, vaan käyttää painokertoimia ja muita kustannuselementtejä optimaalisen reitin löytämiseen. (INRO 2009.)

Linjan aikataulu määritellään seuraavilla attribuuteilla:

- vuoroväli
- ensimmäisen vuoron lähtöaika
- ajettavien vuorojen määrä
- matka-aika segmentillä
- pysäkkiaika (pysäkillä kuluva aika). (INRO 2009.)

Ensimmäisen vuoron lähtöaika ja lähtöjen määrä talletetaan linjan lisäattribuutteihin.

Aikataulupohjaisessa sijoittelussa optimireitti on reitti, joka minimoi matkan yleistetyn matkavastuksen. Matkan kokonaisvastus lasketaan aikakomponenttien ja nousuvastuksen arvon painotettuna summa. Kokonaisvastuksen arvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$V_{tot} = w_{ekspl} * t_{ekspl} + w_{käv} * t_{käv} + t_{impl} + w_{nousu} * t_{nousu} + w_{ajo} * t_{ajo}, \quad (14)$$

jossa	$t_{ekspl}, w_{ekspl}$	eksplisiittinen odotusaika ja sen painokerroin (0-999)
	$t_{käv}, w_{käv}$	kävely aika ja kävelyajan painokerroin (1-999)
	$t_{impl}$	implisiittinen odotusaika (painokerroin aina 1,0)
	$t_{nousu}, w_{nousu}$	nousuaika (0-999 min) ja sen painokerroin (0-999)
	$t_{ajo}, w_{ajo}$	ajoneuvossaoloaika ja sen painokerroin (1-999).

Yleisen matkavastuksen laskentatapa eroaa vuorovälipohjaisen sijoittelun laskentatavasta siinä, että muiden vastuskomponenttien aiheuttamaa vastusta matkustajalle verrataan implisiittiseen odotusaikaan, eikä ajoaikaan, kuten tavallisesti. Painokerrotoimien suhteita ei voi määrittellä yleisen matkavastuksen laskennan periaatteiden mukaisesti, sillä algoritmissa ajoajan painokerroin ei voi olla implisiittisen odotusajan kerrointa pienempi. (Partanen 2000.)

Sijoitteluongelma ratkaistaan käyttäen matkavastukseltaan edullisimman reitin algoritmia paikka-aika –verkostossa. Koska aikatauluinformaatio perustuu toistoihin, paikka-aika –verkostosta voi tulla todella suuri. Koska kävelyn vuorotiheys on ääretön, voi paikka-aika –verkosto sisältää teoriassa äärettömän määrän kävelylinkkejä. Vaikka optimaalisella reitillä kävely alkaa aina heti syöttöpisteestä tai pysäkilltä, mahdollisuus kävellä useita kävelylinkkejä luo eksponentiaalisesti "kävelymahdollisuuksia" paikka-aika –verkostoon. Tämän vuoksi algoritmi ei luo koko verkkoa, vaan vain verkon osat, joita tarvitaan optimaalisen reitin laskemiseen. (INRO 2009.)

Vaihtoehtojen rajaamiseen käytetään käsitettä dominanssi. Dominanssi määritellään seuraavasti:

Tapahtumaan  $p$  liittyy ajankohta  $t_p$  ja kustannus  $c_p$ . Ajankohtaa ja kustannuksia verrataan saman elementin muihin tapahtumiin. Algoritmi etsii tapahtumaa  $r$ , joka tapahtuu samassa elementissä ennen tapahtuma  $p$ :tä ( $t_r < t_p$ ) ja jolle pätee  $c_r + (t_p - t_r) * w \leq c_p$ , missä  $w$  on odotusajan paino. Jos tapahtuma  $r$  löytyy, se dominoi potentiaalista tapahtumaa  $p$  niin, ei tapahtumaa  $p$  oteta mukaan jatkolaskelmiin. Jos tapahtumaa  $r$  ei löydy, tapahtuma  $p$  lisätään kasatietorakenteeseen. (INRO 2009.)

Algoritmi pysähtyy, kun optimaalinen polku on löydetty (kaikki määräpaikkaan liittyvät tapahtumat on käyty läpi) tai jos polkua lähtöpaikasta määräpaikkaan ei löydy (kasatietorakenne on tyhjä). (INRO 2009.)

Aikataulupohjaisessa sijoittelussa koodaustyötä rajoittaa Emmen lisenssikoon riittävyys. Lisenssikoosta riippuen on linjasegmenteillä tietty maksimimäärä. Koska linjakuvauksessa määritellään vuoroväli, on epäsäännölliset linjat kuvattava omina "alilinjoinaan". Jos linjan toisen ja kolmannen lähdön vuoroväli poikkeaa ensimmäisen ja toisen lähdön vuorovälistä, on kolmas lähtö kuvattava omana linjanaan. (Partanen 2000.) Myös linjastomuutosten tekeminen tuo omat haasteensa, sillä sama muutos on tehtävä tietyn linjan kaikkiin alilinjoin. Sijoittelutavan käyttöä rajoittaa myös sen vaatimien lähtötietojen hankinnan vaikeus.

## 5.5 Yksilösijoittelu

Emmen kolmas sijoittelutapa, yksilösijoittelu (Analyze/Assign Individual Trips), perustuu vuoroväli-pohjaisen sijoittelun tapaan optimaaliseen strategiaan. Sijoittelutavat eroavat toisistaan siinä, että normaalissa vuoroväli-pohjaisessa sijoittelussa kysyntä sijoitellaan aina tietyn sentroidiparin (syöttöalueparin) välille. Yksilösijoittelussa sijoiteltavien matkojen alkua- ja loppupiste määritellään koordinaattien avulla. Todennäköisyys  $p_i$  tietyn solmun valitsemiseen lasketaan logittimallilla:

$$p_i = \frac{e^{-\Phi u_i}}{\sum_{j \in I_a} e^{-\Phi u_j}}, \quad i \in I_a \quad (15)$$

jossa  $I_a$  on solmujoukko  
 $u_i$  on vastus lähtöpaikasta solmuun  $i$  ja solmusta  $i$  määräpaikkaan  
 $\Phi$  on dispersioparametri. (INRO 2009.)

Dispersioparametrin avulla vaikutetaan valittavien solmujen määrään. Kun dispersioparametrille annetaan suuri arvo, saadaan sijoittelu toistamaan perinteisen vuoroväli-pohjaisen sijoittelun tuloksia. Näin yksilösijoittelulla voidaan myös

analysoida yksittäisten alueparien sijoittelua. (INRO 2009.)

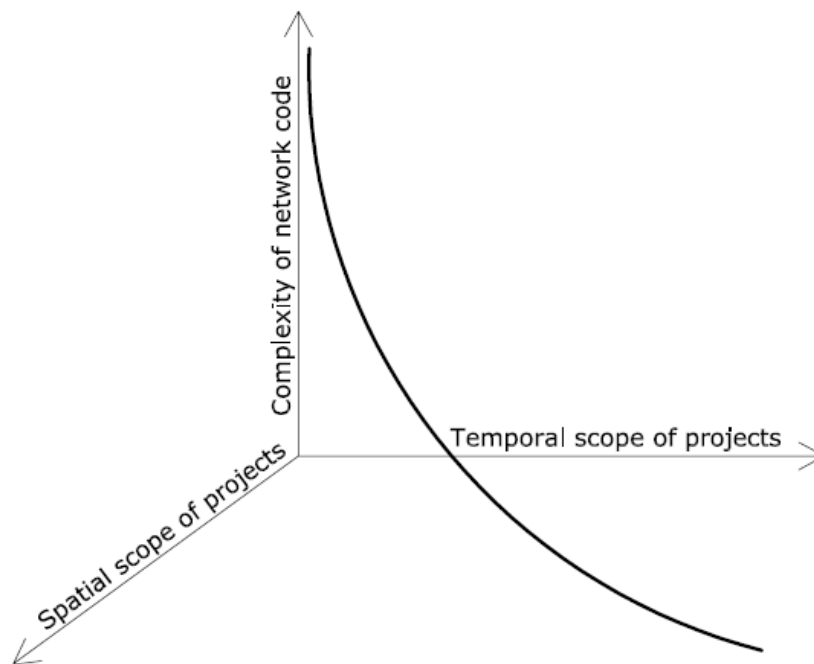
Yksilösijoittelu tarjoaa myös mahdollisuuden matkojen yksityiskohtaisempaan sijoitteluun. Sijoittelulla voidaan sijoitella vaikka jokainen matka erikseen eri koordinaateista ilman, että syöttöpisteiden määrä muodostuu ongelmaksi.

## 6 LIIKENNEJÄRJESTELMÄN EMME-KUVAUKSEN KEHITTÄMINEN

### 6.1 Linjastokuvauksen vaikutukset sijoittelutuloksiin

Kuvattaessa verkkoa ja linjastoa Emmeen tehdään tärkeitä linjanvetoja mallin käyttöön liittyen. Tällä tasolla tehdyt päätökset vaikuttavat mallin käyttöön ja kalibrointiin ja tulostietojen analysointiin ja esittämiseen. Verkon koodaukselle tai modifioinnille ei ole kehitetty yhteisiä standardeja, vaan koodaustavat perustuvat pikemminkin kuvauksen tekijöiden kokemuksiin ja mieltymyksiin. Kaikkiin tarkoituksiin sopivaa koodaustapaa ei ole mahdollista löytää, sillä Emmeä käytetään monipuolisesti projekteissa, joissa ennusteen aikaulottuvuus ja tarkastelualan laajuus eroavat toisistaan radikaalisti. (Livshits 1997.)

Yleisesti voi sanoa, että kuvaus voidaan toteuttaa sitä yksityiskohtaisemmin, mitä pienempi on projektien maantieteellinen laajuus ja projektin aikaulottuvuus (kuva 6).



Kuva 6. Linjastokoodauksen vaatima detaljitaso suhteessa projektin aikaulottuvuuteen ja maantieteelliseen laajuuteen. (Livshits 1997).

Henkilöautoliikenneverkkoa kuvattaessa tarjonnan yksityiskohtia voidaan karsia mallin käyttötarkoituksen mukaan niin, että tieluokitukseltaan alempiarvoiset tiet karsitaan kuvauksesta. Joukkoliikennejärjestelmää kuvattaessa karsiminen on hankalampaa. Jos tarkastelut tehdään kaupunkialueella, ei yleensä ole järkevää karsia tiettyjä linjoja pois kuvauksessa. Joukkoliikennejärjestelmän kuvausta

voidaan kuitenkin yksinkertaistaa jättämällä pois epäoleellisia yksityiskohtia linjojen reiteistä.

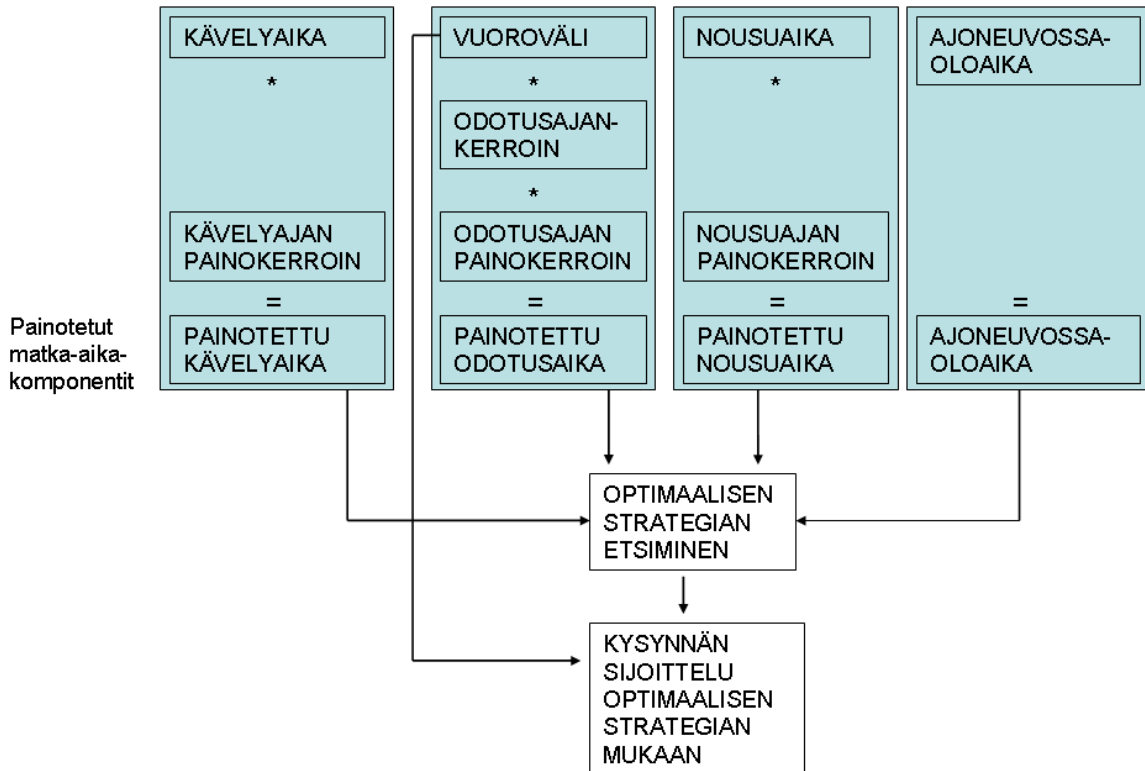
Emme on parhaimmillaan tarkasteltaessa pitkän aikavälin strategisia joukkoliikennehankkeita tai erilaisia linjastorakenteita. Tällaisten hankkeiden kuvausta Emmessä hankaloittaa se, että vaikka kyseessä olisi karkean tason suunnitelma esimerkiksi metron linjauksesta, vaikuttavat kuvauksen yksityiskohdat suuresti saataviin kuormitustuloksiin ja sitä kautta hankkeen arviointiin. Hankkeet on siis kuvattava melko tarkasti Emmessä, vaikka kyseessä olisikin karkean tason suunnitelma.

## **6.2 Liikennejärjestelmäkuvauksen ja sijoitteluparametrien vaikutus optimaalisen strategian muodostumiseen**

Optimaalisen strategian muodostumiseen vaikutetaan Emmessä liikennejärjestelmäkuvauksella ja sijoitteluparametreilla. Sijoitteluparametrit voidaan ajatella säätöruuveina, joilla ohjataan sijoittelun kulkua. Sijoittelun ohjaaminen on monimutkainen säätöprosessi, jossa tietyn säädön muuttamisella voi olla suuria vaikutuksia koko liikennejärjestelmän kuormittumiseen. Sijoittelua ei saa säätää kohdalleen tietyllä tarkasteltavalla alueella ilman, että samalla tarkastelee vaikutuksia muihin verkon osiin.

Emmen sijoitteluprosessissa tiettyjen säätöjen muutos voi vaikuttaa sijoittelutuloksiin hyppäyksittäin. Esimerkiksi vuorovälin pidentäminen voi joko vain laskea linjan kuormitusta tarkasteluajanjakson vuorotiheyden laskiessa tai tiettyjen alueparien välinen kysyntä voi siirtyä käyttämään täysin muita linjoja johtuen muutoksesta optimaaliseen strategiaan. Vaikutus riippuu siitä, onko muutoksella vaikutusta optimaaliseen strategiaan valittavaan linjajoukkoon (algoritmin ensimmäisessä vaiheessa) vai vain kuormituksen jakamiseen linjojen kesken (algoritmin toisessa vaiheessa).

Kuvassa 7 on esitetty sijoitteluun vaikuttavat painotetut matka-aikakomponentit ja niiden muodostuminen.



Kuva 7. Optimaalisen strategian muodostumiseen vaikuttavat painotetut matkaiikakomponentit.

Kävelyajan painolla kuvataan kävelyajan rasittavuutta suhteessa ajoneuvossaoloajan rasittavuuteen. Kävelyaika riippuu kävelymatkan pituudesta ja kuljetavalle asetetusta nopeudesta. Kävelykulkutapoja voi olla useita, jolloin niille voidaan asettaa erilaisia nopeuksia. Esimerkiksi vaihtokävelyn nopeus voi olla eri kuin syöttökävelyn, jos ne on erotettu eri kulkutavoiksi. Mitä korkeampi painokerroin on, sitä rasittavampana kävely koetaan. Kävelyn painokertoimella vaikutetaan siihen, miten pitkiä kävelymatkoja matkustajat ovat mallissa valmiita tekemään.

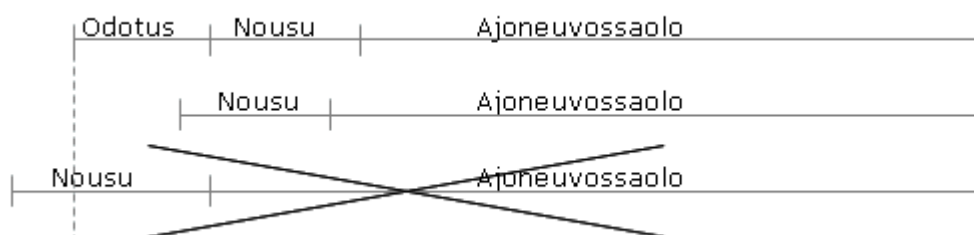
Tehollinen vuoroväli, odotusajan kerroin ja odotusajan paino vaikuttavat yhdessä painotettuun odotusaikaan, joka on näiden tekijöiden tulo. Painotettu odotusaika vaikuttaa siihen, kuinka paljon linjoja voi tulla valituksi optimaaliseen strategiaan tietyltä pysäkiltä ja sitä kautta siihen, kuinka monta erilaista reittiä voidaan ottaa alueparin optimaaliseen strategiaan. Mitä suurempi painotettu odotusaika on, sitä enemmän linjoja voidaan valita tietyltä pysäkiltä optimaaliseen strategiaan.

Nousuaikaa käytetään kuvaamaan vaihdosta koettua hankaluutta. Sillä voidaan

kuvata myös matkan kustannustekijöitä. Nousuaikaa on käytetty kulkutapakohtaisesti niin, että kullekin linjalle on asetettu nousuaika sen mukaan, mitä kulkutapaa se edustaa. Vaihdoista aiheutuu jo ilman nousuajan käyttöä Emmessä vastusta odotusajan vaikutuksesta. Nousuajalla voidaan korostaa tiettyyn kulkuneuvon nousemisen tai vaihdon hankaluutta. Nousuajalla voidaan myös kuvata laadullisia tekijöitä, jotka muuten jäävät mallissa huomioimatta. Esimerkiksi linjan hahmotettavuus ja helppokäyttöisyys voidaan ottaa huomioon mallissa ja tulokset voidaan kalibroida muuttamalla tiettyjen linjojen nousuaikaa. Koska painotetun nousuajan säätämiseen riittää jo pelkkä linjakohtaisen nousuajan muuttaminen, on nousuajan painokertoimelle käyttöä lähinnä sijoitteluparametrien herkkyyystarkasteluissa.

