



Igor Lobanov

**LIIKLUSOLUKORRA NING
PARANDUSMEETMETE ANALÜÜS
TEHNIKA – ENDLA – LUISE TN.
RISTMIKU NÄITEL**

LÕPUTÖÖ

Logistikainstituut

Transpordi- ja liikluskorralduse õppekava

Juhendaja: Mihhail Kirejev

Tallinn 2023

Mina, Igor Lobanov, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Mihhail Kirejev.

Lõputöö on kaitsmisele lubatud logistikainstituudi direktori korraldusega.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Igor Lobanov, sünnikuupäev: 02.12.1983, annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Liiklusolukorra ning parandusmeetmete analüüs Tehnika – Endla – Luise tn. ristmiku näitel“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas
(kuupäev) (autori allkiri)

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
TEOREETILINE OSA.....	8
1.1. Uuringu objekti üldine ülevaade.....	8
1.1.1 Linnaosad	8
1.1.2 Tänavad	8
1.1.3 Teede liigid.....	9
1.1.4 Ristmikud	10
1.2 Liikluskorraldus.....	12
1.2.1 Foorijuhtimine	12
1.2.2 Tsüklid ja taktid.....	14
1.3 Tipptund.....	15
1.4 Simulatsioonimodelleerimine.....	15
1.4.1 Modelleerimine ja simulatsioon	15
1.4.2 Lähenemisviisid	17
1.5 PTV Vissim	17
1.6 Kalibreerimine ja valideerimine.	18
1.6.1 Kalibreerimine.....	18
1.6.2 Valideerimine	19
2 KASUTATUD METOOD	21
2.1 Metodoloogilise lähenemise kirjeldus	21
2.2 Andmete kogumise meetodid	22
2.2.1 Vaatlus ja loendus	22
2.2.2 Transpordi infrastruktuuri objekti vaatlus.....	23
2.2.3 Liikluskaamerad	24
2.2.4 Kaardirakendused.....	25
2.2.5 Seire süsteem.....	27
2.2.6 Kiiruste mõõtmine.....	29
2.2.7 Foorid	30
2.2.8 Ühistransport	32
2.3 Tipptunni määramine.....	33
2.4 Reguleeritava ristmiku kaitseaegade arvutamine	34
2.4.1 Saabumis- ja lahkumisaeg.....	35

2.4.2	Lahkumisaeg	36
2.4.3	Saabumisaeg.....	36
2.4.4	Arvutuse etapid	36
2.5	Optimaalse fooritsükli arvutamine	37
2.6	Foorifaasid.....	38
2.7	Rohelise tule kestus	39
2.7.1	Sõidukid	39
2.7.2	Jalakäijad.....	40
2.8	Tulemuste hindamise mõõdikud.....	40
2.8.1	Teenindustase (LOS).....	41
2.8.2	Ühendusaeg	41
2.8.3	Majanduslik efektiivsus.....	43
2.9	Kalibreerimine	44
2.10	Stsenaariumid	46
2.10.1	Stsenaarium 0 – baasstsenaarium	46
2.10.2	Stsenaarium 1 – Websteri ja T.Metsvahi arvutuse meetoodika	46
2.10.3	Stsenaarium 2 – fooriprogrammi arvutamine, fikseeritud tsükliga.....	48
2.10.4	Stsenaarium 3 – kohanduv foorijuhtimissüsteem.....	50
2.10.5	Stsenaarium 4 – meetodite kombineerimine	51
3	TULEMUSED.....	53
3.1	Tiip tund.....	53
3.2	Liiklusloenduse tulemused	54
3.2.1	Sõidukid	56
3.2.2	Jalakäijad.....	56
3.2.3	Kiiruste profiilid.....	57
3.2.4	Rakseveokite osakaal	58
3.3	Kaitseaja arvutamise tulemused (<i>intergreen matrix</i>).....	58
3.4	Optimaalse fooritsükli arvutamise tulemused	59
3.5	Rohelise tule kestuse arvutamise tulemused	59
3.5.1	Sõidukid	59
3.5.2	Jalakäijad.....	60
3.6	Mikrosimulatsioonide tulemused	61
3.6.1	Stsenaarium 0	61
3.6.2	Stsenaarium 1	63

