

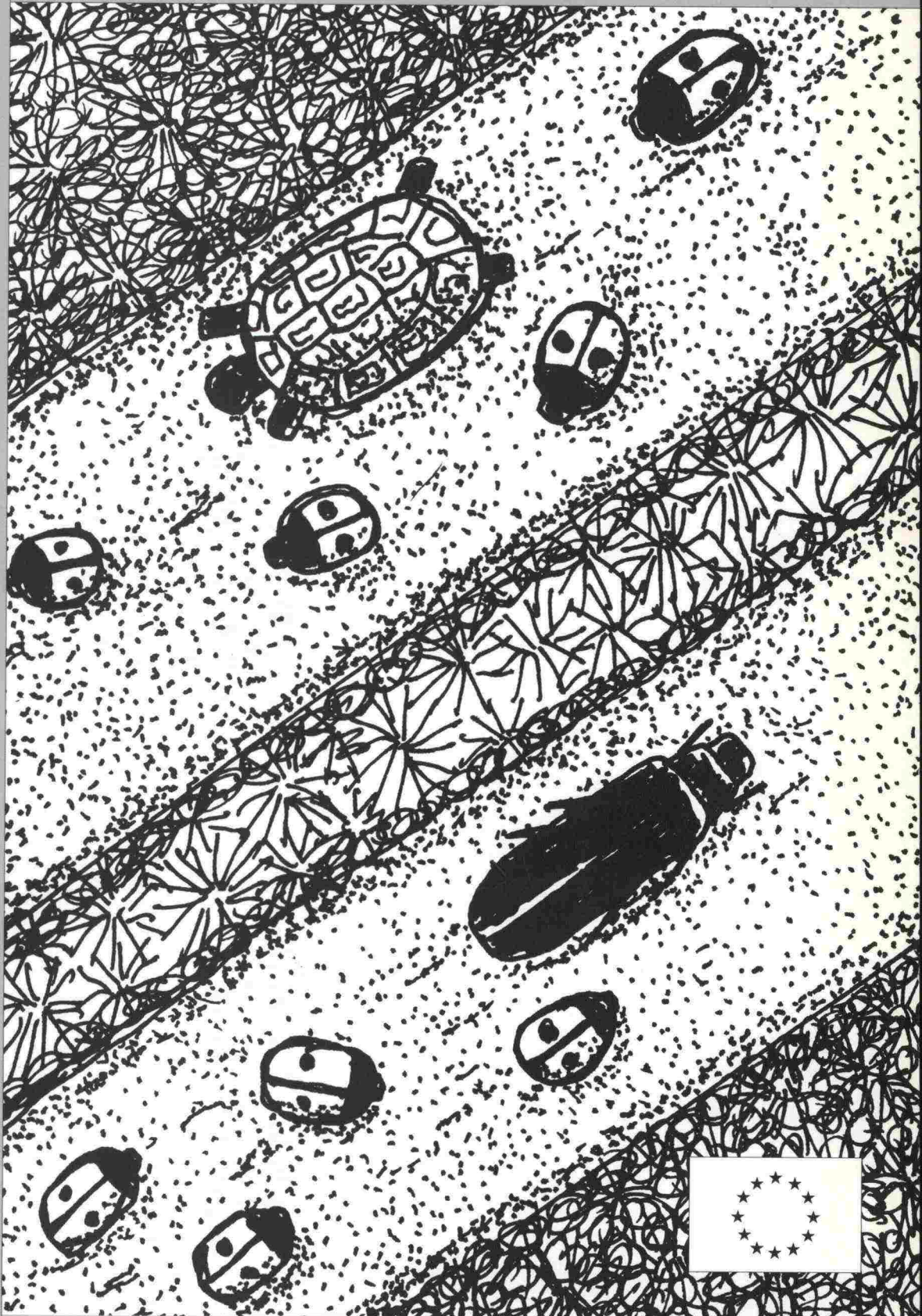


Tielaitos

Satu Innamaa, Iiro Huttunen

Korkealuokkaisten väylien liikenteen mikrosimuloinnin kehittäminen

Kaistanvaihto moottoriteillä - kaistanvaihtomallit ja kenttätutkimus



Tielaitoksen
selvityksiä
10/1998

Helsinki 1998

TIEHALLINTO
Uudenmaan tiepiiri

Tielaitoksen selvityksiä
10/1998

Satu Innamaa, Iiro Huttunen

Korkealuokkaisten väylien liikenteen mikrosimuloinnin kehittäminen

Kaistanvaihto moottoriteillä - kaistan- vaihtomallit ja kenttätutkimus

Tielaitos
TIEHALLINTO
Uudenmaan tiepiiri

Helsinki 1998

ISBN 951-726-412-7
ISSN 0788-3722

Edita Oy
Helsinki 1998

Julkaisua saatavana:
Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri
Asiakaspalvelupiste
Puh. 0204 44 151
Telefax 0204 44 2717



Tielaitos
TIEHALLINTO
Uudenmaan tiepiiri
PL 70
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 44 151

Satu Innamaa, Iiro Huttunen: Kaistanvaihto moottoriteillä – kaistanvaihtomallit ja kenttätutkimus. Helsinki 1998. Tielaitos, Tielaitoksen selvityksiä 10/1998. 65 s. + liitt. 3 s. ISBN 951-726-412-7. ISSN 0788-3722.

Asiasanat: liikennevirta, mallintaminen, moottoritiet, kaistanvaihto, kenttätutkimus

Aiheluokka: 21

TIIVISTELMÄ

Yksittäisten kuljettajien käyttäytyminen ulkoisen ärsykkeen läsnä ollessa on tärkeä osa mikrokooppisia simulointimalleja. Tämän käyttäytymisen pääelementtejä ovat kiihdyttäminen ja ajoneuvon seuraaminen sekä kaistanvaihtopäätökset. Tämän selvityksen tuloksien pohjalta on tarkoitus kehittää Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratorion mikrokooppisen HUTSIM-liikenteensimulointiohjelman kaistanvaihtomallia. Selvitys on osa laajempaa projektia, jonka tarkoitus on laajentaa HUTSIMin sovellusaluetta moottoritie-simulointiin.

Kaistanvaihdon mallintamiseen on hyvin monia eri keinoja: mallit voivat olla mikrokooppisia tai makroskooppisia ja ne voivat perustua esimerkiksi todennäköisyyksiin tai ihmisen käyttäytymiseen. Lisäksi mallin riittävyys ja tarkoituksenmukaisuus vaihtelevat kulloisenkin ongelman mukaan. Selvityksessä on esitelty esimerkkeinä erityyppisistä kaistanvaihtomalleista kenttämittauksiin perustuva makroskooppinen kaistamalli, kuljettajan käyttäytymiseen perustuva ja aikavälin hyväksymiseen perustuva mikrokooppinen kaistanvaihtomalli sekä dynaaminen diskreetti kaistanvalintamalli moottoriteille. Näiden lisäksi on esitelty neljän mikrokooppisen liikenteensimulointiohjelman ratkaisu kaistanvaihtoproblematiikkaan.

Mallien esittelyn lisäksi tätä selvitystä varten tehtiin kenttätutkimus, jonka avulla tutkittiin kaistanvaihtoon liittyviä parametrejä ja niiden välisiä riippuvaisuuksia sekä kaistanvaihtojen määriä ja kaistajakaumia erilaisissa liikenneolosuhteissa. Kenttätutkimuksessa käytettiin koekuljettajia sekä tarkkailtiin muiden autoilijoiden kaistanvaihtokäyttäytymistä. Lisäksi makroskooppisia tietoja hankittiin videomalla moottoritie-liikennettä linjaosuuksilla.

Kokeen tuloksena saatiin havaintoja ohittajan ja ohitettavan nopeudesta sekä heidän nopeuserostaan ennen ohitusta, nopeuserosta ja ohitettavan nopeuden muutoksesta ohituksen aikana, etäisyydestä ja aikavälistä, jolla ajoneuvo lähti ohittamaan toista, etäisyydestä, jolle omalle kaistalle palattiin, sekä ohitettavien ajoneuvojen aikaväleistä, kun samalla kertaa ohitettiin useampia ajoneuvoja. Lisäksi saatiin tuloksia parametrien välisistä riippuvaisuuksista sekä oikealta ja vasemmalta tapahtuneiden ohitusten välisistä eroista.

Satu Innamaa, Iiro Huttunen: **Kaistanvaihto moottoriteillä – kaistanvaihtomallit ja kenttätutkimus.** [*Lane-Change on Freeways – Lane-Change Models and Field Studies*]. Helsinki 1998. Finnish National Road Administration, Finnra reports 10/1998. 65 p. + apps. 3 p. ISBN 951-726-412-7. ISSN 0788-3722.

Keywords: traffic flow, modeling, freeways, lane change, field study

ABSTRACT

The behavior of an individual driver at the presence of external stimulus is an important part of microscopic simulation models. The main elements of this behavior are acceleration and car following and lane-change decisions. The results of this study will be used for the development of a lane-change model for a microscopic traffic simulation program named HUTSIM, which was developed at the Laboratory of Transportation Engineering of Helsinki University of Technology. This study is a part of a greater research project to enlarge the application area of HUTSIM to freeway simulations.

There are many ways to model lane changing: models can be microscopic or macroscopic and they can be based on e.g. probabilities or human behavior. In addition, the sufficiency and the expediency of the model vary according to the respective problem. In this study, as examples of different kinds of lane-change models, a macroscopic lane model based on a field study, microscopic lane-change models based on driver behavior and headway acceptance, and a dynamic discrete lane choice model of freeways are presented. In addition, the solutions to solve lane changing in four microscopic traffic simulation programs are presented.

Besides presenting the models, a field study was done. With the help of the field study, lane-change parameters and their interdependencies as well as lane-change rates and lane distributions in different traffic situations were studied. In the field study, test drivers were used and the lane-change behavior of other drivers was observed. In addition, macroscopic information was gathered by video recording freeway traffic on basic freeway sections.

As a result of the study the following observations were obtained: the speed of the passing vehicle and the passed vehicle and their speed difference before the passing maneuver, the speed difference and the change in the speed of the passed vehicle during the passing, the distance and the headway that vehicles had when the passing began, the distance that they had when passing was over, and the headways that passed vehicles had when several vehicles were passed at once. In addition results were obtained of the interdependencies between the parameters, and of the differences between passings that took place from the right or from the left side.

The study has been granted European Union financial support.

ALKUSANAT

Tämä selvitys on tehty Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa Uudenmaan tiepiirin tilauksesta, Matti Pursulan ja Björn Silfverbergin tekemän tutkimussuunnitelman "Mikrosimuloinnin kehittäminen, esimerkkinä Kehä III" pohjalta. Selvitys on osa "Korkealuokkaisten väylien liikenteen mikrosimuloinnin kehittäminen" -tutkimusohjelmaa, jonka tarkoituksena on laajentaa HUTSIM-nimisen mikroskooppisen liikenteensimulointiohjelman sovellusaluetta moottoritiesimulointiin. Tutkimusohjelman muita tutkimuksia ovat mm. "Impact of heavy vehicles on Finnish freeway traffic flow" (Finnra reports 11/1998) ja "Kehä III:n mikrosimulointimallin kehittäminen välille Ansatie-Kirkonkylä" (Tielaitoksen selvityksiä 22/1998).

Kaistanvaihtoihin liittyvän kenttätutkimuksen suunnitteli diplomi-insinööri Iiro Huttunen ja selvityksen tekemisestä vastasi diplomi-insinööri Satu Innamaa. Projektin taustaryhmässä olivat mukana myös diplomi-insinöörit Mirja Noukka (Tielaitos, Liikenteen palvelut), Mari Ahonen (Uudenmaan tiepiiri), Björn Silfverberg (LT-Konsultit), Åsa Enberg (TKK) ja Shafiqul Mannan (TKK) sekä tekniikan ylioppilas Ville Lehmuskoski (LT-Konsultit). Liikennelaboratoriossa tutkimus on tehty Matti Pursulan valvonnassa.

Tutkimuksen tekemiseen on saatu Euroopan unionin rahoitustukea.

Helsingissä toukokuussa 1998

Uudenmaan tiepiiri

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKUSANAT	7
SISÄLLYSLUETTELO	9
1 JOHDANTO	11
2 KENTTÄMITTAUKSIIN PERUSTUVA MAKROSKOOPPINEN KAISTAMALLI	13
2.1 Yleistä	13
2.2 Kaistajakaumat	13
2.3 Kaistanvaihtojen määrä	16
2.4 Mallin käyttösovellus	19
3 KULJETTAJAN KÄYTTÄYTYMISEEN PERUSTUVA MIKROSKOOPPINEN KAISTANVAIHTOMALLI	20
4 AIKAVÄLIN HYVÄKSYMISEEN PERUSTUVA MIKROSKOOPPINEN KAISTANVAIHTOMALLI	25
4.1 Yleistä	25
4.2 Kaistanvaihtoprosessi	25
4.3 Hyväksytyn aikavälin rakenne	27
4.4 Kaistanvaihtoprosessin vaiheet	27
5 DYNAAMINEN DISKREETTI KAISTANVALINTAMALLI MOOTTORITTEILLE	29
5.1 Yleistä	29
5.2 Malli	29
5.3 Mallin sovellus	31
6 KAISTANVAIHTO SIMULOINTIOHJELMISSA	35
6.1 HUTSIM	35
6.2 INTEGRATION	36
6.3 AIMSUN2	38
6.4 INTRAS	38
7 KENTTÄTUTKIMUS	40
7.1 Koekuljettajat	40
7.2 Kaistanvaihtoparametrien väliset riippuvaisuudet	48
7.3 Makroskooppinen tarkastelu	56
8 PÄÄTELMÄT	61
9 YHTEENVETO	62
9.1 Kaistanvaihtomallit	62
9.2 Kenttäselvitys	63
LÄHDELUETTELO	64

1 JOHDANTO

Liikennehankkeiden yksityiskohtainen suunnittelu on aikaisempaa vaativampaa. Tähän ovat syynä liikennepalveluiden kasvanut kysyntä ja lisääntynyt tietoisuus liikenteen haittavaikutuksista. Liikenteen kysynnän kasvu lisää mahdollisten häiriötilanteiden todennäköisyyttä ja niiden seurausvaikutusten haitallisuutta ja siten tarvetta yksityiskohtaiseen liikennetekniseen suunnitteluun ja liikenteen dynaamisten vuorovaikutusten huolelliseen tutkimiseen. Liikenteen haittavaikutusten tiedostaminen puolestaan synnyttää vaatimuksen hankkeiden sujuvuusvaikutusten ohella myös turvallisuus- ja ympäristövaikutusten monipuolisesta tutkimisesta ja analysoinnista. (Pursula & Silfverberg 1997.)

Matemaattiset apuvälineet liikennevirran käyttäytymisen hallitsemiseksi ovat kaikesta kehittyneisyydestään huolimatta rajoittuneet ja niiden käyttö laajojen järjestelmien toiminnan analyysissä on vaikeaa muuttujien ja erilaisten tilastollisten jakaumien ja riippuvaisuuksien suuren määrän sekä jakaumien monimutkaisuuden vuoksi. Lisäksi erilaiset dynaamiset vuorovaikutukset (ruuhkautuminen, liittymätoiminnot) vaikeuttavat analyttisten menetelmien käyttöä. (Pursula & Silfverberg 1997.)

Liikennevirran ja liikenteen kysynnän hallinnassa käytetään jo nyt erilaisia telemaattisia apuvälineitä. Lähitulevaisuudessa niiden käyttö lisääntyy ja tarjolla on monia tekniikoita, joiden käytöstä ei vielä ole kokemuksia. (Pursula & Silfverberg 1997.)

Liikenteen ohjauksessa ei useinkaan ole mahdollisuutta kenttäkokeisiin eikä liikenneverkon tasolla voida kokeilla vaihtoehtoisia järjestelmiä ennen ratkaisun valintaa. Analyttisten välineiden ja kenttäkokeiden sijasta voidaan käyttää tietokonesimulointia, jolla tässä tarkoitetaan tutkittavan järjestelmän dynaamisen toiminnan jäljittelyä siten, että järjestelmän keskeiset sisäiset lainalaisuudet on kuvattu tietokoneohjelmistossa kulloisenkin tarkastelun edellyttämällä tarkkuudella. Olennaista tässä yhteydessä on dynaamisuus eli järjestelmän tilan seuranta ajan funktiona. (Pursula & Silfverberg 1997.)

Simulointimallit voivat olla joko makroskooppisia, jolloin ne kuvaavat kokonaistilannetta kaistanvaihtojen määrästä, suuntautumisista jne., tai mikroskooppisia, jolloin ne kuvaavat yksittäisen ajoneuvon kaistanvaihtokäyttäytymistä. Yksittäisten kuljettajien käyttäytyminen ulkoisen ärsykkeen läsnä ollessa on olennainen osa mikroskooppisia simulointimalleja. Tämän käyttäytymisen pääelementtejä ovat kiihdyttäminen ja ajoneuvon seuraaminen sekä kaistanvaihtopäätökset. Kaistanvaihto on siis tärkeä osa mikroskooppista liikenteensimulointimallia. Tärkeystään huolimatta kaistanvaihtoa on tutkittu suhteellisen vähän. Aikavälien hyväksymisen mallintamista on tutkittu jonkin verran, mutta tämä ei esitä kaistanvaihdosta kuin yhden puolen. Monet yritykset mallintaa aikavälin hyväksymistä perustuvat kriittisten aikavälien jakaumaan (joka määrittää minimaalivälinä, jonka kuljettaja on halukas hyväksymään, jotta voisi vaihtaa kaistaa) ilman, että yritetäänkään selittää tämän pohjalla olevaa käyttäytymistä. (Ahmed ym. 1996.)

Vaatimukset kaistanvaihdon mallintamisen tarkkuudelle vaihtelevat sen tarkoituksen mukaan, johon liikenteensimulointiohjelma on kehitetty. Tasoliittymien si-

mulointia varten kehitettyyn malliin riittää yksinkertainen kaistanvaihtomalli, mutta esimerkiksi moottoriteliikenteen mallintamisessa kaistanvaihtokäyttäytymisellä on huomattavasti tärkeämpi rooli ja tästä syystä kaistanvaihtaminen täytyy myös mallintaa tarkemmin. Tässä selvityksessä on esitetty joitain esimerkkejä erityyppisistä kaistanvaihtomalleista.

Young, Taylor ja Gipps (1989) ovat kehittäneet kaistanvaihdolle kuljettajan käyttäytymiseen perustuvan mallin. Heidän mallissaan kuljettajan käyttäytymiselle on kolme vaihtoehtoa ja kuljettajan käyttäytyminen määräytyy sen etäisyyden mukaan, jonka jälkeen hän on kääntymässä pois väylältä. Käyttäytymisen muuttuminen on liukuvaa eikä mallilla ole jäykkiä etäisyysrajoja.

Levinin (1976) kaistanvaihtomalli käyttää aikavälin hyväksymiskäsitettä arvioi-
dessaan todennäköisyyttä, että ajoneuvo vaihtaa kaistaa tietyn etäisyyden sisällä erilaisissa liikenneolosuhteissa. Levinin kaistanvaihtoprosessi koostuu seuraavista kolmesta vaiheesta: riittävän pitkän aikavälin etsimisestä, ajoneuvon sijoittamisesta siten, että sen sijainti suhteessa hyväksyttävään aikaväliin on sellainen, että kaistanvaihto voidaan toteuttaa, ja kaistan vaihtamisesta.

Ahmedin ym. (1996) kaistanvaihtomalli on dynaaminen diskreetti valintamalli, joka ottaa huomioon kuljettajapopulaation heterogeenisuuden ja hylättyjen aikavälien välisen riippuvaisuuden. Kaistanvaihto on mallinnettu kolmen askeleen sarjana: päätöksenä vaihtaa kaistaa, vasemman tai oikean kaistan valitsemisena ja riittävän pitkän aikavälin etsimisenä. Mallissa aikavälin hyväksymiseen vaikuttavat aikavälin pituuden lisäksi muun muassa suhteellinen nopeus, etäisyys siihen pisteeseen, jossa kaistanvaihto on viimeistään suoritettava, ja viive päävirtaan sulautumisessa.

Mikroskooppisten kaistanvaihtomallien kalibrointia ja validointia varten tarvitaan makrotason tietoa kaistanvaihtojen määristä. Tässä selvityksessä on esitelty mikroskooppisten mallien lisäksi yksi makroskooppinen kaistanvaihtomalli. Wemple ym. (1991) on kehittänyt kaistamallin, joka ennustaa moottoriteille liikennevirran ominaisuudet ramppien ja suurimpien sekoittumisalueiden läheisyydessä. Malli ennustaa liikenteen jakautumisen kaistoille ja kaistaa vaihtavien ajoneuvojen osuudet kokonaisliikennemäärän funktiona.

Tämä selvitys on osa laajempaa projektia, jonka tarkoitus on laajentaa Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetyn HUTSIM-nimisen mikroskooppisen liikenteensimulointiohjelman sovellusalueita moottoritiesimulointiin. Selvityksen alkuosassa (kappaleet 2 - 6) esitellään erilaisia kaistanvaihtomalleja ja kappaleessa 7 tuloksia kenttämittauksista, joiden tarkoituksena oli selvittää kaistanvaihtojen mikroskooppisia ja makroskooppisia lainalaisuuksia simulointimallin laadintaa, kalibrointia ja validointia varten.

2 KENTTÄMITTAUKSIIN PERUSTUVA MAKRO-SKOOPPINEN KAISTAMALLI

2.1 Yleistä

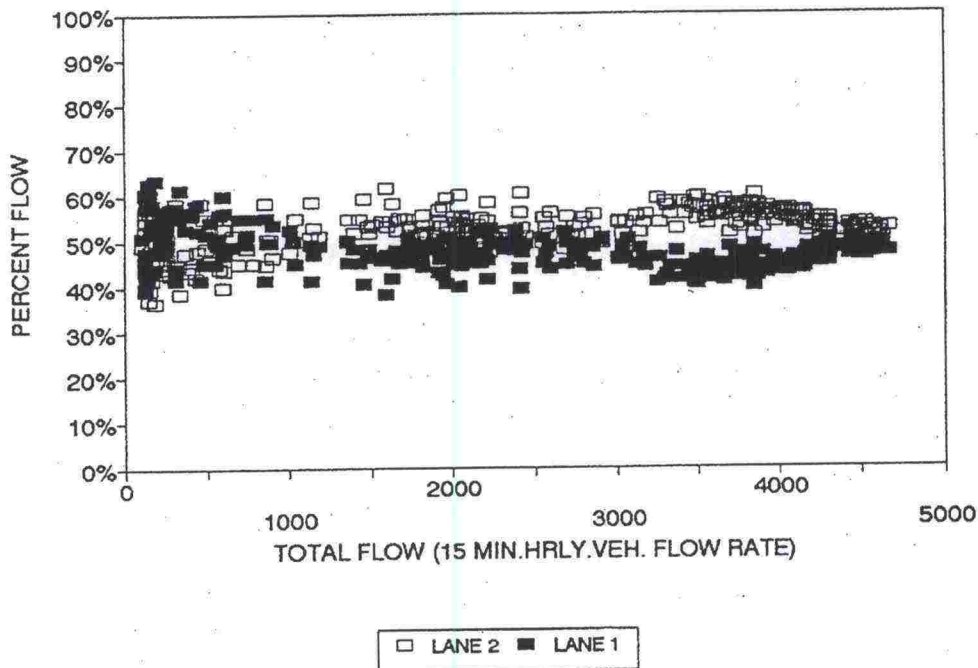
Wemple ym. (1991) on kehittänyt Yhdysvalloissa moottoriteille kaistamallin, joka ennustaa liikennevirran ominaisuudet ramppien ja suurien sekoittumisalueiden läheisyydessä. Mallin kehittämiseksi on kerätty kaistakohtaisia tietoja moottoritien suorilta linjaosuuksilta. Tietoja käytettiin määrittämään, milloin ramppiliittymän tai sekoittumisalueen vaikutus liikennevirtaan lakkaa. (Wemple ym. 1991.)

Mallin kehittämiseksi tehtiin kaksi erillistä tutkimusta, joissa selvitettiin kolmesta kohteesta kaistajakauma ja kaistanvaihtojen määrä liikennemäärän funktiona. Nämä kohteet olivat Caldecott-tunneli sekä moottoritiet Interstate 680 (I-680) ja Interstate 880 (I-880) San Francisco Bayn alueella. Kohteissa oli vastaavasti kaksi, kolme ja neljä kaistaa kumpaankin suuntaan. (Wemple ym. 1991.)

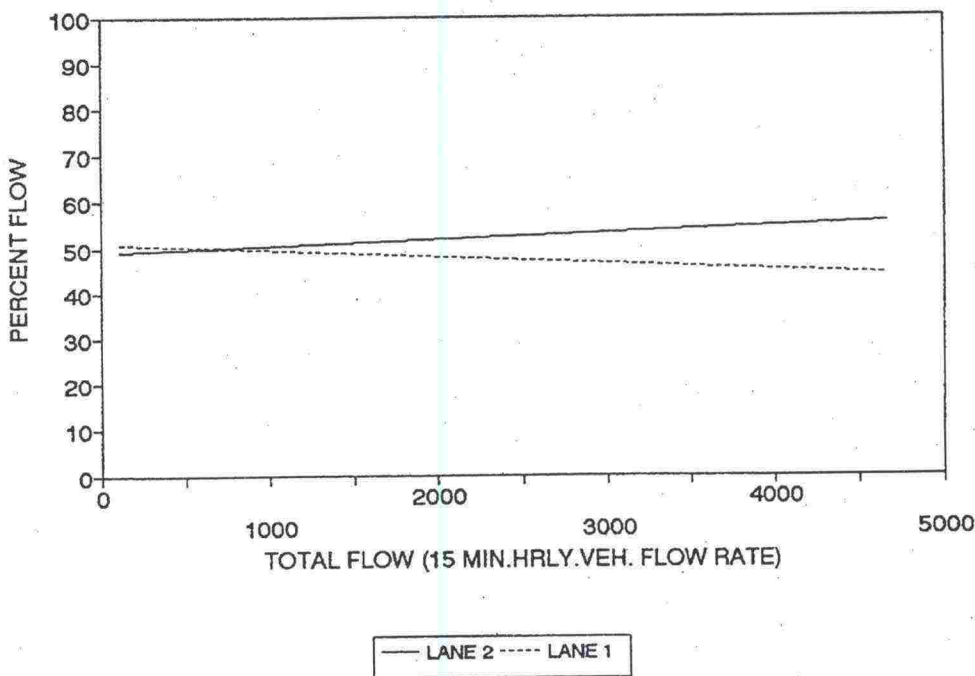
2.2 Kaistajakaumat

Kaikkien kolmen kohteen kaistajakaumatiedot selvitettiin kaistamallia varten. Moottoritien tuntiliikennemäärät ja kunkin kaistan osuus kokonaisliikennemäärästä laskettiin. Kerättyyn dataan sovitettiin lineaarisen regressioanalyysin avulla regressiosuora, joka kuvaa kunkin kaistan osuuden kokonaisliikennemäärästä. (Wemple ym. 1991.)