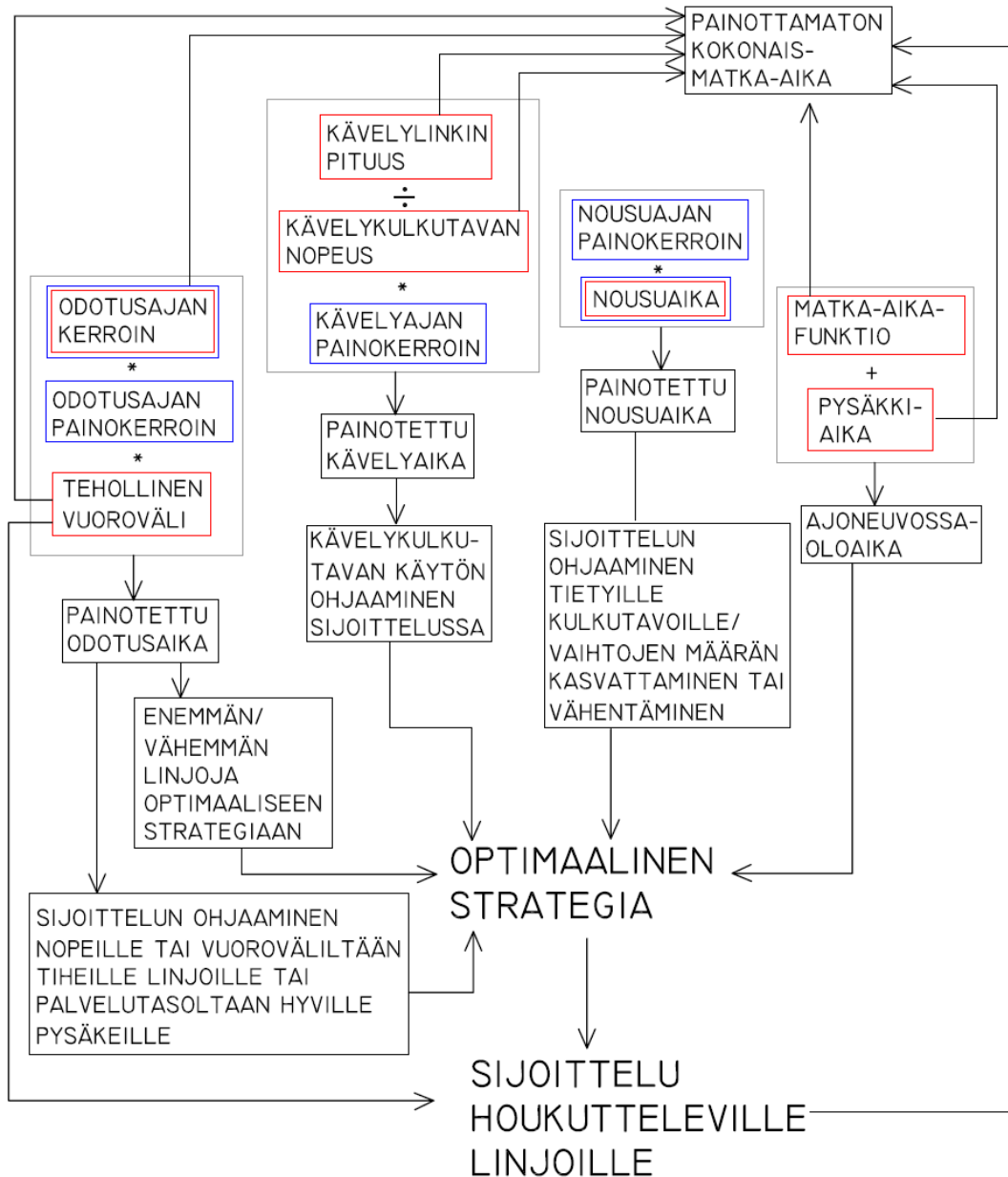
Ajoneuvossaoloaika perustuu segmenttikohtaiseen pysäkkiin ja linjalle asetettuun nopeuteen tai matka-aikafunktion palauttamaan arvoon.

Kuvassa 8 on yksinkertainen esitys painotetun odotusajan vaikutuksesta linjanvalintaan tietyllä pysäkillä. Esimerkissä kaikilta vaihtoehtoisilta linjoilta poistutaan samalla pysäkillä ja vertailun kohteena on vaihtoehdon nousu- ja ajoneuvossaoloaika, sillä vertailtava matka-aika on muilta osin identtinen. Vaihtoehto, jossa painotetun nousuajan ja ajoneuvossaoloajan summa on suurempi kuin nopeimman reitin painotettu odotusaika, nousuaika ja ajoneuvossaoloaika, hylätään. Monimutkaisemmassa tapauksessa, jossa vaihtoehtoina on vaihdollisia matkoja, verrataan nopeimman vaihtoehdon painotettuun matka-aikaan muiden vaihtoehtojen matka-aikoja ilman odotusaikaa pysäkillä, jolta vaihtoehto (vaihtoehtoinen tapa päästä määräpaikkaan alkaa) lähtee. Vertailussa ovat siis matka-ajan osat, jotka eroavat nopeimman vaihtoehdon matka-ajan osista.



Kuva 8. Optimaaliseen strategiaan valitaan linjoja, joissa painotetun nousuajan ja ajoneuvossaoloajan summa on pienempi kuin nopeimman linjan painotetun odotusajan ja nousuajan sekä ajoneuvossaoloajan summa.





Kuva 9. Emmen sijoitteluparametrien vaikutus vuorovälipohjaiseen joukkoliikennesijoitteluun.

Kuvassa 9 on esitetty eri sijoitteluparametrien vaikutus joukkoliikennesijoitteluun. Sijoittelun yhteydessä määritettävillä parametreilla on siniset kehykset ja kuvauksessa määritettävillä punaiset kehykset. Nousuaika voidaan määrittää linja- tai segmenttikohtaisesti tai vasta sijoittelun yhteydessä. Odotusajan kerroin voidaan määrittää solmukohtaisesti tai sijoittelun yhteydessä.

Matka-aikakomponenttien (odotusaika, nousuaika ja kävelyaika) painokertoimet vaikuttavat myös alueparin painottamattomaan matka-aikaan, sillä painokertoimet vaikuttavat optimaalisen strategian muodostumiseen ja sitä kautta sijoitteluun, joka taas vaikuttaa kunkin alueparin painottamattomaan matka-aikaan. Painottamaton matka-aika on painotettu käytettyjen linjojen ja kävelylinkkien suhteen niin, että

kunkin käytetyn reitin vaikutus painottamattomaan matka-aikaan riippuu reittiä käyttävästä matkustajaosuudesta.

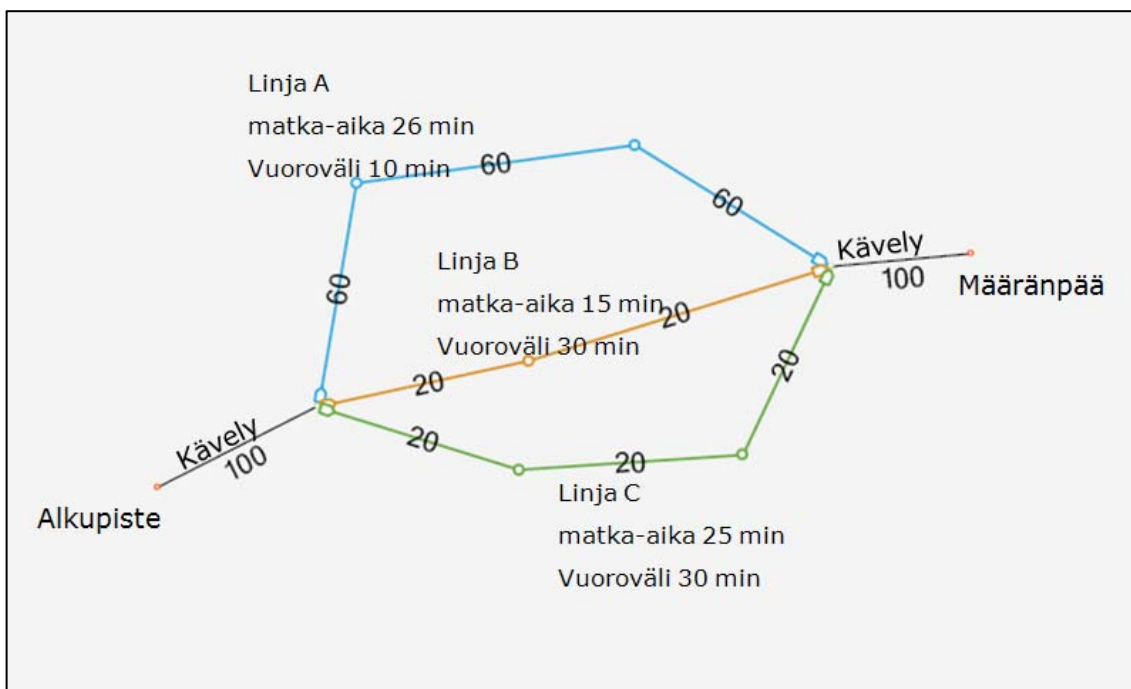
Sijoitteluparametrit valitaan niin, että ne kuvaavat havaittua matkustuskäyttäytymistä. Valitut sijoitteluparametrien arvot ovat riippuvaisia siitä, millaisia periaatepäätöksiä on tehty linjankuvauksesta.

### 6.3 Vuorovälipohjaisen joukkoliikennesijoittelun ominaisuuksia

#### 6.3.1 Sijoittelumallin herkkyys muutoksille

Vuorovälipohjaisen joukkoliikennesijoittelualgoritmin kaksiosaisuus tuo omat haasteensa matkojen sijoitteluun. Ensimmäisessä vaiheessa valitaan optimaaliseen strategiaan sisällytettävät linjat ja toisessa vaiheessa sijoitellaan matkat valituille reiteille tarkasteluajanjakson vuorotiheyksien suhteessa.

Kuvan 10 esimerkkiverkossa on kolme joukkoliikennelinjaa: linja A (matka-aika 26 min, vuoroväli 10 min), linja B (matka-aika 15 min, vuoroväli 30 min) ja linja C (matka-aika 25 min, vuoroväli 30 min). Tässä tapauksessa on tarpeen tarkastella vain linjojen odotus- ja ajoneuvossaoloaikoja, sillä reittien aikakomponentit ovat muilta osin identtisiä.

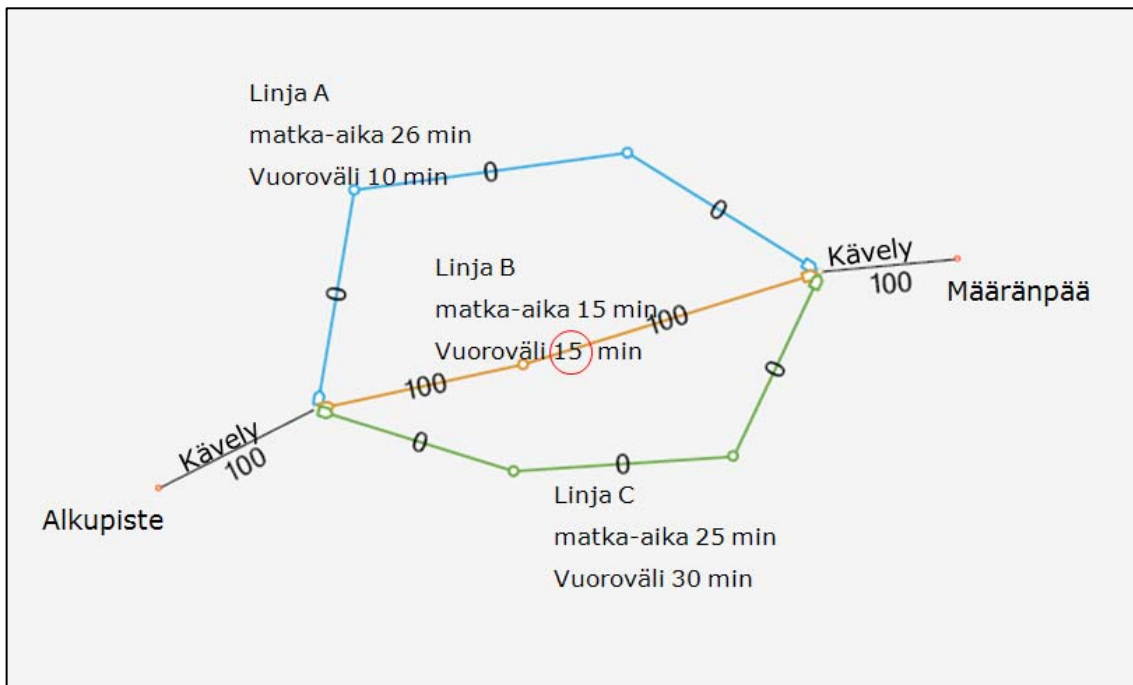


Kuva 10. Esimerkkiverkko.

Kun sijoittelussa käytetään odotusajalla, kävelyajalla ja nousuajalla painokerrointa 1 ja odotusajan kertoimella arvoa 0,5, on linjalla B pienin todennäköinen painotettu

matka-aika. Linjalla B todennäköinen odotusaika pysäkillä on 15 minuuttia ja ajoneuvossaoloaika 15 minuuttia, yhteensä 30 minuuttia. Myös linjat A ja C otetaan mukaan optimaaliseen strategiaan, sillä kummankin ajoneuvossaoloaika alittaa 30 minuuttia. Matkat jaetaan optimaaliseen strategiaan valituille linjoille vuorotiheyksien suhteessa. Linjan A vuorotiheys on  $6/(60 \text{ min})$ , linjan B  $2/(60 \text{ min})$  ja linjan C  $2/(60 \text{ min})$ . Linjojen yhdistetty vuoroväli on  $10/(60 \text{ min})$ . Näin linja A saa 60 % alueparille sijoitelluista matkoista ja linjat B ja C saavat kumpikin 20 %.

Tarkastellaan tilannetta, jossa linjan B aikataulua muutetaan niin, että vuoroväli onkin 15 minuuttia (kuva 11). Nyt linjan odotettavissa oleva matka-aika on 22,5 minuuttia, joten linjoja A ja C ei hyväksytä optimaaliseen strategiaan. Linja B saa 100 % matkoista.



Kuva 11. Esimerkkiverkko, jossa linjan B vuoroväli on 15 minuuttia.

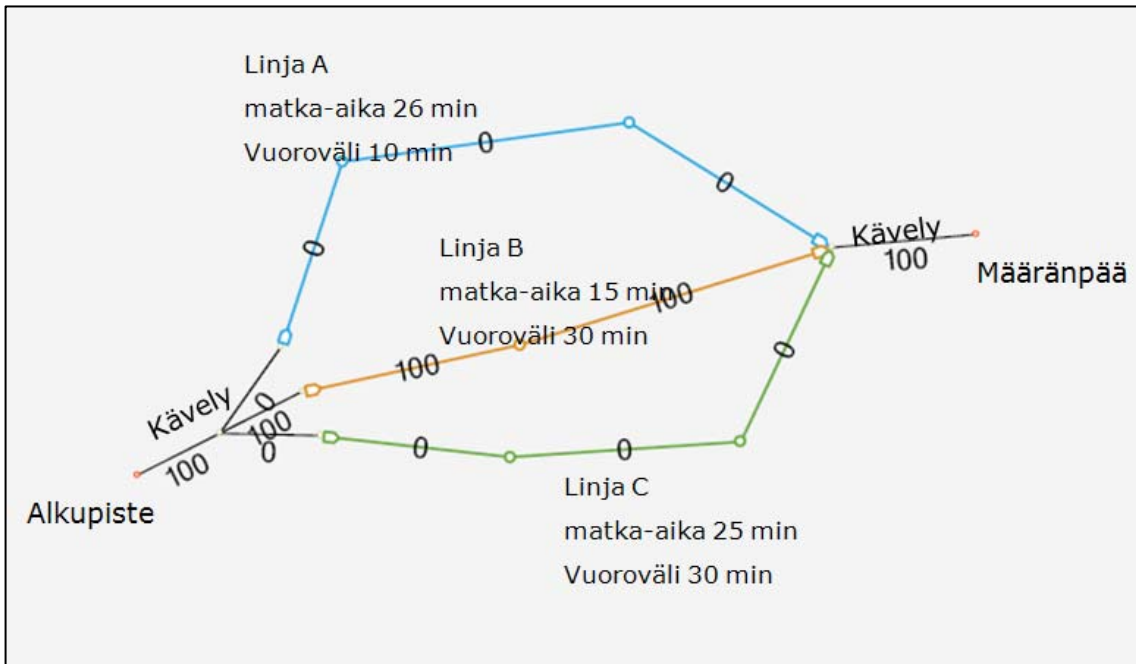
Pienikin muutos vastukseltaan edullisimman linjan ominaisuuksissa voi aiheuttaa suuria muutoksia siihen, mitä linjoja optimaaliseen strategiaan sisällytetään.

### 6.3.2 Yhden lähtöpysäkin ongelma

Vuorovälipohjaisessa sijoittelussa matkustajalla on aina mahdollisuus jäädä odottamaan houkuttelevaa linjaa tai valita kävelylinkki.

Esimerkkiverkkoa muutetaan niin, että linjat A, B ja C lähtevätkin eri pysäkeiltä (kuva 12). Linjan B vuoroväli on 30 minuuttia. Lähtöpisteestä on kaikille pysäkeille yhtä pitkä kävely aika. Emmen vuorovälipohjaisen sijoittelulla kaikki matkat

sijoitellaan matkavastukseltaan edullisimmalle linjalle B, sillä sijoittelussa kaikki alueparin joukkoliikennematkat käyttävät samaa alkupysäkkiä.

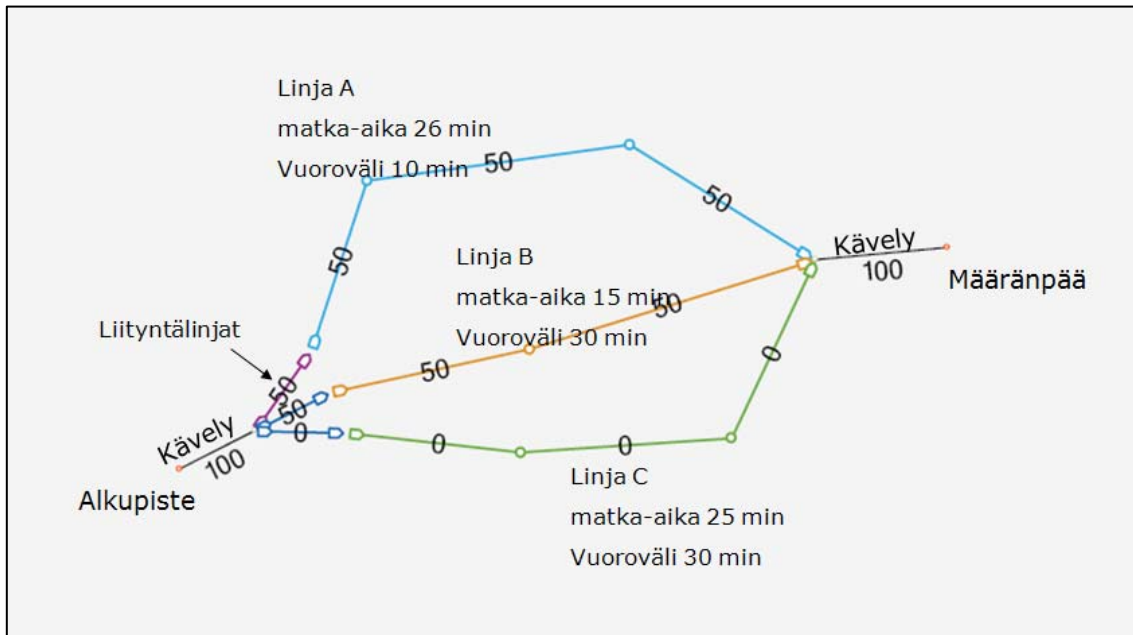


Kuva 12. Esimerkkiverkko, jossa pysäkit on kuvattu erillisinä.

Sijoittelutulokset muuttuvat, kun edellisen esimerkin kävelylinkit muutetaan joukkoliikennelinjoiksi, joiden matka-aika on 1 minuutti ja vuoroväli 2 minuuttia (kuva 13). Taulukossa 2 on esitetty eri reittien ne matka-ajat, joita käytetään vertailussa. Reitti, joka käyttää linjaa B on edelleen kokonaismatka-ajaltaan edullisin. Muiden reittien matka-aikojia ilman odotusaikaa vertaillaan edullisimman reitin matka-aikaan, joka sisältää myös odotusajan. Vertailussa ei oteta huomioon vaihtoehtoisten reittien ensimmäisen pysäkin odotusaikojia, koska kyse on siitä, kannattaako ottaa linjan kulkuneuvo, jos se saapuu pysäkillä ennen nopeinta linjavaihtoehtoa. Linjaa A käyttävä reitti otetaan mukaan optimaaliseen strategiaan, koska sillä on vertailussa sama matka-aika kuin linjalla B. Sen jälkeen matkat jaetaan reiteille houkuttelevien linjojen (tässä tapauksessa liityntälinjojen) vuorotihyönteysien suhteessa. Koska liityntälinjoilla on sama vuoroväli, kumpikin reitti saa yhtä paljon matkoja.

Taulukko 2. Esimerkkiverkon liityntälinjojen ja varsinaisten linjojen vertailtavat matka-ajat.

