
**Simulointien ja analyttisten menetelmien hyödyntäminen
suomalaisten kiertoliittymien välityskykytarkasteluissa**



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Liikennealan koulutusohjelma

Riihimäki, kevät 2013

Elina Tamminen



RIIHIMÄKI

Liikennealan koulutusohjelma
Älykkäät liikennejärjestelmät

Tekijä	Elina Tamminen	Vuosi 2013
Työn nimi	Simulointien ja analyttisten menetelmien hyödyntäminen suomalaisten kiertoliittymien välityskykytarkasteluissa	

TIIVISTELMÄ

Työ on osa Liikenneviraston Ramboll Finland Oy:lta tilaamaa liikenteen välityskykytarkasteluihin liittyvää selvitystä. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää erilaisilla analyttisillä menetelmillä ja mikrosimulointiohjelmilla saatuja kiertoliittymien sisääntulosuunnan välityskykyjä ja mallien kalibrintimahdollisuuksia. Tarkasteltavia analyttisiä menetelmiä olivat HCM 2010 ja HCS 2010, Bovy-kaava, Meerstrooksrotondeverkennerohjelma (Mr), HBS ja suomalainen välityskykykaava. Mikrosimulointiohjelmina olivat Synchro/SimTraffic, Paramics ja VISSIM.

Valituilla menetelmillä laskettiin kiertoliittymän tulosuunnan välityskyky eri kiertävän liikenteen määrillä. Saatuja yksikaistaisten kiertoliittymien välityskykytuloksia vertailtiin Tiehallinnon teettämän selvityksen Kiertoliittymien välityskyky (Tiehallinnon selvityksiä 17/2009) yhteydessä suoritetun kenttämittausten tuloksiin niiden kiertoliittymien osalta, joissa sisääntulosuunnan välityskyky ylittyi. Kaksikaistaista kiertoliittymistä vastaavia tuloksia ei ollut saatavilla.

Menetelmistä ja simulointiohjelmista HBS, Paramics ja Synchro/SimTraffic antoivat oletusarvoilla pienempää välityskykyä kuin kenttämittaauksissa havaittiin. HCM, HCS, suomalainen välityskykykaava ja VISSIM antoivat puolestaan vaihtelevasti suurempaa tai pienempää välityskykyä riippuen kiertävästä liikennemäärästä. Bovy-kaavalla ja Mr-ohjelmalla määritetty välityskyky oli kenttämittaustuloksia suurempi.

HCM:llä, HCS:llä ja Synchro/SimTrafficilla saatuihin kiertoliittymien kapasiteetteihin ei voida vaikuttaa. Muiden menetelmien ja simulointiohjelmien muuttujia ja parametreja voidaan kalibroida niin, että sisääntulokapasiteetit vastaavat paremmin kenttämittaustuloksia.

Kiertoliittymien todellisesta välityskyvystä Suomessa on vielä vähän tietoa, joten saadut tutkimustulokset ovat vain suuntaa antavia. Kiertoliittymän välityskykytarkastelussa käytettävä menetelmä ja mahdolliset muutettavat parametrit tulee määrittää tapauskohtaisesti.

Avainsanat Kiertoliittymä, välityskyky, liikenteen simulointi, analyttiset menetelmät
Sivut 42 s. + liitteet 15 s.

Riihimäki

Degree Programme in Traffic and Transport Management

Author

Elina Tamminen

Year 2013**Subject of Bachelor's thesis**

Use of simulation and analytic methods to define the capacities of roundabouts

ABSTRACT

This Bachelor's thesis is part of Liikennevirasto's project ordered from Ramboll Finland Oy. The main goal was to compare and calibrate output results of various analytic methods and microsimulation programs specific to roundabout capacity. The studied analytic methods included HCM 2010 and HCS 2010, Bovy-method, Meerstrooksrotondeverkenner-program (Mr), HBS and Finnish capacity formula. Studied microsimulation programs included Paramics, VISSIM and Synchro/SimTraffic.

The entry capacities of selected roundabouts for several circumstances were calculated using the above methods. Single lane roundabout results from the analytic methods and simulation programs were compared to field studies from Tiehallinto's report Kiertoliittymien välityskyky. Results where entry capacities crossed were compared. There were no equivalent results to compare multilane roundabouts.

For the analytic methods and simulation programs studied, HBS, Paramics and Synchro/SimTraffic reported lower capacity results than the field studies. HCM, HCS, Finnish capacity formula and VISSIM reported either higher or lower capacity depending on circulating flow. Bovy-method and Mr reported higher capacity than the field studies.

Results from HCM, HCS and Synchro/SimTraffic cannot be improved by using calibration techniques. Other methods and simulation programs can be improved to respond better to the field study by calibration.

In Finland there is little information about roundabout capacity, therefore results are approximate. Methods used to study roundabouts must always be chosen and calibrated in a case by case fashion.

Keywords Roundabout, capacity, traffic simulation, analytic method**Pages** 42 p. + appendices 15 p.

TERMIT

Analyttinen menetelmä = Tekniikoita ja muita menetelmiä, joilla tunnistetaan tunnuslukuja tietokokonaisuudesta.

Kalibrointi = Erilaisten parametrien ja muuttujien arvojen sovittamista siten, että mallin tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin todellisuutta.

Konfliktipiste = Piste, jossa kaksi liikennevirtaa risteää, kohtaa tai erkaanee. Liikennevirran voi muodostaa moottoriajoneuvot, jalankulkijat ja pyöräilijät.

Kriittinen aikaväli = aika, jonka ajoneuvo tarvitsee liittyäkseen liikennevirtaan.

Muuttuja = Kuvaa yksittäisen tekijän ominaisuutta mallissa.

Parametri = Arvo tai kerroin, jota säädetään kalibroinnin avulla sellaiseksi, että mallintulokset vastaavat todellisuutta.

Simulointi = Todellisuuden eli ympäröivän maailman jäljittelyä. Tietokonesimuloinnissa tietokoneen sisään rakennetaan keinotekoinen todellisuus, jonka avulla yritetään jäljitellä oikeaa todellisuutta.

Validointi = Validoinnissa tarkastetaan erilaisilla luotettavilla testimenetelmillä, että validoitava kohde (prosessi, tuote, laite, tila, menetelmä, jne.) toimii ennalta määriteltyjen kriteerien mukaan.

Välityskyky = Liikenneyksiköiden enimmäismäärä, joka aikayksikössä voi läpäistä liittymän tai jonka tie tai ajokaista voi välittää vallitsevissa tie- ja liikenneolosuhteissa.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	1
1.2	Työn rajaus.....	1
2	KIERTOLIITTYMÄT.....	2
2.1	Yleisesti.....	2
2.2	Kiertoliittymätyypit.....	3
2.3	Välityskyky	6
2.4	Kiertoliittymien välityskykytutkimukset Suomessa.....	6
3	VÄLITYSKYVYN LASKENTAMENETELMÄT.....	8
3.1	Analyttiset menetelmät.....	8
3.2	Tarkasteltavat analyttiset menetelmät	9
3.2.1	HCM/HCS	9
3.2.2	BOVY-kaava	10
3.2.3	HBS	12
3.2.4	Suomalainen välityskykykaava	13
3.3	Liikenteen simulointi.....	14
3.4	Tarkasteltavat simulointiohjelmat	15
3.4.1	Synchro/SimTraffic	15
3.4.2	Paramics	15
3.4.3	VISSIM.....	16
4	ANALYYTTISTEN MENETELMIEN TUTKIMUKSET.....	16
4.1	Tarkastelumenetelmä	16
4.2	HCM.....	18
4.3	HCS	19
4.4	Bovy-kaava.....	21
4.5	Meerstrooksrotondeverkener.....	23
4.6	HBS	24
4.7	Suomalainen välityskykykaava	26
5	SIMULOINTITUTKIMUKSET	28
5.1	Paramics	28
5.2	VISSIM	30
5.3	Synchro/SimTraffic	32
6	TULOKSET	33
6.1	Analyttiset menetelmät.....	33
6.2	Simulointiohjelmat	36
6.3	Simulointiohjelmien suositukset	38
6.4	Kiertoliittymien jatkotutkimukset	39
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	39
	LÄHTEET	41

Liite 1	Suomalaiset kiertoliittymät
Liite 2	Bovy-kaavan tarkastelut
Liite 3	HBS-tarkastelut
Liite 4	Suomalaisen kaavan tarkastelut
Liite 5	Paramics-tarkastelut
Liite 6	VISSIM-tarkastelut
Liite 7	Analyyttisten menetelmien muut kaksikaistaiset kiertoliittymät

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Työ on osa Liikenneviraston Ramboll Finland Oy:lta tilaamaa liikenteen välityskykytarkasteluihin liittyvää selvitystä. Työn tulokset tullaan raportoimaan maanteiden liittymien ja linjaosuuksien toimivuustarkasteluja varten laadittavaan ohjeeseen Tieliikenteen toimivuuden arviointi.

Työn tavoitteena on selvittää erilaisten analyttisten menetelmien ja simulointiohjelmien antamia sisääntulokapasiteetteja kiertoliittymissä. Lisäksi selvitetään menetelmien kalibrointimahdollisuuksia ja sitä, kuinka eri arvojen muutokset vaikuttavat välityskykyyn. Simuloinnilla tarkoitetaan olemassa olevan tai suunnitellun liikenneverkon toiminnan mallintamista tietokoneen avulla. Analyttiset menetelmät ovat laskukaavoja, joiden avulla tunnistetaan tunnuslukuja tietokokonaisuudesta, tässä kiertoliittymän sisääntulokapasiteetteja. Kalibrointi tarkoittaa erilaisten parametrien ja muuttujien arvojen sovittamista siten, että tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin todellisuutta.

1.2 Työn rajaus

Välityskykytarkastelumenetelmät on rajattu kuuteen analyttiseen menetelmään ja kolmeen mikrosimulointiohjelmaan. Analyttisiä menetelmiä ovat Highway Capacity Manual (HCM 2010) ja sen pohjalta laadittu tietokonesovellus Highway Capacity Software (HCS 2010), hollantilainen Bo-vy-kaava ja sen pohjalta laadittu Meerstrooksrotondeverkenner-ohjelma, saksalainen Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) sekä suomalainen välityskykykaava. Simulointiohjelmien osalta on tarkasteltu Suomessa yleisimmin käytössä olevia mikrosimulointiohjelmiä Synchro/SimTrafficia, Paramicsia ja VISSIMiä.

Analyttisillä menetelmillä sekä simulointiohjelmillä tutkittujen yksikaistaisten kiertoliittymien välityskykytuloksia on vertailtu Tiehallinnon Kiertoliittymien välityskyky-selvitykseen, joka on julkaistu vuonna 2009. Tarkastelun kohteena olivat viisi Helsingin seudulla sijaitsevaa kiertoliittymää, joista kolme oli yksikaistaisia. Tutkimuksessa tarkasteltujen kaksikaistaisten kiertoliittymien kapasiteetti ei koskaan ylittynyt, joten niiden osalta vertailuaineistoa ei ole saatavilla.

Analyttisissä menetelmissä ja simulointiohjelmissä käsitellään samanaikaisesti kiertoliittymässä kiertävää liikennettä ja tulohaarasta sinne saapuvaa liikennettä. Kokonaiskapasiteetti määräytyy konfliktipisteen välityskyvyn mukaan. Tässä työssä on keskitytty kiertoliittymän yhden sisääntulohaaran välityskyvyn määräytymiseen erilaisissa liikennetilanteissa.

Välityskykytarkasteluiden ohella selvitetään tietoa kiertoliittymistä sekä niiden välityskyvystä. Lisäksi listataan Suomessa olevia kaksikaistaisia

kiertoliittymiä ja selvitetään niiden toimivuutta puhelinhaastatteluiden avulla.

2 KIERTOLIITTYMÄT

2.1 Yleisesti

Kiertoliittymä eli niin sanottu liikenneympyrä on liittymä, jossa vasemmalle kääntyminen on korvattu kahdella käännöksellä oikeaan. Kiertoliittymän keskellä on keskisaareke, jota kierretään vastapäivään. Liittymään liittyvät ajoneuvot ovat väistämisvelvollisia, mikä on osoitettu liikenne-merkeillä väistämisvelvollisuus risteyksessä ja pakollinen kiertosuunta (kuva 1). Saapuvien ajoneuvojen tulee hidastaa aina vauhtiaan saavuttaessa liittymään ja pysähtyä vain silloin, kun liittymässä on paljon kiertävää liikennettä. (Kiertoliittymä ja miten siinä ajetaan n.d; Tiehallinto 2001, 40.)



Kuva 1. Kiertoliittymää ilmaisevat liikennemerkkit. (Kuva: Tamminen)

Oikein suunniteltu ja toteutettu kiertoliittymä on usein turvallisempi vaihtoehto tavalliselle tasoliittymälle, sillä konfliktipisteitä eli pisteitä, joissa ajoneuvoliikenne kohtaa tai erkanee, on vähemmän kuin esimerkiksi tavallisessa valo-ohjaamattomassa nelihaaraliittymässä. Kiertoliittymä sopii lähinnä taajama-alueille, mutta liittymiä on suunniteltu myös taajama-alueiden ulkopuolelle. Kiertoliittymien tavoitteena on parantaa liikenneturvallisuutta ja sivusuuntien palvelutasoa sekä sujuvoittaa liittymien kokonaisvaltaista toimivuutta. Kiertoliittymien etuna on, ettei niissä ole liikennevalojen suoja-aikoja sekä liittymään liittyttäessä ei tarvitse pysähtyä, jos kiertävää liikennettä ei ole havaittavissa. (Tiehallinto 2001, 40–41.)

Kiertoliittymien erilaisia käyttötarkoituksia ja -kohteita sekä perusteita kiertoliittymälle ovat:

- liittämnopeuksien alentaminen
- vaihtoehto liikennevaloille
- liittymät, joissa on ollut paljon onnettomuuksia
- liittymät, joissa on epäselvät väistämisvelvollisuudet
- liittymät, joissa sivusuunnilla on välityskykyongelmia
- liittymät, joissa käännytään paljon vasemmalle
- liittymät, joissa liittymähaaroja on viisi tai enemmän
- liikenteen solmukohdat
- eritasoliittymiltä liityttäessä rampeilta sivuteille.

(Tiehallinto 2001, 40–41.)

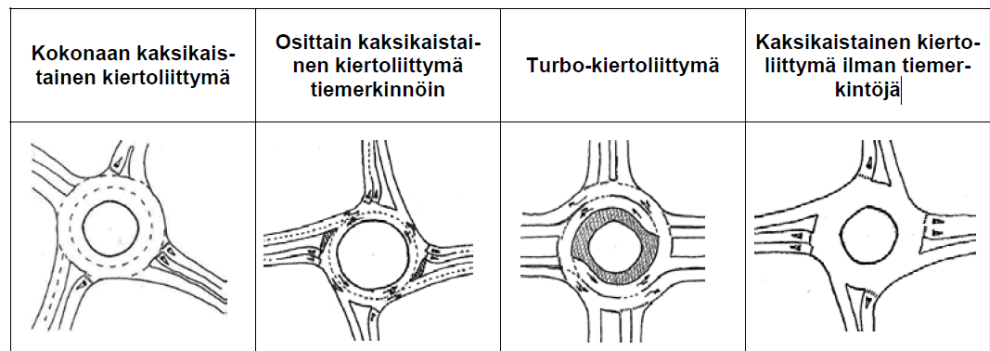
Kiertoliittymiä ei yleensä käytetä taajaman ulkopuolella valta- ja kantateillä, 2+2-kaistaisilla teillä, joissa nopeusrajoitus on yli 60 km/h, erikoiskuljetusreiteillä, eikä silloin, jos kaksikaistaisissa liittymissä kävely- ja pyöräteitä ei saada eri tasoon. Yli 80 km/h nopeusrajoitusalueella ei koskaan käytetä kiertoliittymiä. Kiertoliittymien soveltuvuutta voidaan kuitenkin harkita sijainnin ja liikenneympäristön mukaan. (Tiehallinto 2001, 40–41.)

2.2 Kiertoliittymätyypit

Suomessa kiertoliittymät ovat yleensä yksi- tai kaksikaistaisia. Lisäksi Suomessa on pari monikaistaista kiertoliittymää, joista yksi on valoohjattu. Kaksikaistaisiin kiertoliittymiin kuuluvat turbokiertoliittymät ovat vielä harvinaisia Suomessa. (Tiehallinto 2009,1.)

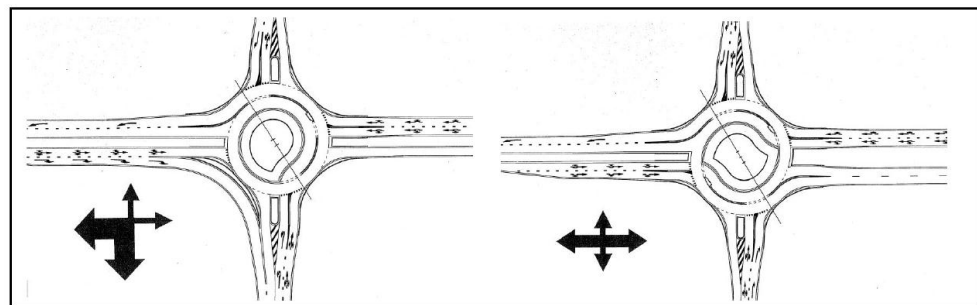
Edellä mainituista kiertoliittymämalleista yksikaistainen liittymä on liikenneturvallisuudeltaan paras, sillä konfliktipisteitä on vähiten. Yksikaistaisessa kiertoliittymässä ajaessa ja siihen liityttäessä ajetaan vain yhtä kaistaa. Yksikaistaisen kiertoliittymän kapasiteettia voi parantaa esimerkiksi niin sanotun vapaan oikean avulla, joko yhdestä tai useammasta suunnasta.

Kaksikaistaiset kiertoliittymät jaetaan neljään päätyyppiin (kuva 2), joita ovat kokonaan kaksikaistainen kiertoliittymä, osittain kaksikaistainen kiertoliittymä, turbo-kiertoliittymä ja ilman tiemerkinöjä oleva kaksikaistainen kiertoliittymä (Aarnikko & Karjalainen 2006, 14). Suomessa on yli 20 kaksikaistaista kiertoliittymää ja niiden lukumäärä vain kasvaa, sillä ne ovat yleistymässä varsinkin pääkaupunkiseudulla ja suurissa kaupungeissa (Haastattelut 2013).



Kuva 2. Kaksikaistaisten kierto liittymien päätyypit (Aarnikko & Karjalainen 2006, 14).

Hollantilaisten kehittämät, kaksikaistaisiin kierto liittymiin kuuluvat turbo-kierto liittymät ovat osittain kaksi- tai monikaistaisia. Niiden periaatteena on, että liikenne ohjataan omille kaistoilleen ennen liittymää, jolloin ajoneuvo pysyy valitulla kaistalla läpi liittymän. Liittymän malli vaihtelee eri suuntien liikennemäärien mukaan. Yleensä pääsuunnalla on kaksi liittyvää ja poistuvaa kaistaa, kun taas sivusuunnilla on vain yksi kaista. Alla olevassa kuvassa (kuva 3) on esitetty kaksi esimerkkiä turbo-kierto liittymistä pääsuunnan liikenteen mukaan. Vasemmanpuoleisessa kierto liittymässä liikenteen pääsuunta on etelän ja lännen välillä ja oikeanpuoleisessa idän ja lännen välillä. (Tiehallinto 2009, 1.)

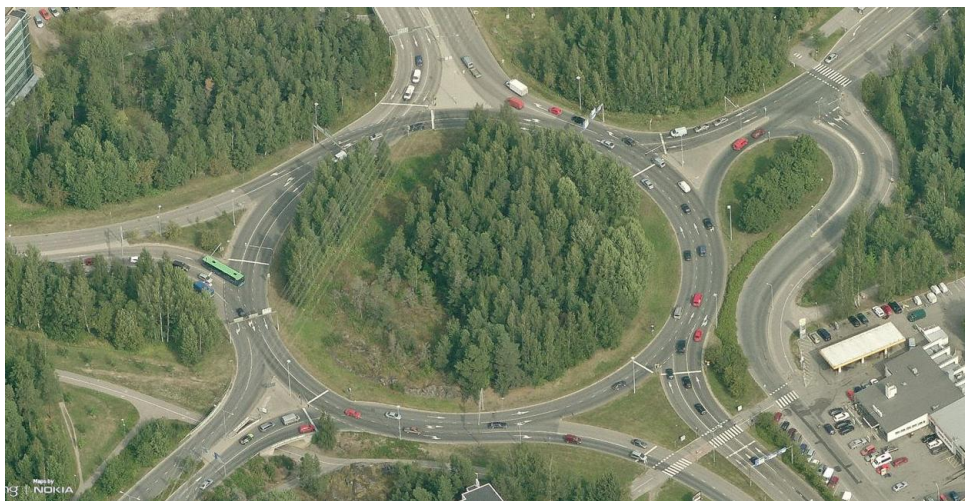


Kuva 3. Turbo-kierto liittymän esimerkkimallit pääsuunnan mukaan (Tiehallinto 2009, 2).

Suomessa on tällä hetkellä kaksi monikaistaista kierto liittymää. Monikaistaisuus tarkoittaa sitä, että vähintään yksi sisääntulokaista ja siitä seuraava liittymäkaistan väli on kolmi- tai useampikaistainen, riippumatta siitä, kuinka monta poistuvaa kaistaa seuraavassa haarassa on. Molemmat kyseisistä kierto liittymistä ovat pääkaupunkiseudulta. Toinen on Espoossa sijaitseva Kuitinmäentien, Martinsillantien ja Finnoontien liittymä (kuva 4) ja toinen Helsingissä sijaitseva Vihdintien, Eliel Saarisen tien, Pitäjänmäentien ja Huopalahdentien liittymä (kuva 5). Helsingissä sijaitseva kierto liittymä on valo-ohjattu.



Kuva 4. Kuitinmäentien, Martinsillantien ja Finnoontien kiertoliittymä (Bing Maps 2013).



Kuva 5. Valo-ohjattu Vihdintien, Eliel Saarisen tien, Pitäjänmäentien ja Huopalahdentien kiertoliittymä (Bing Maps 2013).

Liitteeseen 1 on koottu lista osasta Suomessa olevista osittain tai täysin kaksikaistaisista kiertoliittymistä sekä yksikaistaisista, joissa on vähintään yksi vapaa oikea kaista. Luettelossa on sijainnin lisäksi mainittu rakennusvuosi, kuvaus sekä mallikuva, josta liittymän kaistat käyvät ilmi. Lista on kerätty etsimällä tietoa internetistä sekä puhelinhaastatteluissa eri kaupunkien ja kuntien yhdyshenkilöiden kanssa. Kiertoliittymät, joista tietoja ei saatu sekä mahdollisesti kaksikaistaiseksi muutettavat yksikaistaiset kiertoliittymät ja joitakin uusia ainakin osittain kaksikaistaiseksi suunniteltuja kiertoliittymiä on esitetty myös liitteessä 1.

Puhelinhaastatteluissa kävi ilmi, että yhdessäkään kaksikaistaisessa kiertoliittymässä ei ole tällä hetkellä välityskykyongelmia, vaan mahdolliset ruuhkautumiset aiheutuvat lähellä sijaitsevista muista liittymistä. Tällaisia liittymiä ovat esimerkiksi kuvassa 4 esitetty Espoossa sijaitseva Kuitinmäentien, Martinsillantien ja Finnoontien välinen monikaistainen kiertoliittymä ja Tuusulassa Tuusulänväylän, Hämeentien ja Järvenpääntien välinen osittain kaksikaistainen kiertoliittymä. Yksikaistaisissa kiertoliittymissä sen sijaan ilmeni välityskykyongelmia. Osaa yksikaistaisista kiertoliit-

tymistä harkitaan laajennettavan ainakin osittain kaksikaistaiseksi. Lisäksi muutamia nykyisiä liikennevalo-ohjattuja liittymiä ollaan muuttamassa kaksikaistaisiksi kiertoliittymiksi.

Suurimmat ongelmat kaksikaistaisissa kiertoliittymissä aiheutuvat turvallisuudesta. Suurin riski aiheutuu kiertoliittymän kanssa samassa tasossa olevista suojateistä. Esimerkiksi kun liittymästä poistuu kaksi ajokaistaa samaan suuntaan ja toisen kaistan autoilija väistää mahdollista jalankulkijaa, saattaa toinen autoilija jatkaa matkaa välittämättä viereisestä pysähtyneestä ajoneuvosta. Tällöin ohiajava auto aiheuttaa vaaratilanteen tai mahdollisen törmäyksen jalankulkijan kanssa. Kaksikaistaisissa kiertoliittymissä esiintyy myös väärinajoa, oikomista sekä korkeita ajonopeuksia.

2.3 Välityskyky

Kiertoliittymän välityskyky vastaa yleensä hyvin toimivan valo-ohjatun liittymän välityskykyä. Jos kiertoliittymän liikennemäärät ovat vähäisiä, keskimääräinen viivytysaika on pieni. Kiertoliittymän etu valo-ohjattuun liittymään nähden on se, että pieniliikenteisessä ympyrässä tarvitsee harvoin pysähtyä, toisin kuin liikennevaloissa. (Tiehallinto 2001, 25.)

Kiertoliittymissä välityskyky muodostuu liittymään saapuvien ja kiertävien ajoneuvojen lisäksi kiertoliittymästä poistuvien ajoneuvojen summasta. Välityskykyyn positiivisesti tai negatiivisesti vaikuttavia tekijöitä ovat liikennevirran jakautuminen ja määrä, liittymän koko, liittymähaarojen ja ajokaistojen lukumäärä sekä kevyen liikenteen väyläjärjestelyt. Teoreettinen yksikaistaisen kiertoliittymän maksimivälityskyky on tasaisesti kaikkiin suuntiin suuntautuvalla liikenteellä 3 000 henkilöautoa tunnissa. Välityskyky tulee aina tarkistaa, jos kokonaisliikennemäärä ylittää 2 000 ajoneuvoa, tai jos jokin suunnista on muita suuntia selvästi vilkasliikenteisempi. Tällöin kannattaa harkita osittain kaksikaistaista kiertoliittymää tai vapaan oikean mahdollisuutta. (Tiehallinto 2001, 25–26.)