3.6.3	Stsenaarium 2	65
3.6.4	Stsenaarium 3	66
3.6.5	Stsenaarium 4	67
4	TULEMUSTE ANALÜÜS JA JÄRELDUSED	69
4.1	Tulemuste analüüs	69
4.1.1	Teenindustase	69
4.1.2	Ühendusaeg	70
4.1.3	Majanduslik efektiivsus.....	72
4.1.4	Visuaalne võrdlus.....	73
4.2	Järeldused	74
	KOKKUVÕTE.....	76
	SUMMARY	78
	VIIDATUD ALLIKAD.....	80
	Lisa 1. Liiklusvoogude loenduse tulemused	84
	Lisa 2. Liiklusvood ja rasketehnika osakaal.....	85
	Lisa 3. Ühendusaja tulemused.....	86

SISSEJUHATUS

Kaasaegsed linnad seisavad silmitsi pidevalt kasvava väljakutsega tagada liikluse sujuvus ja ohutus. Üks võtmekomponente antud protsessis on, teede- ja tänavate infrastruktuur, eriti ristmikud, kus tihti põimuvad omavahel erinevad liiklusvood. Käesoleva lõputöö eesmärk on analüüsida ja parandada üht sellist tehnilist sõlme, nimelt Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmikku.

Antud ristmik on oluline osa Tallinn linna liiklusvõrgustikust, kus käsitlev sõlm puutub nii vaadeldavate kui ka teiste tõsiste probleemiga. Erilist tähelepanu tuleb pöörata õhtustele tipptundidele, kus liiklusköormus saavutab oma kriitilise taseme. Liikluse tihenemine nimetatud aegadel tekitab ummikuid, ning raskendab üldist transpordi situatsiooni.

Lõputöö on põhjendatud vajadusega uurida ja rakendada meetodeid, mis parandaksid valgusfooride reguleerimist vaadeldaval ristmikul. Olukorra paranemine käsitlevas sõlmes on mitte ainult kohalike elanike ja liiklejate huvides, vaid ka linnaplaneerimise seisukohast oluline. Kui ristmik ei suuda tõhusalt hallata suurt liiklusvoogu, võib see kaasa tuua negatiivseid mõjusid ümbritsevatele keskkonnale, tekitades ummikuid ning muid negatiivseid tagajärgi. Teema aktuaalsus on tagatud samuti ka ühiskondlikest huvidest ja keskendub parima lahendusvariandi leidmisele. Töö eesmärk on uuritava piirkonna liikluse taseme tõstmine, liiklusummikute vähendamine ning voogude sujuvamaks ja kiiremaks muutmine, mis on liikluse korraldamise peamised eesmärgid.

Otsides tõhusaid lahendusi ristmiku parendamiseks, kasutatakse mitmeid meetodeid. Diplomitöös uuritakse olemasolevaid valgusfooride süsteeme, liikluse reguleerimise algoritme ning analüüsitakse liiklusvoogusid erinevatel kellaaegadel. Lisaks uuritakse võimalikke tehnilisi uuendusi, mis võiksid oluliselt mõjutada ristmiku toimivust. Käesoleva lõputöö eesmärgi saavutamiseks plaanib autor kasutada mikromodelleerimise tarkvara PTV Vissim. Nimetatud tarkvara võimaldab hinnata nii olemasoleva liiklusolukorra kui ka planeeritava liikluslahenduse teenindustaset, võrrelda erinevaid lahendusvõimalusi omavahel ning aru saada, millist mõju võib planeeritud lahendus avaldada uuritava piirkonna liiklusele.

Uurimisküsimused hõlmavad järgmist:

1. Kuidas on hetkeseis ristmiku liikluse reguleerimise süsteemiga?
2. Millised on õhtuse tipptunni liiklusvoogude omadused?
3. Kuidas võivad erinevad reguleerimismeetodid mõjutada ristmiku jõudlust?