Käytetty linja	Liityntälinja		Varsinainen linja		Vertailussa käytetty matka-aika	Kokonaismatka-aika
	Odotusaika	Matka-aika	Odotusaika	Matka-aika		
A	(1)	1	5	26	32	33
B	1	1	15	15	32	32
C	(1)	1	15	25	41	42



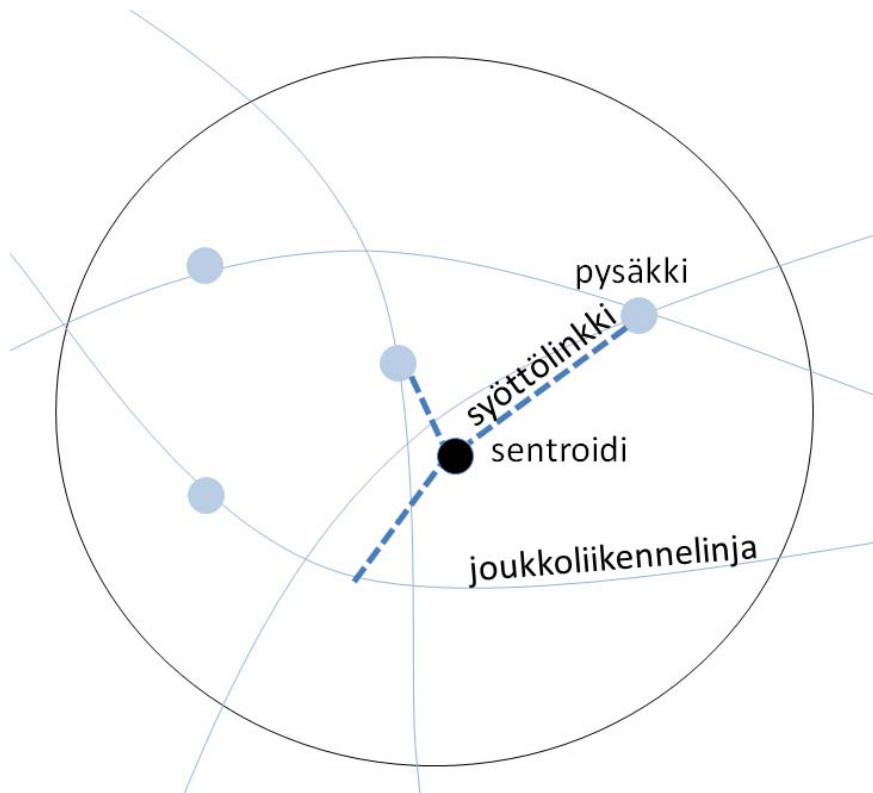
Kuva 13. Esimerkkiverkko, jossa kävelylinkit on kuvattu linjoina, joiden vuoroväli on 1 minuutti.

Jos eri kulkutapojen pysäkit on kuvattu erikseen, sijoitellaan vaihdottomilla matkoilla alueparin kaikki matkat tietylle kulkutavalle. Koodattaessa joukkoliikennelinja kävelylinkin tilalle on vuorovälin määrittely hankalaa. Perinteisesti kävelyn vuoroväli on Emmessä lähellä nollaa. Jos vuoroväli lähestyy arvoa 0, lähestyy vuorotiheys ääretöntä ja tämä vääristää matkojen jakautumista linjoille. Kävelylinkkien kuvaaminen Emmessä joukkoliikennelinjoina vääristää myös vaihtojen määrää.

## 6.4 Joukkoliikennetarjonnan kuvauksen kehittäminen

### 6.4.1 Tarjonnan ja kysynnän kuvauksen tarkkuustasot

Kysyntä kuvataan Emmessä kysyntämatriisina. Kunkin alueen matkat lähtevät alueen syöttöpisteestä, sentroidista. Sentroideilla on tietty enimmäismäärä, joka on riippuvainen ohjelman lisenssikoosta. Syöttölinkit yhdistävät sentroidit liikennejärjestelmään. Syöttölinkkien ominaisuudet määritetään yleensä niin, että ne kuvaavat alueen kaikkia yhteyksiä joukkoliikennejärjestelmään. Linkin kulkemiseen kuluva matka-aika sovitetaan olemaan lähellä alueen keskimääräistä kävelyaikaa pysäkillä tai asemalle.



Kuva 14. Kysynnän ja tarjonnan kuvaus sentroidilähtöisellä lähestymistavalla.

Kuva 14 havainnollistaa kysynnän ja tarjonnan tarkkuustasoa Emmessä. Ympyrän sisäisen alueen matkatuotos tuodaan sijoittelumalliin sentroidin kautta. Sentroidilla on tarkka sijainti, vaikka todellisuudessa matkat alkavat ja päättyvät laajemmalle alueelle. Ottaen huomioon kysynnän kuvauksen karkeuden ja Emmen sijoittelulogiikan ominaisuudet, voidaan kyseenalaistaa tarjonnan kuvauksen tarkkuustaso.

#### 6.4.2 Pysäkkien yhdistäminen

Alueparivälin matkustajat valitsevat vuorotarjonnan mukaan tietyn pysäkin, jolle siirtyvät odottamaan ajoneuvoa. Emmen vuorovälipohjainen sijoittelu on monireitti-sijoittelu, mutta alueparin väliset joukkoliikennematkat alkavat kaikki samalta pysäkiltä, eli alueparin välisten reitit voivat erota toisistaan vain joukkoliikennepysäkillä. Todellisuudessa matkustajat kuitenkin havainnoivat joukkoliikennejärjestelmää, matkustajilla on erilaisia matkustustottumuksia ja tarjolla on runsaasti matkustajainformaatiota mobiilimuodossa ja bussipysäkeillä.

Ottaen huomioon nämä seikat, ei fyysisen järjestelmän tarkka kuvaus Emmessä aina ole paras vaihtoehto linjaston kuvaamiseen. Esimerkiksi vierekkäisiä raitiovaunu- ja bussipysäkkejä havainnoidaan yhtä aikaa ja niistä valitaan saapuvien ajoneuvojen mukaan se, miltä pysäkiltä matkaa jatketaan. Pysäkki saatetaan myös valita etukä-

teen sen mukaan, mille tiedetään seuraavaksi ajoneuvon saapuvan.

Terminaaliin saapuessaan matkustajat eivät aina tiedä, millä linjalla ja miltä pysäkiltä jatkavat matkaansa. Pysäkki voidaan valita terminaalissa saatavilla olevan aikatauluinformaation avulla sen mukaan, mille pysäkille tai laiturille saapuu seuraavaksi ajoneuvo. Näin matkat jakautuvat houkutteleville linjoille vuorovälien suhteessa. Emmessä toiminta saadaan mallinnettua niin, että terminaalin linjat koodataan kulkemaan saman pysäkin kautta.

## **7 JOUKKOLIIKENTEEN LINJASTOKUVAUKSEN TESTAAMINEN**

### **7.1 Linjaston kuvaustavat Helsingin seudulla**

#### **7.1.1 Pääkaupunkiseudun linjastokuvauksen vaiheet**

Pääkaupunkiseudun joukkoliikenteen mallintamisessa on käytetty Emme-ohjelmistoa 1980-luvulta alkaen. Kuvausta on korjattu säännöllisesti, mutta kuvausperiaatteet ovat säilyneet lähes samoina.

Emme-ohjelmiston joukkoliikennekuvausta käytettiin pääkaupunkiseudulla ensimmäistä kertaa vuoden 1988 liikennetutkimuksessa liikennemalleja laadittaessa. Joukkoliikenteen pienaluejako oli 282, tutkimusaluejako 117 ja suuraluejako 19. Linjastot käsittivät Helsingin, Espoon, Kauniaisten ja Vantaan sisäiset linja-autolinjat, seutuliikenteen linja-autolinjat sekä raitiovaunu-, metro- ja lähiliikenteen junalinjat. (Vatanen 2010.)

Vuonna 1990 Helsingin kaupungin liikennelaitos tilasi uuden joukkoliikenneverkon, jonka solmut ja linkit digitoitiin kartalta. Verkon mitatut linkkinopeudet saatiin joukkoliikennerekisteristä (JORE). Aluejakoa tarkennettiin 596-aluejakoon, jolloin joukkoliikenteen verkko ja linjasto rakennettiin uudelleen joukkoliikennerekisterin pohjalta entistä tarkemmaksi. Joukkoliikenteen eri kulkutapojen pysäkit erotettiin toisistaan kulkutapakohtaisten tulosten tarkastelun mahdollistamiseksi. Linjastokuvauksen laadinta digitoidusta verkosta ja joukkoliikennerekisteristä pyrittiin automatisoimaan, mutta verkko ja linjasto korjattiin käsin vuosina 1990 ja 1991. (Vatanen 2010.)

Vuonna 1997-1998 Helsingin kaupungin liikennelaitos ja Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto teettivät Helsingin alueella tihennetyn joukkoliikenneverkon 741 alueen aluejaolla. Metro- ja juna-asemien vaihtoyhteyksien matka-ajat mitattiin sekuntikellolla. Kuvauksen ongelmana oli, ettei kaduilla saanut kävellä, joten syöttölinkkejä oli paljon. Niinpä lyhyillä matkoilla matkustajat eivät hakeutuneet joukkoliikennekulkuneuvoihin, vaan kävelivät pysäkin kautta lähtöpaikasta määräpaikkaan. Vuonna 2004 siirryttiin käyttämään eri sijoitteluparametreja eri vuorokaudenaikoihin. (Vatanen 2010.)

#### **7.1.2 Helsingin metropolialueen uusi linjastokuvaus**

Liikennejärjestelmän muutokset ja pääkaupunkiseudun työssäkäyntialueen kasvu ovat aiheuttaneet vaatimuksia liikenneverkkokuvausten perusteellisemmalle



päivitykselle ja liikennejärjestelmäkuvauksen laatimiselle. (YTV 2008.) Vuoden 2008 liikennetutkimuksen ohessa toteutettu uusi linjastokuvaus pyrkii vastaamaan näihin vaatimuksiin.

Uusin Helsingin metropolialuetta approksimoiva Emme-malli käsittää lähes koko Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan. Uudenmaan kunnista kuvauksen ulkopuolelle on jätetty Hanko ja osa Raaseporia. Itä-Uudenmaan kunnista Ruotsinpyhtää ja osa Lapinjärvestä on jätetty kuvaamatta. Mukaan kuvaukseen on Uudenmaan ulkopuolelta otettu Lahti ja Hämeenlinna. Tieverkon lähtöaineistona on Digiroad-aineisto, joka sisältää tie- ja katuverkon tarkat sijainnit ja tärkeimmät ominaisuustiedot. Koska Digiroad-aineisto on hyvin yksityiskohtainen, kuvausta jouduttiin voimakkaasti karkeistamaan. Linjastokuvaus lähtöaineistona on käytetty joukkoliikennerekisteriä (JORE) ja liikennelupajärjestelmää (VALLU). (YTV 2008.)

Uudessa kuvauksessa linja-autojen nopeus on sidottu ajoneuvojen nopeuksiin. Kun erillistä bussikaistaa ei ole käytössä lisätään segmentin matka-aikaan ajoneuvokohdainen vakio, joka kuvaa pysäkkien aiheuttamaa viivettä ja jonka arvo vaihtelee välillä 0,27-1,00 riippuen nopeakorjauksesta. Yhden pysähdyksen aiheuttama viive on nopeilla väylillä suurempi kuin alhaisilla nopeakorjauksalueilla, mutta vastaavasti pysäkkiväli ja pysähdysväli ovat harvempia korkealuokkaisilla väylillä. (YTV 2009a.)

Bussikaistaosuuksilla bussien nopeuteen ei muun ajoneuvoliikenteen ruuhkalla ole juuri vaikutusta.. Bussikaistaisilla väylillä bussien matka-aika lasketaan ajoneuvojen vapaasta nopeudesta, jota kerrotaan kertoimella, joka vaihtelee välillä 1,5-1,7, riippuen funktioluokasta. (YTV 2009a.)

Metron sekä lähi- ja kaukojunien viivytyksifunktiona on segmenttimuuttujan aikatauluista poimittu asemien välinen matka-aika minuutteina. Raitioliikenteelle on päädytty käyttämään jo aiemmin kehitettyä koodaustapaa, jossa raitiolinkkien aamu-, päivä- ja iltaruuhkan mitattu nopeustieto on talletettu linkkimuuttujan, josta eri ajanjaksojen funktiot hakevat ko. ajanjakson keskinopeuden. (YTV 2009a.)

Kuormituksessa on käytetty joukkoliikennemuotokohtaista nousuaikaa. Taustalla on ajattelu, että raideliikenteen aikataulutäsmällisyys, hahmotettavuus, odotteluolosuhteet sekä mahdollisesti tasainen kulku eivät synnytä yhtä suurta matkavastusta kuin vastaavan matkan tai sen osan tekeminen bussilla. (YTV 2009b.)

Sijoittelussa on käytetty bussilinjoilla linjan pituudesta riippuvaisia nousuvastuksia. Tämä perustuu oletukseen, että linjan pituus vaikuttaa matka-ajan hajontaan.

Tavoitteena on ollut määrittellä nousuvastukset siten, että lyhyillä aikataulussaan pysyvillä linjoilla nousuvastus jää selvästi pienemmäksi kuin pitkillä seutulinjoiilla. Käyttämällä bussilinjan pituudesta riippuvia nousuvastuksia on sijoitteluissa saatu raide- ja bussiliikenteen kuormitusosuudet vastaamaan paremmin matkustuslaskentoja. (YTV 2009b.)

Sijoitteluparametreja laadittaessa tarkastelu on painottunut pääkaupunkiseudun joukkoliikennetilanteeseen, jossa vuorotarjonta on kohtalaisen tiheää. Muualla työssäkäyntialueella linjojen vuorovälit voivat olla jopa tunteja ja on syytä harkita ensimmäisen odotusajan vaimentamista pitkien odotusaikojen osalta. Koska odotusajan maksimin määrittäminen ei ole suositeltavaa, vaimentaminen tehdään sijoittelun jälkeen komponentteihin jaettuja aikamatriiseja käsittelemällä. (YTV 2009b.)

Painokerrointen osalta suositus on odotusajalle ja kävelyajalle paino 1,5 ja nousuajalla painoa 1. Joukkoliikenteen vastustekijöitä käsittelevissä tutkimuksissa (Karhunen 1993, LVM 2006) odotuksen ja kävelyn matka-ajan painokertoimet ovat asettuneet välille 1,5-2,5. (YTV 2009b.)

## **7.2 Tutkimuksen Emme-aineisto**

Tarkastelut tehtiin Helsingin kaupungin liikennelaitoksella (HKL) käytössä olleella Emme-verkolla, jossa on kuvattuna pääkaupunkiseudun joukkoliikennejärjestelmä. Helsingin seudun uutta joukkoliikennejärjestelmäkuvausta ei käytetty siitä syystä, että kysyntäennusteen laatiminen oli tutkimustyön alkaessa vielä kesken. Tarkasteluissa viitataan alkuperäisillä koodaustavoilla siis HKL:n verkossa käytössä olleisiin koodaustapoihin. Tarkasteluissa tehdyt johtopäätökset ovat kuitenkin sovellettavissa uuteenkin kuvaukseen.

Tarkastelut tehtiin HKL:ssa yleisesti käytössä olleilla sijoitteluparametrien arvoilla: vuorovälin maksimi 30 minuuttia, odotusajan kerroin 0,3, odotusajan painokerroin 2, kävelyajan painokerroin 2 ja nousuajan painokerroin 1. Lisäksi käytettiin linjakohtaista nousuaikaa, jossa nousuaika bussilinjoilla vaihteli linjan pituuden mukaan.

## **7.3 Vertailuaineisto ja sen käsittely**

Sijoittelun tuottamia nousijamääriä verrattiin linja-autojen osalta matkakorttiaineistosta saatuihin nousijamääriin ja raitiovaunuliikenteen osalta APC-laitteista saatuihin nousijamääriin. Raitiovaunuissa APC-laitteiden avulla saatujen laskentatietojen

avulla olisi ollut mahdollista suorittaa tarkasteluja myös linjojen kuormituksiin korridorissa. Linja-autojen osalta ei vastaavaa tietoa kuitenkaan ollut saatavilla, sillä matkakorttia näytetään vain linja-autoon noustessa. Matkakorttitiedoissa ei siis ole tietoa poistumismääristä, joten matkustajamääriä pysäkkivälillä ei voida laskea.

#### 7.4 Tutkimusmenetelmät

Tarkasteluun valitun joukkoliikennekorridorin ominaisuuksia tutkittiin sijoittelamalla kysyntää alueparikohtaisesti yksilösijoittelumenetelmällä. Tällä tavoin selvitettiin eri reittivaihtoehtojen klusteroitumista painotetun matka-ajan mukaan. Yksittäisen alueparin matkojen sijoittelussa tietyt pysäkit "kilpailevat" kysynnästä. Eri strategioiden painotetut matka-ajat voivat olla hyvinkin lähellä toisiaan, jolloin pieni muutos linjastossa voi muuttaa strategioiden järjestystä niin, että kokonaan eri linjat pääsevät alueparin optimaaliseen strategiaan. Analyysillä kartoitettiin eri sijoittelutulosten herkkyyttä eri linjankuvaustavoilla.

Järjestelmän tarkastelut tehtiin Emmen vuorovälipohjaisella sijoittelulla. Eri tavoin koodattuja verkkoja kuormitettiin kysyntämatriisilla. Eri linjankoodausperiaatteilla pyrittiin saamaan tarkasteluvuosien joukkoliikennetarjonta kuvattua niin, että muutokset kuormituksissa vastasivat matkustajalaskelmien osoittamia nousijamääriä. Tutkimuksessa vertailtiin tarkasteluun valitun korridorin linjojen keskinäistä kuormittumista eri kuvaustavoilla.

Paras tapa testata eri kuvaustapoja olisi koodata koko joukkoliikennelinjasto uudelleen. Työn puitteissa tämä ei kuitenkaan ollut mahdollista. Tehdyillä tarkasteluilla saadaan kuitenkin suuntaa-antavaa tietoa siitä, miten linjasto olisi syytä kuvata Emmessä.

Myös sijoitteluparametrien käyttö on ongelmallista verkossa, jossa on käytössä useita erilaisia koodaustapoja. Sijoittelua ohjaavat parametrit, etenkin nousuaika, on määritetty niin, että ne antavat parhaan tuloksen alkuperäisillä linjankuvaustavoilla. Sijoitteluparametreilla ei tässä työssä tehty erikseen herkkyystarkasteluja, sillä tutkimuksessa tavoitteena oli enemmänkin linjankuvaustapojen vaikutusten havainnollistaminen kuin mallin kalibrointi todellisten matkustajamäärien kuormitusta vastaavaksi.

Hakaniemi–Pasila-korridorin linjastokuvauksen vaikutusta linjojen kuormittumiseen tutkittiin suunnittain, sillä alueparin i-j joukkoliikennematkat ovat epäsymmetrisiä alueparin j-i joukkoliikennematkojen kanssa, vaikka linjoilla olisikin sama reitti kumpaankin suuntaan ja sama vuoroväli. Alueparin matkustajat nousevat

ajoneuvoihin samalla pysäkillä, mutta saattavat päätyä eri pysäkeille linjojen reittien perusteella. Kokeiltaessa eri koodaustapoja pienelle osalle verkkoa on mielekästä tutkia uudelleen koodattua tarkastelualueutta nousujen ja vaihtojen osalta, ei niinkään niiden matkojen osalta, joilla ajoneuvosta poistutaan tarkastelualueella.

Pysäkkikohtaisia nousijamääriä on harvoin järkevää tarkastella Emmellä suoritettavissa tarkasteluissa. Työssä keskityttiin kuitenkin havainnollistamaan mallin yksityiskohtaista toimintaa eri koodausperiaatteilla, ja sen takia vertailtiin pysäkki-kohtaisia nousijamääriä. Korridorista ei myöskään ollut matkustajalaskentatietoja poistumismääristä, joten korridorin linjojen kuormitusten tarkastelu ei ollut mahdollista.

## **7.5 Pasila–Hakaniemi-korridorin linjaston tarkastelut**

### **7.5.1 Korridorin kuvaus**

Linjankuvaustapojen vaikutusta joukkoliikennesijoittelun tuloksiin testattiin keväiden 2008 ja 2009 aamuhuipputuntitilanteessa Pasila–Hakaniemi-joukkoliikennekorridorissa. Tarkasteluajankohtien välillä raitiolinja 9 aloitti toimintansa elokuussa 2008 ja bussilinja 17 lopetettiin. Tarkasteluvuosien joukko-liikennetarjonnasta tehtiin Emmessä erilaisia kuvauksia ja niillä testisijoitteluja. Verkot kuormitettiin aamuhuipputunnin kysyntämatriisilla.

Kuvissa 15 ja 16 on kuvattu tarkasteltujen linjojen reitit Hakaniemessä keväinä 2008 ja 2009. Kuvissa on linjojen reitit ja pysäkit Pasilan suuntaan.

### **7.5.2 Hakaniemi–Pasila-suunnan kuormitustarkastelut**

Hakaniemi–Pasila-suunnan tarkasteluissa tehtiin erilaisia versioita Hakaniemen linjastokuvauksesta.

Vertailut vaihtoehdot olivat:

- a. kaikki pysäkit kuvattu erikseen
- b. raitiolinjojen 7B ja 9 pysäkit yhdistetty
- c. bussilinjojen 17 ja 23 pysäkit yhdistetty, raitiolinjojen 7B ja 9 pysäkit yhdistetty,
- d. bussilinjojen 17 ja 23 ja raitiolinjojen 7B ja 9 ja pysäkit yhdistetty kaikki
- e. raitiolinjojen, bussilinjojen ja metron pysäkit yhdistetty.