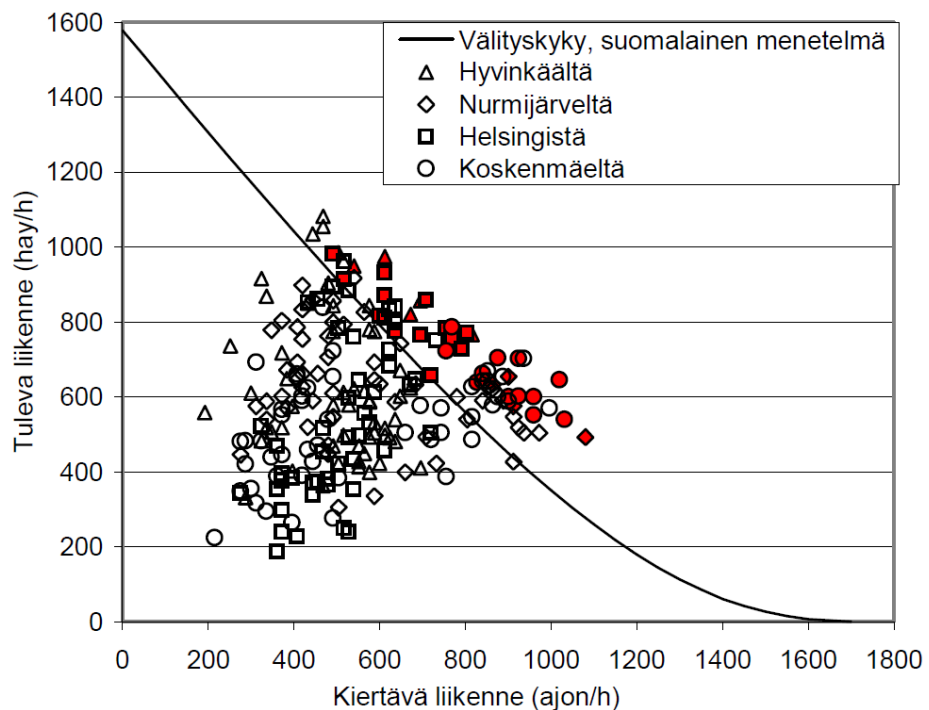
2.4 Kiertoliittymien välityskykytutkimukset Suomessa

Suomessa on tehty Tiehallinnon toimesta tutkimus kiertoliittymien välityskyvystä, Tiehallinnon selvityksiä 17/2009.

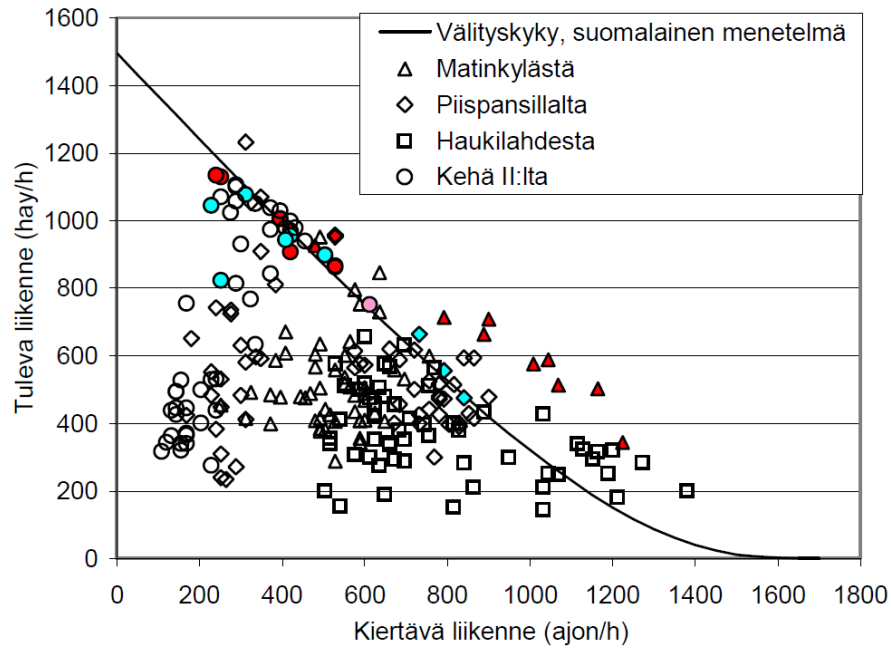
Selvitys on toteutettu tutkimalla kiertoliittymien välityskykyä suomalaisen välityskykylaskentakaavan ja saksalaisen HBS-kaavan avulla sekä kenttämittauksilla. Kenttämittaukset toteutettiin yhteensä viidessä kiertoliittymässä, joista kolme oli yksikaistaisia, yksi kaksikaistainen ja yksi monikaistainen kiertoliittymä. Liittymät sijaitsivat Tuusulan Hyrylässä, Espoon Matinkylässä ja Suomenojassa sekä Helsingin Pitäjänmäessä ja Suutarilasassa. Mittaukset tehtiin videokuvaamalla liittymiä aamu- sekä iltahuipputunteina, jonka jälkeen analysoinnin tuloksia vertailtiin teoreettisilla menetelmillä saatuihin kapasiteetteihin. Suomalainen välityskykykaava on esitetty tämän työn kappaleessa 3.2.4 ja saksalainen HBS kappaleessa 3.2.3.

Kiertoliittymien liikennemääriä tutkittaessa laskettiin jokaisen tulosuunnan liikennemäärät erikseen. Saapuvan ja kiertävän liikenteen määrät laskettiin 5 minuutin välein konfliktipisteissä kaistoittain ja ajoneuvotyypeittäin. Myös mahdollisten tulosuuntien suojateiden käyttäjät otettiin laskelmissa huomioon.

Saadut liikennemäärät esitettiin kaaviokuvina erikseen jokaisen tulosuunnan mukaan. Kyseisistä kuvista käy ilmi kiertävän ja saapuvan liikenteen sekä mahdollisten suojatienkäyttäjien määrä viiden minuutin aikajaksoissa. Välityskykyä päästiin tutkimaan muuttamalla saadut liikennemäärät henkilöautoyksiköiksi, jonka jälkeen määriä vertailtiin molempien, HBS:llä ja suomalaisella menetelmällä saatuihin liikennemääriin. Kuvat 6 ja 7 havainnollistavat saatuja tuloksia. Punaiset pisteet tarkoittavat liikennemääriä, joilla kiertoliittymän suunta jonoutui eli kapasiteetti täyttyi.



Kuva 6. Esimerkkikaavio vertaillen liikennemääriä suomalaiseen välityskykykaavaan Hyrylän kiertoliittymässä. Punaiset pisteet ovat liikennemääriä, joilla kiertoliittymän kapasiteetti täyttyi (Tuovinen & Enberg 2009, 60).



Kuva 7. Esimerkkikaavio vertailtaessa liikennemääriä suomalaiseen välityskykykaavaan Matinkylän kiertoliittymässä. Punaiset pisteet ovat liikennemääriä, joilla kiertoliittymän kapasiteetti täyttyi (Tuovinen & Enberg 2009, 62).

Tuloksista ilmenee, että suomalainen kaava aliarvioi välityskykyä, kun liittymää kiertävä liikennemäärä on suuri. Pienillä kiertävillä liikennemäärillä tulos mitatun ja lasketun arvon välillä lähenee toisiaan. Selvityksessä tutkimustulokset on verrattu myös HBS-kaavaan. Kaavan mukaan välityskykyjen välillä ei ole yhtä merkittävää eroa, sillä mitattu ja laskettu välityskyky muuttuvat samassa suhteessa. Ero kaavan antamassa ja mitatussa välityskyvyissä on kuitenkin noin 100 ajoneuvoa tunnissa.

Lopullisia tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina, sillä mittaushavainnot ei ollut riittävästi. Saadut havainnot kuitenkin osoittivat sen, että molempien laskukaavojen yksikaistaisen kiertoliittymän maksimivälityskyky on heikompi kuin saaduissa mittaustuloksissa. Teoreettisesti voitiin todeta, että yksikaistaisen kiertoliittymän kiertävän liikenteen ollessa 250–1200 ajoneuvoa tunnissa, on välityskyky vähintään niin suuri, kuin kaavat osoittavat. Kaksikaistaisissa kiertoliittymissä maksimivälityskykyä ei saavutettu kertaakaan, joten vertailut jäivät aina reilusti esitetyn käyrän alapuolelle. (Tuovinen & Enberg 2009.)

3 VÄLITYSKYVYN LASKENTAMENETELMÄT

3.1 Analyttiset menetelmät

Liikenteen toimivuuden tarkasteluun on kehitetty erilaisia analyttisiä menetelmiä, joita ovat erilaiset laskentamallit, kaaviot, taulukot ja yhtälöt. Menetelmien pohjalta on kehitetty monia erilaisia tietokoneohjelmia, jotka helpottavat ja nopeuttavat välityskyvyn tarkastelua. Menetelmät perustuvat empiirisiin havaintoaineistoihin ja liikennevirtateorioihin, jotka käsit-

televät liikennettä tilastollisena ilmiönä. Erilaiset mallit tuottavat erilaista tietoa ja tunnuslukuja liittymistä, esimerkiksi jononpituudet, palvelutasoluokat sekä viivytykset. (Liikennevirasto 2013.)

Suomessa analyttisistä menetelmistä on esimerkiksi käytössä HCM2010 ja sen pohjalta kehitetty laskentaohjelma HCS2010, CapCal, DanKap, HBS, Bovy-kaava, Suomen liikennevalosuunnitteluohjeet (LIVASU) ja sen pohjalta kehitetty KSuhde. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kiertoliittymien välityskykyä HCM, HCS ja HBS -menetelmien, Bovy-kaavan sekä suomalaisen välityskykykaavan avulla.

3.2 Tarkasteltavat analyttiset menetelmät

3.2.1 HCM/HCS

Highway Capacity Manual (HCM) on yhdysvaltalaisen Highway Research Board komitean ja Bureau of Public Roadsin yhteistyössä kehittämä mallikonaisuus. Se sisältää laskentamallit esimerkiksi välityskyvyn ja palvelutason laskemiseen erilaisissa liikenneympäristöissä. Suomessa sitä on käytetty erityisesti palvelutasojen tarkastelussa. (Tiehallinto 2003a, 15–16; Highway Capacity Manual 2010, V1-i.)

HCM on julkaistu ensimmäisen kerran vuonna 1950, jonka jälkeen sitä on päivitetty viisi kertaa. Päivitykset ovat vuosilta 1965, 1985, 1994, 2000 ja 2010. Vuoden 2010 versiossa otettiin huomioon ensimmäisen kerran autoilijoiden, kevyenliikenteen sekä joukkoliikenteen matkustajien ja reaaliaikaisen liikenteenhallinnan vaikutukset liikenteen välityskykyyn. Lisäksi uusin versio sisälsi omat laskentakaavat kiertoliittymien kapasiteettitarkasteluihin. (Highway Capacity Manual 2010, V1-i–V1-iii.)

Highway Capacity Manualin mukaan kiertoliittymien sisääntulokapasiteetit voidaan laskea seuraavista kaavoista:

Yksikaistainen kiertoliittymä

$$C_{e,pce} = 1130 e^{(-1.0 \times 10^{-3})v_{c,pce}}, \quad (1)$$

jossa

$C_{e,pce}$ = sisääntulokapasiteetti (ajon/h)

$v_{c,pce}$ = kiertävä liikennemäärä (ajon/h).

Kaksikaistainen kiertoliittymä, kaksi sisääntulokaistaa – yksi kiertävä

Välityskyky lasketaan yksikaistaisen kiertoliittymän kaavan avulla (kaava 1). Tulos antaa tällöin toisen sisääntulokaistan kapasiteetin, joten kokonaisisääntulokapasiteetti saadaan kertomalla tulos kahdella:

$$C = C_{e,pce} \times 2. \quad (2)$$

Kaksikaistainen kierto liittymä, yksi sisääntulokaista – kaksi kiertävää

$$C_{e,pce} = 1130 e^{(-0.7 \times 10^{-3})v_{c,pce}}, \quad (3)$$

jossa

$C_{e,pce}$ = sisääntulokapasiteetti (ajon/h)

$v_{c,pce}$ = kiertävä liikennemäärä, molemmat kaistat yhteensä (ajon/h).

Kaksikaistainen kierto liittymä, kaksi sisääntulokaistaa – kaksi kiertävää

$$C_{e,R,pce} = 1130 e^{(-0.7 \times 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (4)$$

$$C_{e,L,pce} = 1130 e^{(-0.75 \times 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (5)$$

joissa

$C_{e,R,pce}$ = oikeanpuoleisen kaistan sisääntulokapasiteetti (ajon/h)

$C_{e,L,pce}$ = vasemmanpuoleisen kaistan sisääntulokapasiteetti (ajon/h)

$v_{c,pce}$ = kiertävä liikennemäärä, molemmat kaistat yhteensä (ajon/h).

(Highway Capacity Manual 2010, 21-6–21-9.)

Kaistakohtaisista kaavoista voidaan johtaa oma kaava kokonaissisääntulokapasiteetille C , joka koostuu molempien kaistojen kapasiteettien summasta

$$C = C_{e,R,pce} + C_{e,L,pce} \cdot \quad (6)$$

Highway Capacity Manualin pohjalta on kehitetty laskentasovellus Highway Capacity Software (HCS). Uusin versio ohjelmasta on vuodelta 2010.

3.2.2 BOVY-kaava

Bovy-kaava on kehitetty Hollannissa. Sen avulla voidaan laskea sisääntulokapasiteetit yksi- ja kaksikaistaisissa kierto liittymissä.

Sisääntulokapasiteetti saadaan kaavasta

$$C_E = \frac{1}{\gamma} [1500 - \frac{8}{9} (\beta \times Q_C + \alpha \times Q_S)], \quad (7)$$

jossa

C_E = sisääntulokapasiteetti (ajon/h)

Q_C = kiertävä liikennemäärä (ajon/h)

Q_S = poistuva liikennemäärä sisääntulohaarasta (ajon/h)

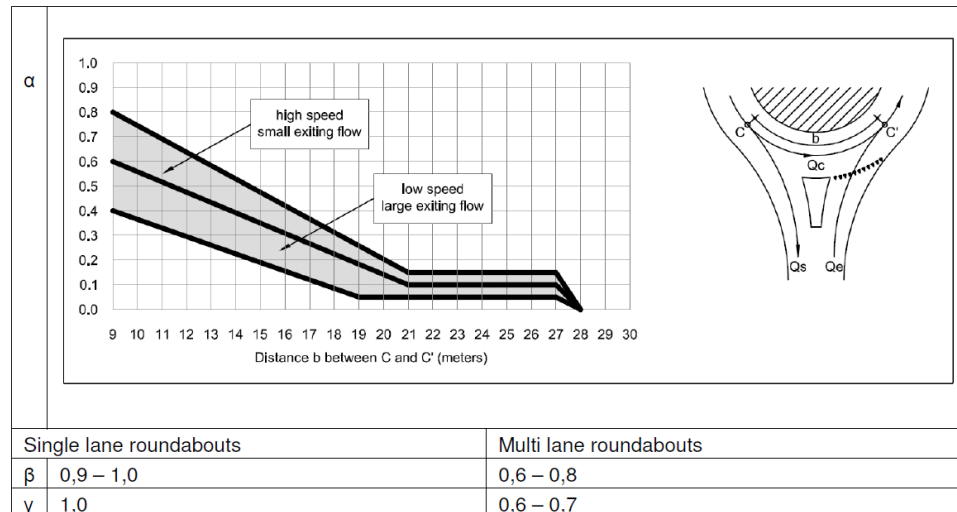
α = kerroin, poistumis- ja sisääntuloakaistan etäisyys toisistaan

β = kerroin, kiertävien kaistojen lukumäärän mukaan

γ = kerroin, sisääntuloakaistojen lukumäärän mukaan.

(DHV & Royal Haskoning 2009, 24.)

Kaavassa käytettävät kertoimet saadaan kuvasta 8.

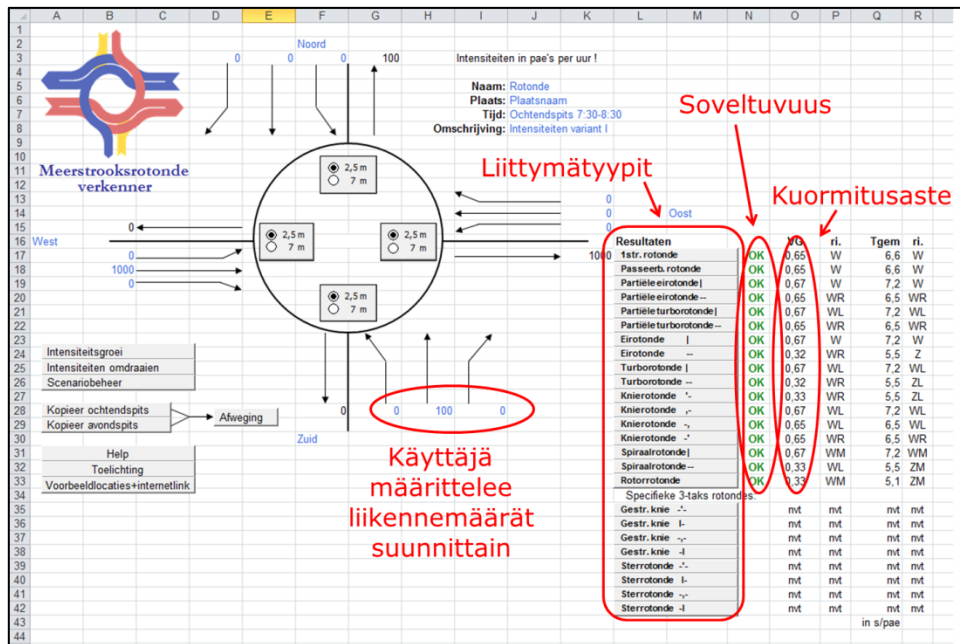


Kuva 8. Bovy-kaavan kertoimet (DHV & Royal Haskoning 2009, 24).

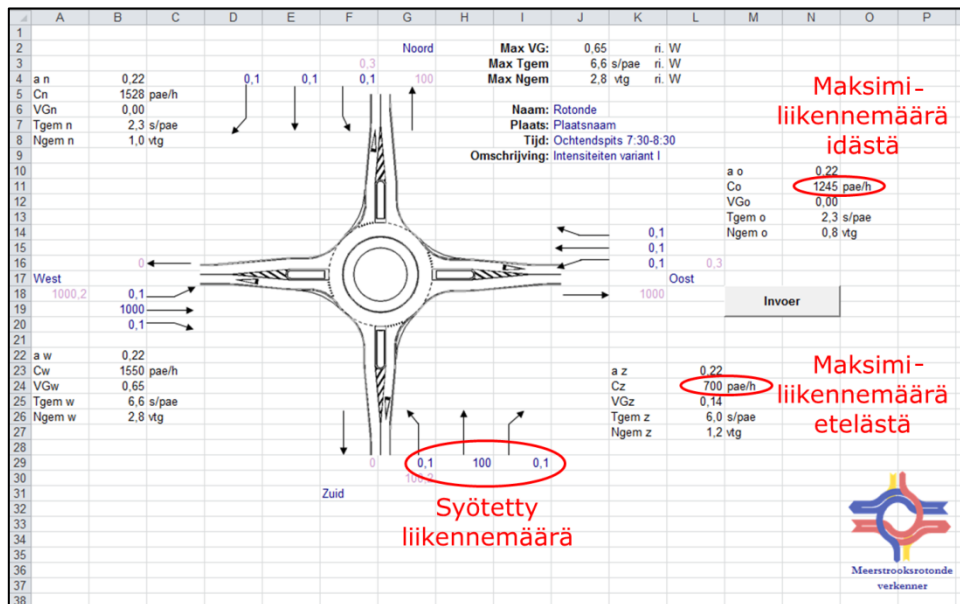
Bovy-kaavan pohjalta on kehitetty kiertoliittymien välityskykyä tarkasteleva ohjelma Meerstrooksrotondeverkenner, "Mr". Ohjelma on kehitetty erityisesti hollantilaisiin olosuhteisiin, sillä muissa maissa käytetyt parametrit saattavat olla erilaisia hollantilaisiin arvoihin nähden. "Mr" löytyy tällä hetkellä vain hollanniksi, juuri soveltuvuustutkimuksien puuttumisten takia. (Ministry of Transport, Public Works and Water management 2009.)

Ohjelma ilmaisee soveltuvat kiertoliittymätyypit tietyillä liikennemäärillä liikenteen suuntautumisen mukaan. Versiossa 1.2 soveltuvuus voidaan testata 24 erilaisella kiertoliittymätyypillä, yksikaistaisesta kiertoliittymästä kolmikaistaisiin kiertoliittymiin asti. Soveltuvuuden lisäksi ohjelma kertoo liittymän kuormitusasteen sekä keskimääräisen maksimiviivytyksen. Kun kuormitusaste on alle 0,8 ja maksimiviivytys alle 50 s/ajoneuvo, ohjelma suosittelee kyseistä kiertoliittymätyyppiä. Kun kuormitusaste on 1,0, kiertoliittymän kapasiteettiraja on saavutettu.

Alla olevassa kuvassa on esitetty ohjelman aloituslehti, josta kyseiset tiedot saadaan selville (kuva 9). Ohjelmaan määritellään tulosuuntien liikennemäärät, jonka jälkeen ohjelma laskee liikennemäärien perusteella, mitkä kiertoliittymät soveltuvat vaihtoehdoiksi. Liittymätyyppiä suositellaan, kunnes vihreä OK poistuu liittymätyypin perästä. Kullekin kiertoliittymätyypille on oma laskentataulukkosivu (kuva 10), josta nähdään eri tulosuuntien tunnuslukuja. (Ministry of Transport, Public Works and Water management 2009.)



Kuva 9. Meerstrooksrotondeverkenner-ohjelma (Ministry of Transport, Public Works and Water management 2009).



Kuva 10. Yksikaistaisen kiertoliittymän laskentataulukkosivu (Ministry of Transport, Public Works and Water management 2009).

3.2.3 HBS

Saksassa kehitetty HBS eli Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen on Saksan liikenneministeriön julkaisu vuodelta 2001. Kyseisestä julkaisusta on tehty vuosina 2005 ja 2009 päivitetty painokset. Uuden version pitäisi ilmestyä 2010-luvun aikana.

Laskentamenetelmä on suunniteltu kierto liittymiin, joissa on maksimissaan kaksi kaistaa. Kaksikaistaiset kierto liittymät voivat olla malliltaan joko yksi tai kaksi kiertäväkaistaisia ja yksi tai kaksi sisääntulokaistaisia. Menetelmä ei sovellu niin sanottuihin minikierto liittymiin, joissa on yli-ajettava kierto saareke. (Tuovinen & Enberg 2009,12.)

HBS:n mukaan kiertoliittymien välityskyky lasketaan seuraavan kaavan avulla

$$G = 3600 \left(1 - \frac{t_{\min} q_k}{n_k 3600}\right)^{n_k} \frac{n_z}{t_f} e^{-\frac{q_k}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{\min}\right)}, \quad (8)$$

jossa

q_k = kiertävä liikennemäärä

n_k = kiertävien kaistojen lukumäärä

n_z = sisääntulokaistojen lukumäärä

t_g = kriittinen aikaväli (4,1 s)

t_f = purkautumisaikaväli (2,9 s)

t_{\min} = peräkkäisten ajoneuvojen minimaiaikaväli kiertotilassa (2,1 s).

(Tuovinen & Enberg 2009, 12.)

3.2.4 Suomalainen välityskykykaava

Suomessa on kehitetty oma kiertoliittymän välityskykykaava, joka perustuu *Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections* – tutkimukseen (Luttinen 2004). Laskentakaavassa on hyödynnetty myös ruotsalaisia tutkimuksia *Roundabout Entry Capacity* (Hagring 1996) ja *Vehicle-Vehicle Interactions at Roundabouts and Their Implications for the Entry Capacity* (Hagring 1998). Kyseiset tutkimukset ovat saatavissa ruotsalaisesta Lundin teknillisestä korkeakoulusta.

Yksikaistaisen kiertoliittymän sisääntulokapasiteetti saadaan kaavasta

$$C_P = \frac{q e^{-\theta(t_c - t_p)}}{1 - e^{-\theta t_f}}, \quad (9)$$

jossa

t_c = kriittinen aikaväli

t_p = kiertävän liikenteen aikavälijakauman minimiarvo

t_f = purkautumisaikaväli

q = kiertävä liikennemäärä.

Kerroin θ saadaan kaavasta:

$$\theta = \frac{q}{3600 - q t_p} \quad (10)$$

Purkautumisaikaväli ja kiertävän liikenteen aikavälijakauman minimiarvo lasketaan kiertoliittymän keskisaarekkeen halkaisijan (d , metriä) funktiona

$$t_p = 2,0 - 0,0067(d - 8) \quad (11)$$

$$t_f = 2,5 - 0,0067(d - 8) \quad (12)$$

Keskisaarekkeen halkaisijan tulee olla 8–40 metriä. Muut arvot saadaan seuraavasta taulukosta (taulukko 1).

Taulukko 1. Suomalaisen kaavan parametrit (Luttinen, Pursula & Innamaa 2005, 262).

Saapumis- kaista	Yksikaistainen kiertoliittymä		Kaksikaistainen kiertoliittymä		
	Kriittinen aikaväli (s)	Purkautumisaikaväli (s)	Kriittinen aikaväli (s)		Purkautumisaikaväli (s)
			Ulko-kaista	Sisä-kaista	
Oikea	4,3	2,3–2,5	4,3	4,0	2,4
Vasen			4,6	4,4	2,4

Kaksikaistaisen kiertoliittymän tulosuunnan vasemman- tai oikeanpuoleisen kaistan sisääntulokapasiteetti lasketaan seuraavalla kaavalla

$$C_p = \frac{3600(\theta_u + \theta_s)e^{-\theta_u(t_{c,u-1,8}) - \theta_s(t_{c,s-1,8})}}{1 - e^{-2,4(\theta_u + \theta_s)}} \left(1 - \frac{q_u}{2000}\right) \left(1 - \frac{q_s}{2000}\right). \quad (13)$$

Kaava antaa kerrallaan vain toisen kaistan kapasiteetin, joten kokonaiskapasiteetti saadaan johtamalla kaava oikean- ja vasemmanpuoleisen kaistan summasta

$$C_{kok} = C_{p,oik} + C_{p,vas}. \quad (14)$$

Kaavassa esiintyvät alaindeksit u ja s tarkoittavat ulko- ja sisäkaistaa. Kiertävän liikenteen aikaväli t_p on 1,8 s ja θ lasketaan yksikaistaisen kiertoliittymän mukaan kummallekin kaistalle erikseen. (Tuovinen & Enberg 2009, 10.)

3.3 Liikenteen simulointi

Liikenteen mikrosimuloinnin avulla voidaan mallintaa erilaisia liittymiä ja liikenneverkkoja hyvin yksityiskohtaisesti. Mallien muokkaaminen on yksinkertaista ja vaikutukset liikenteen välityskyvyssä ja sujuvuudessa näkyvät välittömästi. Simulointia voidaan käyttää hyödyksi olemassa olevien tai suunnitteilla olevien liikenneympäristöjen toimivuuden tarkasteluissa. Liikenteen simulointi voidaan toteuttaa makro-, meso- ja mikrotasolla. Makrotasolla keskitytään liikennevirtojen kokonaisuuksiin, kun taas mikrotasolla tarkastellaan yksittäisiä ajoneuvoja. Mesotaso on edellisten väli-muoto, jossa keskitytään ajoneuvoryhmiin. (Liikennevirasto 2013.)

Simuloinnin avulla voidaan esimerkiksi tarkastella eri kulkumuotoja, ver-tailla erilaisten liikennejärjestelyjen vaikutuksia sekä arvioida tarkastelta-vien vaihtoehtojen paremmuutta. Erilaiset simulointiohjelmat tuottavat tie-

toa palvelutasoista, viivytyksistä, jononpituuksista, liikennemääristä ja matka-ajoista. (Liikennevirasto 2013.)

