

**KAKSIKAISTAISTEN TEIDEN MIKROSIMULOINTI –  
NYKYTILA JA KEHITYSSUUNNAT**

Jukka Lehtinen

Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja ympäristötekniikan osastolla professori Matti Pursulan valvonnassa tehty diplomityö.

Espoo 9.10.2000

<b>Tekijä:</b>	Jukka Lehtinen		
<b>Diplomityö:</b>	Kaksikaistaisen teiden mikrosimulointi – nykytila ja kehityssuunnat		
<b>Päivämäärä:</b>	9.10.2000	<b>Sivumäärä:</b>	109
<b>Professuuri:</b>	Liikennetekniikka	<b>Koodi:</b>	Yhd-71
<b>Valvoja:</b>	Prof. Matti Pursula		
<b>Ohjaaja:</b>	Tekn.lis. Jarkko Niittymäki		

Työssä selvitettiin kaksikaistaisen teiden mikrosimuloinnin nykytilaa kirjallisuustutkimuksen ja simulointikokeiden avulla. Kirjallisuustutkimuksessa perehdyttiin kaksikaistaisen teiden simulointiohjelmien erityispiirteisiin sekä kaksikaistaisen teiden ominaisuuksiin, joiden mallintaminen on simuloinnissa oleellista. Simulointikokeet tehtiin Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetyllä HUTSIM-mikrosimulointiohjelmistolla.

HUTSIMin toiminta perustuu mallinnettujen objektien välisiin vuorovaikutuksiin. Objekteja ovat esimerkiksi tie ja sitä käyttävät ajoneuvot Objektien tila mallinetaan useita kertoja sekunnissa. Ohjelma on alun perin suunniteltu liikennevalo-ohjauksisten liittymien simulointiin. Viimevuosina ohjelmaa on kehitetty palvelemaan myös muunlaisten liikenneympäristöjen simulointia.

Korkealuokkaisilla korkean nopeustason väylillä pystygeometria vaikuttaa etenkin raskaiden ajoneuvojen nopeuksiin merkittävästi. Raskaiden ajoneuvojen nopeuden aleneminen ylämäissä heijastuu koko liikennevirran nopeuteen, lisää jonoutumista ja ohitustarvetta. Pelkkä vaakageometria vaikuttaa kaksikaistaisen teiden linjaosuuksilla teillä ajoneuvojen nopeuksiin harvoin.

Mäen nousukulman ja pituuden vaikutusta raskaiden ajoneuvojen nopeuksiin tutkittiin VEMOSIM-ajoneuvosimulaattorilla. Suomessa nousut ovat yleensä melko loivia ja lyhyitä, mutta simulointitulosten mukaan jo näissä nousuissa nopeuden aleneminen on merkittävä.

Kaksikaistaisen teiden simulointiin soveltuvia ohjelmia on olemassa vain muutamia. Ohjelmat on kehitetty pääosin 1970-80 -luvulla. Tunnetuimmat kaksikaistaisen teiden simulointiohjelmat ovat ruotsalainen VTI:n kaksikaistaisen teiden simulaattori, australialainen TRARR ja yhdysvaltalainen TWOPAS.

HUTSIM-ohjelmiston sopivuutta kaksikaistaisen teiden simulointiin testattiin kolmen simulointikokeen avulla. Simuloidut koekohteet olivat ohituskaista, tavanomainen kaksikaistainen maantie ja alhaisen nopeustason kaksikaistainen tie. Simulointituloksia verrattiin kenttämittauksissa saatuihin tuloksiin.

Ohituskaistan simuloinnissa käytettiin moottoritien simulointiin kalibroituja kaistanvaihtoparametrejä. Saadut tulokset osoittivat, että ohituskaistan simulointi onnistuu HUTSIMilla jo nyt melko hyvin. Keskeisimmiksi HUTSIMin ongelmiksi kaksikaistaisen teiden simuloinnissa todettiin puutteet vapaiden ajoneuvojen nopeusmallissa ja tiegeometrian mallintamisessa. Kaksikaistaisen teiden simuloinnissa välttämätön ohitusmalli puuttuu ohjelmasta kokonaan.

Työssä esitettiin kehitysehdotuksia HUTSIM-ohjelmiston kehittämiseksi kaksikaistaisen teiden simulointiin. Tärkeimpiä kehityskohteita ovat tien väylämallin laatimiseen liittyvät toiminnot, tien geometrian nopeusvaikutusten sekä ohitustilanteiden mallintaminen. Lisäksi käyttöliittymän uudistaminen ja käyttöohjeen ajantasaistaminen helpottaisivat ohjelman käyttöä.



<b>Author:</b>	Jukka Lehtinen		
<b>Thesis:</b>	Traffic Micro-simulation of Two-lane Roads – Present and Prospects		
<b>Date:</b>	9.10.2000	<b>Number of pages:</b>	109
<b>Professorship:</b>	Transportation Engineering	<b>Code:</b>	Yhd-71
<b>Supervisor:</b>	Prof. Matti Pursula		
<b>Instructor:</b>	Lic.Tech. Jarkko Niittymäki		
<p>The target of this study was to find out the present situation of two-lane road micro-simulation by the literary study and simulation tests. The literature study discovered special aspects of two-lane roads and crucial characteristics for simulation model. Simulation tests were performed by HUTSIM micro-simulation programme developed by Helsinki University of Technology.</p> <p>The operation of HUTSIM is based on interactions between modelled objects, vehicles and different parts of traffic environment. The state of each object is defined several times per second. Originally HUTSIM was designed only for simulation of signalised intersections. During last years HUTSIM has been developed to simulate other traffic environments, too.</p> <p>In high-class high-speed roads vertical geometry has a significant influence especially on heavy vehicle speeds. Decrease of heavy vehicle speeds reflects the mean speed of traffic flow, increases queuing and overtaking demand. The horizontal geometry of high-class rural roads decreases speeds of individual vehicles only exceptionally.</p> <p>The effect of angle and length of the upgrade for speeds of heavy vehicles was studied by using the Finnish VEMOSIM-driving simulator. According to the results heavy vehicle speeds are already decreasing in typical upgrades occurring in Finnish rural highways.</p> <p>Only a few simulation programmes can be applied for two-lane road simulation. Programmes are mainly prepared in 1970-80's. The most widely known programs are VTI's two-lane road simulator from Sweden, TRARR from Australia and TWOPAS from United States.</p> <p>The fitness of HUTSIM for the two-lane road traffic simulation was tested by three simulation tests. Tested surroundings were overtaking-lane, normal rural two-lane road and two-lane road with lower speeds. Simulation results were compared to field study results.</p> <p>In overtaking-lane simulation the lane-changing parameters were the same as used earlier in freeway simulation. According to results overtaking-lane simulation by HUTSIM operates quite well. Essential problems in the normal two-lane road simulation are modelling of free vehicle speed and of road geometry.</p> <p>Some improvement suggestions for the development of HUTSIM were presented. Main improvement tasks are modelling of road environment, geometry's effect to speeds and modelling of the overtaking situations. Renewal of the user interface and updating of the instructions are needed for facilitation of the program.</p>			

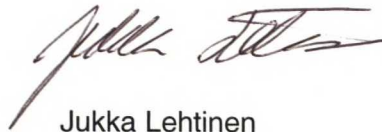
## ALKUSANAT

Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa on vuodesta 1989 lähtien kehitetty omaa HUTSIM-liikennesimulaattoria. Alun perin liikennevalosimulointiin tarkoitettun ohjelmiston käyttöalue on laajentunut käsittämään myös korkealuokkaiset väylät. Tulevaisuudessa ohjelmaa kehitetään palvelemaan myös kaksikaistaisten teiden simulointia.

Työn valvojana toimi professori Matti Pursula. Työn ohjauksesta vastasivat tekniikan lisensiaatti Jarkko Niittymäki ja diplomi-insinööri Jukka Ristikartano. Esitän heille parhaat kiitokseni rakentavista kommenteista. Diplomi-insinööri Ville Lehmuskoskea kiitän HUTSIMin käyttöön liittyvistä neuvoista. Kiitoksen ansaitsevat myös kaikki ne henkilöt Tielaitoksessa ja liikennelaboratoriossa, joilta olen saanut apua työn eri vaiheissa.

Erityiskiitos työnaikaisesta tuesta vaimolleni Hannalle ja muille taustajoukoille.

Espoossa 9.10.2000



Jukka Lehtinen

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	8
2	LIIKENTEEN MIKROSIMULOINNIN NYKYTILA JA KEHITYSSUUNNAT	9
2.1	Mikrosimulointi liikenteen tutkimusmenetelmänä	9
2.2	Erialaisten väylien simuloinnin erityispiirteet	10
2.3	HUTSIM-ohjelmiston soveltuvuus kaksikaistaisten teiden simulointiin	11
3	KAKSIKAISTAISEN TIEN LIIKENNEVIRTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	12
3.1	Kaksikaistaisen tien ominaispiirteitä	12
3.2	Vaakageometrian vaikutus ajonopeuksiin	13
3.3	Pystygeometrian vaikutus ajonopeuksiin	16
3.3.1	Pystygeometrian taustalla vaikuttava kinemaattinen teoria	16
3.3.2	Kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen liikennevirtavaikutuksen vertailu	18
3.3.3	Ajosimulaattoritutkimus	19
4	HCM –MENETTELY KAKSIKAISTAISEN TIEN LIIKENNEVIRRRAN ARVIOINNISSA	21
5	OHITTAMINEN KAKSI- JA KOLMIKAISTAISILLA TEILLÄ	24
5.1	Ohitustarve	24
5.1.1	Ohitustarve liikennevirtateorian mukaan	25
5.1.2	Ohitustarve yksittäisen kuljettajan näkökulmasta	26
5.2	Ohitustilanteiden luokittelu	27
5.3	Ohituspäätökseen vaikuttavat tekijät	27
5.4	Ohitusmahdollisuuden hyväksyminen	28
5.5	Ohituskäyttäytymistä käsittelevät tutkimus	31
5.6	Ohituskaihan kohdalla ohittamiseen liittyviä erityispiirteitä	33
5.7	Ohittaminen ja tavoitenopeuden valinta	34
5.8	Ohjeet ohitusnäkemistä tien suunnittelussa Suomessa	35
5.9	Kolmitasoinen päätöksentekomalli	36
6	KAKSI- JA KOLMIKAISTAISTEN TEIDEN SIMULOINTIIN SOVELTUVIA OHJELMISTOJA JA MALLEJA	37
6.1	VTI:n simulointimalli	37
6.1.1	Ohjelman yleispiirteet	37



6.1.2	Vapaiden ajoneuvojen nopeusmalli	38
6.1.3	Ajoneuvojen ominaisuudet	41
6.1.4	Simulointitapahtumat	41
6.1.5	Tulosten käsittely	45
6.2	TRARR	45
6.2.1	Yleispiirteet	45
6.2.2	Toimintaperiaate	46
6.2.3	Sovelluskohteet	48
6.3	Roadsim	48
6.4	Twopas	49
6.5	Yhteenvedo	51
7	SIMULOINTIKOKEET HUTSIM-OHJELMISTOLLA	54
7.1	Yleistä	54
7.1.1	Simulointikokeiden tavoite ja kohteiden valinta	54
7.1.2	Simulointikokeiden kulku	55
7.2	Ohituskaistan simulointi	56
7.2.1	Tutkimuskohteen ominaisuudet ja vertailuaineisto	56
7.2.2	Mallintaminen ja koeasetelma	57
7.2.3	HUTSIMin kaistanvaihtotoiminnot ohituskaistan simuloinnissa	59
7.2.4	Simuloinneissa käytetyt lähtötiedot	61
7.2.5	Tulokset	62
7.2.6	Johtopäätökset	69
7.3	Kaksikaistainen tie Koskenkylä – Liljendal	70
7.3.1	Tutkimuskohteen ominaisuudet ja vertailuaineisto	70
7.3.2	Mallintaminen ja koeasetelma	72
7.3.3	Simuloinneissa käytetyt lähtötiedot	72
7.3.4	Tulokset	73
7.3.5	Johtopäätökset	77
7.4	Alhaisen nopeustason kaksikaistainen tie	78
7.4.1	Tutkimuskohteen ominaisuudet ja vertailuaineisto	78
7.4.2	Mallintaminen ja simulointi	79
7.4.3	Simulointiparametrien säätö	83
7.4.4	Tulokset	85
7.4.5	Johtopäätökset	93
8	TUTKIMUS- JA KEHITYSTARPEITA	94
8.1	Peruseriaatteita	94
8.2	Simuloitavan väyläympäristön mallintamiseen liittyvät ominaisuudet	95

8.2.1	Tielinjan mallintaminen	95
8.2.2	Tielinjan ulkopuolisten tekijöiden huomioiminen	96
8.2.3	Näkemäpituuden määrittäminen	96
8.3	Ajoneuvojen nopeuden säätelyyn liittyvät ominaisuudet	97
8.3.1	Tavoitenopeus	97
8.3.2	Ajoneuvon ominaisuuksien vaikutus ajonopeuteen	97
8.3.3	Vapaiden ajoneuvojen nopeuden säätely	98
8.4	Ohittamiseen liittyvät ominaisuudet	99
8.4.1	Päätöksenteko ohituspaikan etsimisen aloittamisesta	99
8.4.2	Jonoajoneuvojen seuranta-aikavälit	100
8.4.3	Ohituspäätös	100
8.4.4	Nopeus ohituksen aikana	100
8.4.5	Vastaantulevan ajoneuvon käyttäytyminen ja keskeytetty ohitus	101
8.5	Ohjelman käytettävyyteen liittyvät ominaisuudet	101
9	YHTEENVETO	102

# 1 JOHDANTO

Liikenteen ominaisuuksia erilaisissa ympäristöissä on pyritty mallintamaan monin erilaisin keinoin. Liikenteen mikrosimulointi on kehittynyt voimakkaasti 1980- ja 1990-luvuilla. Kaupunkien ja etenkin pitkälle autoistuneiden maiden moottoriteiden pahenevat ruuhkat ovat pakottaneet tienpitäjiä etsimään ratkaisuja uusista liikenteenohjausmenetelmistä, joiden avulla väylien välityskykyä voidaan parantaa ilman kalliita lisäkaistoja. Näiden menetelmien testaamiseen mikrosimuloinnin on todettu soveltuvan erinomaisesti. Kaupallisia ja korkeakoulujen tutkimuskäyttöä palvelevia ohjelmia on käytössä maailmalla useita kymmeniä.

Kaksikaistaisten teiden simulointi ei ole kehittynyt yhtä nopeasti. Syitä ovat ainakin kaksikaistaisten teiden liikenteen peruspiirteet, kuten geometrian suuri vaikutus liikenteen ominaisuuksiin, sekä ohittaminen vastaantulevan liikenteen kaistaa käyttäen. Näiden piirteiden mallintaminen on vaikeaa.

Suomessa kaksikaistaisten teiden mikrosimuloinnille on ollut kysyntää aikaisemmin ja on edelleenkin. Päätieverkkomme perustuu kaksikaistaiseen tiestöön Helsingistä säteittäin lähteviä moottoriteitä lukuun ottamatta. Keski- ja Pohjois-Suomen pääteitä ei kannata rakentaa moottoriteiksi, vaikka ajoittaisia ruuhkia niillä saattaakin esiintyä. Tämän mittavan tieverkon tehokas käyttö edellyttää kaksikaistaisilla tiellä käytettävien perusratkaisuiden kehittämistä, mistä esimerkkinä ovat ohituskaistajärjestelyt ja leveäkaistatiet. Mikrosimulointi olisi hyvä menetelmä tutkia näitä uusia poikkileikkausratkaisuja erilaisissa liikennetilanteissa ja maasto-olosuhteissa. Simuloinnin avulla voitaisiin myös arvioida ratkaisujen erilaisia vaikutuksia nykyistä paremmin.

Suomessa Tielaitos maantieliikenteen sektoriviranomaisena on kiinnostunut kaksikaistaisten teiden simulointiin soveltuvien ohjelmien kehittämisestä. Tielaitos tukee ja seuraa alan kehitystä tavoitteenaan löytää Suomen olosuhteisiin soveltuvia simulointimenetelmiä, joiden avulla voitaisiin analysoida erilaisia kaksikaistaisten teiden liikennevirtaan liittyviä kysymyksiä. Tielaitoksen näkökulmasta erityisen kiinnostavia ovat simulointisovellukset, joiden avulla voitaisiin tutkia edellä mainittujen uusien poikkileikkausratkaisuiden vaikutuksia.

Tämän työn tavoitteena on selvittää kaksikaistaisten teiden simuloinnin erityispiirteitä suhteessa moottoriteihin ja katu ympäristöön. Työssä kuvataan eräiden olemassa olevien kaksikaistaisten teiden simulointiohjelmien ratkaisut näiden erityispiirteiden osalta. Työssä arvioidaan myös HUTSIM -ohjelmiston soveltuvuutta kaksikaistaisten teiden simulointiohjelmistoksi kirjallisuustutkimuksen ja simulointikokeiden avulla. Tavoitteena on myös tehdä ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi, joiden avulla kaksikaistaisten teiden simulointia voidaan kehittää.



## 2 LIIKENTEEN MIKROSIMULOINNIN NYKYTILA JA KEHITYSSUUNNAT

### 2.1 Mikrosimulointi liikenteen tutkimusmenetelmänä

Simuloinnilla tarkoitetaan jonkin todellisuuden ilmiön jäljittelemistä tietokonemallin avulla. Simuloinnissa oleellista on mallin toiminnan dynaamisuus. Toisin sanoen simulointimallin avulla seurataan tarkasteltavan ilmiön muutoksia ajan funktiona. (Pursula 1982.)

Aluksi mikrosimulointia käytettiin sellaisten liikennetilanteiden simulointiin, jossa kuljettajien toimintaa säädellään erilaisilla liikenteenohjauslaitteilla ja selkeillä säännöillä. Esimerkkejä tällaisista kohteista ovat valo-ohjauksiset ja ilman valo-ohjausta toimivat tasoliittymät. Liittymissä kuljettajien käyttäytymistä ohjataan tietyn ohjauslogiikan mukaan. Järjestelmä ohjaa voimakkaasti kuljettajien toimintaa ja kuljettajien päätöksenteko rajoittuu riittävien aikavälien etsintään erilaisia toimenpiteitä varten. Alkuvaiheessa simuloimalla tutkittiin esimerkiksi sitä, minkälainen opastinryhmien ajoitus olisi paras erilaisissa liikennetilanteissa. Liikennevalojen toimintaa tutkittiin simuloimalla viivytyksiä ja jonon pituuksia.

Tietokoneiden yleistyessä tietojenkäsittelykapasiteetti on lisääntynyt ja on kaikkien käytävissä. Aiemmin käyttöaika jaettiin usean käyttäjän kesken ja oli siksi kallista. Nykyisin tietokoneet ovat kehittyneet simulointiohjelmia nopeammin, eivätkä ne enää aseta vastaavia rajoituksia ohjelmistokehitykselle kuin ennen.

Simuloimalla voidaan tarkastella entistä paremmin tilanteita, joissa kuljettajien toimintaan vaikuttavat paitsi erilaiset ohjauslaitteet, myös kuljettajien ja ajoneuvojen ominaisuudet. Simulointimallien objektien keskeisten vuorovaikutusten mallintaminen nousi entistä tärkeämpään asemaan.

Tulevaisuuden kehityssuuntia liikenteen mikrosimuloinnissa ovat tiegeometrian sekä ajoneuvon teknisten ja ajodynaamisten ominaisuuksien kehittyneempi mallintaminen. Myös kuljettajan ja ajoneuvon välisiä vuorovaikutussuhteita sekä kuljettajan päätöksentekoa tullaan yhä enemmän mallintamaan.

Yksi liikenteen mikrosimuloinnin sovelluskohde voisi tulevaisuudessa olla suunnitelmiin liikenteellisen toimivuuden arvioiminen. Tienpitäjä voisi kilpailuttaa suunnittelijoita ja valita jatkotyön kohteeksi suunnittelijan, jonka suunnitelma näyttäisi simuloinnin perusteella johtavan parhaaseen lopputulokseen.

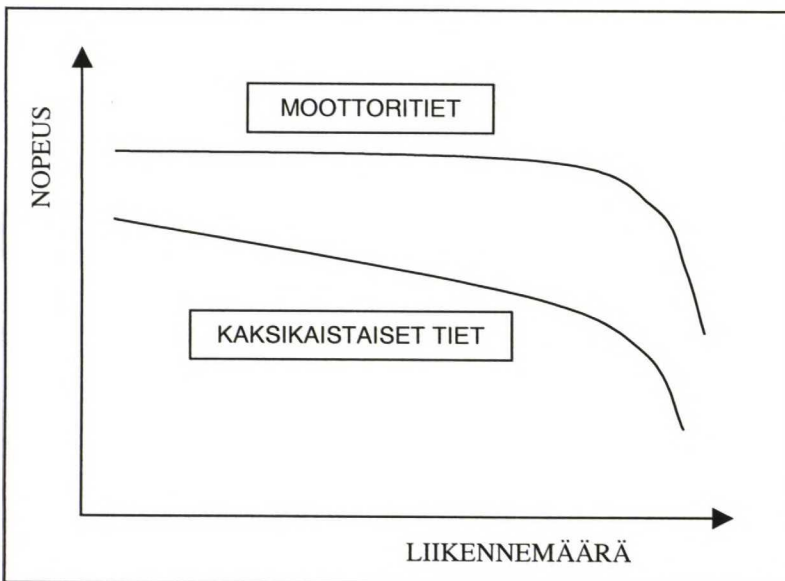
Tässä työssä simulointitarkastelut on tehty Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetyllä HUTSIM-simulointiohjelmistolla. HUTSIM-ohjelmistoperhe muodostuu tällä hetkellä kolmesta osasta. HUTEDI -nimisellä mallieditorilla muodostetaan simuloitavaa kohdetta kuvaava malli. Itse simulointi tehdään HUTSIM-simulaattorilla. Tulosten analysointiin voidaan käyttää HUTSIM Analyzer -analysointia. Usein HUTSIM-ohjelmasta puhuttaessa tarkoitetaan näiden kolmen erillisen osan muodostamaa kokonaisuutta.

HUTSIM –ohjelmisto on esitelty ja sen toimintaa kuvattu monissa aikaisemmissa selvytyksissä ja raporteissa. Kosonen (1999) on väitöskirjassaan esittänyt ohjelman peruseriaatteet. Ohjelman käytöstä löytyy tietoa julkaisusta *HUTSIM 4.2 Reference manual* (Sane & Kosonen 1996). Lehmuskoski (1998) on käsitellyt ohjelman toimintaa korkealuokkaisten väylien simuloinnissa.

## 2.2 Erilaisten väylien simuloinnin erityispiirteet

Kaksikaistaisten teiden simuloinnin merkittävimmät erityispiirteet moottoritieympäristöön nähden ovat ohitustapahtuman ja tien tasauksen ja linjauksen mallintaminen sekä geometrian nopeusvaikutusten mallintaminen.

Erilaisten liikenneympäristöjen ominaisuuksia voidaan vertailla tutkimalla eri olosuhteiden tyypillisiä liikennevirran peruskuvaajia. *Kuvassa 1* on havainnollistettu liikennevirran peruskuvaajien avulla kaksikaistaisten teiden ja moottoriteiden liikennevirran eroa.



Kuva 1. Moottoritien ja kaksikaistaisen tien tyypilliset liikennemäärä-nopeus-käyrät.

Kuvasta 1 nähdään, että moottoritien liikennevirran nopeus pysyy lähes vakiona liikennemäärän kasvaessa kunnes tiellä on niin paljon ajoneuvoja, että nopeustaso laskee selkeästi. Kaksikaistaisilla teillä liikennevirran nopeus laskee liikennemäärän kasvaessa jo melko pienillä liikennemäärillä. Yhdysvalloissa kaksikaistaisten teiden nopeusaleneman on havaittu olevan tyypillisesti 12,5 km/h tuhatta ajoneuvoa kohti (Transportation Research Board 1999). Suomessa nopeusalenema tuhatta ajoneuvoa kohti näyttäisi tutkimusten mukaan olevan pienempi kuin Yhdysvalloissa (Luttinen 2000).

Moottoritien linjaosuuksilla vaakageometria ei rajoita ajoneuvojen nopeuksia, kuten kaksikaistaisilla teillä. Moottoritiellä hitaasti ajavien ajoneuvojen ohittaminen on kaksikaistaisia teitä helpompaa, eikä ajoneuvojen nopeusero ei vaikuta nopeustasoon kuin vasta suurilla liikennemäärillä. Nopeus-liikennemäärä-riippuvuuden kannalta ohitustapahtuman mallintaminen ja vapaiden nopeuksien asettaminen ovat kaksikaistaisten teiden simuloinnissa avainasemassa.



Jotta ohitustapahtuman mallintaminen olisi mahdollista on kaksikaistaisten teiden simuloinnissa välttämätöntä mallintaa vastakkaisiin suuntiin liikkuvien ajoneuvojen välistä vuorovaikutusta. Moottoriteiden linjaosuuksilla vastakkaisiin suuntiin liikkuvien ajoneuvojen vuorovaikutus on estetty keskikaistalla ja kaupunkiliikenteessä liittymiä lukuun ottamatta ajosuunnat käyttävät pääsääntöisesti omia kaistojaan. Kaupunkimaisessa ympäristössä ohittaminen vastakkaisen ajosuunnan kaistaa käyttäen on harvinaista.

### **2.3 HUTSIM-ohjelmiston soveltuvuus kaksikaistaisten teiden simulointiin**

HUTSIM-ohjelmisto on kehitetty alunperin liikennevalo-ohjauksisten liittymien simulointiin. Myöhemmin sovellusaluetta on laajennettu käsittämään myös muunlaiset liittymät sekä liittymien väliset linjaosuudet. Olio-pohjaisena simulointiohjelmana HUTSIMia on voitu kehittää melko joustavasti erilaisiin tilanteisiin sopivaksi, joko lisäämällä ohjelmaan uusia toimintoja ja olioita, tai muuttamalla simulointimuuttujien parametrejä erilaisiin liikenneympäristöihin paremmin sopiviksi.

HUTSIM-mallissa liikkuvien ajoneuvojen pistenopeuksia voidaan seurata malliin sijoitettavien ilmaisimien avulla. Ilmaisimien vastaa maastomittauksissa käytettävää induktiosilmukkaparia. Ilmaisimien havaitsee ohi ajavasta ajoneuvosta ilmaisimien ohitushetken, nopeuden, pituuden, ajoneuvotyyppin ja ajoneuvon järjestysluvun ilmaisimella. Ilmaisimien simuloinnin aikana keräämä tieto voidaan tulostaa HUTSIMin flow-tulostiedostoon, jossa jokainen ilmaisimen tekemä ajoneuvohavainto tulostuu omalle rivilleen. Mikäli mallissa on useita ilmaisimia, voidaan niiden havainnot erottaa toisistaan tulostiedostossa ilmaisimen numeron perusteella. Tulostiedoston tietoja yhdistelemällä saadaan laskettua tietyn ilmaisimen ohittaneiden ajoneuvojen keskinopeus, nopeuksien hajonta, netto- ja bruttoaikavälit.

HUTSIMin käyttöä kaksikaistaisten teiden simuloinnissa rajoittaa se, että ohjelman valmiudet tiegeometrian huomioimiseen ovat huonot. Tien mallinnuksessa käytettävän putken ominaisuudet eivät sisällä tekijöitä, joiden avulla tien linjaus tai tasaus voitaisiin kuvata. Toinen merkittävä puute on ohitustoiminnon puuttuminen. Ohittaminen käyttäen vastakkaisen liikenteen putkea ei ole mahdollista. Ohittamiseen liittyvää päätöksentekoa ei myöskään ole mallinnettu.



### 3 KAKSIKAISTAISEN TIEN LIIKENNEVIRTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

#### 3.1 Kaksikaistaisen tien ominaispiirteitä

Geometria on yksi kuljettajien nopeudenvailintaan vaikuttavista tekijöistä. Tien geometria määräytyy vaak- ja pystygeometrian yhdessä muodostamasta kolmiulotteisesta käyrästä. Pysty- ja vaakageometrian vaikutus ajonopeuteen on erilainen. Peruslähtökohtana molemmissa ovat kuitenkin ajoneuvon vaikuttavat erilaiset voimat.

Vaakageometria vaikuttaa ajonopeuteen kuljettajan kokeman ajomukavuuden ja turvallisuuden kautta. Vaakageometrian vaikutusta ajonopeuteen voidaan tarkastella ainakin kaarresäteen, kaarteiden pituuden ja sivukaltevuuden funktiona. Lisäksi ajonopeuteen vaikuttaa kuljettajan henkilökohtainen tavoitenopeus. Ajettaessa kaksikaistaisen tien linjaosuudella henkilöautolla nopeusrajoituksen puitteissa vaakageometria ei vaikuta nopeuden valintaan. Kuorma-autoilla vaakageometria voi vaikuttaa nopeuden valintaan kaatumisriskin takia.

Pystygeometria vaikuttaa ajonopeuksiin pääasiassa ajoneuvon ominaisuuksien välityksellä. Ajoneuvon eri ominaisuuksien vaikutusta kuvataan usein ajoneuvon tehopainosuhteen avulla. Suure kuvaa kuinka monta tehoyksikköä ajoneuvossa on yhtä painoyksikköä kohti. Riippumatta ajoneuvon ominaisuuksista nopeus pyrkii ylämäessä laskemaan ja alamäessä nousemaan. Mitä suurempi ajoneuvon tehopainosuhte on, sitä vähemmän sen nopeus laskee ylämäessä. Ajoneuvojen nopeuteen alamäessä tehopainosuhte ei käytännössä vaikuta.

Pystygeometrian vaikutus erilaisiin ajoneuvoihin on enemmän riippuvainen ajoneuvon ominaisuuksista kuin vaakageometrian vaikutus. Vaakageometria vaikuttaa ajonopeuteen ajomukavuuden välityksellä, jolloin kuljettajalla on merkittävä osuus ajonopeuden valinnassa. Jos kuljettaja valitsee vaakageometriaan nähden liian suuren nopeuden, hän saattaa ajautua pois tieltä. Mikään voima ei siis estä kuljettajaa ajamasta liian lujaa. Pystygeometria taas ei salli kuljettajan valita nopeuttaan, vaan estää kasvaneen ajovastuksen välityksellä nopeuden kohoamisen suuremmaksi kuin ajoneuvon ominaisuudet sallivat. Tästä pysty- ja vaakageometrian vaikutusmekanismien erosta voidaan sanoa, että pystygeometria muodostuu kaksikaistaisella tiellä erittäin merkittäväksi tien liikennöitävyyteen vaikuttavaksi tekijäksi olivatpa muut tien ominaisuudet kuinka korkeatasoisia tahansa.

Pystygeometria vaikuttaa raskaiden ajoneuvojen nopeuksiin enemmän kuin kevyiden ajoneuvojen nopeuksiin. Kaksikaistaisilla teillä, joilla ohittaminen ei ole aina mahdollista, raskaiden ajoneuvojen nopeuden aleneminen kuitenkin vaikuttaa koko liikennevirran nopeuteen.

Suomalaisilla maanteillä pystygeometria ei vaikuta liikennevirtaan yhtä voimakkaasti kuin esimerkiksi monissa Keski-Euroopan maissa. Suomessa maanpinta on melko tasainen, jolloin teillä ei esiinny suuria pituuskaltevuuksia ja mäet ovat suhteellisen lyhyitä. Tielaitoksen ohjeen *Pääväylät kaupunkialueella* mukaan linja-osuuksilla suurin

hyvää laatutasoa vastaava pituuskaltevuuden arvo on 5 prosenttia (Tielaitos 1993). Päätieverkolla pituuskaltevuus ei joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta ylitä tätä arvoa. Suomalaisilla valta- ja kantateillä henkilöautolla liikkuva joutuu harvoin laskemaan nopeuttaan pystygeometrian vuoksi.

Kuivatuksen kannalta pituuskaltevuuden minimiarvo on yksi prosentti (Tielaitos 1993). Prosentin kallistus ei vaikutus henkilöautojen nopeuksiin mitenkään, mutta pitkissä nousuissa raskaiden ajoneuvojen nopeudet putoavat. Polttoaineen kulutukseen prosentinkin nousu vaikuttaa ajoneuvotyypistä riippumatta.

Nopeuden valinnan lisäksi tien geometria vaikuttaa liikenteeseen myös geometriasta muodostuvien näkemien kautta. Runsaasti pienisäteisiä kaarteita sisältävä tielinja tarjoaa kuljettajille vähän ohittamiseen riittävän pitkiä näkemiä, jolloin oman tavoitenopeuden ylläpitäminen vaikeutuu ohittamisen vaikeutumisen myötä. Tämä onkin yksi merkittävin väylän nopeustasoon vaikuttava tekijä.

Muita tyypillisesti kaksikaistaisten teiden nopeustasoon vaikuttavia tekijöitä ovat ympäröivä maan käyttö ja siihen sidoksissa oleva liittymien määrä ja laatu. Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan vain tien linjaosuuksia eikä myöskään pyritä arvioimaan erilaisten ympäristöjen vaikutusta simuloinnin kannalta.

### 3.2 Vaakageometrian vaikutus ajonopeuksiin

Vaakageometrian ja nopeuden välistä riippuvuutta on tutkittu mittaamalla kuljettajien käyttämiä nopeuksia erilaisissa geometrisissa olosuhteissa.

Tutkimukset voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään:

- tiejakson geometrian ja matkanopeuksien riippuvuutta tarkastelevat tutkimukset ja
- kaarresäteen ja pistenopeuksien riippuvuutta tarkastelevat tutkimukset.

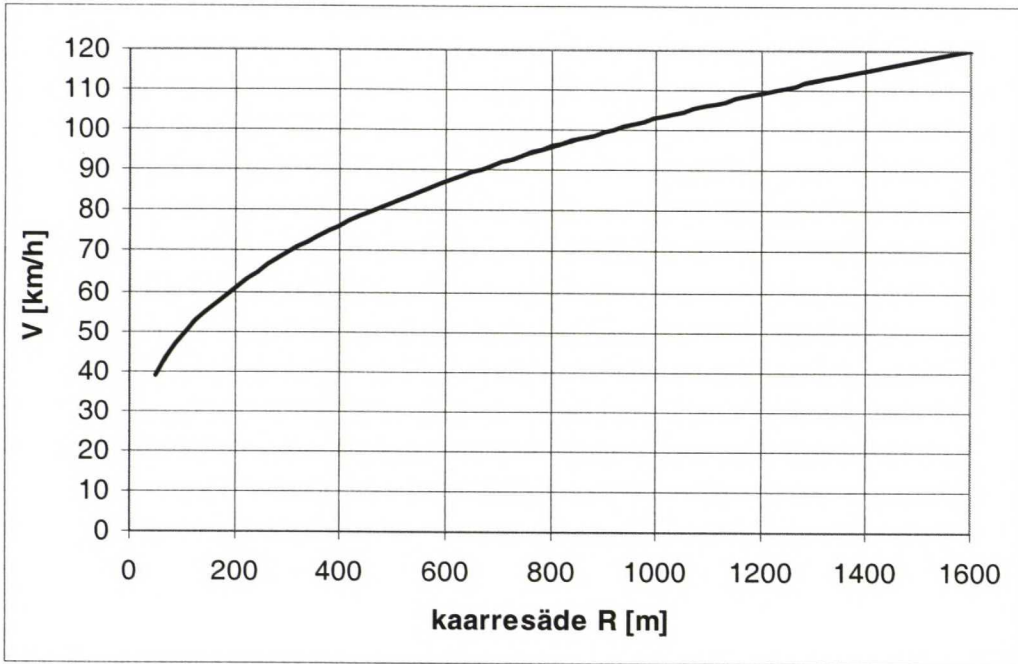
Tässä yhteydessä huomio kiinnitetään jälkimmäiseen ryhmään.

Bonnesonin (1993) mukaan eksponenttimalli (kaava 1) on luotettavin nopeuden ja kaarresäteen riippuvuutta arvioitaessa.

$$v = 10,836 \times R^{0,326} \quad (1)$$

$R$  = kaarresäde (m)

$v$  = ajonopeus kaarteessa (km/h).



Kuva 2. Kaarresäteen ja nopeuden välinen riippuvuus eksponenttimallin (kaava 1) mukaan (Bonneson 1993).

VTI:n simulointimallissa kaarresäde vaikuttaa liikennevirran keskinopeuteen kaavan 2 (Brodin & Carlsson 1986) mukaisesti.

$$v = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{I}{v_{tav}}\right)^2 + b\left(\frac{I}{r} - 0,001\right)}} \quad (2)$$

$r$  = kaarresäde (m)

$b$  = vakio (-)

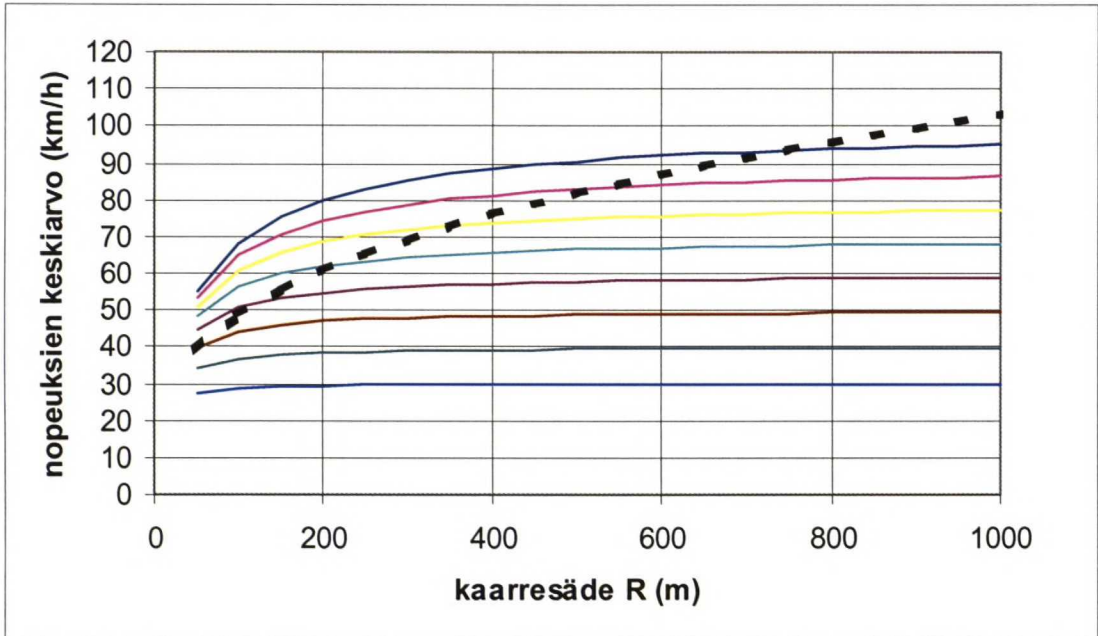
$v_{tav}$  = liikennevirran keskinopeus ennen kaarretta (m/s)

$v$  = keskinopeus kaarteessa (m/s).

Kaavasta 2 nähdään, että vakion  $b$  arvo vaikuttaa nopeuksiin eniten pienillä kaarresäteiden arvoilla.

Kuvassa 3 on esitetty kaarrenoepuksien keskiarvoja kaarresäteen ja ennen kaarretta mitattujen nopeuksien keskiarvon funktiona. Kuvaan on vertailun helpottamiseksi merkitty katkoviivalla kaavan 1 mukainen nopeus kaarresäteen funktiona.





Kuva 3. VTI:n simulointimallin kaarrenoitusmallin (kaava 2) antama kaarrenoitusmallin keskiarvon, kaarresäteen ja tavoitenoiteuden keskiarvon riippuvuus. Käyrät kuvaavat eri tavoitenoiteuksia (alin 30 km/h, ylin 100 km/h). Katkoviivalla on merkitty kaarresäteen ja nopeuden välistä riippuvuutta Bonnesonin (kaava 1) esittämän eksponenttimallin mukaan.

McLeanin (1978) mukaan 85 prosentin nopeus riippuu kaarresäteestä ja tavoitenoiteudesta kaavan 3 mukaisesti.

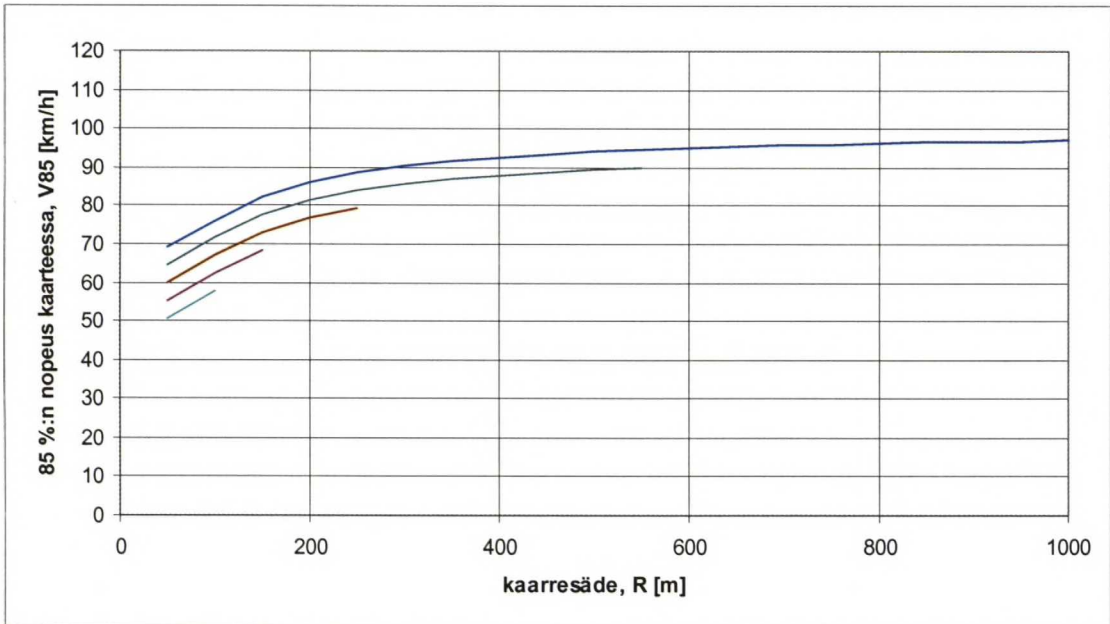
$$V_c(85) = 53,8 + 0,464 \times V_d(85) - \frac{3260}{R} + \frac{85000}{R^2} \quad (3)$$

$V_c(85)$  = 85 prosentin nopeus kaarteessa (km/h)

$V_d(85)$  = tavoitenoiteuksien 85 prosentin persentiili (km/h)

$R$  = kaarresäde (m).

Kuvassa 4 on esitetty kaavan 3 mukaan piirretyt 85 %:n nopeuksia kuvaavat käyrät kaarresäteen ja tavoitenoiteuden funktiona.



Kuva 4. Kaarteen 85 %:n nopeus kaarresäteen ja tavoitenopeuden 85 % persenttiin funktiona. Käyrät kuvaavat eri tavoitenopeuksia (alin 60 km/h, ylin 100 km/h).

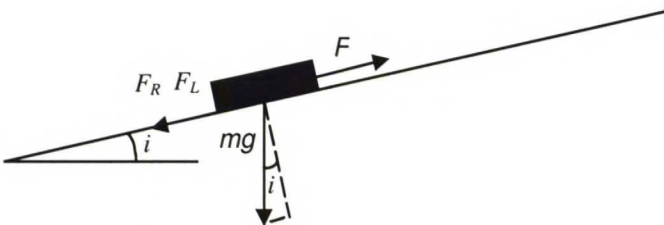
Edellä esitetyissä kaarresäteen ja kaarrenopeuden välisissä yhtälöissä ei ole huomioitu kaarteen pituuden vaikutusta ajonopeuksiin. Voidaan kuitenkin olettaa, että mitä pidempi kaarre on, sitä alempia ovat ajonopeudet kaarteen lopussa. Voi olla, että tällä ei ole niin suurta merkitystä, että sitä kannattaisi tässä yhteydessä selvittää enempää.

### 3.3 Pystygeometrian vaikutus ajonopeuksiin

#### 3.3.1 Pystygeometrian taustalla vaikuttava kinemaattinen teoria

Kuten edellä on mainittu, tien linjaosuuksilla pystygeometria asettaa ajoneuvojen nopeuksille vaakageometriaa tiukempia rajoituksia. Kaupunkiympäristössä ja liittymissä tilanne on toisin. Seuraavassa on esitetty kinemaattinen teoria, johon pystygeometrian vaikutus nopeuksiin perustuu.

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_L - F_R - mg \sin i \quad (4)$$



$F$  = ajoneuvon vetovoima pyöristä mitattuna (N)

$F_L$  = ilmanvastus (N)

$F_R$  = vierintävastus (N)

$m = \text{ajoneuvon massa (kg)}$

$g = \text{normaalikiikthyvyys (m/s}^2\text{)}$

$i = \text{tien pituuskaltevuus (rad)}$

$v = \text{ajoneuvon nopeus (m/s)}$

$t = \text{aika (s)}$ .

Ajoneuvoa liikuttava voima  $F$  on määritelty seuraavasti:

$$F = \frac{P}{v} \quad (5)$$

$P = \text{ajoneuvon teho pyöristä mitattuna}$ .

Ilmanvastus

$$F_L = C_L A v^2 \quad (6)$$

$C_L = \text{ilmanvastuskerroin (kg/m}^3\text{)}$

$A = \text{ajoneuvon keulan poikkipinta-ala, ns. otsapinta-ala (m}^2\text{)}$ .

Vierintävastus

$$F_R = m \cos i (C_{r1} + C_{r2} v) \cong m (C_{r1} + C_{r2} v) \quad (7)$$

$C_{r1}$  ja  $C_{r2} = \text{vierintävastuskertoimia}$ .

Koska pituuskaltevuus  $i$  saa vain pieniä arvoja, maan vetovoima voidaan yksinkertaistaa muotoon:

$$mg \sin i = mgi \quad (8)$$

Edellä esitetyn merkinnöin kaava 4 voidaan kirjoittaa:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{P}{v} - C_L A v^2 - m(C_{r1} + C_{r2} v) - mgi \quad (9)$$

Jakamalla puolittain  $m$ :llä saadaan yhtälö muotoon:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p}{v} - \frac{C_L A}{m} v^2 - (C_{r1} + C_{r2} v) - gi \quad (10)$$

$p = \text{ajoneuvon tehopainosuhde}$ .

Kaavan 10 avulla voidaan teoriassa laskea ajoneuvojen hetkellinen maksimikiikthyvyys kun ajoneuvokohtaiset vakiot ja ajoneuvon nopeus on määritelty. Esitetty malli on sikäli idealisoitu, että siinä oletetaan ajoneuvon pyörien kautta tiehen välittyvän maksimivoiman olevan vakio. Käytännössä voiman suuruus vaihtelee moottorin ominaisuuksista ja moottorin toimintatilasta riippuen.