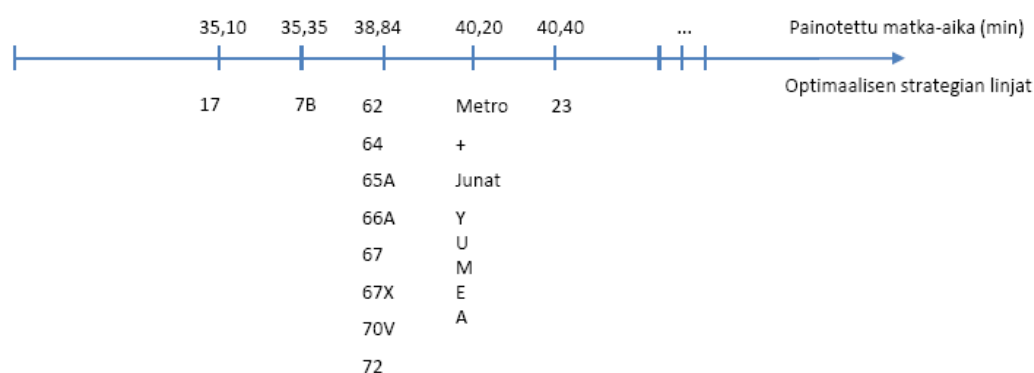
Kuva 15. Tarkasteltujen linjojen reitit ja pysäkit Pasilan suuntaan keväällä 2008.



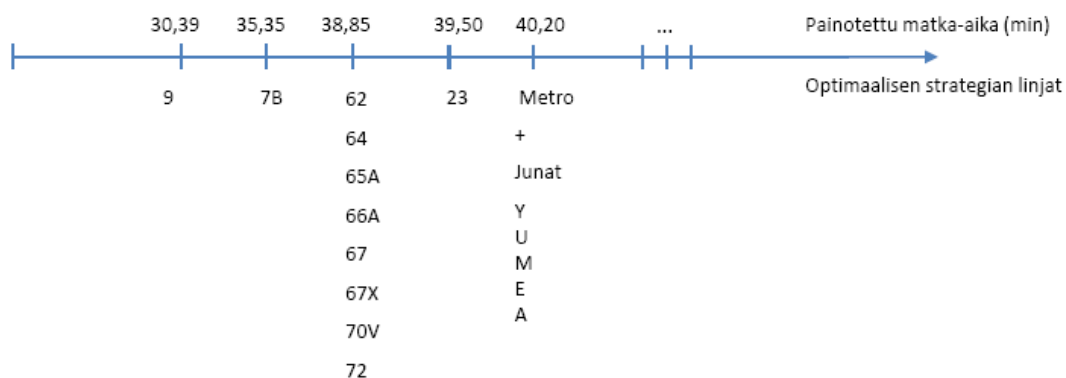
Kuva 16. Tarkasteltujen linjojen reitit ja pysäkit Pasilan suuntaan keväällä 2009.

Vertailuissa tutkittiin vuoden 2008 kevään osalta linjojen 7B, 17 ja 23 nousijamääriä Hakaniemessä ja vuoden 2009 kevään osalta linjojen 9 ja 23 osalta. 7B ei ole mukana vuoden 2009 tarkastelussa, sillä siitä ei ollut saatavilla vastaavia matkustajalaskentatietoja tarkasteluajanjaksolta.

Vaihtoehtoisilla kuvaustavoilla tehtyjen linjaston ominaisuuksia tutkittiin myös sijoittelemalla Hakaniemi–Pasila-välille matkoja yksilösijoittelumenetelmällä ja vertailemalla optimaalisen strategian vaihtoehtoja. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty houkuttelevat pysäkkivaihtoehdot mallissa vuoden 2008 ja 2009 tilanteissa kuvaustavalla a.



Kuva 17. Houkuttelevat strategiat alueparin Hakaniemi–Pasila välisillä joukkoliikennematkoilla vuoden 2008 tilanteessa kuvaustavalla a.



Kuva 18. Houkuttelevat strategiat alueparin Hakaniemi–Pasila välisillä joukkoliikennematkoilla vuoden 2009 tilanteessa kuvaustavalla a.

Vaikka vuoden 2008 tilanteessa linja 17 saa kaikki alueparin väliset matkat, on kyse vain 0,25 minuutin erosta painotetussa matka-ajassa. Tämä vastaa 0,41 minuutin eroa vuorovälissä käytetyillä sijoitteluparametreilla (odotusajan kerroin 0,3 ja odotusajan painokerroin 2). Jos siis linjan 7B vuoroväli olisi vähintään 0,41 minuuttia pienempi, saisi linja 7B kaikki alueparin väliset matkat mallissa. Vuoden 2009 tilanteessa raitiolinja 9 on selvemmin houkuttelevin vaihtoehto. Molempien

vuosien tilanteissa kaikki alueparin väliset matkat tehdään tietyllä linjalla. Kuitenkin todellisuudessa alueen, jota sentroidi kuvaa, ihmisillä on eri mieltymykset, eri kävelymatkat pysäkeille ja eri määrä informaatiota saatavilla. Kun linjojen pysäkit yhdistetään, tulee hajonta linjanvalinnassa paremmin esille. Houkuttelevien linjojen joukkoon pääsemiseen vaikuttavat kuitenkin edelleen myös muut tekijät kuten ajoneuvossaoloaika ja kävelymatka poistumis pysäkiltä määräpaikkaan.

Taulukossa 3 on esitetty linjojen suhteelliset nousijamääräosuudet eri kuvaustavoilla Hakaniemessä sijaitsevilla pysäkeillä. Linjasto on tässä kuormitettu tavallisella vuorovälipohjaisella sijoittelulla ja kysyntämatriisissa on koko pääkaupunkiseudun aamuhuipputunnin matkat.

Taulukko 3. Linjojen suhteelliset nousijamääräosuudet Hakaniemen pysäkeillä.

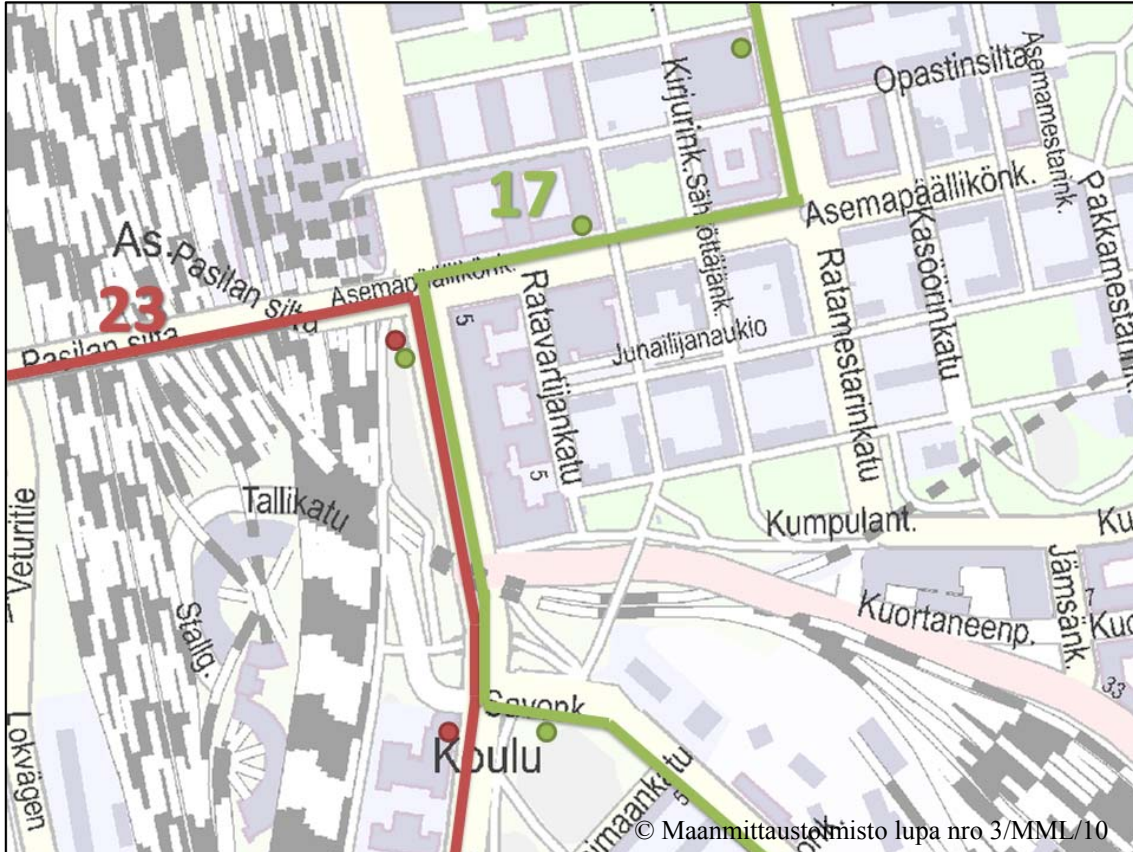
	KEVÄT 2008			KEVÄT 2009	
	ennen linjan 9 perustamista			linjan 9 perustamisen jälkeen	
	7B	17	23	9	23
<b>Liikennelaskennat</b>	0.71	0.08	0.21	0.72	0.28
<b>Nousijamäärät Emmessä</b>					
Kuvaustapa a	0.39	0.06	0.55	0.60	0.40
Kuvaustapa b	0.55	0.06	0.39	0.58	0.42
Kuvaustapa c	0.68	0.18	0.13	0.77	0.23
Kuvaustapa d	0.60	0.20	0.20	0.68	0.32
Kuvaustapa e	0.78	0.11	0.11	0.50	0.50

Tutkimus osoittaa, että pysäkkejä kannattaa kuvauksessa yhdistää ja sillä tavalla päästään lähemmäs todellisia matkustajamääriä. Tuloksia vertailtiin pienimmän neliösumman menetelmällä. Kuvauksista parhaat tulokset antoi kuvaustapa c (bussilinjojen 17 ja 23 pysäkit yhdistetty keskenään ja raitiolinjojen 7B ja 9 pysäkit yhdistetty keskenään) ja toiseksi parhaan d (bussilinjojen 17 ja 23 ja raitiolinjojen 7B ja 9 pysäkit kaikki yhdessä). Tulosten mukaan kuvaustapa c (erotusten neliösumma 0,308) oli kuvaustapaa d (erotusten neliösumma 0,321) marginaalisesti parempi Hakaniemessä. Ottaen huomioon matkustajalaskentojen ja Emme-kuvauksen virhemarginaalit, ei näistä luvuista voi päätellä, kumpi kuvaustapa on oikeampi. Toisaalta kuvaustapa c on kuvaustapana selkeämpi, sillä siinä fyysisiä pysäkkejä joudutaan yhdistelemään vähemmän. Lisäksi vaihtokävelyt vastaavat paremmin todellista tilannetta.

### 7.5.3 Pasila–Hakaniemi-suunnan kuormitustarkastelut

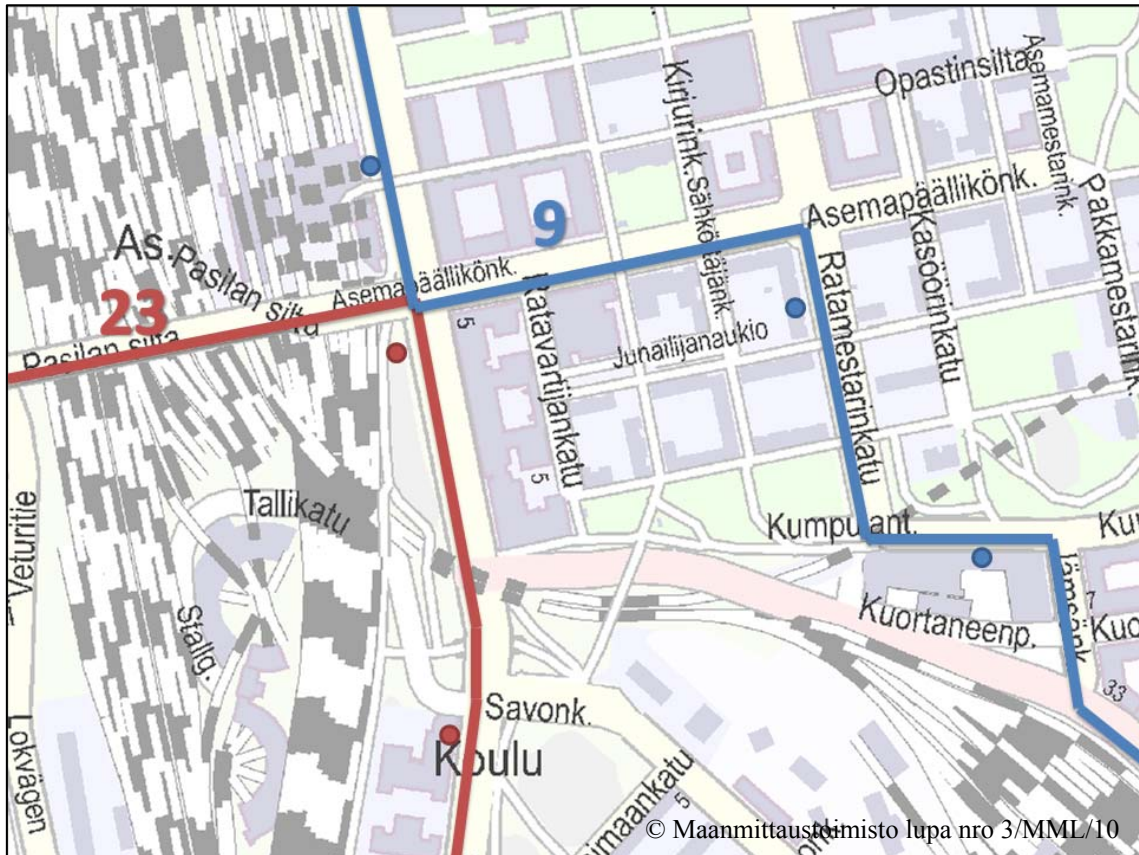
Pasilassa tarkasteluissa yhdistettiin vuoden 2008 tilanteessa bussilinjojen 17 ja 23 pysäkit ja vuoden 2009 tilanteessa bussilinjan 23 ja raitiovaunulinjan 9 pysäkit.

Vuoden 2008 skenaariossa yhdistettiin bussilinjat 17 ja 23 kulkemaan samaan pysäkin kautta Pasilassa. Vuoden 2009 skenaariossa raitionlinja 9 ja bussilinja 23 kulkivat saman pysäkin kautta. Linjojen reitit Hakaniemen suuntaan on esitetty kuvissa 19 ja 20.



Kuva 19. Tarkastelujen linjojen reitit ja pysäkit Pasilassa Hakaniemen suuntaan vuoden 2008 tilanteessa.





Kuva 20. Tarkasteltujen linjojen reitit ja pysäkit Pasilassa Hakaniemen suuntaan vuoden 2009 tilanteessa.

Taulukossa 4 on esitetty sijoittelun tuloksina saadut nousijamäärien suhteet kunkin linjan pysäkillä Pasilassa. Uusi kuvaustapa, jossa pysäkkejä oli yhdistelty, paransi merkittävästi nousijamäärien vastaavuutta liikennelaskentatietoihin. Vuoden 2008 tilanteessa bussilinjat 17 ja 23 lähtivät todellisuudessa samalta pysäkiltä, mutta alkuperäisessä Emme-kuvauksessa ne oli kuvattu lähtemään eri pysäkeiltä. Korjaamalla tämä seikka päästiin lähes matkustajalaskentojen osoittamiin nousijamääräsuuksiin linjojen 17 ja 23 välillä.

Taulukko 4. Nousijamäärät Pasilan pysäkeillä.

	ennen linjan 9 perustamista		linjan 9 perustamisen jälkeen	
	17	23	9	23
<b>Liikennelaskennat</b>	0.47	0.53	0.74	0.26
<b>Nousijamäärät Emmessä</b>				
Alkuperäinen kuvaus (pysäkit erikseen)	0	1	0.73	0.27
Bussilinjat 17 ja 23 / Raitiolinja 9 ja 23 samalta pysäkiltä	0.47	0.53	0.77	0.23

#### 7.5.4 Pysäkkien yhdistäminen Emme-kuvauksessa

Tutkimustulokset viittaavat siihen, että vierekkäiset pysäkit kannattaa yhdistää kuvauksessa yhdeksi pysäkiksi, jolloin useampi linja voi päästä tietyn alueparin optimaaliseen strategiaan. Pysäkkien yhdistettävyyteen vaikuttaa myös se, ovatko linjat havaittavissa samaan aikaan. Bussi- ja raitiovaunupysäkkejä kannattaa yhdistää, jos ne ovat yhtä aikaa havaittavissa. Yhdistämistä ei kannattane tehdä metron ja muiden kulkutapojen kanssa, sillä näissä vaihtoyhteys kulkutavasta toiseen on hankalampi ja metro mielletään usein erillisenä järjestelmänä.

Pysäkkien yhdistämistä kannattaa käyttää ohjauksen keinona erityisesti niillä linjoilla, joiden kuormituksia ei muuten saada vastaamaan todellisia kuormitusmääriä. Pysäkkien yhdistäminen hankaloittaa vaihdoista aiheutuvan kävelyn kuvaamista, joten yhdistettävien pysäkkien tulisi olla sellaisia, joiden välillä vaihtaminen on todellisuudessa sujuvaa.

Pysäkkien yhdistämisessä, kuten muussakin verkon koodauksessa, on tärkeää noudattaa samoja koodausperiaatteita koko verkolla. Jos raitioliikenteen pysäkit päätetään yhdistää linja-autoliikenteen pysäkkeihin kuvauksessa, on tämä tehtävä koko järjestelmän kuvauksessa vastaavissa kohdissa.

### 7.6 Terminaalien linjastokoodauksen tarkastelu

#### 7.6.1 Tarkasteluun valittujen kohteiden kuvaus

Testattaviksi terminaalikohteiksi valittiin Helsingin rautatieasema ja Pasilan juna-asema. Rautatieasemalta lähtevät kaikki Helsingin lähi- ja kaukojunat. Pasilan juna-asemalla erkanevat toisistaan pohjoiseen kulkeva päärata ja länteen kulkeva rantarata. Kaikki matkustajajunat pysähtyvät Pasilan juna-asemalla.

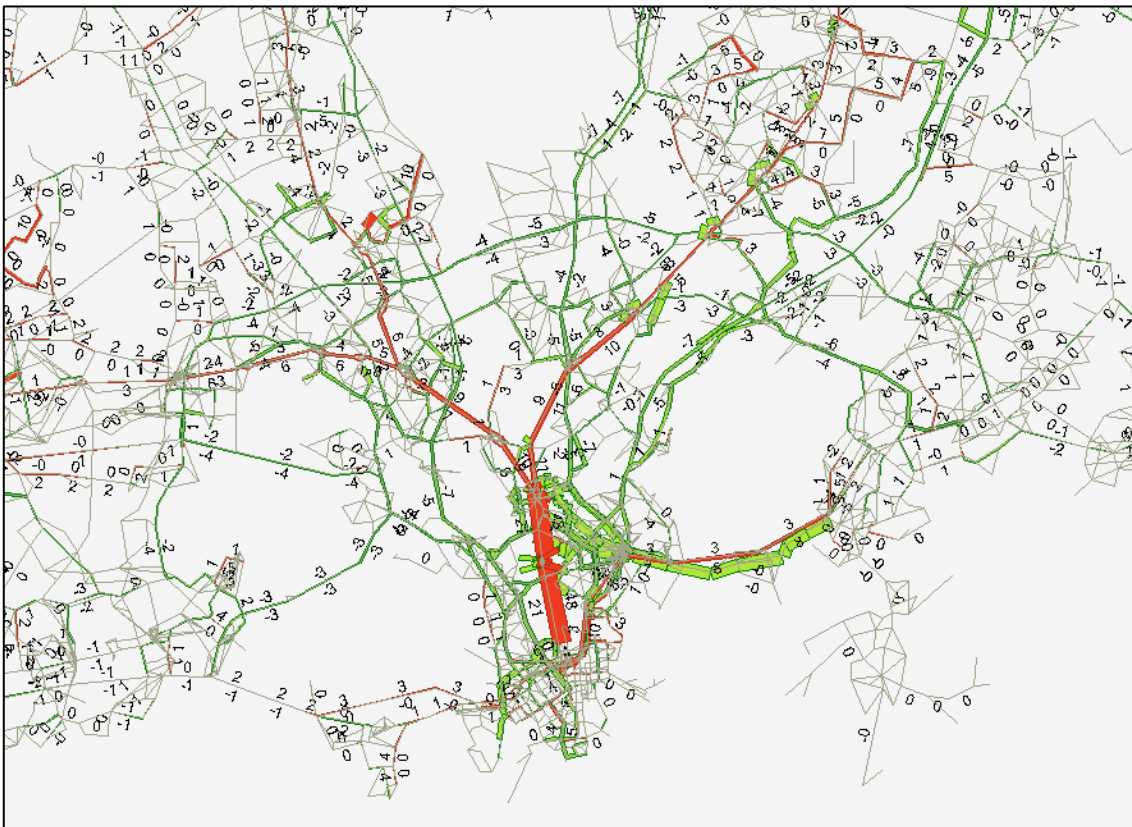
Alkuperäisellä koodaustavalla toteutetussa kuvauksessa Helsingin rautatieasema oli kuvattu kolmena erillisenä solmuna. Pasilan juna-asema oli kuvattu neljänä solmuna niin, että kukin solmu kuvasi yhtä laituria. Terminaalien koodaamisen havainnollistamiseksi tehtiin yksinkertainen tarkastelu juna-asemilla. Raidelinjojen kuormitusta testattiin koodaamalla Helsingin rautatieaseman kaikki matkustajajunat lähtemään samalta pysäkiltä (solmusta) ja Pasilan juna-aseman kaikki junat kulkemaan saman pysäkin (solmun) kautta.