Kalibrointi tarkoittaa erilaisten parametrien ja muuttujien arvojen sovittamista siten, että mallin tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin todellisuutta. Validoinnissa tarkastetaan erilaisilla luotettavilla testimenetelmillä, että validoitava kohde toimii ennalta määriteltyjen kriteerien mukaan. Muokattavat parametrit vaihtelevat ohjelmittain. Erona analyttisiin menetelmiin simulointiohjelmissa on se, että ohjelmilla voidaan tuottaa satunnaisuutta. Luotettavien tulosten saamiseksi malleja tulee usein ajaa useaan kertaan eri siemenluvuilla satunnaisuuden tuottamiseksi. Siemenlukujen vaihtelulla tuotetaan satunnaisuutta, mikä kuvastaa tuloksissa jokaisen päivän ainutkertaisuutta. (Liikennevirasto 2013.)

Markkinoilla on tarjolla mitä erilaisimpia simulointiohjelmiä, joista jokainen on räätälöity eri tarkoituksiin ja eri kohteisiin. Tässä työssä simulointiohjelmat on rajattu kolmeen Suomessa käytettyyn mikrosimulointiohjelmaan: Synchrono/SimTrafficiin, Paramicsiin ja VISSIMIin.

3.4 Tarkasteltavat simulointiohjelmat

3.4.1 Synchrono/SimTraffic

Synchrono/SimTraffic on amerikkalaisen Trafficware-yrityksen suunnittelema liikenteen simulointiohjelma, joka koostuu kahdesta eri ohjelmasta; Synchronosta, jolla malli luodaan sekä SimTrafficiista, joka tuottaa simulointianimaation. SimTraffic osoittaa mallin mahdolliset ongelmakohdat, kuten pullonkaulat ja muut ruuhkautumispisteet.

Synchrono on kehitetty erityisesti liikennevalo-ohjattujen liittymien tarkasteluun, mutta se soveltuu myös valo-ohjaamattomien liikenneympäristöjen toimivuuden arviointiin. Ohjelman avulla voidaan esimerkiksi optimoida liikennevalojen kiertoaikoja sekä eri vaiheiden pituuksia liikennemäärästä riippuen. Aluksi Synchronolla rakennetaan tutkittavan liikenneverkon kohdemalli ja tehdään mahdolliset liikennevalosuunnitelmat, jonka jälkeen kohde tarkastellaan SimTrafficin avulla. Synchrono tuottaa esimerkiksi tiedot liittymien välityskykyasteista suunnittain sekä palvelusoluokat. SimTrafficin avulla saadaan tarkempaa tietoa liittymästä, kuten viivytykset kais-toittain, toteutuneet liikennemäärät ja jononpituudet. Ohjelmia voidaan käyttää myös erillään, mutta tällöin Synchronoa voidaan pitää vain analyttisenä menetelmänä. (Liikennevirasto 2013.)

3.4.2 Paramics

Paramics on mikrotasolla toimiva liikenteen simulointiohjelma, joka on kehitetty Edinburgin yliopistossa 1990-luvulla. Paramics perustuu rinnakkaisprosessointiin, minkä vuoksi ohjelmalla pystytään mallintamaan paljon enemmän katuja sekä ajoneuvoja, kuin monilla muilla mikrosimuloin-

tiohjelmissä. Paramicsin erikoisominaisuutena on juuri tämän tekniikan ansiosta tarkka häiriöiden mallinnuskyky. Ohjelman avulla voidaan mallintaa tavallisen liikenneverkon ja kuljettajakäyttäytymisen lisäksi eri ajoneuvotyyppisiä ja -ryhmiä sekä kevyttä liikennettä. (Pursula, Niittymäki & Ojala 2000, 35.)

Paramics-ohjelma koostuu useamman ohjelman kokonaisuudesta. Jokaisella ohjelmalla on oma tehtävänsä. **Modeller** on käytetyin ohjelmista, sillä sen avulla luodaan liikenneverkot ja simuloidaan liikennettä. Simulointia voidaan seurata animaationa. **Analyserin** avulla tutkitaan tehtyjä simuloituja. Ohjelmalla saadaan tiedot esimerkiksi jononpituuksista, palvelutasoista, viivytyksistä ja liikennemääristä. **Converter** lukee verkon tietoja ja antaa käyttäjälle mahdollisuuden opettaa sovellukselle, kuinka tietoa tulisi tulkita. **Designer** on mallin muuttamis- ja muokkaamisohjelma. Sen avulla voidaan muuttaa 3D-mallit niin sanotuiksi PMX-tiedostoksi. PMX-tallennusmuodon tarkoitus on tarjota Paramicsin käyttäjille mahdollisuus pyörittää suuria, paljon yksityiskohtia sisältäviä 3D malleja alentamatta ohjelman suorituskykyä. **Estimator** on itsenäinen työkalu, jonka avulla voidaan luoda aiemmista ennustematriiseista keinotekoisia matriiseja hyväksikäyttäen liikennelaskentoja ja matriisimalleja, jotka syötetään ohjelmaan. **Processorin** avulla voidaan toteuttaa useita ajoja kerralla. Tuloksia voi tarkastella Analyserilla. (Quadstone Paramics 2011.)

3.4.3 VISSIM

VISSIM on Saksassa kehitetty mikrosimulointiohjelma, jonka toiminta perustuu aika-askeliin. Ohjelman avulla voidaan simuloida suuria malleja, esimerkiksi kokonaisia kaupunkeja. Paramicsiin verrattuna VISSIM on yksityiskohtaisempi ja monipuolisempi simulointiohjelma. (Liikennevirasto 2013.)

Perinteisen ajoneuvoliikenteen lisäksi VISSIMillä voidaan mallintaa joukkoliikennettä, raideliikennettä, jalankulkijoita ja pyöräilijöitä. Jalankulkijat voidaan mallintaa erikseen, tavallisen liikenteen ja/tai joukkoliikenteen kanssa. Simuloitaessa ohjelma ottaa huomioon jalankulkijoiden ja autojen välisen vuorovaikutuksen. Joukkoliikennettä simuloitaessa voidaan ottaa huomioon bussien etuoikeuksia, kuten bussikaistat ja liikennevaloetudet. Ohjelma soveltuu myös bussi- ja raitiovaunupysäkkien kapasiteettien ja toiminnan analysoimiseen. (Ptv 2008, 24.)

4 ANALYYTTISTEN MENETELMIEN TUTKIMUKSET

4.1 Tarkastelumenetelmä

Tarkastelut sisälsivät Suomessa yleisimmät kiertoliittymätyypit, joita ovat yksikaistainen kiertoliittymä, kaksikaistainen kiertoliittymä yhdellä sisään-

tulo- ja kahdella kiertävällä kaistalla, kaksikaistainen kiertoliittymä kahdella sisääntulo- ja yhdellä kiertävällä kaistalla sekä kaksikaistainen kiertoliittymä kahdella sisääntulo- ja kahdella kiertävällä kaistalla. Kaikki menetelmät eivät kuitenkaan sisällä jokaista kiertoliittymätyyppiä. Bovy-kaavan sekä suomalaisella välityskykykaavan avulla voidaan laskea yksikaistaisten kiertoliittymien lisäksi vain sellaisten kaksikaistaisten kiertoliittymien sisääntulokapasiteetit, jossa on kaksi sisään tulevaa ja kaksi kiertävää kaistaa. Analyttisten menetelmien kapasiteettitutkimusten tulokset on esitetty käyräkuvina.

Menetelmien avulla määriteltyjä yksikaistaisten kiertoliittymien kapasiteetteja verrattiin kenttämittaustuloksiin, jotka on esitetty tämän opinnäytetyön kappaleessa 2.4. Kenttämittaustulokset ovat osa Tiehallinnon toteuttamaa Kiertoliittymien välityskyky-selvitystä. Kaksikaistaista kiertoliittymää ei voida vertailla puutteellisten välityskykytutkimusten takia, sillä tutkituissa kaksikaistaisissa kiertoliittymissä mikään suunta ei koskaan jonoutunut.

Menetelmien antamiin tuloksiin on mahdollista vaikuttaa muutamalla infrastruktuuriin tai kuljettajakäyttäytymiseen vaikuttavia arvoja. Menetelmissä muutettavissa olevat tekijät sekä laskettavat kiertoliittymätyypit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Menetelmissä muutettavissa olevat muuttujat ja arvot.

Menetelmä	Laskukaavat	Huomioi	Muutettavat tekijät
HCM	Yksikaistainen Kaksikaistainen (1s,2k) Kaksikaistainen (2s,1k) Kaksikaistainen (2s,2k)	Vain liikennemäärät	
HCS	Yksikaistainen Kaksikaistainen (1s,2k) Kaksikaistainen (2s,1k) Kaksikaistainen (2s,2k)	Infrastruktuuri	Kaistamäärä, raskaan liikenteen %, jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden määrä
Bovy	Yksikaistainen Kaksikaistainen (2s,2k)	Infrastruktuuri, liikennemäärä	Poistuva liikenne ja kertoimet: α = poistumis- ja sisääntulokaistan etäisyys toisistaan, β = kiertävien kaistojen lukumäärän mukaan, γ = sisääntulokaistojen lukumäärän mukaan
MR	Yksikaistainen Kaksikaistainen (1s,2k) Kaksikaistainen (2s,1k) Kaksikaistainen (2s,2k)	Liikennemäärä	Poistuva liikenne
HBS	Yksikaistainen Kaksikaistainen (1s,2k) Kaksikaistainen (2s,1k) Kaksikaistainen (2s,2k)	Kuljettajakäyttäytyminen	Kriittinen aikaväli, purkautumisaikaväli ja peräkkäisten autojen minimaikaväli kiertotilassa
Suomalainen	Yksikaistainen Kaksikaistainen (2s,2k)	Infrastruktuuri ja kuljettajakäyttäytyminen	Keskisaarekkeen halkaisija, kriittinen aikaväli, kaksikaistaisessa kiertoliittymässä kiertävien ajoneuvojen määrän jakauma sisä- ja ulkokaistalla

Kierto liittymätyyppien perässä olevat lyhenteet tarkoittavat:

- 1s, 2k = yksi sisään tulo- ja kaksi kierto vää kaistaa
- 2s, 1k = kaksi sisään tulo- ja yksi kierto vä kaista
- 2s, 2k = kaksi sisään tulo- ja kaksi kierto vää kaistaa.

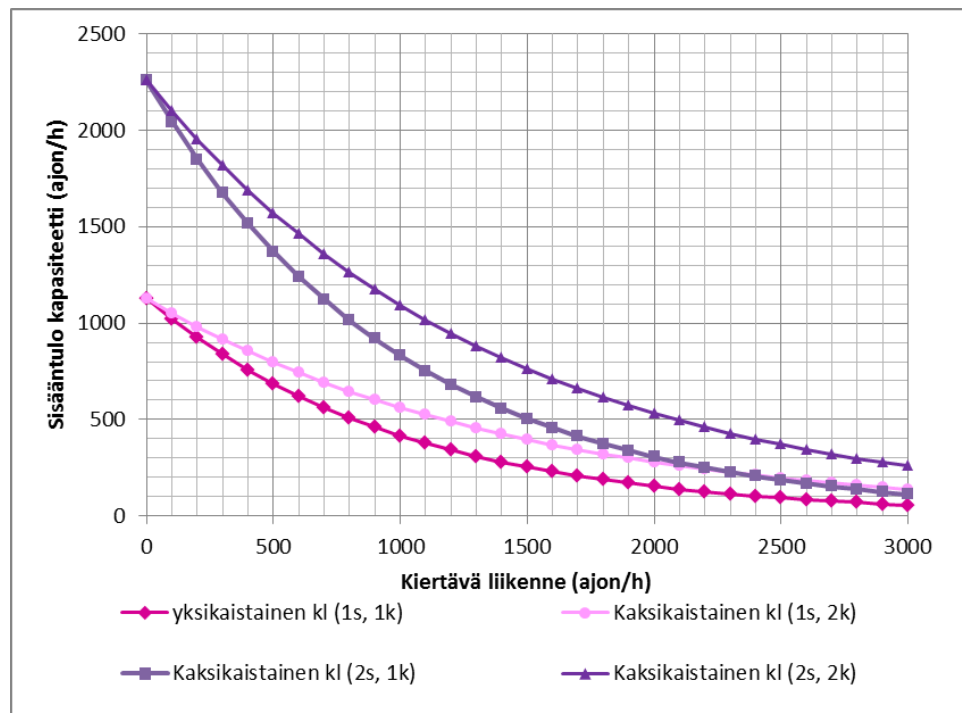
Sisään tulo kapasiteetit tarkasteltiin 100 kierto vään ajoneuvon välein. Jos laskentakaava edellytti kierto liittymän keskihalkaisijan määrittämistä, määriteltiin yksikaistaisen kierto liittymän halkaisijaksi 16 m ja kaksikaistaisen 26 m.

4.2 HCM

Highway Capacity Manualin avulla voidaan laskea sisään tulo kapasiteetti kaikille neljälle eri kierto liittymätyypille:

- yksikaistainen kierto liittymä (kaava 1)
- kaksikaistainen kierto liittymä, jossa on yksi sisään tulo kaista ja kaksi kierto vää (kaava 2)
- kaksikaistainen kierto liittymä, jossa on kaksi sisään tulo kaistaa ja yksi kierto vä (kaava 3)
- kaksikaistainen kierto liittymä, jossa on kaksi sisään tulo- ja kaksi kierto vää kaistaa (kaava 6).

HCM:n laskentakaavoilla lasketut sisään tulo kapasiteetit eri kierto väällä liikennemäärällä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Highway Capacity Manualin kapasiteettikäyrät kierto liittymätyypeittäin.

Kaavojen käyttö on erittäin yksinkertaista, sillä muuttuvia tekijöitä ei ole ja jokainen liittymätyppi lasketaan omalla kaavallaan. Koska kertoimia ja

muuttuvia arvoja ei ole, voidaan todeta, etteivät kaavat ota huomioon kiertoliittymien muita rakenteellisia ominaisuuksia, kuten halkaisijaa tai kais-taleveyksiä. Myöskään kuljettajakäyttäytymistä ei ole otettu huomioon. HCM:n lisäominaisuutena ovat tarkentavat laskukaavat, joiden avulla voi-daan laskea raskaan liikenteen sekä pyöräilijöiden ja kävelijöiden vaiku-tuksia sisääntulokapasiteettiin.

Kenttätutkimukseen verrattuna HCM-kaavan antama yksikaistaisen kierto-liittymän välityskyky on vähäisellä kiertävällä liikenteellä pienempi ja suurella kiertävällä liikennemäärällä korkeampi. Esimerkiksi Hyrylän kiertoliittymän kuvaajassa (kuva 6) esitetty kiertävän ja sisään tulevan lii-kenteen summa on noin 1400–1600 ajoneuvoa tunnissa koko kuvaajan pi-tuudelta, kun kiertävän liikenteen ollessa vähäinen HCM antaa summaksi noin 1 000 ajoneuvoa tunnissa ja kiertävän liikenteen määrän ollessa suuri saadaan tulokseksi lähes 2 000 ajoneuvoa tunnissa. Kun kiertävän ja si-sään tulevan liikenteen määrä lähestyvät toisiaan, on välityskyky noin 200 ajoneuvoa alhaisempi, kuin kenttämittauksissa.

4.3 HCS

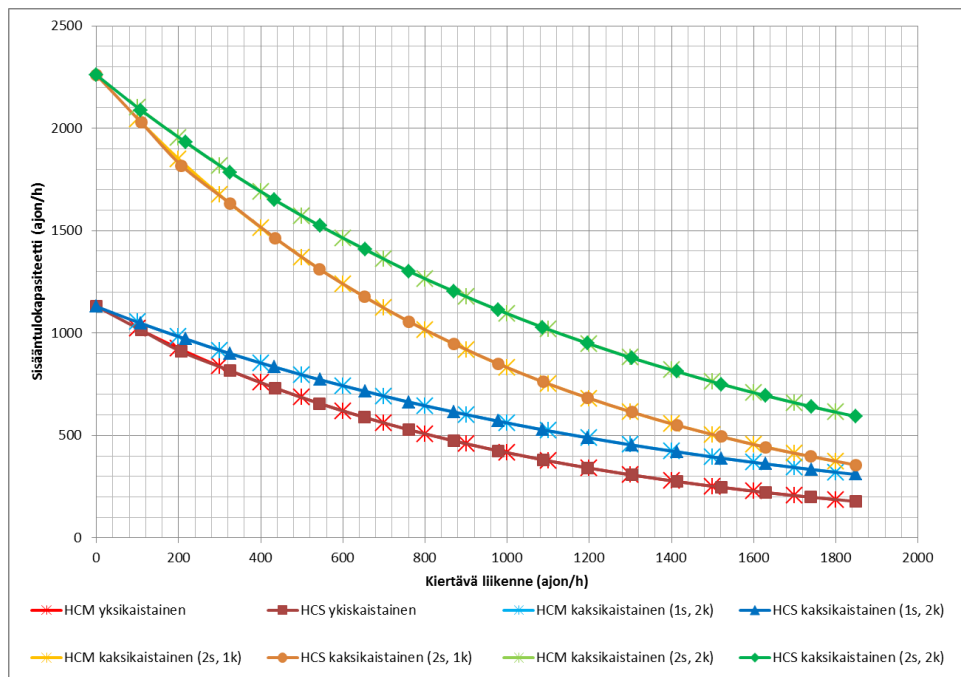
Highway Capacity Softwaren avulla voidaan tarkastella HCM:iin määri-teltyjen kaavojen lisäksi myös useampi kuin kaksikaistaisia kiertoliittymiä. Kiertoliittymät voivat kuitenkin olla maksimissaan nelikaistaisia.

Ohjelmaan syötetään aluksi kuvan 12 mukaisiin kenttiin liittymän tiedot ja tämän jälkeen halutut suunnat, kaistamäärät, konfliktissa olevat kaistat ja mahdolliset prosenttiosuudet raskaalle liikenteelle sekä jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden määrä. Jos kaistoja on enemmän kuin yksi, voidaan lisäksi määrittää, kuinka monta prosenttia ajoneuvoista käyttää ulko- ja sisäkais-taa. Kun tarvittavat tiedot on syötetty, ohjelma laskee kapasiteetin, viivy-tyksen ja kertoo suunta- ja kaistakohtaisesti palvelutasoluokan. Lopulliset tulokset voidaan tulostaa raportiksi.

HCS 2010 ROUNDABOUTS												
Analyst				Intersection								
Agency/Co.				Jurisdiction								
Date	28/04/2013			Units: U. S. Customary								
Time Period Analyzed				Analysis Year								
East/West Street Name				North/South Street Name								
Project ID												
LANE DESIGNATIONS, VEHICLE VOLUMES AND ADJUSTMENTS												
										Duration	0.25	hours
Eastbound			Westbound			Northbound			Southbound			
Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	
Number of Lanes and Usage												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Shared		Shared		Shared		Shared		Shared		Shared		
Percent of Entry Vehicles using Left Lane												
47			47			47			47			
Conflicting Lanes on Entry												
1			1			1			1			
Right-Turn Bypass												
None			None			None			None			
Conflicting Lanes on Bypass Exit												
1			1			1			1			
No. of Pedestrians Crossing Entry												
0			0			0			0			
Eastbound			Westbound			Northbound			Southbound			
Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	
Volume (vph)												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
										Peak Hour Factor, PHF, All	0.92	
Percent Heavy Vehicles, (%), All												
3			3			3			3			
Eastbound U-Turn			Westbound U-Turn			Northbound U-Turn			Southbound U-Turn			

Kuva 12. HCS-ohjelman kentät.

Välityskykyä tarkasteltiin 100 kiertävän ajoneuvoyksikön välein, kun sisääntulosuunnan liikennemäärä oli 3 000 ajoneuvoa tunnissa (ylikysyntä). Syötetyn kiertävän liikennemäärän perusteella ohjelma raportoi, kuinka monta ajoneuvoa 3 000 sisään tulevasta ajoneuvosta todellisuudessa pääsi läpi eli ilmoitti maksimisisääntulokapasiteetin. Tutkimustulokset osoittivat, että ohjelma pohjautuu täysin Highway Capacity Manualiin. Saadut kapasiteettikäyrät noudattivat HCM:n avulla laskettuja välityskykymääriä, pienellä eroavaisuudella. Ohjelma nimittäin lisää sisääntulomäärää suuremmaksi, kuin mitä annettu liikennemäärä on. Esimerkiksi jos kiertäväksi liikenteeksi annetaan 300 ajon/h, on kiertävän liikenteen kapasiteetti 326 ajon/h. Lisäys on jokaisella kerralla 8,67 %. Kapasiteettikäyrät verrattuna HCM:n avulla saatuihin käyriin on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. HCS ja HCM kapasiteetikäyrät.

4.4 Bovy-kaava

Bovy-kaavan avulla voidaan laskea tulosuunnan kokonaiskapasiteetti yksikaistaisissa kierto liittymissä sekä kaksikaistaisissa kierto liittymissä, joissa on kaksi sisääntulo- ja kaksi kiertävää kaistaa. Molempien kierto liittymien kapasiteetit saadaan kaavasta 7 eri kertoimien avulla. Kaava ottaa huomioon lisäksi sisääntulohaarasta poistuvat ajoneuvot. Oletusmallia tarkastellessa on poistuvien ajoneuvojen määräksi määritetty 0 ajoneuvoa.

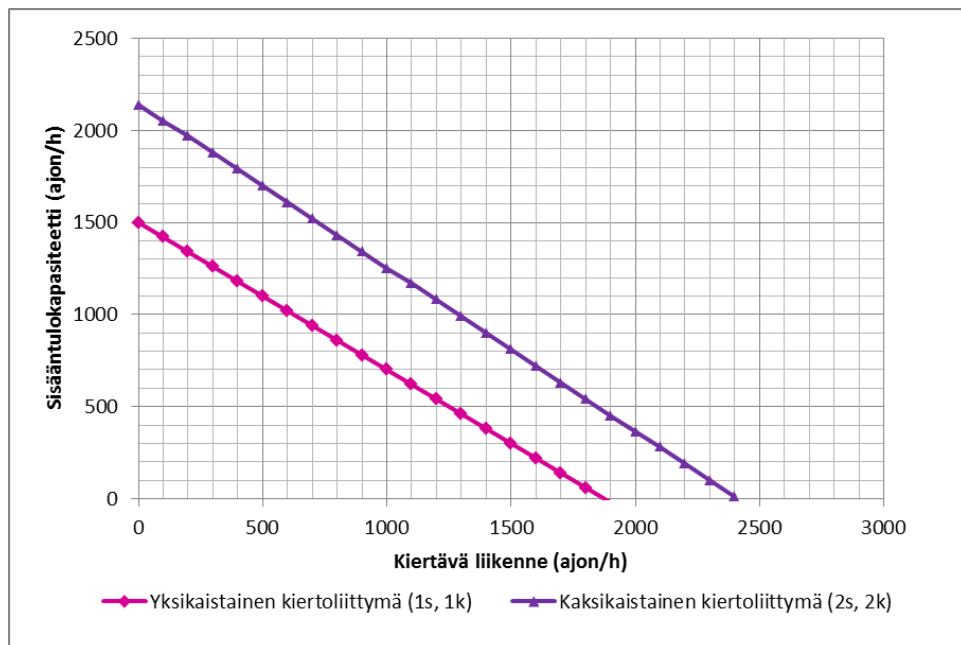
Laskuissa käytetyt kertoimet on ilmoitettu aikaisemmin kuvassa 8. Alfa arvo saadaan kierto liittymän halkaisijasta. Oletuskeskisaarekkeen halkaisija on 16 m ja siihen on lisätty puolikkaat kaistanleveydet molemmilta puolilta keskisaarekettä, yhteensä 5 m. Poistumis- ja sisääntulohaaran etäisydeksi on arvioitu neljäsosa kierto tilasta, joten pisteiden välinen etäisyys on saatu ympyrän piiriin avulla.

$$Pisteiden\ etäisyys = \frac{\pi \times (d + kaistaleveys)}{4}. \quad (15)$$

Laskuissa käytetyt arvot ovat:

- α on yksikaistaisessa kierto liittymässä 0,3 ja kaksikaistaisessa 0,1
- β on yksikaistaisessa kierto liittymässä 0,9 ja kaksikaistaisessa 0,7
- γ on yksikaistaisessa kierto liittymässä 1,0 ja kaksikaistaisessa 0,7.

Kaavasta saadut yksikaistaisen ja kaksikaistaisen kierto liittymän kapasiteetit on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Bovy-kaavan kapasiteetikäyrät yksi- ja kaksikaistaisessa kiertoliittymässä.

Käyttäjän on mahdollista vaikuttaa Bovy-kaavan tulokseen monien muuttujien vuoksi. Kaava ottaa infrastruktuurin huomioon kertoimissa sekä poistuvan liikennemäärän samasta sisääntulohaarasta, mutta ei ota huomioon kuitenkaan kuljettajakäyttäytymistä.

Eri muuttujien vaikutuksia välityskykyyn on selvitetty käyttämällä eri α , β ja γ arvoja sekä lisäämällä oletusarvoilla laskettuun kaavaan poistuvaa liikennettä molemmissa kiertoliittymissä. Poistuvan liikenteen arvot tarkasteluissa olivat yksikaistaisessa kiertoliittymässä 100, 300 ja 500 sekä kaksikaistaisessa kiertoliittymässä 200, 600 ja 1 000 ajoneuvoa tunnissa. Edellä mainittujen tarkastelujen tulokset on esitetty liitteessä 2.

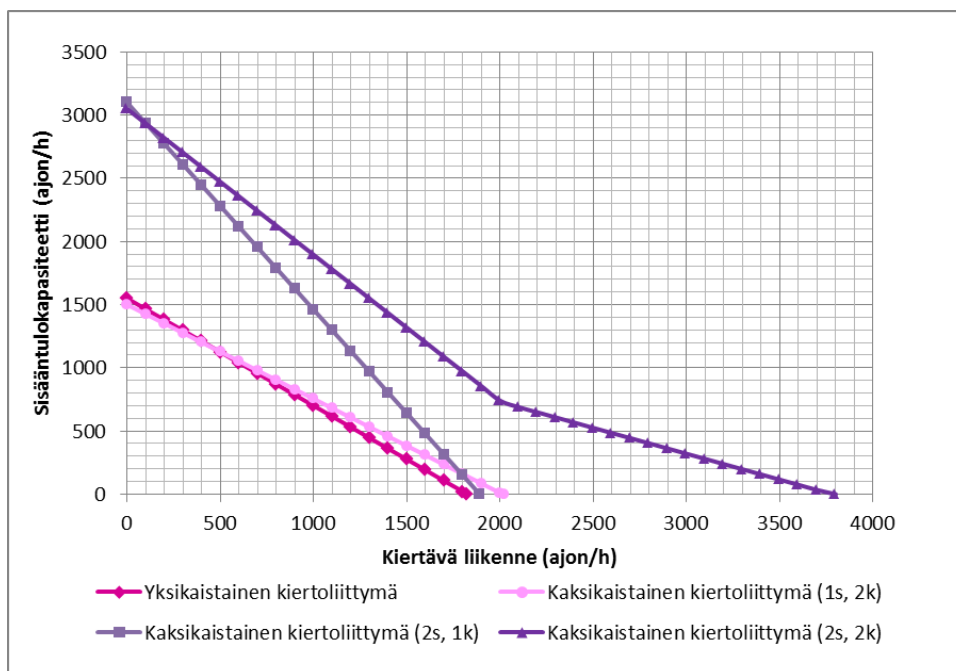
Tarkastelemalla poistuvan liikenteen vaikutuksia laskukaavaan huomataan, että kun poistuvan liikenteen määrä kasvaa, sisääntulokapasiteetti pienenee. Muutos ei ole kuitenkaan suuri, noin 100 ajoneuvoa tunnissa ja se kulkee lineaarisesti oletusmallin kanssa.