### 3.3.2 Kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen liikennevirtavaikutuksen vertailu

Keskeinen selittäjä ajoneuvojen kiihtyvyy- ja nopeuden ylläpito-ominaisuuksille on tehopainosuhde. Mitä suurempi ajoneuvon tehopainosuhde on, sitä vähemmän pystygeometria asettaa rajoituksia kuljettajan nopeuden valinnalle. Muista asiaan vaikuttavista tekijöistä voidaan mainita esimerkiksi ajoneuvon otsapinta-ala, joka on määräävä tekijä ilmanvastuksen kannalta.

Normaalina perheautona pidettävän henkilöauton tehopainosuhde vaihtelee ajoneuvosta riippuen 40...111 kW/t. Täyteen kuormatulla pienitehoisella autolla suhde voi olla alhaisempikin. Raskaiden ajoneuvojen tehopainosuhteiden suuruusluokka on noin kymmenesosa henkilöautojen tehopainosuhteesta.

Kaksikaistaisilla teillä kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen ominaisuuksista johtuvat erot vaikuttavat liikennevirtaan enemmän kuin moottoriteillä. Suurin syy on kaksikaistaisten teiden rajoitetut ohitusmahdollisuudet ja se, että raskas ajoneuvo on hankalampi ohittaa kuin henkilö- tai pakettiauto. Moottoriteillä kevyen ja raskaan ajoneuvon ohittaminen ei eroa yhtä paljon kuin kaksikaistaisilla teillä.

Highway capacity manual –laskentamenettelyssä (HCM) raskaiden ajoneuvojen heikompien kiihtyvyysominaisuuksien vaikutus liikennevirtaan huomioidaan käyttämällä raskaiden ajoneuvojen henkilöautoyksikköekvivalenttia, joka ilmaisee kuinka montaa henkilöautoa yksi raskas ajoneuvo vastaa.

Henkilöautoekvivalentti on määritelty eri tarkoituksiin. Kertoimen arvo riippuu liikennemäärästä ja maaston ominaisuuksista. *Taulukossa 1* on esitetty henkilöautoekvivalenttien arviot määrittäessä liikennevirran keskinopeutta kaksikaistaisella tiellä.

*Taulukko 1. Henkilöautoekvivalenttien arvot määrittäessä liikennevirran keskinopeutta kaksikaistaisella tiellä (Transportation Research Board 1999).*

Poikkileikkausliikennemäärä (ha/h)	Henkilöautoekvivalentti raskaille ajoneuvoille	
	Tasainen maasto	Mäkinen maasto
0 – 600	1,7	2,5
600 – 1200	1,2	1,9
> 1200	1,1	1,5

Tasaisena maastona pidetään olosuhteita, joissa raskaat ajoneuvot pystyvät pitämään yllä samaa nopeustasoa kuin henkilöautot.

*Taulukosta 1* nähdään, että raskaiden ajoneuvojen henkilöautoekvivalentti pienenee liikennemäärän kasvaessa ja kasvaa mäkisempään maastoon siirryttäessä. Liikennemäärän kasvaessa koko liikennevirran nopeus alenee, eivätkä raskaiden ajoneuvojen heikommat ominaisuudet enää vaikuta niin paljon. Mäkisessä maastossa raskaiden ajoneuvojen nopeudet alenevat mäissä, mikä alentaa koko liikennevirran nopeutta.

Raskaiden ajoneuvojen vaikutus välityskykyyn huomioidaan omalla kertoimellaan, joka määräytyy raskaiden ajoneuvojen ja matkailuautojen henkilöautoekvivalenttien sekä niiden osuuksien perusteella. HCM –menettelyä on kuvattu tarkemmin luvussa 4.

### 3.3.3 Ajosimulaattoritutkimus

Tämän työn yhteydessä simuloitiin VEMOSIM-ajoneuvosimulaattorilla sarja simulointeja, joiden tarkoitus on esimerkin avulla havainnollistaa ajoneuvon käyttäytymistä erilaisissa nousuissa. VEMOSIM-ajoneuvosimulaattori on Tielaitoksessa työskentelevän yli-insinööri Olavi H. Koskisen kehittämä ajosimulaattori. Simulaattori on ajoneuvon kinematiikkaan perustuva tapahtumaorientoitunut laskentajärjestelmä. Simuloinnin tuloksena saadaan tiedot ajoneuvon nopeudesta, polttoaineen kulutuksesta ja pakokaasupäästöistä. Ajoneuvosimulaattorin toimintaa on kuvattu liitteessä 1. (Liikenneministeriö 1994.)

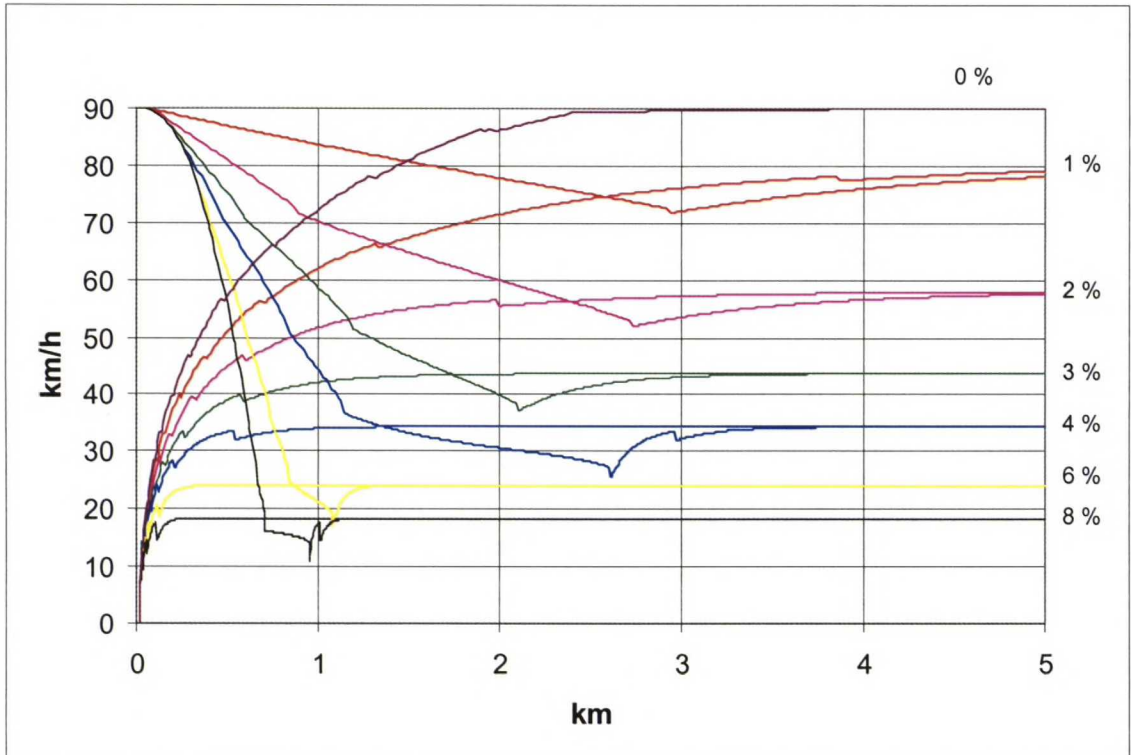
Esimerkkiajoneuvoksi valittiin 54 tonnia painava ja 22 metriä pitkä yhdistelmäajoneuvo. Ajoneuvon tehopainosuhde oli 5,4 kW/t. Ensin simuloitiin ajoneuvon nopeuden muutosta sen saapuessa tasamaalta 90 km/h nopeudella nousuihin, joiden jyrkkyys vaihteli 1 %:n ja 8 %:n välillä. Alkunopeus valittiin raskaiden ajoneuvojen nopeusrajoitusta korkeammaksi, koska todellisuudessa kuljettajat pyrkivät ennen nousuja kiihdyttämään nopeuttaan yli sallitun nopeuden. Alkunopeudeksi valittiin 90 km/h siksi, että raskaiden ajoneuvojen nopeudenrajoitin rajoittaa ajoneuvon nopeuden 89 km/h:iin.

Simuloinnin tutkimusasetelma asetettiin mahdollisimman todenmukaiseksi. Nousun alkuun asetettiin siirtymäkaari, jonka säde oli 7000 m. Jos siirtymäkaarta ei olisi, nousujen alussa ajoneuvon nopeus olisi liian suuri, koska todellisuudessa nopeus laskee jo siirtymäkaaren matkalla. Siirtymäkaaren vaikutus kasvaa tarkasteltavan nousun jyrkkyyden kasvaessa.

Toisessa simulointikokeessa simuloitiin tilannetta, jossa raskas ajoneuvo kiihdyttää paikaltaan erilaisiin nousuihin. Tässäkin tapauksessa nousun alussa oli kupera taite, jonka säde oli 7 000 metriä.

*Kuvassa 5* on esitetty tulokset simuloinnista. Nollasta lähtevät käyrät kuvaavat tilannetta, jossa ajoneuvoyhdistelmä kiihdyttää paikaltaan ylämäkeen. Vastaavasti laskevat käyrät kuvaavat tilannetta, jossa ajoneuvo saapuu 90 km/h vakionopeudella ylämäkeen, jossa sen nopeus alkaa laskea.





Kuva 5. VEMOSIMilla simuloitut matka-nopeus käyrät 54 tonnia painavalle ajoneuvoyhdistelmälle, jonka tehopainosuhte on 5,4 kW/t. Yksittäiset käyrät kuvaavat jyrkkyydeltään erilaisia nousuja. Hidastuvuutta tutkittaessa on oletettu, että nousun alussa on kovera taite, jonka säde on 7 000 metriä.

Kuvasta 5 nähdään, että nousun pituudella on huomattava merkitys sen nopeutta alentavaan vaikutukseen. Kahden prosentin nousussa ajoneuvon nopeus laskee ensimmäisen kilometrin matkalla noin 70 kilometriin tunnissa. Nousun jatkuessa vielä toisen kilometrin, nopeus laskee 60 kilometriin tunnissa. Kolmen prosentin nousussa vastaavat nopeudet ovat 60 ja 40 kilometriä tunnissa. Kiihdytystä vaakasuoralla tiellä kuvaavan käyrän perusteella voidaan arvioida matkaa, joka tarvitaan nopeuden nostoon takaisin tavoitenopeuteen vaakasuoralla tiellä. Kiihdytys 70 kilometristä tunnissa 90 kilometriin tunnissa vaatii kuvan perusteella noin 1,5 kilometrin matkan. Alkunopeuksista 40 ja 60 kilometriä tunnissa vastaavat matkat ovat noin 2 ja 2,3 kilometriä. Yhden kilometrin mittainen kahden prosentin nousu, jonka jälkeen tie on vaakasuora, laskee raskaan ajoneuvon nopeuden alle 90 kilometriin tunnissa yhteensä noin 2,5 kilometrin matkalla.

Kun vielä huomioidaan se, että nousut vaikuttavat heikentävästi myös henkilöautojen kykyyn ohittaa edellä ajavia, voidaan todeta, että raskaiden ajoneuvojen nopeuskäyttäytyminen on erittäin merkittävää koko liikennevirran nopeuksien kannalta. Suomen tieverkolla pitkiä nousuja on kuitenkin vähän. Joissakin paikoissa pitkien nousujen vaikutusta on pyritty vähentämään rakentamalla mäkiin nousukaistoja, joiden kohdalla ohittaminen on vastaantulevasta liikenteestä riippumatonta.

Kiihdytystä ja hidastusta kuvaavat käyrät kohtaavat toisensa tasapainonopeuden kohdalla. Tasapainonopeus on nopeus, jota ajoneuvo pystyy ylläpitämään tietynlaisessa nousussa. Kuvasta nähdään, että ajoneuvon saapuessa ylämäkeen sen nopeus laskee

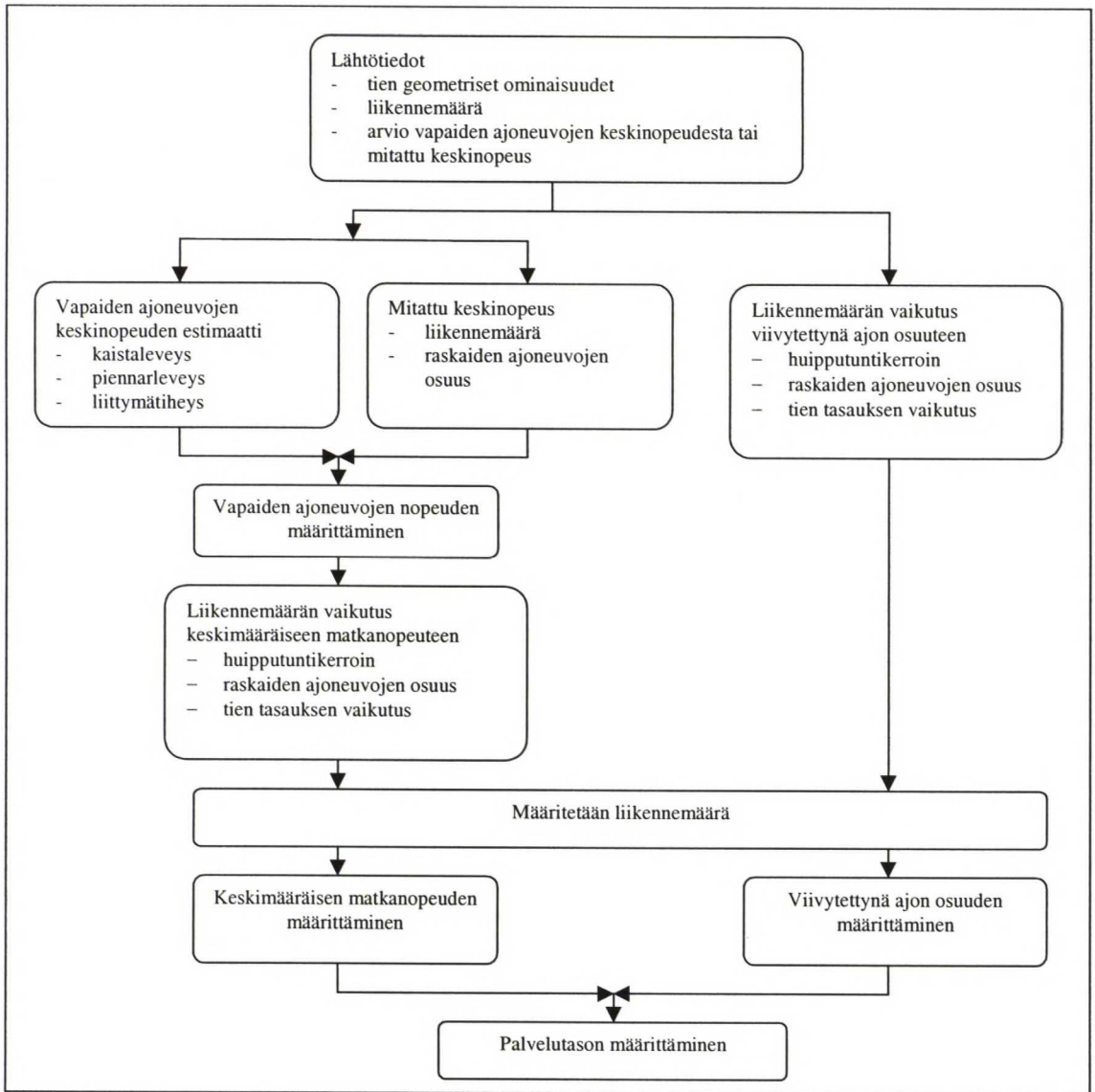


alle tasapainonopeuden. Tämä johtuu siitä, että vauhdin hidastuessa vaihdetta joudutaan vaihtamaan alaspäin. Tällöin kohdataan tilanne, jossa suuremmalla vaihteella ei kyetä ylläpitämään nopeutta, jonka ylläpito onnistuu alemmalla vaihteella. Lisäksi asiaan vaikuttaa se, että simuloinnissa alaspäin vaihdettaessa vaihdettiin kerralla kaksi vaihdetta, jolloin tasapainotilaa vastaavalle vaihteelle mentiin alemman vaihteen kautta. Alaspäin vaihdettaessa yhden vaihteen ylittäminen on yleistä raskailla ajoneuvoilla. Myös nopeuskäyrien epätasaisuus johtuu vaihteen vaihtamisesta.

#### **4 HCM –MENETTELY KAKSIKAISTAISEN TIEN LIIKENNEVIRRRAN ARVIOINNISSA**

Vuonna 2000 ilmestynyt Highway Capacity Manualin (HCM) uusi versio sisältää eräitä uusia kaksikaistaisten teiden liikennevirtaan liittyviä asioita (Transportation Research Board 1999). Tässä käsitellään uutta laskentamenettelyä niiltä osin kuin se koskettaa kaksikaistaisten tien geometrian vaikutusta liikennevirtaan. Highway Capacity Manualin kaksikaistaisten teiden laskentamenettelyyn on viitattu luvussa 3.3.2 käsiteltäessä raskaiden ajoneuvojen vaikutusta liikennevirtaan.

*Kuvassa 6* on esitetty kaaviokuva HCM 2000:n kaksikaistaisten teiden laskentamenettelyn kulusta. Seuraavassa on selvitetty tämän tutkimuksen kannalta menettelyn tärkeimmät vaiheet.



Kuva 6. Kaksikaistaisten teiden laskentamenettely HCM 2000:n mukaan (Transportation Research Board 1999).

HCM 2000:ssa esitetään kaksi menetelmää nopeuksien määrittämiseen vapaissa olosuhteissa. Toinen menetelmä perustuu tarkasteltavalla tiellä tehtäviin nopeusmittauksiin, eikä sitä tarkastella tässä yhteydessä enempää. Seuraavassa esitettävää menetelmää käytetään silloin kun mittauksia ei ole käytettävissä. Tässä menetelmässä vapaa nopeus  $FFS$  määritetään seuraavasti mukaan (Transportation Research Board 1999):

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A \quad (11)$$

$BFFS$  = nopeus ideaalisissa olosuhteissa (km/h)

$f_{LS}$  = kaista- ja piennarleveystestä aiheutuva korjaustekijä (km/h)

$f_A$  = liittymätiheydestä aiheutuva korjaustekijä (km/h)

Ideaaliset olosuhteet on määritelty seuraavasti:

- mitoitusnopeus vähintään 97 km/h (60 mailia/h),
- kaistan leveys vähintään 3,66 m (12 jalkaa),
- pientareen leveys ilman sivuesteitä vähintään 1,83 m (6 jalkaa),
- ei ohituskielto-osuuksia,
- liikennevirassa vain henkilöautoja,
- liikennevirran suuntajakauma 50/50,
- ei liikenteenohjauslaitteiden tai kääntyvien ajoneuvojen aiheuttamaa häiriötä,
- tasainen maasto.

Korjauskertoimien  $f_{LS}$  ja  $f_A$  arvot on esitetty taulukoissa 2 ja 3.

Tien leveyden vaikutus nopeuksiin johtuu leveämmän tien kuljettajille aiheuttamasta turvallisuuden tunteesta. Mitä leveämpi tie on, sitä suurempi on sivuttaisetäisyys vastaantulevaan ajoneuvoon. Samoin tieltä suistumisen mahdollisuus pienenee tien leventyessä.

Taulukko 2. Korjauskertoimen  $f_{LS}$  arvot kaista- ja piennarlevyden mukaan (Transportation Research Board 1999).

Kaistaleveys [m]	Nopeusalenemat [km/h]			
	Piennarleveys [m]			
	≥0 <0,6	≥0,6 <1,2	≥1,2 <1,8	≥1,8
2,7<3,0	10,3	7,7	5,6	3,5
≤3,0 <3,3	8,5	5,9	3,8	1,7
≤3,3 <3,6	7,5	4,9	2,8	0,7
≥3,6	6,8	4,2	2,1	0,0

Liikennevirtaan liittyvät ajoneuvot aiheuttavat häiriötä liikennevirtaan ja alentavat näin nopeuksia. Korjauskerroin  $f_A$  kuvaa liittymätiheydestä aiheutuvaa nopeuden alenemaa sellaiseen tieosaan nähden, jolla ei ole liittymiä. Liittymiksi ei lasketa vähäliikenteisiä liittymiä eikä liittymiä, joiden havaitseminen päätieltä käsin on vaikeaa. Taulukossa 3 on esitetty korjauskertoimen  $f_A$  arvot. (Transportation Research Board 1999).

Taulukko 3. Korjauskertoimen  $f_A$  arvot liittymätiheyden mukaan (Transportation Research Board 1999).

Liittymätiheys [liittymiä/km]	Nopeusalenemat [km/h]
0	0,0
6	2,5
12	5,0
18	7,5
≥ 24	10,0



Tarkasteltavat liikennemäärät määritetään viidentoista minuutin jaksoissa. Yksikkönä käytetään henkilöautoyksikköä.

Liikennevirran keskimääräinen matkanopeus määritetään kaavan 12 avulla.

$$ATS = FFS - 0,0125v_p - f_{np} \quad (12)$$

$ATS$  = keskimääräinen matkanopeus, molemmat suunnat yhteensä

$f_{np}$  = ohituskielto-osuuksien vaikutusta kuvaava korjaustekijä

$v_p$  = 15 minuutin jakson tuntiliikennemäärä.

Kaavasta 12 nähdään, että kun liikennemäärä kasvaa 1000 hay/h liikennevirran keski-  
nopeus laskee 12,5 km/h.

Viivytettynä ajon osuus määritetään kaavojen 13 ja 14 avulla.

$$PTSF = BPTSF + f_{d/np} \quad (13)$$

$$BPTSF = 100[1 - \exp(-0,000879 v_p)] \quad (14)$$

$PTSF$  = viivytettynä ajon osuus (percent time spent following)

$BPTSF$  = liikennemäärästä riippuva viivytettynä ajon osuus (base percent time spent following)

$f_{d/np}$  = suuntajakaumasta ja ohituskielto-osuuksien määrästä riippuva viivytettynä ajon osuus  
(taulukoitu)

$v_p$  = liikennemäärä (hay/h).

## 5 OHITTAMINEN KAKSI- JA KOLMIKAISTAISILLA TEILLÄ

### 5.1 Ohitustarve

Liikennevirran ohitustarve on se ohitusten määrä, joka olisi liikennevirrassa suoritettava, jos liikennevirrassa olevat ajoneuvot etenisivät kukin omalla vakionopeudellaan. Yksittäisen ajoneuvon näkökulmasta ohitustarve voi olla aktiivista tai passiivista. Ohitusta kutsutaan aktiiviseksi kun tarkasteltava ajoneuvo ohittaa toisen ajoneuvon. Passiivisessa ohituksessa ajoneuvo tulee ohitetuksi. (Kallberg 1980.)

Ohitustarve syntyy liikennevirrassa liikkuvien kuljettajien tavoitenopeuseroista. Korkeampaa tavoitenopeutta tavoittelevat kuljettajat pyrkivät ohittamaan alemmaa tavoitenopeutta ylläpitäviä kuljettajia.

Yksittäisen ajoneuvon ohitustarve riippuu ajoneuvon tavoitenopeuden suhteesta kaikkien liikennevirrassa liikkuvien ajoneuvojen nopeuden jakaumaan. Mitä suurempi osa muiden tiellä liikkuvien ajoneuvojen nopeuksista on tarkasteltavan ajoneuvon nopeutta pienempiä, sitä suurempi on tarkasteltavan ajoneuvon aktiivinen ohitustarve.

### 5.1.1 Ohitustarve liikennevirtateorian mukaan

Yksittäisen ajoneuvon aktiivinen ohitustarve tietyn tarkasteluajavälin kuluessa voidaan määrittää laskemalla yhteen niiden ajoneuvojen lukumäärä, jotka täyttävät ehdot (Kallberg 1980):

$$\Delta s_i / (v - v_i) < \Delta t \quad (15)$$

ja

$$v - v_i > 0 \quad \text{ja} \quad \Delta s_i > 0 \quad (16)$$

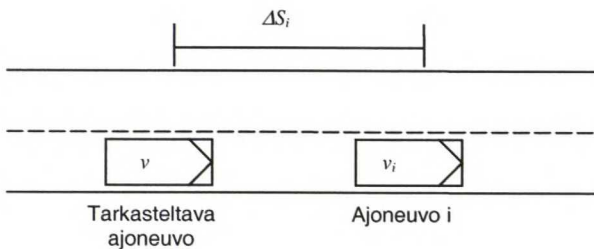
$v$  = tarkasteltavan ajoneuvon nopeus

$v_i$  = ajoneuvon  $i$  nopeus

$\Delta s_i$  = ajoneuvon  $i$  etäisyys tarkasteltavasta ajoneuvosta

$\Delta t$  = tarkasteluajanjakso.

Suureet  $\Delta s_i$  ja  $\Delta t$  tulee määrittellä tarkasteluajavälin alussa. Kuvassa 7 on esitetty suu-reet  $v$ ,  $v_i$  ja  $\Delta s_i$ .



Kuva 7. Suureet  $v$ ,  $v_i$  ja  $\Delta s_i$ .

Ohitustarve voidaan myös ilmaista tuntematta liikennevirtaa yksittäisen ajoneuvon tasolla. Oletetaan funktion  $f(v)$  kuvaavan nopeuden aikajakauman frekvenssifunktiota niin, että keskimäärin  $\Delta t$   $f(v)dv$  kappaletta nopeudella  $v \dots v+dv$  kulkevaa ajoneuvoa ohittaa tarkastelupisteen ajassa  $\Delta t$  (kuva 7).

Nopeudella  $v \dots v+dv$  kulkevia ajoneuvoja matkaa  $\Delta s$  kohti on siis keskimäärin

$f(v) \cdot dv \cdot \Delta s / v = \Delta s \cdot g(v) dv$  kappaletta, jossa  $g(v) = f(v)/v$  tarkoittaa matkajakauman frekvenssifunktiota.

Liikennevirran keskimääräinen matkanopeus  $\bar{v}_1$  voidaan määrittellä seuraavasti.

$$\text{Kaavalla } \int_m^n f(v) dv = q \quad (17)$$

saadaan liikennemäärä  $q$  ja kaavalla

$$\int_m^n g(v)dv = d \quad (18)$$

liikennetiheys  $d$ . Kaava

$$\bar{v}_1 = q/d \quad (19)$$

määrittelee liikennevirran keskimääräisen matkanopeuden  $\bar{v}_1$ .

$m$  = pienin liikennevirrassa esiintyvä nopeus

$n$  = suurin liikennevirrassa esiintyvä nopeus.

Mikäli kaikki liikennevirrassa liikkuvat ajoneuvot saavuttavat tavoitenopeutensa, nopeudella  $x$  liikkuvan ajoneuvon aktiivinen ohitustarve on keskimäärin

$$o'_i(x) = \int_m^x g(v)(x-v)\Delta t dv = \int_m^x \Delta t G(v)dv \quad (20),$$

missä matkajakauman summafunktio  $G(v) = \int_m^v g(v)dv$ .

Wardrop (1952) on esittänyt ohitustarpeelle yhtälön:

$$P = \frac{0,56 * \sigma * Q^2}{V^2} \quad (21)$$

$P$  = ohitustarve (ohitusta/km/h)

$Q$  = liikennemäärä (ajon./h)

$V$  = vapaiden ajoneuvojen keskinopeus (km/h)

$\sigma$  = vapaiden ajoneuvojen nopeuksien keskihajonta (km/h).

Oletusnopeusjakauma on normaalijakauma.

### 5.1.2 Ohitustarve yksittäisen kuljettajan näkökulmasta

Kuljettajan tavoittaessa edessä ajavan hitaamman kuljettajan hän tekee jossain vaiheessa päätöksen yrittääkö ohittaa edessä ajavan vai jatkaako ajamista edessä ajavan takana. Tähän päätökseen vaikuttavat monet seikat. Näitä ovat ainakin:



1. oman tavoitenopeuden ja edessä ajavan nopeusero,
2. kokemukseen perustuva käsitys ohitusmahdollisuuksista kyseisellä tiellä kyseisenä ajankohtana,
3. matkan määränpään läheisyys,
4. oman ja edessä ajavan ajoneuvon ominaisuudet sekä
5. kuljettajan henkilökohtainen ajotapa ja näkemys omasta käyttäytymisestä.

Eri tekijöiden keskinäistä suuruutta ei tunneta. Varmaa kuitenkin lienee, että kuljettajan ominaisuudet ovat keskeisessä asemassa päätöstä tehtäessä.

## 5.2 Ohitustilanteiden luokittelu

Merkittävin ero kaksikaistaisten teiden ja useampikaistaisten teiden välillä on yksiajo-rataisilla teillä liikkuvien kuljettajien rajoitettu mahdollisuus ohittaa muita tiellä liikkuja. Kaksikaistaisella tiellä kuljettajan on ennen ohitusta varmistuttava siitä, että ohitukseen käytettävä vastaantulevan liikenteen kaista on vapaa ohitukseen tarvittavalta matkalta. Väylillä, joilla on enemmän kuin yksi kaista suuntaansa ohittaminen ei riipu vastaantulevasta liikenteestä.

Ohitustilanteet voidaan luokitella viiden perusominaisuuden avulla (McLean 1989):

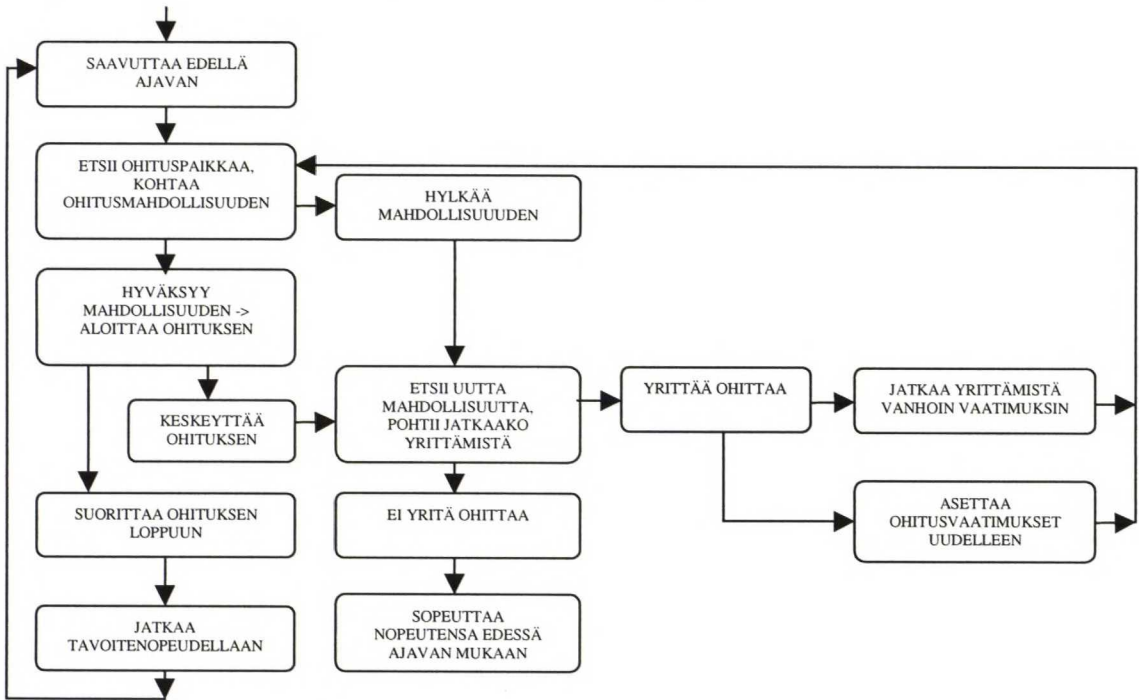
1. ohitettavan ajoneuvon tyyppi (kevyt/raskas),
2. ohitettavan ajoneuvon nopeus,
3. ohittavan ajoneuvon tyyppi (kevyt/raskas),
4. ohituksen tyyppi (kiihdytys-/lentävä ohitus) ja
5. ohitusolosuhteet (näkemä, sääolosuhteet).

Kiihdytsohituksella tarkoitetaan ohitusta, jossa ohittaja ja ohitettava ajavat ennen ohitusta peräkkäin samaa nopeutta. Ohituksen alussa ohittaja kiihdyttää nopeuttaan ja siirtyy vastaantulevan liikenteen kaistalle. Lentävässä ohituksessa ohittaja aloittaa ohituksen heti saavutettuaan ohitettavan ilman, että ennen ohitusta ajaisi tämän perässä.

## 5.3 Ohituspäätökseen vaikuttavat tekijät

Päätöksen ohituksen aloittamisesta tekee ohittavan ajoneuvon kuljettaja. Hän yksin arvioi onko ohittaminen ylipäättään tarpeen ja millainen riski ohittamiseen sisältyy. Kuljettaja tekee päätöksen omien lähinnä näköhavaintojensa perusteella. Kuljettajan päätöksentekoon voi vaikuttaa myös muiden tienkäyttäjien käyttäytyminen, joista ohitettavan ajoneuvon kuljettajan käyttäytyminen on merkityksellisintä. Hidastamalla nopeuttaan, kuljettamalla ajoneuvoaan tien reunassa tai antamalla merkin ohittajalle tien ollessa vapaa ohitukselle hän voi edesauttaa hyväksytyin ohituspäätöksen syntymistä.

Mikrosimulointimallin ohitusprosessia kehitettäessä on tärkeää tarkastella kuljettajata-son päätöksentekoa ja pyrkiä jäljittelemään siinä tapahtuvia ilmiöitä mahdollisimman tarkkaan. *Kuvassa 8* on esitetty kaaviokuva ohittamiseen liittyvästä päätöksenteosta.

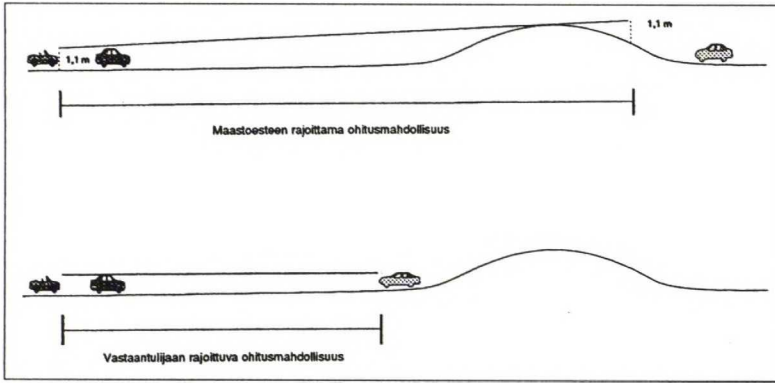


*Kuva 8.* Ohituksen tavallisella kaksikaistaisella tiellä liittyvä päätöksentekoprosessi.

#### 5.4 Ohitusmahdollisuuden hyväksyminen

Kaksikaistaisella tiellä ohituspäätöksen tekemiseen vaikuttaa ratkaisevasti vastaantulevan kaistalla ohittamiseen käytettävissä oleva vapaa tila. Tämän vapaan tilan pituus riippuu teoriassa vain vastaantulevassa liikennevirrassa liikkuvien ajoneuvojen aikavälien pituudesta (Kaistinen 1994). Jotta ohitusta harkitseva kuljettaja voi varmistua vapaan tilan pituudesta on hänen voitava nähdä ohituksessa vaatimansa vapaan tilan verran eteenpäin.

Kuljettajan kohtaamaa ohitusmahdollisuutta voi rajoittaa joko maastoeste tai vastaan- tuleva ajoneuvo. Jos rajoittava tekijä on maastoeste, kuljettajan on varauduttava siihen, että heti näkemäalueen ulkopuolella on vastaantulija (*kuva 9*).



Kuva 9. Ohitusnäkemän rajoittuminen maastoesteeseen ja vastaantulevaan ajoneuvoon (Kaistinen 1994).

Useissa tutkimuksissa on todettu kuljettajien edellyttävän maastoesteeseen tapauksessa pidempää ohitusmahdollisuutta kuin vastaantulevan ajoneuvon tapauksessa. Tulos viittaa siihen, että kuljettajat ottavat huomioon, että heidän tekemistään arviointivirheistä (etäisyys maastoesteeseen, vastaantulijan nopeus) johtuen mahdollisuus ohitukseen ei olekaan riittävä, vaikka se sitä todellisuudessa olisikin. Seuraavassa esitettävä teoria tukee edellä esitettyä päätelmää.

Gibbs (1968) on esittänyt kolme teoriaa kuljettajien päätöksenteosta ohitustilanteessa:

1. **Aikavälin pituuden arviointi** (*time hypothesis*). Kuljettajien päätöksenteko perustuu arvioon vastaantulevassa virrassa olevan aikavälin pituudesta.
2. **Esteen tai vastaantulijan etäisyyden arviointi** (*distance hypothesis*). Kuljettaja arvioi vastaantulevan ajoneuvon tai näkemää rajoittavan maastoesteeseen etäisyyden, mutta ei pysty arvioimaan kuinka nopeasti hän kohtaa ohitusta rajoittavan esteen.
3. **Yhdistetty aikavälin pituuden ja esteen tai vastaantulijan etäisyyden arviointi** (*modified-time/distance hypothesis*). Kuljettajat arvioivat ohitusmahdollisuutta ajan perusteella, mutta eivät pysty ennustamaan vastaantulevan nopeutta. Arvioitua kovempaa ajavan vastaantulevan tapauksessa ohitusmahdollisuuden pituus yliarvioidaan ja vastaavasti oletettua hitaammin ajavan vastaantulijan tapauksessa aliarvioidaan.

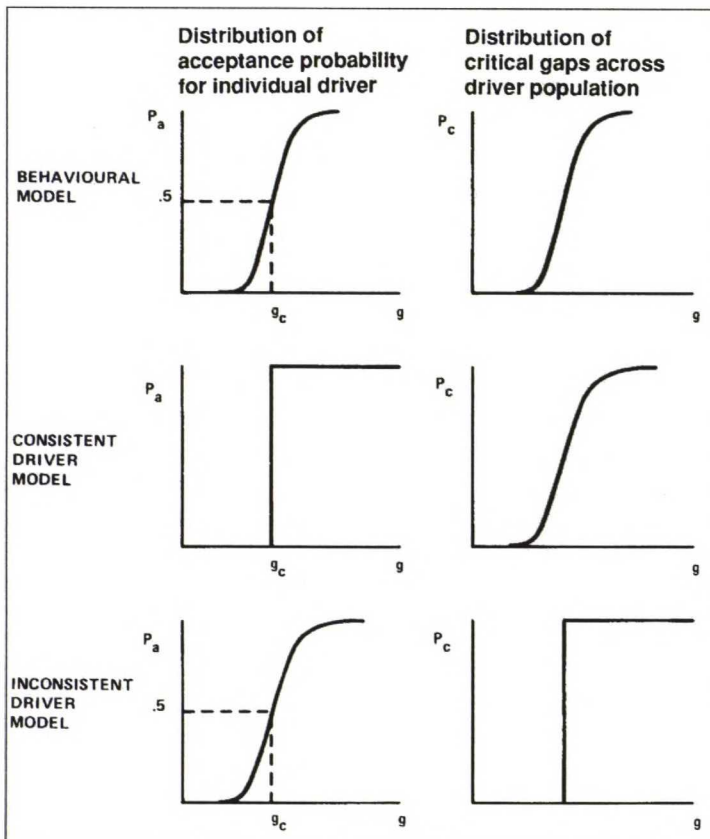
Teorioista viimeinen on kahden edellisen synteesi ja vastannee parhaiten kuljettajien todellista päätöksentekoa.

McLean (1989) on esittänyt kolme teoriaa, joiden avulla voidaan selittää ohitusmahdollisuuden hyväksymistä yksittäisten kuljettajien ja yksittäisistä kuljettajista koostuvassa liikennevirrassa.



1. **Käyttäytymismalli** (*behavioural model*) mukaan yksittäiset kuljettajat eivät pysty arvioimaan johdonmukaisesti heille tarjoutuvia ohitusmahdollisuuksia, vaan saattavat tehdä samanlaisen ohitusmahdollisuuden kohdatessaan joko hyväksyvän tai hylkäävän ohituspäätöksen. Koko kuljettajapopulaatiota tarkasteltaessa hyväksytyn ohitusmahdollisuuden pituus vaihtelee.
1. **Johdonmukaisten kuljettajien teorian** (*consistent driver theory*) mukaan jokainen yksittäinen kuljettaja tekee ohituspäätöksensä täysin johdonmukaisesti. Jokaisella kuljettajalla on siis oma ohitusmahdollisuuden hyväksymistaso. Koska tämä hyväksymistaso vaihtelee kuljettajien välillä, kuljettajapopulaation ohitusmahdollisuuden hyväksymistasoa kuvaava käyrä ei ole suora.
2. **Epäjohdonmukaisten kuljettajien teoria** (*inconsistent driver theory*) perustuu oletukseen, että kaikkien kuljettajien ohitusmahdollisuuden hyväksymistä kuvaava funktio on sama. Tällöin koko kuljettajapopulaatio tekee saman ohituspäätöksen (hylkää tai hyväksyy) kohdatessaan saman ohitusmahdollisuuden.

Kuvassa 10 havainnollistetaan edellä esitettyjä teorioita esittämällä yksittäisen kuljettajan ja kuljettajajoukon ohitusmahdollisuuden hyväksymistä kuvaavat todennäköisyysjakaumat eri teorioiden mukaan.



Kuva 10. Kolme teoriaa yksittäisen kuljettajan ja kuljettajapopulaation ohitusmahdollisuuden hyväksymisen jakautumisesta. (McLean 1989).

## 5.5 Ohituskäyttäytymistä käsittelevät tutkimus

Ohituskäyttäytymistä on tutkittu kenttäkokeiden avulla seuraamalla erilaisin menetelmin kuljettajien käyttäytymistä ohitustilanteissa. Tutkimustuloksia analysoitaessa on huomioidava missä ja milloin ne on tehty, koska tutkimusajankohta ja -paikka vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Esimerkiksi liikennekulttuuri voi aiheuttaa eroa tuloksiin verrattaessa amerikkalaisten ja skandinaavisten tutkimusten tuloksia. Tutkimusten koeasetelmalla ja mittausmenetelmällä voi myös olla vaikutusta tuloksiin.

Kaistinen (1994) tutki ohituskäyttäytymistä kaksikaistaisilla teillä Suomessa vuosina 1987 - 1991. Tutkimus oli Suomessa ensimmäinen ja toistaiseksi ainut. Tutkimuksissa selvitettiin kenttämittausten avulla millaisissa tilanteissa kuljettajat lähtevät ohittamaan, kuinka kauan ohittaminen keskimäärin kestää ja poikkeako ohituskäyttäytyminen eri levyisillä teillä. Kenttätutkimus tehtiin pääosin liikennevirran mukana liikkuvasta ajoneuvosta ohitustapahtumaa videoimalla ja ohituksen eri osapuolten nopeuksia seuraamalla.

Tutkimuksessa päädyttiin käyttämään ohitustodennäköisyyden tunnuslukujen estimoimiseksi Gompertz -funktiota (kaava 22).

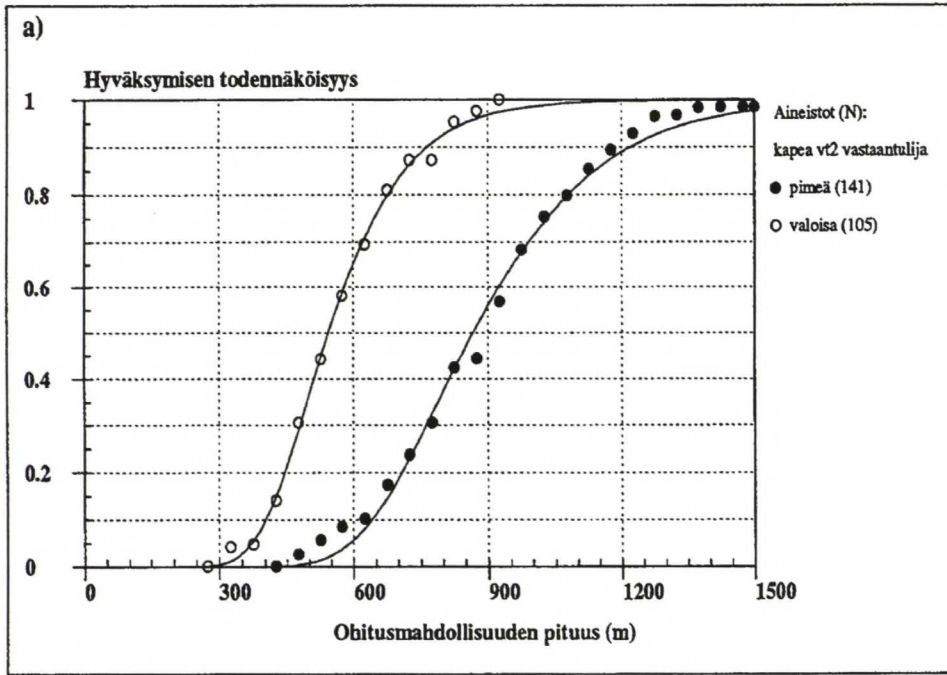
$$P(s) = e^{-Ae^{ks}} \quad (22)$$

$P$  = todennäköisyys, että kuljettaja hyväksyy kohtaamansa ohitusmahdollisuuden

$A, k$  = vakioita

$s$  = vapaan näkemän pituus metreinä tai sekunteina.

Kuvassa 11 on esitetty ohitusmahdollisuuden hyväksymisen todennäköisyys Kaistisen mukaan kapealla tiellä kun näkemää rajoittaa vastaan tuleva ajoneuvo.

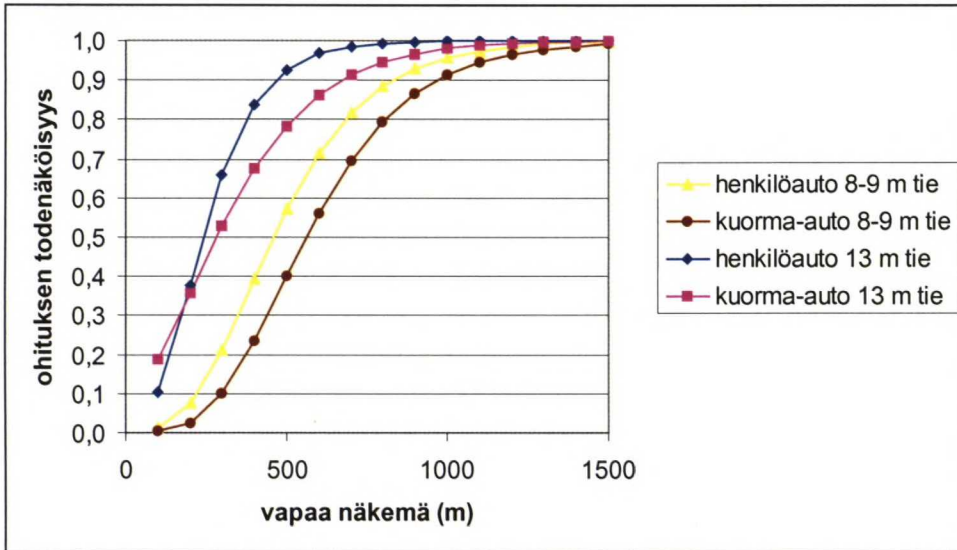


Kuva 11. Ohitusmahdollisuuden hyväksymisen todennäköisyys valoisalla ja pimeällä, kun ohitusmahdollisuutta rajoittaa vastaan tuleva ajoneuvo (Kaistinen 1994).