Kun aseman raideliikennelinjat kulkevat saman pysäkin kautta, käsitellään asemalla

pysähtyviä linjoja yhtenäisenä kokonaisuutena nousutilanteessa. Pysäkkien yhdistäminen laskee yhdistettyä vuoroväliä ja sitä kautta painotettu odotusaika laskee reittivaihtoehtoissa, joissa ajoneuvon nouseaan asemilla. Asemat kilpailevat siis matkoista yksittäisenä vaihtoehtona, jonka kilpailukyky on parempi kuin erillisten pysäkkien.

### 7.6.2 Helsingin rautatieaseman koodaus

Emme-pankkiin tehtiin erillinen skenaario, jossa Helsingin rautatieasema oli kuvattu yhtenä pysäkkinä kolmen pysäkin sijaan. Kuvauksen muuttaminen vaikuttaa ensisijaisesti rautatieasemalla kulkuneuvon nouseviin matkustajiin. Matkoihin, joilla kulkuneuvosta poistutaan ajoneuvosta ja vaihdetaan muuhun kulkutapaan tai kävellään määräpaikkaan, muutos voi vaikuttaa siitä syystä, että uudessa kuvauksessa kaikilla laitureilla on samat koordinaatit ja etäisyydet muualle, kun taas alkuperäisessä eri laiturit sijaitsivat eri kohdissa. Tällä on vaikutusta kävelymatkoihin rautatieasemalta.

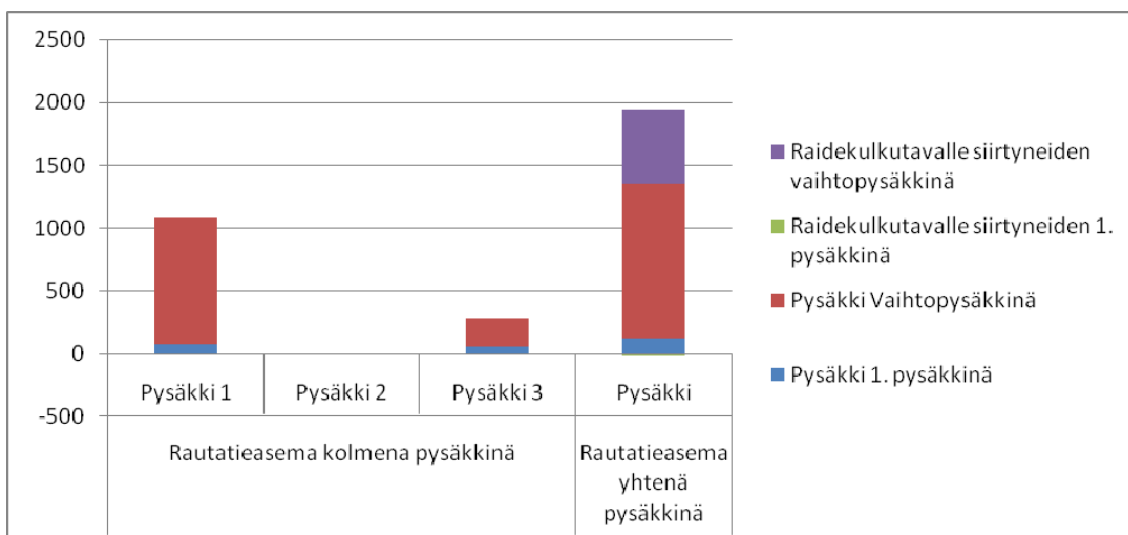


Kuva 21. Suhteelliset muutokset linjojen kuormitusmääriin vaihtoehdoisessa kuvauksessa verrattuna kuvaustapaan, jossa Helsingin rautatieasema on kuvattu neljänä pysäkki-

Kuvassa 21 on esitetty vaihtoehdoisen kuvaustavan vaikutuksia linjojen kuormitukseen. Kuvan luvut ovat suhteellisia muutoksia linjojen kuormitusmäärissä verrattuna alkuperäisen verkon linjojen kuormitukseen. Muutos kuvauksessa siirsi raideliikenteelle matkoja. Esimerkiksi Helsingin rautatieaseman ja Pasilan aseman välillä junayhteyden kuormitus Pasilan suuntaa kasvoi aamuhuipputunnilla 48 %. Vastakkaiseen suuntaan kasvua oli 21 %.

Tulosten tulkinta on ongelmallista siinä suhteessa, että pysäkkien yhdistämisellä on asemalla vaikutusta myös kävelyetäisyyksiin ja sitä kautta kävelyaikoihin, ei pelkästään odotusaikoihin. Esimerkiksi Pasila–Rautatieasema-suunnan kasvu raideliikennematkoissa koostuu yksinomaan näistä.

Vaihtoehdoisen kuvaustavan vaikutuksia sijoitteluun tutkittiin suuraluepareittain. Eniten vaikutusta muutoksella oli kulkutavan valintaan kantakaupungin ja Pohjois-Helsingin välisillä matkoilla. Toisaalta tutkittaessa ko. suuralueparin kulkutapajakaumaa 741-aluejaossa (pienaluejako) havaittiin, että muutamilla aluepareilla raideliikenteen kulkutapaosuus myös laski. Tämä aiheutui siitä, että uudessa kuvauksessa kävelyetäisyydet tiettyjen kulkutapojen pysäkeiltä Helsingin rautatieasemalle kasvoivat.



Kuva 22. Nousijamäärät Helsingin rautatieasemalla vanhalla ja uudella kuvaustavalla.

Tarkastelussa Helsingin rautatieaseman merkitys kasvoi vaihtopaikkana, mutta tämä aiheutui miltei kokonaan kävelyetäisyyksien muutoksista. Pysäkkien yhdistämisen vaikutuksesta painotettu odotusaika laski Helsingin rautatieaseman ja Pasilan aseman välisillä matkoilla 1 minuutista 0,56 minuuttiin. Kävelymatkojen lyhentyminen metrosta juna-laiturille lyhensi kuitenkin matka-aikaa enemmän ja erityisesti matkoilla Kulosaaresta ja Herttoniemestä Länsi-Helsinkiin alettiin mallissa käyttää metro-juna-yhdistelmää. Samalla bussilinjojen kuormitus Herttoniemi–Pasila-välillä laski. Kuvassa 22 on vertailtu rautatieasemaa pysäkinä eri kuvauksien sijoitteluis-  
sa. Rautatieaseman käyttö matkan 1. pysäkinä laski hieman.

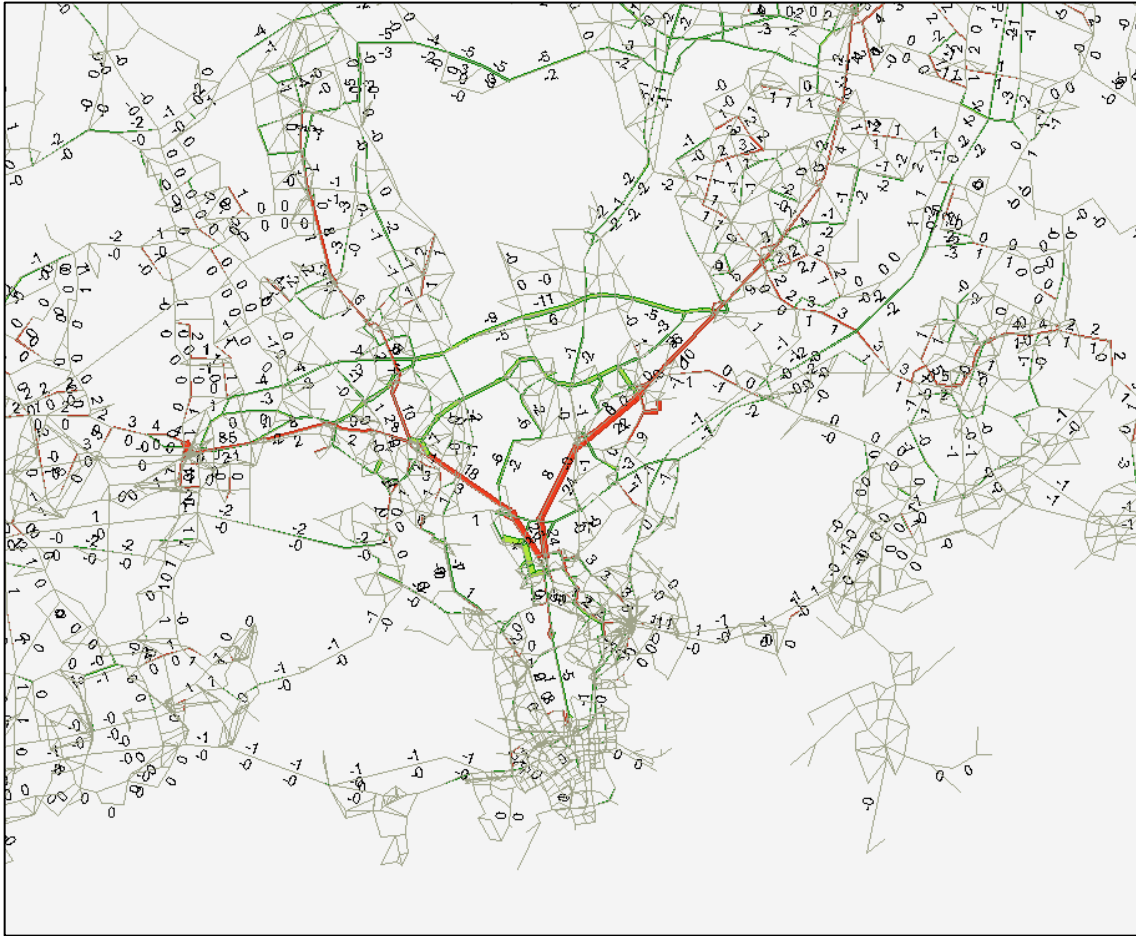
### 7.6.3 Pasilan juna-aseman koodaus

Toiseksi testattavaksi terminaalikohteeksi valittiin Pasilan juna-asema. Pasilan juna-asemalla erkanevat toisistaan pohjoiseen kulkeva päärata ja länteen kulkeva rantarata. Kaikki matkustajajunat pysähtyvät Pasilan juna-asemalla.

Alkuperäisellä koodaustavalla toteutetussa kuvauksessa Pasilan juna-asema oli kuvattu neljänä solmuna niin, että kukin solmu kuvasi yhtä laituria. Terminaalin koodaamisen havainnollistamiseksi tehtiin juna-asemalle yksinkertaisia tarkasteluja.

Pasilan juna-asemalle tehtiin ensin tarkastelu, jossa juna-asema oli kuvattu kahtena pysäkinä. Rantaradan suuntaan kulkevien junien laiturit oli kuvauksessa koodattu yhdeksi pysäikiksi, samoin pääradan junien laiturit. Tarkastelussa pysäkkien yhdistämisen vaikutus ei ollut merkitsevä. Ruuhkatunnilla joukkoliikennetarjonta on pää- ja rantaradalla niin hyvä, että mallissa juna valitaan sen mukaan, millä pysäkillä siitä poistutaan. Siten hitaampiin useammilla pysäkeillä pysähtyviin juniin nousevat vain ne, jotka jäävät pois pysäkeillä, joilla matka-ajaltaan lyhyemmät junat eivät pysähdy. Sillä, että odotusaika juna-asemalla laski matkoilla Pasilasta ja Helsingin rautatieasemalle ei myöskään ollut merkitystä, sillä näillä matkoilla odotusaika oli jo valmiiksi hyvin pieni.

Raidelinjojen kuormitusta testattiin myös koodaamalla Pasilan juna-aseman kaikki junat kulkemaan saman pysäkin (solmun) kautta.



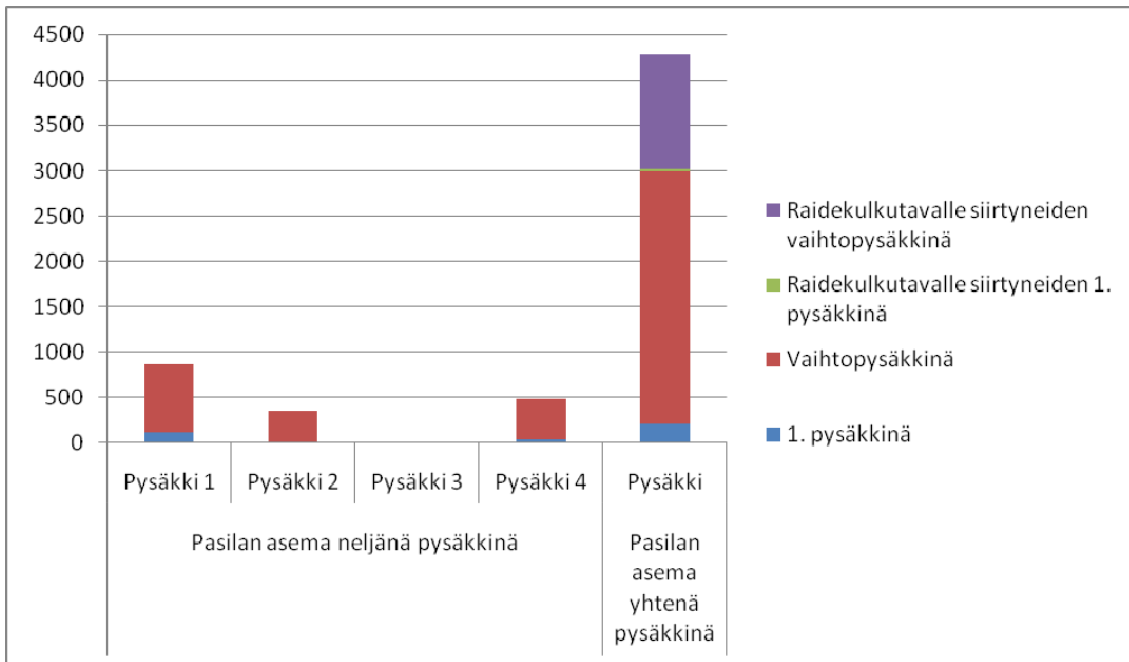
Kuva 23. Suhteelliset muutokset linjojen kuormitusmääriin vaihtoehdoisessa kuvauksessa verrattuna kuvaustapaan, jossa Pasilan asema on kuvattu kolmena pysäkinä.

Kuvassa 23 on esitetty vaihtoehdoisen kuvaustavan vaikutuksia linjojen kuormitukseen. Kuvan luvut ovat suhteellisia muutoksia linjojen kuormitusmäärissä verrattuna alkuperäisen verkon linjojen kuormitukseen. Muutos siirsi matkoja raideliikenteelle pääradalla Pasilasta koilliseen 24 % ja vastakkaiseen suuntaan 8 %. Rantaradalla Pasilasta luoteeseen kuormitus nousi 18 % ja vastakkaiseen suuntaan 3 %. Kuormitus laski poikittaisessa bussiliikenteessä juna-asemien välillä Jokeri-linjalla ja Kehä I:n bussilinjoilla.

Vaihtoehdoisen linjastokuvausten aiheuttamia muutoksia kuormituksissa tutkittiin suuraluepareittain. Suuraluejaossa pääkaupunkiseutu on jaettu 19 alueeseen. Suurimmat muutokset havaittiin matkoissa Luoteis- ja Koillis-Helsingin välillä. Näillä matkoilla junan vaihtaminen Pasilassa helpottui. Muista matkoista raideliikennettä käyttämään eniten siirtyi matkoja Vantaalta pääradan varrelta Luoteis-Helsinkiin.

Pasilan juna-aseman merkitys kasvoi mallissa pääasiassa vaihtopaikkana. Kuvassa 24 on esitetty Pasilan juna-aseman pysäkkien nousijamääriä kummallakin kuvaustavalla. Uudet matkat olivat pääosin pääkaupunkiseudun poikittaisliikennettä.





Kuva 24. Pasilan juna-aseman käyttö nousupysäkkinä eri kuvaustavoilla.

Pysäkkien yhdistämisen vaikutus odotusaikojen lyhenemisenä Pasilan juna-asemalla ei näkynyt linjojen kuormitusluvuissa. Muutokset kuormituksissa johtuivat lähes yksinomaan siitä, että kävelymatkat poistuivat vaihtojen yhteydestä.

Pysäkkien yhdistämisen vaikutus näkyi lähinnä siinä, että pääkaupunkiseudun poikittaisliikennettä siirtyi kulkemaan raidekulkutavalla Pasilan kautta. Kun pysäkit yhdistettiin, kävelymatkat vaihdon yhteydessä hävisivät. Aiemmassa kuvauksessa vaihtoon laiturilta toiselle liittyi 0,12 kilometrin kävelymatka. Pysäkkien yhdistäminen olisi voitu tehdä myös kuvaamalla nousu- ja poistumispysäkit mallissa erillisinä ja asettamalla näiden välille kävelylinkki, jolloin vaihdon hankaluus olisi saatu kuvattua mallissa.

#### 7.6.4 Terminaalien Emme-kuvaus

Helsingin rautatieasema on mallinnettavana ongelmallinen. Toisaalta Helsinki–Pasila-välin matkojen kannalta olisi järkevää esittää rautatieasema vain yhtenä solmuna. Toisaalta pysäkkien yhdistämisellä ei ole merkitystä pidempiin raideliikennekulkutapaa käyttäviin matkoihin, sillä niissä pysäkki valitaan alkuperäisen kuvauksen pysäkeistä sen mukaan, mihin ollaan menossa. Se, että Helsinki–Pasila-välillä kulkee useita junia, ei tällaisilla matkoilla paranna rautatieaseman kilpailutilannetta muihin pysäkkeihin tai terminaaleihin nähden. Kävelymatkat laitureiden väleillä ovat suhteellisen pitkiä ja pysäkkien yhdistämisen tuoma vaikutus riippuu paljolti odotusajan painotuksesta sijoittelussa.

Testaukseen käytetyssä verkossa odotusaikaa on painotettu suhteellisen vähän ja raidekulkutapaa suositaan nousujan avulla. Malli on kalibroitu niin, että kuormitusluvut on saatu lähemmäksi todellisia matkustajamääriä valitulla kuvaustavalla. Pysäkkejä yhdistämällä, odotusajan vahvemalla painotuksella ja kulkutapakoh- taisten nousuaikojen alentamisella päästään samansuuntaisiin tuloksiin. Tällä tavalla kuitenkin vältytään toisistaan suuresti poikkeavien nousuaikojen käytöltä eri kulkutavoilla.

Terminaalin kuvaustavalla on vaikutusta sieltä lähtevien linjojen kuormittumiseen. Kun terminaalit on koodattu ehdotetulla tavalla, niiden kilpailutilanne muihin pysäkkeihin verrattuna paranee. Vaikka pysäkkien kilpailutilanne parani etenkin Helsingin rautatieasema–Pasilan juna-asema-välillä, ei tämä varsinaisesti näkynyt tuloksissa. Tämä johtuu siitä, että junien vuorovälit ovat kuvatulla huipputunnilla varsin lyhyet, eikä kaikkien linjojen yhdistetty vuoroväli merkittävästi sitä enää lyhennä.

Terminaalien kuvaaminen Emmessä on ongelmallista siinä suhteessa, että periaat- teessa pysäkit olisi hyvä kuvata samassa solmussa, jolloin niillä olisi mahdollisuus päästä samaan optimaaliseen strategiaan. Toisaalta vaihtokävelyt on tärkeää saada kuvattua. Etenkin ruuhkatunnin aikana isoilla asemilla kuten Helsingin rautatiease- malla ja Pasilan juna-asemalla palvelutaso on niin hyvä ja yhdistetty vuoroväli hyvin alhainen jo ilman pysäkkien yhdistämistä. Etenkin raideliikenteessä yhdistä- misellä on tällaisessa tilanteessa vaikutusta enemmänkin linjojen keskinäisiin kuormitusosuuksiin kuin ko. korridorin kuormittumiseen.