Vaihtelemalla laskukaavan kertoimia, muutokset välityskyvyssä ovat suuremmat. Yksikaistaisessa kiertoliittymässä pienellä kiertävällä liikennemäärällä kuvaajan alkupiste on sama, mutta kiertävän liikenteen kasvaessa välityskykyero kasvaa. Kaksikaistaisessa kiertoliittymässä on kaksi eri alkupistettä riippuen γ :n arvosta. Loppupisteiden sijainnin hajonta aiheutuu β :n arvosta. Muuttamalla erikseen α :n arvoa sisääntulokapasiteetti ei muuttunut. Tämä johtuu siitä, kun poistuvaa liikennettä ei ole, α :n arvolla ei ole merkitystä.

Kenttätutkimustuloksiin verrattuna yksikaistaisen kiertoliittymän välityskyky vastaa kenttämittaustuloksia β :n arvolla 1. Arvolla 0,9 Bovy-kaavan välityskyky on aavistuksen suurempi.

4.5 Meerstrooksrotondeverkenner

Mr-laskentaohjelman avulla voitiin tarkastella kiertoliittymien sisääntulokapasiteettia kaikilla neljällä kiertoliittymätyypillä. Ohjelmassa syötettiin kuvan 9 mukaisesti läntiselle tulosuunnalle kiertävän liikenteen määrä 100 ajoneuvon välein, jonka jälkeen jokaisen arvon määrittämä maksimisääntuloliikenne tarkasteltiin halutun kiertoliittymätyypin laskentataulukkosivulta. Saadut tulokset on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Meerstrooksrotondeverkenner-ohjelman sisääntulokapasiteettikäyrät.

Kuvasta huomataan, että kaksikaistaisessa kiertoliittymässä, jossa on kaksi sisään tulevaa ja kaksi kiertävää kaistaa, kapasiteetin lineaarisuus muuttuu 2 000 kiertävän ajoneuvoyksikön kohdalla. Tämä aiheutuu siitä, kun vasemmanpuoleisen sisääntulokaistan liikennemäärä saavuttaa nollan, oikeanpuoleisen kaistan kapasiteetti vähenee edelleen samassa suhteessa kuin aikaisemminkin. Ohjelma laskee vasemman- ja oikeanpuoleisen kaistan liikennemäärät eri kaavoista:

$$\text{oikea kaista} = 1550 - 0,82 \times K_u \quad (16)$$

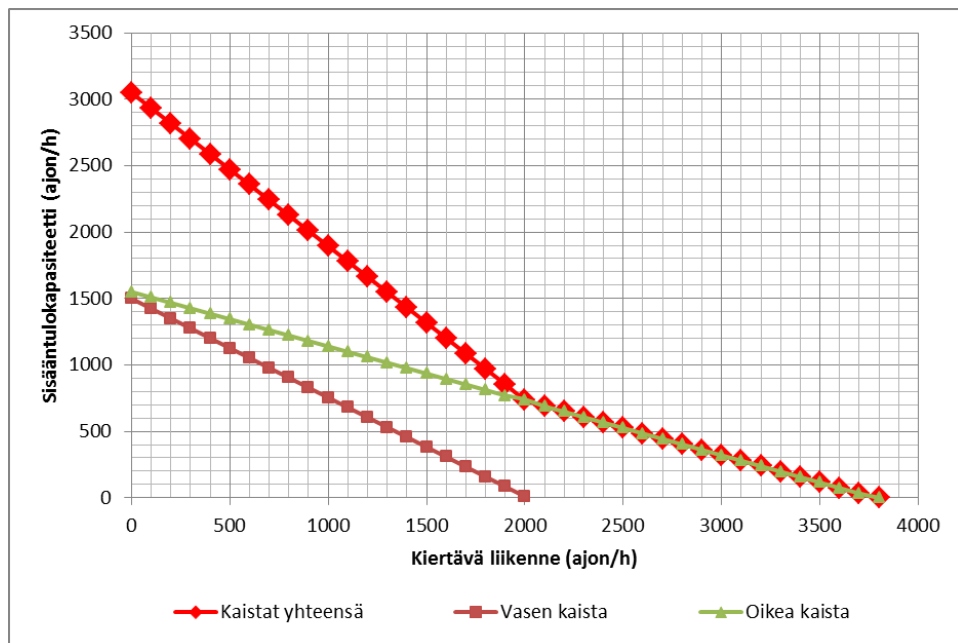
$$\text{vasen kaista} = 1500 - 0,81 \times K_u - 0,68 \times K_s \quad (17)$$

joissa

K_u = kiertävä liikennemäärä ulkokaistalla

K_s = kiertävä liikennemäärä sisäkaistalla.

Vasemman- ja oikeanpuoleisen sisääntulokaistan kapasiteetin muutos sekä kaistojen yhteenlaskettu kapasiteetti on esitetty kuvassa 16.



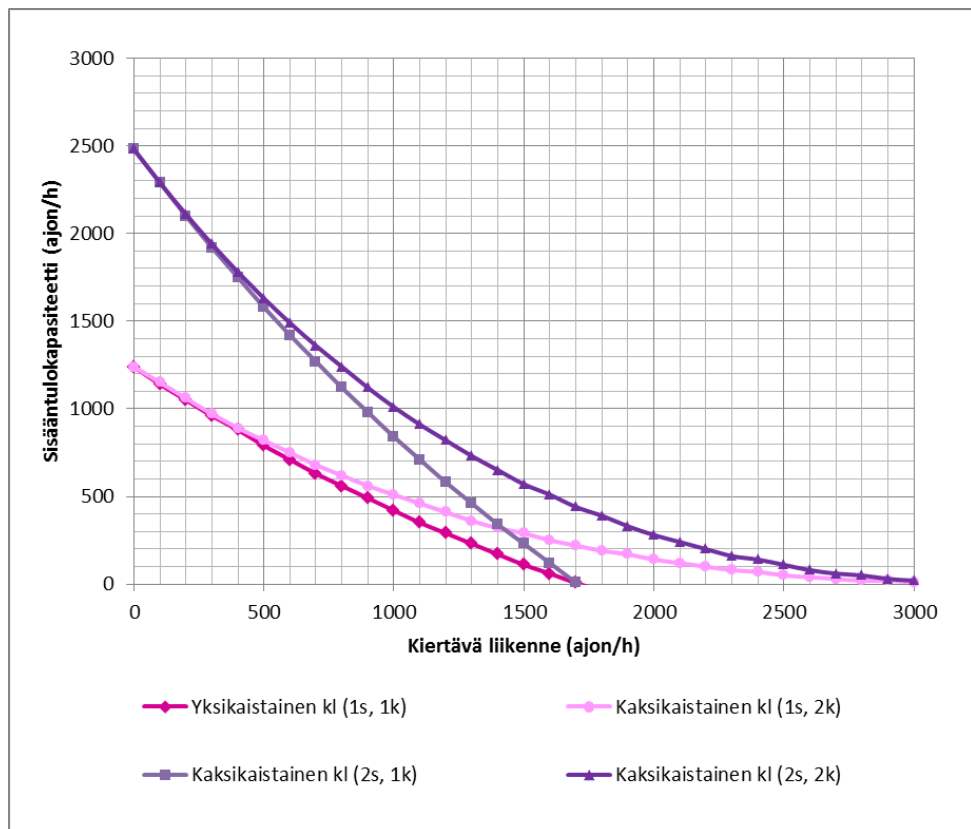
Kuva 16. Vasemman- ja oikeanpuoleisen sisääntulokaistan kapasiteetin muutos sekä kaistojen yhteenlaskettu kapasiteetti.

Oikeanpuoleisen kaistan kapasiteetti laskee hitaammin, koska kaista on konfliktissa vain kiertävän ulkokaistan liikenteen kanssa. Vasen sisääntulokaista puolestaan on konfliktissa kiertävän sisä- sekä ulkokaistan kanssa, jolloin kapasiteetti heikkenee nopeammin.

Ohjelman käyttäjällä ei ole mahdollisuuksia vaikuttaa sisääntulokapasiteetin määrään, sillä ohjelmaan syötetään kiertävän ja sisään tulevan liikenteen lisäksi pelkästään poistuva liikennemäärä. Saaduista tuloksista huomataan, että vaikka ohjelma perustuu Bovy-kaavaan, on kiertoliittymätyyppien välityskyvyissä eroavaisuuksia. Yksikaistaisen kiertoliittymän välityskyky on lähellä Bovy-kaavan antamaa välityskykyä, mutta kaksikaistaisen kiertoliittymän sisääntulokapasiteetti on reilusti korkeampi.

4.6 HBS

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen eli HBS-kaavan avulla voidaan laskea kokonaissisääntulokapasiteetit kaikille neljälle kiertoliittymätyypille, joita tässä työssä käsitellään. Kapasiteetit on saatu kaavasta 8, jossa liittymätyypin muutos tehdään kiertävän- ja sisään tulevan kaistamäärän muutoksella. Tulokset kiertoliittymätyypeittäin ovat esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. HBS:n mukaan lasketut kokonaissisäntulokapasiteetit.

HBS:ssä kaikkien kiertoliittymätyyppien välityskyvyt saadaan samasta kaavasta. Kaavaan merkitään kaistamäärät kiertävän ja sisään tulevien osalta, jolloin pystytään laskemaan erityyppisiä kiertoliittymiä. Kaavan käyttäjän on lisäksi mahdollista vaikuttaa saatuihin sisäntulokapasiteetteihin, sillä kaavassa on monia muutettavissa olevia tekijöitä. Näitä tekijöitä ovat kuljettajakäyttäytymiseen vaikuttavat arvot; purkautumis- ja kriittinen aikaväli sekä peräkkäisten autojen minimaalinen aikaväli kiertotilassa. Oletusarvoilla yksikaistaisen kiertoliittymän kapasiteetti jää pienemmäksi, kuin mitä Kiertoliittymien välityskykytutkimuksen kenttämittaustuloksissa (kappale 2.4) on havaittu.

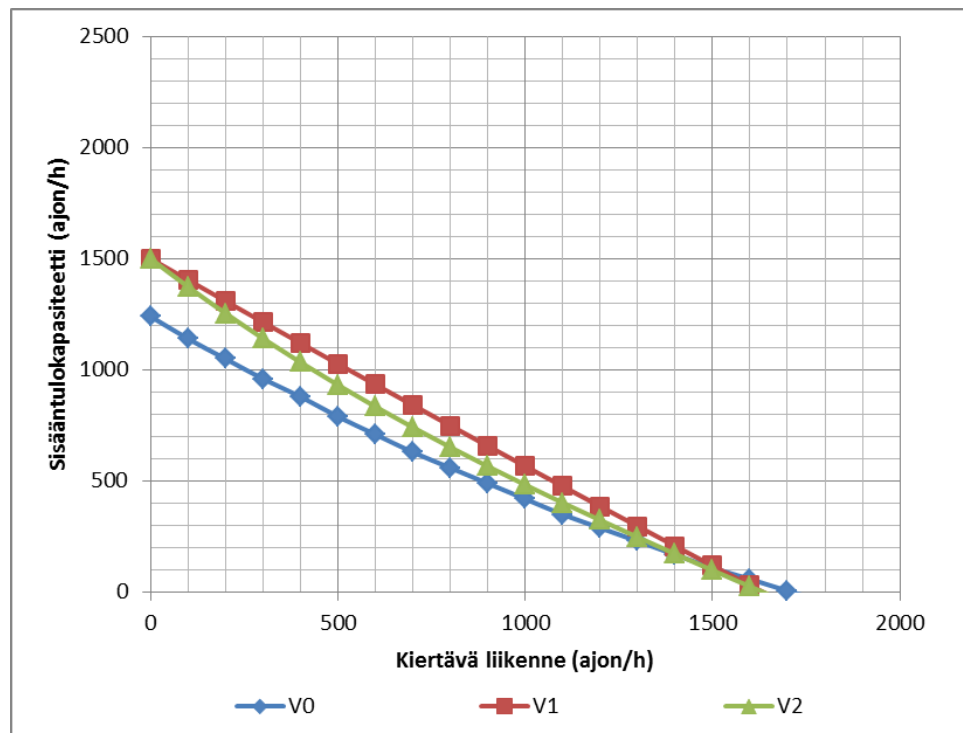
Kun eri aikaväliarvoja muutettiin yksi kerrallaan, nähtiin kuinka eri tekijät vaikuttivat kapasiteettiin. Kuvat käyrien muutoksista on esitetty liitteessä 3. Muokattaessa kriittistä aikaväliä huomattiin, että se vaikutti kapasiteettikäyrän keskivaiheille, missä kiertävän ja sisään tulevan liikenteen määrä lähestyi toisiaan. Mitä pienempi kriittinen aikaväli oli, sitä suurempi oli välityskyky. Suurentaessa kriittistä aikaväliä kapasiteetti taas heikkeni.

Purkautumisaikavälin muutos vaikutti ääripäähän, jossa sisään tulevan liikenteen osuus on korkea. Mitä suurempi aikaväli oli, sitä heikommaksi sisäntulokapasiteetti muuttui vähäisellä kiertävällä liikenteellä. Vastavaroisesti pienentämällä arvoa kapasiteetti kasvoi. Muuttamalla peräkkäisten autojen minimaalisen aikaväliä kiertotilassa, vaikutukset kohdistuivat toiseen ääripäähän, jossa kiertävän liikenteen osuus on korkea. Mitä pienempää arvoa käytettiin, sitä suurempi välityskyky saatiin.

Tarkasteluja tehdessä heräsi kysymys, voisiko kriittinen aikaväli olla kaavassa vaihtuva. Esimerkiksi kiertoliittymän kriittinen aikaväli on suurempi silloin, kun kiertävää liikennettä on vähän ja pienempi silloin, kun kiertävää liikennettä on paljon. Kaava huomioisi kuljettajakäyttäytymistä silloin, kun olosuhteet muuttuisivat. Lähes vapaassa kiertoliittymässä annetaan suurempi tila kiertävälle ajoneuvolle, kun esimerkiksi viiden minuutin jonotuksen jälkeen ajettaisiin rohkeammin pieniin ajoneuvoväleihin.

Aihetta on käsitelty Tiehallinnon selvityksessä Suunnitelmien liikenneturvallisuustarkastus. Selvityksessä on määritetty kiertoliittymissä kriittisen aikavälin arvoksi 3,5–4,5 s. Korkeammilla nopeuksilla kriittiseksi aikaväliksi on määritelty 7–8 s aikaväliä. Reaktioajaksi selvitys on määrittänyt 1–2 s. (Tiehallinto 2003b, 26–27.)

Kuvassa 18 on esitetty kokeellisilla arvoilla kiertoliittymän kapasiteetti yksikaistaisessa kiertoliittymässä. V0 sisältää oletusarvoilla lasketut tulokset, V1 mallissa kriittinen aikaväli on 3,5 s, purkautumisaikaväli 2,4 s ja peräkkäisten autojen minimaalinen aikaväli kiertotilassa 2,2 s. V2 mallissa kriittinen aikaväli on lineaarisesti pienenevä arvojen 4,3–3,875 välillä, muut arvot ovat kuten V1. Kriittinen aikaväli on valittu Tiehallinnon selvityksen Suunnitelmien liikenneturvallisuus perusteella.

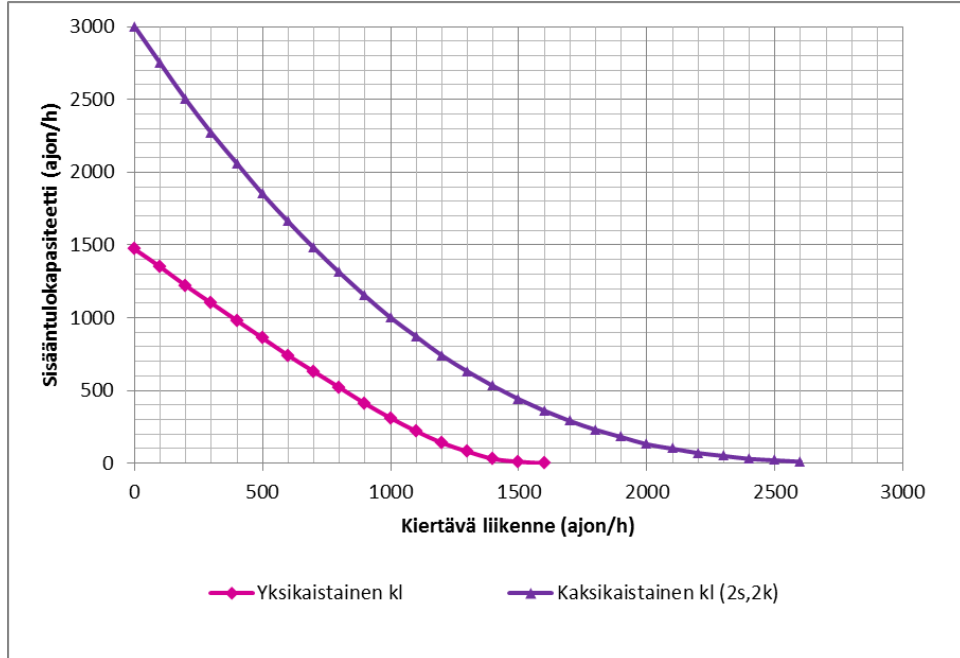


Kuva 18. HBS-kaavan kapasiteettikäyrät kokeellisilla aikaväliarvoilla.

4.7 Suomalainen välityskykykaava

Suomalaisen menetelmän kiertoliittymien välityskykykaavojen avulla voidaan tutkia yksikaistaisia kiertoliittymiä sekä niitä kaksikaistaisia kiertoliittymiä, joissa on kaksi sisääntulo- ja kaksi kiertävää kaistaa. Yksikaistaisen kiertoliittymän kokonaissisääntulokapasiteettien arvot saatiin lasketua kaavan 9 avulla. Kaksikaistaisen kiertoliittymän välityskykykaava 14

on johdettu kaavasta 13. Molemmat kaavat ottavat huomioon kiertoliittymien keskisaarekkeen halkaisijat, jotka tässä työssä on määritetty olemaan yksikaistaisessa 16 m ja kaksikaistaisessa kiertoliittymässä 26 m. Koska lausekkeiden avulla ei voida laskea sisääntulokapasiteettia kiertävän liikenteen ollessa nolla, on tyhjä liittymä tarkasteltu käyttämällä yhtä kiertävää ajoneuvoa. Laskukaavojen tulokset on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Suomalaisen välityskykykaavan kokonaissisääntulokapasiteetit.

Suomalaista välityskykykaavaa käytettäessä on tulokseen mahdollista vaikuttaa vaihtamalla keskisaarekkeen halkaisijan pituutta. Muut tekijät ovat standardeja, mutta muuttamalla kuljettajakäyttäytymiseen vaikuttavia arvoja, välityskyky muuttuu. Kaksikaistaisessa kiertoliittymässä muutoksia saadaan kiertävien kaistojen välisellä liikenteen jakaumalla. Liitteessä 4 on esitetty eri muuttujilla laskettuja tutkimustuloksia.

Tutkimustuloksista nähdään, että muuttamalla kiertoliittymän keskisaarekkeen halkaisijan pituutta, muutokset ovat pieniä. 8 m ja 40 m halkaisijan pituuden välillä välityskyvyn erotus on vain noin 100 ajoneuvoa tunnissa. Muutettaessa standardiarvona olevaa 4,3 s kriittistä aikaväliä, muutokset ovat suurempia. Vähentämällä kriittistä aikaa, välityskyky kasvaa ja kasvattamalla heikkenee. Esimerkiksi, jos kriittinen aikaväli olisi 3,5 s, sisääntulokapasiteetti olisi lähempänä kenttätutkimuksessa saatuja tuloksia. Standardiarvolla kapasiteetti jää reilusti alle mitatuista tuloksista. Kriittisen aikavälin muutos oletusarvon ja 3,5 s välillä on esitetty analyttisten menetelmien tulokappaleessa 6.1.

Kaksikaistaisesta kiertoliittymästä tarkasteltiin kiertävän sisä- ja ulkokaistan ajoneuvomäärän suhdetta. Oletuksena perustarkastelussa puolet ajoneuvoista käytti sisäkaistaa ja puolet ulkokaistaa. Suhdetarkastelussa kapasiteetit tutkittiin seuraavilla prosenttiosuuksilla; 60 % ja 40 %, 70 % ja 30 %, 40 % ja 60 % sekä 30 % ja 70 %. Tuloksista nähtiin, ettei muutoksella ole suurta merkitystä välityskyvyn kapasiteetin suuruudessa. Suurin ero havaittiin silloin, kun kiertävän liikenteen määrä oli korkea. Tällöin

ero kapasiteetissa oli noin 50–100 ajoneuvoa tunnissa. Suuria muutoksia kaavaan ei siis saada vaikuttamalla niihin arvoihin, joita kaavassa tulee määrittää.

5 SIMULOINTITUTKIMUKSET

5.1 Paramics

Tutkimukset tehtiin Paramicsin versiolla 6.8.0. Ohjelmaan mallinnettiin kiertoliittymä yksi- ja kaksikaistaisena. Kaksikaistaisessa kiertoliittymässä oli kaksi sisään tulevaa ja kaksi kiertävää kaistaa.

Paramicsin käytetyimmät työkalut kiertoliittymien mallintamisessa ovat Junctions, Links ja Control Points. Junctionseja määrittäessä voidaan muodostaa Nodeja eli liittymiä, muokata olemassa olevista liittymistä kiertoliittymiä sekä määrittää etuajo-oikeudet. Linkseissä luodaan teitä ja katuja sekä määritellään niiden ominaisuuksia, kuten nopeuksia, kaistaleveyttä ja -määriä. Control Pointseilla muokataan linkkien muotoa siirtämällä pysäytysviivoja ja muokkaamalla kaistaleveyttä Kerbsien avulla sekä muodostamalla kaaria olemassa oleviin linkkeihin. Junctions-, Links-, ja Control Points -työkalujen avulla mallinnetaan oletusliikenneverkko.

Mallin korjaukset ja parannukset tapahtuvat muuttamalla oletusparametreja. Paramicsissa linkin ominaisuuksiin vaikuttavia parametreja ovat:

- **Approach Visibility** eli näkyvyysarvo määrittää sen etäisyyden risteyksestä, jolla kuljettaja havainnoi mahdollisen konfliktin ja tekee päätöksen liittymisestä. Oletusarvo on 0.
- **Headway Factor** säätää seuranta-aikaväliä. Oletusarvo on 1.
- **Reaction Factor** säätää reaktioajan. Oletusarvo on 1.
- **Gap Acceptance** on kriittinen aikaväli.

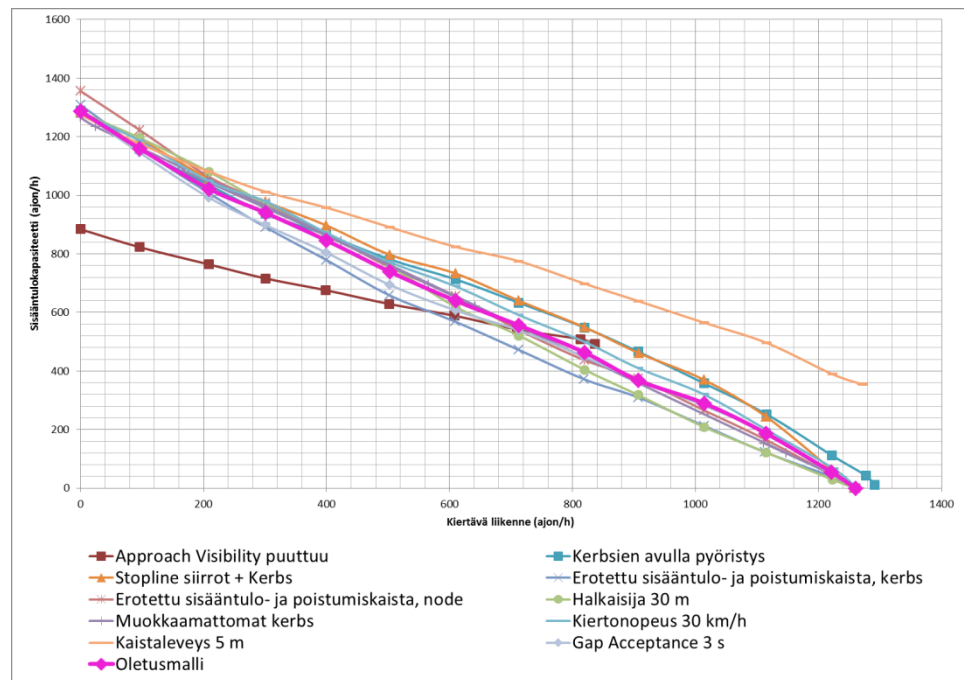
Muutettavissa olevia simulointiasetuksiin vaikuttavia parametreja ovat:

- **Time Steps** on aika-askelten määrä simulointimallissa. Mitä suurempi arvo on, sitä useammin simulointimalli päivittyy ja kuljettajat tekevät päätöksiä. Oletusarvo on 2, suositusarvo yli 4. Tässä työssä on käytetty arvoa 6.
- **Speed Memory** määrittää ennen nykyistä aika-askelta olevien aika-askelten määrän, jotka ajoneuvo muistaa. Oletusarvo on 3. Arvon tulee olla 1,5-kertainen Time Steps arvoon. Tässä työssä on käytetty arvoa 9.
- **Seed** eli siemenluku. Luvun muutos tekee jokaisesta simuloinnista erilaisen. Tämän avulla voidaan mallintaa esimerkiksi jokaisen päivän ainutlaatuisuus. Oletusarvo on 6.

Ensimmäisissä simuloinneissa huomattiin, että jos Approach Visibilityä ei muuteta, ajoneuvot käyttäytyvät liikennesääntöjen vastaisesti. Silloin kun kiertävää liikennettä on vähän, ajoneuvot pysähtyvät ennen liittymistä ja kun kiertävän ja sisään tulevan liikenteen määrä lähestyy toisiaan, kiertävä ja sisään tuleva liikenne muodostaa konfliktipisteessä niin sanotun veto-

ketjuefektin. Toinen tärkeä muutos on siirtää linkkien kulmissa olevat Kerbsit oikeille paikoilleen kiertoliittymässä, sillä Kerbsien sijainnit jäävät aina hyvin kauas liittymäalueesta. Jos näitä ei siirretä lähemmäs, kuljettajakäyttäytyminen muuttuu oleellisesti. Ajoneuvot purkautuvat suunnittain kiertoliittymän läpi, ensin osa yhden suunnan jonosta, sitten toisen suunnan jonosta, taas ensimmäisen suunnan jonosta ja niin edelleen. Näiden havaintojen vuoksi tuloksia ilman Approach Visibilityä ja Kerbsien siirtoa ei voida pitää luotettavina. Approach Visibility on ohjelman oletusarvona 0,0 m. Jotta tuloksia voitaisiin pitää luotettavimpina, arvoksi määritettiin 10 m. Kerbsit tulee siirtää käsin.

Yksikaistainen kiertoliittymä tarkasteltiin aluksi muuttamalla vain yhtä muuttujaa. Nämä olivat Headway & Reaction Factorit eri arvoilla, tulo ja poistumishaaran erottaminen toisistaan joko Kerbseillä tai kahdella erillisellä Nodella, halkaisija, kiertotilan nopeus, kaistaleveys, Gap Acceptance sekä pysäytysviivat. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 20. Liitteessä 5 on havainnollistettu, kuinka Headway ja Reaction factorin arvojen muuttaminen vaikuttaa liittymän kapasiteettiin.