4. Milline võib olla nende muudatuste mõju ümbritsevatele ristmikele ja linnapiirkonnale laiemalt?

Lõputöö on suunatud mitmetahulise probleemi lahendamisele, milleks on Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmiku liikluse efektiivsuse ja ohutuse parandamine. Uurimus lähtub vajadusest leida tasakaal kõrge liikluskooormuse ja jätkusuutliku linnaarengu vahel. Oodatakse, et uurimistöö tulemused aitavad kaasa parandada liiklus probleemid mitte ainult käsitleval ristmikul, vaid pakuvad ka üldisemaid suuniseid linnade liiklusprobleemide lahendamiseks.

Lõputöö koosneb neljast põhiosast: teoreetiline osa, kasutatud meetod, tulemused ja tagajärgede analüüs. Teoreetilises osas autor annab uuritava objekti ülevaadet, kirjeldab hinnatavad aspektid, võimalikud kaasatud lähenemisviisid probleemide kõrvaldamisel ning kasutatud tarkvara. Metodoloogilises osas seletatakse, missugused meetodid rakendatakse ja missugused kriteeriumid hinnatakse. Samuti autor seletab, millistele näitajatele hakatakse tuginema lahendusvariantide hindamisel ja võrdlemisel, üksikasjalikult kirjeldab erilist metodoloogiat ning arvustuskäigud. Kolmandas osas on esitatud PTV Vissim tarkvara abil saadud tulemused olemasoleva situatsiooni kohta ning rakendatud meetmete abil koostatud stsenaariumite tulemused. Viimases osas autor uurib simulatsioonide tulemusi, võrreldes neid omavahel ja tehes järeldusi, et leida kõige optimaalsem lahendusvariant.

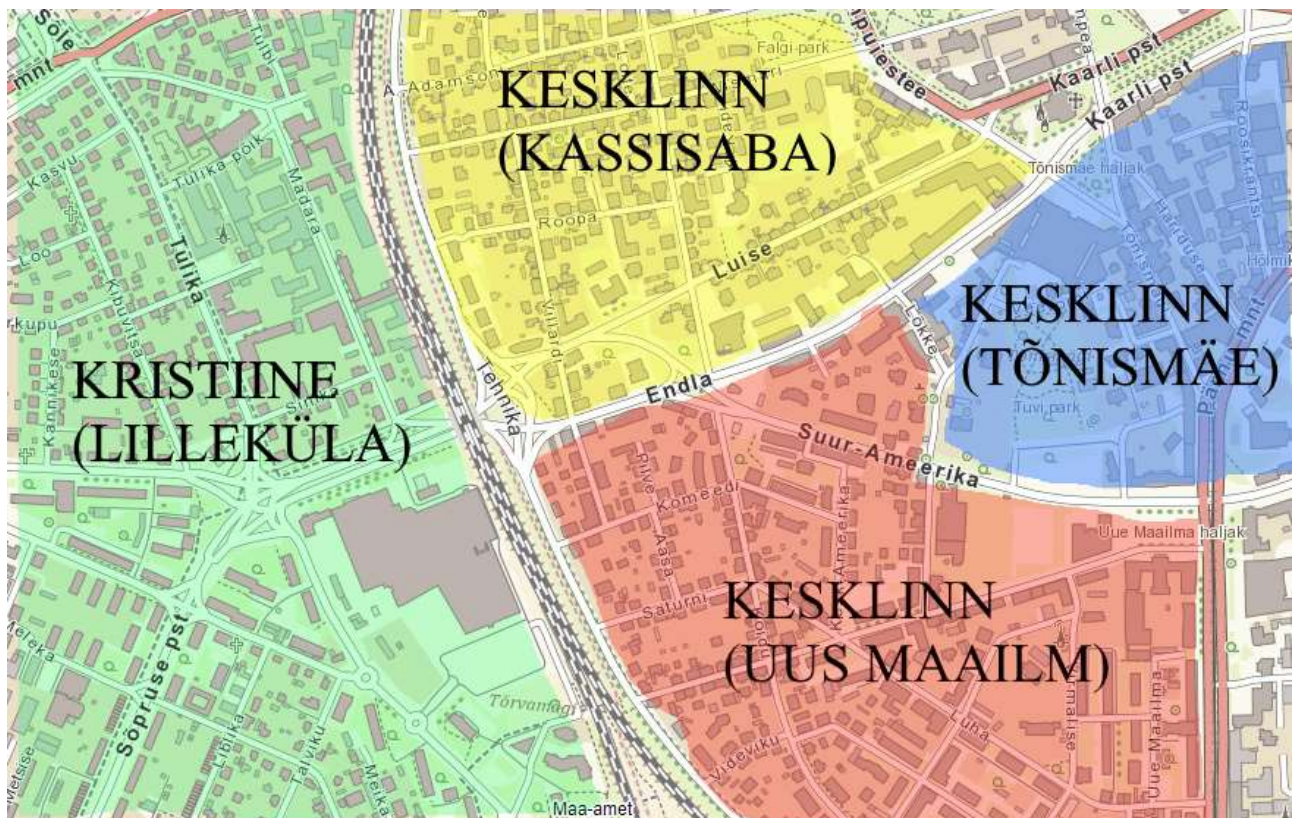
Lõputöö autor avaldab eraldi tänu oma juhendajale Mihhail Kirejevile lõputöö koostamisel ning pideva toe ja professionaalse arvamuse eest erilistes aspektides. Siirad tänusõnad kuuluvad ka Tallinna Transpordiameti töötajatele produktiivse koostöö eest.