Pysäkkien yhdistämisellä on mallissa sitä suurempi vaikutus, mitä suuremmat kertoimet odotusajalle on asetettu. Ruuhkatunnin liikennettä mallinnettaessa terminaalissa, jossa kulkee useita lyhyen vuorovälin linjoja, pysäkkien tai laiturien yhdistämisen vaikutus vähenee. Kuvattaessa samaa terminaalia ruuhkatunnin ulkopuolella voi kuvaustavalla olla suurikin vaikutus.



## **8 EMMEN VUOROVÄLIPOHJAISEN JOUKKOLIIKENNESIJOITTELUN KÄYTTÖSUOSITUKSIA**

### **8.1 Tarjonnan kuvaaminen**

#### **8.1.1 Järjestelmän kuvaus Emmessä**

Joukkoliikennejärjestelmän yksityiskohtainen koodaaminen Emmeen vaatii käytettävän sijoittelulogiikan ja mallinnettavan joukkoliikennejärjestelmän tuntemista. Kuvaustavan on oltava selkeä ja kaikkien, jotka osallistuvat perusverkon ja linjaston koodaukseen on tunnettava se. Joukkoliikennelinjat kannattaa Emmessä kuvata suunnittain, sillä vaikka linjan molemmat suunnat voidaankin kuvata samassa linjakuvauksessa, ei tällöin voida asettaa eri vuorovälejä vastakkaisille suunnille. Ruuhkatunteina on suunnilla usein eri vuorovälit.

Mallin toiminnan kannalta on tärkeää, että liikennejärjestelmän kuvausperiaatteet ovat koko verkolla samat. Näin samat sijoitteluparametrit sopivat sijoittelun ohjaamiseen koko verkolla.

Käytettäessä henkilöauto- ja joukkoliikenteen sijoitteluissa samaa pohjaverkkoa, voidaan joukkoliikenteen nopeudet approksimoida henkilöautoliikenteen nopeuksista siltä osin kuin kulkutavat käyttävät samoja kaistoja. Muilta osin kuvaus on päivitettävä säännöllisesti, koska nopeudet vaikuttavat ajoneuvossaoloaikoihin.

#### **8.1.2 Pysäkkien yhdistäminen**

Perusverkkoa ja linjastoa koodattaessa on syytä ottaa huomioon matkustajakäytännön kuvauksen detaljitaso ja Emmen käyttämä sijoittelulogiikka. Jos aluejako on karkea, on syytä pohtia, miten tarkkaan tarjonta kannattaa kuvata.

Erilliset joukkoliikennejärjestelmät kuten raskas raideliikenne on syytä pitää erillään muista järjestelmän osista, mutta esimerkiksi saman kadun raitiovaunu- ja bussipysäkki, joita havainnoidaan yhtä aikaa, voidaan yhdistää. Pysäkkien yhdistämisessä kuvauksessa on tärkeää tuntea järjestelmän käyttö ja pohtia vaihtoehtojen havainnoitavuutta.

Terminaalien pysäkit kannattaa usein yhdistää yhdeksi pysäkiksi. Näin terminaalin pysäkit eivät kilpaile keskenään, vaan pikemminkin yhdessä muita pysäkkejä vastaan. Kun kyseessä on toiminnallisesti erilaisia joukkoliikennemuotoja, kuten paikallisliikennettä ja pitkän matkan liikennettä, joiden käyttö on erilaista ja jotka

eivät houkuttele samoja matkustajia, voidaan toiminnaltaan erilaiset pysäkit kuvata omana kokonaisuutenaan. Samoin on syytä harkita pysäkkien tai ainakin pysäkkiryhmien kuvaamista erillään, jos kävelymatkat ovat terminaalissa pitkiä ja arvioidaan, että pysäkit eivät kilpaile samoista matkustajista.

Pysäkkien yhdistämisen vaikutus linjojen kuormitustuloksiin on sitä suurempi, mitä enemmän odotusaikaa painotetaan sijoittelussa odotusajan kertoimella ja odotusajan painokertoimella. Jos koodattavaa verkkoa käytetään vain ruuhkatunnin liikenteen sijoittelussa, jossa odotusajat laitureilla ja pysäkeillä ovat lyhyitä, ei pysäkkien yhdistämiselle terminaalissa aina ole tarvetta. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon, ettei kuvaus välttämättä ole käyttökelpoinen hiljaisen ajan liikenteen mallintamiseen.

Pysäkkien yhdistämisellä on mallissa vaikutusta myös vaihdosta aiheutuvaan vastukseen. Jos samalla pysäkillä saadaan nousta ja poistua ajoneuvoista, jää vaihtokävely pois. Vaihtokävely voidaan ottaa huomioon kuvauksessa koodaamalla nousu- ja poistuspysäkki erikseen siten, että ajoneuvosta poistuminen ja ajoneuvon nouseminen tapahtuu eri pysäkeillä ja pysäkkien välillä on kävelylinkki. Tällöin kuitenkin sama vaihtokävely vaikuttaa kaikissa vaihdoissa yhdistetyllä pysäkillä, vaikka nämä vaihdot eivät välttämättä todellisuudessa kävelyä sisältäisikään (vaihdon tapahtuessa samalla fyysisellä pysäkillä). Voidaankin todeta, että kannattaa yhdistää vain pysäkkejä, joiden välinen kävelymatka on todellisuudessa lyhyt.

Mallin toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että koko verkolla käytetään samoja koodausperiaatteita myös pysäkkien yhdistämisessä. Tällöin voidaan valita sopivat sijoitteluparametrit, jotka kuvaavat matkustuskäyttäytymistä verkolla ja pätevät kaikissa verkon osissa.

### 8.1.3 Syöttö- ja kävelylinkkien koodaaminen

Syöttölinkkien kulkemiseen kuluvan ajan tulisi kuvata pysäkillä tai asemalla siirtymisessä kuluvaa keskimääräistä aikaa. Alueella, jonka tuottamia matkoja sentroidin matkatuotos kuvaa, sentroidista tulisi olla syöttölinkit kaikkien pysäkkien lähelle tai suoraan pysäkeille. Jos sentroidista on syöttölinkki vain lähimmille kaduille, suositaan kuvauksessa tiettyjä pysäkkejä, jotka ovat lähellä paikkaa, johon sentroidi on asetettu, vaikka sentroidi kuvaisikin suurempaa aluetta. Syöttölinkkien tulisi ulottua pääasiassa vain alueelle, jota sentroidi kuvaa.

Kävelylinkkien koodaaminen on ongelmallista siinä suhteessa, että vaihtomahdollisuudet on saatava kuvattua, mutta matkoja, joilla ainoa käytetty kulkutapa on kävely, ei saisi syntyä. Vaihtopaikkojen kuvaamiseen on liikennejärjestelmäkuvauksessa kiinnitettävä erityisesti huomiota ja paikoissa, joissa vaihtaminen on helppoa, tämän tulee näkyä myös kuvauksessa. Kävelyn suosioon kulkutapana voidaan vaikuttaa kävelyajan painokertoimella.

Hankaluutena syöttö- ja kävelylinkkien esityksessä on se, että verkosta voi syntyä vaikeaselkoinen yhdistelmä ”hämähäkinverkkoja” ja linjat ja niiden yhteydet toisiinsa on tunnettava hyvin, jotta välttyään virheiltä eikä unohdeta kokonaan jonkin suunnan linjoja.

#### 8.1.4 Vaihtoehtoisten koodaustapojen vaikutus tulostietojen esittämiseen

Joukkoliikennelinjojen pysäkkien yhdistäminen hankaloittaa tiettyjen tietojen tulostamista Emmessä. Kun pysäkkejä yhdistetään, ei tietyn pysäkin nousuja saada enää selville tulostamalla solmukohtaiset nousut. Prioriteettina mallintamisessa tulisi kuitenkin aina olla mallin toiminta. Nousijamäärät voidaan tulostaa segmentteittäin solmujen sijaan ja näiden tietojen avulla voidaan koota pysäkkikohtaiset nousijamäärät. Yksityiskohtaisten tietojen käyttäminen Emmestä on kyseenalaista, sillä on muistettava mallin tarkkuustaso ja lähtötietojen epävarmuus etenkin tulevaisuuden ennusteissa.

## 8.2 Pohdintaa sijoitteluparametrien käytöstä

### 8.2.1 Yleistä sijoitteluparametrien käytöstä

Sijoitteluparametreja tulisi käyttää sijoittelun ohjauksessa maltillisesti. Käytettäessä korkeita kävelyn ja odotusajan painoja sekä nousuaikoja jää itse ajoneuvossaoloaika, jonka paino on aina 1, vähemmälle huomiolle.

Joukkoliikenteen eri kulkutapojen erilaisuus on tapana esittää Emmessä nousuajoissa. Tällöin kuitenkin lyhytkin matka tietyllä kulkutavalla voi saada suuren ”sakon”. Vaihtoehtoisesti eri linjoilla todelliseen ajoneuvossaoloaikaan nähden eri tavalla koettu matka-aika voidaan esittää kertoimena matka-aikafunktiossa. Painokerroin näkyy tällöin funktioiden palauttamissa arvoissa. Ongelmana tässä on se, että tällöin painottamattomien ajoneuvossaoloaikojen tulostaminen matriisina käy Emmessä mahdottomaksi, sillä erilaisten painokerrointen vaikutuksia ajoneuvossaoloaikaan ei voida enää poistaa matriisista ja matriisi kuvaa painotettua, ei todellista, ajoneuvossaoloaika.

Odotusajan kerrointen ja nousuaikojen ei tulisi olla niin korkeita, että joidenkin alueparien matkat alkavat käyttää pelkkää kävelykulkutapaa, sillä yleensä Emmeen tuotavassa matkamatriisissa on mukana vain joukkoliikenteen kysyntä, joka tulisi sijoittelussa ohjata käyttämään joukkoliikenteen kulkutapoja.

Vaikka vuorovälipohjainen joukkoliikenteen sijoittelulogiikka ja linjanvalinta on esitetty yksilökohtaisesti, on kyseessä makrotason sijoittelumalli, jossa ei simuloida yksittäisen yksilön toimintaa vaan enemmänkin matkustajavirtoja. Vaikka malli kuvaa tiettyä aikaväliä, matkoilla ei laskennan yhteydessä ole aikaulottuvuutta.

## 8.2.2 Odotusaikaan vaikuttavat tekijät

Odotusajan kertoimella kuvataan vuorovälin ja odotusajan odotusarvon suhdetta. Kun odotusajan kerroin on 0,5, oletetaan vuorovälien olevan niin lyhyitä, ettei matkustajilla ole tarvetta aikataulujen tarkistamiseen, vaan he saapuvat bussipysäkille satunnaisesti, jolloin keskimääräinen odotusaika on puolet vuorovälistä. Pienempää odotusajan kerrointa on käytetty kuvastamaan tilannetta, jossa matkustajilla on tietoa pysäkkikohtaisista aikatauluista. Kun odotusajan kerroin on pieni, saa painotettu odotusaika pienempiä arvoja matkan ensimmäisellä pysäkillä, mutta sen lisäksi myös vaihdoissa. Odotusajan kertoimen avulla on hankalaa kuvastaa tilannetta, jossa matkustajat hakeutuisivat sille pysäkille, jota seuraavaksi palvelaan. Käyttämällä pientä odotusajan kerrointa ajaudutaan kuvaamaan tilannetta, jossa odotuksella ei ole ihmisille merkitystä, sillä silloin matkustajat käyttävät nousuajaltaan ja ajoajaltaan edullisimpia reittejä. Tämä taas ei kuvaa sellaista tilannetta, jossa ihmiset tuntisivat aikataulun ja odotusajat olisivat siksi lyhempiä vaan pikemminkin tilannetta, jossa ihmiset eivät välitä odotusajasta tai vaihdot ovat järjestettyjä vaihtoja.

Painotettuun odotusaikaan vaikuttavista tekijöistä on muistettava, että vaikka ne selittävätkin eri asioita, vain niiden yhdistelmällä on merkitystä sijoittelussa. Esimerkiksi se, että annetaan järjestelmätasolla odotusajan kertoimelle arvo 0,5 ja odotusajan painokerroimelle arvo 2, tuottaa samoja sijoittelutuloksia kuin jos odotusajan kerroin olisi 0,25 ja odotusajan painokerroin olisi 4. Molemmissa tapauksissa saadaan sama sijoittelutulos ja painotettu matka-aika aluepareilla. Painottamaton matka-aika on kuitenkin tapauksissa eri, sillä odotusajan painokerroin ei näy painottamattomassa matka-ajassa.

Jos käytetään pientä odotusajan kerrointa ja odotusajan painokerrointa, kuvastuu tilanne, jossa matkustajat ovat valmiita odottamaan kulkuneuvoa hyvinkin kauan pysäkillä tai vaihtoehtoisesti kotona. Emme ei kuitenkaan ota huomioon odotteluai-

kaa, jonka matkustaja viettää kotona tai työpaikalla odottaakseen hetkeä, jolloin hän lähtee pysäkille.

### 8.2.3 Nousuaika ja nousuajan painokerroin

Korkeaa nousuajan arvoa on käytetty pitkillä linjoilla, joissa saapumisajat pysäkeillä ovat epäsäännöllisiä. Nousuajalla voidaan kuvata sellaista matkustuskäyttäytymistä ja kulkutapojen suosimista, mitä ei pystytä muilla keinoin esittämään Emmessä, esimerkiksi raitiovaunuliikenteen suosiota matkustuskäyttäytymisestä. Asettamalla tietyn kulkutavan tai tietentyypisten linjojen nousuaika korkeaksi voidaan ohjata kysyntää muille kulkutavoille tai muuntyyppisille linjoille.

Kulkutapojen liikennejärjestelmät ovat kuitenkin toisiinsa nähden erilaisia ja esimerkiksi raideliikenteen käyttöön liittyy usein liityntäkulkutapoja. Kun vaihtojen aiheuttama vastus on suuri, voivat vaihtoehdot, jotka sisältävät useita vaihtoja, jäädä valitsematta optimaaliseen strategiaan, jos nousuajalla on suuri merkitys painotetussa matka-ajassa.

Vaihtoehtoinen tapa esittää pitkien linjojen epäsäännöllisyys on käyttää tehollisena vuorovälinä todellisen vuorovälin sijaan linjamuuttujaan tai –segmenttiin talletettua koettua vuoroväliä. Käyttämällä epäsäännöllisillä linjoilla todellista vuoroväliä pidempää koettua vuoroväliä päästään mallissa tilanteeseen, jossa tietty linja ei jää kokonaan valitsematta optimaaliseen strategiaan, mutta jossa linjaan nousee harvemmin ja linja saa vähemmän matkoja epäsäännöllisyyteensä takia.

Odotusaika on riippuvainen palvelun frekvenssistä ja sen luotettavuudesta. On osoitettu, että odotusaika  $t_w$  bussipysäkillä on riippuvainen vuorovälistä  $h$  ja vuorovälin keskihajonnasta  $\mu$  seuraavasti:

$$t_w = \frac{(h^2 + \mu^2)}{2h} . \text{ (mm. Ortúzar ja Willumsen 1990.)} \quad (16)$$

Olisikin kiinnostavaa testata linjan epäsäännöllisyyden kuvaamista Emmessä tallettamalla koettu vuoroväli segmenttimuuttujaan niin, että odotusaika muodostuisi kaavalla 16. Tämä vaatisi tiedon kunkin linjan epäsäännöllisyydestä pysäkkikohtaisesti.

Joidenkin matkustuskäyttäytymiseen vaikuttavien tekijöiden kuvaaminen Emmessä on hankalaa tai mahdotonta. Esimerkiksi pääkaupunkiseudulla kuntarajat vaikuttavat reitinvalintaan, sillä kuntarajan ylitys vaikuttaa joukkoliikenteen joukkoliikennelipun hintaan. Tällaista tekijää ei kuitenkaan voida kuvata nousuajalla, sillä kyseessä

on alueparikohtainen vastus tiettyjen linjojen valinnassa. Nousuajalla voidaan vaikuttaa matkoihin vain järjestelmä-, linkki- tai solmukohtaisesti, mutta ei alueparikohtaisesti.

### **8.3 Sijoittelulla tuotettujen tietojen hyödyntäminen**

#### 8.3.1 Yleistä

Joukkoliikennesijoittelulla tuotettujen tietojen hyödyntäminen vaatii aina tulkintaa ja tuloksiin on suhtauduttava varauksella. Toisaalta ennakko-oletukset eivät saa olla liian vahvoja, eivätkä ne saa suoraan vaikuttaa sijoittelun ohjaamiseen. Kuvaustaso ja mallissa tehdyt oletukset vaikuttavat siihen, minkä tasoihin suunnitelmiin mallin tuottamien tulosten avulla voidaan ottaa kantaa.

Kokenut käyttäjä pystyy analysoimaan Emmessä tuotettuja tietoja ja tunnistaa myös virheet tai puutteet järjestelmän kuvauksessa.

#### 8.3.2 Sijoittelutulosten hyödyntäminen joukkoliikenteen suunnittelussa

Vuorovälipohjainen sijoittelu on luonteeltaan staattinen ja sopii pitkän aikavälin ennusteisiin. Emme on sopiva työkalu järjestelmätason tarkasteluihin. Yksittäisen linjan tarkasteluun malli ei sovi, sillä yksittäisen linjan sijoittelutulosten virhemarginaalit ovat niin suuret, ettei linjan kuormituksesta saada tarpeeksi luotettavaa tietoa sijoittelulla.

Liikenteen mallinnuksella voidaan tukea joukkoliikenteen suunnittelua. Mallinnuksella voidaan kuitenkin vaikuttaa suunnitteluun ja suunnitelmien toteutukseen vain, jos malliin luotetaan ja mallin tuottamia tuloksia todella hyödynnetään suunnittelussa ja päätöksenteossa.

Emmeä voidaan käyttää suunnittelua palvelevassa arvioinnissa suunnitteluvaihtoehtojen keskinäisessä vertailussa ja rahoitus- ja hankepäätöstä palvelevassa arvioinnissa. Sijoittelussa tehtyjen oletusten tarkka dokumentointi on välttämätöntä arvioinnin läpinäkyvyyden ja päivitettävyyden varmistamiseksi.

Joukkoliikenteen eri kulkutapojen keskinäisen kuormituksen ohjaaminen on Emmen tarjoamin keinoin hankalaa. Käytännössä eri kulkutapojen hahmotettavuutta, säännöllisyyttä tai muuta valintaan vaikuttavaa tekijää voidaan kuvata asettamalla kulkutavoille eri nousuaikoja tai käyttämällä sijoittelussa koettua vuoroväliä todellisen vuorovälin sijaan. Esimerkiksi raitiolinjoiden suosiminen matkustuskäyt-

täytymisessä voidaan kuvata mallissa koodaamalla raitoliikenteen pysäkit linja-autoliikenteen pysäkkien yhteyteen ja kuvaamalla pitkien linja-autolinjojen epä-säännöllisyyttä koetulla vuorovälillä.

Valintaa eri joukkoliikennekulkutapojen välillä on yritetty kuvata myös liikenne-ennustejärjestelmässä logittimallilla. Valinnan mallintaminen on hankalaa jo pelkästään määrittelyongelman takia. Joukkoliikennematkoilla käytetään usein useita kulkutapoja, esimerkiksi matkoilla, joilla käytetään raideliikennekulkutapaa, käytetään usein myös linja-autoa liityntäkulkutapana. Toinen ongelma valinnan mallintamisessa logittimallilla on ollut se, ettei joukkoliikenteen eri kulkutapojen ominaisuuksia ole mallissa kyetty erottamaan toisistaan tarpeeksi hyvin. Valintaa eri joukkoliikennekulkutapojen välillä on hankalaa mallintaa. Emmessä kulkutavanvalinnan mallintamisen onnistumista voidaan parantaa liikennejärjestelmän kuvauksella ja sijoitteluparametrien avulla. Liikennemalleissa kuvausta voidaan parantaa kehittämällä uusia joukkoliikenteen ominaisuuksia paremmin kuvaavia muuttujia.

Vaikka Emme sopii parhaiten strategisen tason joukkoliikennehankkeiden arviointiin, on hanke kuvattava Emmessä melko yksityiskohtaisesti. Tulevaisuuden verkkojen kuvaukset on tehtävä samalla tarkkuustasolla kuin nykyhetken liikennejärjestelmäkuvaus, jotta samat sijoitteluparametrit vastaisivat samanlaista matkustuskäyttäytymistä sekä nykyverkon että tulevaisuuden verkon sijoitteluissa.