Kuva 20. Paramics-mallin yhden arvon muutos.

Kaistaleveyden muutoksella huomataan, ettei käyrä saavuta koskaan kiertävän liikenteen arvoa nolla. Tämä johtuu siitä, ettei malliin saada mahtumaan enempää ajoneuvoja.

Kenttätutkimustuloksiin verrattuna oletusmallin kapasiteettikäyrä jäi reilusti mitattujen arvojen alle. Kun eri muuttujien vaikutuksia välityskykyyn oli tarkasteltu, muodostettiin Paramicsilla erilaisia kombinaatioita, joiden avulla kiertoliittymän välityskykyä yritettiin parantaa. Liitteessä 5 on esitetty kombinaatioiden ominaisuudet taulukoituna ja kapasiteettikäyrinä. Samassa liitteessä on myös esitetty, kuinka Seed numeron muutos ei vaikuttanut tulokseen, sekä kaksikaistaisen kiertoliittymän simuloinnit.

Simulointimalleja luodessa käy heti ilmi, kuinka suuri vaikutus pysähtymisviivoilla (Stopliness) on mallissa. Kun elementit on siirretty sopiviin paikkoihin ja oikeaan kulmaan, välityskyky paranee huomattavasti. Pienilläkin elementtimuutoksilla tuloksiin syntyy merkittäviä eroja, jotka eivät aina paranna välityskykyä. Esimerkiksi jos kiertotilassa pysäytysviivat ovat liian lähellä toisiaan, jokainen ajoneuvo pysähtyy niiden väliin. Jos pysäytysviivat taas ovat liian kaukana toisistaan, ajoneuvot tekevät ylimääräisiä mutkia. Mallintaessa 16 m halkaisijalla olevia kiertoliittymiä, oli pysäytysviivojen asettelu hankalaa, sillä ne olivat lähes aina liian lähellä tai liian kaukana toisistaan. Suuremmalla kiertoliittymän halkaisijalla siirtovaraa on enemmän.

Kaksikaistaisen kiertoliittymän simuloinnit suoritettiin 200 kiertävän ajoneuvon välein. Simuloidessa kiertoliittymää oletusarvoilla huomattiin, että ajoneuvot käyttäytyivät liikennesääntöjen vastaisesti. Lähes kaikki kiertävä liikenne käytti sisempää kaistaa, jolloin sisään tuleva liikenne pääsi vapaasti kiertämään ulkokaistaa. Ongelma korjattiin määrittämällä kaistapakotteet Stay in Lane ja Turning Lanes.

Kun pakotukset oli määritelty, liikenne sujui liikennesääntöjen mukaan. Oletusmallin lisäksi kaksikaistainen kiertoliittymä tarkasteltiin kalibroituina seuraavilla arvoilla: Headway & Reaction Factor 0,77, kiertonopeus 30 km/h ja kaistaleveys 5 m. Lisäksi Kerbsit ja Stoplinessit siirrettiin sekä sisääntulo- ja poistumiskaista erotettiin toisistaan Kerbsien avulla.

5.2 VISSIM

Tutkimukset suoritettiin VISSIMin versiolla 5.40. Ohjelmaan mallinnettiin kiertoliittymät yksi- ja kaksikaistaisena.

Ohjelmassa malli aloitetaan tekemällä haluttu liikenneverkko, määritetään nopeudet, Conflict Areas eli etuajo-oikeudet, mahdolliset Priority Rulesit, jotka täydentävät etuajo-oikeuksia sekä reitit ja ajoneuvomäärät. Tämän jälkeen voidaan muuttaa vielä ohjelman oletusparametreja. Käyttäjä voi halutessaan muuttaa arvoja rajattomasti. Arvojen muutokset kuitenkin kannattaa tehdä varoen, sillä pienilläkin muutoksilla saadaan suuria eroja kapasiteetissa.

Muutettavia parametreja ovat:

- **Average Standstill Distance (ASD)** eli keskimääräinen pysähtymisetäisyys. Oletusarvo on 2 m.
- **Additional Part of Desired Safety Distance (APDSD)** eli tavoitteellisen turvavälin lisäosuus. Oletusarvo on 2 m.
- **Multiplicative Part of Desired Safety Distance (MPDSD)** eli tavoitteellisen turvavälin kerroinisuus. Kerroin huomioidaan kaavassa, jolla lasketaan kahden ajoneuvon välinen etäisyys. Mitä suurempi arvo, sitä pienempi välityskyky. Oletusarvo on 3 m.
- **Min. Headway (Front/Rear)** tarkoittaa minimietäisyyttä edellä ajaavan ajoneuvon, jonka ajoneuvo vähintään tarvitsee vaihtaessaan

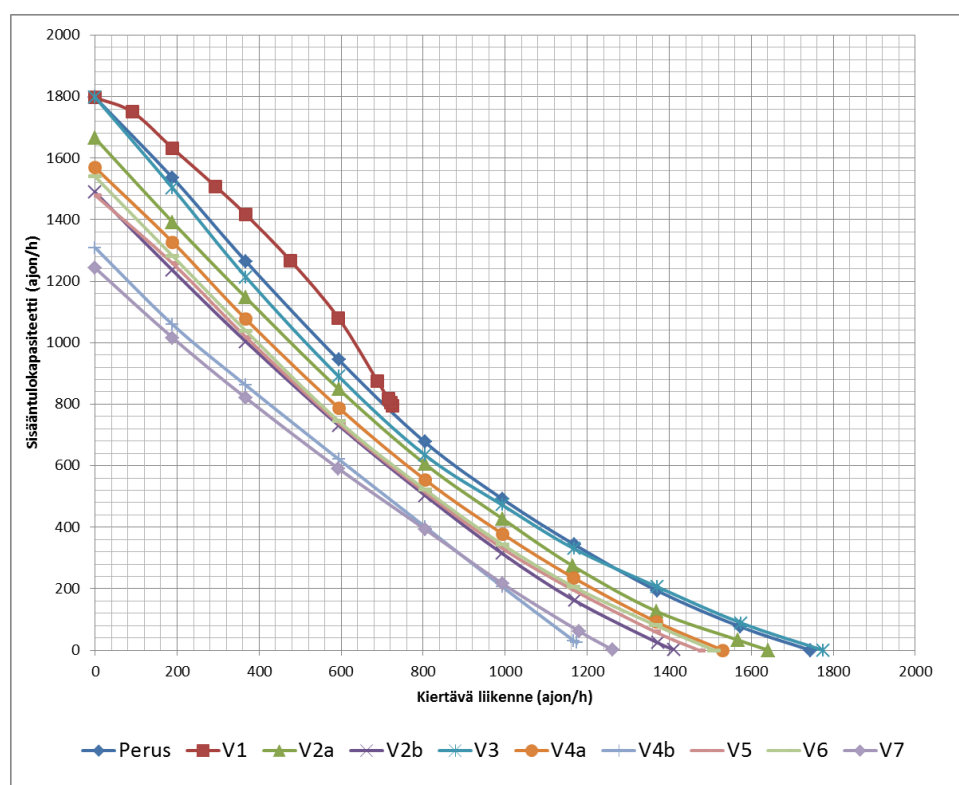
kaistaa edellä ajavan ajoneuvon perään. Oletusarvot ovat kummallakin 1,5.

- **Seed** eli siemenluku. Luvun muutos tekee jokaisesta simuloinnista erilaisen. Tämän avulla voidaan mallintaa esimerkiksi jokaisen päivän ainutlaatuisuus. Oletusarvo on 6.

Parametrien ja infrastruktuurin muutosten tutkiminen on suoritettu lähinnä yksikaistaisella kiertoliittymällä. Kuvasta 21 nähdään infrastruktuurin ja parametrien muutosten vaikutukset yksikaistaiseen kiertoliittymään. Malliversioiden ominaisuudet ja muutokset löytyvät taulukosta 3.

Taulukko 3. Versioiden ominaisuudet ja parametrit.

Yksikaistainen kiertoliittymä							
	nopeus	kierto nop.	priority rules	halkaisija	ASD	APDSD	MPDSD
perus	50	30	x	16	2	2	3
V1	50	30	-	16	2	2	3
V2a	40	25	x	16	2	2	3
V2b	40	20	x	16	2	2	3
V3	50	30	x	25	2	2	3
V4a	50	30	x	16	2	2	5
V4b	40	20	x	16	2	2	5
V5	50	30	x	16	3	3	3
V6	50	30	x	16	5	2	3
V7	50	30	x	16	2	5	3



Kuva 21. VISSIM-tarkasteluiden kapasiteetikäyrät yksikaistaisessa kiertoliittymässä.

Simuloinnit suoritettiin muuttamalla kiertävää liikennemäärää 200 ajoneuvon välein. Liitteessä 6 on esitetty kaksikaistaisen kiertoliittymän tarkastelut sekä kuinka siemenluvun, Seed, muutos ei vaikuta välityskykyyn.

Yksikaistaisen kiertoliittymän perusmallin simuloinneista huomataan, että VISSIM antaa kiertoliittymälle muita simulointiohjelmaa korkeamman vä-

lityskyvyn. Erilaisia kombinaatioita ohjelmassa on vaikea tehdä, sillä muuttujien määrä on rajallinen. Siksi tulokset on tutkittu muuttamalla aina vain yhtä muuttujaa kerrallaan. Kenttätutkimustuloksiin verrattuna kiertävän liikennemäärän ollessa vähäinen, sisääntulokapasiteetti on korkeampi. Muuten sisääntulokapasiteettikapasiteetti on lähellä tutkimustuloksia.

Kaksikaistainen kiertoliittymä on tutkittu vain oletusarvoilla, sekä yksikaistaisen kiertoliittymän versioiden V2b ja V4a ominaisuuksien mukaan. Tuloksille ei ole vertailukohteita, mutta arvojen muutos vaikutti kaksikaistaisen kiertoliittymän välityskykyyn samoin kuin yksikaistaisessakin. Kaksikaistaisen kiertoliittymän välityskykytulokset on esitetty liitteessä 6.

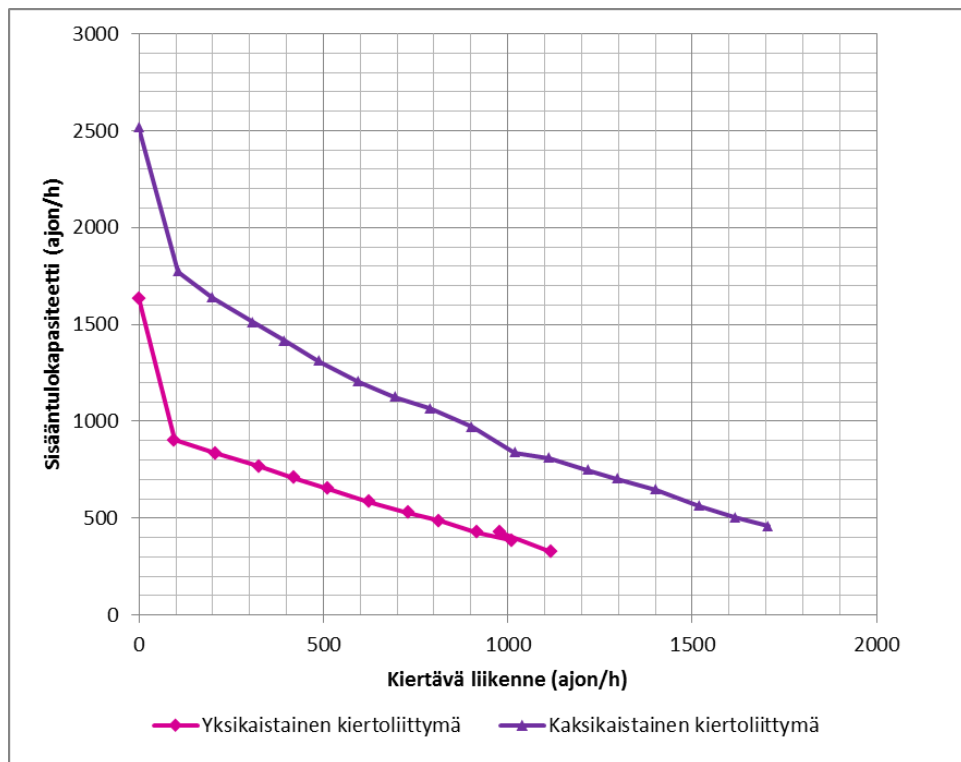
5.3 Synchro/SimTraffic

Simulointitutkimukset tehtiin Synchro/SimTrafficin versiolla 7. Tarkastelun kohteena oli yksikaistainen ja kaksikaistainen kiertoliittymä. Kaksikaistaisessa kiertoliittymässä oli kaksi sisään tulevaa ja kaksi kiertävää kaistaa. Yksikaistaisen kiertoliittymän halkaisijaksi määriteltiin 16 m ja kaksikaistaisen 26 m.

Synchro/SimTrafficissa on hyvin vähän muokausmahdollisuuksia. Esimerkiksi mallin infrastruktuuriin voidaan vaikuttaa vain kaistojen määrän ja leveyden sekä kiertoliittymän keskisaarekkeen halkaisijan avulla. Autojen pituutta ja raskaan liikenteen prosenttiosuutta voidaan myös vaihdella. Tässä tarkastelussa raskaan liikenteen osuus on poistettu kokonaan ja ajoneuvojen pituudeksi on määritetty 6,5 m, joka on lähempänä suomalaisia mittoja, kuin oletusarvo 8,0 m.

Välityskykytutkimukset suoritettiin siten, että sisääntulokapasiteetti mallinnettiin aina ylikysyntänä, eli yksikaistaisessa 2 000 ajon/h ja kaksikaistaisessa 5 000 ajon/h. Vain kiertävän liikenteen määrää muutettiin nolasta sadan ajoneuvon välein siihen asti, kunnes kaistan tai kaistojen kapasiteetti loppui.

Kun malleja tarkasteltiin tyhjänä eli liikenne syötettiin vain yhdestä suunnasta, ajoneuvojen käyttäytyminen oli liikennesääntöjen mukaista. Kun malleihin lisättiin kiertävää liikennettä, sisääntulokapasiteetit romahtivat. Tämä johtui siitä, että ajoneuvojen käyttäytyminen muuttui kiertoliittymään liittyessä. Tyhjässä mallissa ajoneuvot ajoivat kolmion oikeuttamalla tavalla, eli kun vasemmalta ei tullut autoa, ei tarvinnut pysähtyä. Jos malleihin lisättiin edes yksi kiertävä ajoneuvo, kaikki sisään tulevat ajoneuvot pysähtyivät tai hiljensivät merkittävästi vauhtiaan ennen kiertoliittymään liittymistä, kuin olisivat kohdanneet stop-merkin. Tarkasteluista saadut tulokset on esitetty kuvassa 22.



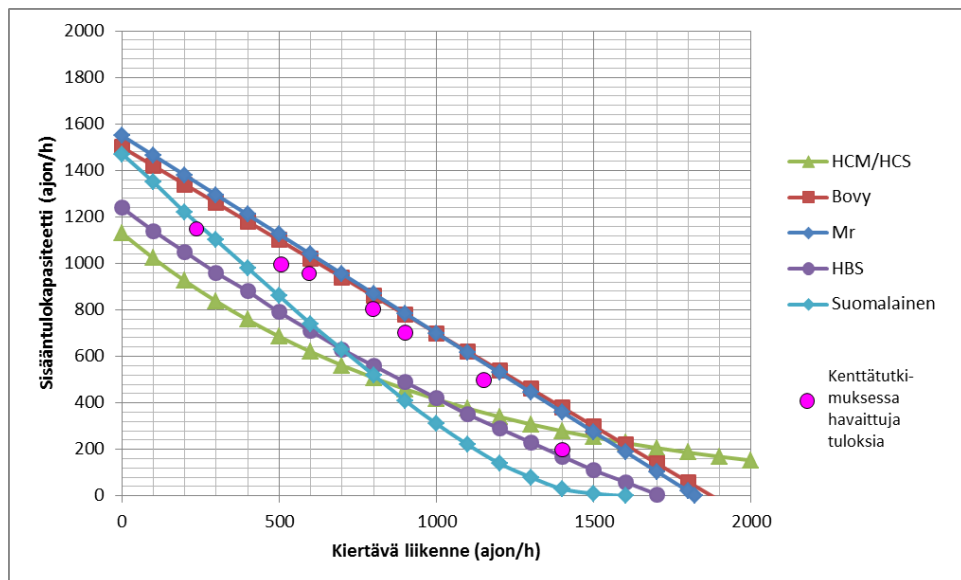
Kuva 22. Synchro/SimTraffic-tarkastelun tulokset.

Kuvasta nähdään, kuinka sisääntulokapasiteetti molemmissa kiertoliittymissä putoaa epärealistisesti noin 600 ajoneuvon verran, kun malliin lisätään kiertävää liikennettä. Verrattaessa tuloksia kenttämittaustuloksiin, huomataan, että esimerkiksi tilanteessa, jossa kiertävä liikenne on 500 ajoneuvoa tunnissa, jää Synchro/SimTrafficin yksikaistaisen kiertoliittymän kapasiteetti noin 300 ajoneuvon verran vajaaksi.

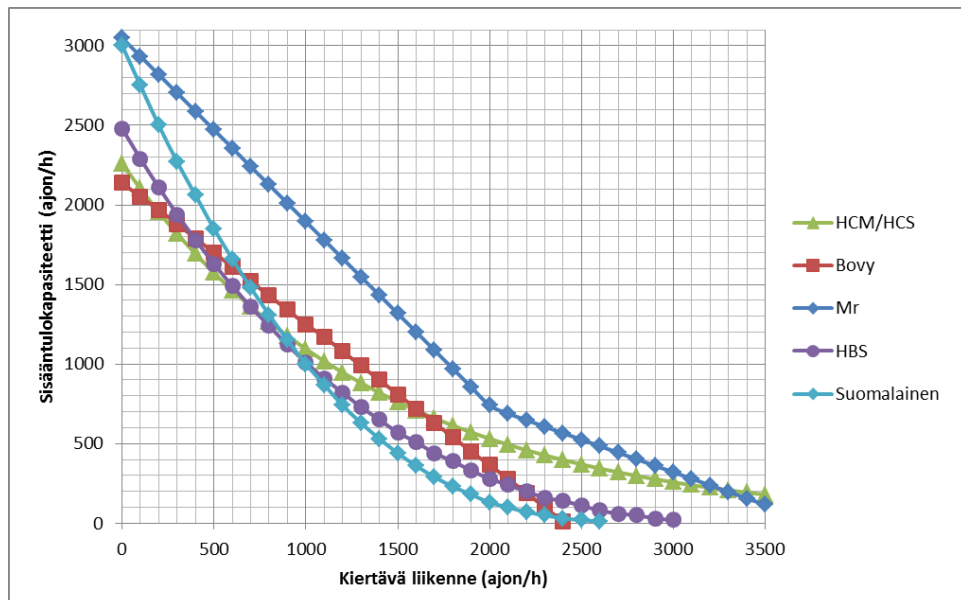
6 TULOKSET

6.1 Analyttiset menetelmät

Eri analyttisten menetelmien oletuskapasiteettikäyrät on esitetty yksikaistaisen kiertoliittymän osalta kuvassa 23. Kuvassa 24 on esitetty vastaavasti kapasiteettikäyrät kaksikaistaiselle kiertoliittymälle, jossa on kaksi kiertävää ja kaksi sisääntulokaistaa. Yksikaistaisen kiertoliittymän kuvaajaan on lisäksi merkitty kenttämittauksissa saatuja tuloksia. Liitteessä 7 on esitetty muiden kaksikaistaisien kiertoliittymien kapasiteettikäyrät niiden analyttisten menetelmien osalta, joiden avulla kapasiteetit oli mahdollista laskea.



Kuva 23. Eri analyttisten menetelmien kapasiteettikäyrät yksikaistaisessa kiertoliittymässä.



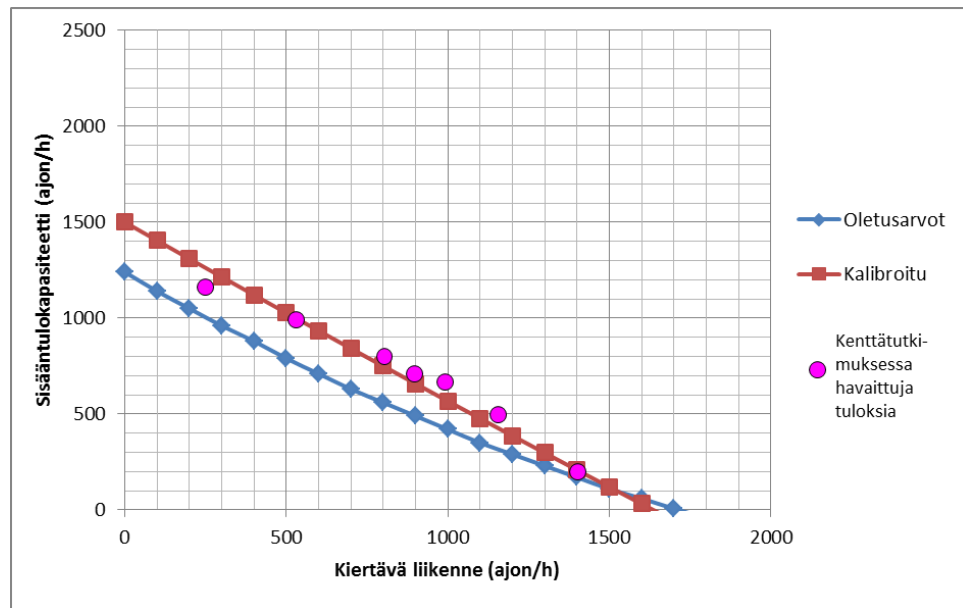
Kuva 24. Eri analyttisten menetelmien kapasiteettikäyrät kaksikaistaisessa kiertoliittymässä, jossa on kaksi sisään tulevaa ja kaksi kiertävää kaistaa.

HCM- ja HCS-menetelmillä lasketut kapasiteetit ylittivät kenttämittaustulokset kiertävän liikenteen määrän ollessa korkea. Koska laskentakaavat eivät ota huomioon liikenneympäristöä eivätkä kuljettajakäyttäytymisiä, kaavoja ei pystytä kalibroimaan vastaamaan paremmin suomalaisia olosuhteita.

Bovy-kaavan määrittelemä kapasiteetti on yksikaistaisessa kiertoliittymässä tarkasteltuna oletusarvoilla ($\alpha = 0,3$, $\beta = 0,9$ ja $\gamma 1,0$) korkeampi, kuin kenttätutkimuksen tulokset ovat osoittaneet. Bovy-kaava tuloksia voidaan pitää luotettavampina silloin, kun β :n arvoksi on määritetty 1,0.

Mr-ohjelman yksikaistaisen kiertoliittymän sisääntulokapasiteetti vastaa Bovy-kaavan oletusarvoilla laskettua kapasiteettia. Kenttämittaustuloksiin verrattuna kaavan antama välityskyky on korkeampi. Kaksikaistaisen kiertoliittymän välityskyky oli muihin analyttisiin menetelmiin verrattuna paljon korkeampi, joten välityskykytuloksiin tulee suhtautua varauksella.

HBS-menetelmän oletusarvoilla laskettu kapasiteetti jäi Kiertoliittymien välityskyky-selvityksen kenttämittaustulosten alle. Kaavan monipuolisten kalibroimisominaisuuksien avulla yksikaistaisen kiertoliittymän sisääntulokapasiteetit saatiin vastaamaan lähes täysin kenttämittaustuloksia. Kuvassa 25 on esitetty oletusarvoilla ja kalibroituilla arvoilla lasketut kapasiteettikäyrät sekä kenttätutkimuksessa havaittuja tuloksia.



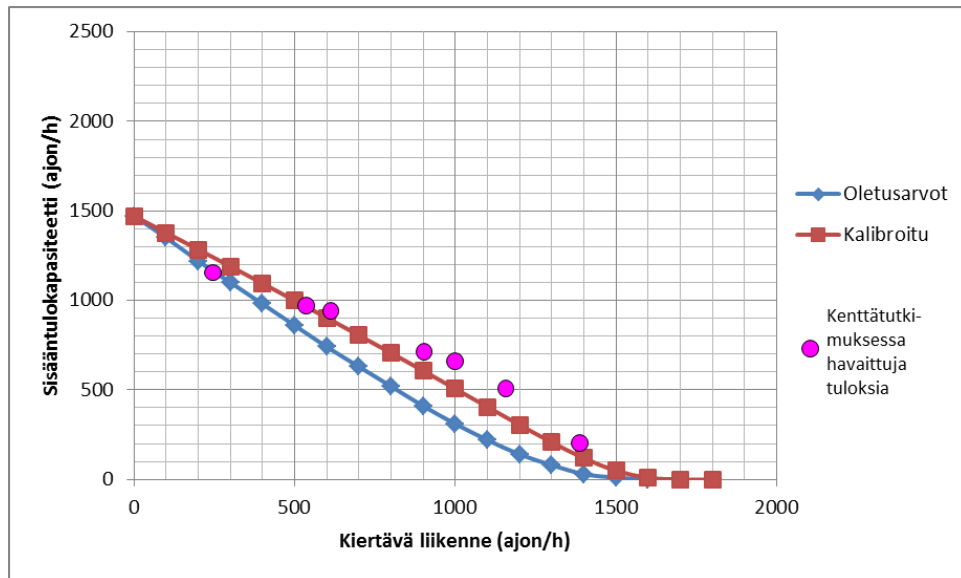
Kuva 25. HBS oletusarvoilla sekä kalibroituna.

Kalibroidut arvot ovat:

- kriittinen aikaväli 3,5 s
- purkautumisaikaväli 2,4 s
- peräkkäisten autojen minimaaliväli kiertotilassa 2,2 s.

HBS-kaavaa voidaan kalibroida myös kaksikaistaisissa kiertoliittymissä, mutta puuttuvien tutkimustulosten vuoksi kalibroinnilta puuttuvat kohdearvot, joita tavoitella. Yksikaistaisen kiertoliittymän kalibroitua kapasiteettikäyrää voidaan näiden tutkimustulosten pohjalta pitää melko luotettavana silloin, kun tarkastelun kohteena ovat tavalliset yksikaistaiset kiertoliittymät.

Suomalaisen välityskykykaavan tulokset jäävät kenttämittaustuloksia pienemmiksi. Kiertävän liikenteen ollessa vähäinen kapasiteetti on korkeampi, mutta liikenteen lisääntyessä sisääntulokapasiteetti vähenee paljon nopeammin kuin kenttämittauksissa. Kalibroimalla kriittistä aikaväliä, tulokset saadaan vastaamaan paremmin tutkittuja tuloksia. Kuvasta 26 nähdään kalibroinnin muutokset oletusarvoilla laskettuun kapasiteettiin sekä kenttämittaustuloksiin.



Kuva 26. Suomalainen välityskykykaava oletusarvoilla sekä kalibroituina.

Kalibroinnissa kriittisenä aikavälinä on käytetty arvoa 3,5 s. Kalibroitua kaavaa ja tutkimustuloksia vertaillen voidaan osoittaa välityskykytarkastelujen olevan luotettavampia kalibroidulla mallilla.