Kaksikaistaisessa mittauspisteessä Caldecott-tunnelin luona kaistoittaiset osuudet koko liikennemäärästä eivät ole lineaarisia, kuten *kuvasta 1* voidaan havaita. (Kuvassa kaista 1 on reunakaista.) Liikennemäärät laskettiin 15 minuutin jaksoissa. Havaintoihin sovitetusta regressiosuorasta (*kuva 2*) voidaan havaita, että mitä suurempi liikennemäärä sitä suurempi osa ajoneuvoista ajaa ohituskaistaa (kaista 2). Suora ei kykene kuvaamaan tätä riippuvaisuutta erityisen hyvin, mikä näkyy alhaisena selitysasteena ($R^2 = 0,23$). Tilanteeseen voi olla syynä havaintopistettä ennen sijaitseva tunneli. (Wemple ym. 1991.)



Kuva 1. Kaistajakauma Caldecott-tunnelin luona (Wemple ym. 1991).



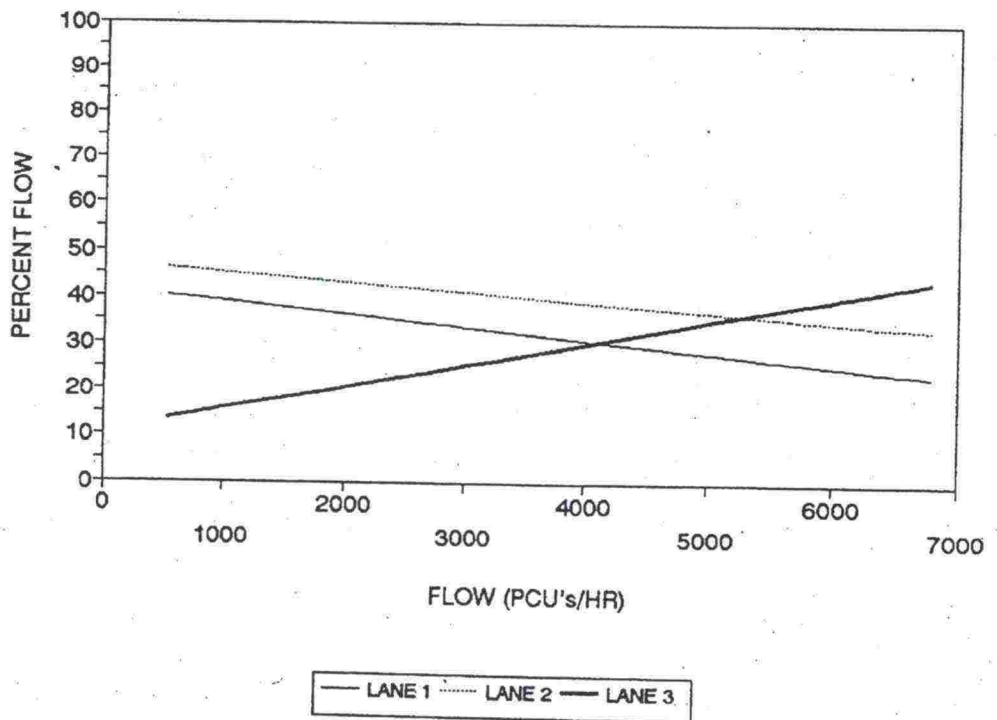
Kuva 2. Kaistajakauma Caldecott-tunnelin luona liikennemäärän (ajon./h) funktiona (Wemple ym. 1991).

Caldecott-tunnelin moottoritieosuudella raskaiden ajoneuvojen osuus oli arviolta 2,7 prosenttia, joten liikennemäärä oli suunnilleen sama kuin henkilöautoyksiköiden määrä tuntia kohti eikä ajoneuvojen määrää muutettu henkilöautoyksiköiksi. Moottoriteillä I-680 ja I-880 ajoneuvomäärät muutettiin henkilöautoyksiköiksi ja kunkin kaistan viiden minuutin henkilöautoyksikkömäärää verrattiin vastaavan jakson henkilöautoyksiköiden kokonaismäärään. (Wemple ym. 1991.)

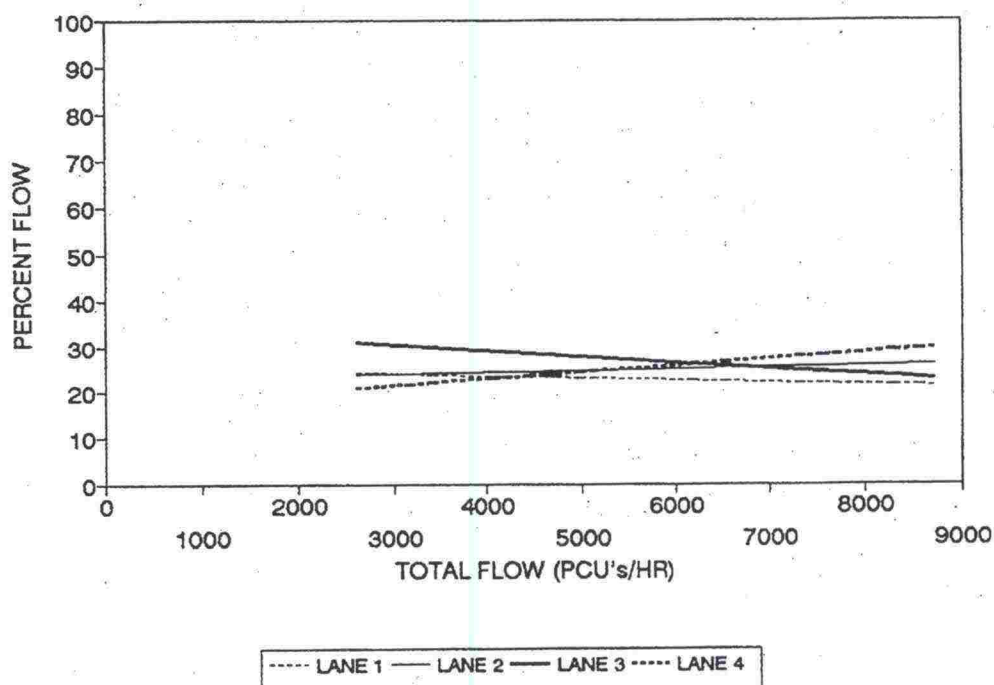
Pienillä liikennemäärillä Caldecott-tunnelin luona sijaitsevan mittauspisteen molemmilla kaistoilla oli suunnilleen saman verran liikennettä, mutta kapasiteetin rajoilla oltaessa ohituskaistan osuus kasvoi 55 prosenttiin. (Wemple ym. 1991.)

Moottoriteiden I-680 ja I-880 kaistamallia varten havaintoihin sovitettiin regressiosuora siten, että henkilöautoyksiköiden kokonaismäärä oli selittävänä muuttujana ja kaistoittaiset osuudet selitettävänä muuttujina. Regressiosuorien selityksasteet olivat melko hyviä lukuun ottamatta moottoritien I-880 kaistoja 1 ja 2 (I-680: 1 = 0,69, 2 = 0,68 ja 3 = 0,88; I-880: 1 = 0,23, 2 = 0,16, 3 = 0,59 ja 4 = 0,65). (Wemple ym. 1991.)

Moottoriteiden I-680 ja I-880 kaistajakaumat on esitetty kuvissa 3 ja 4. Jos käyttäjä tuntee moottoritien kokonaisliikennemäärän, hän voi kaistamallin avulla selvittää henkilöautoyksiköiden kaistajakauman. Näiden molempien kohteiden kaistajakaumadata vahvistaa oletuksen, että suurilla liikennemäärillä ohituskaistan osuus liikenteestä on suurin ja reunakaistan pienin. Nelikaistaisella moottoritieellä I-880 kaistan 2 osuus liikenteestä oli suhteellisen vakio eri liikennemäärillä, mutta kaistan 3 osuus oli laskeva. (Wemple ym. 1991.)



Kuva 3. Moottoritien I-680 kaistajakauma liikennemäärän (hay/h) funktiona (Wemple ym. 1991).



Kuva 4. Moottoritien I-880 kaistajakauma liikennemäärän (hay/h) funktiona (Wemple ym. 1991).

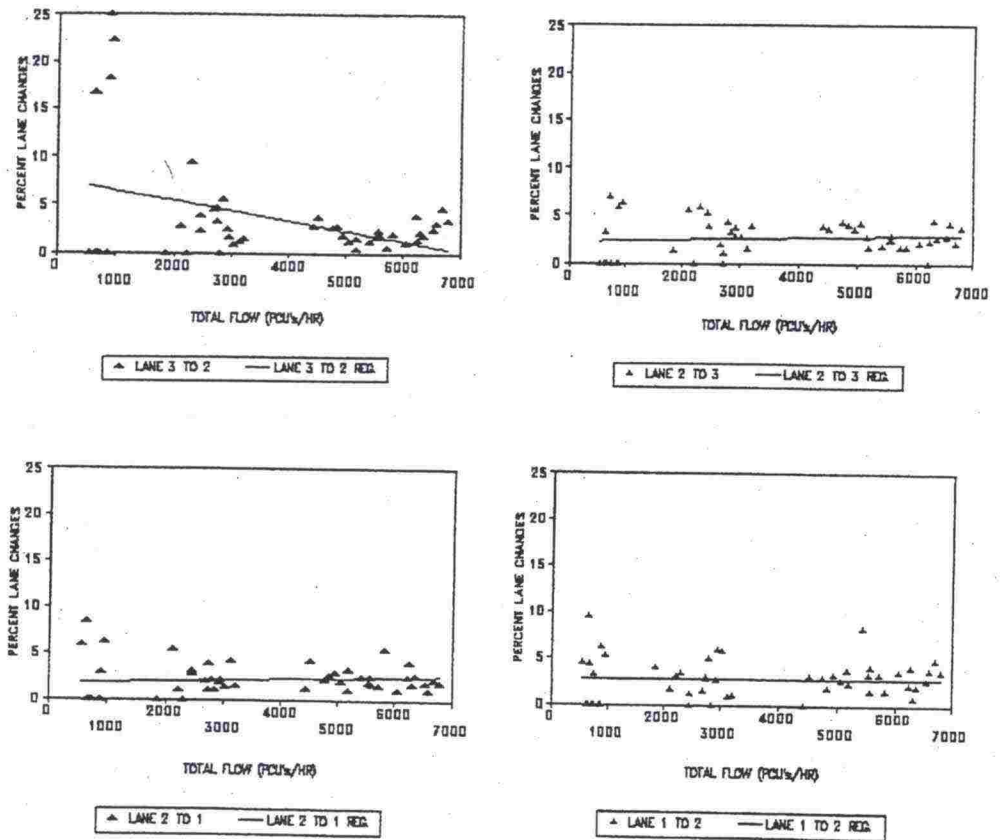
2.3 Kaistanvaihtojen määrä

Moottoriteillä I-680 ja I-880 selvitetiin kaistanvaihtojen määrä liikennemäärän funktiona. Koska Caldecott-tunnelin data kerättiin videoimisen sijasta silmukoilla, tästä kohteesta ei voitu selvittää kaistanvaihtojen määriä. (Wemple ym. 1991.)

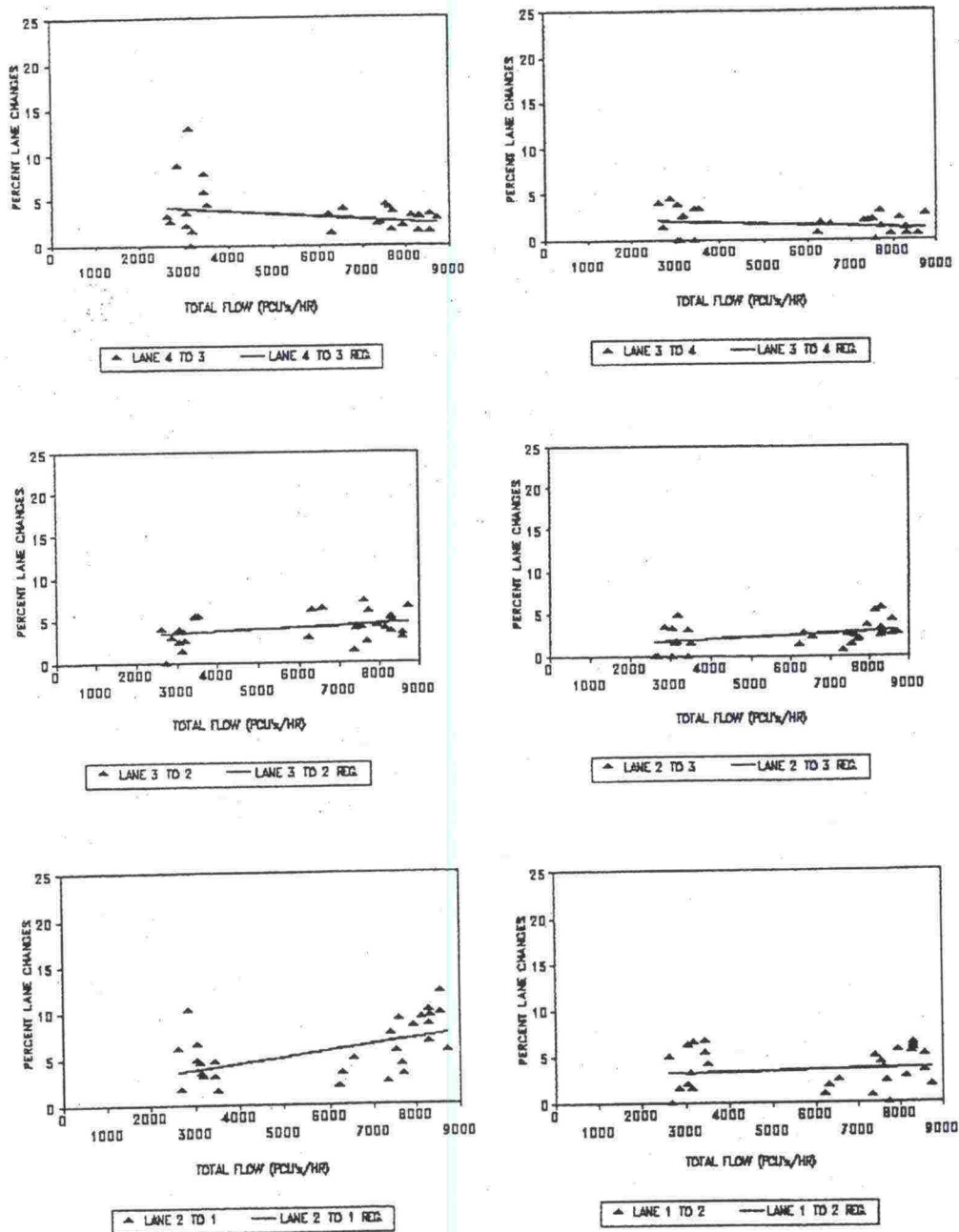
Tietyllä 600 jalan (noin 183 metrin) matkalla laskettiin kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen määrät viiden minuutin jaksoissa lähtö- ja määräkaistan mukaan jaoteltuina. Moottoriteillä I-680 oli neljä kaistanvaihtomahdollisuutta: kaistalta 3 kaistalle 2, kaistalta 2 kaistalle 1 ja päinvastoin. Moottoriteillä I-880 mahdollisuuksia on kuusi: kaistalta 4 kaistalle 3, kaistalta 3 kaistalle 2, kaistalta 2 kaistalle 1 ja päinvastoin. (Wemple ym. 1991.)

Kaistanvaihtomäärät jaettiin sen kaistan, jolta ajoneuvot poistuivat, kyseisen viisiminuuttisen liikennemäärällä (hay/h). Näin saatiin niiden ajoneuvojen osuus, jotka vaihtoivat kyseiseltä kaistalta pois. Tämä prosenttiosuus esitettiin koko moottoritien yhden suunnan liikennemäärän funktiona. (Wemple ym. 1991.)

Tehtyihin havaintoihin sovitettiin regressiosuorat. Kuva 5 esittää tulokset moottoriteiltä I-680 ja kuva 6 moottoriteiltä I-880. Päinvastoin kuin kaistajakauman kohdalla, suorien selitysasteet olivat hyvin alhaisia. Tähän on kuitenkin syynä pikemminkin kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuuden satunnaisuus kuin laskeutuminen. (Wemple 1991.)



Kuva 5. Kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuus liikennemäärän funktiona moottoritieltä I-680 (Wemple ym. 1991).



Kuva 6. Kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuus liikennemäärän funktiona moottoritieltä I-880 (Wemple ym. 1991).

2.4 Mallin käyttösovellus

Jos halutaan määrittää kaistanvaihtojen määrä tietyltä kaistalta tietylle kaistalle, tarvitaan sekä ajoneuvojen kaistajakauma että kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuus liikennemäärän funktiona. Jos kokonaisliikennemäärä on esimerkiksi 3 000 hay/h, kuvasta 3 nähdään, että 40 prosenttia moottoritien I-680 ajoneuvoista on kaistalla 2. Kuva 5 puolestaan kertoo sen, että noin kaksi prosenttia kaistan 2 ajoneuvoista vaihtaa kaistalle 1. Näin saadaan kaistalta 2 kaistalle 1 vaihtavien ajoneuvojen määräksi $0,4 \cdot 3\,000 \cdot 0,02 = 24$ ajoneuvoa tunnissa kuljakin 600 jalan mittaisella matkalla. (Wemple 1991.)

Kuvan 5 perusteella voidaan todeta, että kolmikaistaisella moottoriteillä kaistaa vaihtavien ajoneuvojen osuus on 600 jalan mittaisella matkalla – kaistalta 3 kaistalle 2 vaihtamista lukuun ottamatta – lähes koko ajan, liikennemäärästä riippumatta alle viisi prosenttia keskiarvona kahdesta kolmeen prosenttia. (Wemple 1991.)

Kuvan 6 perusteella taas voidaan sanoa, että lukuun ottamatta kaistalta 2 kaistalle 1 tapahtuvaa kaistanvaihtoa kaistaa vaihtavien ajoneuvojen osuus oli 600 jalan mittaisella matkalla lähes aina alle neljä prosenttia, keskiarvona kahdesta neljään prosenttia. Niiden ajoneuvojen osuus, jotka vaihtoivat kaistalta 2 kaistalle 1, oli hieman suurempi kuin päinvastoin kaistaa vaihtavien ja osuus kasvoi liikennemäärän kasvaessa. Kaistamallia varten määriteltiin, että suorilla moottoritieosuuksilla kaistaa vaihtavien osuus kutakin 600 jalan mittaista tien osaa kohti on alle kuusi prosenttia. (Wemple ym. 1991.)

3 KULJETTAJAN KÄYTTÄYTYMISEEN PERUSTUVA MIKROSKOOPPINEN KAISTANVAIHTOMALLI

Australialaiset Young, Taylor ja Gipps (1989) ovat kehittäneet kaistanvaihdolle kuljettajan käyttäytymiseen perustuvan mallin. Heidän mallissaan kuljettajan käyttäytymiselle on kolme vaihtoehtoa. Kuljettajan käyttäytyminen määräytyy sen etäisyyden mukaan, jonka jälkeen hän on kääntymässä pois väylältä. Jos kääntymiseen on vielä aikaa, se ei vaikuta kaistanvaihtopäätökseen ja kuljettaja keskittyy säilyttämään tavoitenopeutensa. Kun kääntymisetäisyys on määritellyllä keskietäisyydellä, kuljettajat alkavat hylätä mahdollisuuksia parantaa nopeuttaan, jos tämä vaatii kaistanvaihtoja "väärään" suuntaan. Kun kuljettaja lähestyy kohtaa, josta hänen on käännettävä, hän yrittää pysyä kaistalla, joka on oikean reitin kannalta paras. Näin kuljettaja pyrkii siihen, että hän on kääntymisajankohdan lähestyessä oikealla kaistalla valmiina kääntymään. Kun kaistanvaihdon hetki sitten koittaa, kuljettaja on kiinnostunut ainoastaan oikeasta kaistasta eikä nopeudella ole mitään merkitystä. Käyttäytymisen muuttuminen on liukuvaa eikä mallilla ole jäykkiä etäisyyksirajoja. (Young ym. 1989.)

Youngin, Taylorin ja Gippsin malli kaistanvaihtopäätöksistä on tehty käytettäväksi yhdessä ajoneuvonseurantamallin kanssa. Seurantamallissa on määritelty rajat jarrutuksen voimakkuudelle, kun tarkoituksena on saavuttaa turvallinen nopeus suhteessa edellä ajavaan. Kaistanvaihtomallissa "turvallisen nopeuden" ylärajaksi asetetaan tavoitenopeus. Näin vältytään siltä, että hyvin kaukana olevat ajoneuvot tai muut kohteet vaikuttaisivat kuljettajan päätökseen. Hidastuvuuden maksimi (-2 m/s^2) ja edellä mainittu raja rajoittavat paikallaan olevien objektien vaikutuksen 100 ja 200 metrin välille kuljettajan tavoitenopeudesta riippuen. (Young ym. 1989.)

Kaistanvaihtomallin mukaan kuljettaja voi vaihdella voimakkuutta, jolla hän kaistanvaihdon takia joutuu jarruttamaan. Jarrutuksen voimakkuus riippuu oikean kaistan saavuttamisen kiireellisyydestä. Jos kuljettaja on valmistautunut jarruttamaan voimakkaammin, malli antaa hänen vaihtaa kaistaa pienempiin aikaväleihin. (Young ym. 1989.)

Olosuhteet, jotka johtavat päätökseen vaihtaa kaistaa vasemmalle tai oikealle tai pysyä samalla kaistalla, muodostavat kolme tyhjentävää ja toisensa poissulkevaa aluetta moniulotteisessa avaruudessa, joka määrittää liikenneolosuhteet kyseisen ajoneuvon ympärillä. Muuttujien suuren määrän takia näiden alueiden väliset rajat ovat estimaatteja pinnoista, jotka kuvaavat erilaisia päätöskriteereitä. Teoriassa päätöksentekoa tukemaan voitaisiin tehdä 2^n kohdan lista, jossa kohdat vastaisivat $n:n$ eri kriteerin hyväksymistä tai hylkäämistä. Käytännössä tällaisessa listassa olisi yli miljoona ruutua ja lopputuloksena voisi olla mahdottomia yhdistelmiä. Vaihtoehtoinen lähestymistapa on luoda päätöspuu, joka minimoi tehtävien päätösten määrän esittämällä tärkeät kysymykset ensin. (Young ym. 1989.)

Pääkohdat, joita malli käsittelee tehdessään päätöstä, ovat

1. *Kaistanvalinta.* Malli valitsee kullekin ajoneuville halutun kaistan ja kohdekaistan nykyisen kaistan funktiona. Kohdekaista on siis se kaista, jolle kuljet-

taja haluaa lopulta päätyä. Haluttu kaista on nykyisestä kaistasta nähden siihen suuntaan, missä kohdekaista sijaitsee. Kun kohdekaista on saavutettu, on haluttu kaista sama kuin kohdekaista. Jos kohdekaista osoittautuu mahdottomaksi tai epäedulliseksi saavuttaa, määritellään nykyisen kaistan päinvastaisella puolella oleva kaista uudeksi kohdekaistaksi.

2. *Mahdollisuus vaihtaa kaistaa.* Ensimmäinen kysymys, jonka simuloitu kuljettaja kohtaa, on se, onko kohdekaistalle vaihtaminen mahdollista. Tämä kysymys eliminoi suurimman osan potentiaalisista kaistanvaihtotilanteista. Jotta kohdekaistalle vaihtaminen olisi mahdollista, tiettyjen ehtojen tulee täytyä: kohdekaistan pitää olla liikenteen käytettävissä ja sen tulee olla tyhjänä fyysisistä esteistä ja muista ajoneuvoista. Myös liian voimakas jarrutustarve on esteenä kaistanvaihdolle.
3. *Kuljettajan käyttäytyminen aiottua kääntymistä lähestyttäessä.* Varmistuttuaan siitä, ettei kaistanvaihtamiselle ole fyysisiä esteitä, malli jatkaa kysymyksellä, onko ajoneuvo lähellä aiottua kääntymispaikkaa. Jos vastaus on myöntävä, kuljettajat vaihtavat halutulle kaistalle, mikäli he voivat tehdä sen turvallisesti ja mikäli kaista ei ole tukossa ennen kääntymistä. Ainoastaan siinä tapauksessa, että sekä nykyinen että haluttu kaista ovat molemmat tukossa ennen liittymää, kuljettaja harkitsee siirtymistä jollekin muulle kaistalle.

“Lähellä” on suhteellinen käsite ja lisäksi sidonnainen alueellisiin eroihin, joita liikennevirralla on. Koska käsitteiden “lähellä” ja “kaukana” välinen kytkös kuitenkin aiheuttaa suhteellisen pientä vaihtelua käyttäytymiseen, simuloinnin tulos ei riipu merkittävästi kyseisiä käsitteitä määrittelevistä arvoista. Kokeellisesti on havaittu, että tyydyttävä määritelmä “lähellä” olemiselle on kymmenen sekunnin matka kuljettajan tavoitenopeudella.

4. *Kaistanvaihtamisen kiireellisyys.* Kun kuljettaja, joka on väärällä kaistalla, lähestyy suunniteltua kääntymiskohtaa, kiire vaihtaa kaistaa kasvaa. Kiireentunne heijastuu kuljettajan käyttäytymiseen halukkuutena jarruttaa voimakkaammin ja hyväksyä pienempiä välejä. Jarrutuksen voimakkuus on kaksinkertainen siinä pisteessä, jossa aiotaan kääntyä, verrattuna siihen pisteeseen, kun tullaan “lähelle”.
5. *Joukkoliikennekaistat ja -ajoneuvot.* Usein osa kaistoista on varattu ainoastaan joukkoliikenteen ja muiden monimatrustaja-ajoneuvojen käyttöön. Sekä taso, jolle muun kuin joukkoliikenteen palvelutason pitää laskea ennen kuin joukkoliikennekaistan käyttö on sallittua, että lainkuuliaisuus vaihtelevat alueittain. Tämän takia mallin yksinkertaistamiseksi “joukkoliikenneajoneuvoksi” on määritelty kaikki ne ajoneuvot, jotka kokevat oikeutukseksi (lailliseksi tai laittomaksi) ajaa joukkoliikennekaistaa.
6. *Ei-joukkoliikenteen päästäminen joukkoliikennekaistalle.* Vaikka muu kuin joukkoliikenne ei normaalisti saa ajaa joukkoliikennekaistalla, este omalla kaistalla on hyväksytty poikkeukseksi tähän sääntöön. Mallissa päästiin tyydyttäviin tuloksiin, kun kuljettaja saattoi vaihtaa joukkoliikennekaistalle, jos hän havaitsi esteen tavoitenopeudellaan korkeintaan kymmenen sekunnin aikavälin päässä.