Tulevaisuuden järjestelmäkuvauksessa on hankalaa kuvata matkustuskäyttäytymistä sellaista joukkoliikennekulkutapojen kohdalla, jotka eroavat tällä hetkellä käytössä olevista. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun Jokeri-linjan kuormitus on Emmessä saatu parhaiten vastaamaan todellisia kuormitusmääriä, kun on käytetty samaa linjakohtaista nousuaikaa kuin raskaan raideliikenteen kulkutavoilla. Kysymykseksi jääkin, miten linja-auto-Jokerin korvaaminen raide-Jokerilla muuttaa matkustuskäyttäytymistä ja miten raide-Jokeri tulisi kuvata Emmessä liikenne-ennusteita tehdessä.

### 8.3.3 Sijoittelutulosten hyödyntäminen kysyntäennusteissa

Kysyntäennusteissa voidaan käyttää matkan vastuksena painottamatonta matka-aikaa, painottamattomia matka-aikakomponentteja erikseen tai painotettua matka-aikaa. Painotettu matka-aika saadaan Emmestä valmiina matriisina, painottamaton matka-aika voidaan laskea tulostamalla Emmestä erilliset matka-aikakomponenttimatriisit ja laskemalla ne yhteen. Emme-sijoittelussa kokonaismatka-aikaan lasketaan myös nousuaika, mutta mallityössä kokonaismatka-aika koostuu yleensä kävelyajasta, odotusajasta ja ajoneuvossaoloajasta.

Käytettäessä matkavastuksena Emmellä tuotettua painotettua matka-aikaa, on otettava huomioon, että painotetussa matka-ajassa on mukana myös matkustajien kokemana nousuvastus. Painotetussa matka-ajassa ei enää ole kyse ajasta, vaan matkustajien kokemasta vaivasta. Tällöin ei matka-aikoja vertailtaessa enää voida puhua aikasäästöistä. Nousuaikoja käytettäessä vaihtojen määrät korostuvat ominaisuustiedoissa, sillä mukaan saadaan jokaisesta ajoneuvoon noususta oma nousuvastuksensa. Tämä korostuu erityisesti raidematkoissa, joihin liittyy yleensä liityntämatkoja ja sitä kautta enemmän nousuja.

Linjojen kuormittuminen Emmessä vaikuttaa kysyntäennusteisiin tuotavaan ominaisuusmatriisiin, sillä matka-aika on painotettu eri reittejä kulkeneiden matkustajaosuuksien mukaan. Pysäkkien yhdistämisen vaikutus voi näkyä ominaisuustietomatriisissa siten, että matkavastus laskee aluepareilla, joiden välillä on paljon joukkoliikennepalveluita.

#### 8.3.4 Suunnittelijan ja Emme-käyttäjän vuorovaikutus

Joukkoliikenteen suunnittelu ja suunnitelmien analysointi Emmellä on useimmiten koordinoitu eri henkilölle. Vuorovaikutus joukkoliikenteen suunnittelijan ja mallintajan välillä on hyvin tärkeää. Kun vuorovaikutus toimii, voidaan suunnitelmia analysoida jo suunnitelmavaiheessa, ei pelkästään suunnitelmien toteutettavuuden lopullisessa arvioinnissa.

Joukkoliikenteen suunnittelijan on hyvä tietää sijoitteluohjelmiston mahdollisuudet ja rajallisuudet vaihtoehtojen analysoinnissa. Näin linjaston analysointityökaluja saadaan hyödynnettyä suunnittelussa mahdollisimman hyvin. Lopullinen vastuu ohjelmiston kysyntä- ja tarjontamallien rajallisuuden tunnistamisesta ja tuotettujen tietojen analysoinnissa on mallintajalla.

#### 8.3.5 Emme-verkkojen ylläpito

Emmellä tehtävissä tarkasteluissa on edellytettävä, että käytetään yhdessä sovittuja sijoitteluparametreja. Näin varmistetaan mallin läpinäkyvyys. Liikenne-ennusteille olisi tärkeää tehdä myös jälkiarviointia ja todentaa toteutuneita muutoksia vertaamalla toteutunutta kehitystä liikenne-ennusteeseen. Näin voitaisiin tuottaa tietoa uusia ennusteita ja päätöksentekoa varten.

Helsingin seudulla uuden kuvauksen ylläpito tulisi koordinoida tietylle taholle, joka hyväksyisi verkkoon tehtävät muutokset. Ylläpito olisi tärkeää siksi, että eri



tarkasteluista saadut tulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Tulevaisuuden hankkeet voidaan pitää joko erillisinä skenaarioina tai makroina niin, että ne voi tarvittaessa lisätä ja poistaa tarkasteluista.

#### **8.4 Muiden sijoittelutapojen vaikutus koodaustapojen valintaan**

INRO kehittää parhaillaan Emmeen uutta logittimalliin perustuvaa sijoittelutapaa. Tarkkaa kuvausta sijoitteluperiaatteista ei ole vielä julkaistu, mutta sijoittelutapa mahdollistaa useamman kuin yhden alkupysäkin valinnan tietyn alueparin välisillä matkoilla (Florian 2010). Tässä työssä on pohdittu kuvaustapoja vuorovälipohjaisen joukkoliikennesijoittelun näkökulmasta. Uusi sijoittelulogiikka voi aiheuttaa erilaisia vaatimuksia linjastonkoodaukselle etenkin verkon ja linjaston tarkkuustasossa. Jos sijoittelu jakaa matkat alkamaan eri pysäkeiltä koetun hyödyn perusteella, ei pysäkkien yhdistämistä välttämättä tarvita etenkin katuverkolla.

Aikataulupohjaisessa sijoittelussa kukin matkustaja hakeutuu sille pysäkille, mikä kulloinkin minimoi painotettua matka-aikaa. Tässä tapauksessa pysäkkien yhdistämisellä ei voi nähdä samanlaista tarvetta kuin vuorovälipohjaisessa sijoittelussa. Kysynnän ja tarjonnan tarkkuustasot on silti otettava huomioon, sillä sentroidista tulevilla matkoilla on aina sama lähin pysäkki, vaikka sentroidin kuvaamalla alueella osalle matkustajista muut pysäkit voisivat olla lähempänä.

## 9 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

### 9.1 Yhteenveto

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää linjojen kuvaustapojen vaikutusta linjojen kuormitukseen Emme-ohjelmiston vuorovälipohjaisessa joukkoliikennesijoittelussa. Kuormitustiedot ovat tärkeitä erityisesti joukkoliikenteen suunnittelun tarpeissa, kun tutkitaan vaihtoehtoisten linjastojen vaikutusta alueiden välisiin matkoihin. Työn taustalla ovat ongelmat eri joukkoliikennekulkutapojen kuormittumisessa pääkaupunkiseudun Emme-malleissa.

Kysynnän ennustaminen liikenne-ennustetta varten toteutetaan tavallisesti matkaperusteisesti. Nelivaiheinen ennusteprosessi on selkeytensä vuoksi yleisesti käytössä kysyntää arvioitaessa. Prosessi sisältää yleensä neljä peräkkäistä vaihetta: matkatuotosten määrittäminen, matkojen suuntautuminen, kulkutavanvalinta ja liikenteen sijoittelu eri reiteille. Prosessi on iteratiivinen ja siinä on takaisinkytkentöjä. Liikenteen sijoittelulla tuotetut liikennejärjestelmän ominaisuustiedot vaikuttavat matkojen suuntautumiseen ja kulkutavanvalintaan.

Joukkoliikenteen linjanvalinnan mallintamiseksi on kehitetty useita erilaisia sijoittelualgoritmeja ja -malleja ja niitä soveltavia ohjelmistoja. Suomessa laajasti käytössä oleva Emme-ohjelmisto tarjoaa kaksi erilaista joukkoliikennesijoittelualgoritmia: staattisen vuorovälipohjaisen ja dynaamisen aikataulupohjaisen sijoittelutavan. Tässä työssä keskityttiin vuorovälipohjaiseen sijoittelutapaan, joka on kehitetty erityisesti kaupunkien joukkoliikenteen mallintamiseen.

Vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelu perustuu Emmessä optimaalisen strategian periaatteeseen. Matka-ajan eri osille voidaan asettaa painoarvoja. Joukkoliikennesijoittelussa matkustaja minimoi painotettua kokonaismatka-aikaansa, joka koostuu kävely-, odotus-, nousu- ja ajoneuvossaoloajasta. Joukkoliikennetarjonnan ja koettujen painoarvojen perusteella luodaan optimaalinen strategia kullekin alueparille. Matkustaja ei ota riskejä, vaan valitsee painotetun matka-ajan odotusarvon perusteella pysäkin, jolle siirtyy odottamaan kulkuneuvoa. Pysäkillä todennäköisyys nousta tietyn houkuttelevan linjan ajoneuvoon perustuu optimaaliseen strategiaan valittujen houkuttelevien linjojen vuorotiheyksiin tarkasteluajanjaksolla.

Liikenteen sijoittelutuloksiin voidaan kysyntämatriisin lisäksi vaikuttaa linjastonkuvauksen ja sijoitteluparametrien keinoin. Tässä työssä keskityttiin tutkimaan linjastonkuvauksen keinoja, mutta samalla pohdittiin sijoitteluparametrien vaikutusta sijoittelutuloksiin.

Painotettuun kävelyaikaan vaikuttaa kävelymatkan pituus, asetettu kävelynopeus ja kävelyajan painokerroin. Painotettuun odotusaikaan vaikuttavat tehollinen vuoroväli, odotusajan kerroin ja odotusajan painokerroin. Ajoneuvossaoloaikaan vaikuteetaan matka-aikafunktiolla tai vaihtoehtoisesti asettamalla kullekin linjalle nopeus. Nousuajoilla ja nousuajan painokertoimella voidaan kuvata ajoneuvoon noususta koettua hankaluutta.

Emmen vuorovälipohjainen joukkoliikennesijoittelu on monireittisijoittelu, jossa tietyn alueparin matkat voivat jakautua eri reiteille vain pysäkeillä. Tämän takia työssä kiinnitettiin erityisesti huomiota pysäkkien kuvaamiseen Emmessä. Pysäkkien yhdistäminen vähentää odotusaikoja, sillä yksittäisen linjan vuoroväliin sijaan odotusaikaan vaikuttaa linjojen yhdistetty vuoroväli. Samalla yhdistäminen lisää kunkin alueparin optimaaliseen strategiaan valittavien houkuttelevien linjojen määrää. Yhdistämällä pysäkit voidaan kuvata tilannetta, jossa vierekkäisiä pysäkkejä havainnoidaan yhtä aikaa ja toisaalta tilannetta, jossa aikataulu on tiedossa ja pysäkki valitaan sen mukaan, kummalle seuraavaksi saapuu ajoneuvo.

Pysäkkien kuvausta testattiin Hakaniemi–Pasila-korridorissa. Korridorissa liikennöivistä joukkoliikennelinjoista tehtiin erilaisia kuvauksia yhdistämällä niiden pysäkkejä liikennejärjestelmän kuvauksessa Emmessä. Sijoittelutuloksia verrattiin joukkoliikennelinjojen todellisiin nousijamääriin. Pasilan ja Hakaniemen tarkasteluissa parhaat tulokset saatiin kuvaustavoilla, joissa lähellä toisiaan sijaitsevat bussi- ja raitiovaunupysäkit yhdistettiin.

Terminaalien kuvausta testattiin tekemällä vaihtoehtoinen kuvaus Helsingin rautatieasemasta ja Pasilan juna-asemasta. Tarkastelussa pysäkkien yhdistetyn vuorovälin alenemisella ei havaittu olevan suurta merkitystä raidekulkutavan valintaan tarkastelluilla asemilla. Tämä johtuu siitä, että ruuhkatunnilla palvelutaso on vilkasliikenteisillä asemilla hyvä ja tiheimmin liikennöityjen linjojen vuoroväli niin lyhyt, ettei yhdistetty vuoroväli enää juuri alenna odotusaikaa. Sen sijaan linjalta toiselle vaihtaminen helpottui vaihtoehtoisessa kuvauksessa, jossa Pasilan asema oli kuvattu yhtenä asemana. Tämä johtui siitä, että pysäkkien yhdistyessä pysäkkien välinen kävelymatka poistui kuvauksesta.

## **9.2 Päätelmät**

Joukkoliikennesijoittelu on Emmessä monimutkainen kokonaisuus, jota ohjataan liikennejärjestelmäkuvauksen ja sijoitteluparametrien keinoin.

Tarjonnan mallintaminen Emmeen vaatii tarjonnan mallintajalta sekä Emmen sijoittelulogiikan että kuvattavan liikennejärjestelmän tuntemista. Tarjonnan kuvaamisessa Emmeen ei pidä pelkästään pyrkiä kuvaamaan fyysinen järjestelmä mahdollisimman tarkasti, vaan on otettava huomioon kysynnän kuvauksen tarkkuustaso ja samalla sijoittelulogiikka. Kysynnän mallintamisessa käytettävä aluejako vaikuttaa siihen, kuinka tarkasti joukkoliikennejärjestelmä kannattaa kuvata mallissa.

Joukkoliikennematkan aikana eteen tulevat valintatilanteet linjojen välillä tulisi kuvata ensisijaisesti solmuissa. Kaksi vierekkäistä pysäkkiä kannattaa kuvata Emmessä yhtenä pysäkinä, jolloin niillä pysähtyvät linjat voivat päästä samaan optimaaliseen strategiaan ja kilpailevat yhdessä muita vaihtoehtoja vastaan, kun matkustaja valitsee, mille pysäkille siirtyä odottamaan ajoneuvoa.

Pysäkkien yhdistämistä kannattaa käyttää ohjauksen keinona erityisesti niillä linjoilla, joiden kuormituksia ei muuten saada vastaamaan todellisia kuormitusmääriä. Pysäkkien yhdistäminen hankaloittaa vaihdoista aiheutuvan kävelyn kuvaamista, joten yhdistettävien pysäkkien tulisi olla sellaisia, joiden välillä vaihtaminen on sujuvaa. Eri kulkutapojen pysäkkejä ei pitäisi esittää kuvauksessa erikseen, jos niitä on mahdollista havainnoida yhtä aikaa ja on mahdollista dynaamisesti siirtyä sille pysäkille, jota seuraavaksi palvellaan.

Terminaali, jossa tehdään valintoja linjojen välillä, tulisi periaatteessa esittää yksittäisenä pysäkinä. Kuvattaessa vilkasliikenteistä terminaalia ruuhka-aikaan ei tälle aina ole tarvetta, sillä vuorovälit pysäkeillä tai laitureilla voivat olla niin lyhyitä, ettei niiden yhdistetty vuoroväli enää paljonkaan laske odotusaikaa. Valittu koodaustapa vaikuttaa kuitenkin mallin käyttökelpoisuuteen hiljaisemman ajan liikennettä kuvattaessa.

Sijoittelun ohjaamiseen samaan suuntaan on olemassa vaihtoehtoisia tapoja. Pysäkkien yhdistämisellä voidaan päästä samansuuntaisiin tuloksiin kuin asettamalla tietyille kulkutavoille korkeita nousuaikoja. Sillä, millä matka-aikakomponentilla esimerkiksi linjan epäsäännöllisyyttä kuvataan, on suuri vaikutus sijoittelutuloksiin. Käyttämällä tietyillä linjoilla korkeaa nousuaikaa nämä linjat voivat jäädä valitsematta optimaaliseen strategiaan, vaikka ne pysähtyisivät samalla pysäkillä, jolla optimaaliseen strategiaan valittuja linjoja pysähtyy ja veisivät samaan paikkaan. Jos käytetään nousuajan sijasta koettua vuoroväliä kuvaamaan epäsäännöllisyydestä aiheutuvaa vastusta, voidaan epäsäännöllisyyden vaikutus linjan kuormitukseen saada kuvattua, mutta kuitenkin niin, että linja ei jää kokonaan valitsematta, jos se pysähtyy samalla pysäkillä muiden linjojen kanssa.

Emme soveltuu parhaiten pitkän aikavälin strategisten hankkeiden arviointiin. Yksittäisen linjan arviointiin Emme ei sovellu, sillä virhemarginaalit sijoittelutuloksissa ovat niin suuret, ettei yksittäisistä linjoista saada tarpeeksi luotettavaa tietoa.

### **9.3 Jatkotutkimuskohteet**

Markkinoilla on Emmen lisäksi muita joukkoliikenteen sijoitteluohjelmia, joiden toiminta perustuu eri oletuksiin ja sijoittelualgoritmeihin. Jatkossa olisi kiinnostavaa tutkia, mitä keinoja kilpailevat ohjelmistot tarjoavat matkustuskäyttäytymisen kuvaamiseen ja miten hyvin matkustuskäyttäytymistä saadaan kuvattua näillä keinoilla. Toisaalta Emmen käyttöä joukkoliikennesijoittelussa tukee se, että se on Suomessa laajasti käytössä ja mallintajien tuntema työkalu. Sijoittelumallin toimintaperiaate on tunnettava perusteellisesti, jotta se voidaan ottaa käyttöön tarkasteluissa.

Jos linjojen kuvaustapaa muutetaan Emmessä, on sijoitteluparametrien arvot arvioitava uudelleen. Etenkin matka-aikakomponenttien painokerrointen tulisi vastata matkustuskäyttäytymistutkimuksissa havaittuja painokertoimia. Sijoitteluparametrien arvoille tulisi olla hyvät perustelut, jotka perustuisivat havaittuun matkustuskäyttäytymiseen.

Kulkuvälineiden ylikuormittumisen vaikutuksia linjaston kuormitukseen ei ole tutkittu pääkaupunkiseudulla. Helsingin seudulla on kuitenkin bussilinjoja, jotka huipputunnin aikana ovat niin kuormittuneita, ettei kaikilla pysäkeillä ole mahdollisuutta ottaa lisää matkustajia kyytiin. Ruuhkautumisen vaikutuksia vuoroväli pohjaisessa sijoittelussa kuvaamaan kehitetyt Emme-makrot voisivat parantaa kuvausta linjaston kuormittumisen osalta.

## LÄHDELUETTELO

- Ben-Akiva, M., Lerman, S. (1994). *Discrete Choice Analysis*. 6. painos. 373 s.
- Chriqui, C., Robillard P. (1975). *Common bus Lines*. Transportation Science, 9, s. 115-121.
- Ernvall T. (2004). *Liikennetekniikan opetusmoniste kurssille Yhd-71.111, Liikennetekniikan yleisopintojakso*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, Espoo. 418 s.
- Ernvall T., Luttinen, T. (2009). *Liikennetekniikan opetusmoniste kurssille Yhd-0.1110, Liikenne- ja tietekniikan perusteet.* Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, Espoo. 200 s.
- Florian, M. (2010). Michael Florianin haastattelu 23.2.2010.
- Helke, L. (2007). *Tampereen seudun joukkoliikenteen suunnittelu yhtenä kokonaisuutena*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 93 s.
- Hensher, D., Button, K. (2000). *Handbook of transport modelling*. Elsevier Science. 666 s.
- INRO (2009). *Emme Prompt Manual*. Inro Consultants Inc, Montreal.
- Jalasto, P. (2004). 7.5.8 *Suunnitelmatasot*. RIL 165-1 Liikenne ja väylät I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.
- Kallionpää, L. (2010). Sähköposti Leo Kallionpäältä (HSL) 27.4.2010.
- Kangas, L. (2007). *Paikkatiedon hyödyntäminen joukkoliikennelinjaston suunnittelussa*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 109 s.
- Karasmaa, N. (2005). 6.2 *Liikenne-ennusteet*. RIL 165-1 Liikenne ja väylät I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.
- Karasmaa, N., Kurri, J. (2008). *Opetusmoniste kurssille Yhd-71.3235, Liikennetutkimukset ja -ennusteet*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, Espoo. 94 s.
- Karhunen, K. (1993). *Joukkoliikennelinjan valintaan vaikuttavat tekijät*. Diplomi-

työ. Teknillinen korkeakoulu. 86 s.

Korhonen, A. (1998). *EMME/2-ohjelmiston joukkoliikenteen sijoittelualgoritmin rakenne ja ominaisuudet*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 161 s.

Lebel, M. (2010). Michel Lebelin sähköposti (INRO:n käyttötuki) 3.2.2010.

Liikenne- ja viestintäministeriö (2006). *Joukkoliikenteen palvelutasotekijöiden arvottaminen*. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 36/2006. 74 s.

Liikenne- ja viestintäministeriö (2007a). *Joukkoliikenteen palvelutasotavoitteet keskisuurilla kaupunkiseuduilla*. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 54/2007. 86 s.