Kuvasta 11 nähdään valoisuuden vaikutus hyväksytyyn näkemän pituuteen. Pimeällä kuljettajat edellyttävät pidemmän vapaan näkemän ennen ohituksen aloittamista. Osa kuljettajista näyttäisi tutkimuksen mukaan pidättäytyvän ohittamisesta pimeällä kokonaan. Pimeällä ohitukset myös kestivät kauemmin kuin valoisalla. (Kaistinen 1994).

Carlsson (1990, 1991, 1993) on tutkinut ohittamista Ruotsissa 1980-luvun lopulla ja 1990-luvun alussa. Tutkimukset tehtiin 8-9 metriä ja 13 metriä leveillä teillä. Pääasiallinen tutkimusmenetelmä oli videokuvauksen tien laidasta.





Kuva 12. Ohittamisen todennäköisyys Carlssonin (1990, 1991) mukaan, kun ohitettava on henkilöauto tai kuorma-auto 8-9 ja 13 metriä leveällä tiellä. Ohittajana on kaikissa tapauksissa henkilöauto.

## 5.6 Ohituskaidan kohdalla ohittamiseen liittyviä erityispiirteitä

Ohituskaidan ohitustapahtumassa on yhteneväisyyksiä sekä kaksikaistaisen tien että moottoritien ohitustapahtumaan. Ohittamista ohituskaidalla voidaan verrata ohittamiseen kaksikaistaisella tiellä sellaisessa kuvitteellisessä tapauksessa, jossa voidaan olla varmoja, ettei vastaantulevaa liikennettä ole tietyllä matkalla.

Taulukossa 4 on esitetty ohituspäätöksen tekoon, ohituksen aloitukseen ja ohituksen päättämiseen eli paluuseen omalle kaistalle eri tietyypeillä vaikuttavia tekijöitä.

*Taulukko 4. Ohituksen aloittamiseen ja lopettamiseen liittyvän päätöksenteon vertailu eri tietyypeillä. Vaikutussarakkeessa – tarkoittaa, että kyseinen tekijä ei voi vaikuttaa päätöksentekoon kyseisellä tietyypillä. 0 tarkoittaa, että tekijä voi vaikuttaa päätökseen, mutta käytännössä harvoin vaikuttaa. + tarkoittaa, että tekijä on merkityksellinen ja +++, että tekijä on erittäin merkityksellinen.*

		Tekijän vaikutus päätöksentekoon eri tietyypeillä		
		2-kaistainen tie	Moottoritie	ohituskaista
Ohituspäätös ja ohituksen aloitus	• riittävä näkemä / ohituskaistan pituus	+++	+	+
	• vastaantulevien kaista vapaa	+++	-	++
	• ohituskaista vapaa	-	+++	+++
	• mahdollisuus palata omalle kaistalle	++	+	++
Paluu omalle kaistalle	• vastaantuleva liikenne	+++	-	+
	• näkemä riittämätön	+++	+	+
	• takaa tuleva paine	+	++	+
	• peruskaistalla riittävä aikaväli	+	+++	+++
	• ohituskaistan loppu tai ohituskielto	+	+	++

## 5.7 Ohittaminen ja tavoitenopeuden valinta

Tavoitenopeus on kuljettajakohtainen nopeus, jota kuljettaja pyrkii ylläpitämään olosuhteet huomioiden. Liikennevirtaan liittyvä kuljettaja valitsee tavoitenopeutensa ja pyrkii ylläpitämään valitsemaansa nopeutta ellei joku seikka edellytä tavoitenopeuden uudelleen asettamista. Tavoitenopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. sää ja keli, nopeusrajoitus, muiden liikennevirrassa liikkuvien ajoneuvojen nopeus, tien ominaisuudet ja kuljettajan subjektiivinen käsitys itselleen asettamastaan aikataulusta. Yksittäisen kuljettajan tavoitenopeus ei siis ole vakio, vaan se voi vaihdella erilaisissa tilanteissa.

Tavoitenopeuden valinta riippuu kuljettajasta. Myös herkkyys muuttaa valittua tavoitenopeutta ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta vaihtelee kuljettajien välillä. Toiset kuljettajat sopeuttavat tavoitenopeutensa muun liikenteen nopeuteen herkemmin kuin toiset joutuessaan jatkuvasti ohittamaan pitääkseen yllä alkuperäistä nopeuttaan.

Ohituksen aikana ohittavan ajoneuvon nopeus nousee yleensä korkeammaksi kuin sen tavoitenopeus tai vallitseva nopeusrajoitus. Käytännössä ohittaminen nopeuden pysyessä nopeusrajoituksen alapuolella on harvoin mahdollista.

Liikenteessä on vakiintunut ajotapa, jossa osa kuljettajista asettaa tavoitenopeutensa nopeusrajoitusta korkeammaksi. Osa näistä kuljettajista pitää kiinni tavoitenopeudestaan ja joutuu ohittamaan hieman itseään hitaammin ajavia kuljettajia. Jotta ohittaminen olisi mahdollista, on ohituksen aikana käytettävä suurempaa nopeutta kuin nopeusrajoitus sallii.

## 5.8 Ohjeet ohitusnäkemistä tien suunnittelussa Suomessa

Ohitusnäkemällä tarkoitetaan tiensuunnittelussa sitä matkaa, jonka etäisyydelle ajoneuvon kuljettajan tulee voida nähdä tien suuntaan voidakseen ohittaa edellään ajavan ajoneuvon turvallisesti. Näkemällä tarkoitetaan sitä matkaa, jonka kuljettaja näkee tien suuntaan.

Ohitusnäkemäpituutta määritettäessä kuljettajan silmäpisteen korkeutena pidetään tavallisesti 1,1 metriä ja estekorkeutena 0,6 metriä. Silmäpisteen korkeus vastaa henkilöauton kuljettajan silmän korkeutta ja estekorkeus henkilöauton valojen korkeutta tien pinnasta. On huomattava, että tien pinnan ei tarvitse näkyä koko näkemäpituuden matkalta.

Rakennettaville ja geometrialtaan parannettaville teille asetetaan näkemää koskevia vaatimuksia. Yleinen käytäntö on määritellä ohitusnäkemän pituus eri nopeusrajoituksille. Tätä pituutta kutsutaan mitoitusohitusnäkemäksi. Lisäksi määritellään tieluokkaan tai liikennemäärään perustuen kuinka suurella osuudella tiepituudesta määrätty mitoitusohitusnäkemä on täytyttävä. *Taulukoissa 5 ja 6* on esitetty suositeltavat mitoitusohitusnäkemän arvot, sen esiin vähimmäismäärät sekä pisimmät suositeltavat etäisyydet ohitusnäkemävaatimuksen täyttävästä tienkohdasta seuraavan alkuun.

*Taulukko 5. Ohjearvot mitoitusohitusnäkemän pituudelle Suomessa (Tielaitos 1999).*

Mitoitusnopeus [km/h]	Mitoitusohitusnäkemä [m]
60	600
70	650
80	700
90	800
100	850

*Taulukko 6. Ohjearvot mitoitusohitusnäkemän määrälle (Tielaitos 1999).*

Tien toiminnallinen luokka	Mitoitusohitusnäkemän esiintymisen vähimmäismäärät [%]	Maksimietäisyys ohitusnäkemän lopusta seuraavan alkuun [km]
Valta- ja kantatiet		
KVL > 3000 ajon./vrk	30	2
KVL < 3000 ajon./vrk	25	3
Seudulliset	15	3
Yhdystiet	10	4

*Taulukkoja 5 ja 6* tutkittaessa on huomattava, että ohjeet koskevat uusia teitä. Vanhojen teiden geometriaa parannettaessa tulisi myös pyrkiä yllä oleviin arvoihin.

Mitoitusohitusnäkemän pituus määräytyy erilaisten kenttämittausten ja kokemuksen perusteella. Eri maiden ohitusnäkemäpituuksia tarkasteltaessa huomataan, että paikalliset tekijät vaikuttavat ohitusnäkemän pituuteen. Paikallisia tekijöitä ovat mm. maaston ominaisuudet, kaksikaistaisten teiden merkitys ja liikennekulttuuri. Esimerkiksi Norjassa ohitusnäkemän pituudet ovat varsin lyhyitä, koska pidemmät näkemät johtaisivat koh-



tuuttomiin kustannuksiin teitä rakennettaessa. Saksan lyhyet arvot selittyvät taas sillä, että pitkämatkainen liikenne käyttää pääosin moottoriteitä, jolloin kaksikaistaisten teiden ohitusmahdollisuudet voivat olla huonommat kuin sellaisten maiden arvot, joissa kaksikaistaisten teiden merkitys koko maan tieverkossa on merkittävämpi.

Ohitusnäkemän esiintymistä koskeva vaatimus perustuu tutkimuksiin ja laskelmiin ohitusmahdollisuuksien ja liikennemäärän vaikutuksista liikennevirran ominaisuuksiin.

## 5.9 Kolmitasoinen päätöksentekomalli (California PATH 2000)

Kuljettajan toimintaa käsitellään kolmiosaisen mallin avulla. Malli sisältää havainnoinnin, päätöksenteon ja toiminnan. Kuljettajan päätöksentekoa käsitelvä malli voidaan jakaa edelleen kolmeen tasoon, jossa ylempi taso ohjaa alemmalla tasolla tapahtuvaa päätöksentekoa.

Ylin taso on strategisen päätöksenteon taso. Tämän tason päätökset ohjaavat kuljettajan käyttäytymistä pitkällä tähtäimellä. Kuljettajalla voi esimerkiksi olla strategisen tason päätös siitä, että hän pidättäytyy ohittamasta ajoneuvoja, joiden ajonopeus on vähemmän kuin viisi kilometriä tunnissa hänen omaa nopeutta alempi. Strategisen tason päätöksenteon taustalla voi olla näkemys tietyn tyyppisen toiminnan vaaroista ylipäätään. Strategisen tason päätökset eivät suoraan johda toimintaa, vaan ohjaavat alemman tason päätöksiä.

Seuraava taso on taktisen päätöksenteon taso. Taso ohjaa alimman operatiivisen tason päätöksentekoa. Taktisen päätöksenteon tasolla kuljettaja tekee päätöksiä vallitsevien olosuhteiden perusteella. Hän voi esimerkiksi tehdä päätöksen edessä ajavan ajoneuvon ohittamisesta ohitusnäkemien perusteella. Jos hän tietää tai epäilee, että myöhemmin tien geometriasta johtuvat ohitusmahdollisuudet heikkenevät, hän tekee päätöksen etsiä ohituspaikkaa. Jos taas kuljettaja tuntee tien ja tietää saapuvansa pian pitkälle suoralle hän päättää lykätä ohittamista suoralle.

Operatiivinen päätöksenteon taso on mallin alin päätöksenteon taso. Sen perusteella kuljettaja tekee päätöksen, joka johtaa toimintaan. Kun esimerkkikuljettaja on tehnyt edellisellä tasolla päätöksen yrittää ohittaa, hän ratkaisee operatiivisen tason päätöksellä milloin hän ohituksen suorittaa. Päätöksenteko perustuu enää vain siihen kokeeko kuljettaja sen hetkisen tilanteen sopivaksi ohitukselle.

Puhuttaessa kuljettajaryhmistä joihin liitetään joitakin ominaisuuksia, kuten varovaisuus tai arkuus, saatetaan tarkoittaa ryhmää, jota yhdistävät tietyt strategisen päätöksentekotason ominaisuudet.

## **6 KAKSI- JA KOLMIKAISTAISTEN TEIDEN SIMULOINTIIN SOVELTUVIA OHJELMISTOJA JA MALLEJA**

### **6.1 VTI:n simulointimalli (Brodin & Carlsson 1986, Carlsson 1993)**

Ehkä tunnetuin kaksikaistaisten teiden simulointiin soveltuva ohjelma on Ruotsissa Statens väg- och trafikinstitutissa (VTI) pääosin vuosina 1977-85 kehitetty simulaattori. Ohjelma tunnetaan nimellä VTI:n kaksikaistaisten teiden simulaattori.

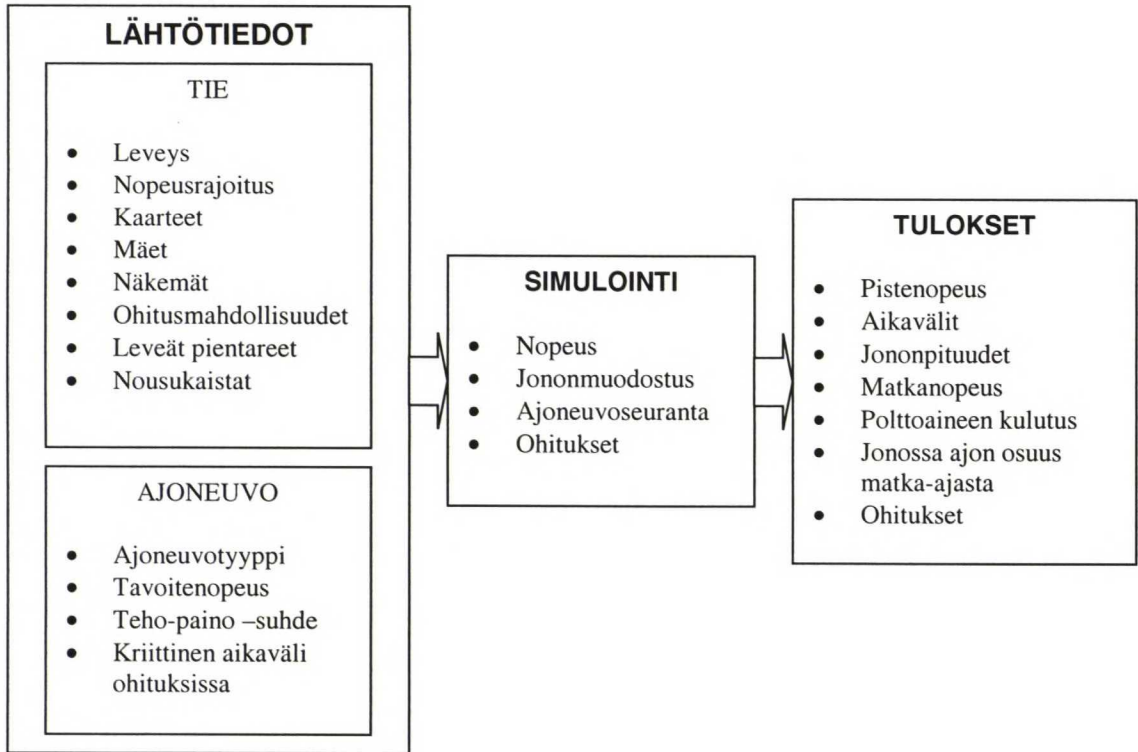
VTI:n simulaattori ollut käytössä Ruotsissa ja myös muissa pohjoismaissa lähinnä simulaattorin kehitystyön aikana. Myöhemmin käyttö on ollut vähäistä. 1990-luvun puolivälissä simulaattorilla on tehty Kiinassa ja Indonesiassa simulointikokeita Highway Capacity Manualin henkilöautoyksikön määrittämiseksi. Tällä hetkellä käynnissä on ohjelman muuttaminen Windows-ympäristöön soveltuvaksi. (Carlsson 2000.)

#### **6.1.1 Ohjelman yleispiirteet**

Ohjelmassa simuloitava tie jaetaan elementteihin (blokkeihin). Elementin sisällä tien leveys, nopeusrajoitus ja geometria on vakio. Ohjelma on tapahtumaorientoitunut, mikä tarkoittaa, että ajoneuvojen sijainti tiellä tarkistetaan aina tapahtumien yhteydessä (vrt. aikaorientoituneet ohjelmat, joissa ajoneuvojen sijainti tarkastetaan määräajoin). Yleisin tapahtuma on ajoneuvon siirtyminen elementistä toiseen.

Ohjelman ajoneuvomalli on kaksiosainen. Vapaiden ajoneuvojen malli määrää ajoneuvojen toiminnan, kun ajoneuvot voivat liikkua muista ajoneuvoista riippumatta. Koko prosessin kannalta vapaiden ajoneuvojen mallin tärkein tehtävä on määrätä vapaiden ajoneuvojen nopeudet. Kun ajoneuvojen välille syntyy vuorovaikutuksia, toimintaa ohjaa vuorovaikutusmalli. Vuorovaikutusmalli määrää ajoneuvojen käyttäytymisen seurantalanteissa ja ohituksissa.

*Kuvassa 13 on esitetty yhteenveto ohjelman toiminasta.*



Kuva 13. Yhteenveto VTI:n simulointiohjelman toiminnasta (Carlsson 1993).

### 6.1.2 Vapaiden ajoneuvojen nopeusmalli

Ohjelmaan syötettävät lähtötiedot jakautuvat simuloitavaa tietä ja ajoneuvojen ominaisuuksiin koskeviin ominaisuuksiin. Tien ominaisuudet syötetään homogeenisina tien osina, elementteinä. Elementin sisällä tien ominaisuudet pysyvät muuttumattomina.

Seuraavassa on esitetty viisivaiheinen liikennevirran tavoitenopeuksien keskiarvon laskenta.

1. Suoran 8 - 13 metriä leveän tieosan ideallisena tavoitenopeuksien keskiarvona  $v_0$  pidetään 108.9 km/h. Nopeuden  $v_0$  jakauma on asetettu vastaamaan kenttämittausten perusteella saatua nopeuksien jakaumaa suoralla 8 – 13 metriä leveällä tiellä.
2. Elementeillä, joilla tien leveys on alle 8 metriä, määritetään nopeusalenema, joka vähennetään ideaalisesta tavoitenopeuksien keskiarvosta  $v_0$ . Saatua uutta keskiarvoa merkitään  $v_1$ :llä. Elementillä, jossa tien leveys on 7,5 metriä,  $v_1$  saa arvon 99,9 km/h.
3. Määritetään *kaavalla 23* nopeus  $v_2$ , jossa huomioidaan tien vaakageometrian vaikutus nopeuksiin. Geometrian oletetaan vaikuttavan nopeuteen vasta kun kaarteiden säde on pienempi kuin 1000 metriä.



$$v_2 = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{I}{v_1}\right)^2 + b\left(\frac{I}{r} - 0,001\right)}} \quad (23)$$

$v_1$  = tien leveyden huomioiva tavoitenopeuksien keskiarvo

$v_2$  = tavoitenopeuksien keskiarvo kaarteessa

$r$  = kaarresäde

$b$  = vakio.

4. Seuraavassa vaiheessa määritetään nopeuden  $v_2$  ja elementin nopeusrajoituksen perusteella vapaiden ajoneuvojen keskinopeus  $v_3$ .

$$v_3 = \frac{v_2}{1 + cd^{2z}} \quad (24)$$

$$z = \frac{v_g}{v_2} \quad (25)$$

$v_g$  = nopeusrajoitus

$d = 0,082$

$$c = \begin{cases} 0,85, & \text{jos } v_g < 105 \text{ km/h} \\ 1,35, & \text{jos } v_g > 105 \text{ km/h} \end{cases}$$

Taulukossa 7 on esitetty nopeuden  $v_3$  arvoja eräissä tyypillisissä tapauksissa.

Taulukko 7. Esimerkkejä nopeuden  $v_3$  arvoista erilaisissa tapauksissa.

Nopeusrajoitus [km/h]	Tyypipoikkileikkauksen leveys [m]	Vapaiden ajoneuvojen keskinopeus $v_3$ [km/h]
110	8 – 13	104,0
110	7,5	97,3
90	8 – 13	93,2
90	7,5	89,6
90	6,5	87,0
70	7,5	81,2
70	6,5	79,2
70	6	77,7

5. Lopuksi määritetään vapaiden ajoneuvojen nopeuksien  $v_3$  jakauma.

Määritellään suure  $Q$ . Sen arvo on tien leveydestä, kaarresäteen suuruudesta ja nopeusrajoituksesta riippuvien tekijöiden  $k_1$ ,  $k_2$  ja  $k_3$  painotettu keskiarvo.  $Q$ :n arvo saadaan kaavasta:

$$Q = \frac{q_1 k_1 + q_2 k_2 + q_3 k_3}{k_1 + k_2 + k_3} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= v_0 - v_1 & q_1 &= 0,5 \\ k_2 &= 2(v_1 - v_2) & q_2 &= -0,8 \\ k_3 &= 2(v_2 - v_3) & q_3 &= -2 \end{aligned}$$

Vakioista  $q_1$ ,  $q_2$  ja  $q_3$  nähdään, että nopeusrajoituksesta riippuvan tekijän  $k_3$  painoarvo on suurin, koska vakio  $q_3$  on itseisarvoltaan suurin.

Määritetään nopeusjakaumien  $v_0$  ja  $v_3$  summakäyrien erotus kaavan 27 avulla.

$$v_0^Q - v_3^Q = v_{0i}^Q - v_{3i}^Q \quad (27)$$

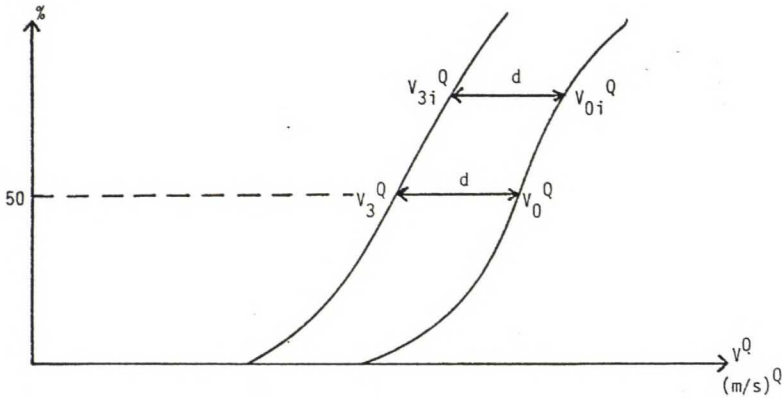
$v_0$  ja  $v_3$  ovat edellä esitettyjä nopeuksien keskiarvoja

$v_{0i}$  ja  $v_{3i}$  ovat nopeusjakaumien  $i$  %:n arvoja.

Jos  $Q = 1$ , nopeuksien  $v_0$  ja  $v_3$  summakäyrien etäisyys  $d$  on vakio.  $Q$  saa arvon 1 vain, jos tien on suora ja tien leveys ja nopeusrajoitukset eivät alenna nopeuksia.

Jos  $Q < 1$ , suurilla nopeuksilla nopeuksien  $v_0$  ja  $v_3$  ero kasvaa ja nopeuden  $v_3$  summakäyrä kiertyy vastapäivään. Tällöin nopeuden  $v_3$  hajonta pienenee.

Kuvassa 14 on havainnollistettu kaavan 27 avulla laskettuja summakäyriä.



Kuva 14. Nopeuden summakäyrän määrittäminen VTI:n simulaattorissa. Kuvan merkinnät viittaavat kaavan 27 merkintöihin.

Edellä esitetyt vapaiden ajoneuvojen keskinopeudet koskevat yksittäisiä elementtejä. Mikäli elementiltä toiselle siirryttäessä nopeus  $v_3$  laskee, asetetaan näiden elementtien välille ylimääräinen elementti. Tämän elementin tarkoitus on tasata varsinaisten elementtien välinen nopeusero. Ylimääräisen elementin pituus määräytyy sen ympärillä olevien elementtien keskinopeuksien  $v_3$  ja niiden oletetun muutosnopeuden perusteella. Keskinopeuden muutoksen nopeudeksi oletetaan  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Ylimääräisen elementin pituus on:

$$L = \frac{v_{3,k}^2 - v_{3,k+1}^2}{2 \times 0,5} = v_{3,k}^2 - v_{3,k+1}^2 \quad (28)$$

L on ylimääräisen elementin pituus,  $v_{3,k}^2$  ja  $v_{3,k+1}^2$  ovat viereisten elementtien keskinopeudet.

Jos elementiltä seuraavalle siirryttäessä nopeus kasvaa, ei ylimääräistä elementtiä käytetä. Nopeuden alenemisen yhteydessä ylimääräisen elementin käyttäminen on perusteltua, koska muuten varsinaisten elementtien rajalla jononmuodostus alkaisi pienemmällä liikennemäärillä kuin todellisuudessa tapahtuu. Nopeuden kasvaessa vastaavaa ilmiötä ei esiinny.

Pystygeometria ei vaikuta edellä määriteltyyn vapaiden ajoneuvojen keskinopeuteen mitenkään. Pystygeometria vaikuttaa ajoneuvojen kasvavien ajovastusten kautta ja se huomioidaan vasta määriteltäessä yksittäisten ajoneuvojen nopeuksia.

### 6.1.3 Ajoneuvojen ominaisuudet

Simulointiohjelmassa ajoneuvotyypit jaotellaan neljään tyyppiin. Ajoneuvotyypit sekä niiden tavoitenopeuksien keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. VTI:n simulointiohjelman ajoneuvotyypit sekä niiden tavoitenopeuksien keskiarvot ja keskihajonnat (Carlsson 1993).

		Tavoitenopeuden keskiarvo	Tavoitenopeuksien keskihajonta
1	Henkilöauto	111	11,5
2	Kuorma-auto tai linja-auto	95,5	10,5
3	Puoliperävaunullinen ka	87,5	5,4
4	Täysperävaunullinen ka	87,5	5,4

Ajoneuvoille on määritelty tehopainosuhde (p-arvo). P-arvo on ajoneuvon vetävistä pyöristä mitatun teho suhde ajoneuvon kokonaispainoon. P-arvo vaihtelee sekä ajoneuvoluokkien sisällä että niiden välillä. Yksittäisten ajoneuvojen maksimisuorituskyky määräytyy p-arvon perusteella.

### 6.1.4 Simulointitapahtumat

Simuloinnissa ajoneuvo voi olla joko vapaa, jonossa ajava tai ohittava ajoneuvo. Ajoneuvon tila asettaa ajoneuvon toiminnalle erilaisia sääntöjä, lähinnä nopeuden valintaan ja sitä kautta kiihdyttämiseen ja hidastamiseen. Ajoneuvon ominaisuudet ratkaisevat kuinka hyvin ajoneuvo pystyy ylläpitämään näiden sääntöjen perusteella määrättyä tavoitetilaa.

Vapaan ajoneuvon nopeutta koskevat algoritmit on esitetty edellisessä luvussa.

Kun vapaa ajoneuvo saavuttaa edellä ajavan, se muuttuu vapaasta ajoneuvosta jonoajoneuvoksi. Jonoajoneuvon ensisijainen liiketilaa rajoittava tekijä on sen edessä ajava



ajoneuvo. Nopeamman ajoneuvon on sovitettava nopeutensa edellä ajavan nopeuden mukaan tai ohitettava tämä. Ohittaminen on kuitenkin erikoistapaus, ja sitä käsitellään myöhemmin.

Seuraavassa yksinkertaisessa ajoneuvon seurantamallissa on esitetty jonoajoneuvon toimintaa ohjaava prosessi edellä ajavan muuttaessa nopeuttaan.

1. Kuljettajan reaktioaika on 1 sekunti. Edellä ajavan muutettua nopeuttaan, seuraava ajoneuvo voi alkaa muuttaa nopeuttaan reaktioajan kuluttua.
2. Reaktioajan kuluttua ajoneuvo alkaa muuttaa nopeuttaan. Ajoneuvon maksimihidastus on  $1,5 \text{ m/s}^2$ . Maksimikiihtyvyys määräytyy ajoneuvon ominaisuuksien perusteella. Ajoneuvo muuttaa nopeutta siten, että siirtyessään seuraavaan elementtiin sen aikaväli edellä ajavaan on vaaditun suuruisen.
3. Elementtien rajalla aikaväli ei saa olla pienempi kuin 0,5 sekuntia. Jos näin on käymässä, ajoneuvo voi ylittää maksimihidastuvuutensa arvon.

Saavuttavan ajoneuvon kuljettaja tekee päätöksen aikooko hän ohittaa edellä ajavan vai jääkö hän tämän taakse sopeuttaen nopeutensa edessä ajavan nopeuden mukaiseksi.

Päätös ohittamisesta tehdään seuraavien tekijöiden perusteella:

1. tien geometrian perusteella määräytyvät näkemäolosuhteet
2. vastaantulevassa liikennevirrassa olevat aikavälit
3. kuljettajan ja ajoneuvon ominaisuudet ja
4. kuljettajan halu ohittaa.

Mallin ominaisuuksiin kuuluu, että jonossa ajavat voivat ohittaa vain järjestyksessä ensimmäisestä jonoajoneuvosta alkaen. Tämä tarkoittaa, että jos joku ohitusmahdollisuutta etsivä jonoajoneuvo ei hyväksy tietyssä tien kohdassa kohtaamaansa ohitusmahdollisuutta, eivät samassa jonossa taempana ajavatkaan hyväksy tätä ohitusmahdollisuutta.

Todennäköisyys sille, että kuljettaja hyväksyy hänelle tarjoutuvan ohitusmahdollisuuden, on määritetty Gompertz –funktion avulla:

$$W = e^{-Ae^{-ks}} \quad (29)$$

*A ja k = vakioita*

*S = näkemän pituus metreinä.*

Kaavan 29 vakioiden A ja k arvot on määritelty neljän muuttujan avulla eri tilanteisiin. Tilanteiden määrittelyssä käytettyjä muuttujia ovat:

- ohituksen tyyppi (lentävä, kiihdytysohitus),
- näkemää rajoittava tekijä (maastoeste, vastaantuleva ajoneuvo),
- tien leveys (päällysteen leveys  $\geq 11$  metriä, kapeampi päällyste) ja
- ohitettavan ajoneuvon tyyppi ja nopeus (kevyt ajoneuvo nopeus  $< 90$  km/h, kevyt ajoneuvo nopeus  $\geq 90$  km/h, kuorma-auto 2- tai 3-akselinen nopeus  $< 90$ , kuorma-auto 2- tai 3-akselinen nopeus  $\geq 90$ , kuorma-auto tai perävaunullinen kuorma-auto).

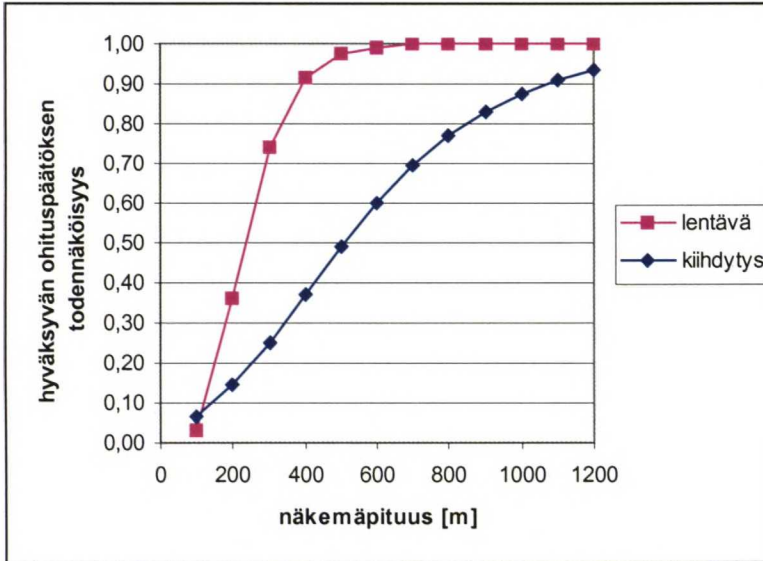
Lentävän ohituksen todennäköisyys riippuu edellä mainitun lisäksi ensimmäisen ohitettavan edessä olevan jonon pituudesta. Mitä pidempi tämä jono on, sitä pienempi on lentävän ohituksen todennäköisyys. Lentävän ohituksen todennäköisyys lasketaan kaavalla:

$$P = W \times 0,6^{(\text{jononpituus}-1)} \quad (30).$$

$W$  = kaavasta 29 laskettu ensimmäisen ajoneuvon ohituksen todennäköisyys.

Jononpituus on ensimmäisen ohitettavan edessä olevan jonon ajoneuvojen lukumäärä. Kaavasta 30 nähdään, että mikäli lentävä ohitus on yhden ajoneuvon ohitus on todennäköisyys suoraan kaavasta 19 saatu  $W$ . Yksi lisäajoneuvo jonossa pienentää ohituksen jatkamisen todennäköisyyttä 40 %. Mikäli ensimmäisen ohituksen jälkeen ohitus jatkuu ohittajan välillä palaamatta peruskaistalle, tapahtuu ohitus lentävän ohituksen tavoin.

Vakiot eri tapauksiin on kalibroitu kenttämittausten perusteella. Alla olevassa kuvassa 15 on esitetty esimerkki ohituksen todennäköisyydestä yhden ajoneuvon kiihdytysohituksessa ja lentävässä ohituksessa.



Kuva 15. Ohituksen todennäköisyys VTI:n simulointimallin mukaan tilanteessa, jossa henkilöauto ohittaa alle 90 km/h ajavan toisen henkilöauton. Tien leveys on alle 11 metriä. Ylempi käyrä kuvaa lentävän ohituksen ja alempi kiihdytysohituksen tilannetta.

Ajoneuvo, joka on tehnyt päätöksen ohituksesta, vaihtaa kaistaa ja kiihdyttää nopeutensa saavuttaakseen ja ohittaakseen ohitettavan ajoneuvon. Kun ohittaja on päässyt ohitettavan rinnalle, ohittaja tarkastaa onko edessä muita ohitettavia. Jos ohitettavia ei ole, ohittaja palaa omalle kaistalleen. Palatessaan omalle kaistalleen ohittaja sopeuttaa nopeutensa siten, että aikaväli edessä ajavaan noudattaa samoja sääntöjä kuin jonoajoneuvolla tavallisestikin. Jos edessä on ohitettava, todennäköisyys, että ohittaja jatkaa ohitustaan saadaan kaavasta 29.

Jos tiellä on leveä piennar, ohituskaista tai nousukaista, ohitustapahtuma poikkeaa edellä esitetystä. Tässä tapauksessa ohitettava ajoneuvo siirtyy ylimääräiselle peruskaistan oikealla puolella sijaitsevalle kaistalle. Tällaisessa tapauksessa molemmat ajoneuvot ovat ohituksen ajan vapaita ajoneuvoja. Siirtyminen pientareelle tai lisäkaistalle edellyttää seuraavien kolmen ehdon täyttymistä:

- lisäkaistan tai väistämiseen vapaan pientareen pituus ajoneuvon edessä tulee olla vähintään 200 metriä
- lisäkaistalla tai pientareella on oltava vapaata tilaa siirtyvälle ajoneuvolle sekä edessä että takana ja
- kahden edellisen ehdon täytyessä kuljettaja siirtyy lisäkaistalle 100 %:n ja pientareelle 85 %:n todennäköisyydellä.

Pientareella tai lisäkaistalla ajavan ajoneuvon nopeus on rajoitettu 90 %:iin ohittavien ajoneuvojen nopeudesta.



## 6.1.5 Tulosten käsittely

Simulaattorista saatava tieto käsitellään jälkikäsitteilyohjelmalla, joita on useita erilaisen tiedon käsittelyyn. Jälkikäsitellyt tulokset voidaan jakaa kolmeen ryhmään alla olevan taulukon 29 mukaisesti.

Taulukko 9. VTI:n simulaattorista saatavien tulosten luokittelu (Brodin & Carlsson 1986).

<p>1. Pistetiedot</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pistenopeus</li> <li>• Aikavälit</li> <li>• Liikennemäärän aikavaihtelu</li> </ul>
<p>2. Kahden pisteen välinen tieto</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Matkanopeus</li> <li>• Matka-aika</li> <li>• Ohitusten lukumäärä</li> <li>• Ohitusyritysten lukumäärä</li> <li>• Polttoaineen kulutus</li> </ul>
<p>3. Tarkasteltavaa tieosaa koskeva tieto</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vapaiden ajoneuvojen ja jonoajoneuvojen osuudet</li> <li>• Riskiä kuvaava indikaattori</li> <li>• Konfliktitilanteet</li> </ul>

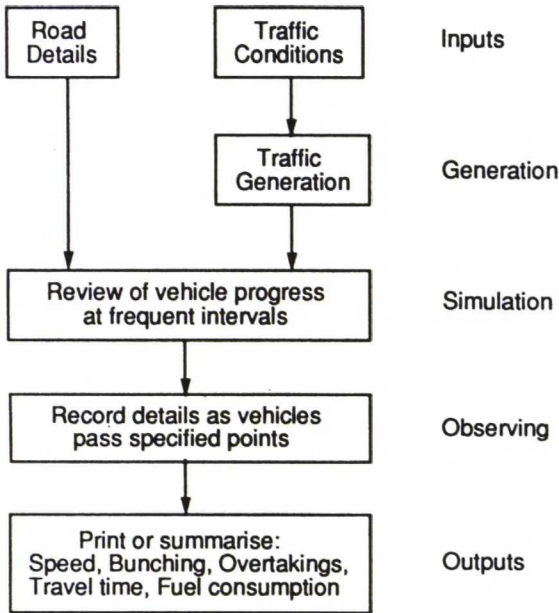
## 6.2 TRARR (Siimes 1992, Hoban et.al 1991)

### 6.2.1 Yleispiirteet

TRARR (TRAffic on Rural Roads) on Australian Road Research Boardin vuosina 1978-80 kehittämä yksiajorataisten kaksikaistaisten maanteiden simulointiin soveltuva ohjelma. Ohjelma soveltuu myös ohitus- ja nousukaistojen tarkasteluun.

Ohjelman simulointiprosessin viisi osaa on esitelty kuvassa 16. Nämä ovat

1. tie- ja liikennetiedostojen lukeminen
2. liikennevirran nopeuden, koostumuksen ja suuntajakauman generointi
3. ajoneuvojen kulun simulointi tiellä
4. liikennevirran ominaisuuksien yksityiskohtien kirjaaminen tietyissä pisteissä tai tieosilla ja
5. yhteenveto liikenteen käyttäytymisestä.



Kuva 16. TRARR –ohjelman osat (Hoban et.al 1991).

Simuloitavan tien ominaisuudet ja muut lähtötiedot syötetään ohjelman ulkopuolisessa syöttötiedostossa. Osa lähtötiedoista on ohjelman mukana toimitettavia ja osa käyttäjän määrittelemiä. Tien ominaisuudet kuvaava tiedosto sisältää tiedot geometriasta, näkemistä ja kaistoista. Muut lähtötiedot sisältävät esimerkiksi liikennettä koskevia tietoja, kuten liikennemäärä ja liikenteen koostumus.

### 6.2.2 Toimintaperiaate

Jokaisella ajoneuvolla on tavoitenopeus, jota se pyrkii noudattamaan. Nopeutta voivat kuitenkin rajoittaa tien geometria, ajoneuvon teho ja jarrutusominaisuudet. Jokaiselle tiejaksolle on määritelty nopeuskerroin, joka kuvastaa tien horisontaalista suuntausta, päällysteen leveyttä ja karkeutta sekä nopeusrajoitusta.

Nopeamman ajoneuvon saavuttaessa hitaamman, saavuttava ajoneuvo voi joko ohittaa tai jäädä ajamaan hitaamman taakse tietyn etäisyyden päähän. Seurantaetäisyys riippuu ajoneuvon nopeudesta. Seurantaetäisyys voi olla tavanomaista pienempi ajoneuvon valmistautuessa ohittamaan. Samoin heti ohituksen jälkeen ohituksen päättäneen ja sitä seuraavan ajoneuvon etäisyys voi olla tavanomaista pienempi.

Ennen ohitusta ajoneuvo tutkii turvallisuusmarginaalin, joka sillä on mahdolliseen vastaantulijaan. Jos vastaantulijaa ei ole näkyvässä, oletetaan seuraavan vastaantulijan olevan heti näkemää rajoittavan maastoesteen takana. Jos turvallisuusmarginaali on riittävä, aloitetaan ohitus.

Turvallisuusmarginaalin pituuteen vaikuttavat monet seikat. Kuljettajilla on erilaisia kiinteitä aggressiotasoja. Osa kuljettajista ei ole riittävän aggressiivisia ohittamaan lainkaan, kun taas osa kuljettajista on valmis ottamaan riskejä eli ohittamaan hyvin niukan turvallisuusmarginaalin turvin. Liikennevirrassa ajavien kuljettajien aggressiotasoa voidaan säätää kertoimen avulla ja tutkia sen vaikutusta käyttäytymiseen. Jos ohitettava

ajaa jonossa, ohittajan turvallisuusmarginaali on pidempi kuin vapaata ajoneuvoa ohittaessa.

Peruskaistalle palaaminen ohituksesta on mallinnettu kahdessa eri tilanteessa. Toinen on paluu peruskaistalle ohituskaistan päättyessä ja toinen ohituksen epäonnistumisen jälkeinen paluu. Paluu ohituskaistalta alkaa tietyn etäisyyden päässä ohituskaistan päättymisestä. Peruskaistalle palattaessa valitaan peruskaistan liikennevirran aikaväleistä liittymiseen riittävä aikaväli, ja yritetään päästä tälle paikalle omaa nopeutta sovitamalla. Peruskaistalla ajaville voi aiheutua viivytystä ohitusta päättävän ajoneuvon liittyessä peruskaistan liikennevirtaan. Kuten edellä mainittiin, ajoneuvon palatessa peruskaistalle voidaan seurantaetäisyydestä tinkiä. Jos ohittavan ajoneuvon nopeus jostain syystä laskee tietyn nopeuden alapuolelle, se pyrkii palaamaan peruskaistalle.

Seuraavassa on esitetty huomioita TRARR:n mallien periaatteista.

- Yksittäisten ajajien oletetaan olevan johdonmukaisia ja tuntevan ajoneuvonsa ominaisuudet täydellisesti.
- Ajajat eivät ennakoil tilanteita eikä heillä ole reaktioaikaa.
- Ajokäyttäytyminen ei ole erilaista eri liikennemäärillä. Ainoastaan seurantaetäisyys vaihtelee sen mukaan, kuinka kauan ajoneuvo on odottanut ohitusmahdollisuutta.
- Mallissa on usein tarpeettomasti käytetty autojen maksimisuorituskykyä.
- Keskimääräinen liikennemäärä on vakio, ellei liikennettä syötetä erillisistä tiedoista.
- Liikenteen häiriöitä, kuten tietöitä, onnettomuuksia ja konerikkoja, ei ole mallinnettu.
- Kuljettajat ottavat aina huomioon ohituskieltoalueet ohituksen alkaessa ja päättyessä.
- Kuljettajat tarkkailevat edessä ajavan ajoneuvon sijaintia ja nopeutta, mutta eivät kiihtyvyyttä.
- Tietiedoston tiedot annetaan tasavälein. Todellisuudessa tien ominaisuudet eivät vaihdu tasaisesti.
- Ajoneuvon suorituskykymalli ei ole kovin täsmällinen. Mallissa ei oteta huomioon mm. vaihteiden vaihtamista eikä vierintävastusta. Tällä on vaikutusta ainakin polttoaineen kulutuksen laskentaan.
- Kaistan vaihtamiseen kuluva aikaa ei ole mallinnettu.



### 6.2.3 Sovelluskohteet

TRARR soveltuu ainoastaan tien linjaosuuksien simulointiin. Mallinnettavalla tiellä ei voi olla liittymiä, vaan ajoneuvot saapuvat malliin ainoastaan sen päistä.

Ohjelman toimintaa voidaan seurata korkeintaan sadan malliin sijoitetun havainnointipisteen avulla. Pisteistä voidaan kerätä esimerkiksi nopeus- ja aikavälitietoja käyttäjän valitsemista ajoneuvoluokista.

Simulaattoria on käytetty Suomessa valtatiellä 4 Mäntsälän ja Järvenpään välillä vuosina 1991-1996 sijainneiden ohituskaistojen toiminnan tarkasteluun ja ohituskaistojen pituuden optimointiin yleisesti (Siimes 1992).

1990-luvun lopulla ohjelma on yhdistetty Yhdysvalloissa kehitettyyn TWOPAS ohjelmaan.

### 6.3 Roadsim (Krammes 2000, Viatek 1987)

Roadsim on Federal Highway Administrationin Yhdysvalloissa 1980-luvun alussa kehittämä simulointiohjelma kaksikaistaisten teiden simulointiin. Roadsim perustuu aikaisempaan TWOWAF -ohjelmaan. Ohjelmassa käytettiin myös osia FHWA:n INTRAS -mallista ja North Carolina State Universityn SOVT -mallista.

Tarkasteltava tie koostuu linkeistä. Linkkeihin liitetään tiedot tien geometriasta, ohituskieltoalueista ja ohitusnäkemistä. Liikennettä generoidaan molemmista suunnista satunnaisesti. Pienillä liikennemäärillä käytetään Shuhl -jakaumaa ja suurilla liikennemäärillä negatiivista eksponenttijakaumaa. Jonokriteerinä käytetään kuutta sekuntia ja jonoajoneuvojen välimatkan oletetaan muodostuvan lineaarisesti suhteessa ajoneuvon nopeuteen.

Ajoneuvoja koskevista tiedoista ohjelmalle annetaan ajoneuvon pituus, maksimikiikkyvyys, huippunopeus, suurin saapumisnopeus ensimmäiselle linkille, tuntiliikennemäärä ajoneuvotyypeittäin ja suunnittain sekä raskaista ajoneuvoista tehopainosuhte ja paino-ilmanvastuspinta-ala-suhde. Ohjelman syötteet annetaan tiedostomuodossa. Vuorovaikutteista syöttötapaa ei ole käytössä.

Simuloinnin tuloksista ajosuorite, ajoajat, viivytykset, keskinopeudet ja ohitustiheys saadaan linkeittäin ja ajosuunnittain. Tiedot jononpituuksien, nopeuksien ja aikavälien jakaumista saadaan lisäksi ajoneuvoluokittain.

Suomessa ROADSIMia ei ole käytetty. Vuonna 1987 tehdyn arvion mukaan Roadsim soveltuu paremmin liikenteen tutkimuksen kuin suunnittelun apuvälineeksi. ROADSIMin kehittäminen on lopetettu ja kehityspanokset on suunnattu TWOPASin kehittämiseen.