7. *Ei-joukkoliikenneajoneuvon poistuminen joukkoliikennekaistalta.* Koska malli sallii myös muun kuin joukkoliikenteen tulemisen joukkoliikennekaistalle esteen ohittamiseksi, mallin täytyy sisältää logiikka myös sille, miten ajoneuvot poistuvat joukkoliikennekaistalta ohitettuaan esteen. Näiden ajoneuvojen osalta malli tarkastelee kohdekaistaa havaitakseen, onko se jo vapaa esteestä. Tämä joukkoliikennekaistalta poistumissääntö ei koske sellaisia ajoneuvoja, joiden aiottu kääntymispaikka on lähellä. Tämä johtuu kriteerin sijainnista päätöspuussa.
8. *Kuljettajan käyttäytyminen keskietäisyydellä.* Kun ajoneuvo on "kaukana" aiotusta kääntymispaikasta, kääntymissuunnalla ei ole vaikutusta ajoneuvon käyttäytymiseen. Mutta kun aiottu kääntymispaikka ei ole "lähellä" eikä "kaukana", aiottu kääntymissuunta alkaa vaikuttaa kuljettajan käyttäytymiseen eikä kuljettaja enää suorita kaikkia mahdollisia kaistanvaihtoja. Kysymys siitä, minkä etäisyyden voi laskea olevan "kaukana", on melko epämääräinen. Australialaisissa olosuhteissa mallilla tehty koe osoitti, että ne ajoneuvot, jotka ovat yhä vähintään 50 sekunnin matkan päässä aiotusta kääntymispaikastaan, voidaan tulkita "kaukana" oleviksi.

Kuljettajan tarvitsee myös tehdä subjektiivinen päätös kaistan vaihtamisesta siihen suuntaan, johon hän on kääntymässä. Ajoneuvo, joka on vasemmalla kaistalla (Huom. Australiassa on vasemman puoleinen liikenne) ja aikoo kääntyä vasemmalle 800 metrin päästä, on halukas vaihtamaan kaistaa oikealle ohittaakseen jonkin hitaan raskaan ajoneuvon. Kyseisessä tapauksessa toinen kaista vasemmalta on kuljettajalle yhtä mieluisa kuin vasen kaista, vaikka se ei olekaan tavoitteena oleva kaista. Tästä johtuen, kun aiottu kääntyminen tulee keskietäisyydelle, malli luokittelee kohdekaistan yhtä mieleiseksi kuin halutun kaistan, jos nykyinen kaista on joko reunakaista tai keskikaista.

9. *Nykyisen kaistan ja kohdekaistan suhteelliset edut.* Jos mikään edellä mainituista tekijöistä ei ole saanut kuljettajaa tekemään päätöstä siitä, pitäisikö hänen vaihtaa kaistaa vai ei, hän on vapaa tutkimaan nykyisen ja kohdekaistan suhteellisia etuja. Ensin kuljettaja tarkistaa kummankin kaistan mahdolliset esteet ja valitsee sitten sen kaistan, jolla on pienempi vaikutus hänelle turvalliseen nopeuteen.
10. *Raskaiden ajoneuvojen vaikutus.* Jos kaistalla ei ole kuljettajan näköpiirissä esteitä, kuljettaja ei tee päätöstä kaistan vaihtamisesta, vaan ryhtyy etsimään katseellaan raskaita ajoneuvoja. Kuljettaja hakee kultakin kaistalta raskaan ajoneuvon ja käsittelee tätä johtavana ajoneuvona tavallisen ajoneuvon seuraamistilanteen tapaan. Kuljettaja valitsee sen kaistan, joka sallii hänelle suurimman nopeuden. Tämä menetelmä vähentää samaa ajonopeutta ajavien raskaiden ajoneuvojen vaikutusta.
11. *Lähestyvien ajoneuvojen vaikutus.* Jos raskaita ajoneuvoja ei ole näköpiirissä, kuljettaja arvioi lopulta ajonopeutta kullakin kaistalla ja vaihtaa kaistaa, jos saavuttaa tällä riittävän suuren edun. Edun "riittävyys" saattaa riippua nykyisestä kaistasta, kohdekaistasta ja ajoneuvotyypistä ja saattaa olla joissakin tapauksissa negatiivinen. Valinta saattaa aiheuttaa sen, että kuljettaja vaihtaa

ohituksen jälkeen takaisin kohti väylän reunakaistaa tai että kuljettajat välttävät väylän molempia äärikaistoja.

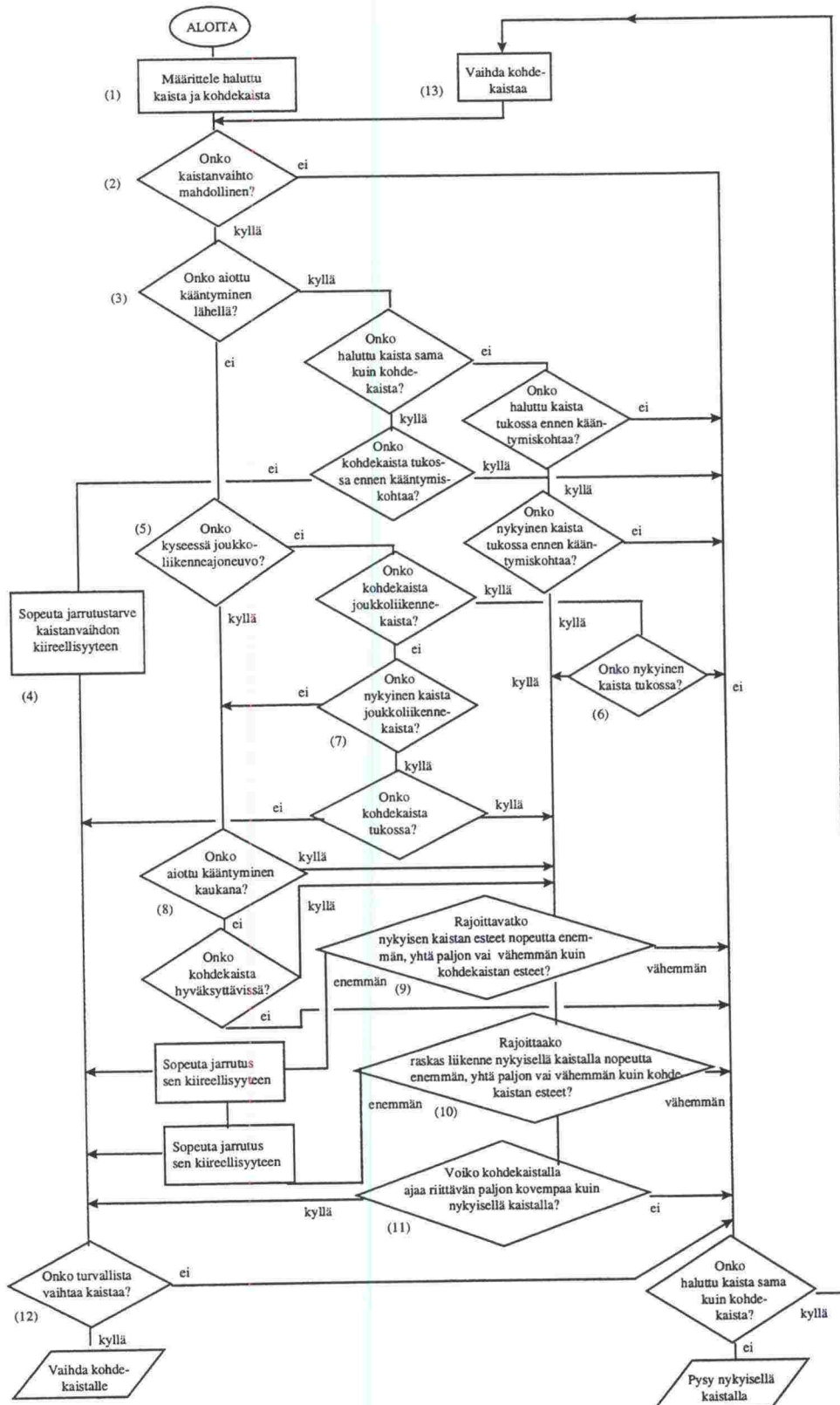
Riittävä etu vaihtaa kaistaa vasemmalle on erään mallin mukaan mahdollisuus nostaa nopeutta 1 m/s tai 3,6 km/h. Sen varmistamiseksi, että ajoneuvo ohituksen jälkeen palaa oikealle, riittävä etu vaihtaa kaistaa oikealle on nopeuden lasku 0,1 m/s.

12. *Turvallisuus.* Kun kuljettaja on päättänyt vaihtaa kaistaa, ainoa jäljelle jäävä kysymys on, voidaanko kaistanvaihto suorittaa turvallisesti. Tämä kysymys on jätetty viimeiseksi, koska riittävän turvallisuuden taso riippuu syystä vaihtaa kaistaa ja kaistan vaihdon kiireellisyydestä.

13. *Kohdekaistan vaihtaminen.* Jos kuljettaja on hylännyt ajatuksen vaihtaa halutulle kaistalle, malli ryhtyy pohtimaan kaistanvaihtoa päinvastaiseen suuntaan ja muuttaa vastaavasti kohdekaistaa. (Young ym. 1989.)

Tässä esitelty malli on oikeastaan rakenne, joka kytkee toisiinsa päätökset, jotka kuljettajan täytyy tehdä ennen kaistan vaihtamista (*kuva 7*). Rakenne on suunniteltu siten, että simuloitujen kuljettajat toimivat loogisesti kohdatessaan oikealle liikenteelle tavanomaisia tilanteita. Tarkat matemaattiset esitystavat mallin päätöksentekoon sisältyvistä kysymyksistä eivät ole mallin kannalta olennaisia, ainoastaan päätöksentekojärjestys. Päätös vaihtaa kaistaa riippuu edellä mainittujen kriteerien yhdistelmästä. Osa kriteereistä on alisteisia ja niitä käytetään vain tietyissä olosuhteissa. Hierarkian tehtävänä on esittää kriteerit sellaisessa järjestyksessä, joka yksinkertaistaa päätöksentekoprosessia. Jos rakenne on väärä ja kysymykset esitetään väärässä järjestyksessä, simuloitujen ajoneuvojen kaistanvaihtokäyttäytyminen eroaa todellisesta. (Young ym. 1989.)

Tämä kaistanvaihtomalli toimii luotettavasti simuloitaessa autoilijoiden käyttäytymistä Australian olosuhteissa. Muilla maantieteellisillä alueilla parametrit saattavat kaivata pientä korjausta, mutta esitetty päätöksentekoprosessi on toistaiseksi osoittautunut erittäin toimivaksi hyvin erityyppisissä olosuhteissa. (Young ym. 1989.)



Kuva 7. Vuokaavio Youngin, Taylorin ja Gippsin kaistanvaihtomallin päätöksentekohierarkiasta (Young ym. 1989).

4 Aikavälin hyväksymiseen perustuva mikrokoop- pinen kaistanvaihtomalli

4.1 Yleistä

Yhdysvaltalainen Levinin kaistanvaihtomalli käyttää aikavälin hyväksymiskäsi-
tettä arvioidessaan todennäköisyyttä, että ajoneuvo vaihtaa kaistaa tietyn etäi-
syyden sisällä erilaisissa liikenneolosuhteissa. Tällaista mallia voidaan käyttää
määrittämään moottoriteillä olevien suunta- ja informaatiomerkkien tehokkuus.
(Levin 1976.)

4.2 Kaistanvaihtoprosessi

Ajoneuvo ajaa keskimääräisellä pistenopeudella U_i sellaista kaistaa i pitkin, jon-
ka vieressä kaistalla $i+1$ nopeuksien aikajakautaman odotusarvo on U_{i+1} (tässä
tapauksessa $U_{i+1} > U_i$). Kaistan i aikavälien todennäköisyyksien tiheysfunktioita
on merkitty $\theta_i(t)$:llä. (Levin 1976.)

Tietyllä ajanhetkellä t ilmenee tarve vaihtaa kaistaa (tässä tapauksessa vasem-
manpuoleiselle kaistalle) ja kaistanvaihtoprosessi alkaa. Kaistanvaihtoa haluava
kuljettaja katsoo haluamalleen kaistalle, kaistalle $i+1$, ja käy mielessään läpi seu-
raavanlaiset asiat:

1. edessä hitaammin liikkuvan ajoneuvon nopeus kaistalla $i+1$
2. johtavan ajoneuvon suhteellinen sijainti kaistalla $i+1$
3. oma nopeus ja toimintatapa
4. omat aikavälin hyväksymiseen liittyvät ominaisuudet.

Hetkellä $t+T$, missä T on kuljettajan päätöksentekoaika, kuljettaja joko hyväksyy
aikavälin ja vaihtaa kaistaa tai hylkää aikavälin ja jää odottamaan pidempää ai-
kaväliä. Jos kuljettaja päättää hyväksyä aikavälin, kaistanvaihtotapahtuma alkaa
heti, kun se voidaan suorittaa turvallisesti. Jos aikaväli hylätään, kuljettaja vä-
hentää nopeuttaan, arvioi seuraavan aikavälin suuruuden ja tekee tälle hyväk-
symis- tai hylkäämispäätöksen. (Levin 1976.)

Kaistanvaihtoprosessi voidaan suorittaa joko kokonaan tai osittain. Prosessi ta-
pahtuu kokonaan joko silloin,

1. kun aikaväli, joka kohdataan heti, kun tarve vaihtaa kaistaa ilmenee, hylätään,
koska se on lyhyempi kuin kuljettajan kriittinen aikaväli, tai
2. kun kohdattu aikaväli ylittää kriittisen pituuden, mutta kohdekaistalla edessä
ajava hitaampi ajoneuvo on niin lähellä, ettei kaistanvaihtoa voida suorittaa
turvallisesti ja tästä syystä aikaväli (kaistanvaihtomahdollisuus) täytyy hylätä.
(Levin 1976.)

Kaistanvaihtoprosessi koostuu seuraavista kolmesta vaiheesta:

1. Odotetaan riittävän pitkää aikaväliä.

2. Liikutaan ajoneuvolla siten, että sen sijainti suhteessa hyväksyttävään aikaväliin on sellainen, että kaistanvaihto voidaan toteuttaa.
3. Vaihdetaan kaistaa. (Levin 1976.)

Kaistanvaihtoprosessi tapahtuu osittaisesti silloin, kun ensimmäinen kohdattu aikaväli hyväksytään. Prosessi tapahtuu jommallakummalla seuraavista tavoista:

- Vaihtoehto A. Ajoneuvon sijaintia suhteessa hyväksytyyn aikaväliin täytyy muuttaa, jotta voidaan varmistua kaistanvaihdon turvallisuudesta.
- Vaihtoehto B. Suhteellinen sijainti on heti oikea ja kaistanvaihto voidaan toteuttaa välittömästi. (Levin 1976.)

Molemmat näistä tapauksista koostuvat yllä kuvatuista kaistanvaihtoprosessin vaiheista 2 ja 3. Kullakin vaiheella on kaistanvaihdon eri muodoille omat etäisyyden jakaumafunktionensa. Nämä jakaumafunktiot ovat itsessään liikenneolosuhteiden funktioita sujuvuudelle. Merkintä $f_i(x_i, V, U)$ tarkoittaa sen etäisyyden jakaumafunktiota, joka tarvitaan täyttämään vaihe i liikennemäärän ollessa \bar{V} ja nopeusolosuhteiden \bar{U} . \bar{V} ja \bar{U} ovat vektoreita, jotka esittävät liikennemäärää ja nopeuksien aikajakautaman odotusarvoa kaistoittain yhdellä moottoritieosuudella prosessin aikana. (Levin 1976.)

Mikä tahansa funktio, joka kuvaa jotakin edellä esitetyn prosessin vaihetta, on riippumaton muita vaiheita esittävistä funktioista annetuissa nopeus- ja liikennemääräolosuhteissa. Erilaisten kaistanvaihtoprosessien suorittamiseksi tarvittavia etäisyyden jakaumafunktioita pidetään yksittäisten prosessin vaihetta kuvaavien jakaumafunktioiden konvoluutiona. Etäisyyden jakaumafunktiot voidaan esittää koko prosessille

$$f_F(x, \bar{V}, \bar{U}) = f_{1F}(x_1, \bar{V}, \bar{U}) \cdot f_{2F}(x_2, \bar{V}, \bar{U}) \cdot f_{3F}(x_3, \bar{V}, \bar{U}) \quad (1)$$

osittaiselle prosessille, vaihtoehto A

$$f_A(x, \bar{V}, \bar{U}) = f_{2A}(x_2, \bar{V}, \bar{U}) \cdot f_3(x_3, \bar{V}, \bar{U}) \quad (2)$$

osittaiselle prosessille, vaihtoehto B

$$f_B(x, \bar{V}, \bar{U}) = f_{2B}(x_2, \bar{V}, \bar{U}) \cdot f_3(x_3, \bar{V}, \bar{U}) \quad (3)$$

(Levin 1976.)

Osittaisjakauma, joka esittää eri kaistanvaihtoprosessien yhdistelmää tietyissä liikennemäärä- ja nopeusolosuhteissa, voidaan esittää

$$f(x, \bar{V}, \bar{U}) = a_F f_F(x, \bar{V}, \bar{U}) \cdot a_A f_A(x, \bar{V}, \bar{U}) \cdot a_B f_B(x, \bar{V}, \bar{U}) \quad (4)$$

jossa a_F , a_A ja a_B ovat prosessin kolmen tyyppin esiintymistodennäköisyydet. (Levin 1976.)

4.3 Hyväksytyn aikavälin rakenne

Se osa alkuperäistä kaistaa, joka muodostaa hyväksytyn aikavälin, voidaan jakaa kolmeen osaan. Osista ensimmäinen on se, jossa kuljettaja ei voi suorittaa kaistanvaihtoa, koska se voisi johtaa konfliktiin kohdekaistalla edellä ajavan ajoneuvon kanssa. Tämän alueen koko on eteenpäin oleva turvaväli. Jos kaistanvaihdon tarve ilmenee hetkellä t ja ajoneuvo on edellä kuvatulla alueella, kuljettaja voi hetkellä $t+T$ olla joko tämän alueen sisä- tai ulkopuolella. Tämä on riippuvainen tietenkin

1. kuljettajan päätöksentekoaikasta T
2. suhteellisesta nopeuserosta $U_{i+1} - U_i$
3. siitä, missä kohdassa aluetta kaistanvaihtotarve ilmenee.

Jos kuljettaja on hetkellä $t+T$ yllä kuvatun alueen ulkopuolella, hän toimii vaihtoehdon B mukaisesti osittaisessa kaistanvaihtoprosessissa, koska hän voi aloittaa kaistanvaihtotapahtuman ajanhetkellä $t+T$. Sitä vastoin, jos kuljettaja on tällöin yhä alueella, hän noudattaa osittaisessa kaistanvaihtoprosessissa vaihtoehtoa A siten, että hänen täytyy päästä alueen ulkopuolelle ennen kuin voi aloittaa kaistan vaihtamisen. (Levin 1976.)

Jos kuljettajan etäisyys kohdekaistaa edellä ajavaan ajoneuvoon päätösaikan T aikana on suurempi kuin yllä esitelty alue, kaistanvaihtoprosessi tapahtuu joko kokonaan tai vaihtoehdon B mukaisesti osittain. Vastaavasti, jos alueen koko on suurempi kuin päätöksenteon aikana kuljettu matka, kaistanvaihtoprosessi voi tapahtua millä tahansa kolmesta vaihtoehdosta. (Levin 1976.)

Toinen alue on sellainen, jolla kuljettaja päättää hylätä hyväksyttävissä olevan aikavälin, koska kaistanvaihdon seurauksena saattaisi olla konflikti kohdekaistaa edellä hitaammin ajavan ajoneuvon kanssa. Kuljettaja suorittaa tässä tapauksessa kaistanvaihtoprosessin kokonaan. Tämä alue on kombinaatio kahdesta ala-alueesta: päätöksenteon aikana kuljetusta matkasta ja turvavälistä. (Levin 1976.)

Kolmannen alueen koko on funktio kahden edellisen alueen ko'oista. Tällä alueella kaistanvaihtoprosessi tapahtuu vaihtoehdon B mukaisesti. (Levin 1976.)

4.4 Kaistanvaihtoprosessin vaiheet

Kaistanvaihtoprosessin vaihe 1 (odotetaan hyväksyttävää aikaväliä) tapahtuu silloin, kun kaistanvaihtoa yrittävä kuljettaja hylkää ensimmäisen aikavälin kohdekaistalla sen jälkeen, kun tarve vaihtaa kaistaa on ilmennyt. Kuljettaja hylkää kaistanvaihtomahdollisuuden, koska aikaväli on joko

1. pienempi kuin kuljettajan tämän hetkinen kriittinen aikaväli T_i tai
2. suurempi kuin kuljettajan kriittinen aikaväli, mutta ajoneuvon sijainti suhteessa aikaväliin on sellainen, että kaistan vaihtaminen saattaa olla vaarallista. (Levin 1976.)

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun kuljettaja on hylännyt aikavälin, hänen oletetaan muuttavan nopeuttaan ja asettavan kriittiselle aikavälille uuden arvon

T_2 . Etäisyyden jakaumafunktio voidaan johtaa todennäköisyysoletuksista hylätä mikä tahansa aikavälien sarja, hylätyn aikavälin keskimääräisestä pituudesta sekä nopeuksista alkuperäisellä kaistalla ja kohdekaistalla. (Levin 1976.)

Kaistanvaihtoprosessin vaihe 2 (ajoneuvon sijainti suhteessa aikaväliin sellaiseksi, että kaistanvaihto voidaan toteuttaa) pitää sisällään kaistanvaihtoa yrittävän ajoneuvon liikkeen hyväksytyin aikavälin sisällä ennen kuin kaistanvaihto suoritetaan. Niissä tapauksissa, joissa turvaväli on yhtä suuri tai suurempi kuin päätöksenteon aikana kuljettu matka, koko prosessin etäisyysfunktio on yksipisteinen funktio, joka on riippuvainen parametreista U_i ja U_{i+1} sekä turvavälin suuruudesta. Osittaisen kaistanvaihtoprosessin vaihtoehdossa A etäisyysfunktio on parametreista U_i , U_{i+1} ja T sekä turvavälin suuruudesta riippuvainen vakio. Vaihtoehdossa B etäisyysfunktio on yksipisteinen funktio, joka on riippuvainen parametreista U_i ja T . Siinä tapauksessa, että päätöksenteon aikana kuljettu matka on suurempi kuin turvaväli, koko prosessin etäisyysfunktio voidaan kuvata yksipisteisenä funktiona, joka on riippuvainen parametreista U_i , U_{i+1} ja T , turvavälin suuruudesta ja tässä vaiheessa käytetyn ajan todennäköisyydestä. (Levin 1976.)

Kaistanvaihtoprosessin vaihe 3 on itse kaistanvaihtotapahtuma, joka määritellään etäisyytenä, jonka ajoneuvo tarvitsee liikkuaan suoraan eteenpäin -asennosta nykyisellä kaistalla suoraan eteenpäin -asentoon kohdekaistalla. (Levin 1976.)

Erlaisiin liikennemäärä- ja nopeushavaintoihin perustuva analyysi on osoittanut, että ylläkuvatut etäisyydet noudattavat Erlang-jakaumaa. Kunkin prosessityypin esiintymistodennäköisyydet määriteltiin useille eri liikennemäärille ja nopeuksille perustuen kriittisen aikavälin ominaisuuksiin ja hyväksytyin aikavälin rakentamiseen.

5 DYNAAMINEN DISKREETTI KAISTANVALINTAMALLI MOOTTORITEILLE

5.1 Yleistä

Yhdysvaltalaisessa Ahmedin ym. (1996) tutkimuksessa kuljettajien kaistanvaihtokäyttäytyminen moottoriteillä on mallinnettu systemaattisesti. Kaistanvaihtomalli on dynaaminen diskreetti valintamalli, joka ottaa huomioon kuljettajapopulaation heterogeenisuuden ja hylättyjen aikavälien välisen riippuvaisuuden. Malli on herkkä suunnitteluparametreille ja muille tekijöille, jotka vaikuttavat kuljettajan käyttäytymiseen. (Ahmed ym. 1996.)

Ehdotettu kaistanvaihtomalli pitää kokonaisuudessaan sisällään kaistanvaihdon päätöksentekoprosessin dynamiikan. Se mallintaa taustalla olevan päätöksentekoprosessin piilevän rakenteen ja pitää sisällään kuljettajan käyttäytymisen stokastiikan. Mallisysteemi sallii kaistanvaihdon harkitsemiseen, kaistanvalintaan ja aikavälin hyväksymismalliin liittyvien parametrien samanaikaisen estimoinnin. Aikavälin hyväksymismalli pitää sisällään heterogeenisuuden ja tilariippuvaisuuden ja ottaa huomioon moottoritien liikennevirtaan liittymisessä aikavälien suhteessa sekä edellä että takana ajavaan tärkeyden. (Ahmed ym. 1996.)

5.2 Malli

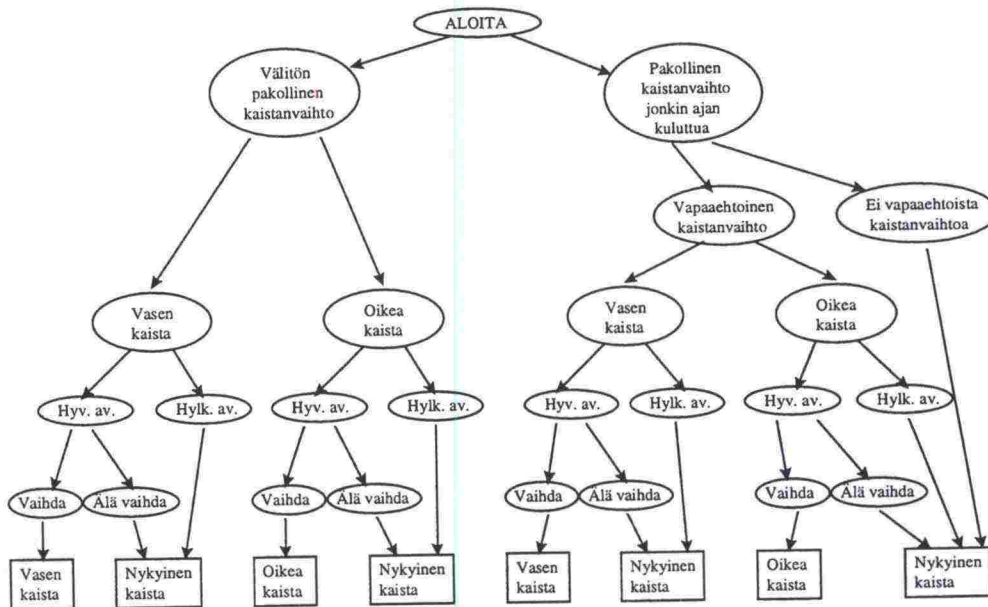
Kaistanvaihdon voidaan katsoa koostuvan seuraavasta sarjasta:

1. päätös harkita kaistanvaihtoa
2. oikean tai vasemman kaistan valinta ja
3. aikavälin hyväksyminen kohdekaistalta. (Ahmed ym. 1996.)

Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta, olemassa olevat aineistot käsittelevät ainoastaan kaistan vaihtamista. Tarkka ajankohta, jolloin ryhdytään harkitsemaan kaistanvaihtoa tai etsimään sopivaa aikaväliä, ei ole suoraan havainnoitavissa. Moottoriteiden liittymisrampit ja sivutieltä päätielle sekoittuminen tai päätien ylittäminen (esimerkiksi valo-ohjaamattomassa liittymässä) ovat poikkeuksia. Näissä tilanteissa kuljettajan täytyy ryhtyä etsimään hyväksyttävää aikaväliä lähestulkoon heti, kun hän saapuu sekoittumisalueen alkuun tai liittymään, ja hylättyjen ja hyväksytyjen aikavälien sarja voidaan havainnoida. (Ahmed ym. 1996.)

Kaistanvaihto voi olla joko pakon sanelemaa tai vapaaehtoista. Kaistanvaihto on pakollinen silloin, kun nykyistä kaistaa pitkin ei ole enää mahdollista jatkaa haluttuun kohteeseen (syynä esimerkiksi kaistan käytön rajoitukset, onnettomuus, tietyö tai tarve siirtyä poistumisrampille) ja kuljettajan on vaihdettava toiselle kaistalle. Kaistanvaihto tapahtuu vapaaehtoisesti silloin, kun kuljettaja ei ole tyytyväinen nykyisen kaistan ajo-olosuhteisiin (kaistan keskinopeus voi on alempi kuin kuljettajan tavoitenopeus, raskaan liikenteen läsnäolo kaistalla yms.). (Ahmed ym. 1996.)

Kuvan 8 puudiagrammi esittää yhteenvedon ehdotetusta rakenteesta kaistanvaihtomallille. Ellipsit vastaavat piilevää päätöstä ja suorakaiteet vastaavat tapahtumia, jotka voidaan havainnoida. (Ahmed ym. 1996.)



Kuva 8. Ahmedin ym. (1996) kaistanvaihtomallin rakenne.

Kuvan 8 kaksi ylintä tasoa esittävät päätöstä harkita kaistanvaihtoa. Kuljettaja, joka kohtaa pakollista kaistanvaihtoa vaativan tilanteen, voi vastata kaistanvaihtotarpeeseen joko välittömästi tai viiveellä. Jälkimmäinen päätös on relevantti ainoastaan niille kuljettajille, jotka joutuvat pakollisen kaistanvaihdon tilanteeseen ja joihin selittävät muuttujat – kuten etäisyys siihen pisteeseen, jossa kaistanvaihto täytyy suorittaa, ylitettävien kaistojen määrä ja liikennetiheys – vaikuttavat. Lyhyt etäisyys, monta ylitettävää kaistaa ja suuri liikennetiheys tekevät todennäköisemmäksi sen, että kuljettaja vaihtaa kaistaa heti. (Ahmed ym. 1996.)

Jos kuljettaja päättää väliaikaisesti olla vaihtamatta kaistaa huolimatta kaistanvaihtamisen pakollisuudesta tai jos olosuhteet eivät sovellu kaistanvaihtoon (molemmat tilanteet on kuvattu sanoin "Pakollinen kaistanvaihto jonkin ajan kuluttua"), voidaan selvittää kuljettajan tyytyväisyys nykyiseen kaistaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kuljettaja voi päättää, haluaako hän suorittaa vapaaehtoisen kaistanvaihdon vai ei. Nopeuserot suhteessa kullakin kaistalla edellä ajavaan ajoneuvoon ja haitat, jotka johtuvat kaistanvaihdon kohteeksi harkitulla kaistalla edellä ajavan ajoneuvon jarrutuksesta (jarrutusindikaattori), raskaan ajoneuvon takana ajamisesta (raskaiden ajoneuvojen läsnäolindikaattori) ja kaistan vieressä olevasta rampista (ramppi-indikaattori), vaikuttavat vapaaehtoisen kaistanvaihdon suorittamispäätökseen. (Ahmed ym. 1996.)

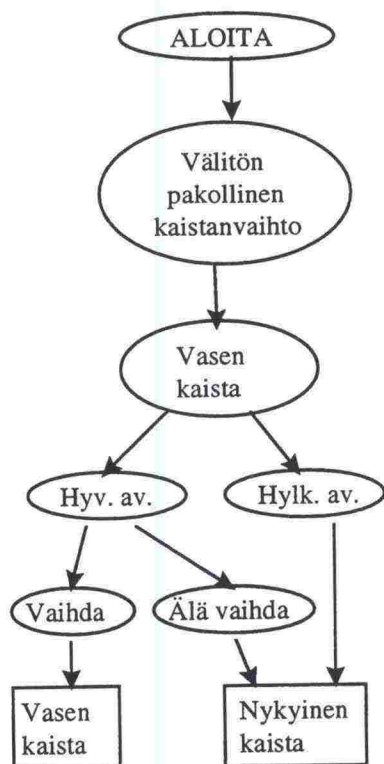
Välittömästi tapahtuvan pakollisen kaistanvaihdon ja vapaaehtoisen kaistanvaihdon tapauksissa, kun molemmat viereiset kaistat ovat mahdollisia, kaistanvalintatodennäköisyys määritellään kohdekaistan valintamallilla. Nopeuserot sekä jarrutus-, raskaiden ajoneuvojen läsnäolo-, ramppi- ja pakollisen kaistanvaihdon tarveindikaattorit (viimeisin ilmaisee sen, että kun kuljettaja päättää suorittaa pakollisen kaistanvaihdon myöhemmin, pakolliseen kaistanvaihtoon sopimattomat

kaistat eivät ole erityisen toivottuja) ovat selittävinä muuttujina. (Ahmed ym. 1996.)

Kun kohdekaista on valittu, kuljettaja etsii hyväksyttävän aikavälin. Selittävät muuttujat liittyvät tieympäristöön ja aikavälin etsimiseen. Näitä selittäviä muuttujia ovat muun muassa suhteellinen nopeus, jäljellä oleva etäisyys siihen pisteeseen, jossa kaistanvaihto pitää viimeistään suorittaa, ensimmäisen aikavälin indikaattori (joka ilmaisee sen, että kuljettajan ensimmäiseksi kohtaama aikaväli ei ole psykologisista syistä yhtä haluttava kuin seuraavat aikavälit), hylättyjen aikavälien määrä ja viive, joka kuljettajalle aiheutuu, kun hän joutuu odottamaan riittävän pitkää aikaväliä. Vaikka sopiva aikaväli löytyisikin, kaistanvaihto ei silti välttämättä tapahdu välittömästi. Tämä johtuu kaistan vaihtamisen vaatimasta ajasta ja reaktioajasta. Mallin viimeinen vaihe ilmentää tätä. Jos kaistanvaihto tapahtuu välittömästi, kuljettaja vaihtaa uudelle kaistalle, muuten hän jatkaa nykyistä kaistaa, kunnes tulee uusi mahdollisuus kaistanvaihtoon. (Ahmed 1996.)

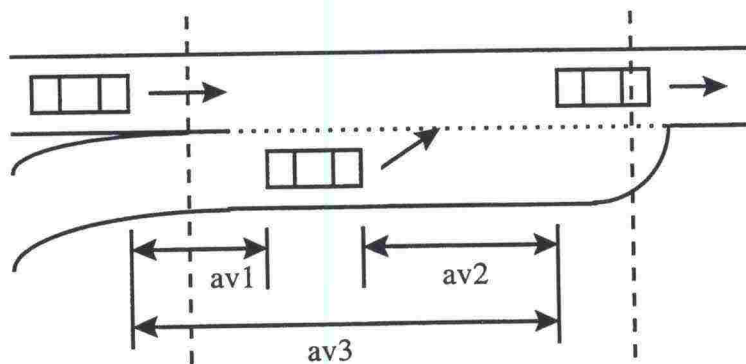
5.3 Mallin sovellus

Edellä esitetyn kaistanvaihtomallin käyttösovelluksena esitellään tilanne, jossa liikenne liittyy rampilta moottoritielle. Tässä tapauksessa kaikki kuljettajat aloittavat kaistanvaihtoprosessin viereiselle kaistalle heti, kun he ylittävät pisteen, jossa liittymisramppi tulee moottoritiekaistan rinnalle (eli jokainen vastaa pakollisen kaistanvaihdon vaateeseen ja vierellä kulkeva moottoritiekaista on ainoa mahdollisuus), ja ryhtyvät etsimään kohdekaistalta riittävän pitkää aikaväliä. Tällainen tilanne on esimerkki pakollisesta kaistanvaihdosta, johon *kuvan 8* puun oikea puoli ei sovellu. Päätösprosessin tärkeimmät elementit ovat aikavälin hyväksyminen ja kaistan vaihtamisen suorittaminen. Kaistanvaihtomallin rakenne, joka esitettiin *kuvassa 8*, voidaan siis yksinkertaistaa *kuvassa 9* esitettyyn muotoon. Päätöspuussa on kaksi vaihtoehtoa: kaistanvaihto vasemmalle ja nykyisellä kaistalla pysyminen. Kaistanvaihto tapahtuu vasemmalle ainoastaan silloin, kun aikaväli on hyväksyttävissä ja kaistan vaihtaminen suoritetaan. Muutoin kuljettaja jatkaa nykyisellä kaistallaan. (Ahmed ym. 1996.)



Kuva 9. Kaistanvaihtomallin rakenne eräässä erityistapauksessa (Ahmed ym. 1996.)

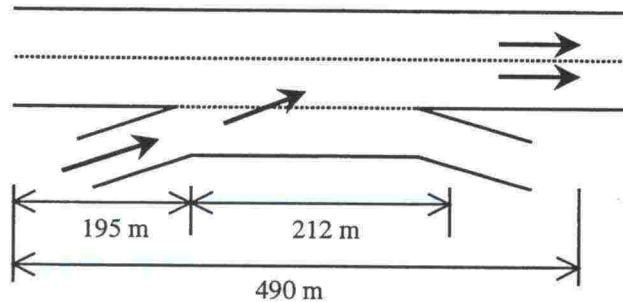
Moottoritiekaistanvaihdossa aikaväli on hyväksyttävissä, kun aikaväli kohdekaistalla suhteessa sekä edellä että takana ajavaan ajoneuvoon on riittävän suuri. Kuva 10 havainnollistaa näitä aikavälejä. Kuljettajan kriittinen aikaväli suhteessa edellä ajavaan ajoneuvoon määritellään minimaikavälinä, jonka kuljettaja on valmis hyväksymään kaistanvaihtoa varten. Kriittisen aikavälin suhteessa edellä ajavaan on oletettu olevan riippuvainen liikenneolosuhteista ja kuljettajan aikaisemmista päätöksistä. (Ahmed ym. 1996.)



Kuva 10. Aikaväli suhteessa kohdekaistalla takana ajavaan (av1) ja edellä ajavaan (av2) ajoneuvoon sekä kokonaisaikaväli (av3). (Ahmed ym. 1996.)

Malli sovitettiin aineistoon, joka oli kerätty diskreetteinä ajanhetkinä moottoritiellä I-95 NB lähellä Baltimore-Washington-puistotietä. Kuva 11 havainnollistaa mitauspaikkaa. Tämä 490 metriä pitkä alue 212 metriä pitkine sekoittumisaluei-

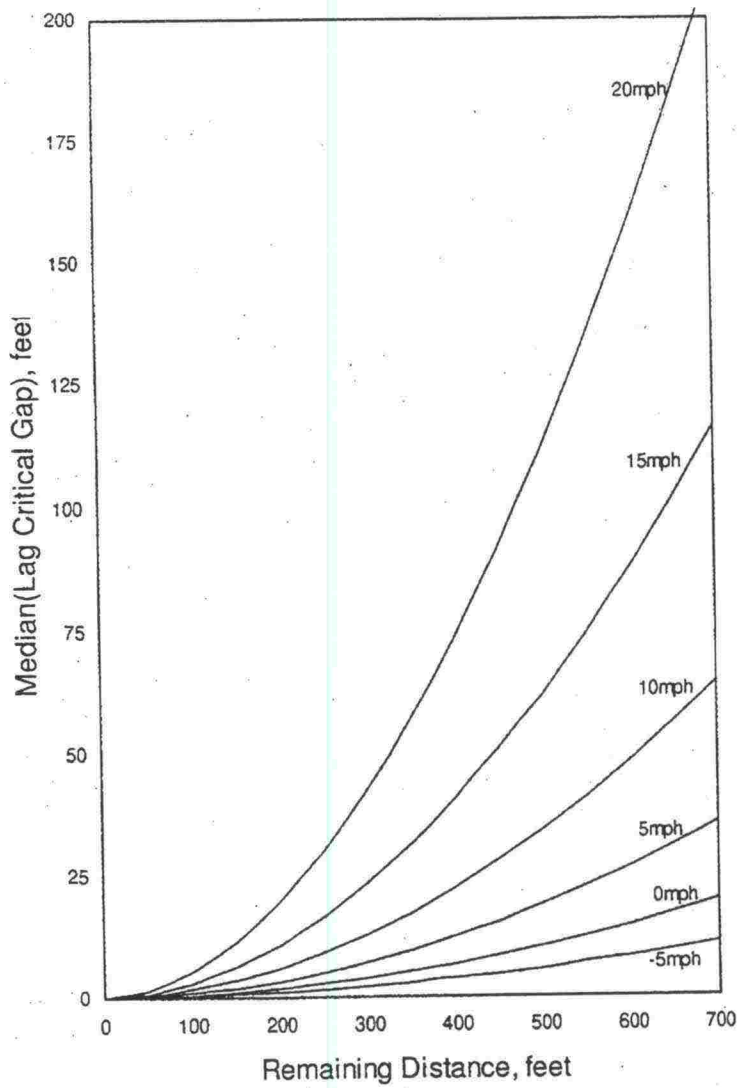
neen kuvattiin ottamalla alueesta valokuva kerran sekunnissa. Ajoneuvot, jotka tulivat sekoittumisalueen alkupäästä ja liittyivät moottoritien liikennevirtaan, havainnoitiin halutunlaisena kaistanvaihtotapahtumana. Havaintoja saatiin 286 kuljettajasta ja 1 447 aikavälistä.



Kuva 11. Datan keruupaikka moottoritiellä I-95 NB lähellä Baltimore-Washington-puistotietä (Ahmed ym. 1996).

Sovitetun mallin avulla havaittiin, että kriittinen aikaväli suhteessa edellä ajavaan on herkkä liikenneolosuhteille, kun taas kriittinen aikaväli suhteessa takana ajavaan osoittui olevan nopeuden (suhteessa takana ajavaan), etäisyyden siihen pisteeseen, jossa kaistanvaihto on viimeistään suoritettava, ja sen seikan, onko kyseinen aikaväli ensimmäinen vai ei, funktio. Kriittisen aikavälin suhteessa edellä ajavaan varianssi osoittautui huomattavasti pienemmäksi kuin kriittisen aikavälin suhteessa takana ajavaan. Kahden kriittisen aikavälin suhteessa edellä ajavaan välinen, kahden kriittisen aikavälin suhteessa takana ajavaan välinen ja kriittisten aikavälien suhteessa edellä ja takana ajavaan väliset korrelaatiot olivat havaituilla yksilöillä pieniä. (Ahmed ym. 1996.)

Liikenneolosuhteet eivät vaikuttaneet kriittisen matkavälin suhteessa edellä ajavaan mediaaniin ja se sai arvoksi 4,6 metriä (15 jalkaa), mutta kriittisen matkavälin suhteessa takana ajavaan kohdalla tilanne oli päinvastainen. Kuva 12 näyttää, kuinka kriittisen matkavälin suhteessa takana ajavaan mediaaniarvot vaihtelevat jäljelle jäävän etäisyyden mukaan erilaisilla nopeuden arvoilla suhteessa takana ajavaan ajoneuvoon. Oletetaan, että takana ajavan ajoneuvon nopeus on 50 mph. Suhteellisella nopeudella (suhteessa takana ajavaan) 20 mph kriittisen matkavälin mediaani on 64 metriä (209 jalkaa, vastaa 2,85 sekunnin aikaväliä), kun jäljelle jäävä etäisyys on 213 metriä (700 jalkaa). Jos jäljelle jäävä etäisyys on 91 metriä (300 jalkaa), kriittiseksi matkaväliksi suhteessa takana ajavaan saadaan 13 metriä (42 jalkaa, 0,6 sekunnin aikaväli). Jos jäljelle jäävä etäisyys on vakio, kriittisen matkavälin suhteessa takana ajavaan mediaaniarvot laskevat samalla, kun nopeus suhteessa takana ajavaan laskee. Kun nopeus suhteessa takana ajavaan on negatiivinen (ajoneuvo ajaa nopeammin kuin kohdekaistalla takana ajava ajoneuvo) kriittisen matkavälin mediaaniarvo on odotetusti hyvin pieni. (Ahmed ym. 1996.)



Kuva 12. Kriittisen matkavälin suhteessa takana ajavaan mediaaniarvo vs. jäljelle jäävä etäisyys erilaisilla nopeuden suhteessa takana ajavaan arvoilla (Ahmed ym. 1996).

6 KAISTANVAIHTO SIMULOINTIOHJELMISSA

6.1 HUTSIM

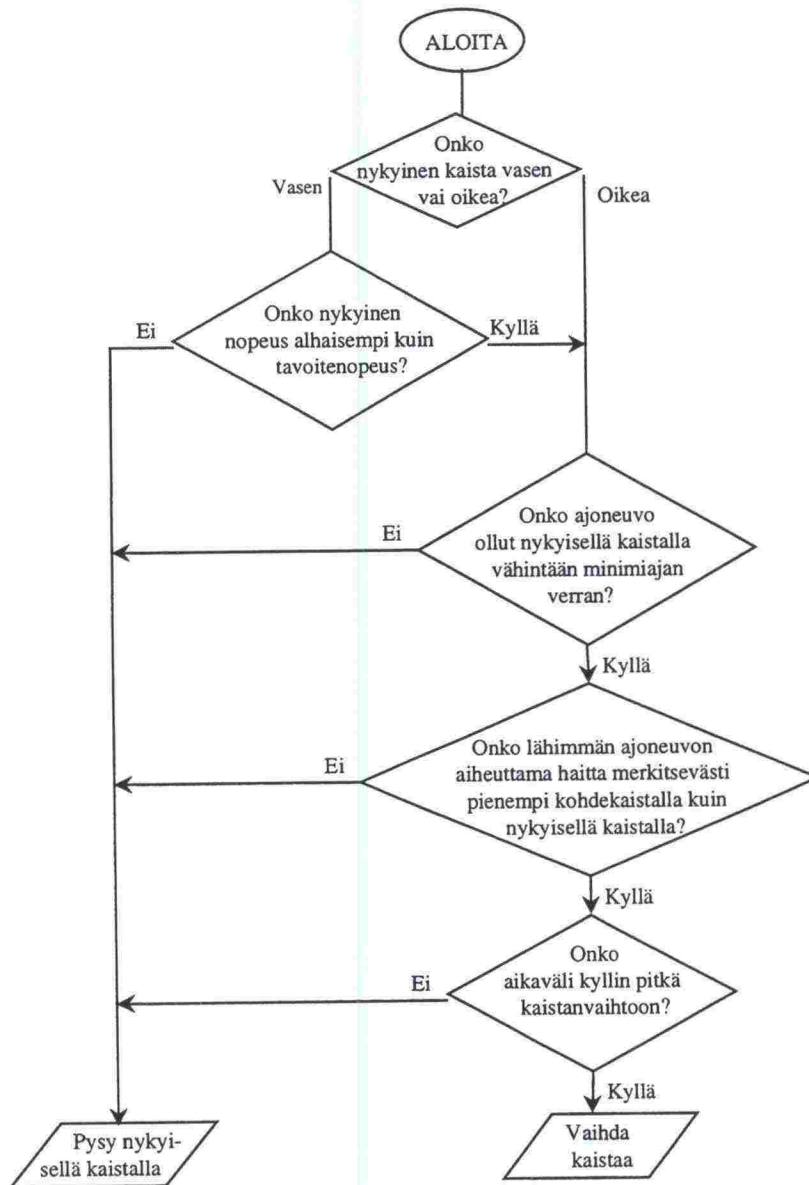
HUTSIM on Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetty oliosuuntautunut mikroskooppinen liikenteensimulointiohjelma. HUTSIM kehitettiin ensisijaisesti valo-ohjauksisten tasoliittymien toiminnan tutkimiseen.

HUTSIMissä kuljettajille on määritelty miniminettaikaväli, jota pienempiin aikaväleihin he eivät vaihda kaistaa. Miniminettoaikaväli on kaikille kuljettajille sama vakio. Miniminettoaikavälin lisäksi kaistaa vasemmalle vaihdettaessa seuraavien ehtojen täytyy toteutua: ajoneuvon nykyisen nopeuden tulee olla pienempi kuin sen tavoitenopeus, ajoneuvo on ollut nykyisellä kaistallaan vähintään ennalta määritellyn minimiajan, joka ajoneuvon on oltava samalla kaistalla, ja vasemman puoleisen kaistan ajovastus on riittävän paljon pienempi kuin nykyisen kaistan ajovastus. HUTSIMissä ajovastusta mitataan hidastuvuuden (m/s^2) avulla. Ajovastus ($Obs(lane)$) on määritelty seuraavasti:

$$Obs(lane) = \frac{(v_{own} - v_{obs})^2}{2 * s}$$

jossa v_{own} on ajoneuvon oma nopeus, v_{obs} on edellä olevan ajoneuvon tai muun "esteen" nopeus ja s sen etäisyys. "Riittävän paljon pienemmän" ajovastuksen rajaksi on HUTSIMissä oletuksena 70 prosenttia nykyisen kaistan ajovastuksesta. (Kosonen 1996.)

Kun halutaan vaihtaa kaistaa oikealle, täytyy miniminettaikavälin lisäksi seuraavien ehtojen toteutua: ajoneuvo on ollut nykyisellä kaistallaan vähintään ennalta määritellyn minimiajan, jonka ajoneuvon on oltava samalla kaistalla, ja oikeanpuoleisen kaistan ajovastus on ennalta määrättyä raja-arvoa pienempi. Oletus tälle raja-arvolle on $0,25 m/s^2$. HUTSIMin kaistanvaihtoproseduuri voidaan esittää kuvan 13 mukaisen kaavion avulla. (Kosonen 1996.)

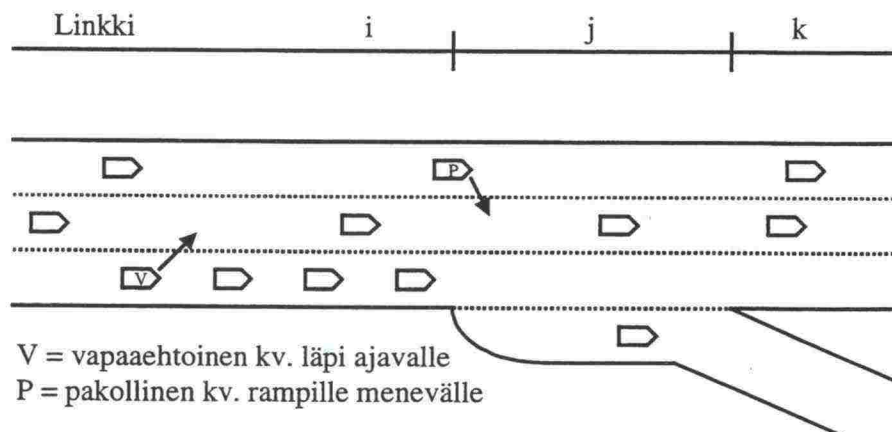


Kuva 13. HUTSIMin kaistanvaihtoproseduuri (perustuu: Kosonen 1996).

6.2 INTEGRATION

INTEGRATION on Kanadassa kehitetty liikenteen mikroskooppinen simulointiohjelma, joka on tarkoitettu moottori- ja pääteiden mallintamiseen.

Kun ajoneuvo matkaa INTEGRATION-mallissa tiettyä linkkiä pitkin, se voi tehdä joko vapaaehtoisia tai pakollisia kaistanvaihtoja tai näitä molempia, kuten *kuvasa 14* on havainnollistettu. Vapaaehtoiset kaistanvaihdot ovat vallitsevien liikeneolosuhteiden funktio, kun taas pakolliset kaistanvaihdot ovat vallitsevan tiiverkkogeometrian funktio. (van Aerde ym. 1996.)



Kuva 14. Vapaaehtoinen ja pakollinen kaistanvaihto (kv.) (van Aerde ym. 1996).

Sen määrittämiseksi, pitäisikö vapaaehtoinen kaistanvaihto suorittaa, jokainen ajoneuvo laskee kolme eri nopeusvaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on potentiaalinen nopeus, jolla ajoneuvo voi jatkaa nykyisellä kaistallaan, ja vaihtoehdot kaksi ja kolme ovat potentiaaliset nopeudet nykyisen kaistan vasemmalla ja oikealla puolella sijaitsevilla kaistoilla. Nämä nopeuslaskelmat perustuvat kullakin kaistalla tarjolla olevaan aikaväliin ja ennakkokäsitykseen siitä, pysyykö ajoneuvo nykyisellä kaistallaan tai vaihtaako se viereiselle kaistalle, jos se vain on mahdollista. Nopeusvaihtoehtojen laskemisen jälkeen ajoneuvo päättää yrittää vaihtaa sille kaistalle, jolla se voi ajaa suurimmalla nopeudella. Esimerkiksi kuvan 14 ajoneuvo V voi päättää vaihtaa kaistaa reunakaistalta keskikaistalle kasvattaakseen aikaväliä ja samalla nopeutta, jolla se voi mukavasti matkustaa. Tämän tyyppinen kaistanvaihto, kun se on vapaaehtoinen, on riippuvainen sopivan aikavälin löytymisestä siltä kaistalta, jolle ajoneuvo haluaisi siirtyä. (van Aerde ym. 1996.)