TEOREETILINE OSA

1.1. Uuringu objekti üldine ülevaade

1.1.1 Linnaosad

Käesolevas lõputöös vaadeldakse Tallinna linnaosa, mis asub Kristiine ja Kesklinna osade piiril ning koosneb järgmistest Tallinna asumitest: Lilleküla, Kassisaba, Uus Maailm ning Tõnismägi (Joonis 1).



Joonis 1. Tallinna asumid (autori poolt koostatud)

1.1.2 Tänavad

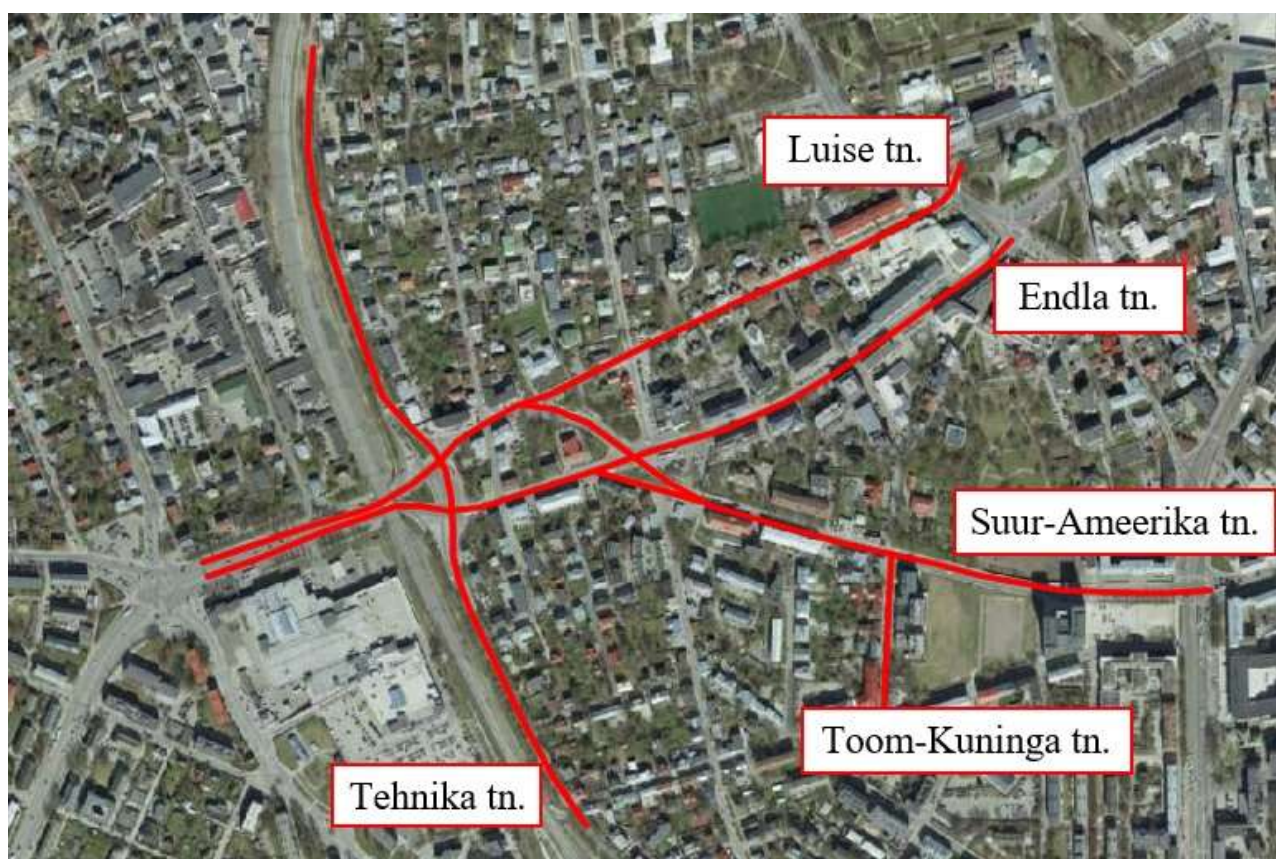
Tänav on osa teede võrgust, mõeldud liiklusvahendite ja jalakäijate liikumiseks. See hõlmab sõiduteed, mis on ette nähtud autode ja teiste liiklusvahendite liikumiseks, samuti kõnniteed või teeäärsed jalgrajad jalakäijatele [1].