Liikenne- ja viestintäministeriö (2007b). *Joukkoliikenteen vaikutusten arviointi*. Yleisohje. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 50/2007. 118 s.

Liikenneministeriö (1991). *Kaupunkien joukkoliikenteen palvelutaso*. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 16/1991.

Liu, Y., Bunker, J., Ferreira, L. (2009). *Modelling urban public transit users' route choice behaviour: review and outlook*. Rethinking sustainable development: Planning, Infrastructure Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure. Queensland University of Technology, Australia. 14 s.

Livshits, V. (1997). *Emme/2 Network Coding Standards: Development, Comparison, Customization to the task at hand*. 12th Annual International EMME/2 User's Group Conference. 22 s.

LVM, ks. Liikenne- ja viestintäministeriö.

Muotka, I. (2009). Irene Muotkan haastattelu 27.11.2009.

Nielsen, O. A. (2000). *A Stochastic Transit Assignment Model Considering Differences in Passengers Utility Functions*. Transportation Research, 34B, s. 377-402.

Nokela I., Lyly, S., Aho E. (1980). Liikennetekniikan sanasto. Helsingin teknillinen korkeakoulu, liikennetekniikka. Julkaisu 45. 298 s.

- Nguyen S., Pallottino S. (1988). *Equilibrium Traffic Assignment for Large Scale Networks*. European Journal Of Operational Research, 37, s. 176-186.
- Ojala, J., Pursula M. (1994). *Taajamien joukkoliikenteen suunnittelu ja hoito*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Opetusmoniste 13, Suomen Paikallisliikenneliitto ry, Otaniemi. 248 s.
- Ortúzar, J. D., Willumsen, L. G. (1990). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 375 s.
- Partanen, P. (2000). *Aikaan sidottu joukkoliikennesijoittelu*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 123 s.
- Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (1990). *Pääkaupunkiseudun liikennetutkimus 1998*. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 1990:15. Helsinki. 50 s.
- Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (2008). *Pääkaupunkiseudun ja sen työssäkäyntialueen Emme-kuvausten teko*. 25.6.2008 päivätty muistio. 25 s.
- Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (2009a). *Pääkaupunkiseudun ja sen työssäkäyntialueen liikennejärjestelmän uudet liikenteen viivytysfunktiot*. Helsinki. 34 s.
- Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (2009b). *Pääkaupunkiseudun työssäkäyntialueen liikennemallien kehittäminen: Joukkoliikenteen sijoitteluparametrit*. 26.3.2009 päivätty muistio. 5 s.
- Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (2003). *Pääkaupunkiseudun liikenneennustemallit 2000*. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2003:9. Helsinki. 196 s.
- Sihto, S. (2005). *7.4 Liikennejärjestelmäsuunnitelmat*. RIL 165-1 Liikenne ja väylät I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.
- Spiess, H., Florian M. (1989). *Optimal strategies: A new assignment model for transit networks*. Transportation Research B, Vol 23B, 1989, 20 s.
- Spiess, H. (1993). *Transit Equilibrium Assignment based on Optimal Strategies: An Implementation in EMME/2*. <http://emme2.spiess.ch/congras/congras.html> Viitattu 15.2.2010.



Varian, H. (1992). *Microeconomic analysis*. Norton & Company, Inc. 3. painos. 559 s.

Vatanen, M. (2010). Mervi Vatasen haastatteluita aikavälillä 1.10.2009-30.4.2010.

Vuchic, V. (2004). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. Wiley, Hoboken, New Jersey. 644 s.

Wardrop, J. (1952). *Some theoretical Aspects of Road Traffic Research*. Institution of Civil Engineers. Proceedings, 1, s. 325-362.

YTV, ks. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta.

## **LIITTEET**

### **LIITE 1. LISTA HAASTATTELUIHIN OSALLISTUNEISTA ASIAANTUNTIJOISTA**

Joukkoliikenteen suunnitteluun liittyvät haastattelut

Leo Kallionpää, HKL (nyk. HSL)

Irene Muotka, YTV (nyk. HSL)

Arto Siitonen, HKL (nyk. HSL)

Laura Sundell, YTV (nyk. HSL)

Joukkoliikenteen matkustajatutkimuksiin liittyvät haastattelut

Marko Vihervuori, HSL

Liikenteen mallintamiseen liittyvät haastattelut

Petri Blomqvist, Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto

Timo Elolähde, HSL

Kari Hillo, Strafica Oy

Markus Holm, Trafíx Oy

Lauri Kangas, Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto

Nina Karasmaa, HSL

Ville Lehmuskoski, HSL

Virpi Pastinen, WSP Finland Oy

Jyrki Rinta-Piirto, Strafica Oy

Tapani Särkkä, Matrex Oy

Mervi Vatanen, HSL

## LIITE 2. EMMEN VUOROVÄLIPOHJAISEN SIJOITTELUMALLIN MÄÄRITTELY (Spiess ja Florian 1989.)

Kullekin joukkoliikennematkanosalle määritellään vastus aikayksiköissä. Poikkeuksena on kulkuvälineen odotus, jonka vastus määritellään tietyn pysäkin tietyn linjan ensimmäisen ajoneuvon odotusaikojen tilastollisen jakauman avulla.

Asiaa voidaan yksinkertaistaa määrittelemällä aikakomponentit niin, että niihin kaikkiin liittyy vakioaika ja odotusaikojen jakauma. Matkakomponenttien kuvaamiseksi määritellään linkit  $a \in A$  ja solmut  $i \in I$  ja näistä koostuva verkko  $G=(I, A)$ .  $A_i^+$  on solmusta  $i \in I$  lähtevien linkkien joukko ja  $A_i^-$  on solmuun  $i \in I$  saapuvien linkkien joukko. Jokaista linkkiä  $a \in A$  kuvataan tekijöiden  $c_a$  ja  $G_a$  avulla:  $c_a$  on linkin matka-aika ja  $G_a$  on odotusajan jakaumafunktio ( $G_a(x) = P\{\text{odotusaika linkillä } a \leq x\}$ ).

Odotusaikojen jakaumafunktiot  $G_a\{x\}$  voidaan johtaa vuorovälien jakaumien ja matkustajien pysäkillä saapumisaikojen jakaumista. Olkoon  $h_a(x)$  vuorovälijakauman tiheysfunktio.  $H_a(x)$  on vastaava kertymäfunktio

$$H_a(x) = \int_0^x h_a(t) dt. \quad (1)$$

Jos oletetaan, että matkustajat saapuvat joukkoliikennepysäkillä tasaisesti, on odotusajan jakauma linkillä  $a$

$$g_a(x) = (1 - H_a(x)) / \int_0^\infty (1 - H_a(t)) dt, \quad (2)$$

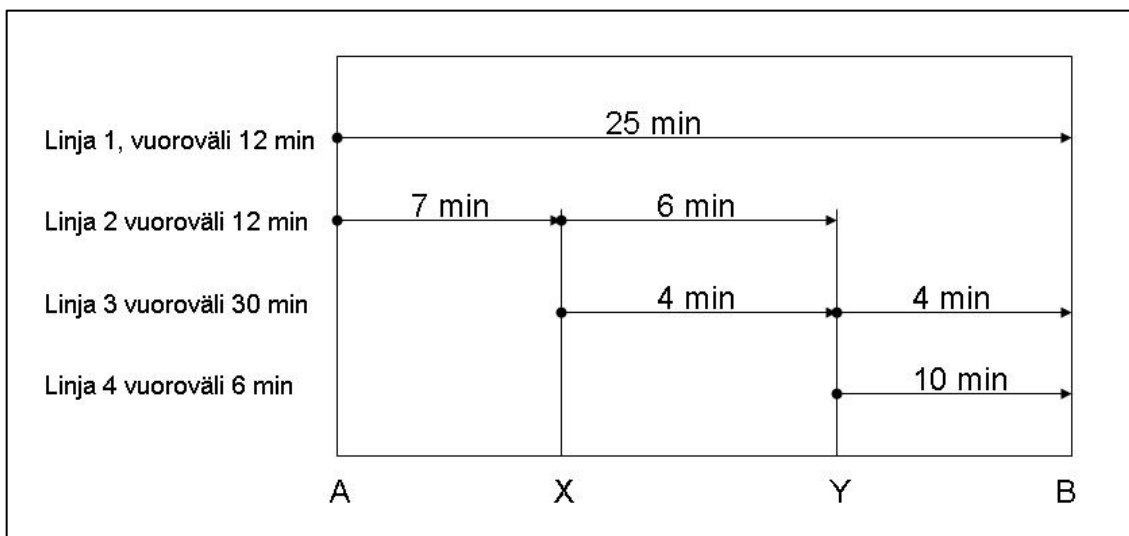
ja kumulatiivisesti

$$G_a(x) = \int_0^\infty g_a(t) dt. \quad (3)$$

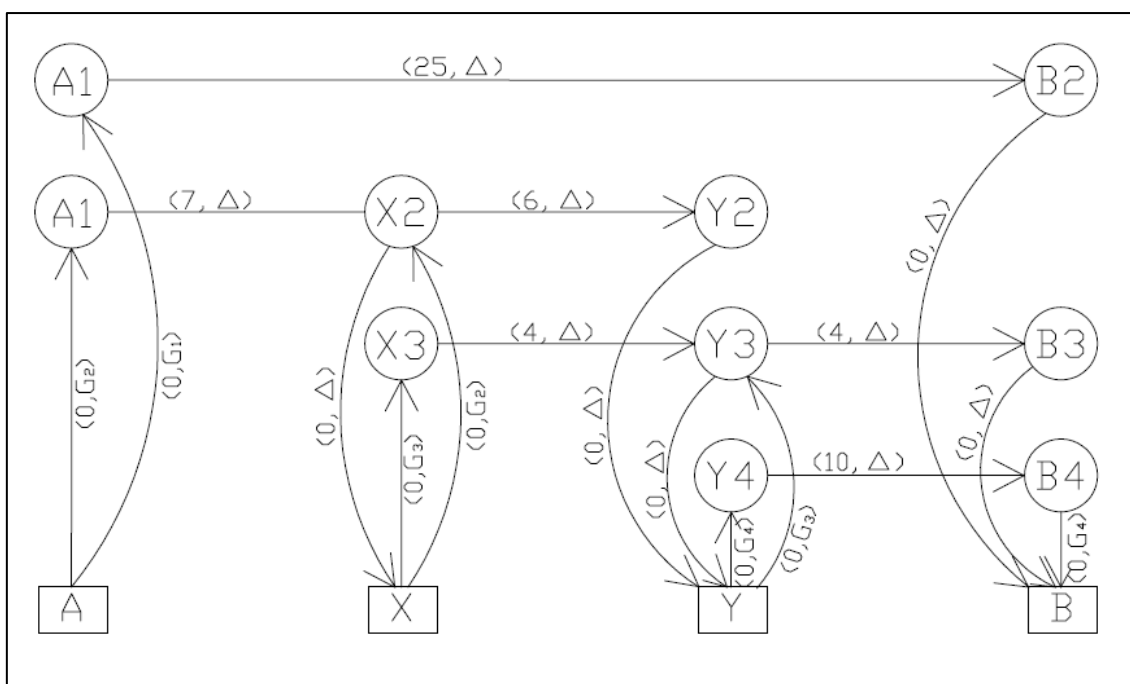
Jos linkillä ei ole aikakomponenttia, saadaan

$$G_a(x) = \Delta(x) = \begin{cases} 0, & \text{jos } x < 0 \\ 1, & \text{jos } x \geq 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Kun tarkastellaan yksinkertaista joukkoliikenneverkkoa (kuva 1) voidaan verkon linkkien aikakomponentit matka-aika  $c_a$  ja odotusaika  $G_a$  määrittää esittää kuvan 2 esittämällä tavalla.



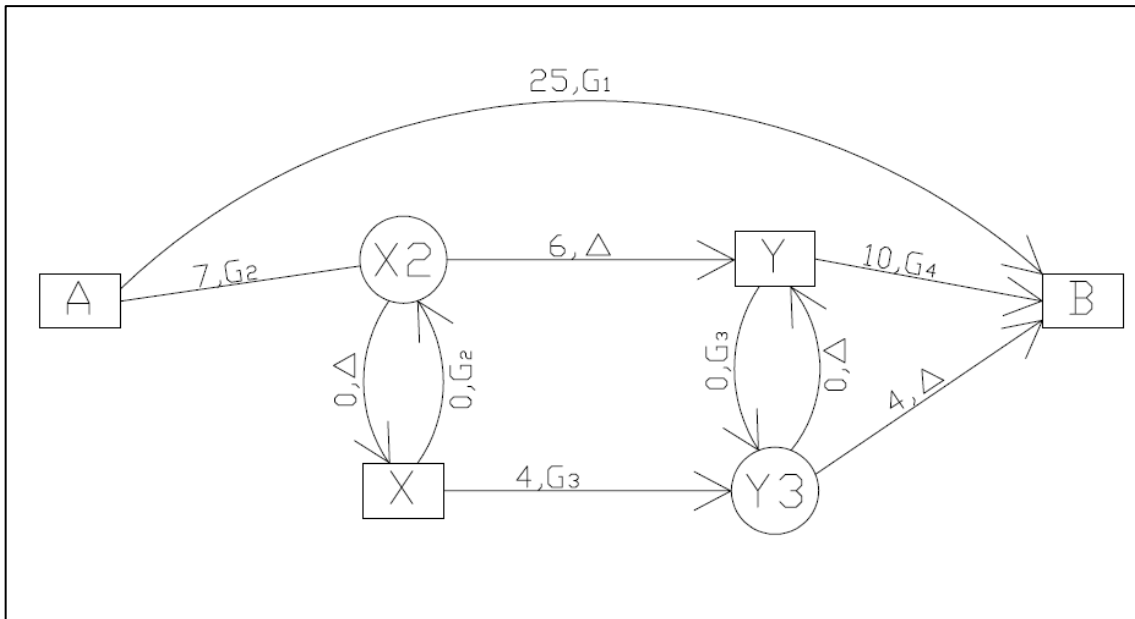
Kuva 1. Esimerkki yksinkertaisesta joukkoliikenneverkosta.



Kuva 2. Esimerkkiverkon linkkien aikakomponentit  $\langle c_a, G_a \rangle$ .

Tässä tapauksessa on vain kolmenlaisia aikakomponentteja: odotus (ei matka-aikaa), ajoneuvossaolo (ei odotusaikaa) ja ajoneuvosta poistuminen (ei odotus- eikä matka-aikaa). Solmuista A, X, Y ja B lähtevät ja niihin tulevat linkit kuvaavat joukkoliikennevälineeseen nousua ja niistä poistumista. Jos solmuun saapuu vain yksi linkki  $a_1 (c_{a1}, G_{a1})$  ja siitä lähtee vain yksi linkki  $a_2 (c_{a2}, G_{a2}=\Delta)$ , voidaan se korvata linkillä  $a (c_a=c_{a1}+c_{a2}, G_a=G_{a1})$ . Näin verkko voidaan esittää kuvan 3

muodossa.



Kuva 3. Pelkistetty esimerkkiverkon linkkikuvaus

Pelkistetyssä esityksessä ei enää niinkään kuvata erillisiä joukkoliikennelinjoja vaan enemmänkin linkkejä. Niinpä esityksessä ei matkustaja odotakaan bussia, vaan enemmänkin sitä, että linkkiä "palvellaan".

Tarkasteltaessa reitinvalintaongelmaa pelkistetyllä verkkoesityksessä, voidaan määrittää uusi verkko  $G_r=(I, \bar{A})$ , joka sisältää vain linkit, joita valittu strategia käyttää. Oletetaan, että  $W(\bar{A}^+)$  on ensimmäisen ajoneuvon todennäköinen odotusaika millä tahansa linkillä  $a \in \bar{A}^+$ . Oletetaan myös, että  $P_a(\bar{A}^+)$  on todennäköisyys, että linkkiä  $a$  palvellaan ensimmäisenä linkkijoukosta  $A$ .  $P_a(\bar{A}^+)=0$  kaikille  $a \notin \bar{A}^+$ .  $W(\bar{A}^+)$  ja  $P_a(\bar{A}^+)$  riippuvat odotusajan jakaumasta  $G_a$  seuraavasti:

$$W(\bar{A}^+) = \int_0^{\infty} \prod_{a \in \bar{A}^+} \{1 - G_a(x)\} dx \quad (5)$$

$$P(\bar{A}^+) = \int_0^{\infty} g_a(x) \prod_{a \in \bar{A}^+, a' \neq a} \{1 - G_{a'}(x)\} dx \quad (6)$$

Emmen joukkoliikennesijoittelu perustuu malliin, jossa sijoittelu tehdään kaikista lähtösolmuista yhteen määräsolmuun  $r$ . Tämä poikkeaa useimmista muista sijoittelumalleista, joissa matkat sijoitellaan yhdestä lähtösolmusta kaikkiin määräsolmuihin. Olkoon  $g_i$ ,  $i \in I - \{r\}$  kysyntä solmusta  $i$  solmuun  $r$ . Määritetään myös

$$g_r = -\sum_{i \neq r} g_i. \quad (7)$$

Edelleen oletetaan, että  $g_i > 0$ ,  $i \in I - \{r\}$ . Kun kysyntä  $g_i$ ,  $i \in I - \{r\}$  sijoitellaan verkkoon strategian  $\bar{A}$  mukaisesti saadaan linkeille liikennemäärä  $v_a$ ,  $a \in A$ . Liikennemäärä  $v_i$  solmussa  $i$ ,  $i \in I$ , on kaikkien saapuvien linkkien liikennemäärien ja solmun kysynnän summa.

$$v_i = \sum_{a \in A_i^-} v_a + g_i \quad i \in I. \quad (8)$$

Solmun liikennemäärä  $v_i$  jaetaan lähteille linkeille strategian  $A$  mukaisten todennäköisyyksien suhteessa:

$$v_a = P_a(\bar{A}_i^+) v_i \quad a \in A_i^+, i \in I \quad (9)$$

Koska

$$\sum P_a(\bar{A}_i^+) = 1 \quad (10)$$

voidaan kaavojen 13 ja 14 perusteella muodostaa yhtälö:

$$\sum_{a \in A_i^+} v_a - \sum_{a \in A_i^-} v_a = g_i. \quad (11)$$

Optimaalinen strategia  $\bar{A}^*$  on strategia, joka minimoi todennäköisen matka-ajan. Kun linkin  $a$  odotusajan jakauma ilmoitetaan linkin frekvenssin avulla, voidaan yhdistetty odotusaika ja linkin valintatodennäköisyys ilmaista seuraavasti:

$$W(\bar{A}_i^+) = \frac{\alpha}{\sum_{a \in A_i^+} f_a} \quad \alpha = 0, \quad (12)$$

$$P(\bar{A}_i^+) = \frac{f_a}{\sum_{a' \in A_i^+} f_{a'}} \quad a \in \bar{A}_i^+. \quad (13)$$

Tapauksessa  $\alpha=1$  ajoneuvojen vuoroväli on jakautunut eksponentiaalisesti ja vuorovälien keskiarvo on  $1/f_a$ . Matkustajat saapuvat pysäkillä satunnaisesti. Tapauksessa  $\alpha=1/2$  linkin  $a$  vuoroväli on vakio  $1/f_a$ . Useimmiten käytetään arvoa  $\alpha=1/2$ .

Kertoimella  $\alpha$  voidaan kuvata myös erilaisia odotus- ja ajoneuvossaoloaikoja ja sitä miten ne koetaan. Kaavassa 13 määritetyt linkkitodennäköisyydet ovat riippumattomia siitä, missä yksikössä frekvenssi  $f_a$  on esitetty, joten ne voi voidaan aina skaalata kertoimella  $1/\alpha$ .

Optimaalinen strategia  $\bar{A}$  voidaan ilmaista 0–1-muuttujan  $x_a$  avulla

$$x_a = \begin{cases} 0, & \text{jos } a \notin \bar{A} \\ 1, & \text{jos } a \in \bar{A} \end{cases} \quad a \in A. \quad (14)$$

Solmun  $i$  kaikkien matkojen kokonaisodotusaika voidaan esittää seuraavasti:

$$\varpi = \frac{V_i}{\sum_{a \in A_i^+} f_a x_a} \quad i \in I. \quad (15)$$

Spiess on osoittanut, että joukkoliikenteen sijoittelumallissa on kyse matka-ajan ja odotusajan summan minimoimisesta eli seuraavan lausekkeen ratkaisemisesta:

$$\text{Min} \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{i \in I} \varpi_i \quad (16)$$

edellyttäen kaavan 11 lisäksi, että

$$v_a \leq f_a \varpi_a \quad a \in A_i^+, i \in I \quad (17)$$

$$v_a \geq 0 \quad a \in A. \quad (18)$$