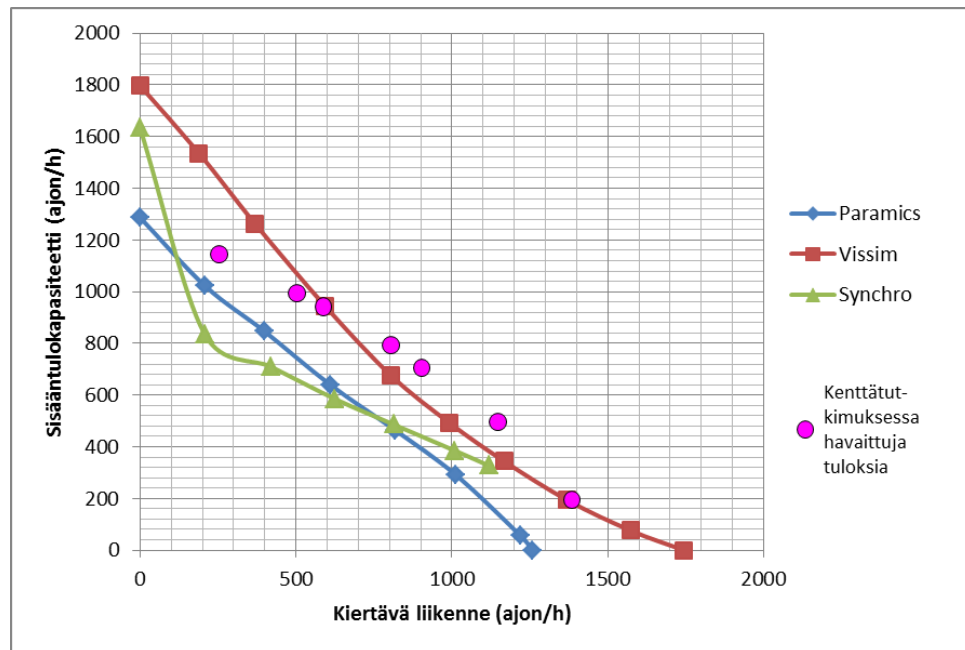
6.2 Simulointiohjelmat

Synchro/SimTrafficin simuloinneissa ajoneuvokäyttäytyminen ei vastaa todellista ajoneuvokäyttäytymistä, sillä simuloinneissa jokainen kiertoliittymään liittyvä ajoneuvo pysähtyy kolmion taakse, vaikka kierto-tila olisi kyseisellä hetkellä tyhjä. Käyttäjä ei voi vaikuttaa ajoneuvojen käyttäytymiseen, joten pysähtymisongelma ei ole korjattavissa. Ylimääräinen pysähtyminen heikentää kiertoliittymän toimivuutta ja yksikaistaisen kierto-tilan välityskyky jää reilusti alhaisemmaksi kuin mitä esimerkiksi kenttämittaustuloksissa on havaittu. Tästä syystä Synchro/SimTrafficia ei suositella käytettäväksi kiertoliittymien välityskykytarkasteluissa. Jos verkolla on kiertoliittymiä, voi Synchro/SimTrafficia periaatteessa käyttää, jos kiertoliittymien liikennemäärät ovat niin alhaisia, että ne välittävät kaiken kysynnän, eivätkä ruuhkauta viereisiä liittymiä.

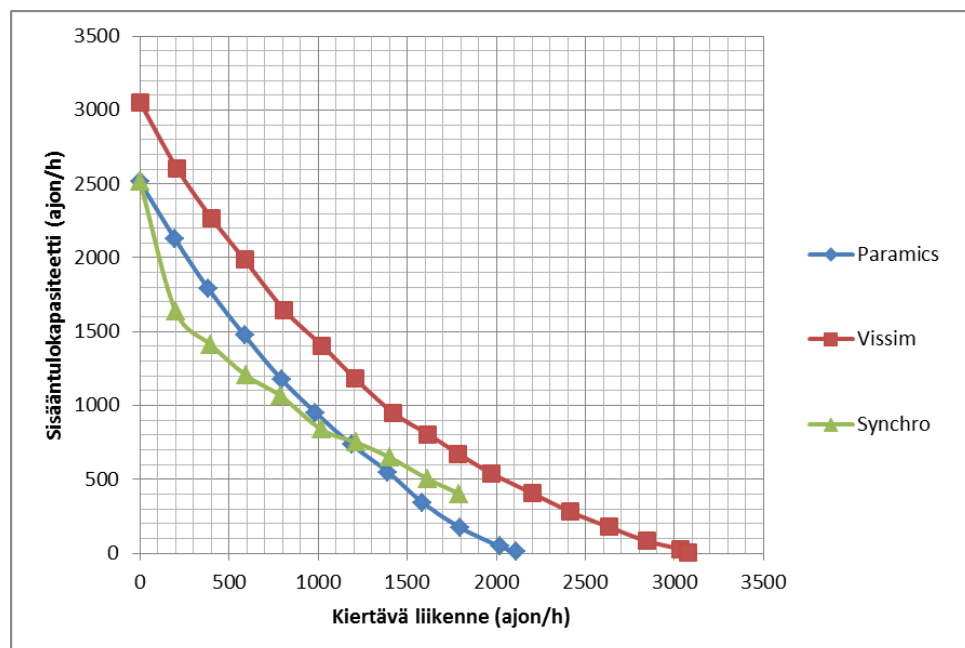
Paramics antaa simuloimassa kenttämittaustuloksia heikomman välityskyvyn. Synchro/SimTrafficiin ja VISSIMiin verrattuna Paramicsissa liikenteen toimivuuteen vaikuttaa erittäin paljon se, miten tarkasteltava liikennenympäristö on mallinnettu. Pelkästään yksittäisen kiertoliittymän voi rakentaa lukuisilla tavoilla, sillä esimerkiksi Kerbs-elementtien sijoittaminen pitää tehdä käsin jokaista simulointimallia rakennettaessa. Kerbs-elementtien sijainnilla on suuri merkitys toimivuuteen. Jokainen malli on aina erilainen ja käyttäjänsä näköinen, jolloin täysin yksiselitteisiä kalibrointisääntöjä on hankala määrittää. Käyttäjältä vaaditaan erityistä huolellisuutta, sillä pienetkin muutokset vaikuttavat kapasiteettiin joskus oleellisesti, esimerkiksi Stoplines-pysäytysviivojen kulman ja sijainnin määrittäminen.

VISSIM antaa kiertoliittymälle muita simulointiohjelmiä korkeamman välityskyvyn. Kenttämittaustuloksiin verrattuna kiertävän liikennemäärän ollessa vähäinen, sisääntulokapasiteetti on korkeampi. Muuten sisääntulokapasiteettikapasiteetti on lähellä kenttämittaustuloksia.

Simulointiohjelmien oletuskapasiteettikäyrät yksikaistaisen kiertoliittymän osalta on esitetty kuvassa 27 ja kaksikaistaisen kiertoliittymän kuvassa 28. Yksikaistaisen kiertoliittymän kuvaan on lisätty myös kenttätutkimuksissa havaittuja tuloksia. Kuvien kapasiteetit on tarkasteltu 200 ajoneuvoyksikön välein.



Kuva 27. Simulointiohjelmissä tarkasteltujen yksikaistaisten kiertoliittymien kapasiteettikäyrät.



Kuva 28. Simulointiohjelmissä tarkasteltujen kaksikaistaisten kiertoliittymien kapasiteettikäyrät.

Tutkittaessa kiertoliittymiä Paramicsilla, voidaan todeta, että jos simuloinnin kapasiteetti riittää, soveltuu yksikaistainen kiertoliittymä myös todelliseen ympäristöön. VISSIMin osalta samaa oletusta voidaan käyttää, kun liityntähaarojen liikennemäärät ovat matalia tai liittyvän ja kiertävän liikenteen määrät ovat keskenään yhtä suuria.

6.3 Simulointiohjelmien suositukset

Simulointiohjelmista ei voida antaa täysin varmoja ja todellisuuteen tähtäviä parametrisuosituksia, sillä jokainen käyttäjä luo mallistaan aina omannäköisensä. Vaikka arvot olisivatkin samoja, tulokset voivat erota huomattavasti toisistaan. Seuraavassa taulukossa (taulukko 4) on esitetty ohjelmakohtaisesti suositeltavat muutokset, joiden avulla helpotetaan käyttäjän suorittamaa simuloinnin mallinnusta ja yhdenmukaistetaan eri käyttäjien saamia simulointituloksia.

Taulukko 4. Parametrien ja muuttujien suositukset.

Paramics	Simulointi-asetukset	Time Steps	Oletusarvo 2, suositellaan 6. Vaikuttaa simulointituloksen tarkkuuteen
		Speed Distance	Oletusarvo 3, muutettava 9, jos Time Steps on 6. (Time Steps x 1,5)
		Seed	Ei vaikutusta välityskykyyn, muutoksella saadaan aikaiseksi simulointien erilaisuus. Vaikutukset näkyvät paremmin suuremmissa liikenneverkoissa jononpituuksina ja viivytyksinä.
	Liikenneverkon ominaisuudet	Approach Visibility	Ohjelman oletusarvolla 0,0 liittymä ei toimi oikein, suositus 10 m.
		Headway Factor	Pienentäminen parantaa välityskykyä. Oletusarvo 1,0, suositellaan pienempää arvoa 0,7 ja 0,8 väliä.
		Reaction Factor	Pienentäminen parantaa välityskykyä. Oletusarvo 1,0, suositellaan pienempää arvoa 0,7 ja 0,8 väliä.
		Kerbs	Siirrettävä jokaisessa mallissa oikeille kohdilleen, muuten liittymä ei toimi oikein.
		Stoplines	Siirtoja tehdessä oltava tarkkana, sillä pienet muutokset voivat vaikuttaa välityskykyyn joko negatiivisesti tai positiivisesti.
		Halkaisija	Kasvattaa kiertoliittymän kiertonopeutta, mikä heikentää välityskykyä.
		Kiertonopeus	Kiertonopeuden pienentäminen heikentää välityskykyä. Suositellaan käytettävän muuta liikenneverkkoa pienempää kiertonopeutta, esimerkiksi 30 km/h.
Kaistaleveys	Kaistaleveyden suurentaminen kasvattaa välityskykyä. Oletusarvo 3,7. Suositellaan 5 m leveyttä, joka vastaa paremmin todellisuutta.		
Gap Acceptance	Oletuksena ohjelma ei ole määrittänyt kriittistä aikaväliä. Kertoimen kasvatus heikentää välityskykyä. Suositellaan ettei kriittistä aikaväliä määritetä.		
VISSIM	Simulointi-asetukset	Average Standstill Distance	Pienentäminen kasvattaa liikennemäärää ja suurentaminen heikentää. Oletusarvoa 2 ei tarvitse muuttaa.
		Additional Part of Desired Safety Distance	Pienentäminen kasvattaa liikennemäärää ja suurentaminen heikentää. Oletusarvoa 2 ei tarvitse muuttaa.
		Multiplicative Part of Desired Safety Distance	Pienentäminen kasvattaa liikennemäärää ja suurentaminen heikentää. Oletusarvo 3, voidaan kasvattaa tarvittaessa.
		Min. Headway	Pienellä muutoksella ei vaikutusta verkkoon. Oletusarvo on 1,5, jota ei tarvitse muuttaa.
	Liikenneverkon ominaisuudet	Seed	Ei vaikutusta välityskykyyn, muutoksella saadaan aikaiseksi simulointien erilaisuus. Vaikutukset näkyvät paremmin suuremmissa liikenneverkoissa jononpituuksina ja viivytyksinä.
		Kiertonopeus	Kiertonopeuden pienentäminen heikentää välityskykyä. Suositellaan käytettävän tarvittaessa muuta liikenneverkkoa pienempää kiertonopeutta, esimerkiksi 30 km/h.
		Halkaisija	Suurempi keskisaarekkeen halkaisija parantaa välityskykyä.
Synchro/SimTraffic	Liikenneverkon ominaisuudet	Priority Rules	Määritettävä, jotta liikenneverkko toimii.
		Ei suositella käytettäväksi kiertoliittymien toimivuustarkasteluissa.	

6.4 Kiertoliittymien jatkotutkimukset

Kiertoliittymien välityskykyä on tutkittu Suomessa ja ulkomailla hyvin vähän, joten tutkimuksia olisi syytä täydentää. Sisääntulokapasiteettien lisäksi voitaisiin tutkia esimerkiksi kriittistä aikaväliä sekä purkautumisajaväliä. Tutkimuksia voitaisiin suorittaa esimerkiksi nykyisissä kapasiteetin rajoissa toimivissa yksikaistaisissa kiertoliittymissä, joita on harkittu kaksikaistaisiksi.

Kun erilaista tietoa kerättäisiin, saataisiin vankempaa pohjaa sille, kuinka analyttisiä menetelmiä ja simulointimalleja tulisi kalibroida tai jättää kalibroimatta. Useissa analyttisten menetelmien kaavoissa on mahdollista vaikuttaa eri arvojen avulla välityskykyyn, joten jos kiertoliittymistä saataisiin lisää tietoa, voitaisiin kaavat kalibroida vastaamaan todellisuutta ja näin saataisiin luotettavia tutkimusmenetelmiä kiertoliittymien suunnittelua varten.

Kuten opinnäytetyössä jo mainittiin, nämä menetelmät eivät ole ainoita vaihtoehtoja kiertoliittymien välityskyvyn tarkasteluun. Jatkotutkimuksena voitaisiin tutkia myös muiden simulointiohjelmien ja analyttisten menetelmien, kuten DanKapin, antamia välityskykyjä ja verrata niitä jo tutkittuihin menetelmiin.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiertoliittymien todellisesta välityskyvystä Suomessa on vielä vähän tietoa, joten saadut tutkimustulokset ovat vain suuntaa antavia. Tarkastelut ovat kohdentuneet tässä kiertoliittymän yhteen sisääntulosuuntaan. Ohjelmien ja menetelmien tulosten vertailukohteena käytettiin yksikaistaisten kiertoliittymien osalta Tiehallinnon selvityksen (Kiertoliittymien välityskyky) kenttämittaustuloksia niiden kiertoliittymien osalta, joissa sisääntulosuunnan välityskyky ylittyi. Kaksikaistaisten kiertoliittymien osalta vertailutiedot puuttuvat kokonaan, sillä Suomessa olevissa kaksikaistaisissa kiertoliittymissä ei ole ilmennyt välityskykyyn liittyviä toimivuusongelmia.

Analyttisistä menetelmistä HBS:n kapasiteetti jäi kenttämittaustulosten alle. Suomalainen kaava antoi suurempaa kapasiteettia silloin, kun kiertävän liikenteen osuus oli vähäinen sekä HCM ja HCS silloin, kun kiertävä liikennemäärä oli suuri. Muuten menetelmät antoivat havaittua pienempää välityskykyä. Hollantilaiset Mr-ohjelma sekä Bovy-kaava antoivat aina havaittua korkeampaa välityskykyä. Osaa menetelmistä pystyttiin kalibroimaan, jolloin kapasiteetikäyrä saatiin vastaamaan paremmin kenttämittaustuloksia. Näitä menetelmiä olivat Bovy-kaava, HBS ja suomalainen välityskykykaava.

Simulointiohjelmista Paramicsin sisääntulokapasiteetit jäivät kenttämittaustulosten alle. VISSIM puolestaan antoi korkeampaa välityskykyä silloin, kun kiertävän liikenteen määrä oli vähäinen tai korkea. Ohjelmissa

on monia muuttujia ja parametreja, joita voidaan määrittää. Käyttäjän tulee olla huolellinen tekemissään muutoksissa, sillä jokainen muutos vaikuttaa välityskykyyn positiivisesti tai negatiivisesti. Synchro/SimTrafficia ei suositella käytettäväksi kiertoliittymien tarkasteluissa, sillä ajoneuvojen käyttäytyminen kiertoliittymään liittyessä ei ole suomalaisten liikennesääntöjen mukaista.

Kiertoliittymän välityskykytarkastelussa käytettävä menetelmä ja mahdolliset muutettavat parametrit tulee aina määrittää tapauskohtaisesti.

LÄHTEET

Aarnikko, T. & Karjalainen, J. 2006. Tiehallinto. 2-kaistaisten kiertoliittymien suunnitteluperiaatteet. Tiehallinnon selvityksiä 42/2006. Viitattu 14.03.2013. <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3201018-v-2kaistkiertoliitt.pdf>

Bing Maps. n.d. Bing. Viitattu 27.03.2013. <http://www.bing.com/maps/>

DHV & Royal Haskoning. 2009. Roundabouts – Application and Design. Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management. Hollandi.

HAASTATTELUT

Forss, H. 2013. Nastolan kunta. Haastattelu 19.04.2013.

Hänninen, S. 2013. Espoon kaupunki. Haastattelu 23.04.2013.

Kannala, M. 2013. Tornion kaupunki. Haastattelu 19.04.2013.

Laakso, J-M. 2013. Tuusulan kunta. Haastattelu 25.04.2013.

Multaharju, P. 2013. Lappeenrannan kaupunki. Haastattelu 12.04.2013.

Riihimäki, E. 2013. Porin kaupunki. Haastattelu 12.04.2013.

Räty, U. 2013. Lahden kaupunki. Haastattelu 12.04.2013.

Seimelä, T. 2013. Tampereen kaupunki. Haastattelu 12.04.2013.

Vihervaara, T. 2013. Vantaan kaupunki. Haastattelu 02.05.2013.

Highway Capacity Manual. 2010. HCM2010. National Academy of Sciences. Yhdysvallat.

Kiertoliittymä ja miten siinä ajetaan. n.d. Tiehallinto. Viitattu 13.03.2013. <http://alk.tiehallinto.fi/kiertol/kiertol.htm>

Liikennevirasto. 2013. Tieliikenteen toimivuuden arviointi. Luonnos maaliskuuta 2013.

Luttinen, R.T., Pursula, M & Innamaa, S. 2005. Liikennevirran ominaisuudet. Teknillinen korkeakoulu. Opetusministeriö 15. Helsinki: Picaset Oy.

Ministry of Transport, Public Works and Water management. 2009. Partners for Roads. Meerstrooksrotondeverkenner. Ohjelmaversio 1.2.

Ptv. 2008. VISSIM 5.10 User Manual. Planung Transport Verkehr AG. Saksa.

Pursula, M., Niittymäki, J & Ojala, J. 2000. Liikenteen simulointi. Teknillinen korkeakoulu. Julkaisu 101. Espoo: Otamedia Oy.

Quadstone Paramics. 2011. Quadstone Paramics help. Ohjelmaversio 6.8.0.

Tiehallinto. 2001. Tasoliittymät. TIEH 2100001–01. Viitattu 13.03.2013.
http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/tasoliittymat_ohje.pdf

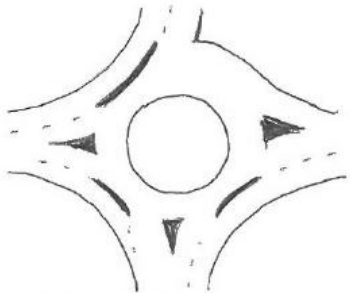
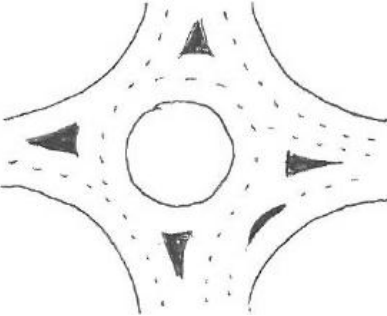
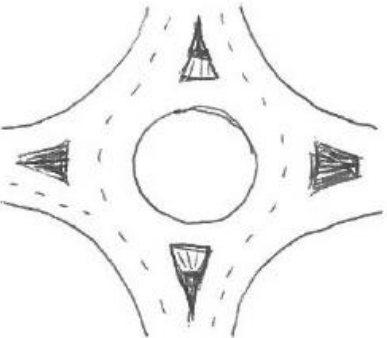
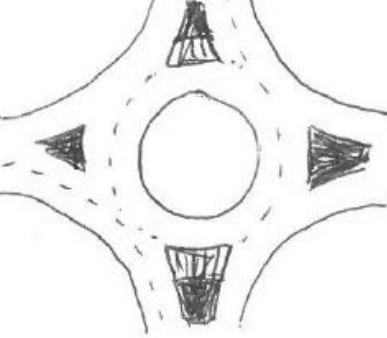
Tiehallinto. 2003a. Liikennetekninen mallintaminen - nykytila, kehityssuunnat ja mahdollisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 28/2003. Viitattu 25.04.2013.
<http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200816liikennetknmallintam.pdf>

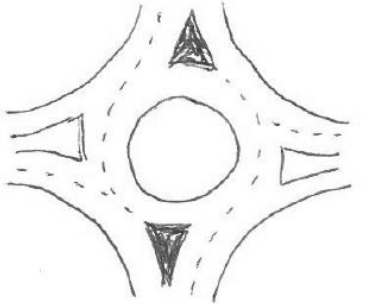
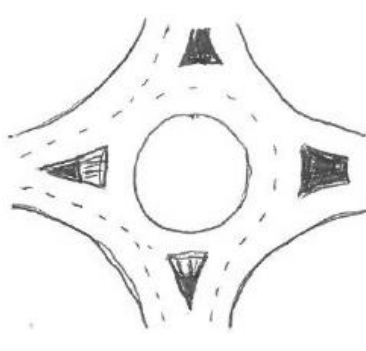
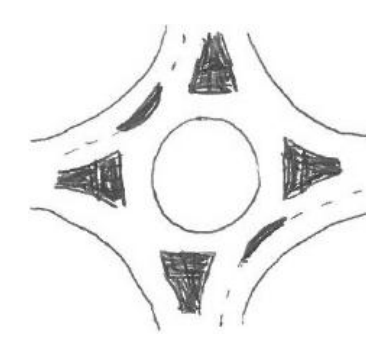
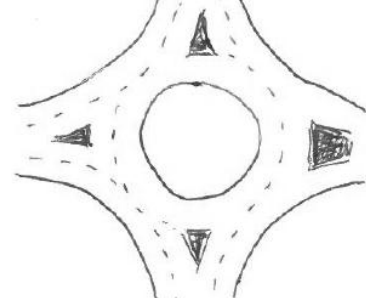
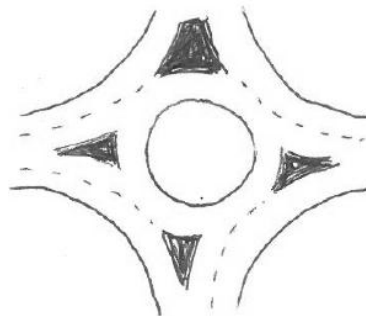
Tiehallinto. 2003b. Suunnitelmien liikenneturvallisuustarkastus. Tiehallinnon selvityksiä 18/2003. Viitattu 4.5.2013.
<http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200807suunnliikennturvvtark.pdf>

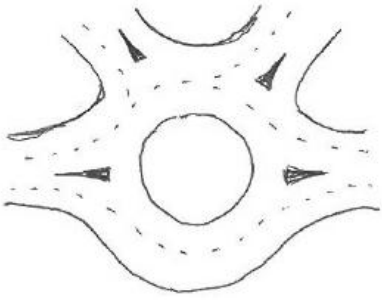
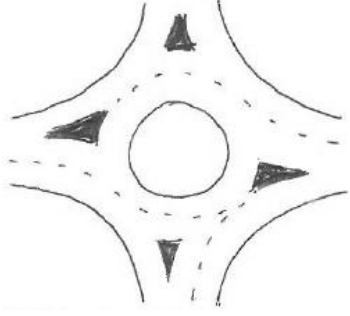
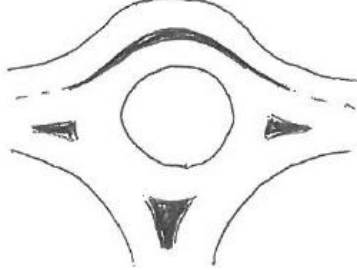
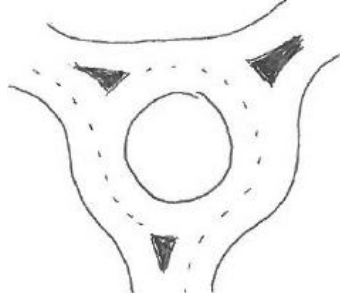
Tiehallinto. 2009. Tietoa tiesuunnitteluun nro 89. Viitattu 14.03.2013.
http://alk.tiehallinto.fi/thohje/ttiens/tts_89.pdf

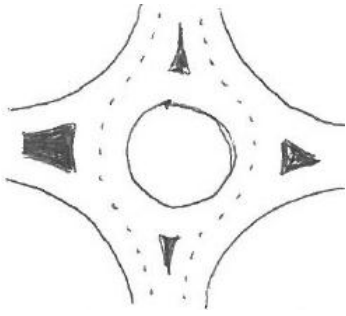
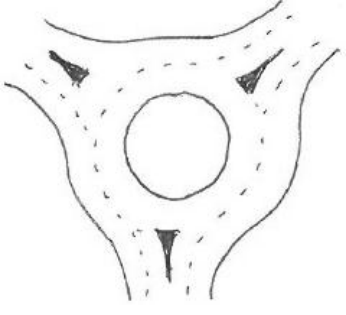
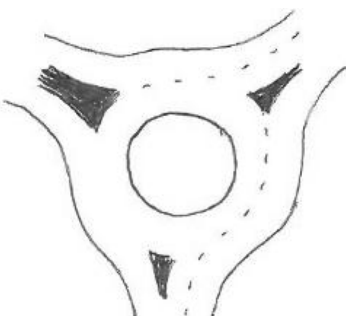
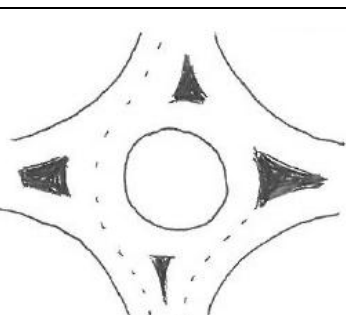
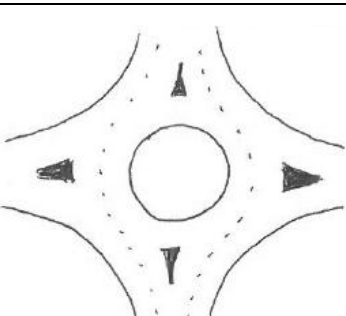
Tuovinen, P. & Enberg, Å. 2009. Tiehallinto. Kiertoliittymien välityskyky. Tiehallinnon selvityksiä 17/2009. Viitattu 14.03.2013.
http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/3201131-v_kiertoliittymien_valityskyky.pdf

Suomalaiset kiertoliittymät

	<p>Kaupunki: Espoo</p> <p>Liittymä: Kivenlahdentie, Espoonlahdenranta ja Länsiväylä</p> <p>Rakennusvuosi: 2008</p> <p>Kuvaus: Ei toimivuusongelmia</p> <p>Haastattelu: Salla Hänninen, Espoon kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Espoo</p> <p>Liittymä: Finnoontie, Martinsillantie ja Kuitinmäentie</p> <p>Rakennusvuosi: 2007</p> <p>Kuvaus: Jonoutuu lähellä sijaitsevien liikennevalojen vuoksi.</p> <p>Haastattelu: Salla Hänninen, Espoon kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Tuusula</p> <p>Liittymä: Tuusulanväylä, Hämeentie ja Järvenpääntie</p> <p>Rakennusvuosi: 90-luku</p> <p>Kuvaus: Korkeat ajonopeudet, ajoratamaalausten yliajo, seuraavat liittymät ruuhkauttavat, opastus ei riittävä</p> <p>Haastattelu: Jukka-Matti Laakso, Tuusulan kunta</p>
	<p>Kaupunki: Tuusula</p> <p>Liittymä: Järvenpääntie, Kulloontie ja Koskenmäentie</p> <p>Rakennusvuosi: 90-luku</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia, korkeat ajonopeudet</p> <p>Haastattelu: Jukka-Matti Laakso, Tuusulan kunta</p>