Ajoneuvo tekee vapaaehtoisen kaistanvaihdon maksimoidakseen nopeuttaan, mutta pakolliset kaistanvaihdot ovat usein seurausta tarpeesta päästä kaistalle, joka mahdollistaa pääsyn haluttuun kohteeseen. Esimerkiksi kuvan 14 ajoneuvo P haluaisi pysytellä sisimmäisellä kaistalla voidakseen ajaa kovempaa, mutta koska ajoneuvon täytyy päästä poistumisrampille, sen täytyy mennä hidastuskaistalle ennen linkiltä j poistumista. (van Aerde ym. 1996.)

Kun ajoneuvo on suorittanut kaistanvaihdon, kaistanvaihtaminen on kiellettyä tietyn ennalta määritetyn minimiajan ajan. Tämä minimiaika varmistaa sen, että kaistanvaihtoon kuluva rajallinen aika konkretisoituu. Se myös varmistaa sen, ettei kahta kaistanvaihtoa voida tehdä välittömästi toinen toisensa jälkeen. Lisäksi samalla, kun itse kaistanvaihtotapahtuma on käynnissä, ajoneuvo on mallinnettu siten, että se rajoittaa aikaväliä sekä kaistalla, jolta se on tulossa että jolle se on menossa. Samanaikainen läsnäolo kahdella kaistalla näkyy tehokkaan kapasiteetin laskuna verrattuna tilanteeseen, jos ajoneuvo ei olisi vaihtanut kaistaa. (van Aerde ym. 1996.)

6.3 AIMSUN2

Espanjassa kehitetty AIMSUN2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) on mikroskooppinen liikenteen simulointiohjelma. AIMSUN2 on erikoistunut liikenneverkkojen simulointiin ja sen avulla voidaan selvittää muun muassa uusia liikenteen ohjausjärjestelmiä ja liikenteenjärjestelyperiaatteita. Kaistanvaihtomallinaan AIMSUN2 käyttää australialaista Gippsin mallia (ks. kappale 3). (Barceló & Ferrer 1997.)

6.4 INTRAS

INTRAS (Integrated TRAffic Simulation) on Yhdysvalloissa kehitetty mikroskooppinen moottoriteliikenteen simulointiohjelma, joka on kehitetty moottoriteliikenteen häiriöiden tutkimiseen. INTRAS esittää todenmukaisesti liikenteen ja liikenteenohjauksen moottoriteillä sekä ympäröivällä katuverkolla. (Wicks & Lieberman 1980.)

INTRASissa kaistanvaihto lähtee kysymyksestä, tarvitseeko ajoneuvon vaihtaa kaistaa. Vastaus edelliseen kysymykseen on myöntävä, jos ajoneuvo on poistumassa moottoritieltä tai jos se on liittymässä moottoritien liikennevirtaan kiihdytyskaistalta. Ajoneuvo voi myös haluta vaihtaa kaistaa, vaikkei se olekaan täysin välttämätöntä. Näin käy, jos ajoneuvo ei voi ajaa tavoitenopeuttaan ja haluaa vaihtaa kaistaa ohittaakseen hitaamman ajoneuvon. Halu vaihtaa kaistaa voi ilmetä myös silloin, kun ajoneuvo ajaa tavoitenopeuttaan ja haluaa säilyttää tämän. (Wicks & Lieberman 1980.)

Jatkuvasti tapahtuvan kaistanvaihtamisen estämiseksi INTRASissa on rajoituksia ei-välttämättömille kaistanvaihdolle. Ajoneuvo ei esimerkiksi vaihda kaistaa, jos sen olisi kiihdytettävä lujempaa kuin $0,3 \text{ m/s}^2$. Ajoneuvo ei myöskään vaihda kaistaa, jos viereisellä kaistalla edellä ajava ajoneuvo ajaa hitaammin kuin nykyisellä kaistalla edellä ajava ajoneuvo ja jos viereisellä kaistalla aikaväli edellä ajavaan olisi pienempi kuin nykyisellä kaistalla. Lisäksi ajoneuvo hyväksyy alhaisemman nopeuden silloin, kun se on vaihtamassa kaistaa oikealle. (Wicks & Lieberman 1980.)

Kun ajoneuvo on päättänyt yrittää kaistanvaihtoa, täytyy tarkistaa, onko se mahdollista. Tällöin tarkistetaan aikaväli halutulla kaistalla edellä ajavaan ajoneuvoon ja kiihdytyksen voimakkuus, joka vaaditaan turvalliseen ajamiseen edellä mainitun ajoneuvon takana. Tässä kaistanvaihdot jaetaan kahteen luokkaan: vapaaehtoihin ja pakotettuihin kaistanvaihtoihin. Vapaaehtoisessa kaistanvaihdossa kiihdytyksen tulee olla positiivinen tai nolla, eli että ajoneuvo voi vaihtaa kaistaa alentamatta nopeuttaan, mutta pakotetussa kaistanvaihdossa myös pieni hidastaminen on hyväksyttävissä. Hidastuksen täytyy kuitenkin pysyä turvallisissa rajoissa. (Wicks & Lieberman 1980.)

Jos kaistanvaihtoa pidetään yhä mahdollisena, tarkistetaan alkuajaväli. Tämä tehdään ennustamalla kiihdytys, jonka takana ajava ajoneuvo joutuu tekemään, jotta tarkastettava ajoneuvo voi turvallisesti vaihtaa kaistaa. Jos tämä kiihdytys on positiivinen, eli takana ajava ajoneuvo ei joudu hidastamaan, kaistanvaihto voidaan aloittaa. (Wicks & Lieberman 1980.)

Pakotetun kaistanvaihdon tapauksessa takana ajava ajoneuvo saattaa hidastaa mahdollistaakseen kaistanvaihdon eteensä. Satunnaisella osalla takana ajavia kuljettajia on tämä niin kutsuttu kohteliaisuustekijä. Jos takana ajava ajoneuvo ei lukeudu tähän kohteliaiden autoilijoiden ryhmään, kaistanvaihtoa ei voida suorittaa. Vaikka takana ajava kuuluisikin kohteliaiden ryhmään, pakotettu kaistanvaihto voidaan suorittaa vain silloin, kun tarvittava jarrutus pysyy sallituissa rajoissa. (Wicks & Lieberman 1980.)

INTRASin kaistanvaihtoproseduuri on joustava ja tehokas. Se sopii hyvin liittymisen ja erkanemisen mallintamiseen ruuhkaisissa olosuhteissa. (Wicks & Lieberman 1980.)

7 KENTTÄTUTKIMUS

7.1 Koekuljettajat

Koejärjestelyt

Kaistanvaihtoa tutkittiin koekuljettajien avulla Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen instrumentoidulla autolla (Opel Astra 1.8i Caravan). Autoon oli asennettu ajoanalysointilaite ja etäisyystutka. Ajon aikana tietokoneen muistiin tallentui aika, kuljettu matka, mittausauton nopeus, polttoaineen kulutus ja etäisyys edellä aja-vaan ajoneuvoon. Lisäksi tiedostoon tallennettiin käsin tapahtumakoodeja. Perustiedot, eli aika, matka ja nopeus, tallentuivat yhden sekunnin välein. Etäisyys-
tutka mittasi etäisyyttä eteenpäin. Sen enimmäiskantama oli suoralla noin 120 metriä, kaarteissa, nousuissa ja laskuissa vähemmän.

Mittaukset tehtiin Hämeenlinnanväylällä Kivistön liittymän ja Nurmijärven liittymän välillä. Ajoreitti ajettiin molempiin suuntiin. Reitin kokonaispituus oli 35,8 kilometriä. (Tämä matka sisältää myös ramppien pituudet.) Koekuljettajia oli kaikkiaan 18. He olivat iältään 22 - 47 -vuotiaita, heillä oli ollut ajokortti 4 - 29 vuotta ja heidän vuotuinen ajokilometrimääränsä oli 1 000 - 40 000 kilometriä. (Liite 1)

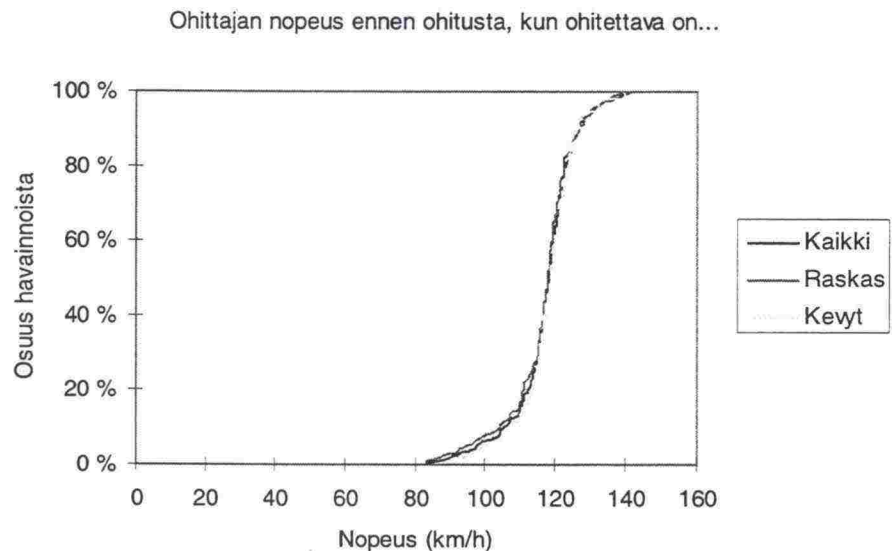
Mittauksen alussa koekuljettajien annettiin säätää hallintalaitteet sopiviksi. Tämän jälkeen heille selostettiin ajoreitti pääpiirteissään, jonka lisäksi heitä muistutettiin ajon aikana 1 000 metriä ennen liittymiä poistumisesta moottoritiltä. Ennen liikkeellelähtöä koekuljettajille kerrottiin, että nopeusrajoitus on moottoriteillä 120 km/h ja että mittausauton nopeusmittari näyttää 10 km/h liikaa moottoritienopeuksilla. Koekuljettajille ei annettu muita ajoon liittyviä ohjeita. Mittaaja istui auton takapenkillä. Hän ei aloittanut ajon aikana keskustelua koekuljettajan kanssa, mutta puhui hänen kanssaan, jos koekuljettaja aloitti keskustelun. Mittauksesta ja sen tarkoituksesta ei kuitenkaan keskusteltu. Radio oli suljettuna koko mittauksen ajan. Ajon aikana etäisyystutkan näyttö oli peitetty niin, ettei koekuljettaja nähnyt sen lukemia.

Koekuljettajat ohittivat yhteensä 159 raskasta ja 139 kevyttä ajoneuvoa. Raskaiden ajoneuvojen osuus ohitetuista oli siis 53 prosenttia, kun se oli kyseisenä ajankohtana väylän liikennemäärästä 15 prosenttia Keimolassa sijaitsevan liikenteen automaattisen mittauspisteen (LAM-piste 137) mukaan. Liikennemäärä vaihteli kokeen aikana 1 300 ja 2 800 ajon./h välillä keskiarvon ollessa 1 600 ajon./h (60 min aikajaksot).

Kokeen tuloksena saatiin havaintoja ohittajan ja ohitettavan nopeudesta sekä heidän nopeuserostaan ennen ohitusta, nopeuserosta ja ohitettavan nopeuden muutoksesta ohituksen aikana, etäisyydestä ja aikavälistä, jolla ajoneuvo lähti ohittamaan toista, etäisyydestä, jolle omalle kaistalle palattiin, sekä ohitettavien ajoneuvojen aikaväleistä, kun samalla kertaa ohitettiin useampi ajoneuvo. Havaintojen normaalijakautuneisuus testattiin Wilk-Shapiron testillä (Analytical Software 1994). Jos havainnot todettiin normaalijakautuneiksi, parametrien eron merkitsevyys raskaan liikenteen ja kevyen liikenteen ohitusten välillä testattiin t-testillä (Laininen 1987, Milton & Arnold 1986).

Ohittajan nopeus ennen ohitusta

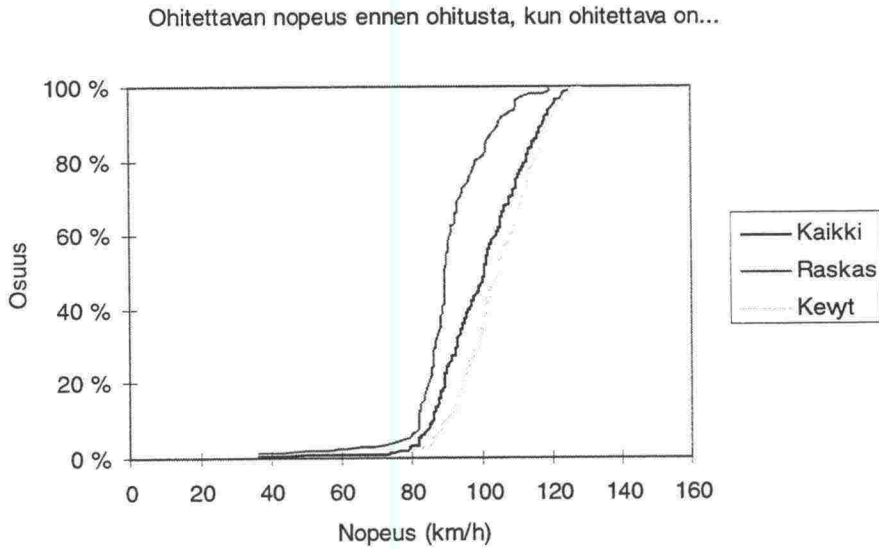
Ohittamaan lähtevän ajoneuvon 10 sekunnin keskinopeuden (*kuva 15*) odotusarvo ennen ohitusta oli raskaita ajoneuvoja ohitettaessa 117 km/h ja kevyitä ajoneuvoja ohitettaessa 118 km/h. Havainnot olivat 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (raskaat ajoneuvot tn. 0,93 ja kevyet tn. 0,94), joten odotusarvojen ero testattiin t-testillä. Ero ei ollut käytetyllä riskitasolla merkitsevä. Raskaita ajoneuvoja lähdettiin siis ohittamaan yhtä suurella nopeudella kuin kevyitä ajoneuvoja. Kyseisen nopeuden odotusarvo oli 117 km/h ja 90 prosentin luottamusväli 116 – 118 km/h. Havainnoista 90 prosenttia oli väliltä 98 – 131 km/h.



Kuva 15. Ohittajan 10 sekunnin keskinopeus (km/h) ennen raskaan tai kevyen ajoneuvon ohitusta sekä keskimäärin.

Ohitetun nopeus ennen ohitusta

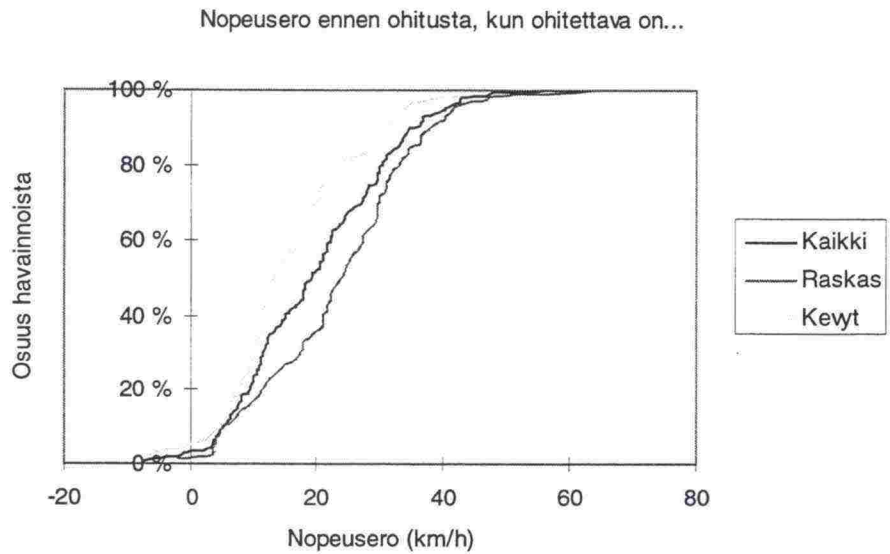
Ohitetun raskaan ajoneuvon 10 sekunnin keskinopeuden (*kuva 16*) odotusarvo ennen ohitusta oli 91 km/h ja kevyen ajoneuvon 105 km/h. Raskaiden ajoneuvojen nopeuksien havainnot eivät olleet 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (tn. 0,86), mutta kevyiden ajoneuvojen nopeushavainnot olivat (tn. 0,99). Nopeuksien ero (14 km/h) on kuitenkin sen verran suuri, että sen voidaan sanoa olevan merkitsevä. Ohitettujen kevyiden ajoneuvojen 10 sekunnin keskinopeuden 90 prosentin luottamusväli oli ennen ohitusta 103 – 106 km/h. Ohitetuista raskaista ajoneuvoista 90 prosenttia ajoi ennen ohitusta 10 sekunnin keskinopeudella 79 – 110 km/h ja kevyistä ajoneuvoista nopeudella 86 – 122 km/h.



Kuva 16. Ohitettavan ajoneuvon 10 sekunnin keskinopeus (km/h) ennen ohitusta.

Nopeusero ennen ohitusta

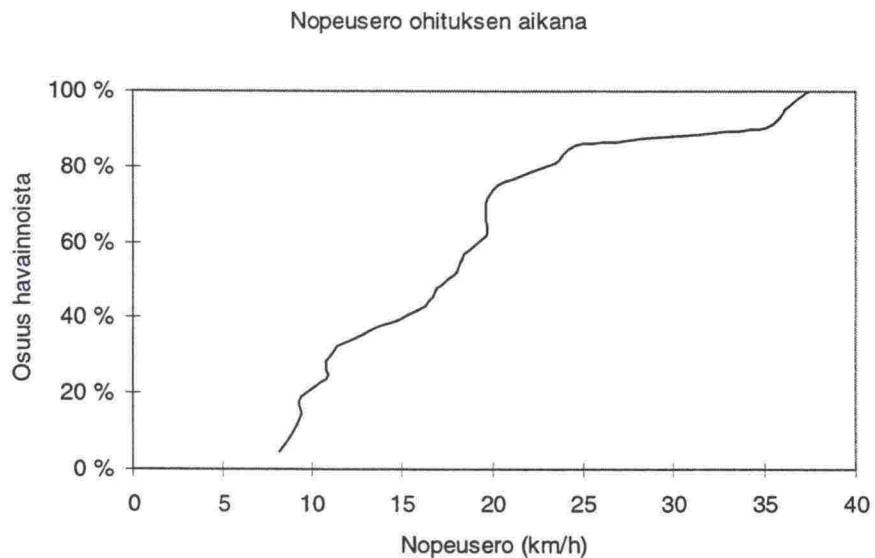
Ohittavan ja ohitettavan ajoneuvon välinen ero 10 sekunnin keskinopeudessa ennen ohitusta (kuva 17) oli odotusarvoltaan 24 km/h, kun ohitettava oli raskas ja ohittaja kevyt ajoneuvo. Nopeuseron odotusarvo oli 16 km/h, kun molemmat ajoneuvot olivat kevyitä. Molempien suureiden havainnot olivat 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (raskaat ajoneuvot tn. 0,98 ja kevyet ajoneuvot tn. 0,97), joten odotusarvojen eron merkitsevyys voitiin testata t-testillä. Ero havaittiin käytetyllä riskitasolla merkitseväksi. Raskaiden ajoneuvojen alhaisemmat nopeudet heijastuvat siis myös nopeuseroihin. Nopeuseron 90 prosentin luottamusväli, kun kevyt ajoneuvo ohittaa raskasta, oli 21 – 26 km/h ja, kun kevyt ajoneuvo ohittaa kevyttä ajoneuvoa, 14 – 18 km/h. Nopeusero havainnoista 90 prosenttia oli välillä 4 – 42 km/h, kun ohitettava ajoneuvo oli raskas, ja 4 – 40 km/h, kun ohitettava ajoneuvo oli kevyt. Kuvassa esiintyvät nopeuserojen negatiiviset arvot selittyvät ohittajan myöhäisellä kiihdytyksellä.



Kuva 17. Ohittavan ja ohitettavan ajoneuvon välinen ero 10 sekunnin keskinopeudessa (km/h) ennen ohitusta.

Nopeusero ohituksen aikana

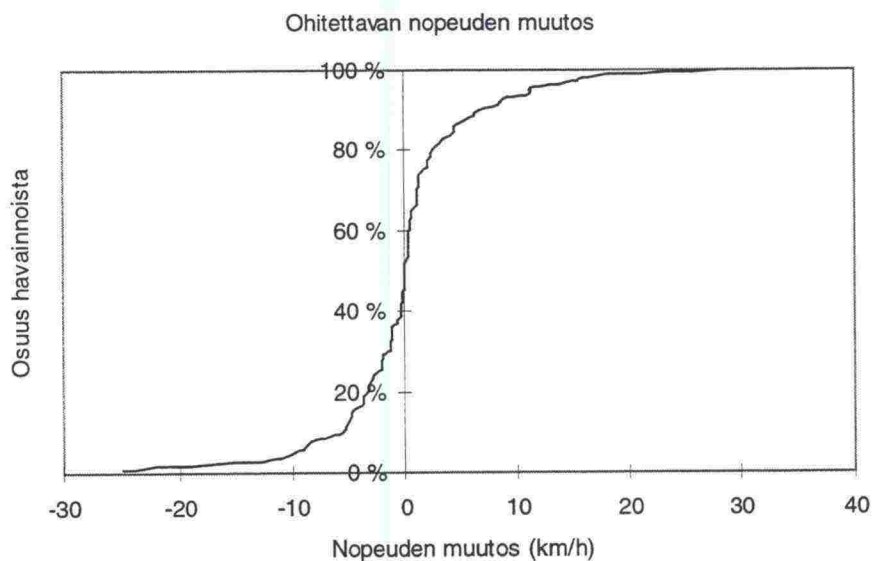
Ohittajan ja ohitettavan ajoneuvon välinen nopeusero (kuva 18) oli ohituksen aikana odotusarvoltaan 19 km/h. Tämä oli siis samaa suuruusluokkaa kuin ohittajan ja ohitettavan välinen nopeusero ennen ohitusta (20 km/h). Nopeuserohavainnot eivät olleet 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (tn. 0,89), joten eron merkitsevyyttä ei voitu tutkia t-testillä. Nopeuserohavainnoista 90 prosenttia vaihteli välillä 8 – 36 km/h, mikä on hieman suppeampi kuin nopeuserojen vaihteluväli ennen ohitusta (4 – 40 km/h).



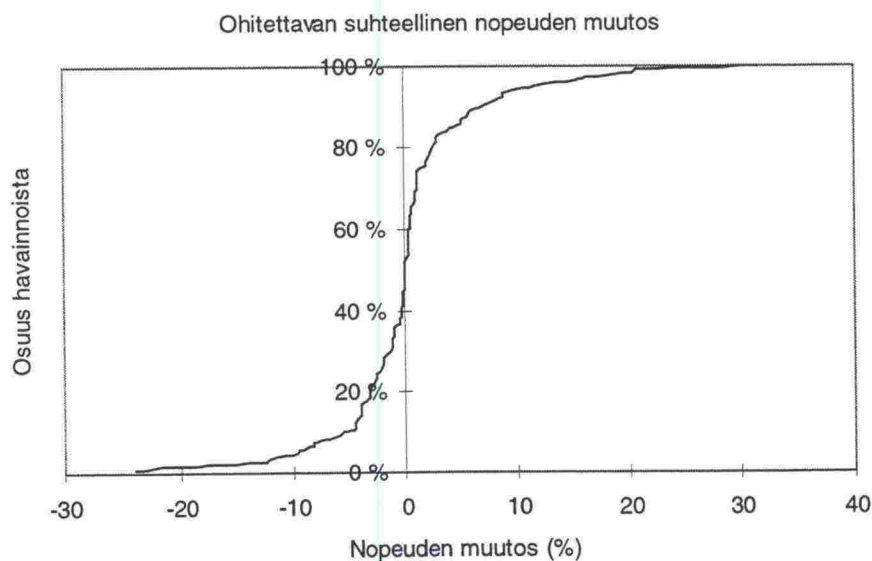
Kuva 18. Ohittajan ja ohitettavan ajoneuvon välinen nopeusero (km/h) ohituksen aikana.

Ohitettavan nopeuden muutos

Ohitettava ajoneuvo säilytti keskimäärin ohituksen aikana nopeuden, joka sillä oli ollut ennen ohitusta (nopeuden muutoksen odotusarvo 0 km/h). Nopeudenmuutoshavainnot eivät olleet 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (tn. 0,87). Nopeuttaan nostaneita ja laskeneita oli melko tarkkaan yhtä paljon ja 90 prosenttia havainnoista oli väliltä $-10 - +11$ km/h (kuva 19). Nopeuden muutos suhteessa nopeuteen ennen ohitusta oli odotusarvoltaan noin 0 prosenttia ja 90 prosenttia havainnoista oli väliltä $-10 - +11$ prosenttia (kuva 20).



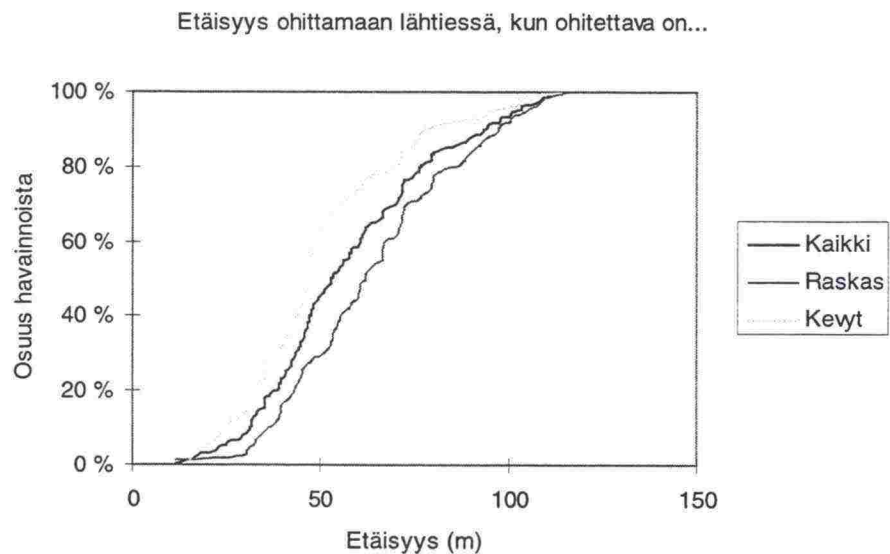
Kuva 19. Ohitettavan ajoneuvon nopeuden muutos (km/h) suhteessa nopeuteen ennen ohitusta (nopeus ohituksen aikana - nopeus ennen ohitusta).