## 6.4 Twopas

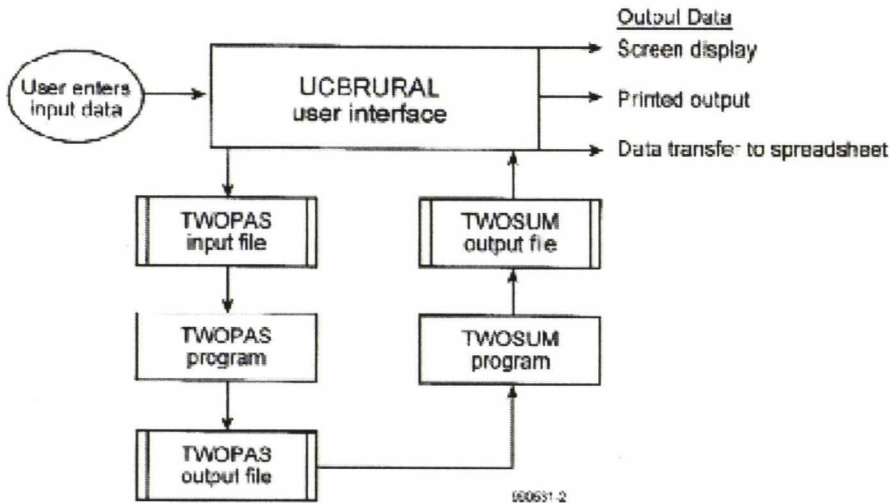
Twopas on Yhdysvalloissa Midwest Research Institutin 1970-luvun lopussa kehittämä yksinkertainen simulointimalli kaksikaistaisten teiden mikrosimulointiin. Ohjelman alkuperäinen nimi oli TWOWAF (TWO Way Flow). Vuosina 1981 ja 1983 ohjelmasta julkaistiin uudet versiot. Ohjelmaa hyödynnettiin Highway Capacity Manualin vuoden 1985 version kaksikaistaisia teitä käsittelevän osan laadinnassa. Myös HCM:n vuoden 2000 version laadinnassa on hyödynnetty TWOPASin malleja. (Harwood et.al 1999.)

TWOPASin keskeisiä ominaisuuksia ovat (Harwood et.al 1999):

- kolme perusajoneuvotyyppiä: henkilöautot, matkailuautot ja raskaat ajoneuvot
- syöttötiedostossa määriteltäviä tien geometrisia ominaisuuksia ovat vaaka- ja pystygeometria, näkemäpituudet, ohitus- ja nousukaistat sekä lyhyet nelikaistaiset osuudet
- ohituskieltoalueet
- simuloitavalle tielle saapuvan liikenteen ominaisuuksista määritellään liikennemäärä, liikenteen koostumus ja jonoprosentti
- kuljettajien käyttäytyminen perustuu kenttämittauksiin
- ajoneuvojen nopeudet vapaissa olosuhteissa perustuvat käyttäjän asettamaan tavoitenopeusjakaumaan
- jonoajoneuvon nopeuden valinta perustuu asetettuun aikavälijakaumaan, tavoitenopeuksiin, jonoajoneuvojen suhteellisiin nopeuksiin ja seuraavan ajoneuvon ohitusaikeisiin
- ohituskäyttäytyminen ja lisäkaistojen käyttö perustuu kenttätutkimuksissa havaittuun kuljettajien käyttäytymiseen
- ajoneuvojen nopeudet, kiihtyvyydet ja sijainnit päivitetään sekunnin välein.

TWOPAS on ohjelmoitu Fortran –ohjelmointikielellä. Alun perin Twopas ohjelmoitiin toimimaan keskustietokoneympäristössä, mutta myöhemmin siitä laadittiin versio myös mikrotietokoneille. Ohjelmaa pidettiin vaikeakäyttöisenä, mikä rajasi käytön lähinnä tutkimustarkoituksiin.

Ohjelman käytettävyyttä parantavat siihen laaditut jälkikäsitelyohjelma TWOSUM ja käyttöliittymä UCBRURAL. TWOSUM käsittelee simulaattorin tulokset ymmärrettäviksi tunnusluvuiksi. Käyttöliittymän avulla käyttäjä syöttää ohjelmaan lähtötiedot, ohjaa ohjelman toimintaa ja saa jälkikäsitelyohjelman tuottamista tuloksista haluamansa muotoisen raportin. Käyttöliittymä laadittiin alun perin TRARR ohjelmaa silmällä pitäen ja TWOPASin käyttömahdollisuus liitettiin siihen vasta myöhemmin. *Kuvassa 17* on esitetty edellä mainittujen ohjelman osien vuorovaikutussuhteet.



Kuva 17. TWOPAS, TWOSUM ja UCBRURAL –ohjelmien suhteet. (Harwood et.al 1999).

Simuloitavan tien geometriasta syötetään ohjelmaan sekä vaaka- että pystygeometria (vrt. TRARR, jossa vain pystygeometria syötetään ja vaakageometria huomioidaan nopeusindeksin avulla).

TWOPASissa ajoneuvolla voi olla yksi kuudesta statuksesta. Ajoneuvo voi (Harwood et.al 1999):

1. olla vapaa ajoneuvo
2. ohittaa edessä ajavan
3. seurata edessä ajavaa
4. seurata edellä ajavaa poikkeuksellisen lähellä aikomuksena ohittaa
5. tulla ohitetuksi tai
6. keskeyttää ohituksen.

Federal Highway Administration on käynnistänyt Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) –nimisen ohjelman. Ohjelman tarkoitus on tuottaa malli, jonka avulla kaksikaistaisten teiden suunnittelussa voitaisiin tietytyyppejä koskeva tutkimustieto hyödyntää nykyistä tehokkaammin. Tavoitteena on CAD-yhteensopiva ohjelma, jolla voidaan tarkastella erilaisten tielinjojen ominaisuuksia. Tarkastelut voivat koskea liiketurvallisuusvaikutusten lisäksi sujuvuutta ja ympäristövaikutuksia. Mallin liikenne-analyysityökaluna tullaan käyttämään TWOPASin pohjalta rakennettavaa simulaattoria. Aikataulun mukaan IHSDM-malli valmistuu vuonna 2002. (FHWA 2000.)



## 6.5 Yhteenveto

Kaksikaistaisten teiden simulointiohjelmistojen tarjonta maailmalla on pieni. Ohjelmien kehittäminen vaatii suurta panostusta, johon vain suurilla organisaatioilla on mahdollisuus.

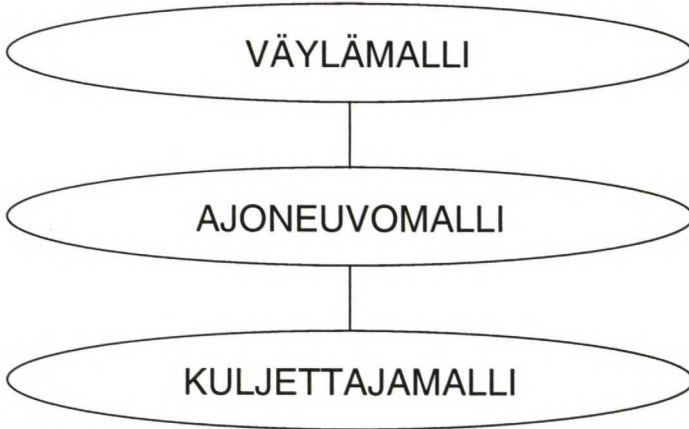
Monissa maissa tieverkon kehittäminen on painottunut olemassa olevien tieyhteyksien välityskyvyn kasvattamiseen, mikä on käytännössä tarkoittanut kaksikaistaisten tieyhteyden korvaamista moottoritiellä. Tämä lienee osaltaan vaikuttanut siihen, että kaksikaistaisten teiden mikrosimulointi ei ole kehittynyt kuten moottoriteiden simulointi. Tällä hetkellä on kuitenkin nähtävissä, että tienpitäjät ovat jälleen kiinnostuneita edullisemmista ratkaisuista, joita kaksi- ja kolmikaistaiset tiet ovat.

Mikrosimulointiohjelmien toimivuuden arviointi kirjallisuustutkimuksen avulla on vaikeaa. Myöskään simulointikokeista kertovat raportit eivät yleensä anna riittävästi informaatiota toimivuuden arviointiin. Simulointiohjelmistojen toimivuutta ei tulisi arvioida ainoastaan vertaamalla niiden antamia makroskooppisia suureita vastaavien kenttämittausten tulosten kanssa. Simulointituloksista johdetut makroskooppiset suureet, kuten keskinopeus ja nopeuksien keskihajonta voivat olla hyvin samansuuntaisia kenttämittausten tulosten kanssa vaikka simulointiohjelman mikroskooppinen toiminta ei olisikaan todellisuuden mukaista. Jos esimerkiksi simuloitua matkanopeustiedot vastaavat hyvin mitattuja matkanopeuksia voi silti olla, että simuloitua matka-nopeuskäyrät eivät vastaa todellista tilannetta. Ohjelmien toimivuutta tulisikin tarkastella kaikin mahdollisin käytössä olevin mittarein. Käytännössä tämä on kuitenkin hankalaa ja usein mahdotonta.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella simulointiohjelmien eri toimintoja koskevia ratkaisuita on vaikea verrata sekä ohjelmien pienen määrän, että dokumentoinnin vähäisyyden takia. Tähän kappaleeseen on kerätty kirjallisuustutkimuksessa esiin tulleita kaksikaistaisten teiden simulointiohjelmalta vaadittavia perusominaisuuksia.

*Kuvassa 18* esitellyllä ominaisuuksien ryhmittelyllä on pyritty kattamaan kaikki kaksikaistaisten teiden keskeiset ominaisuudet. Ryhmittelyllä ei pyritä kuvaamaan simulointiohjelman rakennetta, vaan tarkoitus on kuvata mitä toiminnallisia ominaisuuksia kaksikaistaisten teiden simulointiin tarkoitettujen ohjelmien sisältävät tai mitä niiden tulisi sisältää.

Ryhmittely perustuu mallien jakamiseen kolmeen osaan *kuvan 18* osoittamalla tavalla.



Kuva 18. Simulointiohjelmien rakenteen toiminnallinen jako.

Useimmissa ohjelmissa ajoneuvo- ja kuljettajamallin rajaa on vaikea havaita. Kolmiportaisen ryhmittelyn mukaan kuljettajamallissa mallinnetaan kaikki kuljettajan tekemät ajopäätökset ja ajoneuvomallissa vain ajoneuvon teknisistä ominaisuuksista seuraavat ominaisuudet. Toistaiseksi ajoneuvon ja kuljettajan toiminta on kuitenkin yleensä mallinnettu yhdessä. Tästä johtuen jatkossa ajoneuvo- ja kuljettajamallia käsitellään yhtenä kokonaisuutena.

### **Väylämalli**

Väylämallissa kuvataan simuloitavan tien ominaisuudet. Kuvattavia ominaisuuksia ovat ainakin tien vaaka- ja pystygeometria sekä tielle asetettavat nopeusrajoitukset. Jos simulointiohjelman käyttöalue kattaa tavanomaisen kaksikaistaisen tien lisäksi myös tiet, joiden poikkileikkaus eroaa tavanomaisesta, on tiemalliin sisällyttävä ominaisuudet erilaisten kaistaleveyksien ja lisäkaistojen kuvaamiseen.

Kirjallisuustutkimuksen mukaan osassa simulointiohjelmissä väylämallin avulla kuvataan myös näkemäpituudet tien erikohdissa. Toinen vaihtoehto on, että näkemäpituuden havainnointi mallinnetaan ajoneuvomallissa (tai kuljettajamallissa). Geometrian perusteella määräytyvät näkemäolosuhteet vaikuttavat kuljettajien mahdollisuuteen tehdä havaintoja toisista ajoneuvoista ja tien geometriasta. Näkemäolosuhteiden kannalta myös tien reunaympäristö tulisi voida mallintaa ainakin karkeasti. Esimerkiksi pellolla ja metsässä kulkevien teiden näkemäolosuhteet voivat olla hyvin erilaiset, vaikka teiden geometria olisi samanlainen.

### **Ajoneuvo- ja kuljettajamalli**

#### **Ajoneuvomalli**

Ajoneuvomallin tarkoitus on kuvata ajoneuvojen ominaisuudet. Ajoneuvojen ominaisuuksia ovat ainakin kinemaattiset ominaisuudet, ajoneuvojen päämitat (pituus ja leveys) ja ajoneuvokohtaiset nopeusrajoitukset. Jos halutaan simuloida ajoneuvojen polttoaineen kulutusta ja päästöjä, tulee ajoneuvomallin sisältää mallit näiden tekijöiden määrittämiseksi. Tässä yhteydessä ei polttoaineen kulutus ja päästömalleista mainita enempää.



## Vapaiden ajoneuvojen nopeusmalli

Kaksikaistaisen tien simuloinnin peruslähtökohta on oikein toimiva vapaiden ajoneuvojen nopeusmalli. Vapaiden ajoneuvojen nopeusmallissa määritellään erilaisten ajoneuvojen nopeus simuloitavan tien eri kohdissa. Kaksikaistaisella tiellä vapaana ajava kuljettaja voi kohdata tilanteen, jossa hänen on alennettava nopeuttaan tien vaakageometriasta johtuen. Ajettaessa nopeusrajoitusten sallimaa nopeutta moottoritiellä tällaista tilannetta ei synny moottoritien hyvän on vaakageometrian vuoksi.

## Näkemämalli

Edellä on korostettu näkemäolosuhteiden tärkeyttä kuljettajien päätöksenteon kannalta erilaisissa tilanteissa. Näkemäolosuhdemallin sijoittamista väylämallin sijasta kuljettaja- tai ajoneuvomalliin puoltaa ainakin se, että näkemäolosuhteet riippuvat paljon kuljettajan silmäpisteen sijainnista, lähinnä korkeudesta, joka riippuu ajoneuvotyypistä.

## Ajoneuvon seurantamalli

Ajoneuvon seuranta on liikenteen simuloinnin keskeinen ominaisuus. Seuranta-algoritmien avulla määritellään miten kuljettajat reagoivat edellä ajaviin kuljettajiin.

Kaksikaistaisten teiden simulointiohjelmien ajoneuvonseurantamallit voivat perustua pääosin samoihin malleihin kuin muun tyyppisten liikenneympäristöjen simulointiin laadittujen simulointiohjelmien ajoneuvonseurantamallit. Kaksikaistaisen tien kaistan liikennevirta vastaa moottoritien peruskaistan liikennevirtaa kohtalaisen hyvin silloin, kun ajoneuvot eivät yritä ohittaa toisiaan.

Ajoneuvon seurantamallin liittyy läheisesti ajoneuvojen jako vapaisiin ajoneuvoihin ja jonoajoneuvoihin. Kaksikaistaisella tiellä ajoneuvojen tämä jako on moottoritieympäristöä selkeämpi. Moottoritien peruskaistalla jonossa ajava voi siirtyä vapaaksi ajoneuvoksi vaihtamalla kaistaa ohituskaistalle. Kaistanvaihto ohituskaistalle onnistuu helposti erityisesti silloin, kun moottoritien liikennemäärä on pieni. Kaksikaistaisella tiellä jonossa ajava muuttuu vapaaksi vain ohittamalla edessään ajavan tai mikäli edessä ajava poistuu väylältä. Ohittaminen kaksikaistaisella tiellä edellyttää aina riittävän pitkää vapaata ohitusnäkemää, mikä tekee ajoneuvon tilan muuttumisen jonoajoneuvosta vapaaksi ajoneuvoksi kaksikaistaisella tiellä vaikeammaksi kuin moottoritiellä.

Kuten edellä on mainittu kaksikaistaisella tiellä aikavälien pituuteen vaikuttaa merkittävästi se pyrkimys takana ajava ohittamaan edessä ajavan.

## Ohitusmalli

Ohitusmallissa kuvataan kaksikaistaisille teillä ohittamiseen liittyvät asiat. Näitä ovat ainakin päätös yrittää ohittamista, ohituksen aloittamiseen liittyvä päätöksenteko ja ajoneuvon toiminta ohituksen aikana. Ohitustarpeen muodostumisella tarkoitetaan tässä kuljettajien tekemää arviointia siitä, haluavatko he ohittaa edessään ajavan vai tyytyvätkö he ajamaan edessä ajavan takana.



## 7 SIMULOINTIKOKEET HUTSIM-OHJELMISTOLLA

### 7.1 Yleistä

#### 7.1.1 Simulointikokeiden tavoite ja kohteiden valinta

Simulointitutkimuksen tarkoitus oli arvioida HUTSIM -ohjelmiston vahvuuksia ja heikkouksia kaksikaistaisten teiden simulointiohjelman rungoksi.

HUTSIM on alun perin kalibroitu kaupunkiympäristössä. Kenttämittaukset ja niihin perustuva parametrien säätö on tehty pääosin valo-ohjauksisissa tasoliittymissä. (Niittymäki 1993). Myöhemmin HUTSIMin käyttöaluetta on laajettu muun tyyppisiin ympäristöihin tekemällä kenttämittauksia erilaisissa ympäristöissä ja kalibroimalla simulaattoria niiden pohjalta. Viimeaikoina HUTSIMia on kehitetty myös korkealuokkaisten väylien simulointiin. Keskeinen kehityskohde on ollut juuri sopivien parametrien ja parametrijhdistelmien etsiminen korkealuokkaisille väylille.

Tämän tutkimuksen kohteiden kaltaisissa ympäristöissä HUTSIMia ei tiettävästi ole ennen käytetty. Tämän takia tutkimuksen yksi oleellinen osa on selvittää eri parametrien merkitystä simulointituloksiin. Varsinaista kalibroitua ei tehdä, koska se vaatisi saatavilla olevaa mittausaineistoa yksityiskohtaisemman aineiston hankintaa. Toisaalta on myös muistettava, että kaksikaistaisten teiden simuloinnissa ollaan siirtymässä yhä enemmän alueelle, johon HUTSIMin perusominaisuudet ovat riittämättömät. Tarkempi kalibrointi on järkevää tehdä vasta silloin, kun ohjelman peruselementit, kuten vaaka- ja pystygeometrian mallintaminen, ovat kehittyneet nykytilastaan.

Ensimmäisessä simulointikokeessa tutkittiin HUTSIMin toimintaa ohituskaistatien simuloinnissa. Ohituskaistatie poikkesi muista kohteista merkittävästi lisäkaistalla järjestetyn ohitusmahdollisuuden takia.

Toisessa kokeessa tutkittiin miten HUTSIM tavanomaisen kaksikaistaisen väylän simulointiin. Tutkimuskohteeksi valittiin noin 4,5 kilometrin mittainen jakso valtatieltä 6 Koskenkylän ja Liljendalin välillä. Tieosa sopi tutkimuskohteeksi hyvin siksi, että tieosan näkemäolosuhteet ovat huonot ja poikkileikkaus on kapea, minkä vuoksi tieosalla ohitetaan vähän.

Kolmannen kokeen tavoitteena oli tutkia tien vaakageometrian mallintamista HUTSIMilla. Tutkimuskohteena oli Finnoontie Espoossa. Finnoontie on vilkas Espoon kaupungin etelä- ja pohjoisosia yhdistävä väylä, joka on sen toiminnallinen asema huomioiden geometrialtaan heikko.

Edellä esitettyjen kohteiden valintaperusteiden lisäksi kaikista kohteista piti olla saatavilla vertailuaineistoksi sopivia kenttämittaustuloksia. Simuloinneissa käytettiin HUTSIMin versiota 5.02.

## 7.1.2 Simulointikokeiden kulku

Seuraavassa on esitetty simulointiprosessin päävaiheet. Sama prosessimainen toimintamalli toteutui kaikissa tarkasteltavissa kohteissa, joskin kohteiden erityispiirteiden vuoksi käsittelyt poikkesivat toisistaan jonkin verran.

Simulointitutkimuksen ensimmäinen tehtävä on tarkastelukohteen mallin muodostaminen lähtökohtien pohjalta. Lähtökohtia ovat mm. tien geometria, liikenteen ohjaus, liikennegeneraattoreiden asettaminen sekä kaistanvaihtojen asettaminen malliin. Mallin muodostamisen tavoitteena on kuvata tarkasteltava kohde niin hyvin kuin se käytettävissä olevin välinein on mahdollista.

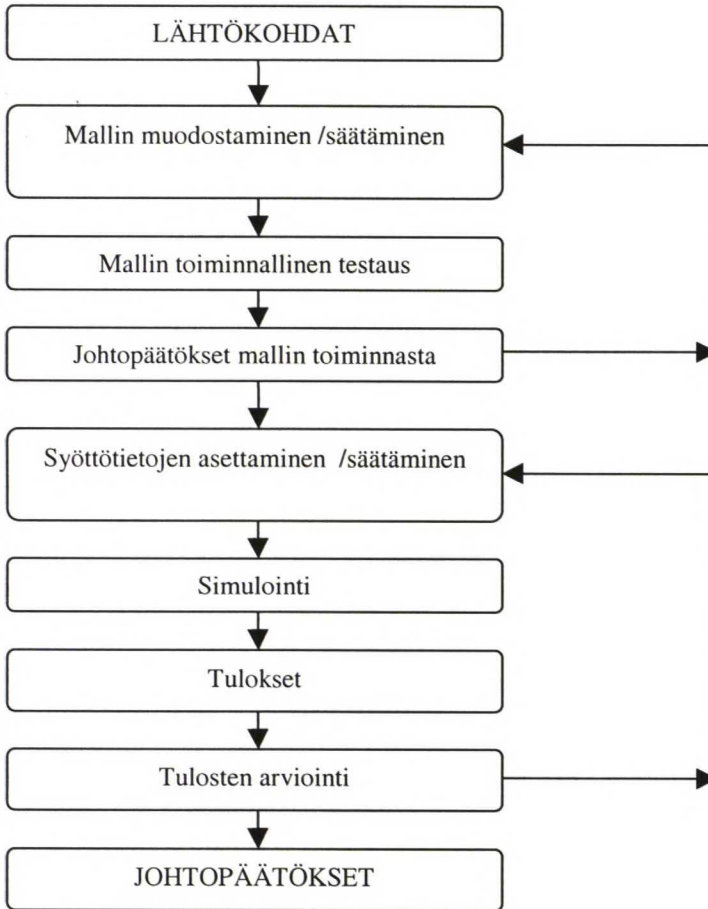
Yleensä käytettäessä simulointia tutkimusmenetelmänä tutkittavan kohteen mallintamisen peruseräkkeet ovat tiedossa ja itse mallin rakentaminen helppoa. Tämän työn pilottiluoteen vuoksi mallin muodostamiseen liittyi epävarmuutta, minkä vuoksi ennen varsinaisten koesimulointien aloittamista mallin toiminnallinen testaus oli erityisen tärkeää. Esimerkiksi ohituskaistan mallintamiseen ei ole vakiintunutta tapaa, vaan mallinuksen lähtökohtana tässä työssä pidettiin moottoritien simuloinnissa käytettyjä tapoja.

Toiminnallisessa testauksessa malliin syötettiin erilaisia liikennemääriä ja tarkasteltiin silmämääräisesti simuloinnin kulkua. Esimerkiksi ohituskaistatien simuloinnissa tämä oli välttämätöntä, jotta ohituskaistan loppukiila saatiin toimimaan tyydyttävästi.

Mallin toimivuuden varmistuttua suunniteltiin varsinainen simulointikoe. Tässä vaiheessa vertailuaineistolla oli suuri merkitys, koska simuloinnin tulosten oli oltava vertailtavissa kenttämittauksin kerättyyn aineistoon. Tässä vaiheessa ratkaistiin mm. mitä tuloksia haluttiin ja minkälaisilla liikennemäärillä simulointi suoritettiin. Tässä vaiheessa asetettiin myös simulointiparametrit eli säädettiin simulaattori toimimaan tarkasteltavaan kohteeseen sopivalla tavalla.

Simulointiajajojen jälkeen tulostiedostot käsiteltiin joko HUTSIM Analyzer jälkikäsitteilyohjelman tai taulukkolaskentaohjelman avulla. Tuloksista tehtiin alustavat johtopäätökset, joiden perusteella päätettiin uusitaanko koe säädetyin syöttötiedoin vai ovatko saadut tulokset riittävän ”hyviä”. Tyypillinen tässä tutkimuksessa tehty säätö koski vapaiden ajoneuvojen tavoitenopeusjakaamaa.

Simulointikokeiden kulku on esitetty *kuvassa 19*. Kuva perustuu Drewn (1968) esittämään simulointiprosessin kulkuun.



Kuva 19. Simulointikokeiden kulku. (Perustuu: Drew 1968.)

## 7.2 Ohituskaistan simulointi

### 7.2.1 Tutkimuskohteen ominaisuudet ja vertailuaineisto

Tämän simulointikokeen tavoite oli tutkia miten HUTSIM-ohjelmisto soveltuu ohituskaistan toiminnan tarkasteluun. Erityisesti tarkkailtiin ajoneuvojen nopeuksia ohituskaistan kohdalla, ajoneuvojen toimintaa ohituskaistan lopussa sekä ohituskaistan käyttöastetta sen eri kohdissa. Alkuperäisenä tavoitteena oli tutkia myös useista ohituskaistoista muodostuvan ohituskaistatien toimintaa. Yhden ohituskaistan simuloinnista saadut kokemukset kuitenkin osoittivat, että ohituskaistatien simulointia kannattaa tutkia vasta sen jälkeen kun yksittäisen ohituskaistan toiminta pystytään mallintamaan riittävän tarkasti.

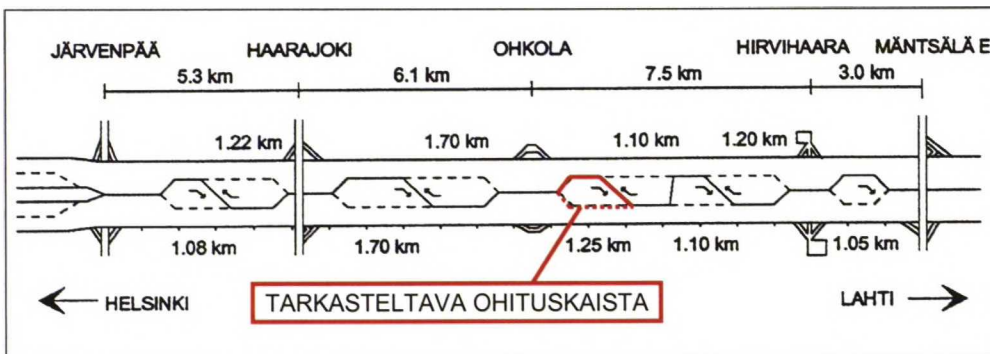
Mallinnusalue sijaitsi valtatiellä 4 (E75) Ohkolan ja Hirvivaaran palvelualueiden välillä Järvenpään eritasoliittymän ja Mäntsälän pohjoisen liittymän välisellä ohituskaistatiellä. Tieosuudella kokeiltiin vuosina 1991-96 kolmikaistaisen ohituskaistatien soveltuvuutta vilkkaasti liikennöidyllä tieosalla. Vuonna 1996 tieosuus muutettiin tavalliseksi moottoriliikennetieksi ja vuodesta 1999 alkaen tie on ollut moottoritie, jonka toinen ajorata on entinen moottoriliikennetie.



Ohituskaistatie, jolla tarkasteltava ohituskaista sijaitti, oli yksi vilkkaimmin liikennöityjä yksiajorataisia teitä Suomessa. Mäntsälän kohdalla tien keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) vuonna 1994 oli 12 754 ajoneuvoa (Tielaitos 1997). Tunnusomaista tien liikenteelle oli sen voimakas suuntajakauma perjantain ja sunnuntain iltaruuhkissa. Pääsuuntaan kulki vuosina 1991-92 jopa 71–82 % tien liikenteestä (Enberg 1994). Ohituskaistatie oli moottoriliikennetie eli kevyttä liikennettä tai hitaita maatalouskoneita tiellä ei liikkunut.

Tarkasteltava tieosuus on alunperin rakennettu moottoritien toiseksi ajoradaksi. Tästä johtuen sen geometria on suurisäteisine kaarteineen hyvin moottoritiemäinen. Ohituskaistatie, jolla tarkasteltava ohituskaista sijaitti, oli pystygeometrialtaan tasainen. Tietekisteritietojen mukaan suurin pystykaltevuus tiejaksolla on 1,7 %. Pienin kaarresäde on noin 2 000 metriä. Simulointimallissa ei huomioida pysty- eikä vaakageometrian vaikutusta vaan tien oletetaan olevan suora ja tasainen.

Tarkasteltavan ohituskaistan pituus on 1250 metriä. Ennen ohituskaistan alkua on 4 350 metriä pitkä ohituskielto-osa, joka johtuu vastakkaisen suunnan ohituskaistasta ja Ohkolan levähdysalueesta. Tarkasteltavan ohituskaistan sijainti ohituskaistatiellä on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Tarkasteltavien ohituskaistojen sijainti Järvenpää - Mäntsälä ohituskaistatiellä. Alkuperäinen kuva: Enberg (1994).

Tarkastelujakson kaistajärjestely mallinnettiin Opasteet ja tiemerkinnot Järvenpää-Mäntsälä ohituskaistatiellä –suunnitelman mukaisesti (Tielaitos 1991).

Ohituskaistan tarkastelussa lähtö- ja vertailutietoina on käytetty Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratorion vuosina 1991-92 tekemiä mittauksia ja niiden pohjalta tehtyjä tutkimuksia. Tutkimukset on raportoitu tielaitoksen selvityksiä sarjassa nimellä *Ohituskaistan liikennevirran perusominaisuudet* (Enberg 1994).

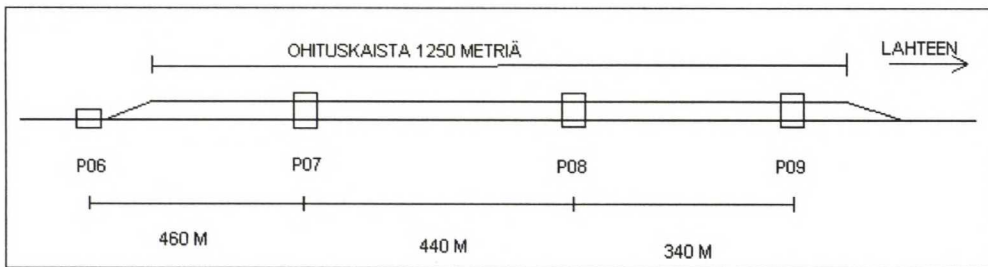
## 7.2.2 Mallintaminen ja koasetelma

Mallinnettavaa ohituskaistaa ennen oli 4 350 metriä pitkä ohituskielto-osa, jonka matkalla hitaat ajoneuvot keräsivät taakseen jonoja. Simulointimallissa jonoutuminen aikaansaatettiin rakentamalla ohituskaistaa ennen vastaavan mittainen yksikaistainen osuus jonka alkuun generaattorit sijoitettiin. Ohituskieltoalueella sijainneen Ohkolan levähdysalueen ei oletettu vaikuttavan liikennevirtaan, eikä sitä näin ollen mallinnettu.

Tulosten yhteydessä on esitetty simuloitua ja mitattua jonoprosenttia ja liikennevirran keskinopeudet liikennemäärän funktiona juuri ennen ohituskaistan alkua.

Ohituskaistan alkukiila mallinnettiin yksinkertaisesti siten, että viimeisen yksikaistaisen osuuden putkeen liitettiin kaksi putkea. Varsinaisella ohituskaistaosuudella oli koko matkalla kaksi rinnakkaista putkea, joiden välillä kaistanvaihto oli sallittu. Kaksisataa metriä pitkä loppukiila mallinnettiin siten, että ensimmäiset 150 metriä kuvattiin kahtena putkena, joissa kaistanvaihto oli sallittu ja viimeisen viidenkymmenen metrin matkalla oli kaksi putkea, jotka yhtyivät loppupäästään. Loppukiilan päättymiskohtaan asetettiin väistämisvelvollisuus ohituskaistalle, jotta ajoneuvot, jotka eivät olleet ennen tätä palaaneet peruskaistalle, häiritsisi peruskaistan pääliikennevirtaa. Käytännössä ajoneuvot ajautuivat loppukiilalle hyvin harvoin ja väistämisvelvollisuudella ei näin ollut merkitystä simulointituloksiin. Ohituskaistatien simuloinnissa oleellisia kaistanvaihto-ominaisuuksia on esitelty tarkemmin kappaleessa 7.2.3.

Malliin kytkettiin seitsemän ilmaisinta, joiden antamista tiedoista tulokset johdettiin taulukkolaskentaohjelman avulla. Ilmaisimien sijainnit ja etäisyydet on esitetty alla olevassa kuvassa 21.



Kuva 21. Ohituskaistan mallin mitat ja ilmaisimien paikat. Ilmaisimien numerointi Ohituskaistatien liikennevirran perusominaisuudet –tutkimuksen mukaan (Enberg 1994).

Tavoitenopeusjakauman asettaminen oletettiin jo etukäteen hankalaksi. Syynä tähän oli kokemusperäinen havainto, että kuljettajien nopeuskäyttäytyminen voi muuttua ohituskaistatien eri kohdissa riippuen esimerkiksi siitä ajetaanko ohituskaistan kohdalla vai kahden ohituskaistan välisellä yksikaistaisella osuudella. Etukäteen arveltiin, että yksikaistaisen osuuden kohdalta mitatun vapaiden ajoneuvojen nopeusjakauman käyttö tavoitenopeusjakaumana tuottaisi liian alhaisen nopeustason, minkä seurauksena ohituskaistaa käytettäisiin liian vähän ja nopeudet ohituskaistan kohdalla jäisivät liian alhaisiksi. Toisaalta ohituskaistan kohdalla mitatussa vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumassa näkyisivät selvästi ohituskaistan käyttäjien suuret nopeudet, joita ei voida pitää kuljettajien tavoitenopeuksina, vaan ne ilmentävät halua hyödyntää ohituskaistan tarjoama ohitusmahdollisuus mahdollisimman tehokkaasti.



### 7.2.3 HUTSIMin kaistanvaihtotoiminnot ohituskaistan simuloinnissa

Kaistanvaihtotoiminnot ovat ohituskaistoja tutkittaessa keskeisellä sijalla koska ajoneuvojen ohitukset tapahtuvat kaistanvaihtosääntöihin perustuen. Ohitus on itse asiassa kaksi kaistanvaihtoa sisältävä tapahtuma. HUTSIMissa ajoneuvo valitsee käyttämänsä kaistan vertailemalla eri kaistoilla kohtaamaansa hidastuvuustarvetta. Pääsääntönä kuitenkin on, että oikean puoleinen kaista valitaan aina kun vain mahdollista.

Seuraavassa on kerrottu pääpiirteet kaistanvaihtomallin toiminnasta ja kaistanvaihtoon vaikuttavien parametrien merkityksestä HUTSIMin versiossa 5.02. Lehmuskoski (1998) on diplomityössään esitellyt kattavasti kaistanvaihtoon liittyvät algoritmit kyseisessä ohjelmaversiossa.

#### Vapaaehtoinen kaistanvaihto

HUTSIMissa kaistanvaihdot voidaan jakaa vapaaehtoiisiin ja pakollisiin kaistanvaihtoihin. Vapaaehtoisessa kaistanvaihdossa ajoneuvo voi joko pysyä nykyisellä kaistallaan tai vaihtaa kaistaa. Kaistan valinta tapahtuu ajoneuvon tekemän eri kaistojen hidastustarvearvion perusteella.

Ajoneuvojen herkkyyttä säädellään kaistanvaihdon kynnyksertoimilla, jotka määritellään asetustiedostossa erikseen oikealle ja vasemmalla kaistalla vaihtoa varten.

Ajoneuvo vaihtaa kaistaa vasemmalle jos:

1. ajoneuvon nopeus on pienempi kuin sen tavoitenopeus,
2. ajoneuvo on ollut nykyisellä kaistallaan vähintään asetetun minimiajan ja
3. vasemman kaistan hidastamistarve on pienempi kuin kynnyksertoimella kerrottu nykyisen kaistan hidastamistarve.

Oikealle vaihdettaessa ajoneuvo ei vertaile hidastustarvettaan eri kaistoilla vaan vaihtaa kaistaa, mikäli

1. ajoneuvo on ollut nykyisellä kaistallaan vähintään asetetun minimiajan ja
2. oikean kaistan hidastamistarve on pienempi kuin absoluuttinen kynnyksarvo oikealle vaihdettaessa.

Jos edellä mainitut ehdot täyttyvät, alkaa ajoneuvo etsiä kaistanvaihtoon riittävää aikaväliä kaistalta, jolle se on siirtymässä. Vapaaehtoisessa kaistanvaihdossa ajoneuvon eteen ja taakse on jäätävä vähintään seuranta-aikavälin pituinen aikaväli.

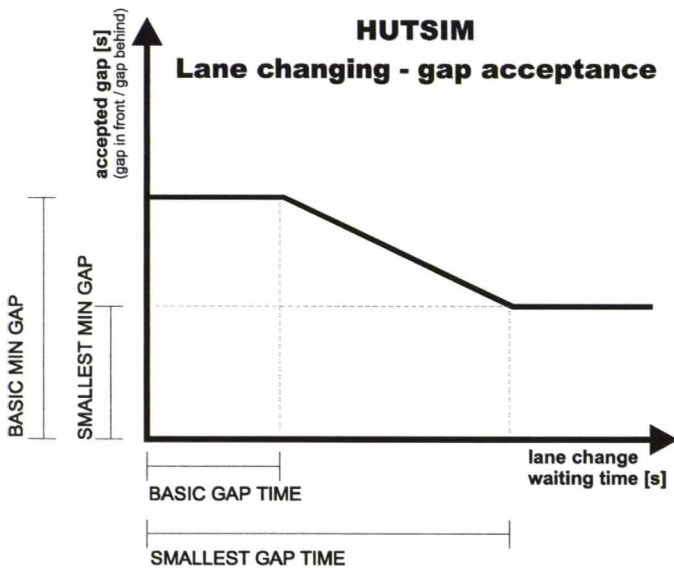
Ohituskaistatien tapauksessa ajoneuvon siirtyminen peruskaistalta ohituskaistalle on aina vapaaehtoinen kaistanvaihto. Paluu takaisin peruskaistalle voi puolestaan olla joko vapaaehtoinen tai pakollinen kaistanvaihto.



### Pakollinen kaistanvaihto

Pakollisessa kaistanvaihdossa ajoneuvon on pakko vaihtaa kaistaa. Pakollinen kaistanvaihto ilmaistaan ajoneuvoputken reittitaulukon arvona 2, mikä tarkoittaa, että ajoneuvon on alettava etsiä kaistanvaihtoon riittävää aikaväliä ja suoritettava kaistanvaihto. Pakollisessa kaistanvaihdossa vaadittavat aikavälit asetetaan erikseen ajoneuvon edessä ja takana vaadituille aikaväleille.

HUTSIMin versio 5.02:n uusi ominaisuus on kaistanvaihtoaikavälin muuttuminen. Sen avulla ajoneuvo voidaan pakottaa hyväksymään pakollisessa kaistanvaihdossa myös vaadittua aikaväliä pienempiä aikavälejä, jos vaadittua aikaväliä ei löydy kaistalta, jolle ollaan vaihtamassa. Kuvassa 22 on esitetty periaatekuva kaistanvaihtoaikavälin muuttumisesta. Asetuksissa voidaan säätää kuinka monta prosenttia lyhin mahdollinen aikaväli (kuva 22: *smallest min gap*) on alkuperäisestä aikavälistä (kuvassa 22: *basic min gap*). Lisäksi voidaan säätää kuinka pitkän ajan kuluessa aikaväli vaatimus muuttuu alkuperäisestä lyhimmäksi mahdolliseksi.



Kuva 22. Periaatekuva HUTSIMin kaistanvaihtoaikavälin arvon muuttumisesta kaistanvaihtomahdollisuutta odottaessa pakollisessa kaistan vaihdossa. Kaistanvaihtoaikavälin alku- ja loppuarvo sekä niiden välisen suoran kulmakertoimen arvo on käyttäjän määriteltävissä. (Lehmuskoski et al 1999.)

Tässä tutkimuksessa pakotettua kaistanvaihtoa käytettiin ohituskaistan simuloinnissa ohituskaistan loppuosassa, jotta ajoneuvot palaisivat hyvissä ajoin ennen ohituskaistan loppua peruskaistalle. Pakotettu kaistanvaihto asetettiin alkamaan 400 ennen kaistan loppukiilan alkua, eli kohtaan, jossa loppuvasta ohituskaistasta varoitetaan ensimmäisen kerran.

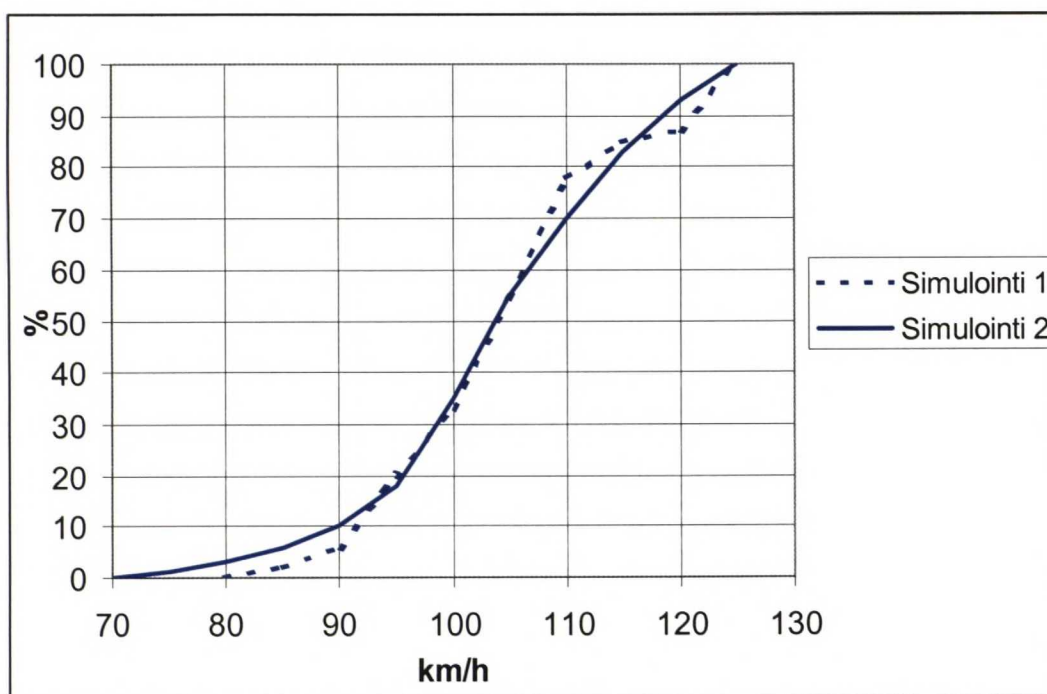
### Kohteliaat kuljettajat

HUTSIMissa voidaan määrittää kuinka suuri osa kuljettajista on ns. kohteliaita kuljettajia. Kohtelias kuljettaja tarkkailee ympärillään olevaa liikennetilannetta ja pyrkii omalla

ajokäyttäytymisellään edistämään toisten ajoneuvojen pyrkimyksiä, esimerkiksi niiden liittyessä liittymältä rampilta etuajo-oikeutettuun liikennevirtaan. Kohteliaiden kuljettajien määrällä ei ohituskaistan simuloinnissa ole oleellista merkitystä.

#### 7.2.4 Simuloinneissa käytetyt lähtötiedot

Ohituskaistan simulointi suoritettiin kahteen kertaan tavoitenopeusjakaumaa ja parametrejä välillä säätäen. Simulointi 1:ssä käytettiin moottoritien simulointiin kalibroituja parametreja ja tavoitenopeusjakaumana ohituskaistan keskeltä mitattua vapaiden ajoneuvojen tavoitenopeusjakaumaa. Simulointi 2:ssa osaa parametreista säädettiin ja tavoitenopeusjakaumaa muutettiin simulointi 1:n tulosten perusteella. Koska simulointien syötiedot eroavat usean muuttujan osalta, ei yksittäisten muuttujien vaikutusta tuloksiin voida luotettavasti arvioida. Simuloinneissa käytetyt tavoitenopeusjakaumat on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Simuloinneissa käytetyt tavoitenopeusjakaumat. Simulointi 1:n tavoitenopeusjakauman keskiarvo oli 105,8 km/h ja keskihajonta 10,8 km/h. Simulointi 2:n vastaavat arvot olivat 105,1 km/h ja 11,0 km/h.

Kuvasta 23 nähdään, että käytetyt tavoitenopeusjakaumat eivät poikkea oleellisesti toisistaan. Merkittävin ero tavoitenopeusjakaumien välillä on alhaisimpia nopeuksia käyttävien ajoneuvojen määrissä. Tällä on merkitystä siksi, että ennen ohituskaistan alkua olevalla yksikaistaisella osuudella hitaasti ajavat keräävät taakseen jonoa ja synnyttävät näin ohitustarvetta.

Taulukossa 10 on esitetty simuloinneissa käytetyt kaistanvaihtoon ohituskaistalla vaikuttavat parametrit. Simuloinnissa 1 käytetyt parametrit perustuvat korkealuokkaisten väylien simulointia varten annettuihin suosituksiin. Simuloinnin 2 parametrit on asetettu simulointi 1:n kokemusten perusteella.



Taulukko 10. HUTSIM-simuloinneissa käytetyt kaistanvaihtoon vaikuttavat parametrit. (Parametrien vaikutuksia simuloinnin kulkuun on selvitetty luvussa 7.2.3.)

	Simulointi 1	Simulointi 2
kynnyskerroin vasemmalle ( <i>left changing treshold</i> )	0,90	0,90
kynnyskerroin oikealle ( <i>right changing treshold</i> )	0,05	0,5
seuranta-aikaväli (s) ( <i>following time headway</i> )	1,2	1,2
aikaväli takana oikealla pakollisessa kaistanvaihdossa (s) ( <i>forced lnc gap back right</i> )	0,5	0,5
aikaväli edessä oikealla pakollisessa kaistanvaihdossa (s) ( <i>forced lnc gap back right</i> )	0,5	0,3
aikavälin lyhenemä pakollisessa kaistanvaihdossa (%:a alkuperäisestä) ( <i>maximum gap decrease</i> )	20	20
kaistanvaihdon odotusaika, jonka aikana siirrytään alkuperäisestä lyhyimpään hyväksyttävään (s) ( <i>forced lane change gap decreasing time</i> )	10	6
kohteliaita kuljettajia (%) ( <i>polite drivers</i> )	70	70
lyhin kaistalla oloaika (s) ( <i>minimum time in lane</i> )	10	5

## 7.2.5 Tulokset

### 7.2.5.1 Silmämääräisesti tehdyt havainnot

Seuraavassa on esitetty eräitä ohituskaistan eri osissa silmämääräisesti tehtyjä havaintoja, joiden seurauksia ei välttämättä simulointitulosten ja mittauksetietojen vertailussa nähdä.