	<p>Kaupunki: Nokia</p> <p>Liittymä: Porintie, Kolmihaarakatu ja vt3</p> <p>Rakennusvuosi: ei tiedossa</p> <p>Kuvaus: Aluksi kaistojen väärinajoa.</p> <p>Haastattelu: Timo Seimelä, Tampereen kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Pori</p> <p>Liittymä: Satakunnankatu ja Luvian puistokatu</p> <p>Rakennusvuosi: 2008</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia, onnettomuusherkkä: kaistanvaihdot ja suojatiet</p> <p>Haastattelu: Eija Riihimäki, Porin kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Pori</p> <p>Liittymä: Tampereentie ja Presidentin puistokatu</p> <p>Rakennusvuosi: 2003–2004</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia, parantanut turvallisuutta</p> <p>Haastattelu: Eija Riihimäki, Porin kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Tornio</p> <p>Liittymä: Länsiranta ja vt29</p> <p>Rakennusvuosi: 2008</p> <p>Kuvaus: Ei ongelmia</p> <p>Haastattelu: Markus Kannala, Tornion kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Tornio</p> <p>Liittymä: Kromintie, Raumontie ja vt29</p> <p>Rakennusvuosi: 2001</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia, kurveja oio-taan.</p> <p>Haastattelu: Markus Kannala, Tornion kaupunki</p>

	<p>Kaupunki: Lappeenranta</p> <p>Liittymä: Taipalsaarentie, Varastokatu ja Tukkipkatu</p> <p>Rakennusvuosi: 2009</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia, parantanut turvallisuutta. Liian väljä, korjauksia tulossa.</p> <p>Haastattelu: Pentti Multaharju, Lappeenrannan kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Nastola</p> <p>Liittymä: Villähteentie, Vaakatie ja vt12</p> <p>Rakennusvuosi: 2011–2012</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmaa. Osa liikenteestä siirtynyt kiertoliittymän vuoksi katuverkolle.</p> <p>Haastattelu: Hans Forss, Nastolan kunta</p>
	<p>Kaupunki: Nastola</p> <p>Liittymä: Villähteentie ja Puolitie</p> <p>Rakennusvuosi: 2011–2012</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia.</p> <p>Haastattelu: Hans Forss, Nastolan kunta</p>
	<p>Kaupunki: Vantaa</p> <p>Liittymä: Valimotie ja Tasetie</p> <p>Rakennusvuosi: 2009</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia.</p> <p>Haastattelu: Teemu Vihervaara, Vantaan kaupunki</p>

	<p>Kaupunki: Vantaa</p> <p>Liittymä: Niittytie ja Kuriiritie</p> <p>Rakennusvuosi: 2005</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia, turvallisuusongelmia suojateillä.</p> <p>Haastattelu: Teemu Vihervaara, Vantaan kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Vantaa</p> <p>Liittymä: Kielotie ja Talvikkitie</p> <p>Rakennusvuosi: 2007</p> <p>Kuvaus: Ei toimivuusongelmia, suojatie liian kaukana liittymästä.</p> <p>Haastattelu: Teemu Vihervaara, Vantaan kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Vantaa</p> <p>Liittymä: Heidehofintie ja Jokiniementie</p> <p>Rakennusvuosi: 2006</p> <p>Kuvaus: Kaistajärjestelyt aiheuttaneet tulkin- taongelmia väistämissäännöissä, turvallisuus- ongelmia suojateillä.</p> <p>Haastattelu: Teemu Vihervaara, Vantaan kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Lahti</p> <p>Liittymä: Lahdenkatu, Savontie, Vääksyntie ja Johanneksenkatu</p> <p>Rakennusvuosi: 2009-2010</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia.</p> <p>Haastattelu: Unto Rätty, Lahden kaupunki</p>
	<p>Kaupunki: Lahti</p> <p>Liittymä: Jalkarannankatu, Karinniemenkatu ja Ståhlberginkatu</p> <p>Rakennusvuosi: 70–80-luku</p> <p>Kuvaus: Ei välityskykyongelmia.</p> <p>Haastattelu: Unto Rätty, Lahden kaupunki</p>

Muita kaksikaistaisia kiertoliittymiä on esimerkiksi seuraavissa kohteissa:

- Helsinki
 - o Vuosaarensatamatie ja Kehä III
 - o Tapaninkyläntie, Suutarilantie ja Tapaninvainiontie
 - o Pitäjämäentie ja Kaupintie
 - o Vihdintie, Pitäjämäentie, Huopalahdentie ja Eliel Saarisen tie
- Kirkkonummi
 - o Kirkkonummentie, Haagantie ja Saloviuksentie
- Tampere
 - o Ikean kiertoliittymät
- Liminka
 - o Jyväskyläntie, Raahentie, Ouluntie ja Pohjantie
- Vaajakoski
 - o Vaajakosken moottoritie, Vaajakoskentie ja Leppävedentie
- Kuopio
 - o Joensuuntie, Vuorelantie ja vt5
 - o Ikean kiertoliittymät
- Kokkola
 - o Eteläväylä, Vaasantie ja Satamatie
- Lohja
 - o Lohjanharjun moottoriliikennetie, Lohjanharjuntie ja Saukkolantie
- Lappeenranta
 - o Vaalimaantie, Poikkitie ja vt6

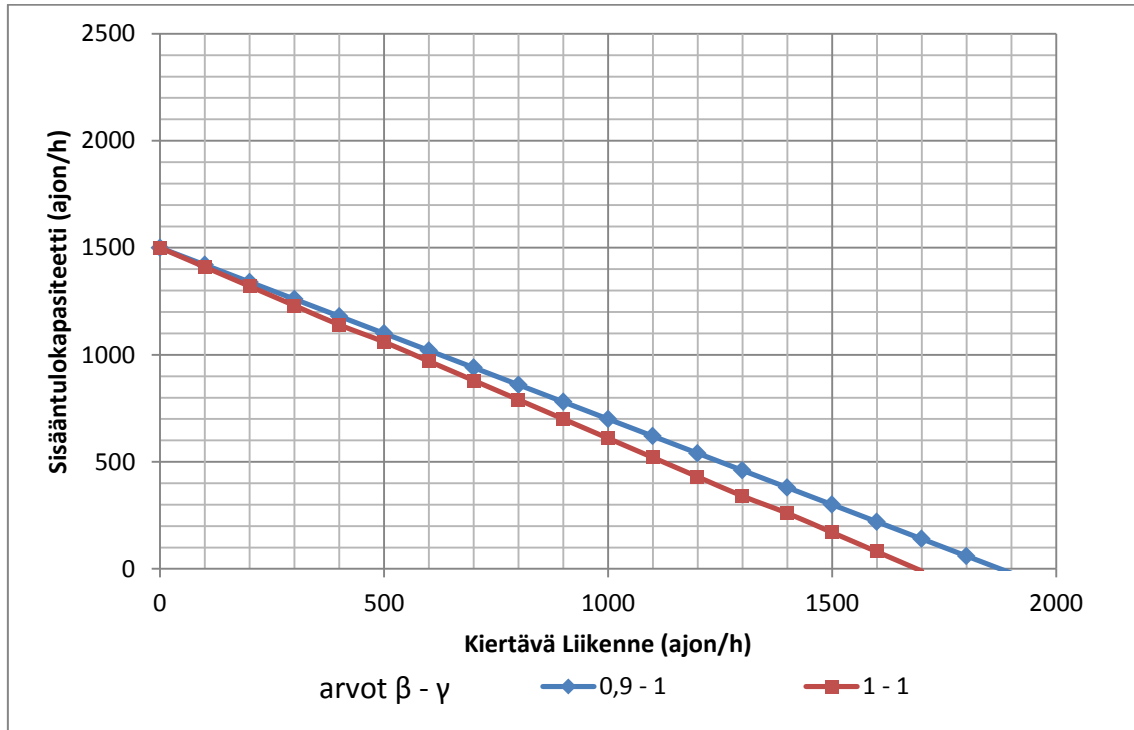
Yksikaistaiset kiertoliittymät, joita harkitaan kaksikaistaiseksi välityskykyongelmien takia, on esimerkiksi seuraavissa kohteissa:

- Lappeenranta
 - o Neumaninkatu ja Koulukatu
- Tuusula
 - o Hämeenkatu, Koskenmäentie ja Nahkelantie
- Tampere
 - o Ilmailukatu, Naistenmatkantie ja Saapastie
- Espoo
 - o Gräsanlaakso ja Nelikkotie

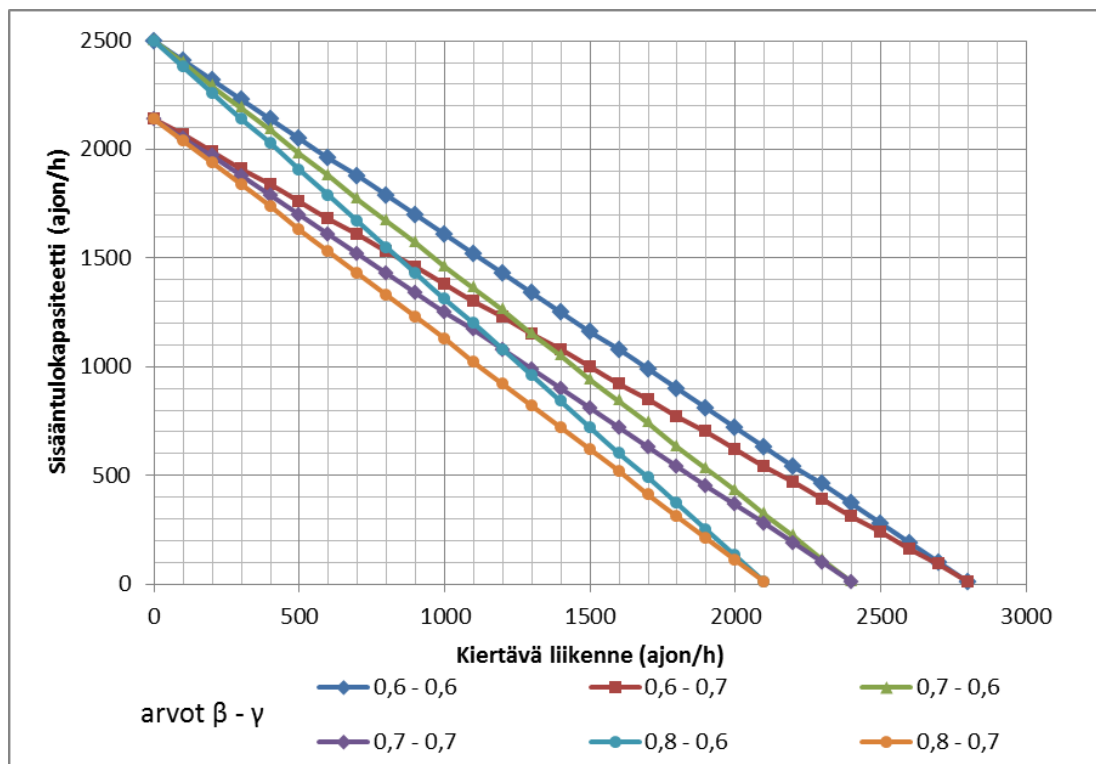
Suunnitteilla olevia, ainakin osittain kaksikaistaiseksi suunniteltuja kiertoliittymiä on esimerkiksi seuraavissa kohteissa:

- Tampere
 - o Satakunnankatu ja Lapintie
- Vantaa
 - o Koivukylänväylä, Talvikkitie ja Asolanväylä
 - o Tikkurilantie, Riipiläntie ja Piispankylätie
 - o Tikkurilantie ja Aviabulevardi
- Espoo
 - o Gräsanlaakso ja Kehä II
 - o Turuntie ja Karvasmäentie
 - o Vihdintie ja Juvanmalmintie
 - o Turveradantie ja Sinimäentie

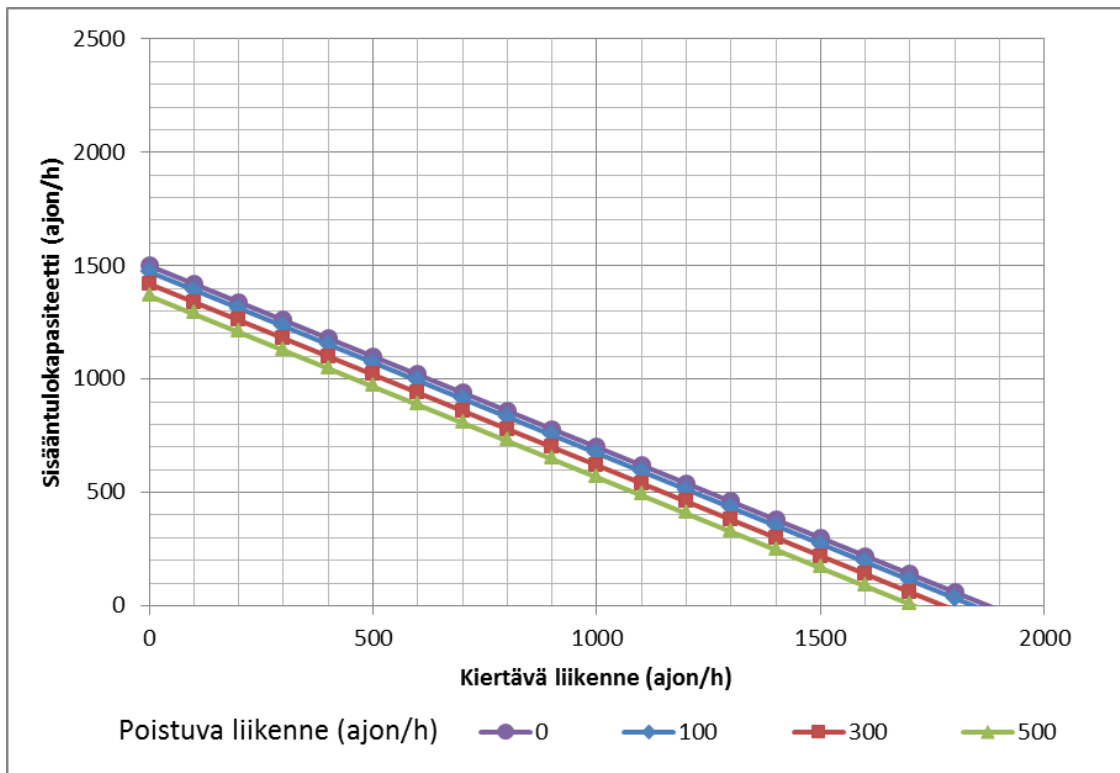
Bovy-kaavan tarkastelut



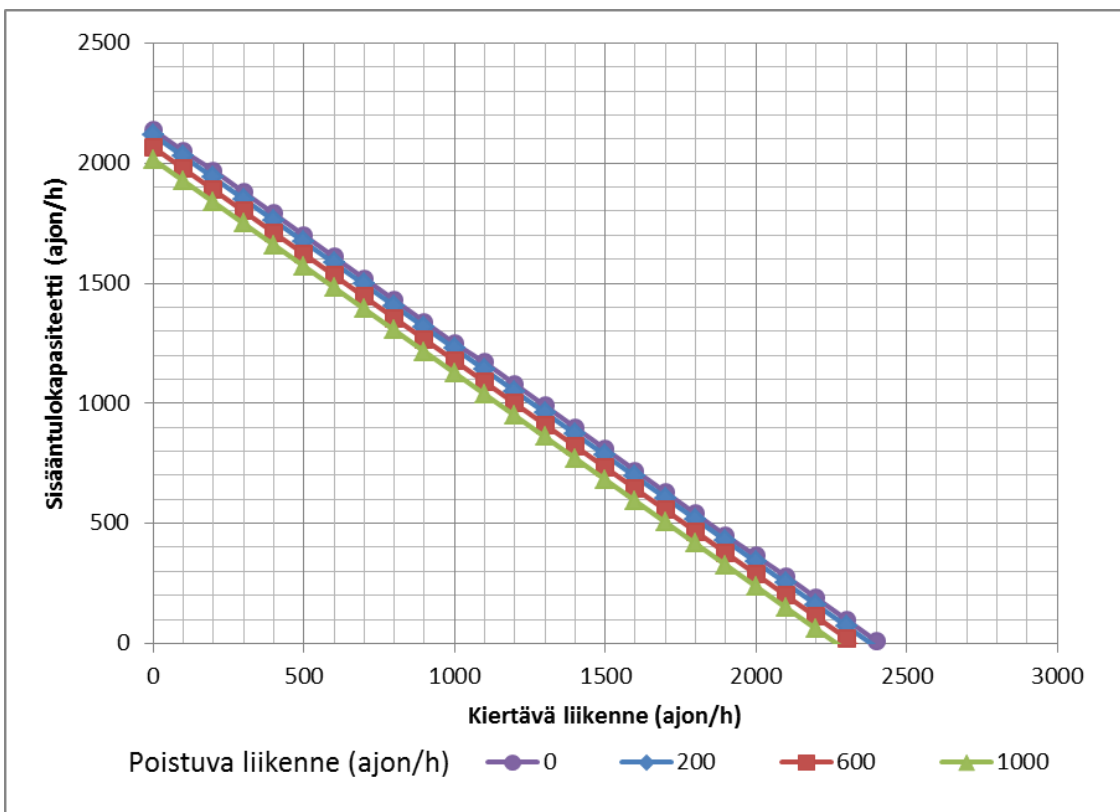
Yksikaistainen kiertoliittymä eri kertoimilla.



Kaksikaistainen kiertoliittymä eri kertoimilla.

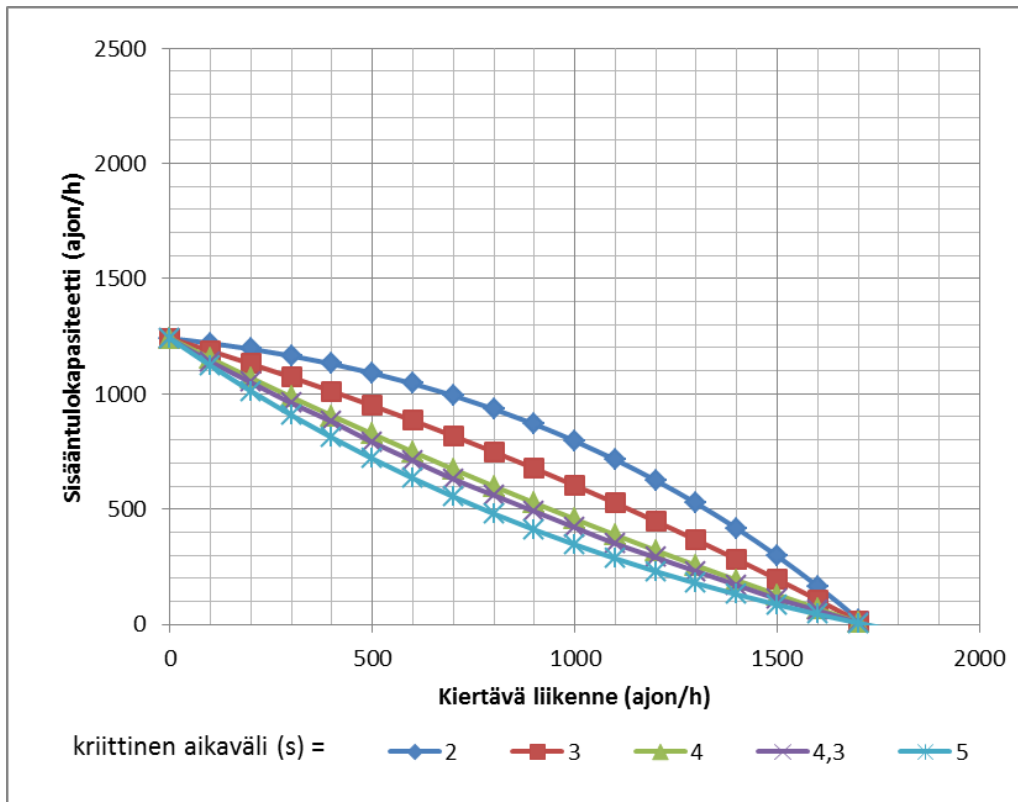


Yksikaistaisen kiertoliittymän tarkastelu poistuvalla liikenteellä.

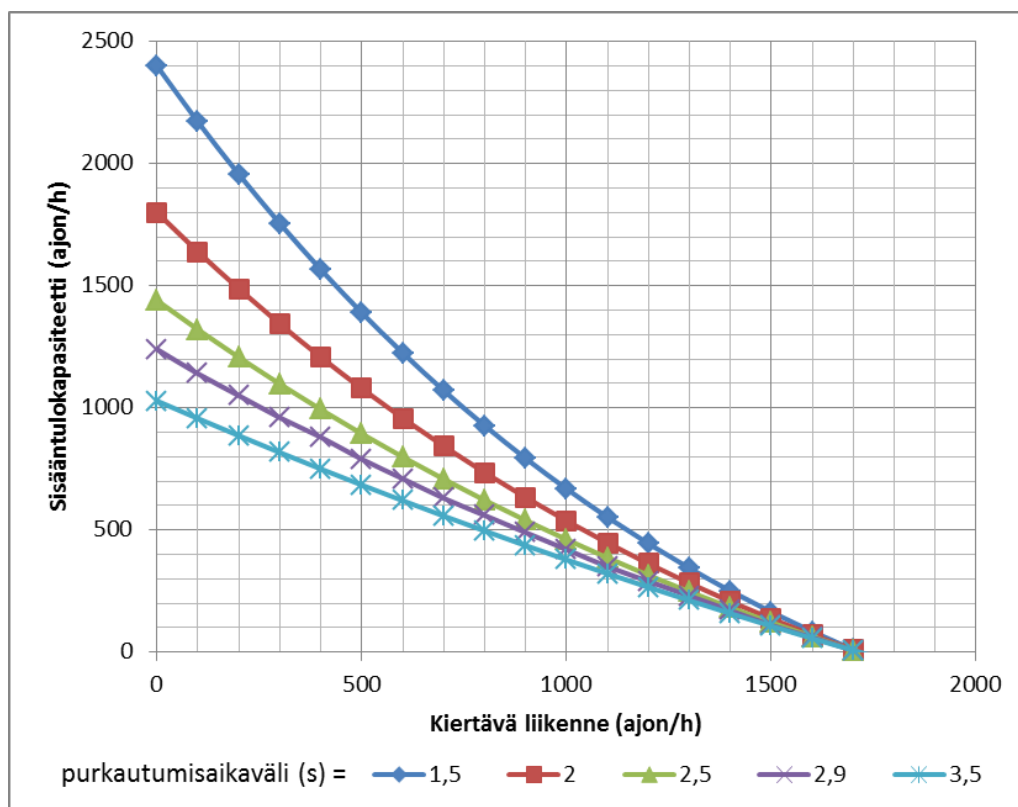


Kaksikaistaisen kiertoliittymän tarkastelu poistuvalla liikenteellä.

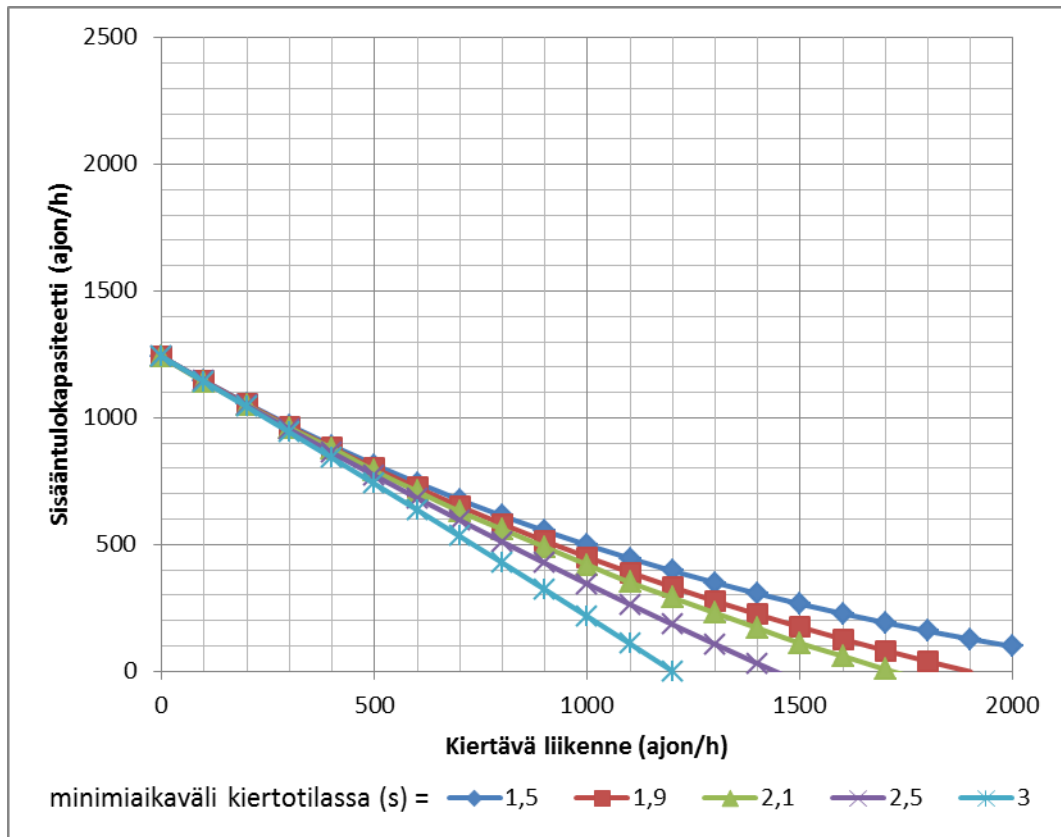
HBS-tarkastelut



Kriittisen aikavälin muutos.