Kuva 20. Ohitettavan ajoneuvon nopeuden suhteellinen muutos (%) suhteessa nopeuteen ennen ohitusta (nopeuden muutos / nopeus ennen ohitusta).

Etäisyys ennen ohitusta

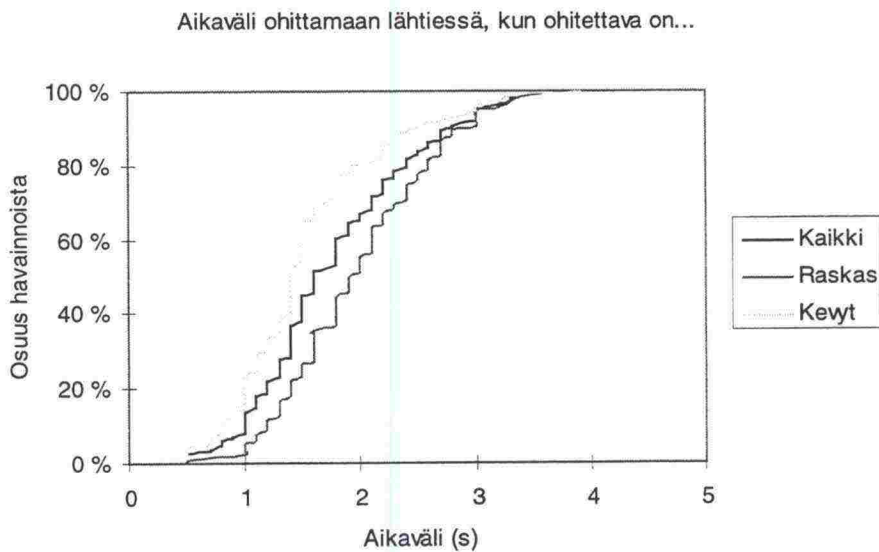
Kun lähdettiin ohittamaan raskasta ajoneuvoa, ohittajan etäisyyden (kuva 21) odotusarvo ohitettavaan oli 65 metriä ja, kun ohitettava oli kevyt ajoneuvo, etäisyyden odotusarvo oli 51 metriä. Molempien etäisyyksien havainnot olivat 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (raskaat ajoneuvot tn. 0,98 ja kevyet tn. 0,94). Odotusarvojen eron merkitsevyys tutkittiin t-testillä ja ero todettiin merkitseväksi. Raskasta ajoneuvoa lähdettiin siis ohittamaan kauempaa kuin kevyttä ajoneuvoa. Etäisyyden 90 prosentin luottamusväli oli 60 – 69 metriä, kun ohitettava ajoneuvo oli raskas, ja 47 – 55 metriä, kun ohitettava ajoneuvo oli kevyt. Etäisyshavainnoista 90 prosenttia oli väliltä 32 – 105 metriä, kun ohitettava ajoneuvo oli raskas, ja väliltä 19 – 97 metriä, kun ohitettava ajoneuvo oli kevyt.



Kuva 21. Ohittajan etäisyys (m) ohitettavaan, kun ohittaja vaihtaa ohituksen alussa kaistaa.

Aikaväli ennen ohitusta

Myös nettoaikaväli oli raskasta ajoneuvoa ohittamaan lähdettäessä suurempi (odotusarvo 2,0 sekuntia) kuin kevyttä ajoneuvoa ohittamaan lähtiessä (odotusarvo 1,6 sekuntia) (kuva 22). Molemmat aikaväliahvainnot olivat 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (raskaat ajoneuvot tn. 0,99 ja kevyet tn. 0,91) ja eron merkitsevyys todettiin t-testillä. Etäisyyden 90 prosentin luottamusväli oli 1,9 – 2,1 sekuntia, kun ohitettava ajoneuvo oli raskas, ja 1,4 – 1,7 sekuntia, kun ohitettava oli kevyt. 90 prosenttia etäisyshavainnoista oli väliltä 1,0 – 3,1 sekuntia, kun ohitettava ajoneuvo oli raskas, ja väliltä 0,6 – 3,0 sekuntia, kun ohitettava ajoneuvo oli kevyt.

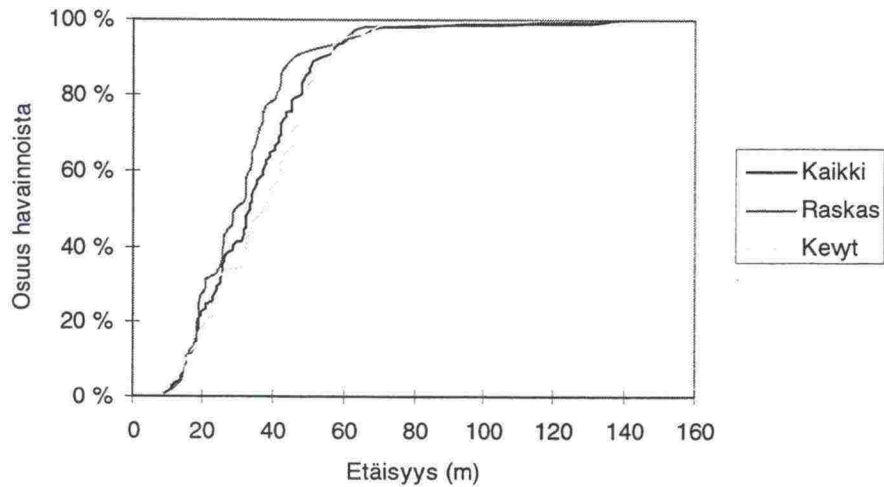


Kuva 22. Nettoaikaväli (s) ohituksen alussa, kun ohitettava ajoneuvo on raskas tai kevyt, sekä keskimääräinen aikaväli.

Etäisyys ohituksen jälkeen

Kun ajoneuvo palasi ohituksen jälkeen omalle kaistalleen, etäisyys ohitettuun (kuva 23) raskaaseen ajoneuvoon oli odotusarvoltaan 33 metriä ja kevyeen ajoneuvoon 38 metriä. Etäisyshavainnot eivät olleet 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (raskaat ajoneuvot tn. 0,68 ja kevyet tn. 0,87). Etäisyshavainnoista 90 prosenttia oli raskaiden ajoneuvojen ohituksissa väliltä 14 – 60 metriä ja kevyiden ajoneuvojen ohituksissa väliltä 12 – 60 metriä. Vaihteluvälit ovat siis hyvin samanlaiset. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että raskaan ajoneuvon ohitus aloitettiin keskimäärin hieman kauempaa kuin kevyen ajoneuvon, mutta raskaan ajoneuvon eteen palattiin hieman lähemmäksi kuin kevyen ajoneuvon eteen.

Etäisyys omalle kaistalle palatessa, kun ohitettava on...

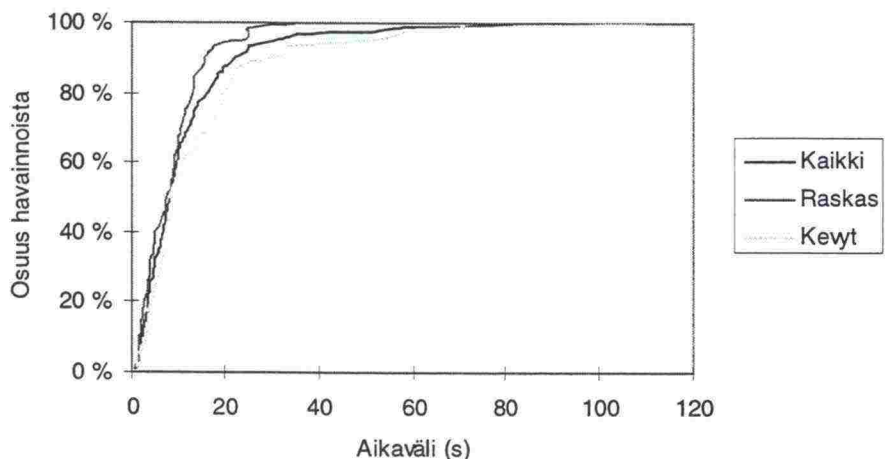


Kuva 23. Etäisyys (m) omalle kaistalle palattaessa, kun ohitettava ajoneuvo on raskas tai kevyt, sekä keskimääräinen etäisyys.

Ohitettavien välinen aikaväli

Kun ohitettiin useampia ajoneuvoja samalla kertaa, ohitetun ajoneuvon aikaväli seuraavaan (kuva 24) oli odotusarvoltaan 9 sekuntia, kun seuraava ohitettava oli raskas ajoneuvo, ja 15 sekuntia, kun seuraava ohitettava oli kevyt ajoneuvo. Havainnot eivät olleet 10 prosentin riskitasolla tarkasteltuna normaalijakautuneita (raskaat ajoneuvot tn. 0,88 ja kevyet tn. 0,63). Aikavälihavainnoista 90 prosenttia oli raskaiden ajoneuvojen ohituksessa väliltä 1 – 21 sekuntia ja kevyiden ajoneuvojen ohituksissa väliltä 1 – 40 sekuntia.

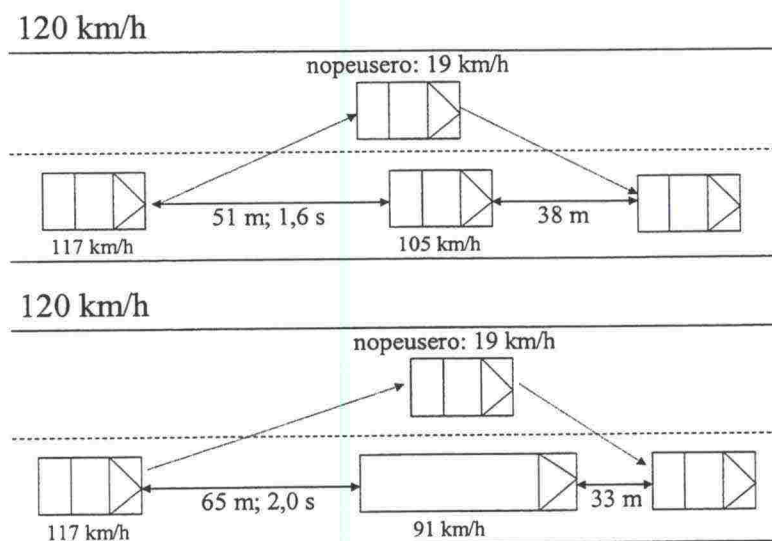
Ohitettavien aikaväli, kun ohitetaan useampaa ajoneuvoa ja ohitettava on...



Kuva 24. Ohitettavien ajoneuvojen aikaväli (s) (ohittajan kannalta) silloin, kun ohitetaan kerralla useampi ajoneuvo.

Yhteenveto tuloksista

Kuvassa 25 on esitetty yhteenveto koekuljettajien avulla tehdyn tutkimuksen tuloksista raskaan ja kevyen ajoneuvon ohituksesta moottoriteillä, jolla on nopeusrajoituksena 120 km/h.



Kuva 25. Raskaan (alla) ja kevyen (yllä) ajoneuvon ohitus moottoriteillä.

7.2 Kaistanvaihtoparametrien väliset riippuvaisuudet

Koejärjestelyt

Kaistanvaihtoa kuvaavien tunnuslukujen (kaistanvaihtoparametrien) välisiä riippuvaisuuksia selvitettiin tutkimalla muiden autoilijoiden kaistanvaihtotilanteita Helsingin seudun moottori- ja kehäteillä: Kehä III:lla Bembölen ja Juvanmalmin sekä Hämeenlinnanväylän ja Tikkurilan välillä, Hämeenlinnanväylällä Kivistön ja Vt 25:n välillä, Lahdenväylällä reitillä Viikki - Korso - Vallila - Kehä I sekä Kehä I:llä, Tuusulanväylällä ja Länsiväylällä. Nopeusrajoitukset vaihtelivat mittaussuoksilla 70 km/h:sta 120 km/h:iin. Ajon aikana tehtiin havaintoja mitta-auton eteen joko oikealta tai vasemmalta kaistaa vaihtavista ajoneuvoista. Kaistanvaihtohavaintoja oli yhteensä 152 kappaletta. (Liite 1)

Sekä oikealta että vasemmalta tapahtuneille kaistanvaihdolle laskettiin ohitetun ajoneuvon 10 sekunnin keskinopeus ennen kaistanvaihtotilannetta, etäisyys ja aikaväli, jolla ohittava ajoneuvo tuli kaistaa vaihtaessa ohitettavan eteen, sekä nopeusero kaistanvaihtotapahtuman jälkeen. Lisäksi merkittiin ylös se, tuliko ajoneuvo eteen oikealta vai vasemmalta puolelta.

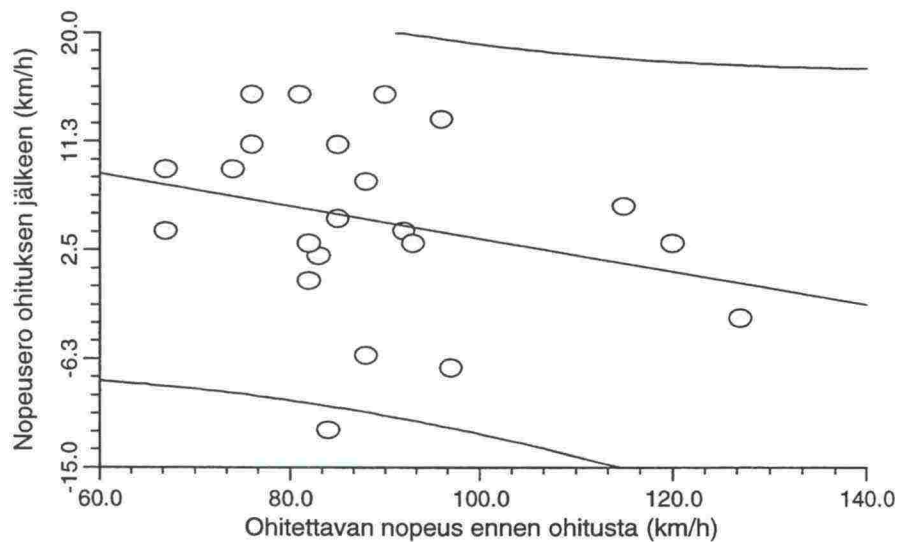
Parametrien väliset riippuvaisuudet

Tutkittiin, löytyikö parametrien väliltä korrelaatioita. Tämä tehtiin erikseen oikealta ja vasemmalta tapahtuneille kaistanvaihdolle. Ainoastaan etäisyyden ja aikavälin, jolle ohittaja tulee ohitettavan ajoneuvon eteen, väliltä löytyi selvä riippuvaisuussuhde (taulukko 1), mikä onkin luonnollista suureiden määritelmien perusteella. Muiden parametrien välillä ei korrelaatiota näyttänyt olevan, kuten taulukosta 1 ja kuvista 26 – 31 voidaan havaita.

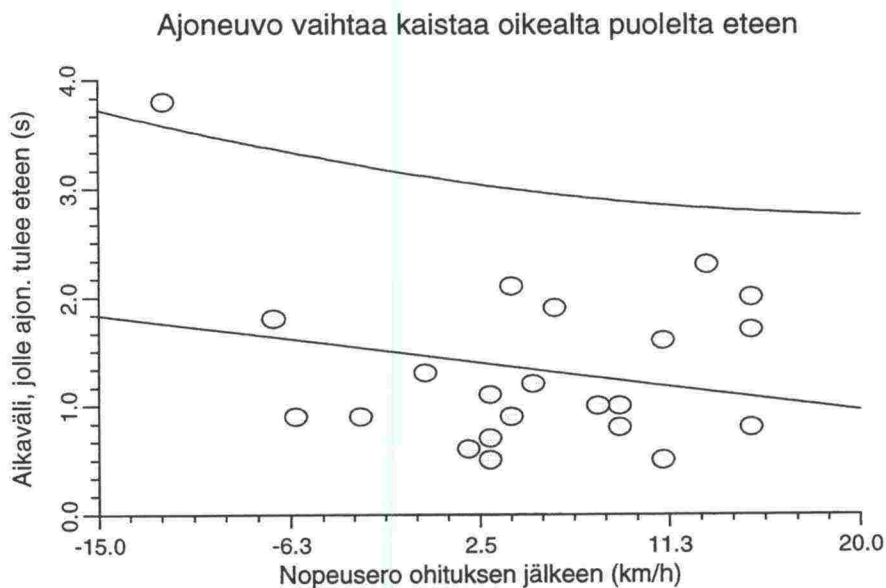
Taulukko 1. Parametrien (aikaväli ja etäisyys, jolla ohittaja tuli ohitettavan eteen, nopeusero kaistanvaihtotapahtuman jälkeen ja ohitettavan 10 sekunnin keskinopeus ennen kaistanvaihtotilannetta) väliset korrelaatiot vasemmalta ja oikealta tapahtuvissa ohituksissa.

Ohitus		aikaväli	etäisyys	nopeusero
vasemmalta	etäisyys	0,94		
	nopeusero	0,27	0,34	
	ohitettavan nopeus	-0,01	0,32	0,29
oikealta	etäisyys	0,97		
	nopeusero	-0,24	-0,26	
	ohitettavan nopeus	-0,01	-0,21	-0,28

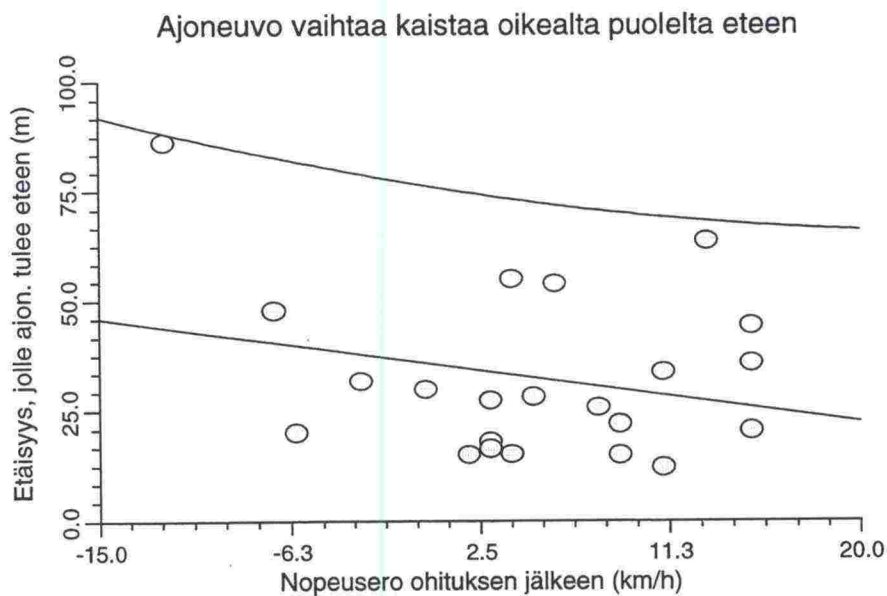
Ajoneuvo vaihtaa kaistaa oikealta puolelta eteen



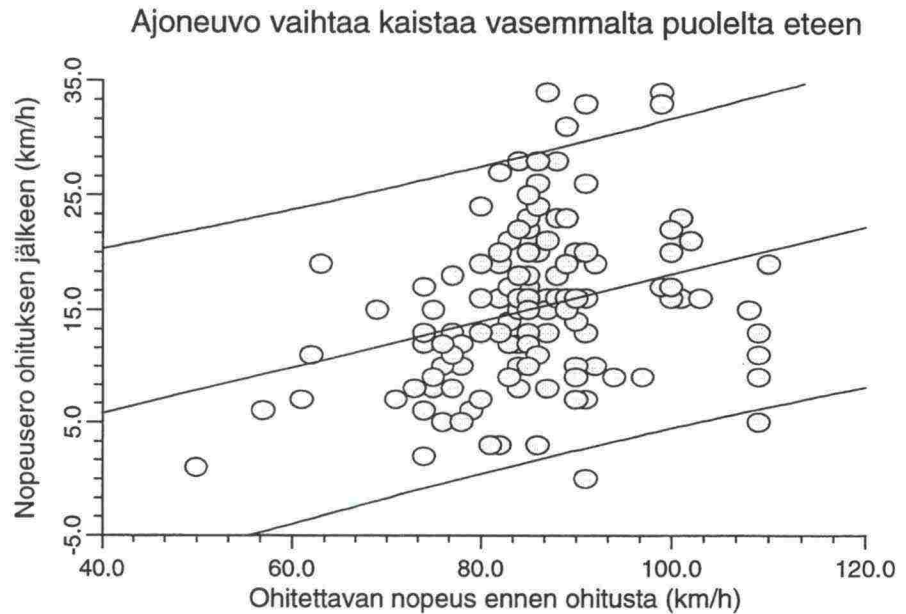
Kuva 26. Ohitettavan ja ohittajan välinen nopeusero ohituksen jälkeen ohitettavan ennen ohitusta ajaman nopeuden funktiona. Kuvassa havaintopisteet, regressiosuora ja sen 95 prosentin luottamusväli.



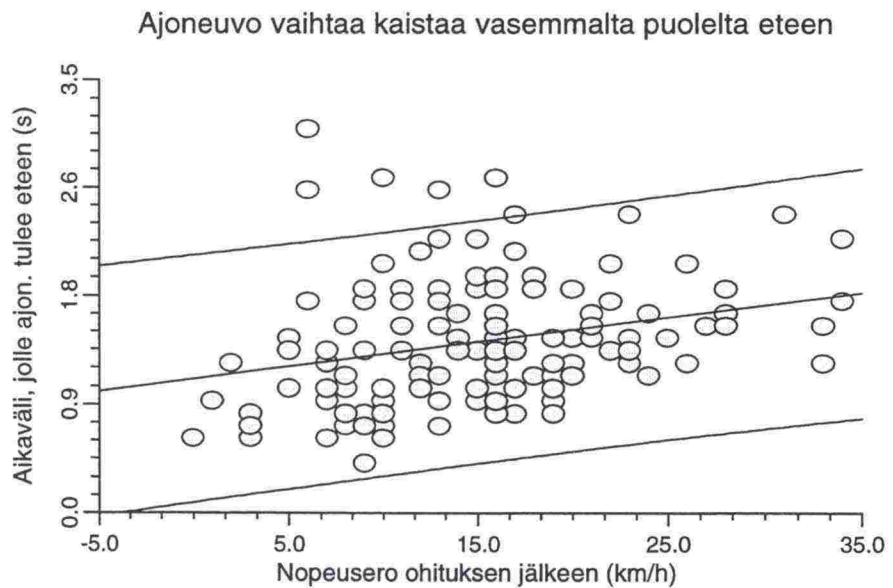
Kuva 27. Nettoaikaväli, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona. Kuvassa havaintopisteet, regressiosuora ja sen 95 prosentin luottamusväli (yläraja).



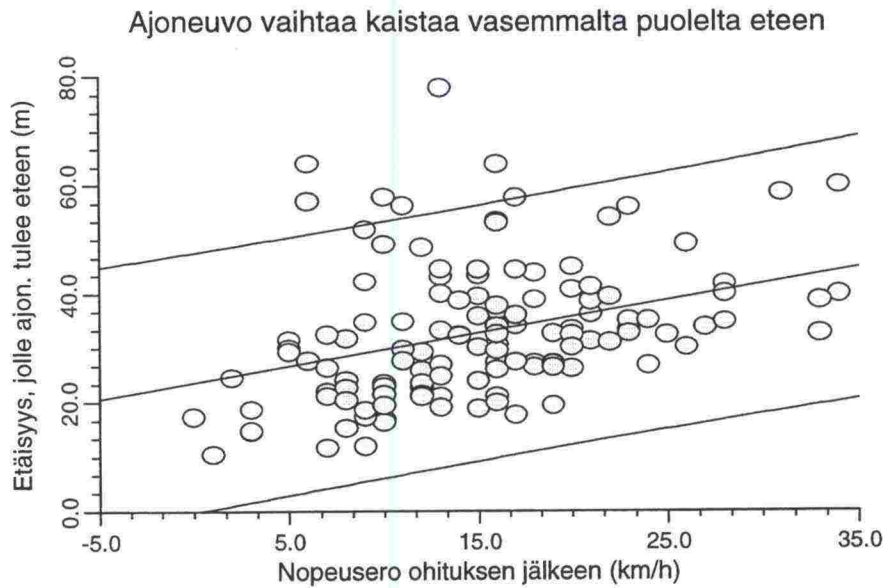
Kuva 28. Etäisyys, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona. Kuvassa havaintopisteet, regressiosuora ja sen 95 prosentin luottamusväli (yläraja).



Kuva 29. Ohitettavan ja ohittajan välinen nopeusero ohituksen jälkeen ohitettavan ennen ohitusta ajaman nopeuden funktiona. Kuvassa havaintopisteet, regressiosuora ja sen 95 prosentin luottamusväli.



Kuva 30. Aikaväli, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona. Kuvassa havaintopisteet, regressiosuora ja sen 95 prosentin luottamusväli.

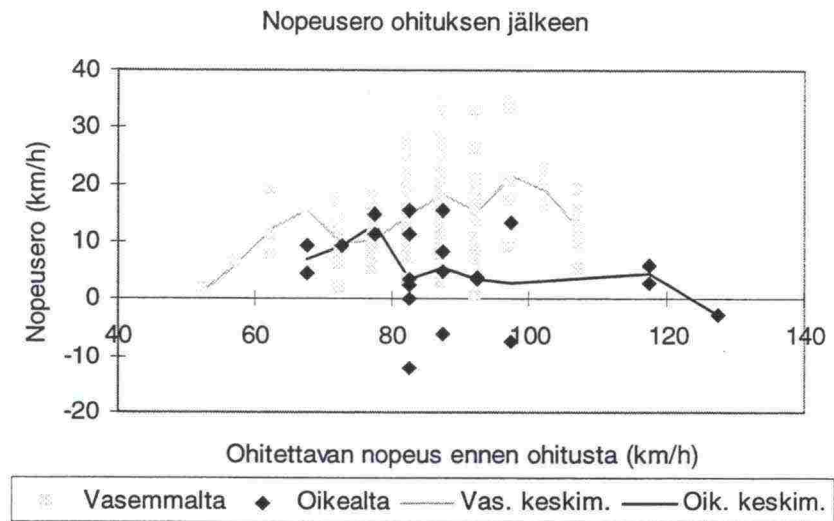


Kuva 31. Etäisyys, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona. Kuvassa havaintopisteet, regressiosuora ja sen 95 prosentin luottamusväli.