#### Ohituskaistan alku

Ensin kaistan alku mallinnettiin siten, että viimeisen yksikaistaisen osuuden putken lopusta jatkui kaksi putkea (perus- ja ohituskaista). Tällöin ajoneuvot näyttivät valitsevan käyttämänsä kaistan satunnaisesti ja alemman tavoitenopeuden omaavat ajoneuvot saattoivat siirtyä ohituskaistalle heti sen alettua. Tämän seurauksena syntyi tilanteita, jossa kaksi alhaista tavoitenopeutta ajavaa ajoneuvoa eteni rinnakkain ja esti takana tulevien ohittamisen. Ilmiö vaikuttanee tuloksiin etenkin suurilla liikennemäärillä.

#### Ohituskaistaosuus

Simuloinnissa 1 näytti siltä, että ajoneuvot jäivät ohituskaistalle vaikka oikealla kaistalla olisi ollut tilaa. Tämän seurauksena lyhin kaistalla oloaika muutettiin toiseen simulointiin 10:stä 6:een sekuntiin ja vapaaehtoisen kaistanvaihdon kynnysarvo muutettiin 0,05:stä 0,5:een. Lisäksi pakollisen kaistanvaihdossa edessä oikealla vaadittavaa aikaväliä muutettiin 0,5:stä 0,3:een sekuntiin. Muutoksen tarkoituksena oli välttää tilanne, jossa ohituskaista ruuhkautuu. Muutoksen seurauksena ongelma näytti lievenevän. Samaan aikaan kuitenkin syntyi tilanteita, joissa peruskaistalle palaavan jälkeinen ajoneuvo koki hidastustarvetta ja vaihtoi kaistaa ohituskaistalle. Nämä toisen ajoneuvon eteen tulon



seurauksena kaistaa vaihtavat olivat usein melko alhaisen tavoitenopeuden omaavia ja ruuhkauttivat kaistanvaihdoillaan ohituskaistaa.

### Ohituskaistan päätyminen

Välityskyvyn kannalta ohituskaistan kriittisin osa on kaistan loppuosa, jossa ajoneuvot siirtyvät kahdelta kaistalta yhdelle. Todellisessa liikenteessä ajokäyttäytyminen tässä tilanteessa poikennee merkittävästi siitä ajokäyttäytymisestä, jonka mukaan HUTSIMin parametrit on kalibroitu. Todellisuudessa ohituskaistan lopussa hyväksyttävät aikavälit kaistaa vaihdettaessa ovat lyhyempiä kuin esimerkiksi moottoritillä kaistaa vaihdettaessa.

Ohituskaistalla pätevät samat väistämissäännöt kuin kaistaa vaihdettaessa yleensäkin eli ohituskaistalta palaavan on väistettävä peruskaistalla ajavaa. HUTSIMissa asia voidaan mallintaa asettamalla ohituskaista väistämisvelvolliseksi peruskaistaan nähden. Tällaisen järjestelyn ongelmia ovat aikavälin asettaminen todellista käyttäytymistä vastaavaksi ja ajoneuvojen pysähtyminen ohituskaistan lopussa, mikäli peruskaistalla ei löydy riittävää aikaväliä. Käytännössä ajokäyttäytyminen ohituskaistatiellä on muodostunut sellaiseksi, että ohituskaistan lopussa peruskaistalla ajavat väistävät usein ohituskaistalta peruskaistalle palaavia.

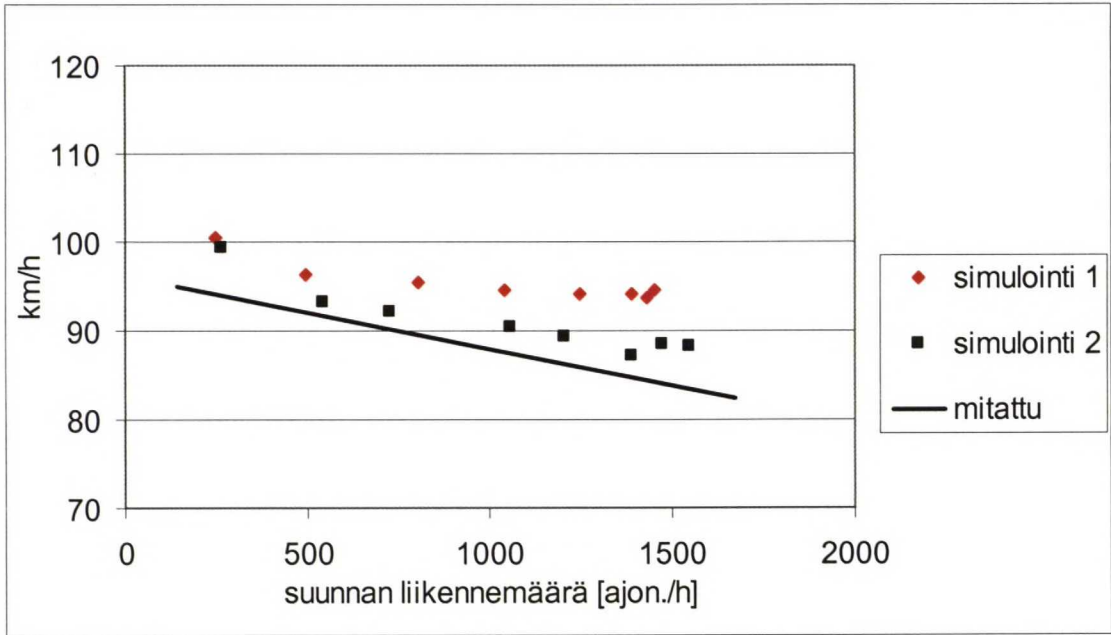
Ohituskaistan mallissa ajoneuvojen paluuta ohituskaistalta peruskaistalle säädeltiin muuttamalla pakotetun kaistanvaihdon aikavälin muutosnopeuteen vaikuttavia parametreja. Mitä nopeammin vaadittava aikaväli pieneni, sitä aikaisemmin kaistaa vaihdettiin peruskaistalle. Asian merkitys kasvaa liikennemäärän kasvaessa.

HUTSIMissa voidaan säätää kohtelioiden kuljettajien määrää, jotka muuttavat omaa ajokäyttäytymistään siten, että kaistaa vaihtava ajoneuvo löytää helpommin riittävän aikavälin liittymistoiminnolleen. Kohtelioiden kuljettajien määrän parametri oli tässä tutkimuksessa säädetty siten, että 70 % kuljettajista oli kohteliaita. Arvo perustuu aikaisempiin kokemuksiin. Ohituskaistan simuloinnissa saattaisi myös pienemmän arvon käyttö olla perusteltua ohituskaistojen kohdalla aggressiivisemmän ajokäyttäytymisen vuoksi.

## **7.2.5.2 Simulointitulosten ja mittaustietojen vertailu**

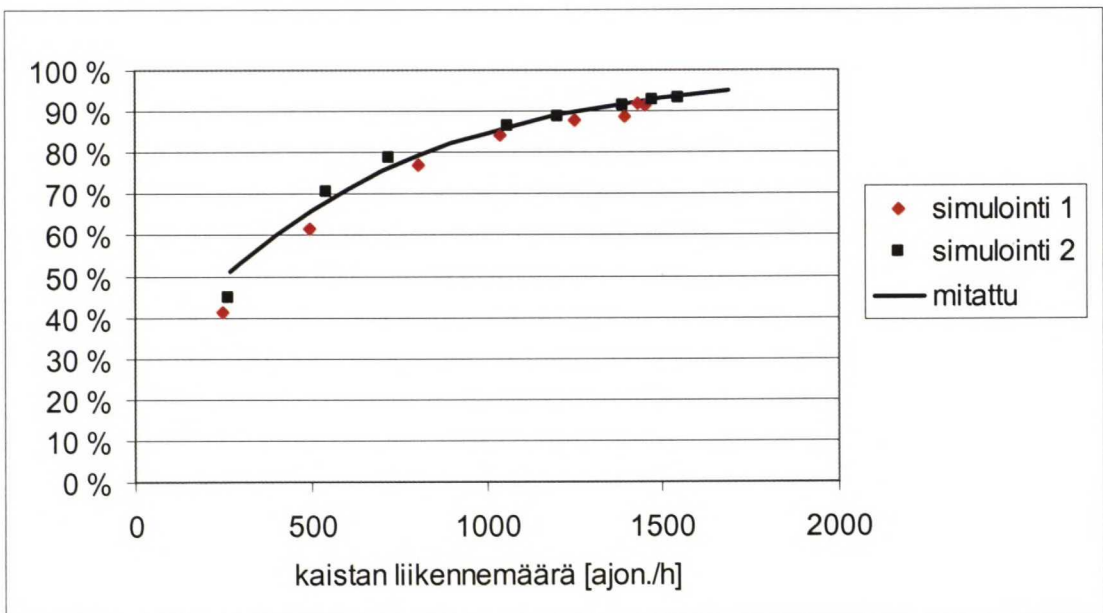
### Liikennetilanne ennen ohituskaistan alkua

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty simulointitulosten ja mittaustietojen vertailu keskinopeuksien ja jonoprosenttien osalta.



Kuva 24. Simuloidut ja mitatut nopeuksien keskiarvot ennen ohituskaistan alkua.

Kuvasta 24 nähdään, että molemmissa simuloinneissa ennen ohituskaistan alkua ajo-  
neuvojen keskinopeus on mitattuja keskinopeuksia suurempi liikennemäärästä riippu-  
matta. Verrattaessa simulointeja 1 ja 2 keskenään havaitaan, että simulointi 2:n keski-  
nopeudet ovat simulointi 1:n keskinopeuksia alempia. Tämä voi johtua vain alemmasta  
tavoitenopeusjakaumasta. Kaistanvaihtoon vaikuttavien parametrien muutokset eivät  
vaikuta ennen ohituskaistan alkua simuloituihin nopeuksiin, koska tätä ennen kaistan-  
vaihto ei ole mahdollista.



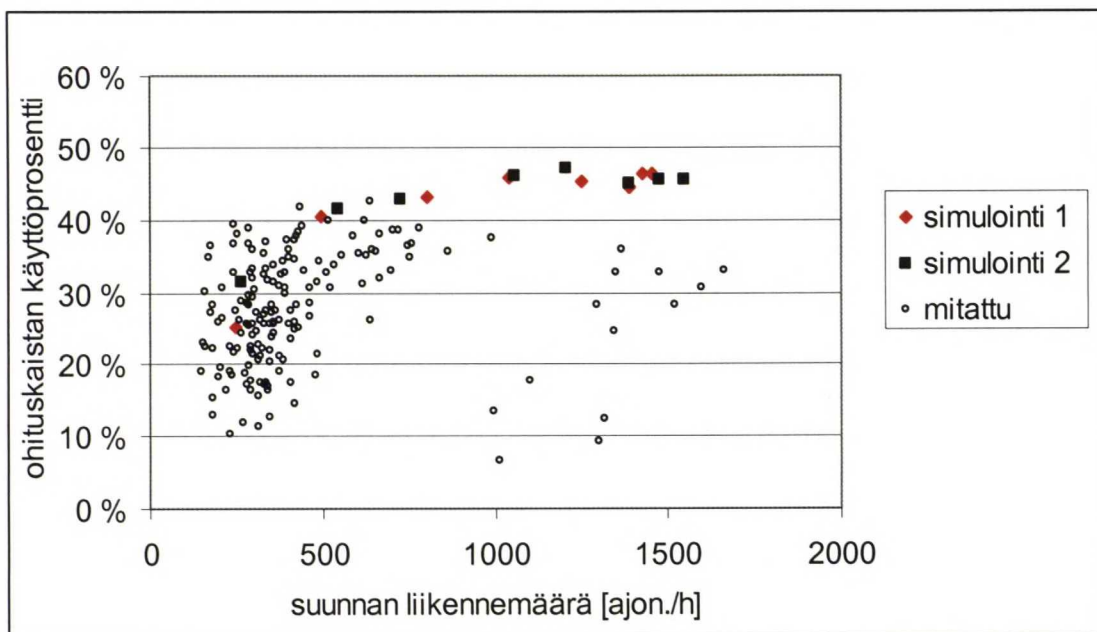
Kuva 25. Simuloidut ja mitatut jonoprosentit ennen ohituskaistan alkua.

Kuvasta 25 nähdään, että simuloidut ja mitatut jonoprosenttien arvot ennen ohituskaistan  
alkua ovat hyvin lähellä. Toisinaan tämä olikin todennäköistä, sillä jonoprosentti on  
voimakkaasti liikennemääräriippuvainen suure. Simulointien keskinäinen vertailu

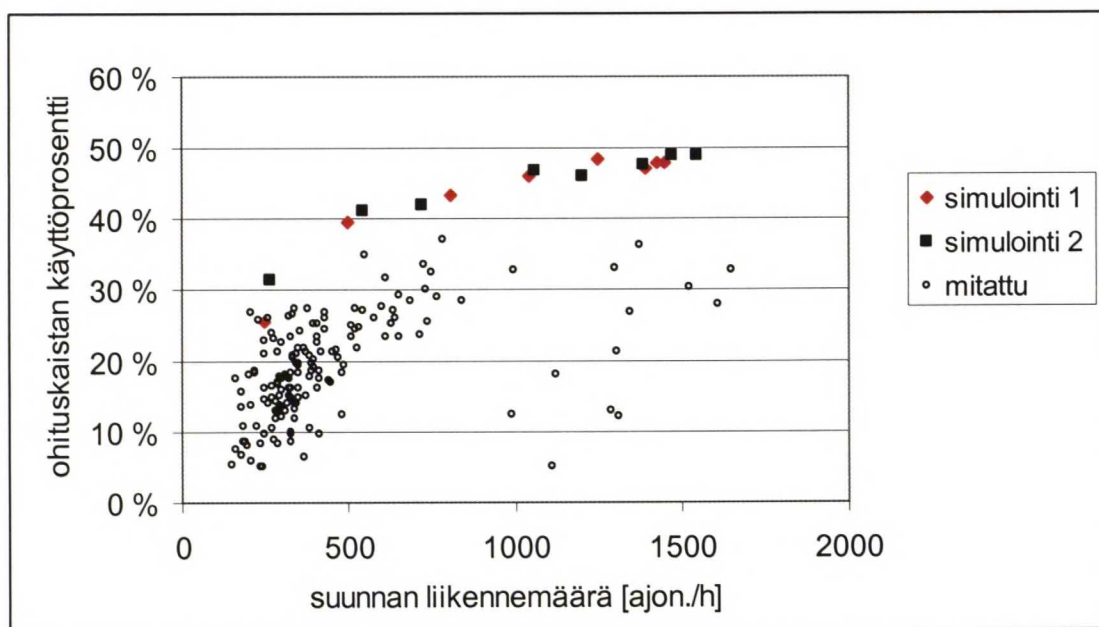
osoittaa, että simulointi 2:n jonoprosentit ovat simulointi 1:n jonoprosentteja suurempia. Tämä johtuu erosta tavoitenopeusjakaumassa.

### Ohituskaistan käyttö

Kuvissa 26, 27 ja 28 on esitetty simuloitua ja mitattua ohituskaistan käyttöprosenttia suunnan liikennemäärän funktiona. Käyttöprosentti kertoo kuinka monta prosenttia ajoneuvoista käyttää mittauspisteen kohdalla ohituskaistaa.

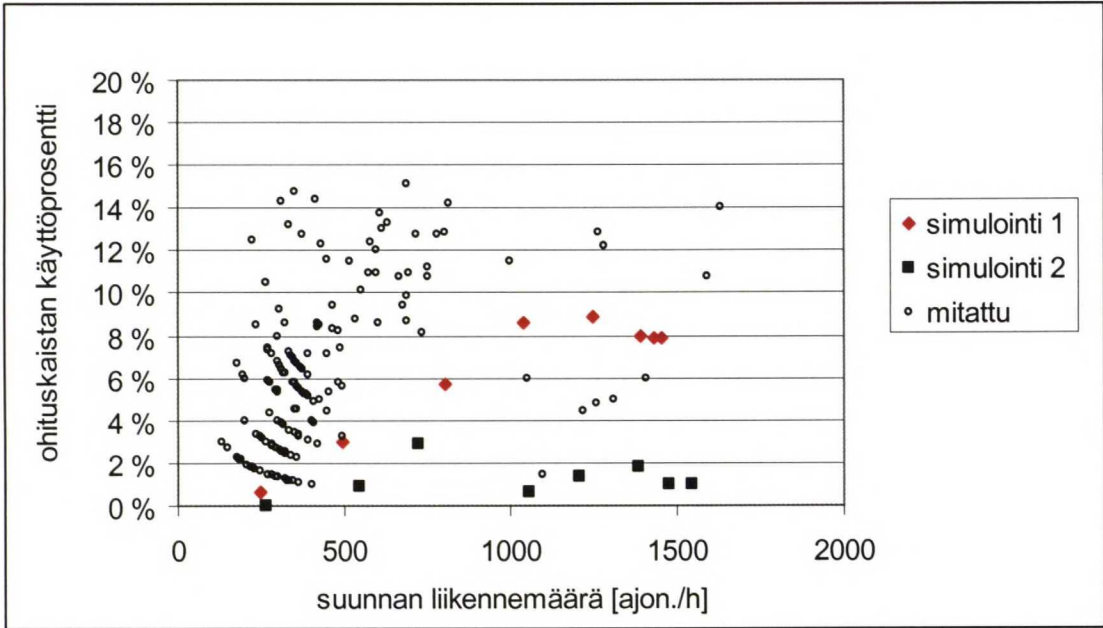


Kuva 26. Ohituskaistan käyttöprosentti ohituskaistan alussa.



Kuva 27. Ohituskaistan käyttöprosentti ohituskaistan keskiosassa.





Kuva 28. Ohituskaistan käyttöprosentti ohituskaistan lopussa.

Kuvista 26, 27 ja 28 nähdään, että simuloidut ohituskaistan käyttöprosentit riippuvat liikennemäärästä. Suurimat mitatut käyttöprosentit ohituskaistan alussa havaittiin liikennemäärillä 300 – 1000 ajon./h, käyttöprosentin ollessa tuolloin noin 40. Liikennemäärillä yli 1000 ajon./h, käyttöprosentit pienenevät. Simuloidut käyttöprosentit vastaavat mitattuja kohtalaisen hyvin liikennemäärän ollessa alle 700 ajoneuvoa tunnissa. Yli 1000 ajon./h liikennemäärillä simuloidut käyttöprosentit ovat huomattavasti mitattuja suurempia. Tämä johtunee siitä, että simuloinnissa kuljettajat tekevät päätöksen vaihtaa kaistaa ohituskaistalle vain lähellä edessään havaitsemansa liikennetilanteen perusteella. Käytännössä näyttäisi siltä, että suurilla liikennemäärillä osa kuljettajista pidättäytyy ohituskaistan käytöstä vaikka eivät peruskaistalla voikaan ajaa tavoitenopeuttaan. Kuljettajat arvelevat, että palaaminen peruskaistalle voi olla suurilla liikennemäärillä vaikeaa ja aiheuttaa peruskaistan liikenteelle liikaa häiriötä heidän saamaansa hyötyyn nähden.

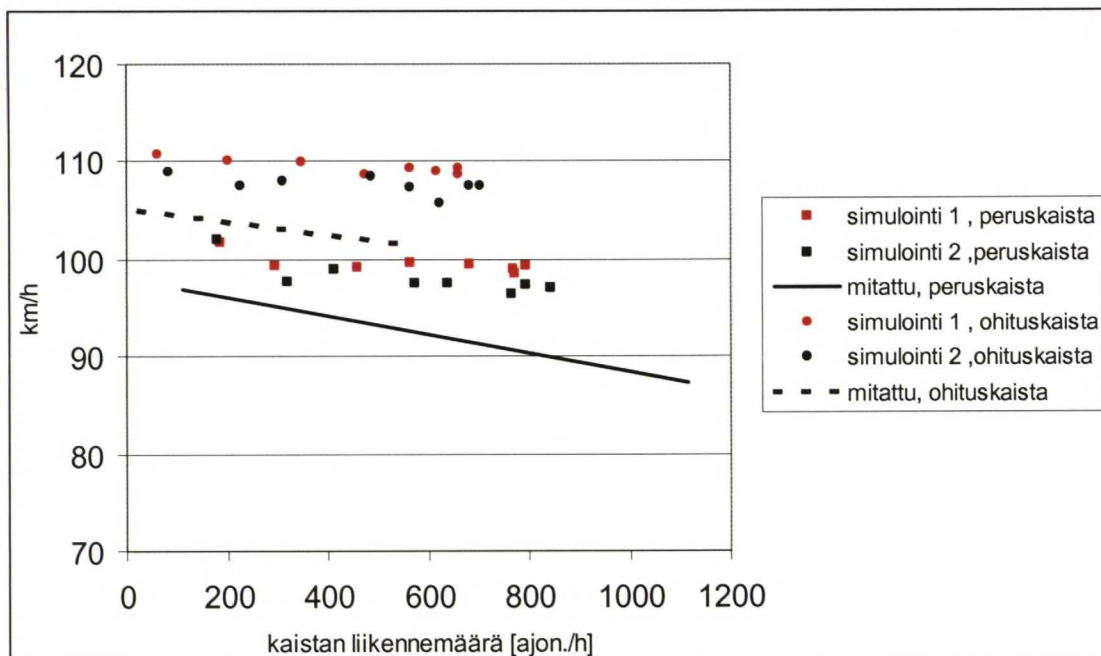
Keskellä ohituskaistaa simuloidut käyttöprosentit vastaavat melko tarkasti ohituskaistan alun käyttöprosentteja. Sen sijaan mitatut käyttöprosentit ovat pienempiä kuin ohituskaistan alussa. Tämä johtunee siitä, että ennen ohituskaistan alkua jonossa ensimmäisenä olleet ajoneuvot ovat päättäneet ohituksensa ja palanneet peruskaistalle ennen mittauspistettä. Näyttäisi siltä, että simuloidut käyttöprosentit kasvavat vielä suurimmillakin simuloiduilla liikennemäärillä, vaikka ohituskaistan alussa näin ei tapahdukaan. Tämä johtunee siitä, että liikennemäärän ollessa 1500 ajon./h tai enemmän ohituskaistan loppupää alkaa ruuhkautua ja ohituskaistan keskiosassa ajavien on hidastettava. Tämän seurauksena osa kuljettajista vaihtaa kaistaa ohituskaistalle.

Ohituskaistan lopussa sekä havaitut että simuloidut ohituskaistan käyttöprosentit olivat huomattavasti pienempiä kuin kahdessa muussa mittauspisteessä havaitut. Verrattaessa simulointituloksia toisiinsa huomataan, että simulointi 2:n ohituskaistan käyttöprosentit olivat huomattavasti pienempiä kuin simulointi 1:n. Tämä johtuu simulointi 2:ssa

käytetyistä kaistanvaihtoparametreista, joiden seurauksena ajoneuvot hyväksyvät peruskaistalla myös hyvin lyhyitä aikavälejä.

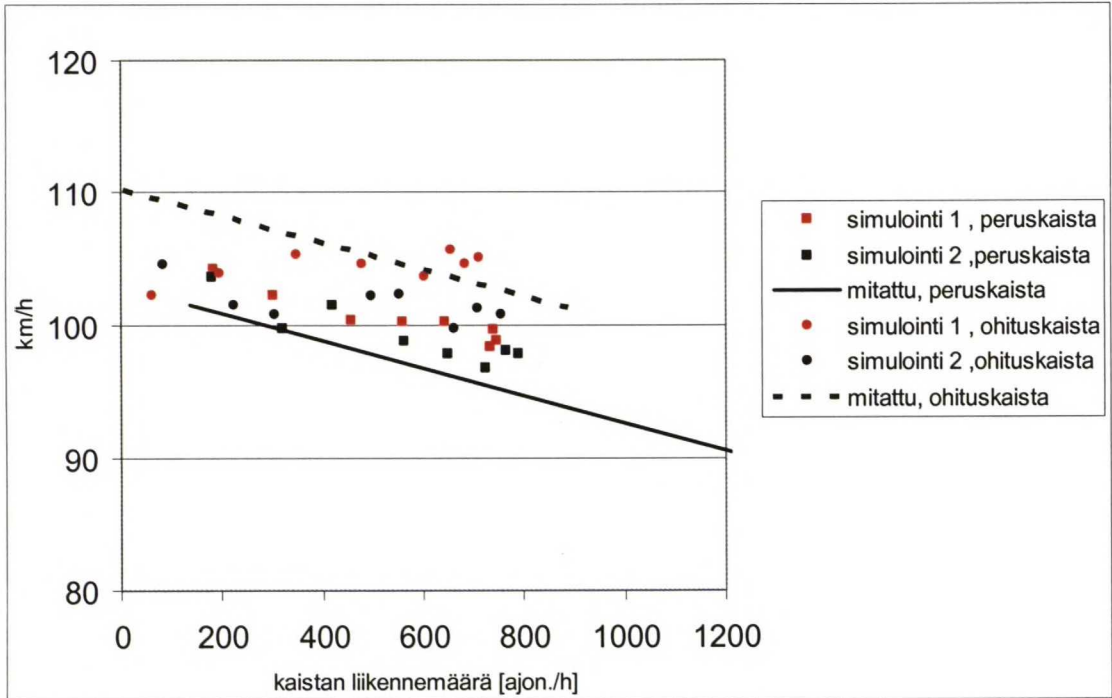
### Nopeudet ohituskaistan kohdalla

Kuvissa 29, 30 ja 31 on esitetty simuloitua ja mitattua liikennevirran keskinopeudet ohituskaistan kohdalla kolmessa eri pisteessä.



Kuva 29. Simuloitua ja mitattua keskinopeudet perus- ja ohituskaistalla ohituskaistan alussa.

Kuvasta 29 nähdään, että ohituskaistan alussa molempien simulointien keskinopeudet olivat mitattuja suurempia sekä perus- että ohituskaistalla. Verrattaessa keskinopeuksia peruskaistalla ohituskaistan alussa (kuva 29) ja ennen ohituskaistan alkua (kuva 24) havaitaan, että mitatut keskinopeudet ovat näissä pisteissä saman suuruisia. Simuloitua nopeudet taas kasvavat jonkin verran siirryttäessä ohituskaistan alkuun.

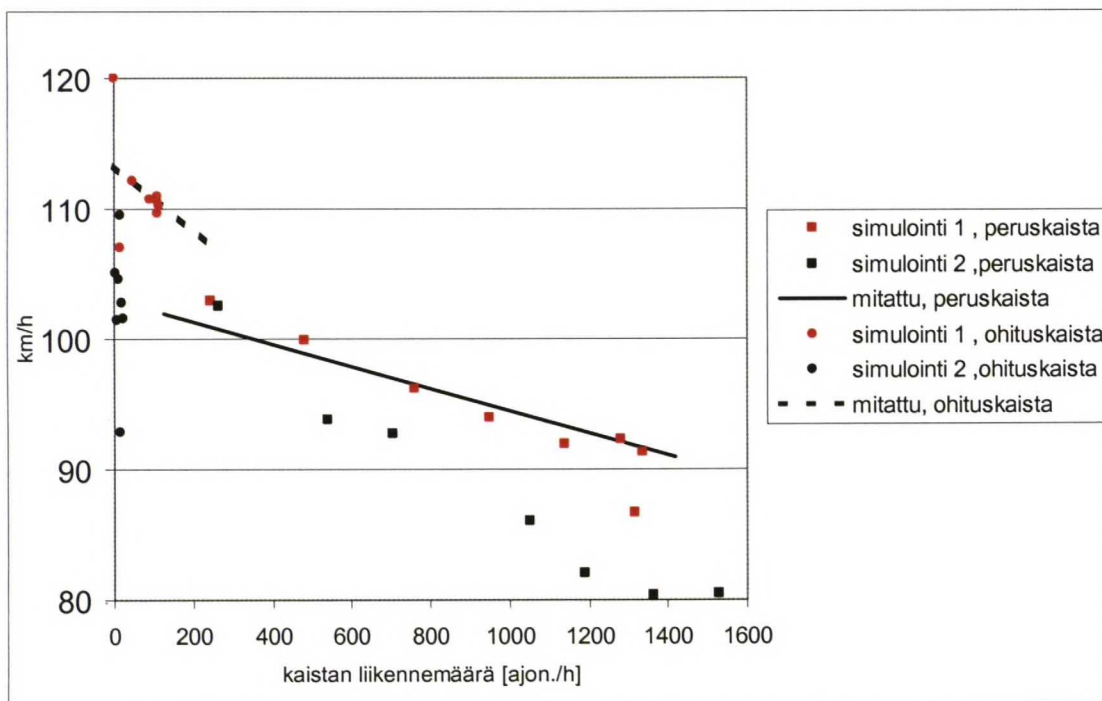


Kuva 30. Simuloidut ja mitatut keskinopeudet perus- ja ohituskaistalla ohituskaistan keskiosassa.

Kuvasta nähdään, että ohituskaistan keskiosassa ohituskaistalla simuloidut keskinopeudet ovat korkeampia kuin mitatut keskinopeudet, kun tilanne vielä ohituskaistan alussa oli päinvastainen. Tämä johtunee siitä, että simuloidut ohituskaistan käyttöprosentit olivat huomattavasti mitattuja käyttöprosentteja suurempia (kuva 26). Simuloinnissa ajo-olosuhteet ohituskaistalla eivät mahdollista mitatun suuruisia nopeuksia. Simuloitujen keskinopeuksien alhaisuus ei riipu tavoitenopeusjakaumasta, koska ohituskaistan alussa simuloidut keskinopeudet ohituskaistalla olivat keskiosaa korkeampia.

Kuvien 29 ja 30 perusteella näyttäisi siltä, että ohituskaistan alussa ja keskiosassa simuloidut peruskaistan keskinopeudet laskevat liikennemäärän kasvaessa suunnilleen yhtä nopeasti kuin mitatut keskinopeudet. Sen sijaan simuloidut ohituskaistan keskinopeudet eivät alene liikennemäärän kasvaessa kuten mitatut.





Kuva 31. Simuloidut ja mitatut keskinopeudet perus- ja ohituskaistalla ohituskaistan keskiosassa.

Kuvasta 31 nähdään, että ohituskaistan lopussa simulointi 1:n keskinopeudet ja mitattujen keskinopeuksien nopeustaso vastaavat toisiaan melko hyvin. Simulointi 1:n ohituskaistan keskinopeuksia kuvaava pisteistö ei kuitenkaan tue mittauksia kuvaavaa suoraa, jossa keskinopeus laskee liikennemäärän kasvaessa. Simulointi 2:n keskinopeudet ovat mitattuja selvästi alhaisempia. Kun vielä huomioidaan se, että simulointi 2:n ohituskaistan käyttöprosentit olivat huomattavasti mitattuja alempia, voidaan todeta simulointi 1:ssä käytettyjen kaistanvaihtoparametrien tuottavan ohituskaistan loppua tarkasteltaessa paremman tuloksen kuin simulointi 2:ssa käytettyjen.

## 7.2.6 Johtopäätökset

Moottoritieympäristöön kalibroitu kaistanvaihtotoiminto ei antanut ohituskaistan kaistanvaihdossa tyydyttävää tulosta. Pääsyy tähän on kuljettajien ohituskaistalla ja erityisesti ohituskaistatiellä omaksuma ajotapa, jossa ollaan valmiita hyväksymään hyvin lyhyitä aikavälejä kaistanvaihdon yhteydessä. Käytännössä lyhyiden aikavälien hyväksyminen on yleisintä juuri ennen ohituskaistan loppua. Simulointikokeen perusteella ohituskaistan lopussa liikennevirran nopeus laskee hetkellisesti huomattavasti pienemmällä liikennemäärällä kuin käytännössä tapahtuu. Asiaa voitaneen korjata jonkin verran kalibroimalla kaistanvaihtoaikaväli vastaamaan paremmin ohituskaistalla todellisuudessa esiintyvää.

Simuloinnissa liikennetilanteen arviointi ja siitä seuraava päätöksenteko perustuu vain edessä melko lähellä ajavien ajoneuvojen havainnointiin. Tämän vuoksi ohituskaistalle siirrytään myös sellaisissa tilanteissa, joissa kuljettajat todellisuudessa eivät ohituskaistalle siirtyisi, koska arvioivat peruskaistalle paluun vaikeaksi.

Ohituskaistan lopun mallintamiseen liittyvät ongelmat voisivat olla ratkaistavissa ”ohituskaistan loppu” elementin avulla. Tässä erityiselementissä ajoneuvojen käytös kalibroitaisiin vastaamaan todellisuutta ilman, että ajokäyttäytyminen mallin muissa osissa muuttuisi.

Vaikka asia ei tämän tutkimuksen tuloksista ilmenekään, voidaan olettaa, että ohittaessaan kuljettajat muuttavat nopeuskäyttäytymistään ja ovat valmiita ajamaan ylinopeutta ohitusmatkaa ja –aika lyhentääkseen ja voidakseen suorittaa yhden ohituskaistan matkalla useita ohituksia. Lyhyen tähtäimen kehitystyössä asia voitaneen järjestää asettamalla tavoitenopeusjakauma ja putkikohtaiset nopeusrajoituksen siten, että ohituskaistaa ajavat pyrkivät käyttämään suurempia nopeuksia kuin peruskaistaa ajavat.

Yksittäistä ohituskaistaa simuloitaessa tulisi ohituskaistan mallintaa myös ohituskaistan edeltävä tieosa riittävän pitkältä matkalta. Näin menetellen varmistetaan, että simuloitu liikennevirta ohituskaistan alussa vastaa todellista. Erityisesti ohituskaistatiellä, missä ohituskaistan vastakkaisella suunnalla on ohituskielto, ohituskaistaa edeltävän ohituskieltoalueen pituus vaikuttaa merkittävästi jonoutumiseen ohituskaistan alussa.

Toistaiseksi HUTSIMilla ei ole mielekästä tutkia useista ohituskaistoista muodostuvan ohituskaistatien toimintaa. Ennen ohituskaistatien toiminnan tarkastelua on varmistettava ohjelman toiminnasta yksittäisen ohituskaistan simuloinnista, ja siinä erityisesti ajokäyttäytymisen mallintamisesta ohituksen aikana.

### **7.3 Kaksikaistainen tie Koskenkylä – Liljendal**

#### **7.3.1 Tutkimuskohteen ominaisuudet ja vertailuaineisto**

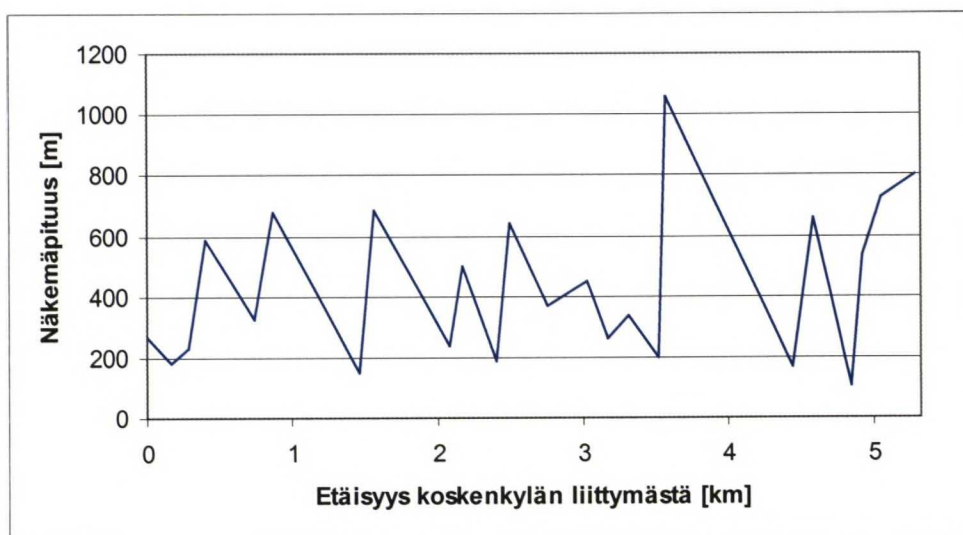
Tutkimusalue sijaitsee valtatiellä 6 Koskenkylän koillispuolella. Tutkimusalueen pituus on noin 5,3 km. Alue rajoittuu eteläpäästään Koskenkylän liittymän (mt 1673) ja pohjoispäässään vertailuaineiston keräämisen yhteydessä käytetyn mittauspisteen paikkaan noin 1230 metriä Liljendalin liittymästä Kouvolaan päin. Tutkimusalue kuuluu kokonaisuudessaan vt 6:n tieosaan 117. Ajouradan leveys tutkimusalueella on 7 metriä. Nopeusrajoitus on 100 km/h. Tie on sekaliikennetie eli tiellä liikkuu myös kevyttä liikennettä.





Kuva 32. Koskenkylä – Liljendal –tarkastelualueen sijainti.

Vt 6 välillä Koskenkylä – Kouvola tunnetaan yhtenä Etelä-Suomen ongelmallisena kaksikaistaisena päätienä. Ajoradan kapeus ja suuret liikennemäärät etenkin kesäperjantaisin ruuhkauttavat liikenteen helposti. Lisäksi ohittaminen on tiellä heikokkojen näkemäolosuhteiden vuoksi. Huonot näkemäolosuhteet johtuvat tieosan mäkisyydestä. Tieosan näkemäkäyrä Koskenkylän liittymästä Liljendalin suuntaan on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Tutkimusalueen näkemäkäyrä.

Tutkimusalueella sijaitsee Tielaitoksen liikenteen automaattinen mittauspiste numero 111. Keskimääräinen vuorokausiliikenne LAM –pisteessä 111 oli vuonna 1998 6 053 ajoneuvoa vuorokaudessa.



Tämän tutkimuksen tuloksia on verrattu Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratorion 4.9.1998 tekemässä liikennevirtatutkimuksessa saatuihin tuloksiin. Liikennevirtatutkimus tehtiin rekisteritunnustutkimuksena kahdella videokameralla. Tutkimus tehtiin perjantain menoliikenteessä. Sää tutkimushetkellä oli pilvipoutainen tai pilvinen. Seitsemän tunnin mittaisen tutkimuksen aikana liikennemäärä Liljendalin suuntaan oli yhteensä noin 4 300 ajoneuvoa ja Koskenkylän suuntaan noin 1 400 ajoneuvoa. 15 minuutin jaksoissa havaittu tuntiliikenne vaihteli Liljendalin suuntaan välillä 328 - 1 016 ajoneuvoa tunnissa ja Koskenkylän suuntaan välillä 120 – 372 ajoneuvoa tunnissa. (Enberg 1998).

### 7.3.2 Mallintaminen ja koeasetelma

Pääasiallisen tietolähteenä HUTSIM –mallin laadinnassa käytettiin tierekisterin tietolajin 111 (kaarteet) tietoja. Tietolaji sisältää tiedot tieosan vaakageometriasta. *Taulukossa 11* on esitetty tutkimusalueen vaakageometriian elementtien pituudet, kaarresäteet, sekä HUTSIMissa asetettu putkikohtainen nopeusrajoitus kaarteissa. HUTSIM –malliin asetettiin nopeusrajoitukset kaarteisiin, mikäli *kaavan 1* (sivu 13) perusteella laskettu kaarresäteestä johtuva nopeusrajoitus johti alle 100 km/h rajoituksiin. Tien linjaus on kohtalaisen suora, joten vain etelästä tullessa ensimmäinen kaarre sai putkeen merkityn nopeusrajoituksen 94 km/h. Mallin muihin putkiin nopeusrajoituksia ei merkitty, joten ajoneuvot pyrkivät muualla ajamaan tavoitenopectaan. Vapaan ajoneuvon nopeuden määräytymistä HUTSIMissa on selvitetty tarkemmin luvussa 7.4.3.

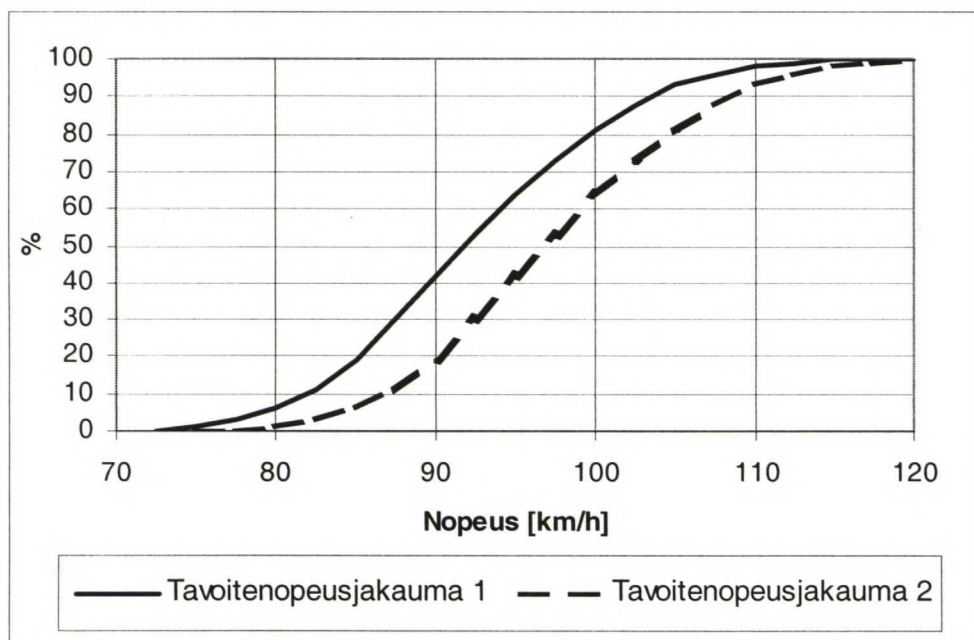
*Taulukko 11. Vt 6:n tarkastelualueen tielinjan elementit Liljendalin suuntaan.*

Elementti, kaartein suunta	Elementin pituus [m]	Kaartein kaarresäde [m]	HUTSIM-nopeusrajoitus [km/h]
Kaarre oikeaan	473	753	94
Suora	847		
Kaarre oikeaan	155	1480	
Suora	650		
Kaarre oikeaan	107	1533	
Suora	1094		
Kaarre oikeaan	356	1133	
Suora	1548		
Kaarre oikeaan	143	1639	

### 7.3.3 Simuloinneissa käytetyt lähtötiedot

Simuloinnit tehtiin käyttäen kahta tavoitenopectajakaumaa. Tavoitenopectajakauma 1 vastasi LAM –pisteen 111 keräämistä nopeustiedoista poimittua vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaa. Vapaan ajoneuvon kriteerinä käytettiin viiden sekunnin nettoaikaväliä (perästä keulaan) edellä ajavaan. Tavoitenopectajakauma 2 saatiin kun tavoitenopectajakauma 1 siirrettiin 5 km/h suurempia nopeuksia kohti. Tavoitenopectajakaumat

ovat muodoltaan samanlaisia, joten jakaumien keskihajonta on sama (8,2 km/h). Käytetyt nopeusjakaumat on esitetty kuvassa 34.



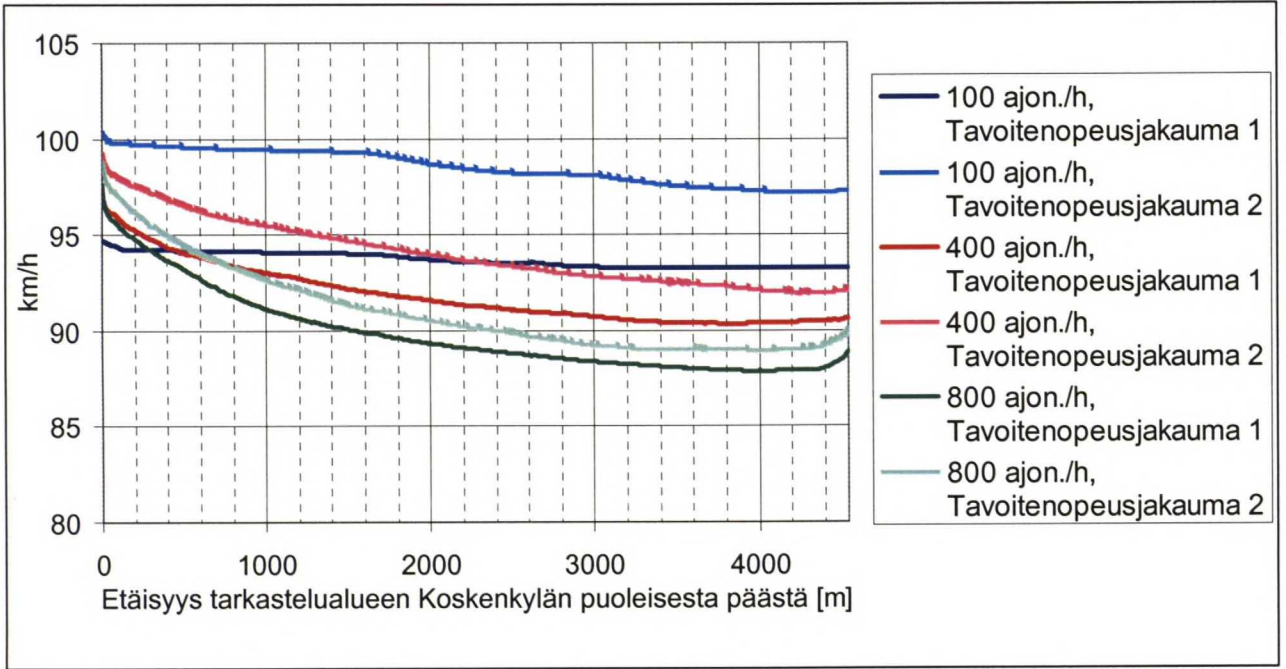
Kuva 34. Vt 6:n simuloinnissa käytetyt tavoitenopeusjakaumat. Tavoitenopeusjakauma 1:n keskiarvo oli 92,8 km/h ja keskihajonta 8,3. Tavoitenopeusjakauma 2:n keskiarvo oli 97,5 km/h ja keskihajonta 7,9.

#### 7.3.4 Tulokset

Valtatie 6:n simuloinnissa vertailuaineisto käsitti vain rekisteritunnustutkimuksella hankittua mittaustietoa. Tämän vuoksi pistenopeuksia ei simuloitu. Myöskään simuloituja nopeusprofiileja ei vastaavia mittaustietoja ei ollut käytettävissä.

#### Nopeusprofiilit

Kuvassa 35 on esitetty simuloitua matka-nopeus-käyrä vti 6:lla Liljendalin suuntaan.



Kuva 35. Esimerkkejä simuloituista matka-nopeus-käyristä vt 6:lla Liljendalin suuntaan.