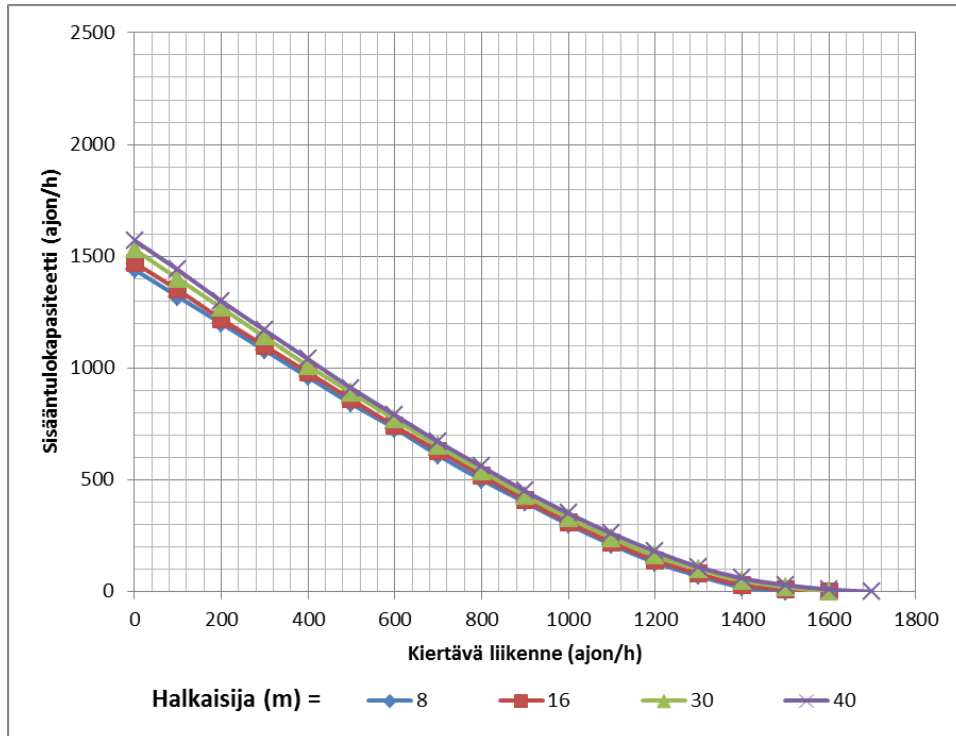


Purkautumisaikavälin muutos.

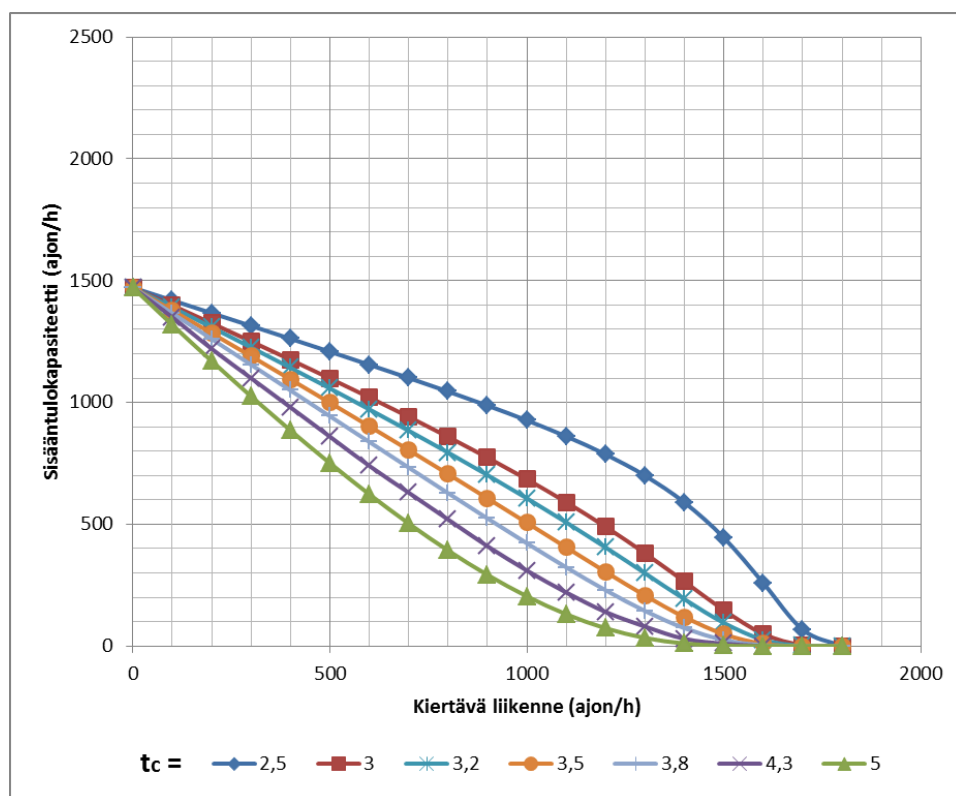


Peräkkäisten autojen minimaikaväli kiertotilassa.

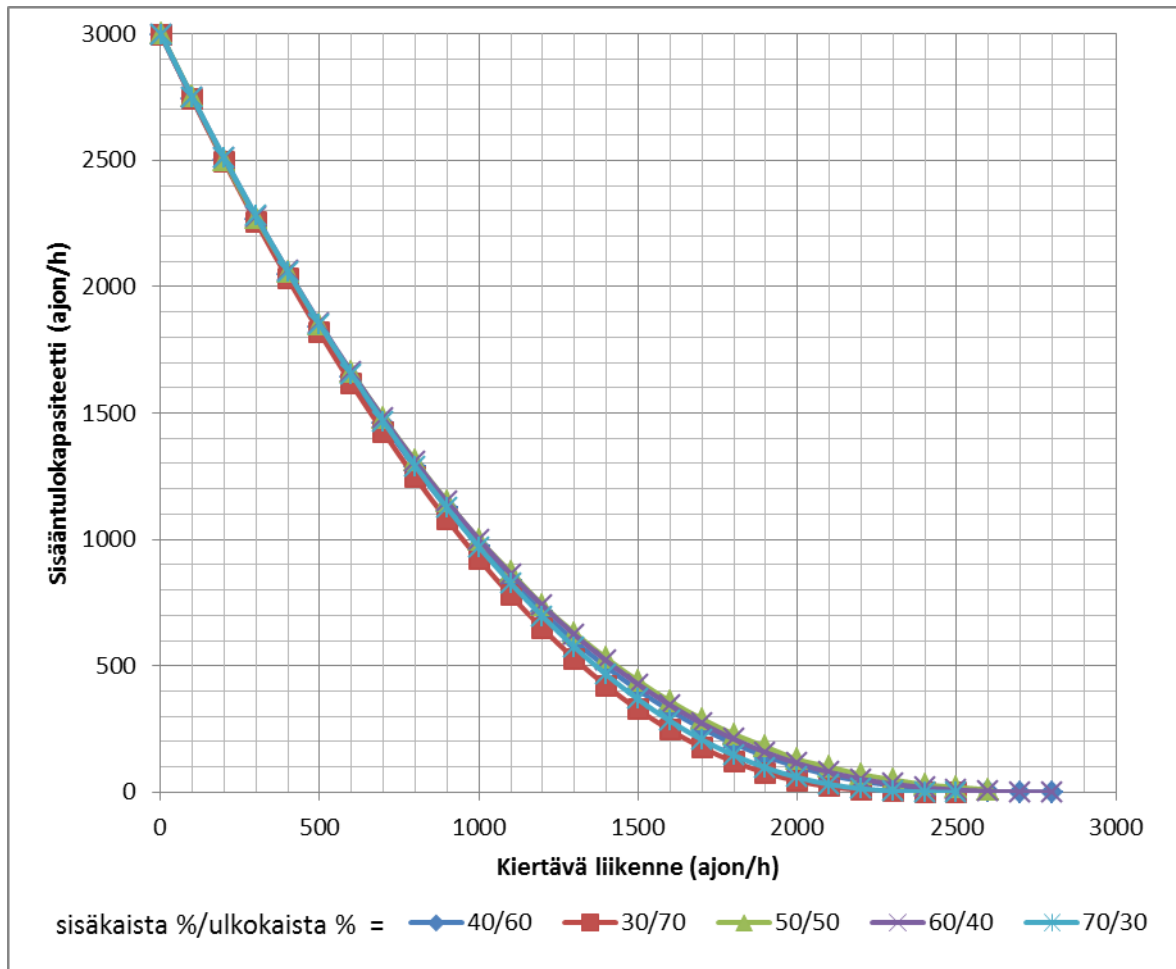
Suomalaisen kaavan tarkastelut



Yksikaistainen kierto liittymä eri halkaisijoilla.

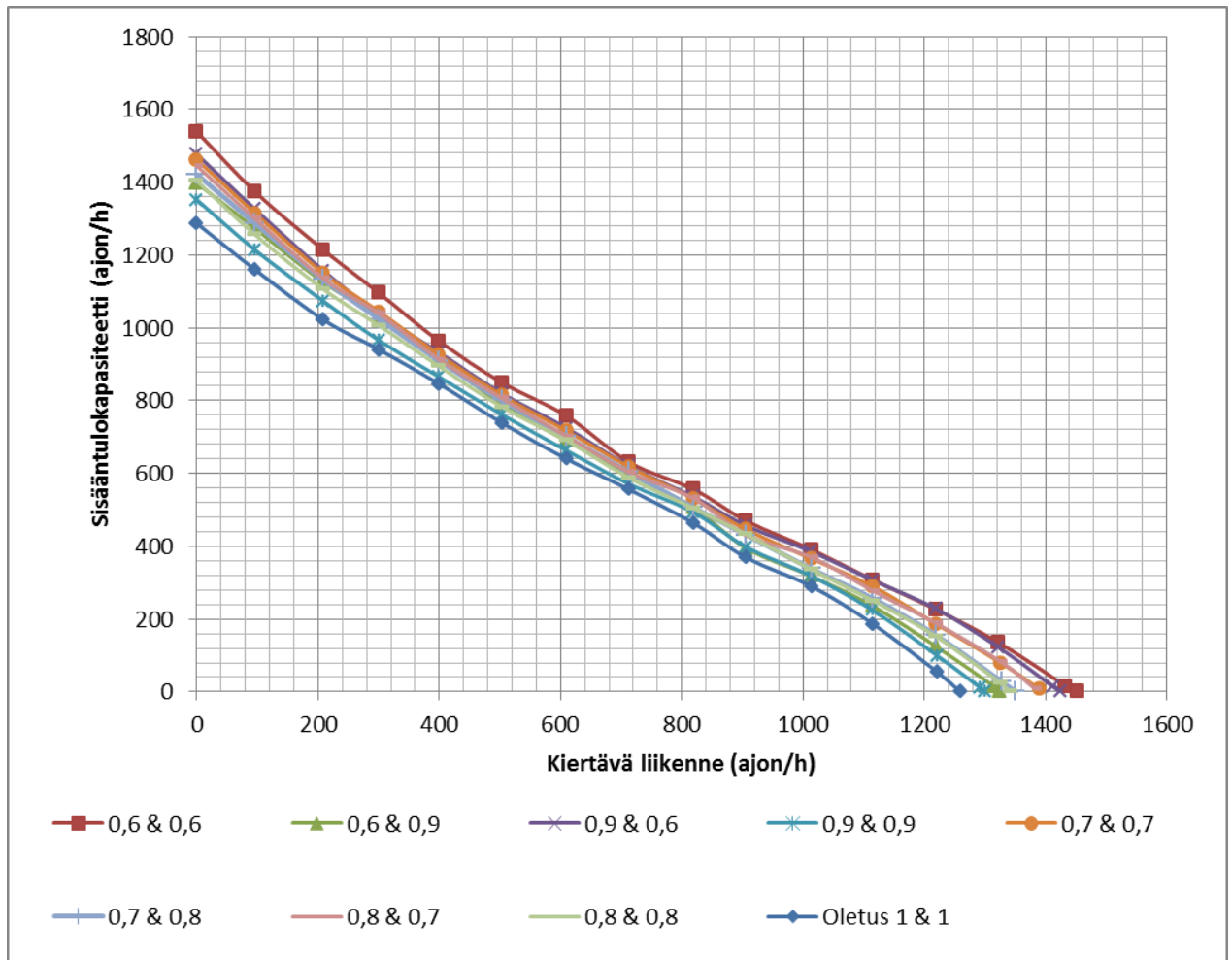


Yksikaistainen kierto liittymä eri kriittisten aikavälien arvoilla.



Kaksikaistaisen kierto liittymän kiertävän ajoneuvomäärän % - osuus sisä- ja ulkokaistalla

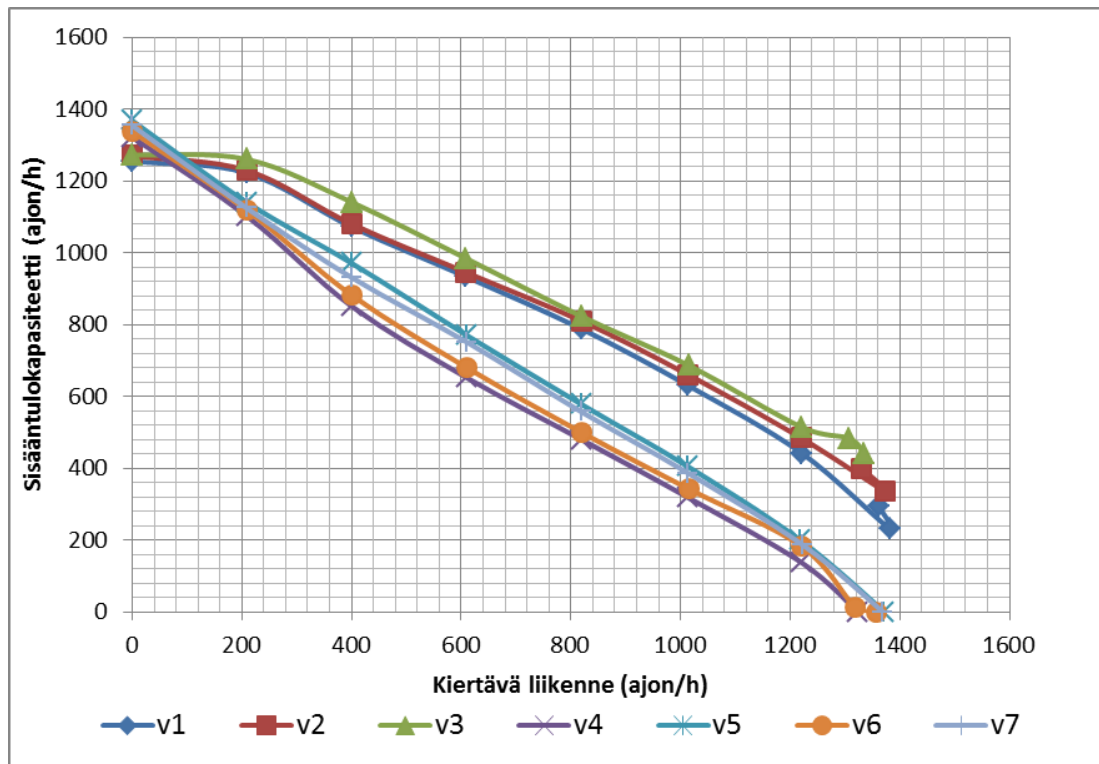
Paramics-tarkastelut



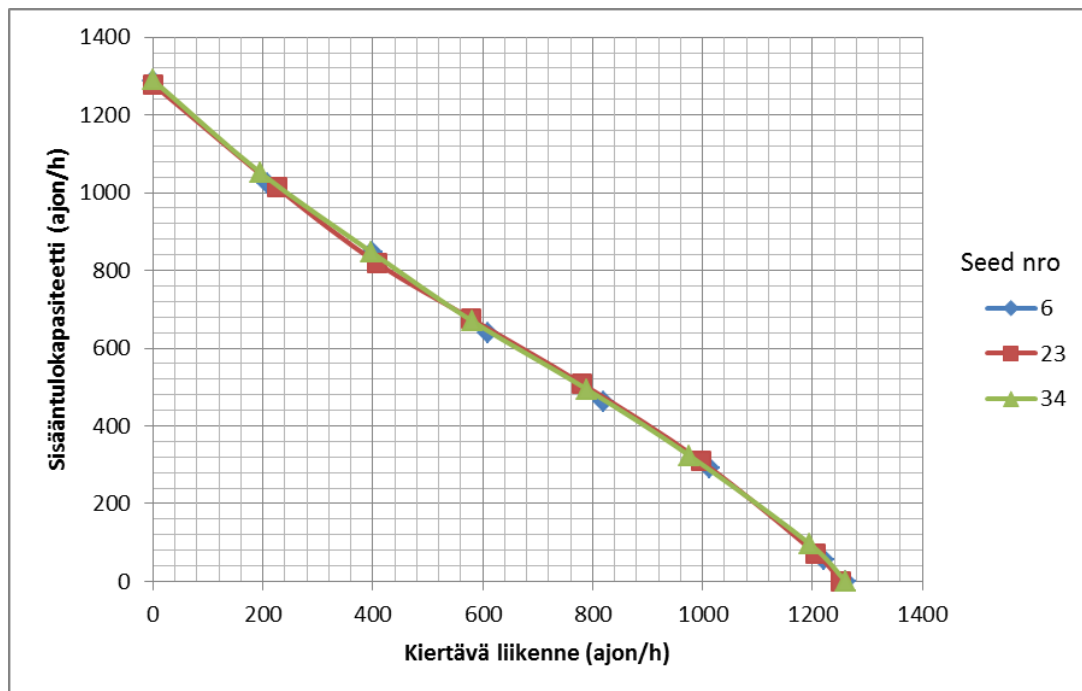
Headway & Reaction Factor-arvojen muutosten vaikutukset.

Kombinaatiomallit

	Headway & Reaction Factor	Kaistaleveys	Kiertonopeus	Halkaisija	Sisääntulevan ja poistuvan kaistan erottelu kerbseillä	Kerbs + Stoplines
v1	0,77	3,6	30	16	x	x
v2	0,77	5	30	16	x	x
v3	0,6	5	30	16	x	x
v4	0,77	5	20	16	x	x
v5	0,77	5	30	16	-	x
v6	0,77	5	30	30	x	x
v7	0,77	5	30	16	x	-

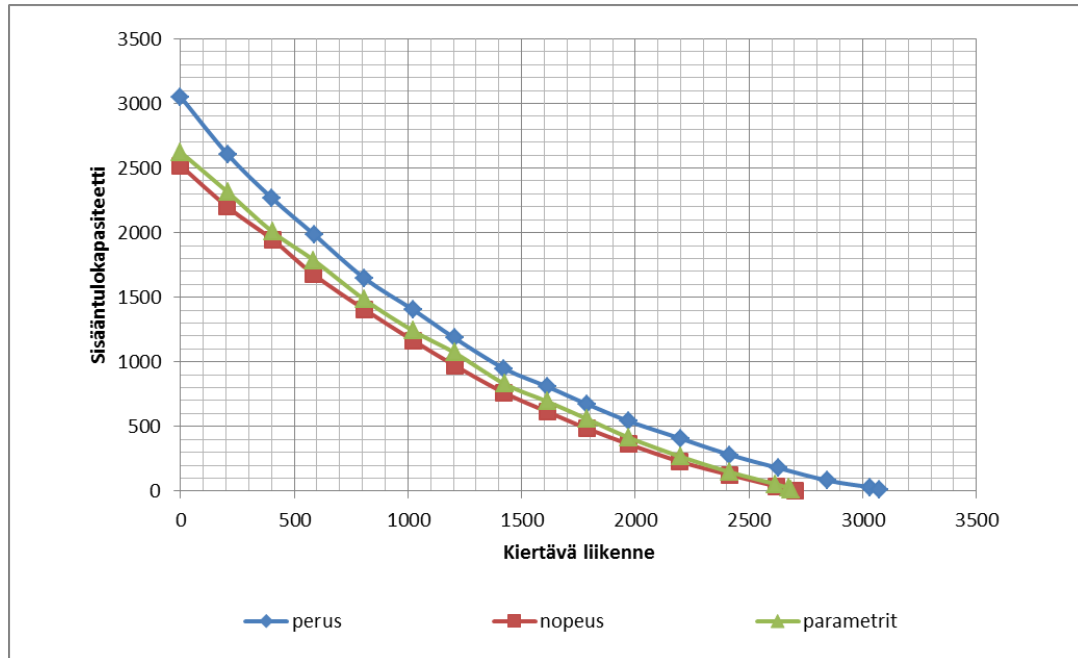


Paramics kombinaatiot.



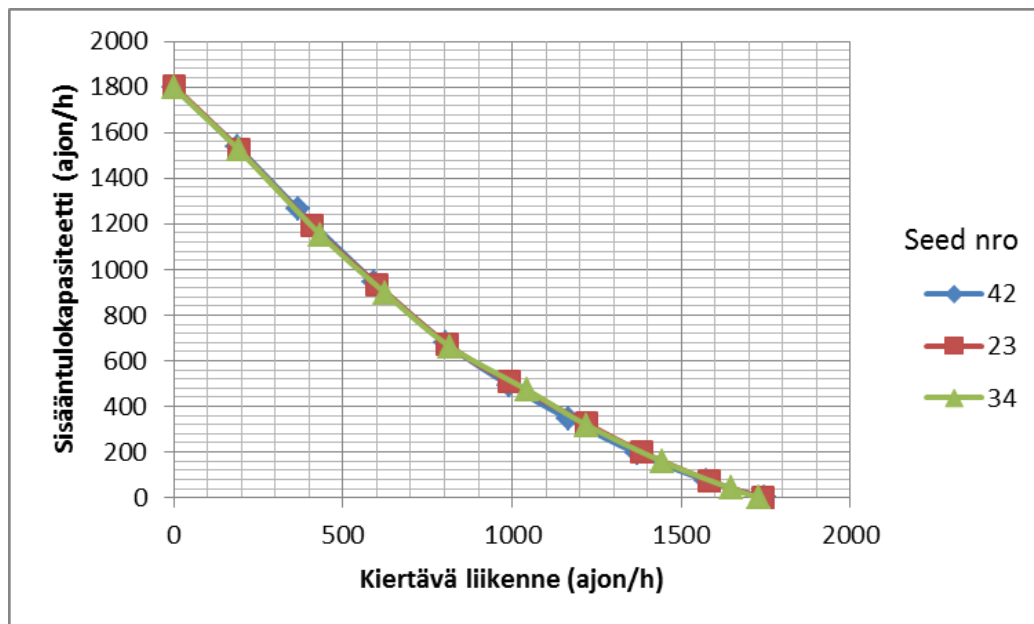
Seed-numeron vaikutus.

VISSIM-tarkastelut



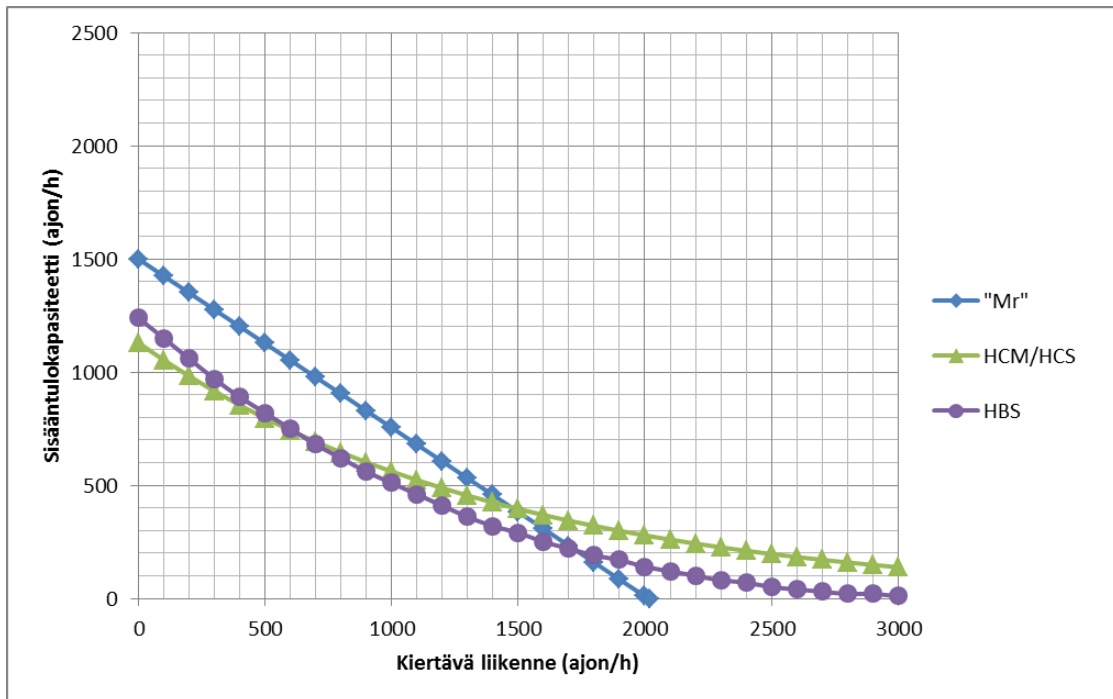
Kaksikaistaisen kierto liittymän kapasiteetteja.

Parametritarkastelussa on käytetty samoja arvoja kuin yksikaistaisen kierto liittymän versiossa 4a eli Avarage Standstill Distance 2 m, Additional Part of Desired Safety Distance 2 m, Multiplicative Part of Desired Safety Distance 5 m.

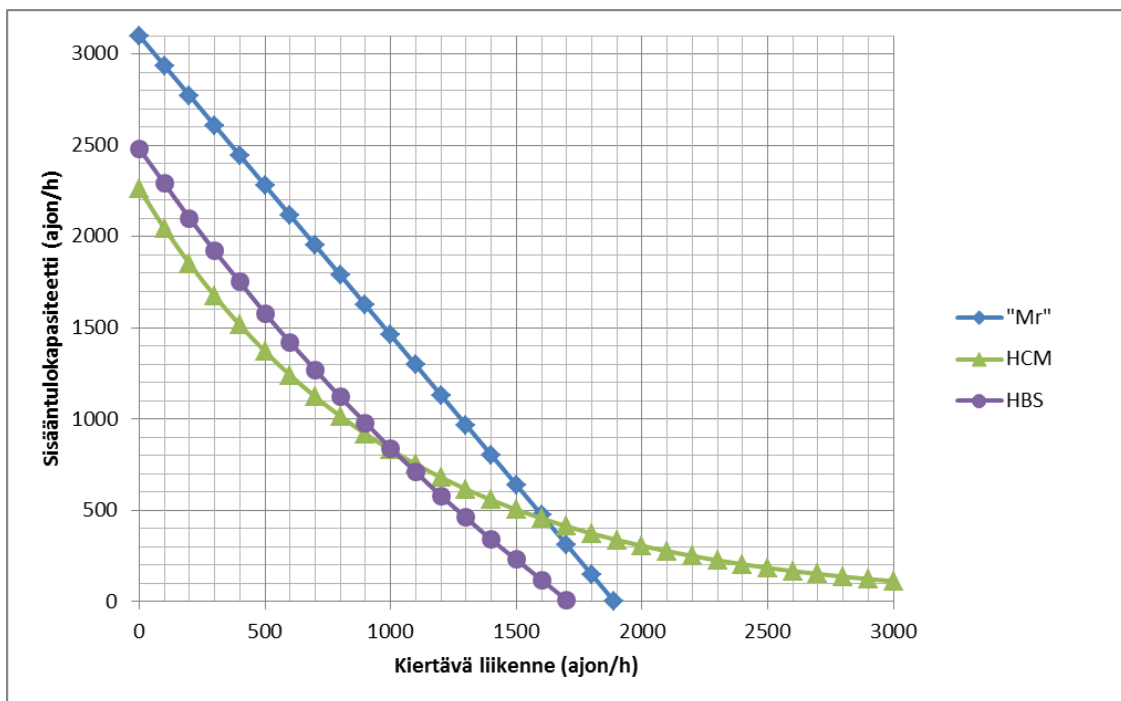


Seed-numeron vaikutus.

Analyttisten menetelmien muut kaksikaistaiset kiertoliittymät



Kaksikaistainen kiertoliittymä, jossa on yksi sisääntulokaista ja kaksi kiertävää kaistaa.



Kaksikaistainen kiertoliittymä, jossa on kaksi sisääntulokaistaa ja yksi kiertävä kaista.