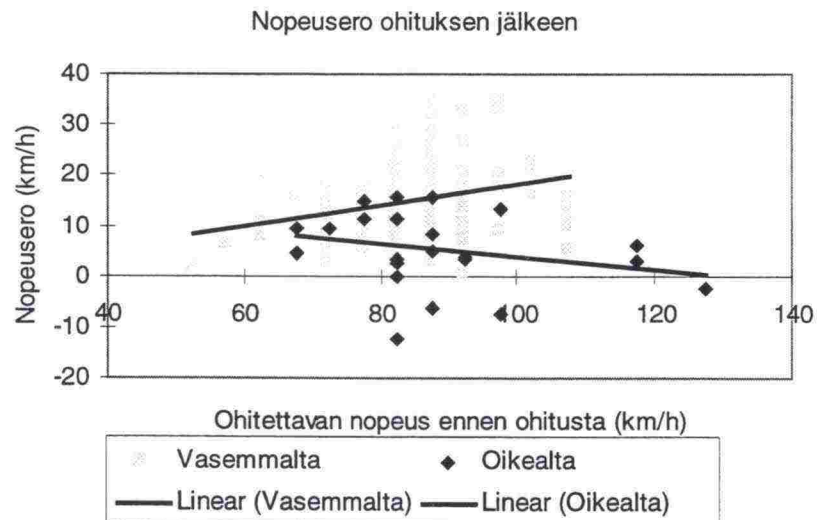
Oikealta ja vasemmalta tapahtuneiden ohitusten väliset erot

Havainnot jaoteltiin ohitettavan ajoneuvon ennen ohitusta ajaman nopeuden, ohituksen jälkeisen ohittajan ja ohitettavan välisen nopeuseron sekä etäisyyden, jolle ohittaja tulee ohitettavan eteen, mukaisesti. Kullekin havaintoryhmälle määritettiin keskiarvokäyrä ja havaintoihin sovitettiin regressiosuora havaintojen painopisteen havainnollistamiseksi. Näin päästiin tarkastelemaan, oliko vasemmalta ja oikealta tapahtuvien kaistanvaihtojen välillä eroja. On kuitenkin hyvä muistaa, että oikean puolen kaistanvaihtotapahtumien vähyys on varmasti vaikuttanut tuloksiin.

Kun kaistanvaihtotapahtuman jälkeisiä nopeuseroja tarkasteltiin ohitettavan ohitusta edeltäneen keskinopeuden funktiona, tuntui sillä, kummalta puolelta eteen tultiin, olevan suuri merkitys. Vasemmalta puolelta kaistaa vaihtavien nopeusero ohitettavaan verrattuna oli suurempi kuin oikealta puolelta kaistaa vaihtavilla (kuva 32). Vasemmalta puolelta kaistaa vaihtavien nopeuserossa ohitettavaan nähden oli lisäksi havaittavissa nouseva trendi, kun taas vastaavasti oikealta kaistaa vaihtavien nopeuseron trendi tuntui olevan laskeva (kuva 33).



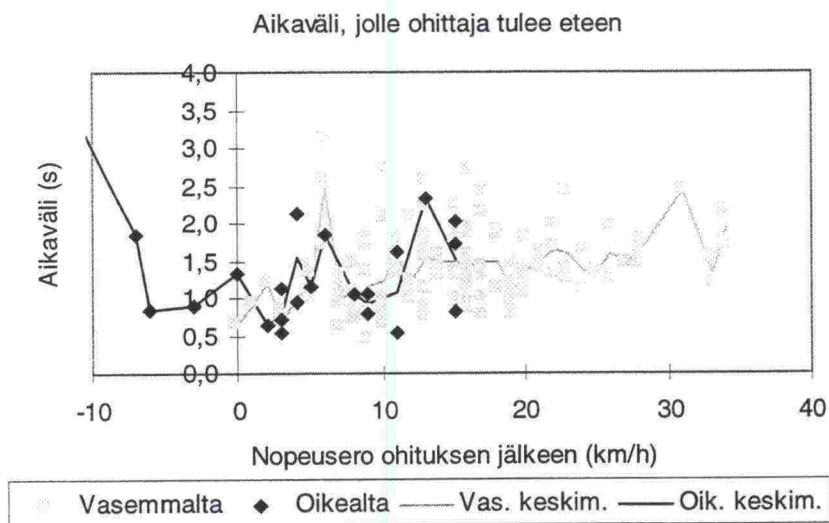
Kuva 32. Ohitettavan ja ohittajan välinen nopeusero ohituksen jälkeen ohitettavan ennen ohitusta ajaman nopeuden funktiona siten, että nopeushavainnot on jaoteltu ohitettavan ajoneuvon ennen ohitusta ajaman nopeuden mukaisesti 5 km/h välein. Kuvassa ryhmitellyt havainnot ja niiden keskiarvokäyrät.



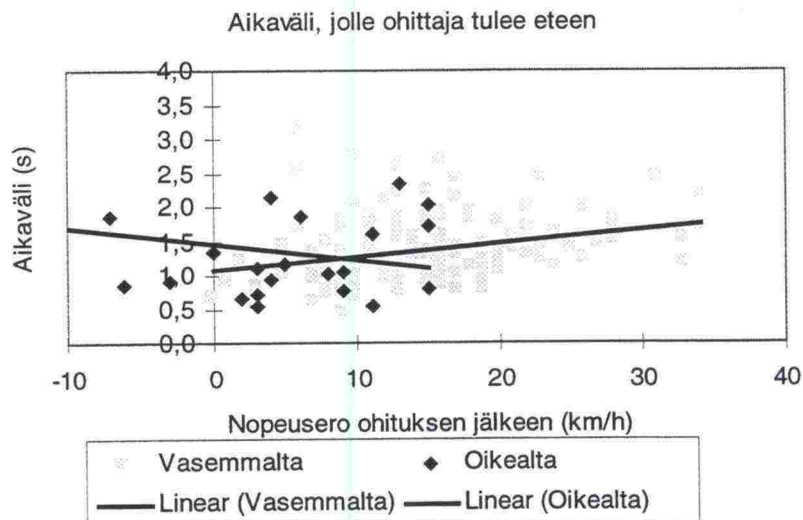
Kuva 33. Ohitettavan ja ohittajan välinen nopeusero ohituksen jälkeen ohitettavan ennen ohitusta ajaman nopeuden funktiona siten, että nopeushavainnot on jaoteltu ohitettavan ajoneuvon ennen ohitusta ajaman nopeuden mukaisesti 5 km/h välein. Kuvassa ryhmitellyt havainnot ja niiden regressiosuorat.

Kun tarkasteltiin aikaväliä, jolle ohittava ajoneuvo tuli ohitettavan eteen, ohittajan ja ohitettavan ajoneuvon välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona, voitiin havaita regressiosuorien samankaltaisuus (kuva 35). Myös keskiarvokäyrät kulkivat lomittain (kuva 34). Jos tarkasteltiin keskiarvokäyristä ainoastaan väliä, josta molemmissa otoksissa oli havaintoja, voitiin havaita vasemmalta puolelta kaistaa vaihtaneiden aikaväleissä, jolla he tulivat ohitettavan ajoneuvon eteen, lievä nouseva trendi. Vastaava trendi näytti oikealta kaistaa vaihtavilla olevan lievästi laskeva. Näiden trendisuorien saattoi voida kuvitella leikkaavan noin nopeuserotason 9 km/h kohdalla. Tällöin siis nopeuseroilla alle 9 km/h aikaväli oli

oikealta kaistaa eteen vaihtavilla suurempi kuin vasemmalta vaihtavilla. Nopeuseroilla yli 9 km/h tilanne oli päinvastainen. Vasemmalta kaistaa vaihtava meni siis aikavälinä tarkasteltuna kauemmas ohitettavasta, kun nopeusero kasvoi. Oikealta kaistaa vaihtavilla tilanne oli päinvastainen.



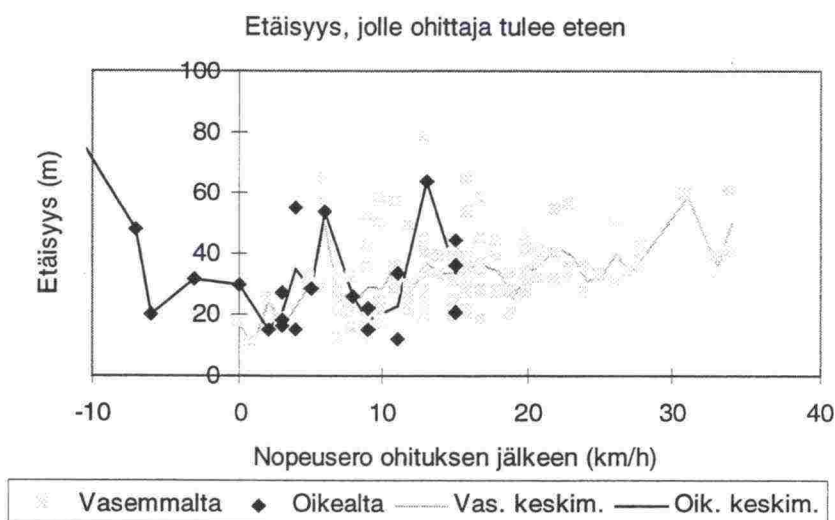
Kuva 34. Aikaväli, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona siten, että nopeuserohavainnot on jaoteltu 1 km/h välein. Kuvassa ryhmitellyt havainnot ja niiden keskiarvokäyrät.



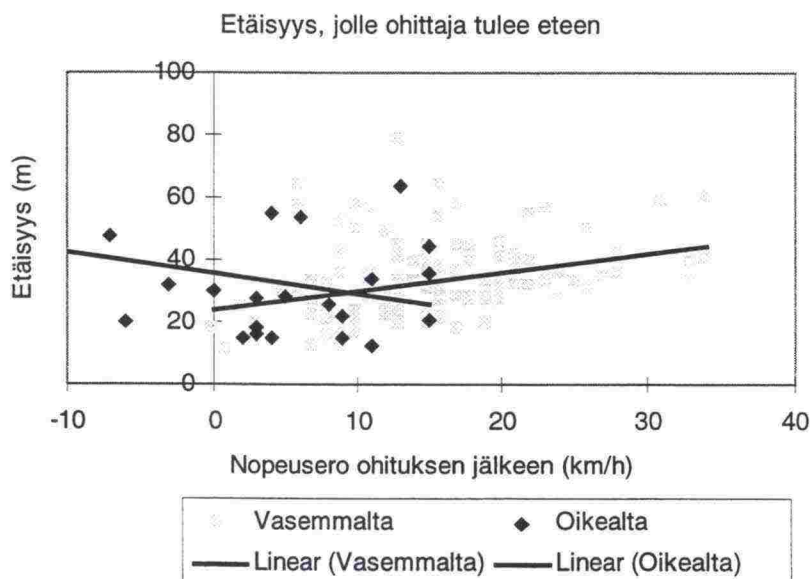
Kuva 35. Aikaväli, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona siten, että nopeuserohavainnot on jaoteltu 1 km/h välein. Kuvassa ryhmitellyt havainnot ja niiden regressiosuorat.

Kun tarkasteltiin etäisyyttä, jolle ohittava ajoneuvo ohituksen jälkeen tuli ohitettavan eteen, ohittavan ja ohitettavan ajoneuvon ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona voitiin havaita edellä mainitun kaltainen regressiosuorien yhtäläisyys (kuva 37). Myös keskiarvokäyrät kulkivat lomittain (kuva 36). Jos tarkasteltiin

regressiosuorista ainoastaan väliä, jolta molemmissa otoksissa oli havaintoja, voitiin oikealta kaistaa vaihtavien etäisyyksissä, jolle he tulivat koeauton eteen, havaita aivan vastaavalla tavalla laskeva trendi ja vasemmalta puolelta kaistaa vaihtavilla nouseva trendi. Myös näiden trendilinjojen saattoi kuvitella leikkaavan noin nopeuseron 9 km/h kohdalla. Tätä alhaisemmilla nopeuksilla vasemmalta eteen tuleva ajoneuvo siis tuli keskimäärin lähemmäksi ohitettavan eteen kuin oikealta tuleva ja nopeuksilla yli 9 km/h tilanne oli päinvastainen.



Kuva 36. Etäisyys, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona siten, että nopeusero-havainnot on jaoteltu 1 km/h välein. Kuvassa ryhmitellyt havainnot ja niiden keskiarvokäyrät.

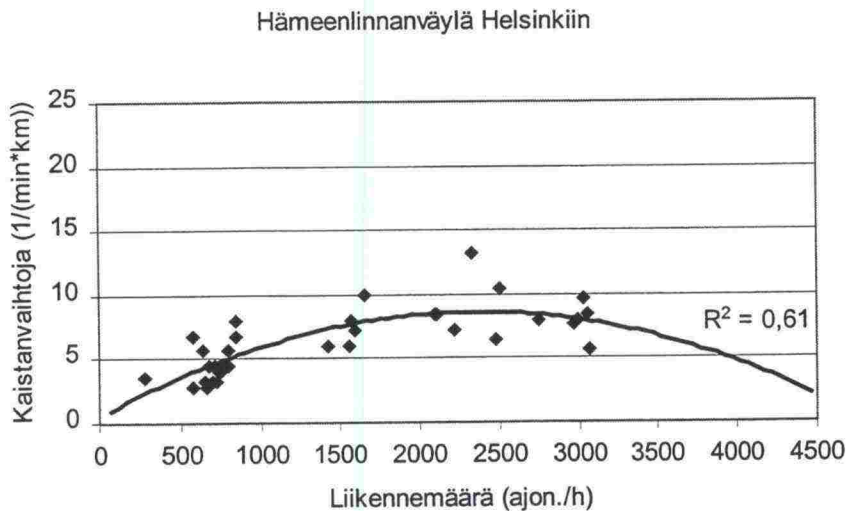


Kuva 37. Etäisyys, jolle ohittava ajoneuvo tulee ohitettavan eteen, ohitettavan ja ohittajan välisen ohituksen jälkeisen nopeuseron funktiona siten, että nopeusero-havainnot on jaoteltu 1 km/h välein. Kuvassa ryhmitellyt havainnot ja niiden regressiosuorat.

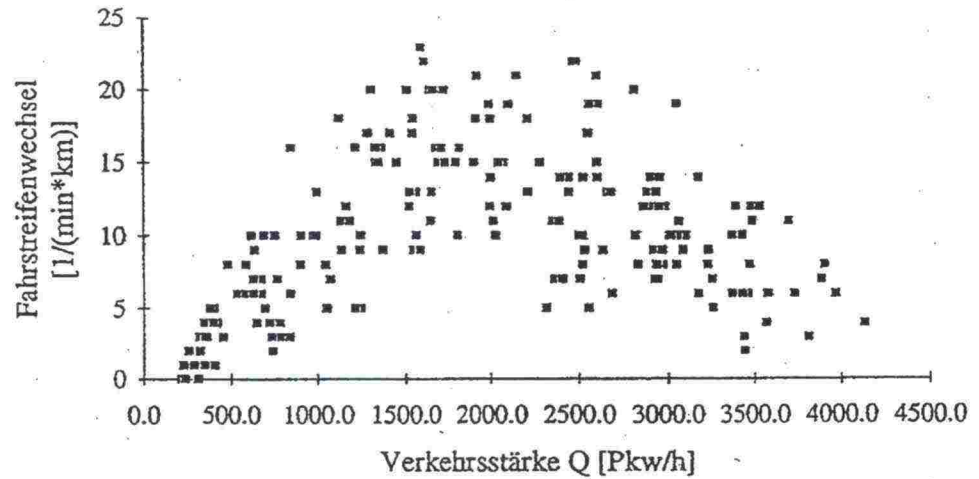
7.3 Makroskooppinen tarkastelu

Kaistanvaihtojen määrää tutkittiin makroskooppisella tasolla kuvaamalla moottoriteliikennettä tien pituussuunnassa yläviistosta siten, että voitiin havainnoida kaistanvaihtojen määrät (kilometriä ja minuuttia kohden) ja liikennemäärät viiden minuutin jaksoissa. Kuvauspaikkoja olivat Lahdenväylä Jakomäen kevyen liikenteen sillalta, Länsiväylä Maamonlahden sillalta ja Hämeenlinnanväylä Keimolan kevyen liikenteen sillalta. (Liite 1)

Ainoastaan Hämeenlinnanväylältä Helsingin suuntaan löytyi havaintoja riittävän suurelta liikennemäärän vaihteluväliltä, jotta havainnoista voisi tehdä johtopäätöksiä. Tähän havaintojoukkoon (kuva 38) näyttäisi sopivan toisen asteen käyrä. Käyrän selitysasteeksi saatiin 61 prosenttia. Toisen asteen käyrä tuntuu kuitenkin järkevältä: pienellä liikennemäärällä kaistanvaihtoja ei juuri tapahdu, mutta kun liikennemäärä lähtee kasvamaan, kasvaa kaistanvaihtojen määrä kunnes liikennemäärä on niin suuri, ettei kaikkia haluttuja kaistanvaihtoja enää voida suorittaa ja lopulta liikennemäärä on niin suuri, että kaistanvaihtojen suorittaminen tulee mahdottomaksi. Kuvan 38 havaintopisteet vastaavat hyvin saksalaisia tutkimustuloksia (Rekersbrink 1995), jotka on esitetty kuvassa 39.



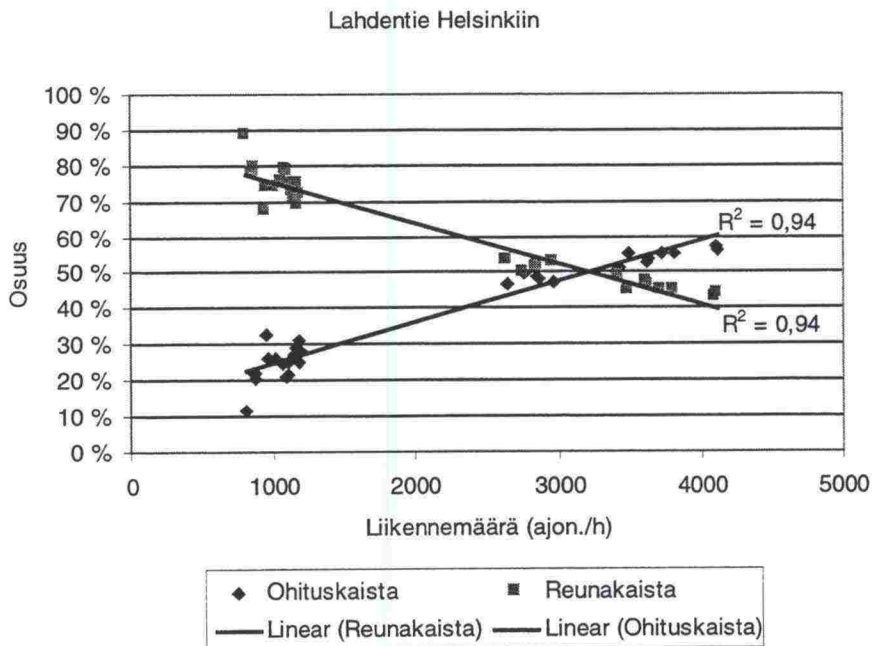
Kuva 38. Kaistanvaihtojen määrä (kv/(min*km)) Hämeenlinnanväylällä Helsingin suuntaan liikennemäärän (ajon./h) funktiona. Kuvassa havaintopisteet, niihin sovitettu toisen asteen regressiokäyrä ja sen sovitussaste.



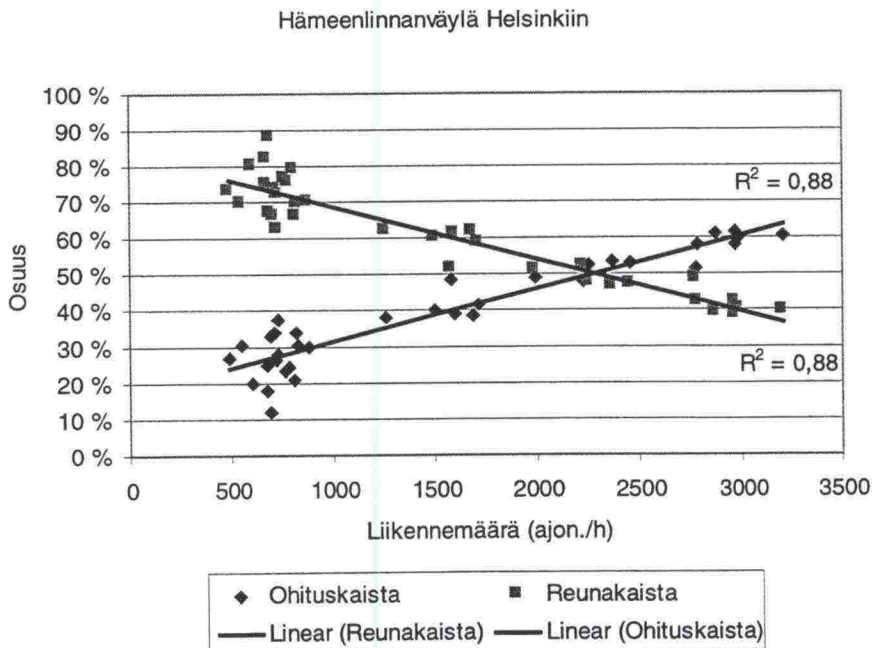
Kuva 39. Kaistanvaihtojen määrä (kv/(min*km)) liikennemäärän (ajon./h) funktiona (Rekersbrink 1995).

Kaistajakaumista ja kaistanvaihtomääristä ja tehtiin myös kappaleen 2 mukainen tarkastelu (Wemple ym. 1991). Ensin selvitettiin kaistoittaiset osuudet kokonaisliikennemäärästä. Ainoastaan Lahdentien ja Hämeenlinnanväylän Helsingin suunnilla oli havaintoja riittävän suurelta kokonaisliikennemäärän vaihteluväliltä. Näissä aineistoissa myös regressiosuoran selitysaste oli korkea.

Tulokset eroavat kappaleen 2 amerikkalaisista tuloksista. Yhdysvalloissa kaksi-kaistaisen moottoritien kaistajakauma on suunnilleen 50 ja 50 prosenttia, kun taas Helsingin seudulla reunakaistan liikennemäärä on pienillä liikennemäärillä jopa yli 80 prosenttia (kuvat 40 ja 41). Lahdentiellä kaistojen painopiste muuttui toisinpäin noin liikennemäärän 3 300 ajon./h ja Hämeenlinnanväylällä noin liikennemäärän 2 300 ajon./h kohdalla. Näitä suuremmilla liikennemäärillä ohituskaistan osuus kokonaisliikennemäärästä oli yli puolet.



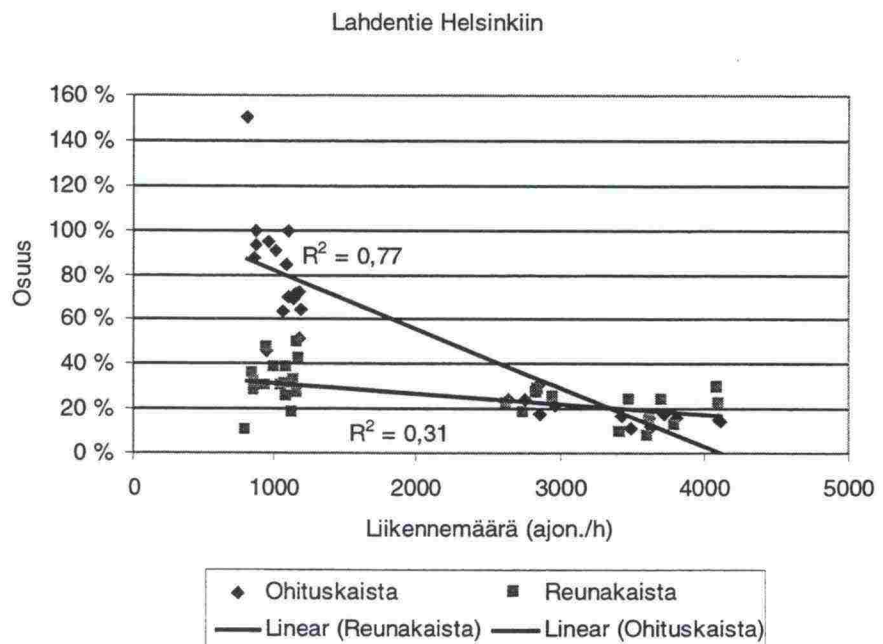
Kuva 40. Kaistajakauma Lahdentiellä Helsingin suunnalla kokonaisliikennemäärän funktiona. Kuvassa havaintopisteet ja niihin sovitettu regressiosuora selityksasteineen.



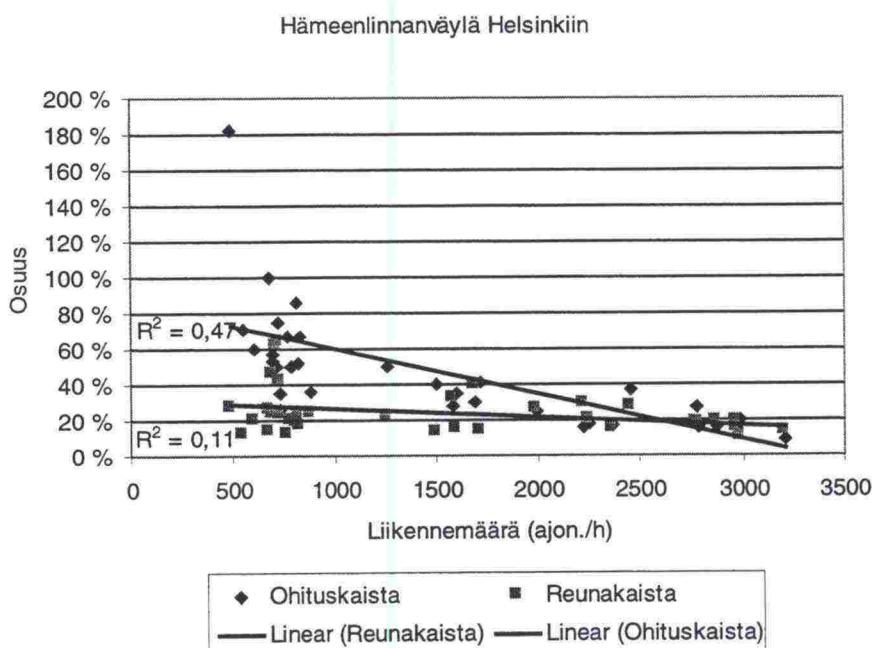
Kuva 41. Kaistajakauma Hämeenlinnanväylällä Helsingin suunnalla kokonaisliikennemäärän funktiona. Kuvassa havaintopisteet ja niihin sovitettu regressiosuora selityksasteineen.