Käesoleva lõputöö autor suunab põhilist rõhku Tehnika – Endla – Luise tänavate ristumisele, kuid muuhulgas tähelepanelikult vaatleb ka teisi tänavaid, mis osutavad mõju käsitlevale ristmikule ning kogu linnaosale. Need tänavad on: Suur-Ameerika tn. ja Toom-Kuninga tn.

Endla tänav on linna põhitänav, mis sellel ristmikul (kui vaadata linna siseneva suunda) jaguneb kaheks ühesuunaliseks tänavaks: Endla (3 sõidurada + kergliiklusrada) ja Luise (2 sõidurada + kergliiklusrada). Mõlemad tänavad on piiratud elu- ja ärihoonetega (Sotsiaalkindlustusamet, Eesti rahvusraamatukogu, elumajad, hotellid; kuni 6 korrust; Luise tänaval esineb vana kahekorruseline puithoonestus).

Tehnika tänav oma suuremas osas kaherealise liiklusega tänav, millel olemas ka kergliiklustee. Tänav ühelt poolt piiratud raudtee kaitse vööndiga (läheb tänavaga paralleelselt) ning teiselt rajatistega (enamasti vanad 2-3-korruselised majad). Ristmiku lähedal mõlemalt poolt lisanduvad kaherealisele teele mitu sõidurada, mis on ettenähtud liikluse kanaliseerimiseks.

Kogu vaadeldava linnaosa tänavate skeem on esitatud alloleval joonisel (Joonis 2).



Joonis 2. Tänavate skeem (autori poolt koostatud)

1.1.3 Teede liigid

Vastavalt Tallinna teede liigitusele, mis on kooskõlas standardiga EVS 843:2016 „Linnatänavad“, võib järeldada, et vaadeldavad tänavad omavad järgmised karakteristikud (Tabel 1):

Tabel 1. Tallinna tänavate liigitus (autori poolt koostatud)

Tänava nimetus	Liik	Tänavaliigitus
Endla tänav	122	Magistraal, põhitänav
Luisse tänav	131	Magistraal, jaotustänav
Tehnika tänav	131	Magistraal, jaotustänav
Suur-Ameerika tänav	131	Magistraal, jaotustänav
Toom-Kuninga tänav	215	Juurdepääsutee, kõrvaltänav