Kuvan 35 matka-nopeus-käyristä nähdään, että kaarteisiin asetetut putkikohtaiset nopeusrajoitukset aiheuttavat keskinopeuksien huomattavan alenemisen kaarteiden kohdalla. Vaikka mitään vertailutietoa ei olekaan käytettävissä, voidaan olettaa, että nopeusalenema on suurempi kuin keskinopeuden alenema todellisuudessa. Keskinopeuksien alenema johtune haitariliikkeestä, joka syntyy, kun edessä ajavan hiljentäessä takana tuleva ensin alentaa nopeutta estääkseen joutumisensa liian lähelle edellä ajavaa ja sen jälkeen taas kiihdyttää pitääkseen seuranta-aikavälin pituuden mahdollisimman lähellä asetettua arvoa. Etenkin suurilla liikennemäärillä, jolloin jonot muodostuvat pitkiksi, keskinopeuden alenema on huomattavasti suurempi kuin vapaiden ajoneuvojen keskinopeuksien alenema.

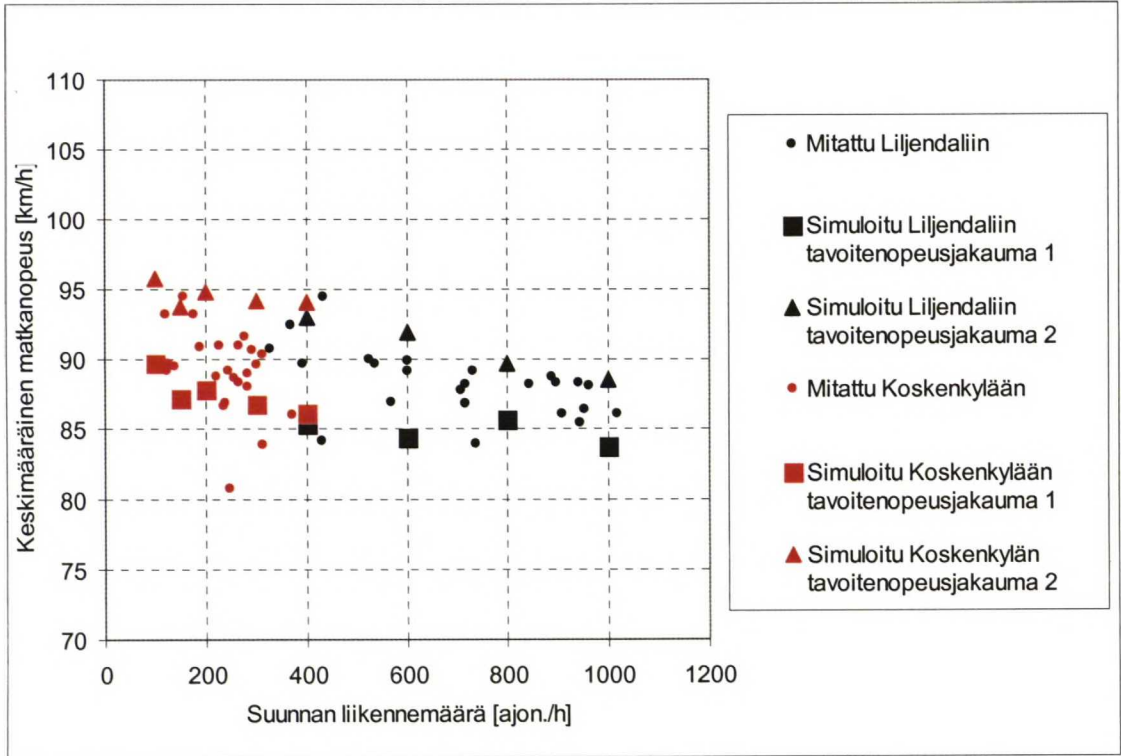
Tarkastelualueen lopussa nopeudet näyttäisivät nousevan. Tämä johtuu siitä, että malli ei jatkunut tarkastelualueen ulkopuolella riittävän pitkään. Nyt jonossa ajavat nostavat nopeuttaan edellä ajavan poistuttua mallista. Jos malli olisi jatkunut tarkastelualueen ulkopuolella pidempään ei tämä ilmiö näkyisi tarkastelualueen käsittävissä matka-nopeus-käyrässä.

### **Matkanopeudet**

Simuloituja matkanopeuksia verrattiin Teknillisen korkeakoulun mittaamiin matkanopeuksiin. Koska mittaukset tehtiin perjantai-iltapäivänä oli liikennettä Liljendaliin huomattavasti enemmän kuin Koskenkylään.

Kuvassa 36 on esitetty simuloitujen ja mitattujen matkanopeuksien keskiarvojen vertailu.



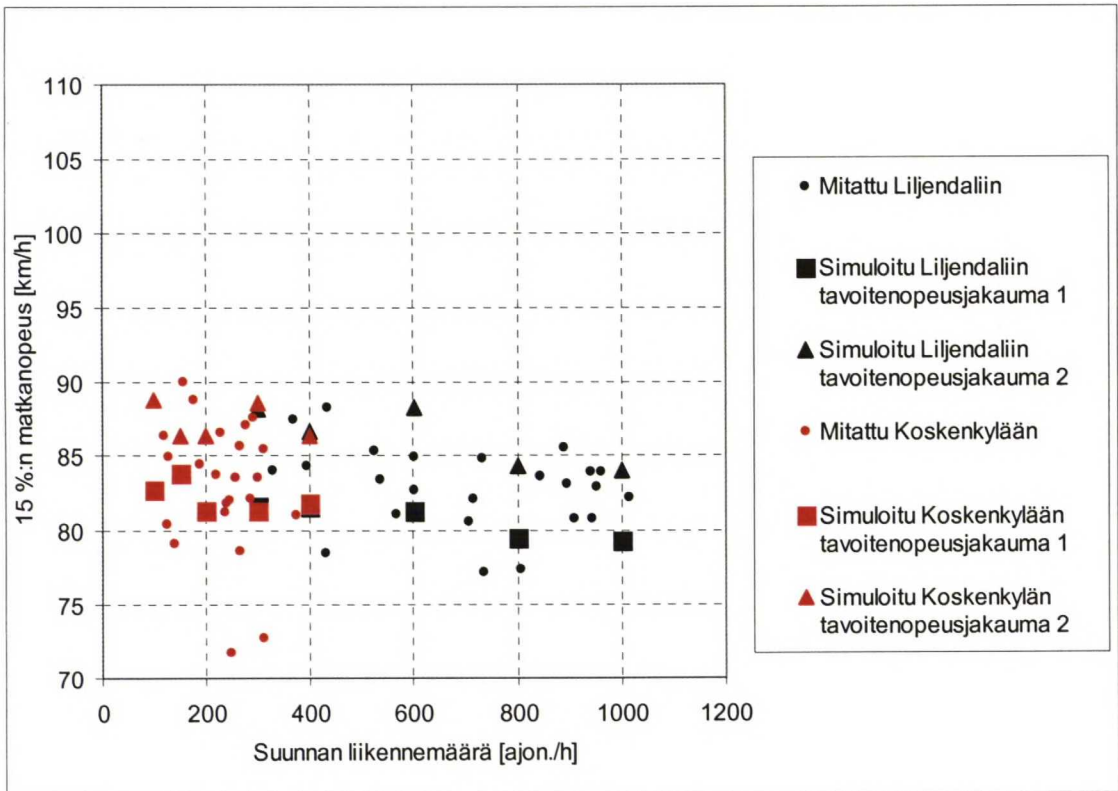


Kuva 36. Mitattujen ja simuloitujen matkanopeuksien keskiarvojen vertailu vt 6:n simuloinnissa.

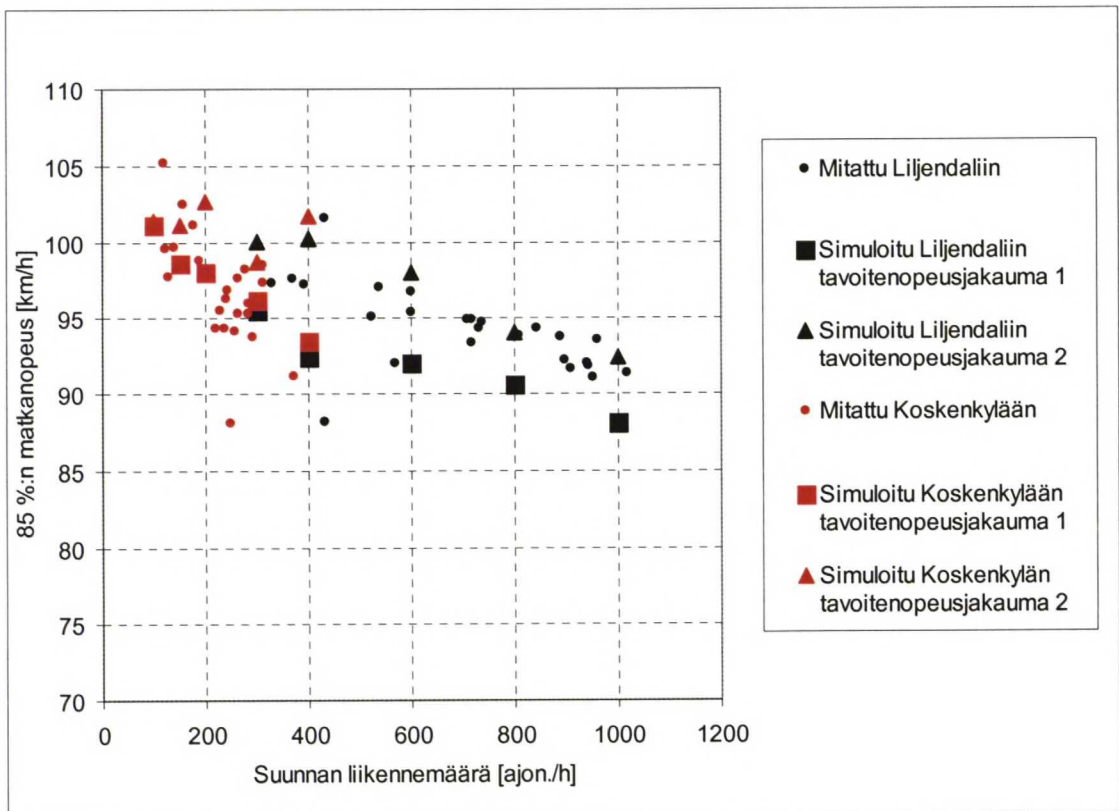
Kuvasta 36 nähdään, että vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaan perustuvalla tavoitenopeusjakaumalla 1 simuloitujen matkanopeuksien keskiarvot ovat liikennemäärästä riippumatta mitattuja nopeuksia pienempiä. Tavoitenopeusjakaumalla 2 simuloitujen nopeudet ovat mitattuja nopeuksia suurempia.

Eri tavoitenopeusjakaumilla simuloitujen matkanopeuksien keskiarvot poikkeavat toisistaan noin 5 km/h liikennemäärästä riippumatta.

Kuvissa 37 ja 38 on esitetty mitatut ja simuloitut 15 %:n ja 85 %:n nopeudet. 15 %:n nopeudella tarkoitetaan nopeutta, jonka 15 % ajoneuvoista alittaa. 85 %:n nopeus on nopeus, jonka 85 % ajoneuvoista alittaa.



Kuva 37. Mitattujen ja simuloitujen matkanopeuksien 15 % nopeuksien vertailu vt 6:n simuloinnissa.



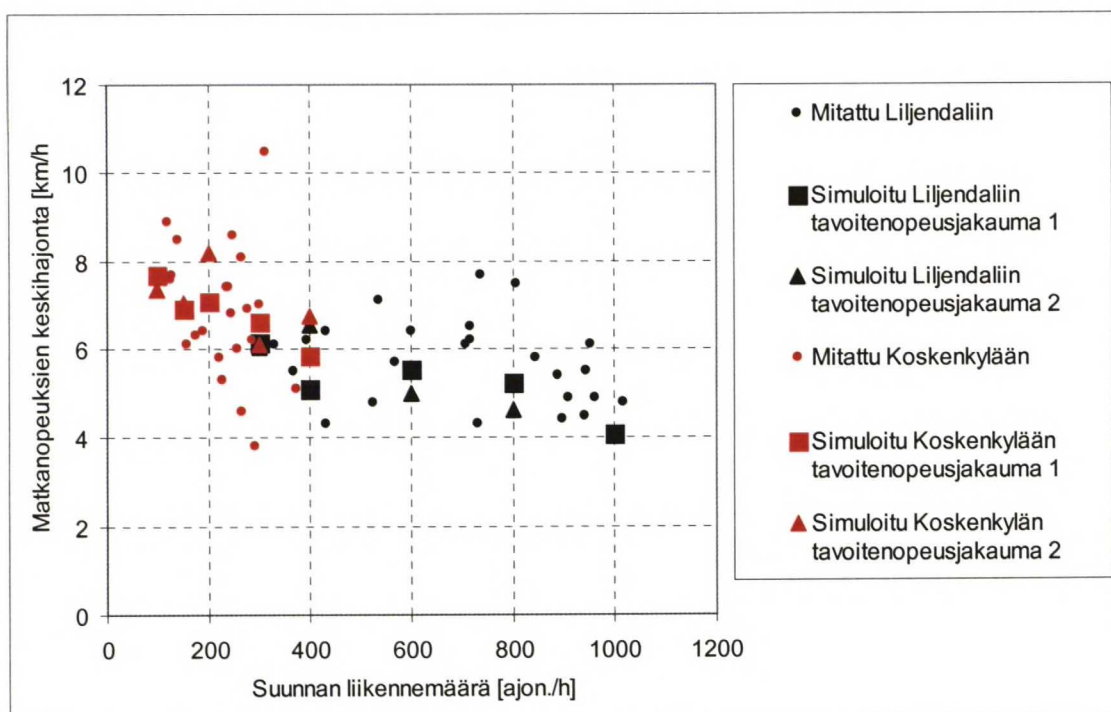
Kuva 38. Mitattujen ja simuloitujen matkanopeuksien 85 % nopeuksien vertailu vt 6:n simuloinnissa.

Kuvia 37 ja 38 verrattaessa huomataan, että 85 %:n nopeudet laskevat liikennemäärän kasvaessa voimakkaammin kuin 15 %:n nopeudet. Sama ilmiö on nähtävissä sekä mitatuissa että simuloituissa nopeuksissa. 85 %:n nopeuksien lasku suunnan liikennemäärän kasvaessa onkin luonnollista, koska suuremmilla liikennemäärillä todennäköisyys, että hitaampi ajoneuvo rajoittaa korkeampia nopeuksia, on suurempi kuin pienillä liikennemäärillä.

Kuvasta 37 nähdään, että mitatuissa nopeuksissa on muutamia selvästi muita alempia havaintoja, joita ei voida selittää suunnan liikennemäärällä. Nämä muita alhaisemmat nopeushavainnot johtuvat todennäköisesti verraten lyhyeen (15 minuuttia) mittausjaksoon sattuneista useista selvästi muuta liikennettä hitaammista ajoneuvoista. Simuloinneissa tällaisia yksittäisiä alempia nopeushavaintoja ei ole.

### Matkanopeuksien keskihajonta

Kuvassa 39 on esitetty mitattujen ja simuloitujen matkanopeuksien keskihajonnan vertailu.



Kuva 39. Mitattujen ja simuloitujen matkanopeuksien keskihajonnan vertailu vt 6:n simuloinnissa.

Vertailuaineistossa matkanopeuksien keskihajonta vaihtelee paljon. Etenkin Koskenkylään suuntaan, missä havaitut liikennemäärät ovat kaikki alle 400 ajoneuvoa tunnissa, vaihtelu on suurta. Tavoitenopeusjakauman vaikutus simuloitujen matkanopeuksien keskihajontaan on pieni.

### 7.3.5 Johtopäätökset

Korkean nopeustason kaksikaistaisen tien simulointi osoitti, että simulointitulokset ovat hyvin herkkiä tavoitenopeusjakauman muutoksille.



HUTSIMissa ajoradan leveyden vaikutusta ei voida mallintaa, vaan ajoneuvoputki on leveyssuunnassa dimensioton objekti. Tässä tutkimuksessa mallinnetun tien päällysteen leveys on 8 metriä, josta kaistojen leveys yhteensä 7,5 metriä. Simuloitavan tien leveys ei siis kuitenkaan vaikuta malliin mitenkään. Tien leveyden vaikutus näkyy tiellä mitatussa tavoitenopeusjakaumassa ja vaikuttaa näin simulointituloksiin.

## 7.4 Alhaisen nopeustason kaksikaistainen tie

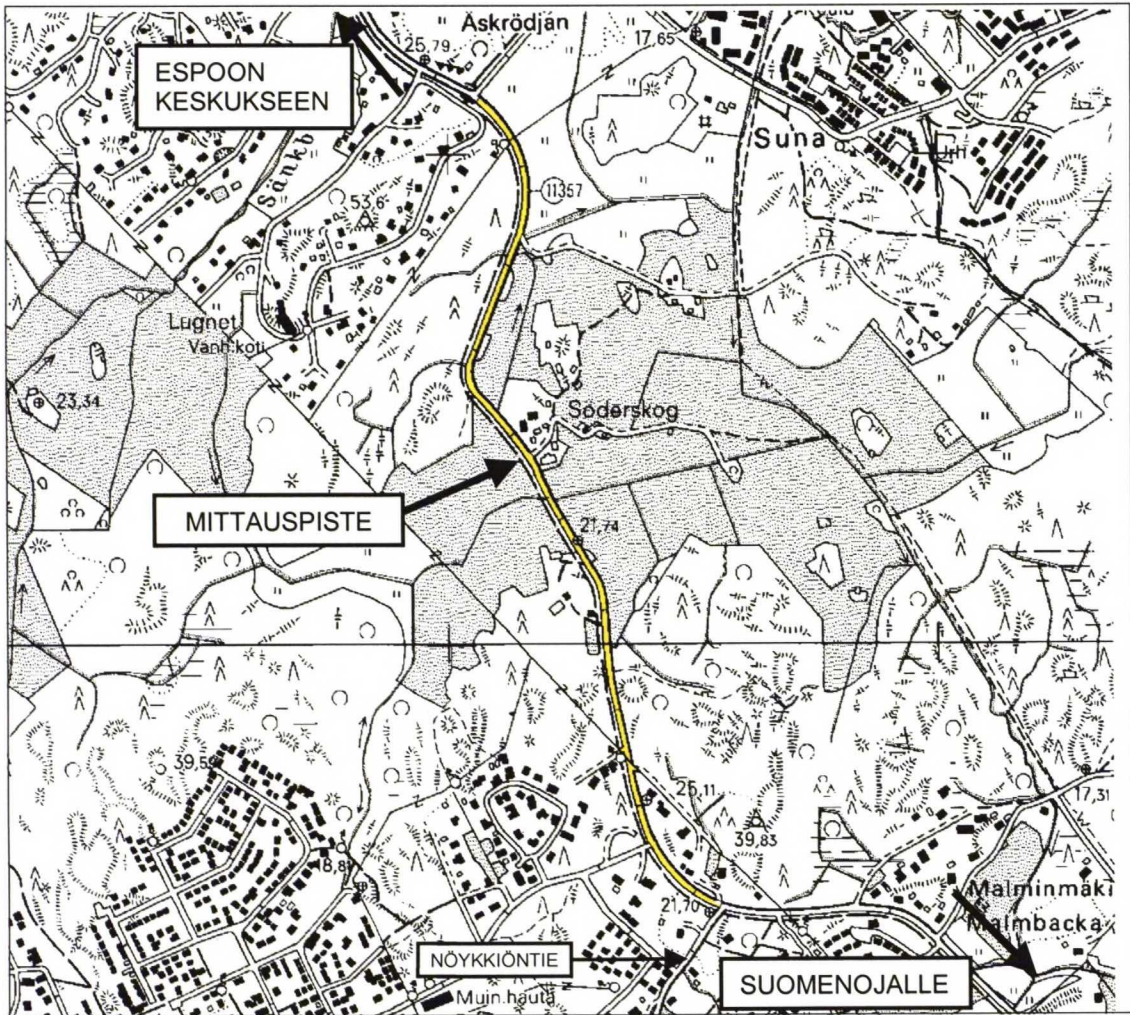
### 7.4.1 Tutkimuskohteen ominaisuudet ja vertailuaineisto

Mallinnusalue on Espoossa sijaitseva Finnoontien pohjoispää noin 2,1 km:n matkalta (kuva 40). Tie on merkittävimpiä yhteyksiä Pohjois- ja Etelä-Espoon välillä. Tieosan pohjoispäässä sijaitsee tiivis taajamamainen Espoon keskus ja eteläpäässä pientalovaltaiset Nöyekiön, Puolarmetsän ja Latokasken alueet. Pohjoispäästä on yhteys Kehä III:lle ja valtatielle 1 (Turunväylä) ja eteläpäästä kantatielle 51 (Länsiväylä) ja sen rinnakaistielle Merituulentielle.

Mallinnettava tieosa sijaitsee maaseutumaisessa ympäristössä. Mallinnusalueella ei ole merkittäviä liittymiä. Kevyelle liikenteelle on oma väylänsä koko tarkasteltavan tieosan matkalla.

Tässä alhaisen nopeustason kaksikaistaisen tien tutkimuksessa vertailuaineistona käytetään Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratorion vuonna 1995 tekemiin mittauksiin perustuvia tuloksia. Tutkimuksia tehtiin samaan aikaan myös muilla vastaavanlaisilla väylillä, mutta tässä käytettävä vertailuaineisto käsittelee vain Finnoontien pohjoispäätä. Aineisto on analysoitu Juha Hietasen diplomityössä (Hietanen 1995) ja keskeiset tulokset on koostettu tielaitoksen julkaisuun *Liikennevirta alemman nopeustason kaksikaistaisilla väylillä* (Enberg & Hietanen 1996). Tutkimusalue mallinnettiin niin, että se vastaa vuoden 1995 tilannetta mahdollisimman tarkasti.

Edellä mainituissa tutkimuksissa tutkimusalueen pituus oli hieman yli 3 km. Tässä simulointitutkimuksessa tutkimusaluetta rajattiin tien pohjoispäästä siten, että simuloitavan tieosan pituudeksi jäi noin 2,1 km.



Kuva 40. Finnoontien tarkastelualue ja mittauspisteen sijainti.

Tässä tutkimuksessa mallinnusalueen liikennemäärinä käytetään vertailuaineiston mittauksissa vuosina 1994-95 havaittuja liikennemääriä. Suurin mittauksissa havaittu koko ajoradan liikennemäärä oli aamulla 1 850 ajon./h. Liikennemäärät havainnoitiin 15 minuutin tarkastelujaksossa. Suurin suunnittainen liikennemäärä mittauksissa havaittiin Espoon keskukseen, noin 1 000 ajon./h.

#### 7.4.2 Mallintaminen ja simulointi

Finnoontien HUTSIM -malli laadittiin vuonna 1976 tien parantamissuunnitelman yhteydessä tehdyn tien inventoinnin tietojen perusteella (Espoon kaupunki 1977). Tehty inventointi on tarkkuudeltaan yleissuunnitelmaa vastaava, joten sen tiedot riittivät hyvin mallin lähtötiedoiksi. Pituusleikkauskuvan sisältämien vaakageometriatietojen perusteella määritettiin elementtien alku- ja loppupisteet, pituudet sekä kaarresäteet. Inventointikartan avulla mitattiin myös suorien elementtien suuntakulmat.

Koska tutkimuksen tarkoitus oli tutkia kaksikaistaisen tien simulointia, jätettiin mallinnusalueella olevat liittymät huomioimatta. Merkittävänä pidettäviä liittymiä ei mallinnusalueella ole. Niiden merkitys lopputulokseen olisi ollut joka tapauksessa pieni.

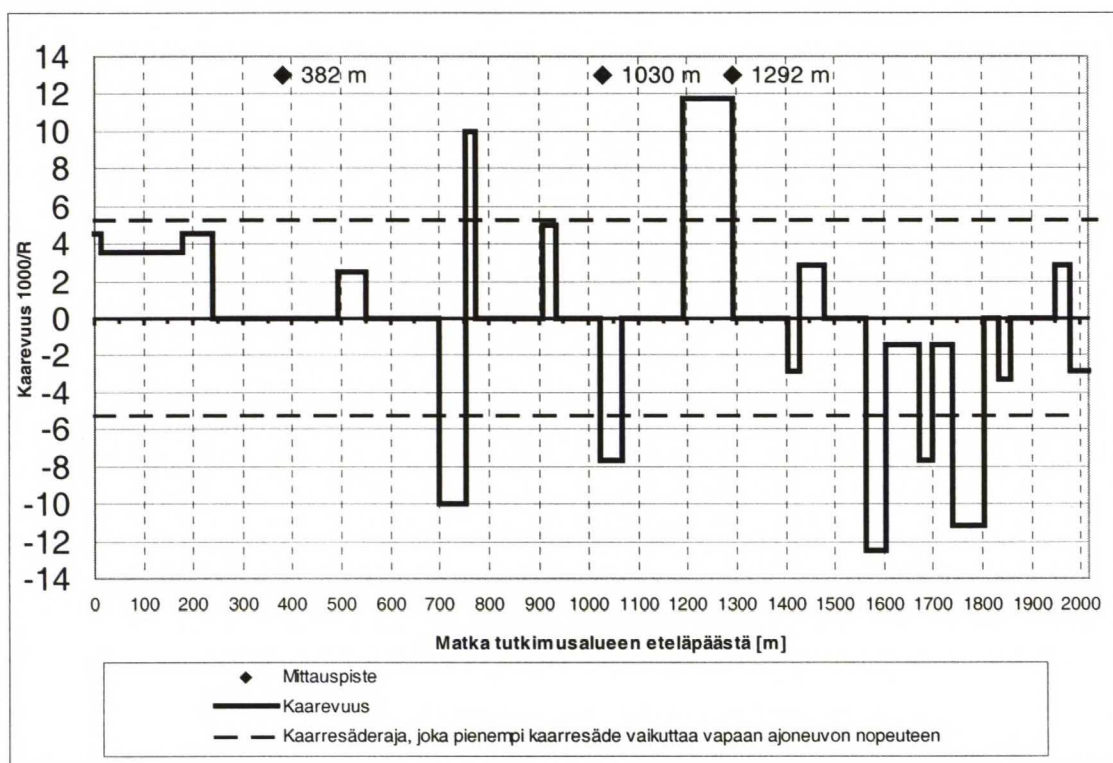


Mallinnusalueella on tiekohtainen nopeusrajoitus 60 km/h. Tien geometrian nähden nopeusrajoitusta voidaan pitää melko korkeana, sillä tiellä on kaarteita, joiden kaarresäde on jopa alle sata metriä. Toisaalta tiellä on osuuksia, joissa nopeudet nousevat helposti nopeusrajoitusta korkeammiksikin.

HUTSIMissa ajoneuvojen nopeuteen vapaissa olosuhteissa vaikuttavat ajoneuvokohtainen tavoitenopeus ja malliin asetetut nopeusrajoitukset. Lisäksi nopeusrajoitusten vaikutusta nopeuksiin säädellään nopeusrajoitusparametrin avulla. Nopeusrajoitusparametrin vaikutusta on esitelty *kuvassa 43*. Koska tässä tutkimuksessa tavoitenopeusjakauma perustui mallinnettavalla tiellä havaittuun vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaan, joka on riippuvainen tien nopeusrajoituksesta, ei ole mielekäästä asettaa koko malliin 60 km/h nopeusrajoitusta. Lisäksi nopeusrajoitus on ainoa HUTSIMissa käytettävissä oleva tapa kuvata eri tienkohtien erilaisen geometrian vaikutusta ajoneuvoihin.

HUTSIM –malliin asetettiin geometriasta aiheutuva ajoneuvojen nopeusalenema *kuvassa 1* esitetyn kaarresäteen ja nopeuden yhdistävän funktion avulla. Suorille osuiksille ja sellaisiin kaarteisiin, joiden kaarresäde olisi johtanut rajoitukseen yli 60 km/h, ei rajoituksia asetettu.

*Kuvassa 41* on esitelty kaarevuuskuvan avulla Finnoontien vaakageometria, jonka pystygeometria on kuvattu tulosten yhteydessä.



Kuva 41. Finnoontien HUTSIM -mallin vaakageometria. Kuvaan on merkitty katkoviivalla kaarresäde, jota suurempisäteisiin kaarteisiin merkittiin nopeusrajoitus. Kuvassa positiiviset kaarresäteen arvot kuvaavat etelästä pohjoiseen ajettaessa vasemmalle kaartuvia mutkia ja negatiiviset kaarresäteen arvot vastaavasti oikealle kaartuvia mutkia.



Finnoontien mallissa kaarresäteestä johtuvat rajoitukset on asetettu tarkasti tielinjan kaarteiden kohdalle. Todellisuudessa pienen kaarresäteen nopeutta alentava vaikutus ei kohdistu näin, vaan kuljettajat hiljentävät todennäköisesti nopeuttaan jo ennen kuin siirtyvät kaarteeseen. Mikäli tiellä on käytetty siirtymäkaaria, nopeuden muutos tapahtuu pääosin juuri siirtymäkaarien matkalla. Mallissa tien vaakageometria muodostuu ainoastaan suorista ja ympyräkaarista. Finnoontien kaltaisilla vanhoilla väylillä ei ole tosin välttämättä käytettykään siirtymäkaaria.

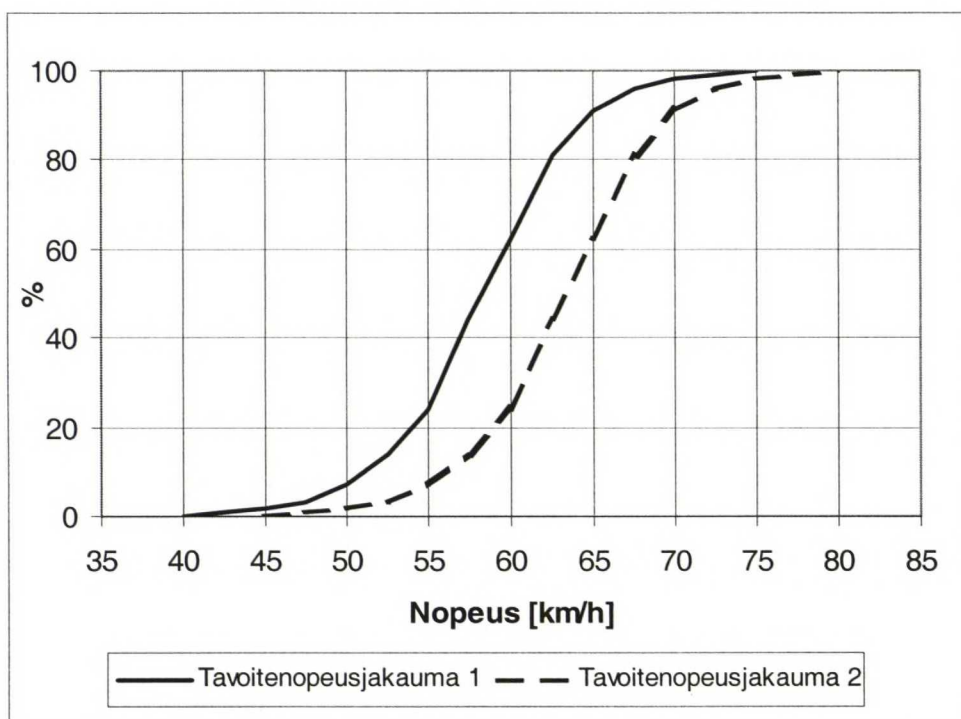
Mallinnusalueen geometrian perustietoja on esitetty *taulukossa 12*.

*Taulukko 12. Finnoontien mallinnusalueen tiegeometrian perustietoja.*

Pituus	2,02 km
Kaarteisuus	135 astetta/km
Mäkisyys	27,5 m/km
Kaarresäteeltään alle 200 metrin kaarteiden pituuden osuus koko tarkastelujakson pituudesta	17 %

*Kuvassa 42* on esitetty Finnoontien simuloinneissa käytetyt tavoitenopeusjakaumat. Tavoitenopeusjakauma 2 vastaa Hietasen (1995) mittaamaa vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaa Finnoontiellä. Mittauspiste, jossa havainnot on kerätty, sijaitsee kaarteessa (säde 130 m), jossa pituuskaltevuuden arvo on noin 3 %. Mittauspisteen sijaintikohdan pituuskaltevuudesta huolimatta eri suuntien nopeusjakaumat olivat hyvin lähellä toisiaan. Tämä johtunee siitä, että Espoon keskukseen suuntaan ajettaessa piste sijaitsee kaarteiden alussa, mutta ylämäessä, kun taas Suomenojan suuntaan ajettaessa piste sijaitsee kaarteiden lopussa, mutta alamäessä. Simuloinneissa käytettiin eri suunnilla samaa tavoitenopeusjakaumaa.

Koska oli olemassa epäily, että simulointitulokset ovat hyvin herkkiä tavoitenopeusjakauman muutoksille, tehtiin simuloinnit myös toisella tavoitenopeusjakaumalla. Tavoitenopeusjakauma 1 vastaa mitattua vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaa. Tavoitenopeusjakaumassa 2 nopeusjakaumaa on siirretty 5 km/h suurempaa nopeutta kohti. Yksinkertaisuuden vuoksi kaikissa simuloinneissa käytettiin samoja ajoneuvotyyppijakaumia.



Kuva 42. Finnoontien simuloinneissa käytettyjen nopeusjakaumien summakäyrät. Tavoitenopeusjakauma 1:n keskiarvo oli 58,9 km/h ja keskihajonta 5,6. Tavoitenopeusjakauma 2:n keskiarvo oli 64,0 km/h ja keskihajonta 5,6.

Finnoontien simuloinneissa käytettiin taulukossa 13 esitettyä ajoneuvotyyppijakaumaa. Jakauma perustuu Hietasen (1995) tutkimuksessa havaittuun ajoneuvotyyppijakaumaan. Tutkimuksen mukaan jakauma vaihteli eri mittausajankohtina huomattavasti. Simuloinneissa käytetty jakauma on asetettu kuvaamaan havaittujen jakaumien keskiarvoa. Yksinkertaisuuden vuoksi kaikissa simuloinneissa käytettiin samaa ajoneuvotyyppijakaumaa.

Taulukko 13. Finnoontien simuloinneissa käytetty ajoneuvojakauma.

Henkilö- ja pakettiautoja	94 %
Kuorma-autoja	2 %
Linja-autoja	3 %
Yhdistelmäajoneuvoja	1 %

Mallinnusalueen eteläpään kolmihaaraliittymässä on liikennevalot, jotka aiheuttavat liikennevirtaan häiriötä. Mallintamisen kannalta ongelmallista oli se, että liittymään eri suunnasta saapuvien liikennevirtojen suuruutta ei tunnettu. Asia ratkaistiin liittämällä mallin eteläpäähän liikennevalo-opastin, joka toimi 80 sekunnin kiinteällä kiertoajalla. Opastin ohjelmoitiin toimimaan kahdessa vaiheessa. Pidempi vihreä vaihe kuvasi pääsuunnan (Finnoontietä ajavat) vihreää vaihetta ja lyhyempi sivusuunnan (Nöykkiöntieltä Espoon keskukseen kääntyvät) vihreää. Vihreän ajan osuus kiertoajasta oli noin 85 %, josta "sivusuunnan" vihreää simuloiva osuus oli noin 15 %.

Simuloinnit tehtiin liikennemäärän vaihdella välillä 100 – 1 200 ajoneuvoa. Edellä mainitut liikennemäärät ovat HUTSIMin liikennemäärätiedostoon (.trf -tiedosto) syötettyjä liikennemääriä. Satunnaisvaihtelun vuoksi mitatut liikennemäärät poikkeavat jonkin

verran tavoitelluista liikennemääristä. Simuloinneissa käytetyt liikennemäärät vastaavat vertailututkimuksessa mitattuja liikennemääriä, joskin simuloinneissa on käytetty myös pienempiä liikennemääriä kuin vertailututkimuksessa havaittiin.

Jokaisen simulointiajon alussa oli kahden minuutin mittainen sopeutumisjakso, jonka tarkoitus oli liikennetilanteen vakiinnuttaminen. Tätä seurasi kahdenkymmenen minuutin jakso, jonka aikana kerättiin tulokset. Lopussa oli kahden minuutin jakso jolloin tuloksia ei kerätty sekä kolmen minuutin jakso, jonka aikana malliin ei generoitu enää uusia ajoneuvoja. Viimeisellä kolmen minuutin jaksolla ei ole tulosten kannalta merkitystä ja se olisi voitu jättää pois. Kahdenkymmenen minuutin jakson aikana tehtiin liikennemäärästä riippuen 40 – 300 ajoneuvohavaintoa.

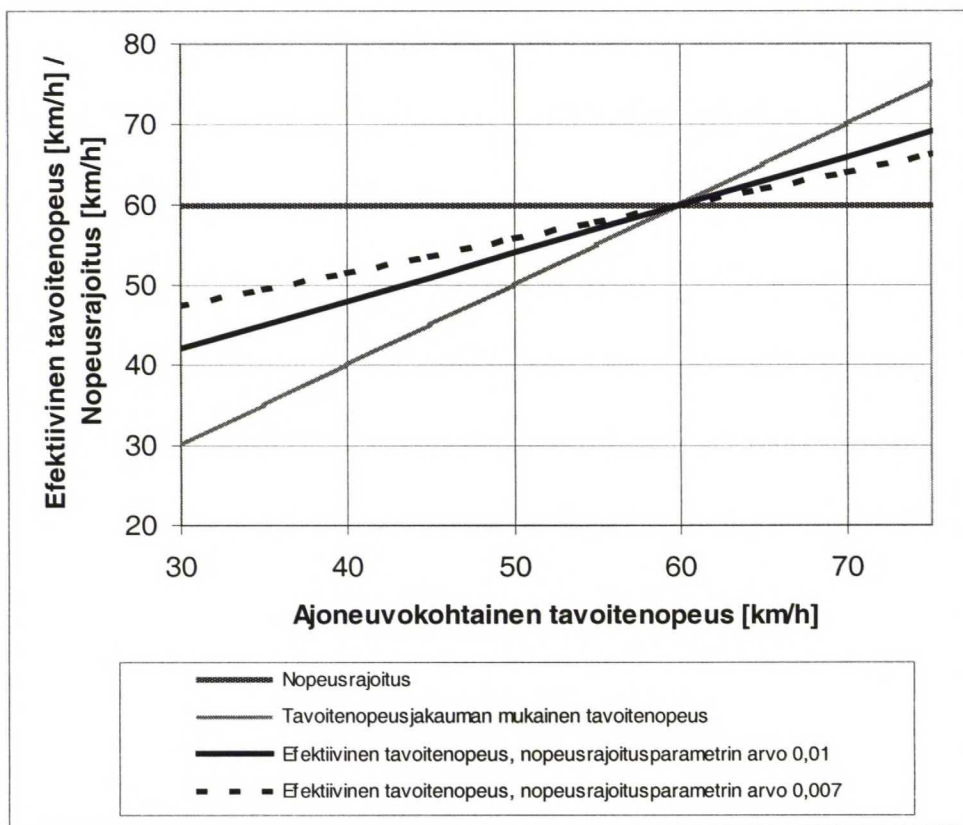
### **7.4.3 Simulointiparametrien säätö**

Ennen suuria eri liikennemäärillä tehtyjä simuloiteja tehtiin joitakin koesimuloiteja, joiden tarkoitus oli paljastaa mallissa olevat puutteet ja selkeästi väärin asetetut parametrien arvot.

Koesimuloinneissa havaittiin, että simuloinneista saatavat tulokset ovat erittäin herkkiä nopeustasoon vaikuttavien parametrien arvoille ja lähtötiedoille. Tarkasteltavassa tilanteessa geometrian perusteella määräytyvien nopeusrajoitusten, ajoneuvojen tavoitenopeusjakauman ja nopeusrajoitusparametrin arvo määräävät yhdessä hyvin suurelta osin mallissa havaittavan liikenneviran nopeuden ja nopeushajonnan. Kuten edellä on mainittu simuloinnit tehtiin kahdella eri tavoitenopeusjakaumalla tavoitenopeuden vaikutuksen selvittämiseksi.

Eräs nopeuteen vaikuttavien parametrien ja lähtötietojen asettamiseen liittyvä ongelma on nopeusrajoituksen arvoa pienemmän tavoitenopeuden omaavien ajoneuvojen nopeuden kasvu. Tämä johtuu HUTSIMin algoritmista, jonka perusteella määräytyy ajoneuvon todellinen tavoitenopeus. Tämä nopeus riippuu ajoneuvon tavoitenopeudesta, nopeusrajoituksesta ja nopeusrajoitusparametrin arvosta. Asiaa on havainnollistettu *kuvassa 43*.





Kuva 43. Nopeusrajoituksen vaikutus HUTSIMin efektiiviseen tavoitenopeuteen Finnoontien nopeusalueella nopeusrajoituksen ollessa 60 km/h.

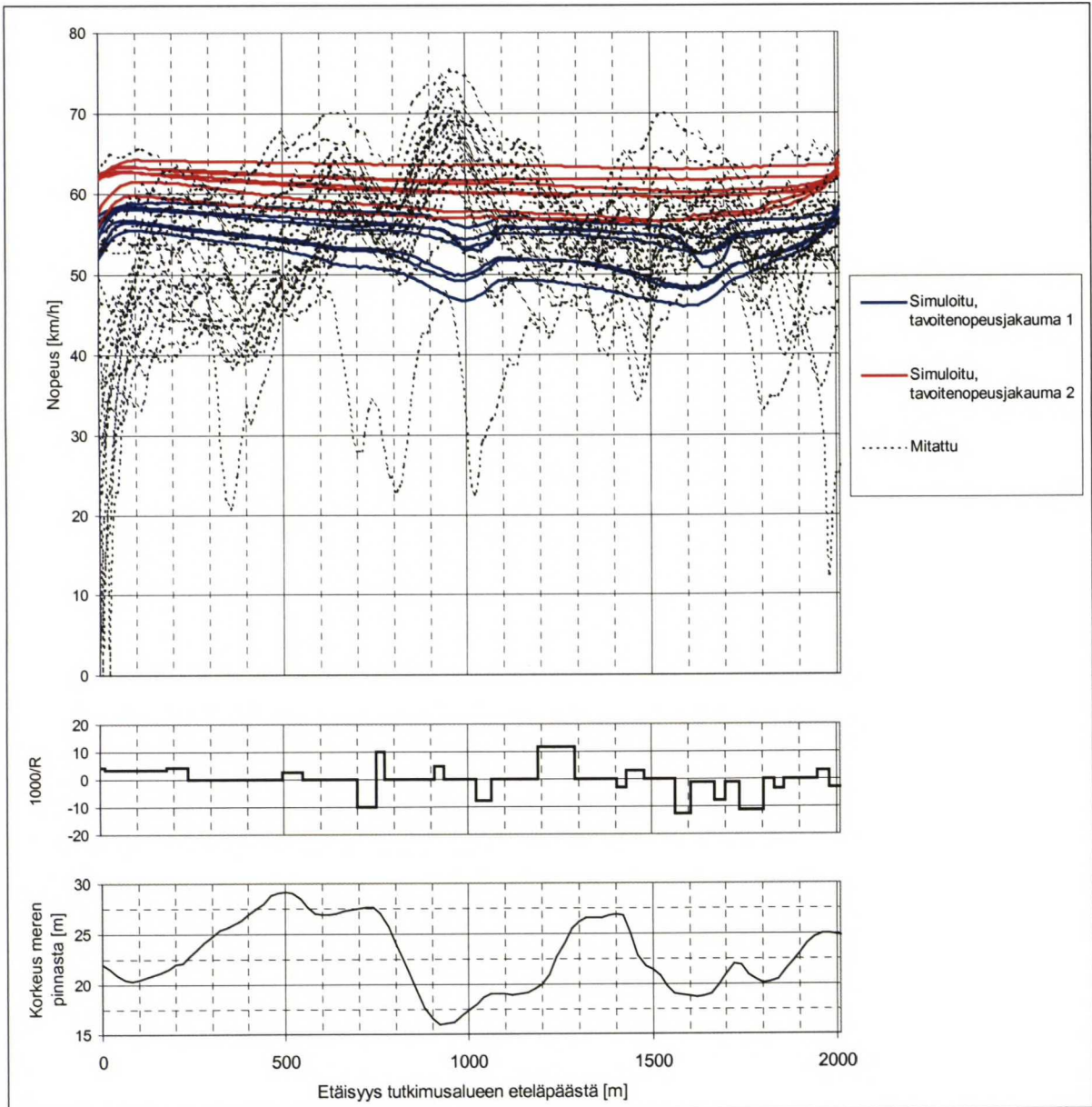
Kuvasta 43 nähdään, että HUTSIMin putkeen asetettu tai nopeusrajoitusmerkillä osoitettu nopeusrajoitus nostaa niiden ajoneuvojen nopeuksia, joiden tavoitenopeus on nopeusrajoitusta alempi. Toisin sanoen nopeusrajoitus muuttaa ajonopeuksia tavoitenopeuksien arvoista kohti nopeusrajoituksen arvoa. Tämän seurauksena nopeushajonta pienenee verrattuna tilanteeseen, jossa mallissa ei käytetä putkikohtaisia nopeusrajoituksia. Mitä pienempi nopeusrajoitusparametrin arvo on, sitä vähemmän tavoitenopeusjakauma kapenee kohti nopeusrajoitusta.

Eräänlainen kompromissi saavutetaan merkitsemällä kaarteisiin kaarresäteen perusteella määräytyvä nopeusrajoitus. Nopeusrajoitus päädyttiin merkitsemään niihin kaarteisiin, joiden kaarresäteen perusteella määräytyvä nopeusrajoitus olisi ollut suurempi kuin todellisen tien nopeusrajoitus 60 km/h. Tällä järjestelyllä vapaiden ajoneuvojen sallittiin ajaa suorilla osuuksilla omaa tavoitenopeuttaan.

## 7.4.4 Tulokset

### 7.4.4.1 Nopeusprofiilit

Kuvassa 44 on esitetty Hietasen (1995) liikkuvan auton menetelmällä mitaamien nopeusprofiilien keskiarvoprofiili ja simuloitujen nopeusprofiilien keskiarvot Espoon keskuksen suuntaan. Kuvan alareunassa on lisäksi esitetty tien vaakageometriaa kuvaava kaarevuuskuva ja pystygeometriaa kuvaava tasausviiva.



Kuva 44. Liikkuvan auton menetelmällä mitatut nopeusprofiilit ja simuloitujen nopeusprofiilien keskiarvot Espoon keskuksen suuntaan. Liikkuvan auton mittauksissa liikennemäärä vaihteli välillä 400 – 1 000 ajon./h. Simuloidut profiilit on vastaavat liikennemääriä 100, 200, 400, 600, 800, 1 000 ja 1 200 ajon./h. Simuloiduissa profiileissa pienintä liikennemäärää vastaavat profiilit ovat käyräparvessa ylimpänä ja suurinta liikennemäärää vastaavat alimpana.