Myös kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuudet selvitettiin kaistoittain (kuvat 42 ja 43). Näitä tuloksia ei voi verrata suoraan kappaleessa 2 esitettyihin amerikkalaisiin lukuihin, koska Wemplen ym. (1991) artikkelissa kaistanvaihtojen määrä oli ilmoitettu 600 jalkaa (noin 183 metriä) ja tässä kilometriä kohti. Lisäksi vertai-

lua haittaa se, että artikkelissa käsiteltiin vain kolmi- ja nelikaistaisten moottori-
teiden kaistanvaihtomääriä. Wemplen ym. ilmoittama alle 6 prosentin 600 jalan
matkalla kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuus on kilometriä kohti muutettuna
alle 33 prosentin osuus ajoneuvoista. Nyt saadut tulokset ovat reunakaistalla
samaa suuruusluokkaa, mutta ohituskaistalla kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen
osuus on pienillä liikennemäärillä huomattavasti suurempi. Eroa voitaneen selit-
tää erilaisilla kaistajakaumilla.



Kuva 42. Kaistalta pois vaihtaneiden osuudet Lahdentiellä Helsingin suunnalla
kokonaisliikennemäärän funktiona. Kuvassa havaintopisteet ja niihin sovitettu
regressiosuora selitysasteineen.



Kuva 43. Kaistalta pois vaihtaneiden osuudet Hämeenlinnanväylällä Helsingin suunnalla kokonaisliikennemäärän funktiona. Kuvassa havaintopisteet ja niihin sovitettu regressiosuora selityksasteineen.

Vähätalo (1980) on selvittänyt nelikaistaisen moottoritien kaistajakaumaa liittymien välillä Helsingin seudulla. Hän sovitti havaintoihinsa nopeusrajoitusalueelta 120 km/h mallin, joka kuvaa ensimmäisen kaistan osuutta kokonaisliikennemäärästä. Tämä 20 vuotta vanhaan aineistoon perustuva tulos eroaa nyt saadusta selvästi: pienillä liikennemäärillä reunakaistan osuus on nykyään pienempi kuin ennen ja suurilla liikennemäärillä tilanne on päinvastainen. Vähätalon tulokset eivät kuitenkaan kumoa nyt saatuja tuloksia eikä osoita niitä vääriksi. Tulosten välinen ero viittaa pikemminkin siihen, että 20 vuodessa autoilijoiden ajotapa on muuttunut.

8 PÄÄTELMÄT

Tehdyn selvityksen kappaleiden 2 - 6 avulla saadaan kuvaa siitä kirjosta, jolla kaistanvaihtoa voidaan mallintaa. Mallit voivat olla joko makroskooppisia, jolloin ne kuvaavat kokonaistilannetta kaistanvaihtojen määrästä, suuntautumista jne., tai mallit voivat olla mikroskooppisia, jolloin ne kuvaavat yksittäisen ajoneuvon kaistanvaihtokäyttäytymistä. Kaistanvaihtamisen mallintamiseen on lisäksi olemassa useita eri lähestymistapoja: mallit voivat olla matemaattisia, perustua ihmisen käyttäytymiseen jne. Myös kulloiseenkin tapaukseen sopivan, riittävän hyvän mallin tarkkuusaste vaihtelee simulointimallin sovellusalueen mukaan. Kun kaistanvaihtojen mallintamisen tapaa siis lähdetään valitsemaan, on tärkeää tuntea simulointiohjelman käyttötarkoitus ja ymmärtää rajoitukset, jotka valittu kaistanvaihtomalli ohjelmalle asettaa.

Tämä selvitys on osa isompaa projektia, jonka tarkoitus on laajentaa Teknillisen korkeakoulun liikennelaboratoriossa kehitetyn HUTSIM-simulointiohjelman sovellusalueita moottoritieympäristöön. HUTSIM perustuu sääntöpohjaiseen dynamiikkaan (Kosonen 1996), minkä takia kehitystyön pohjalle kannattaisi valita kappaleessa 3 esitellyn kaltainen päätöspuuhun perustuva kaistanvaihtomalli. Myös kappaleessa 6.4 esitetty kohteliaan kuljettajan käsite ja soveltamistapa vaikuttavat HUTSIMiin sopivilta (Innamaa 1997).

Nyt tehdyn selvityksen tuloksena opittiin erilaisista kaistanvaihtoon liittyvistä parametreista sekä kevyen ja raskaan ajoneuvon ohitusten välisistä eroista. Lisäksi kävi ilmi, että kotimainen tutkimus on perusteltua jatkossakin, koska ainakin Yhdysvalloissa kaistanvaihtokäyttäytyminen eroaa huomattavasti vastaavasta suomalaisesta käyttäytymisestä. Nyt tehty selvitys opetti kaistanvaihtojen tutkimisesta ja siinä tarvittavista tutkimusmenetelmistä sekä antoi ideoita jatkotutkimuksiin.

Tämän selvityksen pohjalta saadut tiedot ovat tärkeitä ja mielenkiintoisia jo sellaisenaan ja ne soveltuvat kaistanvaihtomallien kalibrointiin suomalaisiin olosuhteisiin. Mallin validointiin voidaan myös suoraan käyttää kerättyjä makrotason tietoja kaistanvaihtojen määrästä ja kaistajakaumista. Ennen kuin mikrotason tietoja kuitenkaan voidaan suoranaisesti soveltaa simulointimalliin, täytyy rakentaa itse päätöspuu eli selvittää syitä, miten ja miksi kaistanvaihto tapahtuu tai jää tapahtumatta. Tällaista päätöspuuta ei tämän tutkimuksen perusteella vielä voi tehdä ja asian selvittämiseen soveltuisi ehkä parhaiten koekuljettajien haastattelututkimus.

Tähän selvitykseen liittyvissä kenttätutkimuksissa esille saatuja seikkoja tulisi selvittää tarkemmin suuremmalla aineistomäärällä. Nyt on saatu estimaatit parametrien suuruusluokasta, mutta näiden tarkentamiseksi otoskokoja pitäisi kasvattaa. Havaintoja olisi myös tärkeää saada suuremmalta liikennemäärän vaihteluväliltä, erilaisilta sää- ja keliolosuhteilta sekä heterogeenisemmalta koekuljettaja-aineiksesta.

Tehty selvitys kuvaa kaistanvaihtoa moottoritien linjaosuuksilla, eli pääosin vapaaehtoista kaistanvaihtoa. Oma selvityksenalansa ja jatkotutkimuskohde olisivat pakotetut kaistanvaihdot, joita olisi helpointa selvittää ramppien ja liittymäalueiden läheisyydessä.

9 YHTEENVETO

9.1 Kaistanvaihtomallit

Tämän selvityksen alussa on kuvattu erilaisia tapoja mallintaa kaistanvaihtoa moottoriteillä. Kaistanvaihto on olennainen osa autoilijan käyttäytymistä moottoriteillä ja tämän takia kaistanvaihtokäyttäytymisen oikeanlainen mallintaminen on tärkeä osa mikroskooppista moottoriteliikenteen simulointia. Mikrotason tietoja tarvitaan mikroskooppisen kaistanvaihtomallin rakentamiseen, mutta tämän lisäksi mallin validointia varten tarvitaan myös makroskooppisia tietoja kaistanvaihtojen määristä ja oikeista kaistajakaumista.

Wemple ym. (1991) on kehittänyt makroskooppisen kaistamallin, joka ennustaa moottoriteille liikennevirran ominaisuudet ramppien ja suurimpien sekoittumisalueiden läheisyydessä. Malli perustuu kaistakohtaisiin liikenne- ja kaistanvaihtolaskentoihin kolmen erityyppisen moottoritien linjaosuuksilla. Mallin avulla voidaan ennustaa liikenteen jakautuminen kaistoille ja kaistaa vaihtavien ajoneuvojen osuudet kaksi-, kolmi- tai nelikaistaisella moottoriteillä suunnan kokonaisliikennemäärän funktiona.

Young, Taylor ja Gipps (1989) ovat kehittäneet kaistanvaihdolle kuljettajan käyttäytymiseen perustuvan mallin. Heidän mallissaan kuljettajan käyttäytymiselle on kolme vaihtoehtoa ja kuljettajan käyttäytyminen määräytyy sen etäisyyden mukaan, jonka jälkeen hän on kääntymässä pois väylältä. Jos kääntymiseen on vielä aikaa, se ei vaikuta kaistanvaihtopäätökseen ja kuljettaja keskittyy säilyttämään tavoitenopeatensa. Kun kääntymisetäisyys on määritellyllä keskietäisyydellä, kuljettajat alkavat hylätä mahdollisuuksia parantaa nopeuttaan, jos tämä vaatii kaistanvaihtoja "väärään" suuntaan. Kun kuljettaja lähestyy kohtaa, josta hänen on käännettävä, hän yrittää pysyä kaistalla, joka on oikean reitin kannalta paras. Näin kuljettaja pyrkii siihen, että hän on kääntymisajankohdan läheisyydessä oikealla kaistalla valmiina kääntymään. Kun kaistanvaihdon hetki sitten koittaa, kuljettaja on kiinnostunut ainoastaan oikeasta kaistasta eikä nopeudella ole mitään merkitystä. Käyttäytymismallin vaihtuminen on liukuvaa eikä mallilla ole jäykkiä etäisyysrajoja käyttäytymisen muuttumiseen.

Levinin (1976) kaistanvaihtomalli käyttää aikavälin hyväksymiskäsitettä arvioidessaan todennäköisyyttä, että ajoneuvo vaihtaa kaistaa tietyn etäisyyden sisällä erilaisissa liikenneolosuhteissa. Levinin kaistanvaihtoprosessi koostuu seuraavista kolmesta vaiheesta: riittävän pitkän aikavälin etsimisestä, ajoneuvon sijoittamisesta siten, että sen sijainti suhteessa hyväksyttävään aikaväliin on sellainen, että kaistanvaihto voidaan toteuttaa, ja kaistan vaihtamisesta. Kaistanvaihtopäätökseen vaikuttavat kohdekaistalla edessä hitaammin liikkuvan ajoneuvon nopeus ja sen suhde oman ajoneuvon nopeuteen, oma nopeus ja toimintatapa sekä omat aikavälin hyväksymiseen liittyvät ominaisuudet.

Ahmedin ym. (1996) kaistanvaihtomalli on dynaaminen diskreetti valintamalli, joka ottaa huomioon kuljettajapopulaation heterogeenisuuden ja hylättyjen aikavälien välisen riippuvaisuuden. Kaistanvaihto on mallinnettu kolmen askeleen sarjana: päätöksenä vaihtaa kaistaa, vasemman tai oikean kaistan valitsemisena ja hyväksyttävissä olevan aikavälin etsimisenä. Mallissa kuljettajan aikavälin hy-

väksymiseen vaikuttavat aikavälin pituuden lisäksi muun muassa suhteellinen nopeus, etäisyys siihen pisteeseen, jossa kaistanvaihto on viimeistään suoritettava, ja viive päävirtaan sulautumisessa. Pakollinen ja vapaaehtoinen kaistanvaihto on käsitelty erikseen. Ahmedin ym. mallista voidaan tehdä myös yksinker- taistuksia kuvaamaan kaistanvaihtoa, jossain tietyssä erikoistilanteessa.

Edellä mainittujen mallien lisäksi tässä selvityksessä on esitelty neljän mikros- kooppisen liikenteensimulointiohjelman ratkaisu kaistanvaihto-ongelman mallin- tamiseen. HUTSIMissä kaistanvaihtopäätös perustuu minimiaikaan kaistalla, ta- voitenopeuteen, edellä ajavan ajoneuvon aiheuttamaan ajovastukseen ja minimi- aikaväliin, INTEGRATIONissa ajonopeuksiin kullakin vaihtoehtokaistalla ja mini- miaikaan kaistalla sekä INTRASissa tavoitenopeuteen, ajonopeuksiin, aikavälei- hin ja maksimikiihdytyksiin. AIMSUN2ssa on käytetty australialaista Gippsin mal- lia.

9.2 Kenttäselvitys

Kaistanvaihtoa selvitettiin tutkimalla kaistanvaihtotapahtumaan liittyviä paramet- rejä koekuljettajien avulla ja muiden autoilijoiden kaistanvaihtokäyttäytymistä tarkkailemalla. Makroskooppisia tietoja kaistanvaihtojen määrästä ja kaistajakau- mista hankittiin kuvaamalla moottoritieliikennettä suoralla linjaosuudella.

Koekuljettajille tehdyn kokeen tuloksena saatiin havaintoja ohittajan ja ohitetta- van nopeudesta sekä heidän nopeuserostaan ennen ohitusta, nopeuserosta ja ohitettavan nopeuden muutoksesta ohituksen aikana, etäisyydestä ja aikavälistä, jolla ajoneuvo lähti ohittamaan toista, etäisyydestä, jolle omalle kaistalle palattiin, sekä ohitettavien ajoneuvojen aikaväleistä, kun samalla kertaa ohitettiin useampi ajoneuvo. Havainnot ryhmiteltiin ohitettavan ajoneuvon tyyppin (raskas tai kevyt) mukaan.

Kaistanvaihtoparametrien välisiä riippuvaisuuksia selvitettiin tarkkailemalla mui- den autoilijoiden kaistanvaihtokäyttäytymistä. Parametreinä oli ohitetun ajoneu- von 10 sekunnin keskinopeus ennen kaistanvaihtotilannetta, etäisyys ja aikaväli, jolla ohittava ajoneuvo tuli kaistaa vaihtaessa eteen, sekä nopeusero kaistan- vaihtotapahtuman jälkeen. Havainnot ryhmiteltiin sen mukaan, tapahtuiko ohitus oikealta vai vasemmalta. Tuloksena nähtiin parametrien väliset korrelaatiot tai sen puute sekä oikealta ja vasemmalta tapahtuvien ohitusten väliset erot.

Makroskooppisessa tarkastelussa selvitettiin kaistajakauumat sekä kaistaa vaihta- neiden määrät ja kaistoittaiset osuudet liikennemäärän funktiona. Kaistaa vaihta- neiden määrät määriteltiin kilometriä kohti minuutissa. Vertailussa kaistanvaihto- määrien todettiin vastaavan saksalaisia tutkimuksia, mutta kaistajakauuma ja kaistaa vaihtaneiden ajoneuvojen osuudet poikkesivat yhdysvaltalaisista tulok- sista.

LÄHDELUETTELO

van Aerde M, Hellinga B, Baker M, Rakha H (1996). INTEGRATION: An Overview of Traffic Simulation Features. A Paper Accepted for Presentation at the 1996 Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C. 1996. 14 s.

Ahmed K I, Ben-Akiva M E, Koutsopoulos H N, Mishalani R G (1996). Models of Freeway Lane Changing and Gap Acceptance Behavior. Transportation and Traffic Theory. Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Lyon, France, 24-26 July 1996. s. 501 - 515.

Analytical Software (1994). Statistix Version 4.1, User's Manual. 330 s.

Barceló J, Ferrer J L (1997). An Overview of AIMSUN2 Microsimulator. Department of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya. 13 s.

Innamaa S (1997). Moottoriteliikenteen mallintaminen – mikroskooppinen simulointi ja liikennevirran peruskuvaukset. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio. 142 s.

Kosonen I (1996). HUTSIM – Simulation Tool for Traffic Signal Control Planning. Lisensiaatintyö. Julkaisu 89, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, Espoo. 121 s.

Laininen P (1987). Tilastollisia kaavoja, taulukoita ja sanasto. Research Reports B11, Teknillinen korkeakoulu, Systeemianalyysin laboratorio, Espoo. 40 s.

Levin M (1976). Freeway Lane-Changing Process: a Microscopic Approach (Abridgment). Transportation Research Record 596. Washington DC, USA. s. 30 - 32.

Milton J S, Arnold J C (1986). Probability and Statistics in the Engineering and Computing Sciences. International Edition. McGraw-Hill Book Company, New York. 643 s.

Pursula M, Silfverberg B (1997). Mikrosimuloinnin kehittäminen, esimerkkinä Kehä III. Alustava tutkimusohjelma 03.01.1997. 16 s.

Rekersbrink A (1995). Mikroskopische Verkehrssimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic. Straßenverkehrstechnik 2/95. s. 68 – 74.

Vähätalo L (1980). Nelikaistaisen moottoritien kaistajakauma liittymien välillä. Liikennetekniikan erikoistyö. Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, Espoo. 34 s.

Wemple E A, Morris A M, May A D (1991). Freeway Capacity and Flow Relationships. Highway Capacity and Level of Service. Proceedings of the International Symposium on Highway Capacity, Karlsruhe, Germany, 24-27 July 1991. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands. s. 439 - 455.

Wicks D A, Lieberman E B (1980). Development and Testing of INTRAS, a Microscopic Freeway Simulation Model. Vol.1, Program Design, Parameter Cali-

bration and Freeway Dynamics Component Development. Report No. FHWA/RD-80/106, Federal Highway Administration, Washington D.C. 245 s.

Young W, Taylor M A P, Gipps P G (1989). Microcomputers in Traffic Engineering. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England. 489 s.

MITTAUSTIEDOT

MITTAUKSET INSTRUMENTOIDULLA AUTOLLA

Koekuljettajat (Hämeenlinnanväylä välillä Kivistö-Nurmijärvi-Kivistö, 35,8 km, nop.raj 120 km/h)

KULJETTAJA	IKÄ VUOTTA	AJOKORTTI VUODESTA	AJOKILOMETRIT VUODESSA	KOEAJON PÄIVÄMÄÄRÄ	KELLONAIKA
MIES 1	33	1992	1000	Ti 2.9.1997	10:51-11:11
NAINEN 1	22	1993	1500	Ti 2.9.1997	11:14-11:38
MIES 2	28	1989	10000	Ti 2.9.1997	11:47-12:11
NAINEN 2	24	1991	1000	Ti 2.9.1997	12:12-12:36
NAINEN 3	37	1978	25000	Ti 2.9.1997	12:50-13:10
MIES 3	34	1983	10000	Ti 2.9.1997	13:12-13:37
MIES 4	29	1987	20000	Ti 2.9.1997	13:47-14:06
NAINEN 4	27	1988	10000	Ti 2.9.1997	14:08-14:29
NAINEN 5	38	1981	10000	Ke 3.9.1997	08:48-09:12
MIES 5	24	1992	4000	Ke 3.9.1997	09:15-09:37
NAINEN 6	28	1991	8000	Ke 3.9.1997	09:44-10:05
MIES 6	36	1979	10000	Ke 3.9.1997	10:08-10:30
MIES 7	41	1974	25000	Ke 3.9.1997	10:41-11:03
MIES 8	32	1983	20000	Ke 3.9.1997	11:58-12:18
MIES 9	32	1983	15000	Ke 3.9.1997	12:21-12:42
MIES 10	45	1970	40000	Ke 3.9.1997	12:46-13:10
MIES 11	47	1968	30000	Ke 3.9.1997	13:15-13:35
MIES 11	47	1968	30000	Ke 3.9.1997	13:36-13:56
MIES 12	28	1986	30000	To 4.9.1997	09:13-09:33

KULJETTAJA	OHITETTUJEN RASKAIDEN AJONEUVOJEN LKM	OHITETTUJEN KEVYIDEN AJONEUVOJEN LKM	VÄYLÄN TUNTI-LIIKENNEMÄÄRÄ AJON AIKANA (AJON./H, MOLEM-MAT SUUNNAT)	SUUNTA-JAKAUMA (% HELSINGISTÄ/ HELSINKIIN)	RASKAIDEN AJONEUVOJEN OSUUS (%)
MIES 1	8	6	1379 ja 1265	46/54 ja 45/51	16,0 ja 16,8
NAINEN 1	2	1	1265	45/51	16,8
MIES 2	10	6	1265 ja 1386	45/51 ja 52/48	16,8 ja 15,5
NAINEN 2	5	2	1386	52/48	15,5
NAINEN 3	10	11	1386 ja 1451	52/48 ja 53/47	15,5 ja 15,6
MIES 3	7	1	1451	53/47	15,6
MIES 4	8	18	1451 ja 1750	53/47 ja 56/44	15,6 ja 12,8
NAINEN 4	8	7	1750	56/44	12,8
NAINEN 5	4	1	2767 ja 1596	33/67 ja 43/57	7,9 ja 14,6
MIES 5	5	6	1596	43/57	14,6
NAINEN 6	11	5	1596 ja 1299	43/57 ja 46/54	14,6 ja 17,6
MIES 6	12	5	1299	46/54	17,6
MIES 7	10	6	1299 ja 1350	46/54 ja 49/51	17,6 ja 16,8
MIES 8	12	13	1350 ja 1438	49/51 ja 50/50	16,8 ja 13,8
MIES 9	10	11	1438	50/50	13,8
MIES 10	8	5	1438 ja 1491	50/50 ja 51/49	13,8 ja 12,3
MIES 11	7	16	1491	51/49	12,3
MIES 11	9	11	1491	51/49	12,3
MIES 12	13	8	1600	44/56	12,9

Muiden autoilijoiden kaistanvaihtojen tutkiminen

VÄYLÄ JA REITTI	NOPEUS- RAJOITUS (KM/H)	PÄIVÄMÄÄRÄ	KOKO REITIN PITUUS (KM)	LÄHTÖ- AIKA KLO
Kehä III, Bemböle– Juvanmalmi 3 kertaa edestakaisin	100	Ke 03.09.1997	46,5	14:49
Hämeenlinnanväylä, Kivistö– vt 25–Kivistö	120	To 04.09.1997	60,7	09:52
Kehä III, Hämeenlinnanväylä–Tikkurila (valo-ohj. osuus)	70/80	To 04.09.1997	8,3	10:32
Lahdenväylä, Viikki–Korso–Vallila–Kehä I	100/120	To 04.09.1997	44,8	11:30
Kehä I, Itäkeskus– Hämeenlinnanväylä–Itäkeskus	70/80	To 04.09.1997	40,1	12:05
Tuusulanväylä, Kehä I–Ilola	80/100/120	To 04.09.1997	9,8	12:46
Tuusulanväylä, Ilola–Käpylä–Ilola	80/100/120	To 04.09.1997	27,7	13:07
Tuusulanväylä, Ilola–Käpylä	80/100/120	To 04.09.1997	12,9	13:54
Länsiväylä, ajoa välillä Ruoholahti–Kivenlahti–Ruoholahti	80/100	To 04.09.1997	40,1	14:06
Länsiväylä, ajoa välillä Ruoholahti–Kivenlahti–Ruoholahti	80/100	To 04.09.1997	45,8	14:38

VÄYLÄ	VÄYLÄN TUNTI- LIIKENMÄÄRÄ AJON AIKANA (AJON./H). MOLEMMAT SUUNNAT	SUUNTA- JAKAUMA (%, HELSINGISTÄ/ HELSINKIIN (KEHÄTEILLÄ ITÄÄN/LÄNTEEN	RASKAIDEN AJONEUVOJEN OSUUS (%)	VASEMMALTA KAISTAA VAIHTAVIEN AJONEUVO- JEN LUKUMÄÄRÄ	OIKEALTA KAISTAA VAIHTAVIEN AJONEUVO- JEN LUKUMÄÄRÄ
Kehä III	2453	51/49	8,2	43	0
Hämeenlinnanväylä	1351	49/51	14,0	15	2
Kehä III, (valo-ohj. osuus)	2282	49/51	17,7	3	1
Lahdenväylä	1817	53/47	13,6	10	3
Kehä I	5072 (*)	50/50	7,4	22	4
Tuusulanväylä	2496	45/55	10,4	5	0
Tuusulanväylä	2496	45/55	10,4	6	4
Tuusulanväylä	2496	45/55	10,4	2	1
Länsiväylä	1114 ja 3605 (**)	56/44 ja 55/45	9,5 ja 9,5	8	2
Länsiväylä	1114 ja 3605 (**)	56/44 ja 55/45	9,5 ja 9,5	18	3

*) LAM-piste ajoreitin länsipuolella

**) Ajoreitillä kaksi LAM-pistettä

VIDEOKUVAUKSET

Kaistanvaihtojen kuvaaminen moottoriteiden linjaosuuksien silloilta (makroskooppinen tarkastelu)

VÄYLÄ JA KUVAUSPAIKKA	PÄIVÄ-MÄÄRÄ	KELLON-AIKA
Lahdenväylä Jakomäen kevyen liikenteen sillalta (molemmat suunnat)	Ti 26.8.1997	11:35-12:55
Lahdenväylä Jakomäen kevyen liikenteen sillalta (suunta Helsinkiin)	To 28.8.1997	07:25-08:30
Länsiväylä Maamonlahden sillalta (molemmat suunnat)	To 28.8.1997	09:45-10:45
Hämeenlinnanväylä Keimolan kevyen liikenteen sillalta (suunta Helsingistä)	To 28.8.1997	14:20-15:15
Hämeenlinnanväylä Keimolan kevyen liikenteen sillalta (molemmat suunnat)	To 04.9.1997	12:55-14:20
Hämeenlinnanväylä Keimolan kevyen liikenteen sillalta (molemmat suunnat)	Pe 05.9.1997	07:15-08:50

VÄYLÄ	KUVATTUJEN AJONEUVOJEN LUKUMÄÄRÄ	RASKAIDEN AJONEUVOJEN OSUUS (%)	KAISTA-JAKAUMA (REUNATAI KESKI-OHITUSKAISTA)	KUVATTUJEN KAISTANVAIHTOJEN LUKUMÄÄRÄ (VASEMALLE/OIKEALLE)	KAISTANVAIHTOJEN LUKUMÄÄRÄ/KM (VASEMALLE/OIKEALLE)
Lahdenväylä (molemmat suunnat)	1381 (Lahteen) 1385 (Helsinkiin)	14,8 12,6	75/25 75/25	78/120 166/132	156/240 332/264
Lahdenväylä (suunta Helsinkiin)	3661	5,6	47/53	137/134	343/335
Länsiväylä (molemmat suunnat)	998 (Espooseen *) 1291 (Helsinkiin) *	13,3 8,9	76/24 68/32	11/54 34/17	28/135 85/43
Hämeenlinnanväylä suunta Helsingistä)	1030	11,0	64/36	52/67	173/223
Hämeenlinnanväylä (molemmat suunnat)	1190 (Helsingistä) 1582 (Helsinkiin)	15,3 9,4	71/29 83/17	214/162 101/86	357/270 202/172
Hämeenlinnanväylä (molemmat suunnat)	1351 (Helsingistä) 4754 (Helsinkiin)	11,1 4,2	71/29 62/38	231/181 163/200	385/302 326/400

*) Mukana ainoastaan keski- ja ohituskaista ilman linja-autokaistaa

ISBN 951-726-412-7
ISSN 0788-3722