*Kuvasta 44* nähdään, että mittausten nopeusprofiileissa on selviä jaksoja, joissa nopeus nousee tai laskee paikallisesti. Simuloidussa käyrissä näitä ei ole. Verrattaessa mitattuja nopeusprofiileita ja tien tasausviivaa huomataan, että nopeusprofiileissa näkyvät nopeuskohoumat sijoittuvat alamäkiin tai heti niiden jälkeen.

Paaluvälillä 800 – 1 100 metriä simuloiduissa profiileissa näkyy selvä nopeuden aleneminen, kun taas vastaavan kohdan mittaustuloksissa nopeudet näyttäisivät nousevan. Tästä voidaan päätellä, että ainakin tässä tienkohdassa pystygeometrian vaikutus kumoaa vaakageometrian vaikutuksen. Tämä osoittaa, että pystygeometrian mallintamisen sisällyttäminen kaksikaistaisten teiden simulointiin olisi erityisen tärkeää.

Liikennemäärän vaikutus näkyy selvästi tavoitenopeudella 1 simuloiduissa profiileissa nopeuksien laskuna. Ilmiö on nähtävissä myös tavoitenopeudella 2 simuloiduissa käyrissä, mutta ei yhtä selkeästi.

Simuloiduissa nopeusprofiileissa Nöykkiöntien liittymän nopeuksia alentava vaikutus ei näy riittävän selvästi. Tämä johtunee siitä, että simulointimallissa liittymän valo-ohjaus mallinnettiin todellisuudesta poikkeavalla tavalla (ks. kohta mallintaminen). Tämä johtaa siihen, että suuri osa autoista ohittaa liittymän pysähtymättä, jolloin nopeudet mallin alussa ovat korkeampia kuin todellisuudessa. Mittausten perusteella voidaan arvioida, että Nöykkiöntien valo-ohjauksinen liittymä vaikuttaa ajonopeuksiin noin 100 metrin matkalla.

Nopeusprofiileja tarkasteltaessa ei voida sanoa, kumpi tavoitenopeusjakauma antaa paremman tuloksen. Kumpaakin jakaumaa käytettäessä nopeusvaihtelu jäi mitattuja nopeusvaihteluita pienemmiksi. Simuloiduista nopeusprofiileista nähdään, että eri tavoitenopeusjakaumilla simuloitujen nopeuksien ero on suunnitteen nopeusjakaumien keskiarvojen eron suuruinen.

Nopeusprofiilien perusteella voidaan päätellä, että Finnoontien kaltaisen kaksikaistaisen tien simuloinnissa pystygeometrian mallintaminen on välttämätöntä luotettavien tulosten saamiseksi. Vähimmäisvaatimuksena voidaan pitää sitä, että ajoneuvon kulku ylä- ja alamäissä eroaa jotenkin toisistaan. Tämä voisi aluksi tapahtua putkeen asetettavan pituuskaltevuusparametrin avulla. Ajoneuvon kiihtyvyyttä rajoitettaisiin ylämäessä pituuskaltevuusparametrin funktiona ja vastaavasti alamäessä ajoneuvolle sallittaisiin normaalia suurempi kiihtyvyys. Menetelmän kehittäminen ei kuitenkaan liene järkevää, koska se ei todennäköisesti tarjoa mahdollisuutta vaaka- ja pystygeometrian yhteisvaikutuksen mallintamiseen. Todennäköisesti parempi ratkaisu olisi ryhtyä kehittämään HUTSIMiin ajoneuvon kinematiikkaan perustuvaa ajoneuvomallia, joka mahdollistaisi myös ajoneuvon polttoaineen kulutuksen ja päästöjen simuloinnin luotettavammin kuin nyt käytössä oleva mallinnusmenetelmä.

#### **7.4.4.2 Pistesuureet**

Pistesuureita mitattiin kaikkiaan kahdeksassa pisteessä, joista neljä sijaitsi Espoon keskukseen johtavalla ja neljä Suomenojalle johtavalla kaistalla. Kummakin suunnan pisteistä kolme sijaitsi mallissa vastaavilla paikoilla kuin Hietasen (1995) tutkimuksen pisteet. Näiden vastinpisteiden lisäksi mallin molempiin päihin asetettiin mittauspisteet,

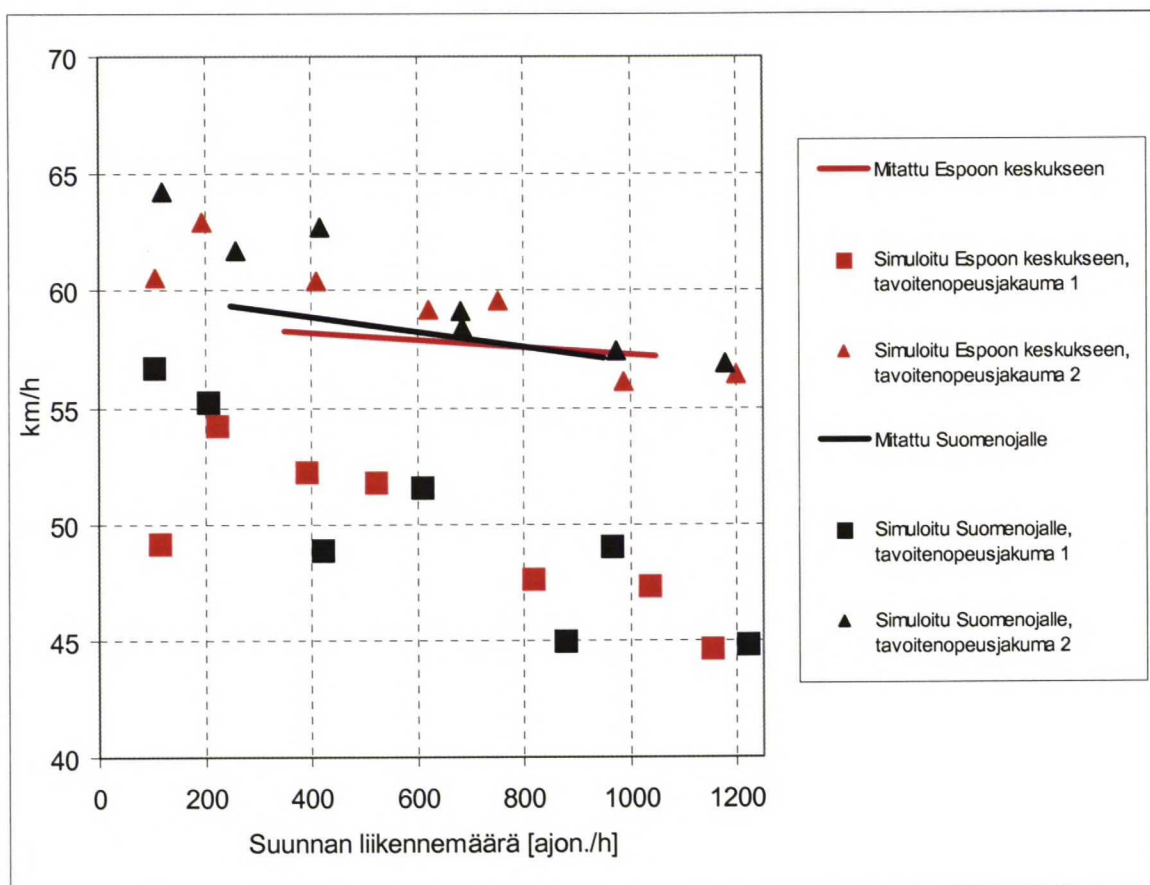


joiden avulla voitiin kontrolloida malliin saapuvan liikenteen määrää heti generaattoreiden jälkeen.

Hietasen (1995) tutkimuksessa pistesuureita koskevat analyysit on tehty kahdessa pisteessä mitattujen tietojen perusteella. Tämän tutkimuksen tarkastelualue ei kuitenkaan kattanut koko Hietasen tarkastelemaa aluetta ja vain toinen Hietasen käyttämistä pisteistä sijaitsee nyt tarkastellun alueen sisällä. Siksi pistesuureita koskevat vertailut perustuvat vain Hietasen tutkimuksen tarkastelupisteen 1 ja tämän tutkimuksen vastaavan pisteen tietojen vertailuun. Simuloituja tuloksia on verrattu pääsääntöisesti Hietasen mittausten perusteella muodostettuihin regressiokäyriin.

### Suunnan liikennemäärä ja matkajakauman keskinopeus

Kuvassa 45 on verrattu Hietasen (1995) tutkimuksessa lasketut suunnan liikennemäärien ja tarkastelupisteessä 1 havaitun matkajakauman keskinopeuden regressiosuoraa tässä tutkimuksessa saatuihin havaintoihin matkajakauman keskinopeudesta suunnan liikennemäärän funktiona kahdella eri tavoitenopeusjakaumalla.



Kuva 45. Matkajakauman keskinopeuden ja suunnan liikennemäärän välisen riippuvuuden vertailu.

Kuvasta 45 nähdään, että molemmilla suunnilla tavoitenopeusjakaumalla 2 tehdyn simuloinnin keskinopeudet vastaavat mitattua keskinopeutta paremmin kuin tavoitenopeudella 1 tehdyn simuloinnin keskinopeudet. Tämä siitäkin huolimatta, että tavoitenopeusjakauma 1 perustuu mitattuun nopeusjakaumaan.

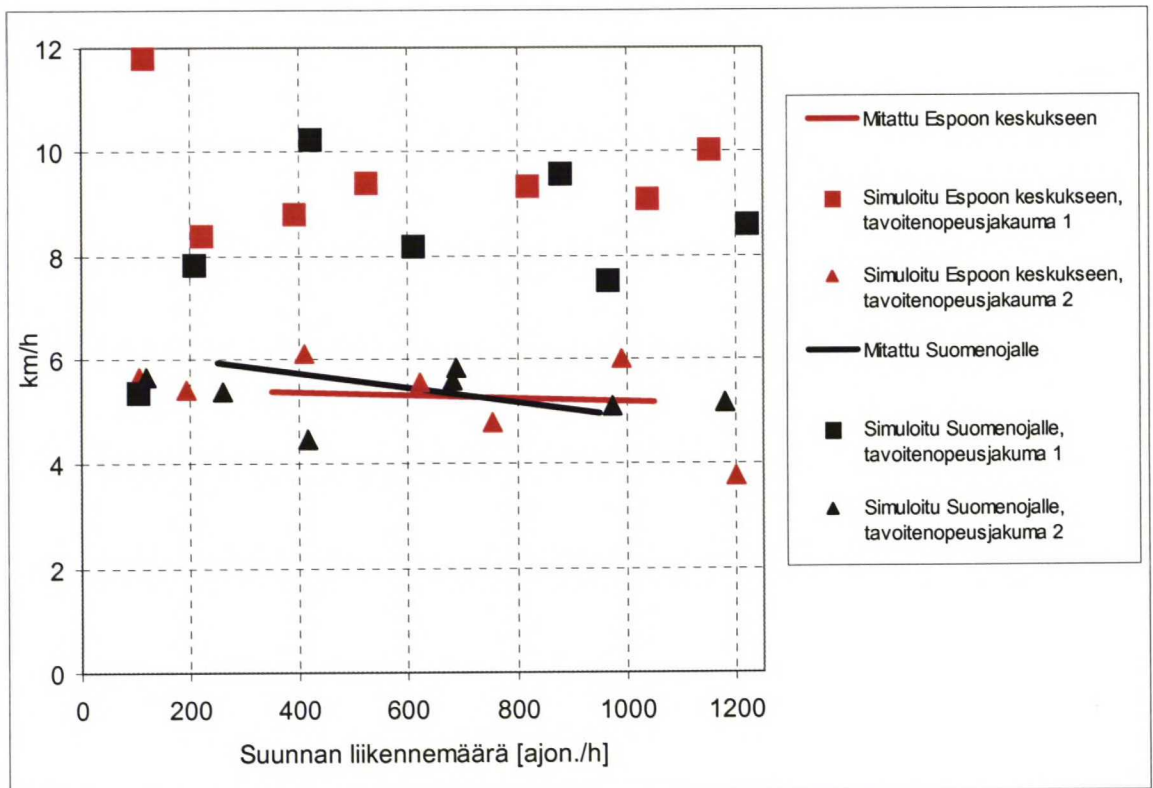
Kuvasta nähdään, että eri tavoitenopeuksilla simuloitujen keskinopeuksien ero on suurempi kuin tavoitenopeusjakaumien keskiarvojen (5 km/h) erotus. Tämä johtuu siitä, että tavoitenopeusjakauma perustuu vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaan ja nyt käsillä oleva keskinopeus on suunnan kaikkien ajoneuvojen keskinopeus. Kaikkien ajoneuvojen keskinopeus laskee, kun hitaimmat ajoneuvot keräävät taakseen jonoa.

Simuloinneissa käytettyjä tavoitenopeusjakaumia voidaan pitää sikäli virheellisenä, että ne eivät todennäköisesti edusta koko tien vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaa kovinkaan hyvin. Mittauspiste sijaitsi kaarteessa ja tienkohdalla pituuskaltevuuden arvo oli 3 %. Koska mittauspiste sijaitsi kaarteessa, malliin asetettiin pisteen kohdalle kaarresädettä vastaava nopeusrajoitus, joka muuttaa ajoneuvojen nopeusjakaumaa kuten edellä mallin laadintaa kuvaavassa luvussa on selitetty.

Kuvasta 45 nähdään, että sadan ajoneuvon tuntiliikennemäärällä keskinopeus Espoon keskukseen on alempi kuin kahden sadan ajoneuvon tuntiliikennemäärällä. Tilanne on sama molemmilla tavoitenopeusjakaumilla tehdyissä simuloinneissa. Syytä tuloksen epäjohtonmukaisuuteen ei saatu selville.

### Suunnan liikennemäärä ja nopeusjakauman keskihajonta

Kuvassa 46 on esitetty Hietasen (1995) tutkimuksessa laskettujen suunnan liikennemäärän ja tarkastelupisteessä 2 havaitun nopeuksien hajonnan välisten regressiosuorien ja tässä tutkimuksessa saatujen nopeuksien hajonnan vertailu.



Kuva 46. Pistenopeusjakauman keskihajonnan ja suunnan liikennemäärän välisen riippuvuuden vertailu



*Kuvasta 46* nähdään, että tavoitenopeusjakaumalla 2 simuloidut nopeuden keskihajonnat vastaavat melko hyvin mitattuja keskihajontoja kuvaavaa regressiosuoraa, mutta tavoitenopeusjakaumalla 1 simuloidut keskihajonnat ovat mitattuja suurempia. Tämä johtuu siitä, että vaikka tavoitenopeusjakaumien keskinopeus poikkesi toisistaan, nopeushajonnat olivat saman suuruisia. Tavoitenopeusjakaumien suhteelliset nopeushajonnat eroavat toisistaan siten, että tavoitenopeusjakauman 1 suhteellinen keskihajonta on tavoitenopeusjakauman 2 suhteellista keskihajontaa suurempi.

Verrattaessa Finnoontiellä ja vt 6:lla simuloituja nopeuksien keskihajontoja huomataan, että Finnoontiellä tavoitenopeusjakauma ei vaikuta keskihajontaan yhtä voimakkaasti kuin vt 6:lla. Tämä johtuneet vt 6:n korkeammasta nopeustasosta, jolloin tavoitenopeuksien keskiarvon 5 km/h ero ei johda yhtä suureen eroon tavoitenopeusjakaumien suhteellisessa keskihajonnassa.

### **Lyhyiden aikavälien osuus ja liikennemäärä**

Hietasen (1995) tutkimuksessa tarkastelupisteessä 2 havaittiin alle 1,5 sekunnin mittaisia aikavälejä 2 – 25 % liikennemäärän vaihdellessa välillä 300 – 1000 ajon./h. Regressiomallin mukaan liikennemäärän kasvaessa 1000 ajon./h, lyhyiden aikavälien osuus kasvoi 12-13 % riippuen tarkastelusuunnasta. Lyhyiden aikavälien osuus oli suurempi Espoon keskuksen suuntaan ajettaessa.

Simulointitulosten mukaan alle 1,5 sekunnin aikavälejä ei tarkastelupiste 1:ssä ollut lainkaan. Syy lyhyiden aikavälien puuttumiseen on HUTSIMin seuranta-aikavälin arvo 1,2 sekuntia. HUTSIMin seuranta-aikavälin arvo määrää ajoneuvoille minimietäisyyden jolla ne seuraavat edellään ajavaa. Seuranta-aikaväli on määritelty edellä ajavan ajoneuvon perästä seuraavan keulaan (nettoaikaväli), kun taas Hietasen (1995) tutkimuksessa aikavälinä on käytetty bruttoaikaväliä. Tämä aikavälikäsitteiden ero selittää miksi simuloinneissa ei havaittu alle 1,5 % aikavälejä, vaikka seuranta-aikavälin arvo oli säädetty 1,2 sekuntiin.

### **Jonoprosentti ja suunnan liikennemäärä**

*Kuvassa 47* on esitetty jonoprosentin riippuvuus suunnan liikennemäärästä. Teoreettinen riippuvuus näiden kahden suureen välille satunaisessa liikennevirrassa voidaan laskea kaavalla 30.

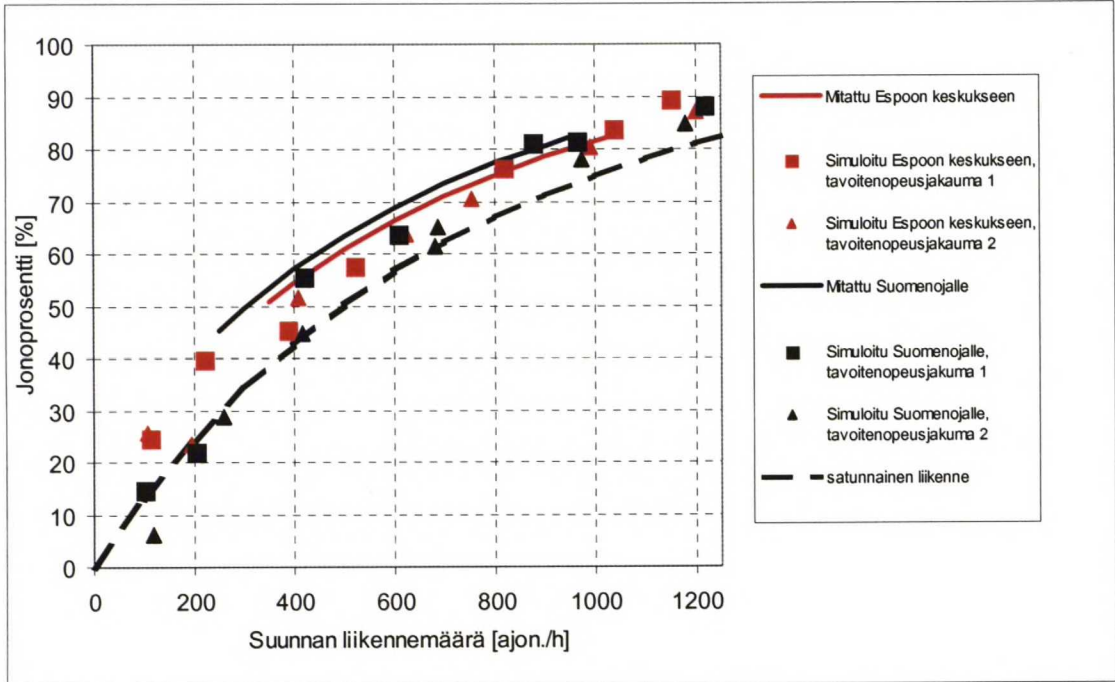
$$p = 100(1 - e^{-qt}) \quad (30)$$

$p$  = jonoprosentti

$q$  = suunnan liikennemäärä (ajon./h)

$t$  = jonokriteeri (5 s)





Kuva 47. Tarkastelupisteen 1 jonoprocentin ja suunnan liikennemäärän välisen riippuvuuden vertailu Hietasen (1995) tutkimuksen ja tämän tutkimuksen simuloitien välillä. Katkoviivalla merkitty käyrä kuvaa suureiden teoreettista riippuvuutta satunnaisessa liikenteessä.

Kuvasta 47 nähdään, että käytetystä tavoitenopeusjakaumasta riippumatta simuloitujen jonoprocenttien arvot ovat mitattuihin jonoprocenttien arvoihin perustuvan regressiokäyrän alapuolella lukuun ottamatta suurimpia liikennemääriä tavoitenopeusjakaumalla 1 simuloituna. Verrattaessa simuloituja ja mitattuja jonoprocentteja teoreettisiin, havaitaan että simuloitujen jonoprocenttien arvot ovat lähempänä teoreettisia kuin mitatut.

### Jonon keskipituus ja suunnan liikennemäärä

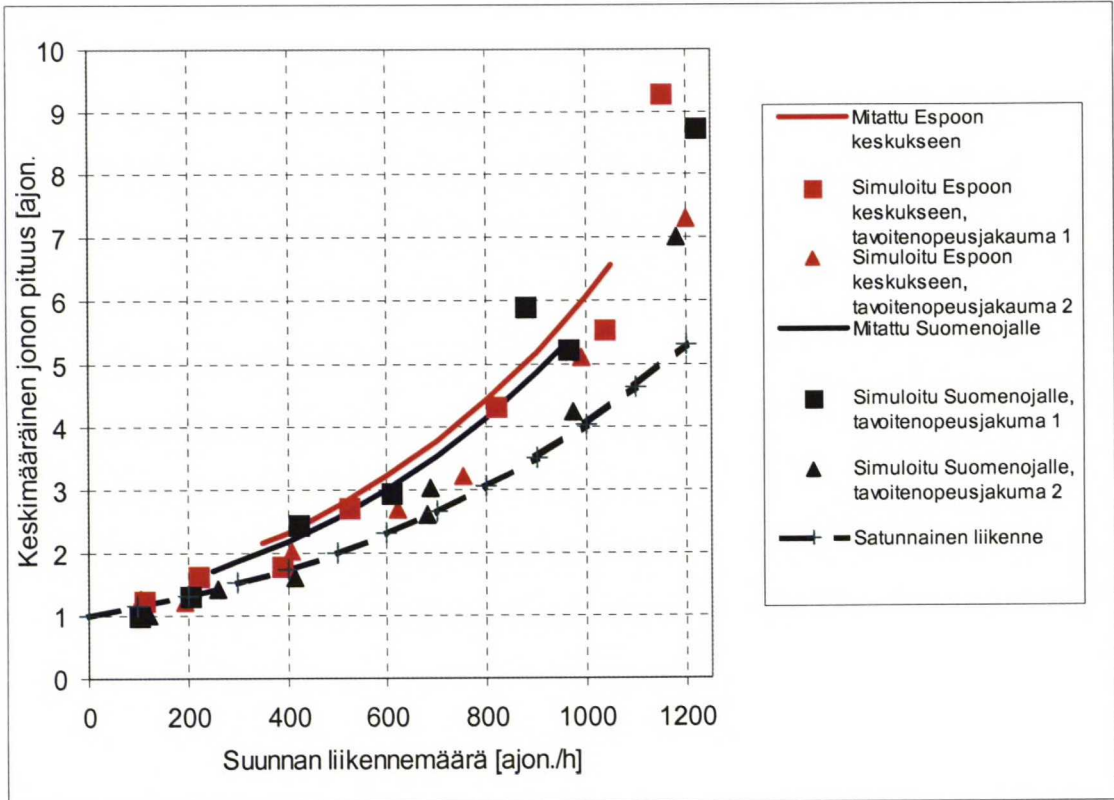
Kuvassa 48 on esitetty jonon keskipituuden ja suunnan liikennemäärän välinen riippuvuus. Teoreettinen riippuvuus näiden kahden suureen välille satunnaisessa liikennevirrassa voidaan laskea kaavalla 31.

$$E(q) = e^{qt} \quad (31)$$

$E(q)$  = jonon keskipituus (ajon.)

$q$  = suunnan liikennemäärä (ajon./h)

$t$  = jonokriteeri (5 s)



Kuva 48. Tarkastelupisteen 1 jonon keskipituuden ja suunnan liikennemäärän välisen riippuvuuden vertailu Hietasen (1995) tutkimuksen ja tämän tutkimuksen simulointien välillä. Katkoviivalla merkitty käyrä kuvaa suureiden teoreettista riippuvuutta satunnaisessa liikenteessä.

Kuvan 48 perusteella nähdään, että Hietasen (1995) tutkimuksen mukaan tarkastelupisteessä 1 jonon keskipituus Espoon keskukseen oli pidempi kuin Suomenojalle. Syyinä tähän voi olla se, että pisteen pohjoispuolella on pienisäteinen kaarre johon kuljettajat hiljentävät vauhtiaan. Suomenojalle ajettaessa tarkastelupisteen kohdalla kuljettajat kiihdyttävät nopeuttaan. Espoon keskukseen ajavat taas alkavat pisteen kohdalla hiljentää nopeuttaan kaarteeseen sopivaksi. Simuloidut jononpituudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin Hietasen mittaamat, mutta johdonmukaista eroa suuntien välillä ei havaita.

### Jonon keskipituus ja jonoprosentti

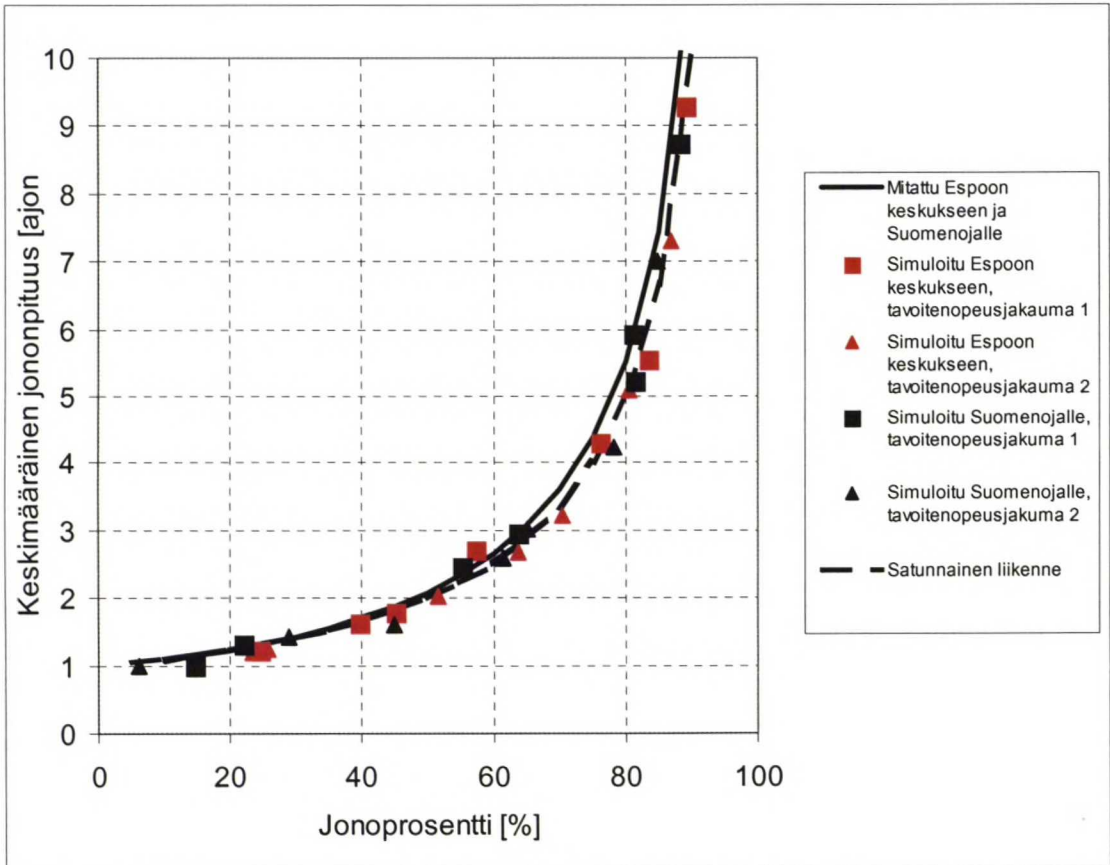
Kuvassa 49 on esitetty jonon keskipituuden riippuvuus jonoprosentista Hietasen (1995) tutkimuksen ja simulointitutkimuksen mukaan.

Hietasen (1995) tutkimuksen mukaan eri suuntien jonon keskipituuden ja jonoprosentin riippuvuutta ilmaisevat käyrät olivat hyvin lähellä toisiaan. Kuvassa 49 on esitetty Hietasen tuloksista vain yksi käyrä, joka kuvaa kumpaakin ajosuuntaa erikseen. Kuvassa on lisäksi esitetty teoreettinen jonon keskipituuden ja jonoprosentin riippuvuus satunnaisessa liikenteessä. Teoriassa jononpituudet muodostavat geometrisen jakauman. Teoreettinen riippuvuus näiden kahden suureen välille satunnaisessa liikennevirrassa voidaan laskea kaavalla 32.

$$E(Q) = \frac{100}{100 - p} \quad (32)$$

$E(Q)$  = jonon keskipituus (ajon.)

$p$  = jonoprosentti (%)



Kuva 49. Jonon keskipituuden riippuvuus jonoprosentista Hietasen (1995) tutkimuksen ja simulointitutkimuksen mukaan. Katkoviivalla merkitty käyrä kuvaa suureiden teoreettista riippuvuutta satunnaisessa liikenteessä.

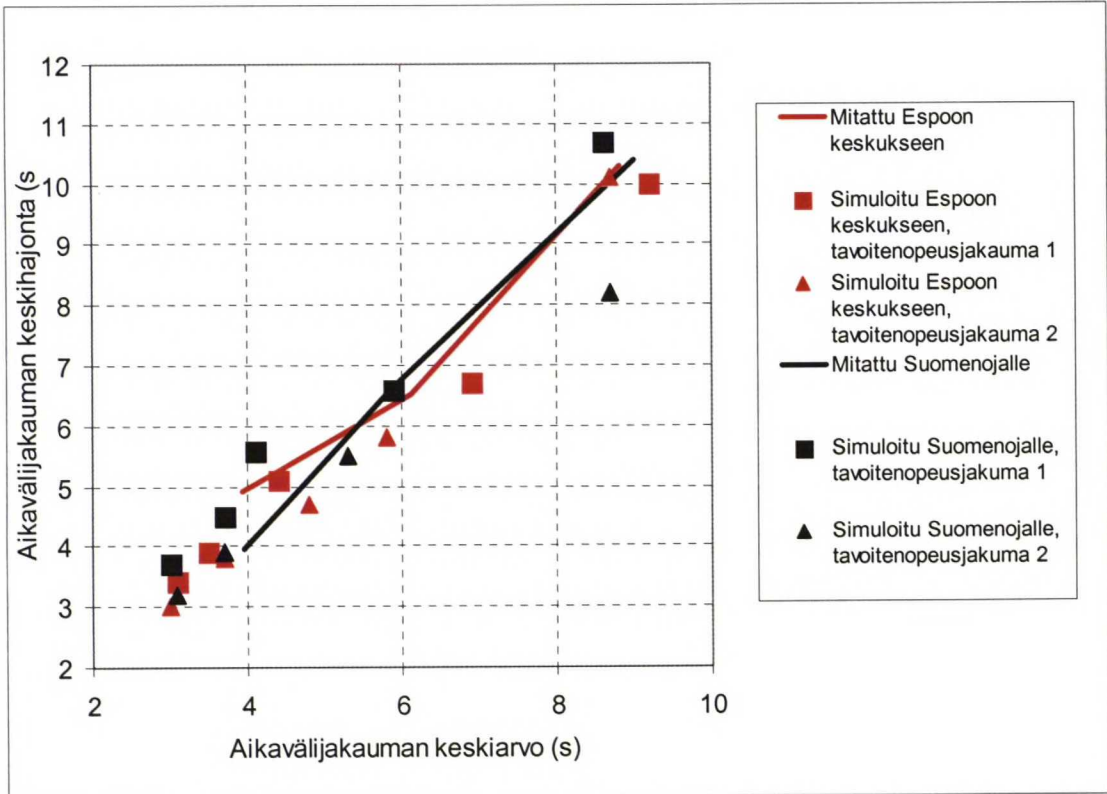
Kuvasta 49 nähdään, että vastaavalla jonoprosentin arvolla simuloitujen jononpituudet olivat mitattuja jononpituuksia hieman lyhyempiä. Lisäksi voidaan havaita, että teoreettiset satunnaisesta liikenteeseen perustuvat jononpituudet ovat lyhyempiä kuin Hietasen (1995) tutkimuksessa havaitut. Simuloitujen jonon keskipituudet ovat lähempänä satunnaisen liikenteen kuin Hietasen tutkimuksessa saatuja jononpituuksia. Tulokset viittaavat siihen, että simuloinnissa liikennevalojen liikennevirtaa häiritsevä vaikutus ei ollut yhtä suuri kuin Hietasen tutkimuksessa. Toisaalta Hietasen mittauksissa eri suuntien jonon keskipituudet ovat hyvin lähellä toisiaan. Tämä viittaa siihen, että liikennevalot eivät vaikuta liikenteen jonoutumiseen tarkastelupisteessä 1 tai vaikutus kompensoituu tien geometrian vaikutuksen johdosta.

Jonoutumista kuvaavien suureiden osalta voidaan todeta, että simulointitulokset vastasivat hyvin Hietasen tutkimuksessa saatuja tuloksia.



### Aikavälijakauman keskiarvo ja keskihajonta

Kuvassa 50 on esitetty aikavälijakauman keskihajonnan riippuvuus aikavälijakauman keskiarvosta.



Kuva 50. Aikavälijakauman keskihajonnan riippuvuus aikavälijakauman keskiarvosta Hietasen (1995) tutkimuksen ja simulointitutkimuksen mukaan.

Kuvasta 50 nähdään, että sekä simuloinnissa että mitatussa aineistossa aikavälijakauman keskihajonta ja riippuvuus ovat hyvin samanlaisia.

#### 7.4.5 Johtopäätökset

Tavoitenopeusjakauman herkkyyden tutkiminen osoittaa nopeuksien riippuvan voimakkaasti asetetusta tavoitenopeusjakaumasta. Kun tavoitenopeusjakauma asetettiin vastaamaan väylällä havaittujen vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaa simuloitujen nopeudet jäivät mitattuja nopeuksia alhaisemmiksi. Osittain tämä johtuu siitä, että HUTSIMissa ei voida mallintaa ohitustapahtumaa. Tämän seurauksena hitaimpien ajoneuvojen nopeuksien vaikutus koko liikennevirran nopeuteen korostuu.

Käytetty vaakageometrian nopeusvaikutuksen mallintaminen putkeen asetettavien nopeusrajoitusten avulla osoittautui hankalaksi. Menettelyn tekee vaikeaksi nopeusrajoituksen vaikutuksen kohdistaminen oikealle kohdalle.

Geometrian mallintamisen rajoittuminen vain vaakageometriaan osoittautui riittämättömäksi. Finnoontien tarkastelussa pystygeometrian huomioimatta jättäminen vaikutti siihen, että simuloitujen ajoneuvojen nopeudet eivät vastanneet kovinkaan hyvin mitattuja nopeuk-

sia. Finnoontien simuloinnin perusteella voidaan lisäksi sanoa, että tien pysty- ja vaakageometria yhteisvaikutuksen huomioiminen geometrialtaan huonoilla tiellä parantaisi simulointituloksia. On kuitenkin todettava, että erilaisiin kiihtyvyy- ja hidastuvuusparametreihin perustuvalla ajoneuvon nopeuskäyttäytymisen mallintamisella geometrian yhteisvaikutuksen huomiointi voi olla erittäin hankalaa ellei mahdollista. Ajoneuvon kinematiikkaan perustuva nopeuden säätely avaisi uusia kehityssuuntia geometrian nopeusvaikutusten mallintamiseen.

Finnoontien simulointikokeen tuloksissa esitetty liikkuvan ajoneuvon menetelmällä kerättyjen matka-nopeus-käyrien ja simuloitujen nopeuksien vertailu on mielekäs kaksikaistaisten teiden simulointitulosten arviointimenetelmä. Sen perusteella on mahdollista luoda käsitys ohjelman mikroskooppisesta toimivuudesta. Pelkkien tieosakohtaisten tietojen, kuten matkanopeus ja -aika, perusteella tehty ohjelman toiminnan arviointi ei riitä. On mahdollista, että simuloitujen tieosakohtaiset tiedot vastaavat vertailutietoja sattumalta.

Kaksikaistaisten teiden simuloinnissa tulee varmistua, että tarkastelualueelle saapuva liikenne vastaa nopeuksiltaan, aikaväleiltään sekä jonoutumista kuvaavien suureidensa puolesta riittävän hyvin todellista tilannetta. Simuloinneissa tulee käyttää varsinaisen tarkastelualueen ja generointipisteen välillä riittävän pitkää ”lämmitysjaksoa”. Tämän varsinaisen tarkastelualueen ulkopuolisen jakson tarkoitus on muuntaa satunnaisesti generoitu liikenne vastaamaan tarkastelualueelle todellisuudessa saapuvaa liikennettä. Tässä tutkimuksessa tehdyissä simuloineissa ohituskaistan simulointia lukuun ottamatta liikenne generoitiin malliin satunnaisesti heti tarkastelualueen päästä.

## 8 TUTKIMUS- JA KEHITYSTARPEITA

### 8.1 Peruseriaatteita

Kehitettäessä kaksikaistaisten teiden simulointia palvelevia osamalleja on kiinnitettävä riittävästi huomiota kaksikaistaisten teiden erilaisuuteen. Perinteisten kaksikaistaisten teiden rinnalle on syntynyt uusia tietyyppisiä, joilla ajokäyttäytyminen poikkeaa merkittävästi ajokäyttäytymisestä perinteisillä kaksikaistaisilla teillä. Koska simuloinnin vahvuus on juuri mahdollisuus testata erilaisia järjestelyitä ohjelman avulla, tulisi simulointiohjelmia jatkossa kehittää palvelemaan juuri uusien ratkaisuiden testausta. Tämä ei ole kuitenkaan aivan yksinkertaista, koska simulointimallien kalibrointi ja validointi on mahdollista vasta, kun riittävä määrä kenttätutkimuksia on voitu tehdä.

Simulointitutkimuksen yhteydessä on esitetty yksittäisiä näkökohtia, jotka tulisi huomioida kaksikaistaisten teiden simulointia palvelevaa ohjelmistoa kehitettäessä. Tässä luvussa kuvaillaan yleisellä tasolla kehityksen suuntia.

Kaksikaistaisten teiden mikrosimuloinnissa tulisi hyödyntää mikrotason tarkastelun ominaisuudet täysmääräisesti. Kaksikaistaisten teiden liikenteen yksilötason päätöksentekoa tulee mallintaa mahdollisimman totuudenmukaisesti. Tämä johtaa monimut-



kaiseen mallinnus ja kalibrointiprosessiin, mutta vain näin menetellen voidaan puhua todellisesta mikrosimuloinnista ja erottaa se makrotason menetelmistä. Ohjelmien taustalla olevien mallien kehittäminen tulee tehdä yhteistyössä mallin toimintaan liittyvien liikennetutkimusten kanssa. Suunniteltaessa kaksikaistaisen tien liikennettä käsittelevää liikennetutkimusta tulee tutkimusasetelma, -paikka ja -ajankohta valita niin, että tuloksia voidaan hyödyntää simulaattorin kalibroinnissa.

Mikrosimulointiohjelmien käyttötarkoitus voidaan rajata karkeasti kahteen käyttöalueeseen. Hanketason tarkasteluissa tutkitaan miten kyseinen hanke tulisi toteuttaa, jotta asetetut tavoitteet saavutetaan, ja että valmis ratkaisu olisi käyttökelpoinen mahdollisimman kauan. Toisaalta simuloimalla voidaan tarkastella erilaisten ratkaisuiden toimivuutta yleisesti. Jälkimmäisiä tarkasteluita, voidaan käyttää hyväksi makroskooppisia malleja kehitettäessä. Edellä esitetty jako pätee myös kaksikaistaisten teiden simulointiin. Siksi ohjelmiston tulisi palvella vähintään tyydyttävästi molempia käyttötarkoituksia.

HUTSIMin kehittäminen on tähän asti tapahtunut melko pienin voimavaroin verrattuna monien muiden simulointiohjelmien kehittämiseen käytettyihin panoksiin. Suunnitelmallista kehittämistä haittaa epätietoisuus tulevaisuudessa käytössä olevista resursseista. Ohjelman kehittämistä auttaisi selkeä valittuun strategiaan perustuva suunnitelmallisuus. Avoin tiedotus ohjelman tilanteesta ja vilkkaampi kanssakäynti sidosryhmien kanssa voisi avata uusia kehitysmahdollisuuksia. Kehitysstrategian valinnassa vuoropuhelu mahdollisten käyttäjien kanssa johtaisi todennäköisesti parempaan johtopäätökseen kuin ohjelman lyhytjänteinen kehittäminen pala palalta.

Jos tavoitteeksi asetetaan sekä tiedemaailman ja liikennesuunnittelijoiden käyttöön sopiva Suomen olosuhteisiin räätälöity ohjelmisto, ei kannattane myöskään sulkea pois mahdollisuutta yhdistää voimavaroja jonkun yhteistyötahon kanssa. Jos taas HUTSIMia halutaan kehittää ainoastaan tieteelliseen käyttöön, lienee oma helposti hallittava kehitysympäristö perusteltu vaihtoehto.

## **8.2 Simuloitavan väyläympäristön mallintamiseen liittyvät ominaisuudet**

### **8.2.1 Tielinjan mallintaminen**

Nykyisin HUTSIMissa väylän peruselementti on putki. Putken ominaisuuksia ovat putken tyyppi (mitkä ajoneuvotyypit voivat käyttää putkea), pituus, kaistanvaihtoominaisuus sekä putkikohtainen nopeusrajoitus. Suoraa ja kaarretta mallinnetaan samalla putkielementillä. Haluttaessa kaarteita kuvaaviin putkiin voidaan asettaa putkikohtainen nopeusrajoitus. Nopeusrajoituksen tarkoitus on alentaa ajoneuvojen nopeuksia kaarteissa samaan tapaan kuin oikealla tiellä keskipakovoiman aiheuttama tieltä suistumisen pelko.

Tulevaisuudessa tulisi pyrkiä tiensuunnitteluohjelmissa käytettävään menetelmään, jossa tien suunnittelu aloitetaan HUTSIMin putkiin verrattavista elementeistä. Elementtejä tulisi olla ainakin suoran, kaarteiden ja siirtymäkaaren mallintamiseksi. Elementteillä tulisi olla erilaisia parametrejä joita muuttamalla elementin ominaisuuksia



voidaan helposti muuttaa. Parametrein säädettäviä ominaisuuksia olisivat esimerkiksi elementin pituus ja kaarre-elementin kaarresäde. Myös mahdollisuus kaistan leveysparametrin käyttöönottoon kannattanee huomioida, vaikka sitä ei alkuvaiheessa käytettäisikään. Kun tarkasteltavan tielinjan elementit on luotu ja niiden keskinäisten riippuvuuksien (päätepisteiden yhteys) on varmistettu, luodaan elementeille pohjautuva tielinja. Vastaavalla tavalla luotaisiin tien tasaus. Linjaus ja tasaus yhdistämällä saataisiin väylää kuvaava kolmiulotteinen käyrä.

Varteenotettava mahdollisuus lienee HUTSIMin mallieditorin yhteensovittaminen jonkin tiensuunnitteluohjelman kanssa. Tällöin voitaisiin väylämallin laatiminen tehdä tarkoitukseen suunnitellulla tehokkaalla työkalulla.

### **8.2.2 Tielinjan ulkopuolisten tekijöiden huomioiminen**

Kaksikaistaisen tien näkemäolosuhteilla on suuri merkitys tien liikennevirran ominaisuuksiin. Näkemäolosuhteet muodostuvat yksittäisten tienkohtien näkemäpituuksien muodostamasta sarjasta. Näkemäpituus riippuu tien geometriasta, sen sijainnista ympäristöönsä nähden (penger tai leikkaus) ja tienvarren maankäytöstä aiheutuvista näkemäesteistä (pelto, metsä, jne...). Muutos yhdessäkin näistä tekijöistä voi muuttaa ratkaisevasti tien näkemäolosuhteita. Tämän vuoksi kaksikaistaisen tielinjan ulkopuolisia ominaisuuksia tulisi voida mallintaa.

Ensimmäisessä kehitysvaiheessa tulisi kehittää menetelmä, jonka avulla voitaisiin mallintaa erilaisissa tyyppipoikkileikkauksissa kulkevan tien näkemäolosuhteita. Jo penkereellä ja leikkauksessa kulkevan tien näkemäolosuhteiden eron saaminen esiin olisi suuri edistysaskel. Ensimmäisessä vaiheessa tyyppipoikkileikkaukset liitettäisiin tielinjaan esimerkiksi 50 metrin välein. Tyyppipoikkileikkauksen muutoskohdissa näkemäesteen sijainti muuttuisi lineaarisesti kahden kiinnityspisteen välillä.

Myöhemmin tielinjan ulkopuoliset ominaisuudet voitaisiin huomioida parametrisoimalla tyyppipoikkileikkaustyyppejä esimerkiksi penkereen korkeuden ja muodon mukaan. Lisäksi näkemäestemäärityä voitaisiin kehittää siten, että myös tiealueen ulkopuolella oleva näkemäeste tulisi huomioiduksi.

Maastomallin liittäminen HUTSIMin väylämalliin tarjoaisi laajoja kehitysnäkymiä näkemäpituuden määrittämisessä. Maastomalliin perustuvan väylämallin laadinta lienee kuitenkin hyvin työlästä ja siksi toistaiseksi käytössä olevin resurssein mahdotonta.

### **8.2.3 Näkemäpituuden määrittäminen**

Edellisissä luvuissa on hahmoteltu simuloitavan väylän mallintaminen väylän geometrian ja sen ympäristön osalta. Saatua lopputulosta kutsutaan jatkossa tiemalliksi.

Tiemallin avulla voidaan tien jokaisesta kohdasta määrittää eri kriteerein laskettavia näkemäpituuksia. Kaksikaistaisen tien simuloinnin kannalta tärkein määritettävä näkemäpituus on ohitusnäkemä. Ohitusnäkemäpituus on matka, jonka pituudelta kuljettaja voi nähdä tien suuntaan voidakseen normaaliolosuhteissa ohittaa edellään kulkevan

ajoneuvon ilman, että ohituksen alkamishetkellä näkyviin tulevan, vastakkaiseen suuntaan kulkevan ajoneuvon tarvitsee vähentää nopeuttaan.

Ohitusnäkemäpituutta määritettäessä kuljettajan silmäpisteen korkeutena pidetään tavallisesti 1,1 metriä ja estekorkeutena 0,6 metriä. Silmäpisteen korkeus vastaa henkilöauton kuljettajan silmän korkeutta ja estekorkeus henkilöauton valojen korkeutta tien pinnasta. On huomattava, että tien pinnan ei tarvitse näkyä koko näkemäpituuden matkalta.

Ohitusnäkemäpituuden vaikutusta ohituspäätösten tekoon on käsitelty luvussa 8.4.1.

Yksittäisten pisteiden näkemäpituustiedot yhdistämällä voidaan muodostaa tien näkemäolosuhteita kuvaava näkemäkäyrä. Esimerkki maastosta mitatusta tien näkemäkäyrästä on esitetty simulointikokeiden yhteydessä luvussa 8.3.1.

## **8.3 Ajoneuvojen nopeuden säätelyyn liittyvät ominaisuudet**

### **8.3.1 Tavoitenopeus**

Simulointikokeet osoittivat, että kaksikaistaisten teiden simuloinnissa tulokset ovat hyvin herkkiä tavoitenopeusjakauman muutoksille. HUTSIMin nykyisessä versiossa tämä johtuu siitä, että kun ajoneuvot eivät voi simuloinnissa ohittaa toisiaan, alhaisimman tavoitenopeuden omaavat ajoneuvot keräävät taakseen jonon, jolloin jonossa ajavien ajoneuvojen nopeudet laskevat ja liikenne jonoutuu.

Eri ajoneuvotyypeillä tulisi olla omat tavoitenopeusjakaumat. HUTSIMin tähänastisella sovellusalueella asialla ei ole ollut kovin suurta merkitystä, koska simuloituissa ympäristöissä eri ajoneuvotyyppien todelliset nopeusjakaumat ovat olleet hyvin samanlaiset. Korkean nopeustason väylillä kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen tavoitenopeusjakauma sen sijaan eroaa toisistaan.

Nykyisin HUTSIMissa tavoitenopeusjakauman oletetaan olevan vakio koko mallin alueella riippumatta väylän ominaisuuksista.

### **8.3.2 Ajoneuvon ominaisuuksien vaikutus ajonopeuteen**

Tällä hetkellä HUTSIMissa ajoneuvojen ominaisuudet vaihtelevat vain eri ajoneuvotyyppien välillä. Vaihtelu koskee ajoneuvon pituutta sekä kiihtyvyyttä ja hidastuvuusominaisuuksia. Lisäksi ajoneuvotyypeille voidaan asettaa erilaisia tavoitenopeusjakaumia generoimalla eri ajoneuvotyypit omista generaattoreistaan. Todellisuudessa samaan ajoneuvoryhmään kuuluvien ajoneuvojen ajo-ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti.

Tällä hetkellä HUTSIMissa tarkasteltava tie oletetaan tasaiseksi, jolloin yksittäisen ajoneuvon kiihtyvyyttä ja hidastuvuusominaisuudet voidaan olettaa tienkohdasta riippumattomiksi. Tällä hetkellä ajoneuvojen kiihtyvyys on riippuvainen ajoneuvon nopeudesta. Tiemallin kehittyessä käsittämään myös tien tasauksen, on ajoneuvojen kiihtyvyyksien ja hidastuvuuksien oltava riippuvaisia myös tien pituuskaltevuudesta.



Tulevaisuudessa HUTSIMin koko ajoneuvomallin perusrakenne olisi syytä uudistaa. Lähtökohdaksi tulisi ottaa ajoneuvojen moottorin ja voimasiirron ominaisuuksien mallintaminen. Tällöin HUTSIMin polttoaineen kulutus- ja päästösimulointien tulosten tarkkuus ja luotettavuus paranisi. Ajoneuvon tekniikkaan perustuva mallintaminen edellyttää laajaa tiedonkeruuta ajoneuvojen tekniikasta. Osittain tarvittava tieto voi olla jopa autotehtaiden toimesta salattua ja sen käyttöön saaminen erittäin hankalaa.

Esimerkki ajoneuvon teknisten ominaisuuksien mallintamiseen perustuvasta ohjelmasta on VEMOSIM-ajosimulaattori. Sen teoria on esitetty liitteessä 1. Simulaattorin hyödyntämistä raskaan ajoneuvon nopeuden määrittämisestä nousuissa on esitelty luvussa 3.3.3.

### 8.3.3 Vapaiden ajoneuvojen nopeuden säätely

Kaksi merkittävintä väylän ominaisuuksista aiheutuvaa tekijää, jotka vaikuttavat vapaissa olosuhteissa ajavan kuljettajan nopeuden valintaan, ovat:

- tien ominaisuudet (geometria ja poikkileikkaus)
- tielle asetettu nopeusrajoitus.

Lisäksi kuljettajien nopeuden valintaan vaikuttavat kuljetettavan ajoneuvon ominaisuudet.

Nykyisin HUTSIMissa vapaan ajoneuvon nopeuden säätely perustuu vapaiden ajoneuvojen tavoitenoepusjakaumaan. Ajoneuvojen tavoitenoepuuta voidaan muuttaa mallin merkittäväillä nopeusrajoituksilla.

Tällä hetkellä (versio 5.02) HUTSIMin nopeusrajoitus –toiminnon avulla asetetaan malliin nopeusrajoitus riippumatta siitä mistä rajoitus aiheutuu. Malliin asetetulla nopeusrajoituksella huomioidaan sekä tien geometriasta johtuva että säännöistä (tielle asetetusta nopeusrajoituksesta) johtuva käyttäytyminen.

Luvussa 3.3 esitettyjen kenttätutkimuksiin perustuvien kaarresäteen ja kaarteessa käytettävien ajonopeuksien riippuvuutta kuvaavista käyristä voidaan päätellä, että yli 1000 metrin kaarresäde ei vaikuta ajonopeuksiin liikuttaessa nopeusalueella alle 100 km/h.

HUTSIMilla simuloitaessa tavoitenoepusjakauma on yleensä perustunut väylällä havaittujen vapaiden ajoneuvojen nopeusjakaumaan. Vapaan ajoneuvon kriteerinä on pidetty viiden sekunnin nettoaikaväliä edellä ajavaan. Tämä tavoitenoepuden määrittämistapa on vaatinut väylällä tehtäviä mittauksia. Jos simulointitarkastelu on tehty uudelle vielä rakentamattomalle väylällä, edellä mainittua tavoitenoepuden määrittämistä ei ole voitu tehdä. VTI:n kaksikaistaisten teiden simulaattorissa tavoitenoepusjakauman keskinopeus riippuu tien leveydestä ja nopeusrajoituksesta (ks. luku 6.1.2).



## 8.4 Ohittamiseen liittyvät ominaisuudet

### 8.4.1 Päätöksenteko ohituspaikan etsimisen aloittamisesta

Ajoneuvon saavuttaessa hitaamman ajoneuvon, saavuttavan ajoneuvon kuljettaja tekee päätökseen pyrkiikö ohittamaan saavuttamansa ajoneuvon vai mukauttaako ajoneuvotensa saavuttamansa ajoneuvon nopeuden mukaiseksi. Tehtyään päätöksensä saavuttaneen ajoneuvon kuljettaja toimii päätöksen edellyttämällä tavalla.

Päätöksenteko ohituspaikan etsimisestä voisi HUTSIMissa tapahtua seuraavan menettelyn avulla.

Määritellään mittaristo, jonka avulla jonoajoneuvot arvioivat tarvetta aloittaa ohituspaikan etsiminen. Näitä mittareita voivat olla:

1. Nopeusero edelliseen ajoneuvoon. Jos edessä ajavan ajoneuvon tarkasteluhetken nopeus on vain vähän omaa tavoitenopeutta alempi, kuljettaja ei yritä ohittaa, vaan sopeuttaa nopeutensa edessä ajavan mukaan.
2. Oman ajosuunnan liikennetiheys havaintoetäisyyden sisällä. Jatkuvässä jonossa osa kuljettajista ei yritä ohittaa, vaan alentaa tavoitenopeuttaan ja jää jonon viimeiseksi. Mitä suurempi liikennetiheys, sitä epätodennäköisemmin pyritään ohittamaan.
3. Vastakkaisen ajosuunnan liikennetiheys. Jos kuljettaja havaitsee vastaantulevan liikenteen olevan vilkasta, ja ohitukseen riittäviä aikavälejä olevan vähän, hän tekee päätöksen olla ohittamatta. Mitä suurempi vastakkaisen suunnan liikennetiheys, sitä epätodennäköisemmin pyritään ohittamaan.
4. Tien ominaisuusmittari. Käytännössä ainakin osa kuljettajista tuntee tien geometrian tarjoamat ohituspaikat. Jos edessä olevan tiejakson geometria tarjoaa vähän ohitusnäkömiä, on epätodennäköistä, että yritetään ohittaa.

Yksittäisten mittareiden tulokset yhdistetään yhdeksi ohitusolosuhdeparametriksi. Mitä suurempi parametrin arvo on, sitä paremmat olosuhteet ohittamisen kannalta ovat ja ohituspaikan etsimisen aloittaminen todennäköisempää. Parametri määritetään kaikille jonoajoneuvoille tietyin väliajoin ja aina heti kun ajoneuvo muuttuu vapaasta ajoneuvosta jonoajoneuvoksi. Mittareiden keskinäisiä vaikutuksia on syytä painottaa. Mittareiden väliä painoarvoja määritettäessä voidaan käyttää apuna ohitus- ja ajokäyttäytymistä käsitteleviä tutkimuksia.

Lopullinen päätös aloittaa ohituspaikan etsintä tehdään edellä määritellyn ohitusolosuhdeparametrin ja ajoneuvokohtaisen ohitustarveparametrin vertailun perusteella. Ohitustarveparametri on ajoneuvokohtainen suure. Ohitustarveparametrin arvot määritellään jakaumana asetustiedostossa. Jos ohitusolosuhdeparametri ylittää ajoneuvon oman ohitustarveparametrin, ajoneuvo alkaa etsiä ohituspaikkaa. Jos ohitustarveparametrin arvo ylittää ohitusolosuhdeparametrin arvon ajoneuvosta tulee ns. stabiili ajoneuvo, eikä se yritä ohittaa edellä ajavaa.

Ohitusolosuhdeparametrin arvo tulee määrittää jonossa ajavalle ajoneuvolle riittävän usein. Jos kahden peräkkäisen vertailun aikaväli on liian pitkä, voi takimmaisena ajoneuvon käyttäytyminen olla epäjohdonmukaista. Ohitusolosuhdeparametrin määrittämisessä tulee lisäksi varmistaa, että peräkkäisissä laskennoissa parametrin arvo ei heittelehti ajoneuvokohtaisen ohitustarveparametrin puolelta toiselle.

#### **8.4.2 Jonoajoneuvojen seuranta-aikavälit**

Ennen ohitusta ajoneuvon aikaväli edellä ajavaan on yleensä pienempi kuin sellaisella ajoneuvolla, joka ei pyri ohittamaan edellä ajavaa. Edellä esitettiin periaate, jonka mukaan ajoneuvot jaetaan ohituspaikkaa etsiviin ja ns. stabiileihin jonoajoneuvoihin. Seuraavassa hahmotetaan mallia, miten nämä kaksi tyyppiä eroavat toisistaan ajoneuvon seurantaikäyttyymisen suhteen.

HUTSIMissa tämä ajoneuvojen erilaisen seuranta-aikavälin käyttö voidaan mallintaa seuraavasti:

Määritellään kaksi seuranta-aikaväliä:

1. "Normaali seuranta-aikaväli", jota kuljettaja pyrkii käyttämään ajaessaan jonossa.
2. "Ohitusseuranta-aikaväli", jota kuljettaja käyttää valmistautuessaan ohitukseen. Kuljettaja siirtyy käyttämään ohitusseuranta-aikaväli ajettuaan tietyn pituisen ajan jonossa, joka liikkuu riittävän paljon pienemmällä nopeudella kuin kuljettajan tavoitenoisuus.

Molemmille aikaväleille määritetään jakaumat. Ohitusseuranta-aikavälille voidaan käyttää myös yhtä arvoa eli oletetaan, että kaikkien ajoneuvojen välimatka juuri ennen ohituksen alkamista on vakio. Normaali seuranta-aikaväli vastaa siis nykyään käytettävää seuranta-aikaväliä.

Kuljettaja käyttää normaalia seuranta-aikaväliä, jos hän edellä esitetyn sääntölogiikan perusteella ei pyri ohittamaan. Vastaavasti ohittamaan pyrkivä kuljettaja käyttää ohitusseuranta-aikaväliä.

#### **8.4.3 Ohituspäätös**

Ohituspäätöksellä tarkoitetaan ohituspaikkaa etsivän kuljettajan päätöstä aloittaa ohitus. Hyväksyvä ohituspäätös syntyy, jos vastaan tuleva kaista on vapaa ohitukseen tarvittavalta matkalta.

Simuloinnissa jokaiselle ajoneuvolle voitaisiin antaa oma ohitusnäkemävaatimus, jota se vertaa sijaintinsa mukaiseen ohitusnäkemään. Jos ohitusnäkemä on pidempi kuin ohitusnäkemävaatimus, ajoneuvo aloittaa ohituksen.

#### **8.4.4 Nopeus ohituksen aikana**

Usein ohituksen aikana kuljettajat ylittävät nopeusrajoituksen. Tämä johtuu siitä, että kuljettajat haluavat pitää kiinni tavoitenopeudestaan ja joutuvat siksi ohittamaan vain



vähän omaa tavoitenopeuttaan hitaampaa ajavia kuljettajia. Tällaisessa tilanteessa ohittaessa on usein pakko ylittää sallittu nopeus, jotta ohittaminen olisi mahdollista.

HUTSIMin jatkokehityksessä tulee ratkaista miten ohittavat kuljettajat saadaan ohitus-hetkellä ajamaan kovempaa kuin he ajaisivat vapaana ajoneuvona ajaessaan. Yksinkertaisin ratkaisumalli lienee, että ohittavan ajoneuvon sallitaan ajaa tietyn verran tavoitenopeuttaan korkeampaa nopeutta. Tavoitenopeuden ylitys voisi olla tietty prosentti-määrä tavoitenopeudesta.

#### **8.4.5 Vastaantulevan ajoneuvon käyttäytyminen ja keskeytetty ohitus**

Edellä on oletettu, että ohitustapahtuman osapuolina ovat vain ohittaja ja ohitettava. Todellisuudessa myös vastaantulijan käyttäytyminen voi vaikuttaa ohitustapahtumaan.

Keskeytetyllä ohituksella tarkoitetaan ohitusta, jossa kuljettaja on hyväksynyt hänelle tarjoutuneen ohitusmahdollisuuden ja aloittanut ohituksen. Kun kuljettaja on ehtinyt siirtyä vastaantulevan kaistalle hän havaitsee jotakin, joka pakottaa hänet keskeyttämään ohituksensa. Tavallisin syy ohituksen keskeyttämiseen lienee vastaantulevan ajoneuvon lähestyminen nopeammin kuin ohitusta aloitettaessa ennakoitiin.

Kaksikaistaisen tien simulointiohjelman kehityksen ensimmäisessä vaiheessa vastaantulevan ajoneuvon vaikutusta ja toimintaa eikä keskeytettyä ohitusta ole syytä mallintaa.

#### **8.5 Ohjelman käytettävyyteen liittyvät ominaisuudet**

HUTSIMin mallieditorin käyttö on nykymittapuun mukaan hankalaa. Toisaalta tämä johtuu ohjelman ikääntymistä ja toisaalta siitä, että ohjelma on alun perin kehitetty liittymien simulointiin, jossa tarkastelualue on rajallisempi kuin linjaosuuksien simuloinnissa. Laajoja linjaosuuksia mallinnettaessa käyttäjä jää kaipaamaan sujuvampia liikku- mis- ja tarkennusominaisuuksia.

Tällä hetkellä HUTSIMin käyttöä hankaloittaa ajan tasalla olevan käyttöohjeen puuttuminen. Nykyinen käyttöohje (Sane & Kosonen 1996) on jo monilta osin vanhentunut. Ohjeen laadinnan jälkeen HUTSIMiin tehdyt parannukset on raportoitu yksittäisissä muistioissa tai tutkimusraporteissa, joiden olemassaolosta käyttäjä ei välttämättä saa tietoa.

Internetissä olevan ohjeen käyttöönottoa tulisi harkita. Tällöin käyttäjillä olisi aina käytettävissään tuoreinta tietoa. Mahdollinen palaute ja käyttäjien ohjelman käyttöön liittyvät kokemukset olisi helppo rekisteröidä internetin välityksellä.

HUTSIMista on käytössä useita toisistaan hieman poikkeavia versioita. Useiden versioiden samanaikainen käyttö ei ohjelman käytön kannalta ole ongelma, mutta voi aiheuttaa käyttäjässä epätietoisuutta.



## 9 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli luoda katsaus kaksikaistaisten teiden mikrosimuloinnin nykytilaan kirjallisuustutkimuksen ja HUTSIM-simulointiohjelmistolla suoritettavien simulointikokeiden avulla. Työssä on tarkasteltu myös kaksikaistaisen tien mikrosimuloinnin kannalta tärkeitä kaksikaistaisen tien erityispiirteitä.

Kaksikaistaisten teiden simuloinnissa joudutaan ratkaisemaan monia kysymyksiä, joihin moottoriteiden ja katu ympäristön simuloinnissa ei ole tarvetta puuttua. Keskeisimmät kysymykset ovat ohittamiseen liittyvien toimintojen mallintaminen sekä geometrian nopeusvaikutusten mallintaminen.

HUTSIM on Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa liikenteen mikrosimulointiin kehitetty ohjelmisto. Ohjelmisto koostuu kolmesta osasta. HUTEDI on graafinen editori, jonka avulla mallinnetaan simuloitava ympäristö. Liikennesimulaattori HUTSIMin avulla laadittuun malliin syötetään haluttu liikenne ja kerätään tarvittavat tulostiedot. HUTSIM Analyzer on tulosten jälkikäsitteilyohjelma, jonka avulla saatuja tuloksia voidaan tarkastella ja tulostaa eri tavoin.

HUTSIM-simulointiohjelmisto on alun perin kehitetty valo-ohjauksisten liittymien simulointiin. Ohjelmistoa on kehitetty viime vuosina myös muunlaisten liikenneympäristöjen simulointiin sekä kalibroimalla parametreja että kehittämällä ohjelman ominaisuuksia laajemminkin. Kehityksestä huolimatta nykyisen HUTSIMin perusratkaisut ovat aika-kaudelta, jolloin ohjelman tulevaa käyttöä korkealuokkaisten väylien simulaattorina ei vielä tiedetty.

Kaksikaistaisen tien liikennevirran ominaisuudet riippuvat merkittävästi tien geometriasta. Koska ohittaminen kaksikaistaisella tiellä on rajoitettua, riippuu koko liikennevirran nopeus kaksikaistaisilla teillä merkittävästi hitaimpien ajoneuvojen nopeudesta. Yksittäisten ajoneuvojen nopeuteen kaksikaistaisella tiellä vaikuttavat muun muassa tien pysty- ja vaakageometria ja tien nopeusrajoitus. Vaakageometria vaikuttaa nopeuksiin keskipakovoiman ja siitä aiheutuvan ajomukavuuden muutoksen takia. Vaakageometrian nopeusvaikutus riippuu ajoneuvon ominaisuuksien lisäksi merkittävästi myös kuljettajan ajotottumuksista ja vaatimuksista ajomukavuutta kohtaan. Pystygeometrian nopeusvaikutus perustuu pääosin ajoneuvon ominaisuuksiin. Hyvän tehopainosuhteen omaavalla ajoneuvolla voidaan ylläpitää ylämäessä haluttua nopeutta helpommin kuin ajoneuvolla, jonka tehopainosuhte on pieni. Myös muut ajoneuvon ominaisuudet, kuten vaihteiston välitykset vaikuttavat siihen, miten paljon pystygeometria vaikuttaa ajoneuvon nopeuteen.

Tämän tutkimuksen yhteydessä simulointiin Koskisen ajosimulaattorilla suuritehoisen raskaan ajoneuvoyhdistelmän nopeuden muutosta ylä- ja alamäessä mäen nousu- tai laskukulman ja nousun pituuden funktiona. Saadut matka-nopeus-käyrät ovat ajoneuvo- ja tilannekohtaisia, mutta niistä voidaan

Kolmikaistaisella tiellä ajaminen sisältää sekä moottoritiellä, että kaksikaistaisella tiellä ajamiseen liittyviä piirteitä. Tästä johtuen myös kolmikaistateiden simuloinnissa käytet-

tävissä malleissa on piirteitä, jotka ovat tuttuja moottoriteiden ja kaksikaistaisten teiden simuloinnista.

Maailmalla on olemassa muutamia kaksikaistaisten teiden simulointiin soveltuvia ohjelmistoja. Myös hankkeita uusien ohjelmistojen luomiseksi sekä vanhojen ohjelmistojen parantamiseksi on käynnissä. Merkittävimpinä kaksikaistaisten teiden simulointiohjelmina voidaan pitää ruotsalaista VTI:n simulointiohjelmaa, australialaista TRARR-ohjelmaa ja amerikkalaista TWOPAS-ohjelmaa. Kaikki ohjelmistot on kehitetty 1970-80 luvuilla. TWOPASia lukuun ottamatta ohjelmat ovat olleet käytössä myös Suomessa, tosin vain kokeilumielessä.

Kaksikaistaiset simulointiohjelmat koostuvat tyypillisesti tie- ja liikennemallista, ajoneuvomallista sekä kuljettajamallista. Tie- ja liikennemallin avulla mallinnetaan simuloitavan tien geometria, kaistajärjestelyt, ohitusolosuhteet ja nopeusrajoitukset. Ajoneuvomallissa mallinnetaan ajoneuvojen ominaisuudet kuten dynaamiset ominaisuudet ja ajoneuvon mitat. Kuljettajamallissa mallinnetaan kuljettajan käyttäytyminen erilaisissa tilanteissa. Ajoneuvo- ja kuljettajamallit voidaan katsoa useissa tapauksissa yhdeksi ohjelman toiminnalliseksi osaksi. Kaksikaistaisen tien erityispiirteiden mallintamiseen käytetyt ratkaisut vaihtelevat ohjelmien välillä.

Simulointitutkimuksen tavoitteena oli arvioida HUTSIM-ohjelmiston vahvuuksia ja heikkouksia kaksikaistaisten teiden simulointiohjelman rungoksi. HUTSIM on alun perin kehitetty valo-ohjauksisten liittymien simulointiin, joten sen toimivuus kaksikaistaisten teiden simuloinnissa ei ole itsestään selvää. Tarkoitus ei ollut kalibroida HUTSIMin parametreja kaksikaistaisten teiden simulointiin.

Ensimmäisessä simulointikokeessa tarkasteltiin vuosina 1991-96 Järvenpään ja Mäntsälän välillä toimineen ohituskaistatien yhden ohituskaistan toimintaa. Simulointikokeen keskeinen tavoite oli kokeilla miten hyvin korkealuokkaisten väylien simulointiin kalibroidut HUTSIMin kaistanvaihdon parametrit toimivat ohituskaistan simuloinnissa. Vertailuaineistona käytettiin Tielaitoksen Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriolta tilaamaa ohituskaistatien liikennevirtaa käsittelevä tutkimusta.

Ohituskaistan simuloinnissa tavoitenopeusjakauman asettaminen osoittautui ongelmalliseksi. Ohituskaistatiellä ohituskaistalla käytetään korkeampia nopeuksia kuin tien seläisissä osissa, joissa on vain yksi ajokaista suuntaansa. Simuloinnissa jokaisella ajoneuvolla on oma tavoitenopeutensa, jota se pyrkii noudattamaan kaikissa tienkohdissa.

Ennen kokonaisten useista ohituskaistoista koostuvien ohituskaistateiden simulointitarkasteluiden aloittamista tulee HUTSIM toimintaa kehittää yhden ohituskaistan simulointikokeiden avulla. Keskeisiä kehittämistarpeita ovat tavoitenopeusjakauman muodostamisen periaatteet ja kaistanvaihtotoimintojen kehittäminen.

Toisessa simulointikokeessa tarkasteltiin tavanomaista korkean nopeustason kapeaa kaksikaistaista valtatiötä koskenkylän ja Liljendalin välillä valtatiellä 6. Tieosa soveltui tähän tutkimukseen hyvin, koska tie on kapea ja näkemäolosuhteet huonot, minkä vuoksi tiellä ohitetaan vähän. Tien vaakageometria on kuitenkin hyvä ja se ei yksinään aseta rajoituksia käytettäville nopeuksille.



Eryityisesti korkean nopeustason väylillä poikkileikkauksella on suuri merkitys yksittäisten kuljettajien ajokäyttäytymiseen ja sitä kautta myös koko liikennevirran ominaisuuksiin. Toistaiseksi HUTSIMissa ajoradan leveys ei vaikuta ajoneuvojen nopeuksiin kuin tavoitenopeusjakauman kautta eli tien erilaisia poikkileikkauksia ei voida HUTSIMissa erottaa toisistaan kuin nopeuksien osalta.

Korkean nopeustason väylien simuloinnin kehittämisessä kaksikaistaisen tien ohitustilanteen mallintaminen on erittäin tärkeää. Ilman sitä pitkien linjaosuuksien simulointi ei ole järkevää, koska hitaammin liikkuvat ajoneuvot ruuhkauttavat mallin ja liikennevirtaa kuvaavat tunnusluvut ovat sitä enemmän virheellisiä mitä pidemmästä mallista on kyse.

Kolmannessa simulointikokeessa tutkittiin HUTSIMin sopivuutta alhaisen nopeustason kaksikaistaisten teiden simulointiin simuloimalla Espoossa sijaitsevan Finnoontien liikennettä. Keskeinen tavoite Finnoontien simuloinneissa oli tutkia miten tien linjauksen vaikutus ajonopeuksiin voitaisiin huomioida HUTSIMissa. Finnoontien kaltaisen väylän simuloinnin kannalta ohitustilanteen mallintamisen puute ei ole ongelma.

Kaikissa simulointikokeissa korostui tavoitenopeusjakauman suuri vaikutus simulointituloksiin. Tämä olikin odotettavissa. Kaksikaistaisilla teillä, missä ohittaminen on vastaantulevan liikenteen ja geometrian vuoksi rajoitettua, hitaammat ajoneuvot keräävät taakseen jonoja ja alentavat näin koko liikennevirran nopeutta.

HUTSIMin kehittämisessä palvelemaan kaksikaistaisten teiden simulointia kaksi tärkeintä painopistettä ovat tiegeometrian huomioiminen ja ohitustilanteiden mallintaminen. Kuljettaja ja ajoneuvomallin kehittäminen on tärkeää, koska kaksikaistaisten tien liikennevirran ominaisuudet riippuvat pitkälti kuljettajien ajokäyttäytymisestä.

Jotta ajokäyttäytymistä voitaisiin mallintaa, tarvitaan mallien kalibrointiin mittava eri asioita käsittävä kenttämittausaineisto. Ajokäyttäytymistä käsittelevät kenttämittaukset tulisi suunnitella siten, että niiden tuloksia voidaan helposti käyttää simuloinnin kehittämistyössä.

Tielinjan mallintamista tulisi kehittää siten, että tiemallista voidaan määrittää helposti ajokäyttäytymiseen vaikuttavia suureita mistä tahansa tien kohdasta. Näitä suureita ovat esimerkiksi näkemä sekä kaarresäteen ja nousukulman arvot. Siirtymistä nykyisestä ajoneuvoputki-mallista tiensuunnitteluohjelmien omaiseen kolmiulotteiseen mallintamiseen tulisi tutkia. Samoin mahdollisuutta käyttää olemassa olevia suunnitteluohjelmia mallieditoria tulisi selvittää.

Näkemien määrittäminen voisi aluksi perustua näkemäpituuksien arviointiin ja niiden syöttämiseen tielinjan eri pisteistä. Myöhemmin tulisi kuitenkin selvittää miten ympäröivää maastoa voitaisiin kuvailla näkemäpituuksien määrittämistä varten.

HUTSIMin tavoitenopeus-määritelmää tulisi tarkentaa ja sallia tavoitenopeuden muuttaminen erilaisissa tienkohdissa. Myös ajoneuvojen tavoitenopeuden ja niiden muiden ominaisuuksien suhdetta tulisi selvittää lisää.

Jos kaksikaistaisten teiden simulointiin sopivan HUTSIMin halutaan soveltuvan myös pakokaasupäästöjen ja polttoaineen kulutuksen simulointiin, tulee näiden suureiden



määrittämiseen käytettävien menetelmien toiminnasta varmistua. Simuloitavien ajoneuvojen moottorin ja voimasiirron ominaisuuksien mallintamiseen perustuva mallintaminen parantaisi näitä ominaisuuksia. Siirtyminen moottorin ja voimasiirron ominaisuuksien mallintamiseen edellyttäisi kuitenkin laajaa tiedonkeruuta ajoneuvotekniikasta.

Vapaiden ajoneuvojen nopeusmallia tulee kehittää siten, että tien ominaisuudet vaikuttavat vapaiden ajoneuvojen nopeuksiin. Erityisen tärkeää olisi mallintaa raskaiden ajoneuvojen nopeudet oikein, koska niiden nopeudet vaikuttavat merkittävästi koko liikennevirran nopeuteen.

Merkittävä osa kaksikaistaisen tien simulointiohjelmaa on ohittamisen mallintaminen. Ilman ohitusmallia kaksikaistaisten teiden simulointi ei ole mahdollista. Ohittamiseen liittyviä mallinnuskohteita ovat ohituspaikan etsimisen aloittamiseen liittyvä kuljettajan päätöksenteko, ohituspaikkaa etsivän kuljettajan käyttäytyminen, ohituspäätös, nopeuden säätely ohituksen aikana ja vastaantulevan ajoneuvon käyttäytyminen.

Ohituspaikan etsimisen aloittaminen esitetään toteutettavaksi portaittaisen mittariston avulla. Kuljettaja, joka saavuttaa edellä ajavan, tekee arvion siitä alkaako hän etsiä ohituspaikkaa. Arvion perusteella muodostuu sen hetkinen ohitusmahdollisuusparametri, jota verrataan kuljettajakohtaiseen ohitustarveparametriin. Jos vertailu osoittaa, että olosuhteet ovat riittävät ohituspaikan etsinnälle, kuljettaja supistaa etäisyyttä edellä ajavaan ja alkaa etsiä riittävää aikaväliä vastaantulevasta liikennevirrasta. Kun kuljettaja kohtaa riittävän aikavälin, hän aloittaa ohituksen. Jotta mallinnettu ohittaminen vastaisi todellisia ohituksia, tulee ohittavalle ajoneuvolle sallia tavoitenopeutta korkeamman nopeuden käyttö.

HUTSIMin käytettävyyttä tulisi parantaa käyttöliittymän uudistamisella ja käyttöohjeen päivityksellä. Käyttöohjeen siirtämistä internetiin tulisi harkita. Ohjelman versioiden hallintaan ja dokumentointiin tulee niin ikään kiinnittää huomioita.

Pystygeometrialtaan tasaisten kaksikaistaisten teiden liikennevirran simulointiin HUTSIM sopinee melko pienin muutoksin. Tällöin keskeisin tarvittava parannus on ohitusmallin kehittäminen. Jotta ylä- ja alamäkiä sisältävien teiden simulointi olisi mielekästä, tulee pystygeometrian nopeusvaikutukset mallintaa. HUTSIMin sopivuus päästöjen ja polttoaineenkulutuksen simulointiin kaksikaistaisella tiellä soveltuvan ohjelman runkosi on kyseenalaista.

## LÄHTEET

- Bonneson J.A. (1993). Modelling queued driver behaviour at signalized junctions. Transportation research board 1365, Highway capacity and traffic flow, Transportation research board.
- Brodin A., Carlsson A. (1986). The VTI traffic simulation model, A description of the model and programme system. VTI meddelande 321 A. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping. 114 s.
- California PATH (2000). California PATH internet-sivu, Human factor research esittely-sivu. <http://path.berkeley.edu/~astein/HFhome.html>. 25.4.2000
- Carlsson A. (1990). Trafikantbeteennde på 13 m-väg. Studie av paseringar och omkörningar, VTI Notat T 78. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping. 21 s.
- Carlsson A. (1991). Trafikantbeteennde på 8-9 m-väg. Studie av omkörningar, VTI Notat T 95. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping. 21 s.
- Carlsson A. (1993). Beskrivning av VTIs trafiksimuleringsmodell, VTI Notat T 138. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping. 26 s.
- Carlsson A. (2000). Väg- och transportforskningsinstitutin tutkimuspäällikkö Arne Carlssonin sähköpostiviesti 19.5.2000 koskien VTI:n simulaattorin toimintaa.
- Drew D. (1968). Traffic flow theory and control. McGraw-Hill series in transportation. USA. 467 s.
- Enberg Å. (1994). Ohituskaistatien liikennevirran ominaisuudet. Tielaitoksen selvityksiä 31/1994. Kehittämiskeskus, Helsinki. 148 s. + liit. 108 s.
- Enberg Å., Hietanen J. (1996). Liikennevirta alemman nopeustason kaksikaistaisilla väylillä. Tielaitoksen selvityksiä 18/1996. Kehittämiskeskus, Helsinki 49 s. + liit. 10 s.
- Enberg (1998). Muistio Koskenkylä – Kouvola liikennevirtatutkimuksen olosuhteista. Teknillinen korkeakoulu, liikennelaboratorio, Espoo. 1 s.
- Espoon kaupunki (1977). Finnoontien suunnittelu, 1. vaihe, nykyisen tien vaakageometria, paalutus ja tien ominaisuudet. Espoo. 2 karttaa.
- FHWA (2000). Federal Highway Administration. Internet-sivut, Interactive Highway Safety Design Model –esittelysivut. <http://www.fhwa.dot.gov/ihsdm/index.htm>. 17.4.2000.
- Gibbs W.L. (1968). Driver gap acceptance at intersections. Journal of applied Psychology, 52(3), s 200-4.
- Harwood D.W., May A.D., Anderson I.B., Leiman L., Archilla A.R. (1999). Capacity and quality of service of two-lane highways, Final report (luonnos). University of California, Berkeley, USA. 180 s. + liit.



- Hietanen J. (1995). Liikennevirran perusominaisuudet alemman nopeustason väylillä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, liikennelaboratorio, Espoo. 250 s.
- Hoban C., Shepherd r., Fawcett G., Ropinson G., (1991). A Model for Simulating o Two-lane Rural Roads: User Guide and Manual for TRARR version 3.2. ARRB Technical Manual ATM, Australia. 83 s.
- Kaistinen J. (1994). Ohituskäyttäytyminen kaksikaistaisilla maanteillä. Tielaitoksen tutkimuksia 3/1994. Tielaitos, kehittämiskeskus, Helsinki. 58 s.
- Kallberg H. (1980). Ohitukset ja jononmuodostus 2-kaistasella maantiellä. VTT tiedonanto 61, Espoo. 104 s. + liitt. 8 s.
- Koskinen O. (1998). Vehicle simulator. Documentation. Olavi H. Koskinen, Ministry of Transport and Communications, Helsinki. 9 s.
- Kosonen I. (1999). HUTSIM – urban traffic simulation and control model: principles and applications. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka. Julkaisu 100. Tohtorin väitöskirja. Espoo. 249 s.
- Krammes R. (2000). Federal Highway Administrationin tutkimuspäällikkö Raymond Krammesin Sähköpostiviesti 5.3.2000 koskien Yhdysvalloissa kehitettyjen kaksikaististen teiden simulointiohjelmien nykytilaa ja historiaa.
- Lehmuskoski V. (1998). Korkealuokkaisten väylien mikrosimuloinnin kehittäminen, Kehä III:n mikrosimulointimallin kehittäminen välille Ansatie-Kirkonkylä. Tielaitoksen selvityksiä 22/1998. Tiehallinto, Uudenmaan tiepiiri, Helsinki. 149 s.
- Lehmuskoski V., Silverberg B., Kosonen I. (1999). The operational range of microscopic simulation on high class roads in Finland, the development of driving dynamics in HUTSIM and applications. 11<sup>th</sup> Mini-Euro conference on "Artificial Intelligence in Transportation Systems and Science". Helsinki 1999.
- Liikenneministeriö (1994). Moottoriajoneuvojen kulutus ja päästöt kaupunkiliikenteessä. Liikenneministeriön julkaisuja 42/1994. Liikenneministeriö, Helsinki. 66 s.
- Luttinen R.T. (2000) Level of Service on Finnish Two-Lane Highways. In: Brilon, W. (toim.) Fourth International Symposium on Highway Capacity, Proceedings. June 27 - July 1, 2000, Maui, Hawaii. (Transportation Research Circular E-C018.) Transportation Research Board. Washington, D.C. S. 175-187.
- McLean J.R. (1978). Speeds on curves: Regression analysis. Australian Research Board. Report AIR 200-3.
- McLean J.R. (1989). Two-Lane Highway Traffic Operations: Theory and Practice. Gordon and Breach science publishers, Transportation studies volume 11, New York, USA. 408 s.
- Niittymäki J. (1993). Liikennesimulaattorin kalibrointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, liikennelaboratorio, Espoo. 131 s.



Pursula M. (1982). Liikenteen simulointi. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Opetusmoniste 5, Otaniemi. 28 s.

Pursula M. (1999). Simulation of traffic systems – an overview. Journal of geoprachic information and decision analys, vol 3, no 1, s 1-8, 1999.

Sane K., Kosonen I. (1996). HUTSIM 4.2 Reference manual. Julkaisu 84, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, Espoo. 132 s.

Siimes H. (1992). Kaksi- ja kolmekaistaisen tien liikennevirran simulointi trarr-ohjelmalla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, liikennelaboratorio, Espoo. 158 s.

Tielaitos (1991). Valtatie 4, Ohituskaistaosuus välillä Järvenpää-Mäntsälä, opasteet ja tiemerkinnt, työkohtainen työselostus. Tielaitos, kehittämiskeskus, Helsinki.

Tielaitos (1993). Pääväylät kaupunkialueella, yleiset suunnitteluperiaatteet. Tielaitos, kehittämiskeskus, Helsinki.

Tielaitos (1997). Liikenteen automaattinen mittaus 1996. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 18/1997. Tielaitos, liikenne- ja tiestötiedot, Helsinki.

Tielaitos (1999). Ohitusnäkemät tiensuunnittelussa. Tietoa tiensuunnitteluun nro 46. Tielaitos, tie- ja liikennetekniikka, Helsinki. 2 s.

Transportation Research Board (1999). Highway Capacity Manual 2000, Chapter 20 – Two-lane Higways. Draft. Transportation Research Board, National Research Council. Washington D.C..

Viatek (1987). Liikenneteknisen suunnittelun tietokoneohjelmistot. TVL:lle laadittu muistio Kaksikaistaisten teiden liikenteen simulointiohjelmista 2.4.1987.

## VEMOSIM-ajosimulaattorin teoreettista taustaa

(Liikenneministeriö 1994, Lehmuskoski 1998)

VEMOSIM-ajosimulaattori on ajoneuvon ominaisuuksien tarkkaan kuvaamiseen perustuva laskentajärjestelmä. Laskennassa seurataan lyhyin aikaväleihin (0,5-1,0 sekuntia) ajoneuvon liiketilaa ja sen muutoksia. Koska aikaväli on lyhyt, sen aikana ajoneuvon vetovoimaa ja vastusvoimia voidaan pitää vakioina. Liiketilän muutos tänä aikana saadaan seuraavasti (Newtonin toinen laki):

$$m \frac{\Delta v}{\Delta t} = F_1 - F_2$$

$m$  = ajoneuvon massa (kg)

$v$  = nopeus (m/s)

$t$  = aika (s)

$F_1$  = vetovoima (N)

$F_2$  = vastusvoima (N).

Vetovoima voidaan määrittää seuraavasti:

$$F_1 = E_i \times E_0 \times Z_i \times Z_0 \times \frac{M}{R}$$

$F_1$  = vetovoima

$M$  = moottorin vääntömomentti (Nm)

$R$  = vetävien pyörien säde (m)

$Z_i$  = vaihteen  $i$  välityssuhde

$Z_0$  = vetopyörästä välityssuhde

$E_i$  = vaihteen  $i$  hyötysuhde

$E_0$  = vetopyörästä hyötysuhde.

Vastusvoima voidaan määrittää seuraavasti:

$$F_2 = m \times g \times (A_0 + A_1 \times v + Q) + A_2 \times v^2$$

$F_2$  = vastusvoima

$m$  = ajoneuvon massa

$v$  = nopeus

$g$  = gravitaatiokiihtyvyyden kiihtyvyyden vakio (9,807 m/s<sup>2</sup>)

$A_0, A_1$  = vierintävastuskertoimet (-, s/m)

$A_2$  = ilmanvastuskerroin (kg/m)

## VEMOSIM-ajosimulaattorin teoreettista taustaa

$Q =$  tie pituuskaltevuus (-).

Ilmanvastuskertoimelle  $A_2$  on voimassa seuraava yhtälö:

$$A_2 = \frac{1}{2} \times D_i \times C_w \times A_1$$

$A_2 =$  ilmanvastuskerroin (kg/m)

$D_i =$  ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$C_w =$  muotokerroin (-)

$A_r =$  otsapinnan ala (m<sup>2</sup>).

Lisäksi etenemisnopeuden ja moottorin pyörimisnopeuden välillä on seuraava funktio:

$$v = R \times \frac{w}{\frac{Z_i}{Z_0}}$$

$v =$  etenemisnopeus (m/s)

$w =$  moottorin pyörintänopeus (rad/s)

$R =$  vetävän pyörän säde (m)

$Z_i =$  vaihteen  $i$  välityssuhde

$Z_0 =$  vetopyörästä välityssuhde.

Edellä esitetyillä funktioilla voidaan ajoneuvon liiketila ajan ja paikan funktiona laskea. Kun vetovoima ja vastusvoima ovat yhtä suuret liike on tasaista. Jos näin ei ole ajoneuvon nopeus muuttuu laskenta-aikavälin aikana.

Pyörimisnopeus ja vääntömomentti määräytyvät, paitsi ajoneuvon ominaisuuksien, myös sen perusteella, millainen ajomalli simulaattorille asetetaan. Vapaissa olosuhteissa, joissa muu liikenne ei vaikuta nopeuden valintaan, voidaan ajoneuvolle antaa tavoitenopeus, jota se pyrkii ylläpitämään. Lisäksi tulee määrittää kierroslukurajat, missä kuljettaja vaihtaa vaihdetta ylös tai alaspäin.

Jos ajo-olosuhteet eivät ole vapaat eli muun liikenteen oletetaan vaikuttavan nopeuden valintaa, tavoitenopeus ei ole vakio vaan se muuttuu tilanteen mukaan. VEMOSIM-ajosimulaattorilla ei voida simuloida dynaamisesti muun liikenteen vaikutusta.

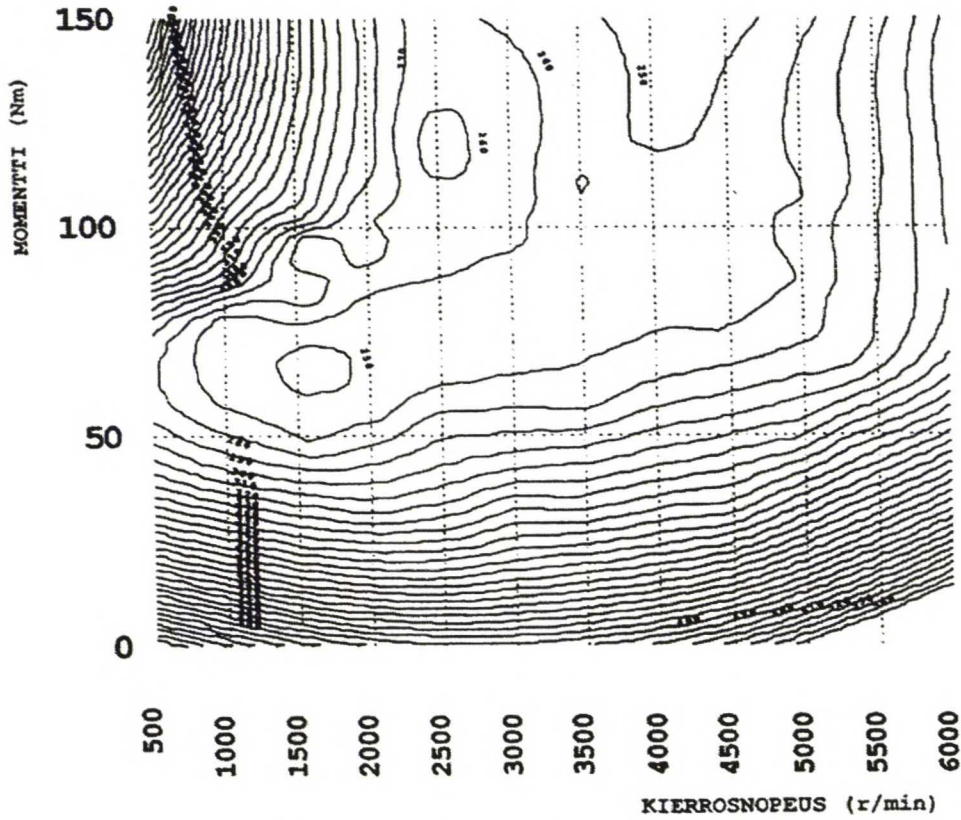
Ajosimulaattorin vahvuuksia ovat polttoaineen kulutus ja pakokaasupäästöjen tarkka määrittäminen. Simulaattorin avulla voidaankin verrata esimerkiksi polttoaineenkulutuksen eroja erilaisissa tien tasauksissa.

Jotta edellä kuvattu laskenta olisi mahdollista, tulee simuloitavan ajoneuvon moottorin ominaisuudet kuvata tarkoin simulaattorille. Lisäksi polttoaineen kulutus ja pakokaasu



## VEMOSIM-ajosimulaattorin teoreettista taustaa

päästöjen simulointia varten on tunnettava kyseiset suureet tunnettava moottorin eri tiloissa. Alla on esitetty esimerkki VEMOSIM-ajoneuvosimulaattorin käyttämästä polttoaineenkulutusdiagrammista, jonka avulla voidaan polttoaineen kulutus määrittää moottorin kierrosnopeuden ja momentin funktiona.



Polttoaineenominaiskulutusdiagrammi (g/kWh)

*Esimerkki VEMOSIM-ajoneuvosimulaattorin käyttämästä polttoaineenkulutusdiagrammista, jonka avulla voidaan polttoaineen kulutus määrittää moottorin kierrosnopeuden ja momentin funktiona.*