Tänavad on jagatud vastavalt nende hetke funktsionaalsele olekule. Igal tänavaliigil on seotud kolmekohaline number. Esimene number määrab, kas tegemist on peatee (1) või juurdepääsuteega (2). Magistraalidel näitab teine number kiirteed (1), põhitänavat (2) või jaotustänavat (3). Juurdepääsuteedel näitab teine number vastavalt kõrvaltänavat (1), veotänavat (2), kvartalisest teed (3), jalakäijate tänavat (4) või jalgrattateed (5). Selline jaotus on levinud peaaegu kõigis kehtivates määrustes ja normides. Kolmas number tähistab alaliigituse jagunemist vastavalt tänavad omadustele ja ühistranspordi kättesaadavusele. Mõistete tähendused on järgmised:

- Magistraal – keskne suure liiklusega linnatee või tänav;
- Põhitänav – magistraaltänav liikluseks linna eri osade vahel;
- Jaotustänav – linnaosa sisest liiklust võimaldav tänav, mis ühendab juurdepääse magistraalidega;
- Juurdepääs – mittekeskne, ainult teatud piirkonda magistraalidega ühendav tänav;
- Kõrvaltänav – mittekeskne, elamuala tänav (juurdepääs), mis võib olla ühenduses jaotustänavaga.

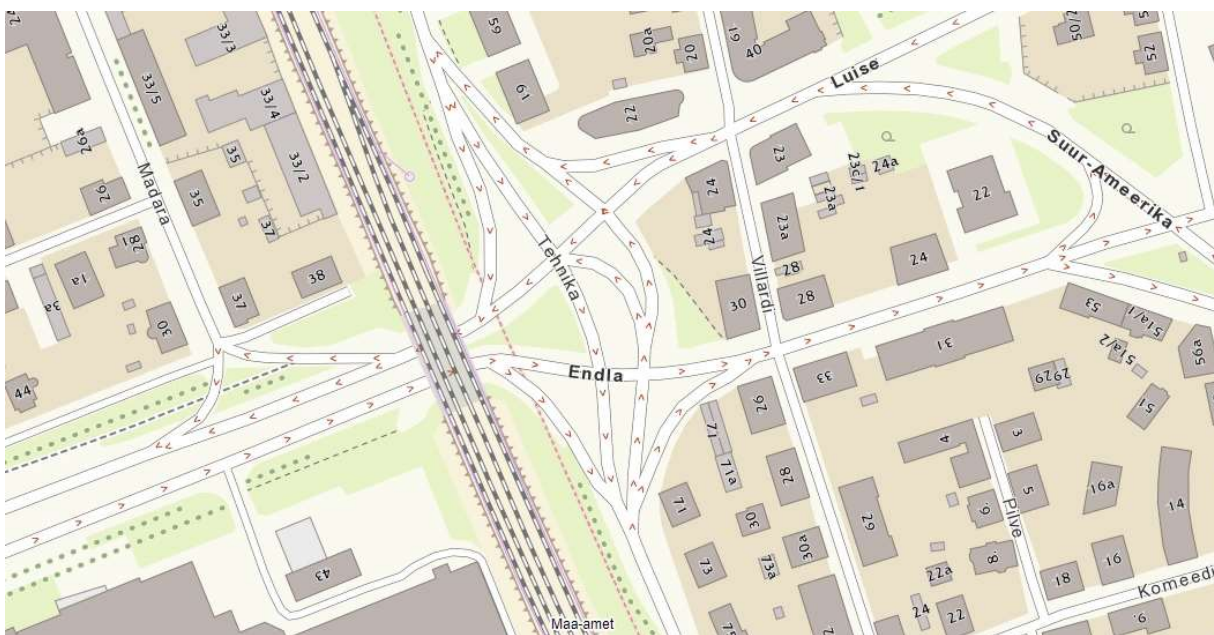
Liigitamisel võeti arvesse, et põhitänavad on vähemalt neljarajalised, samas kui jaotustänavad on kahe- või kolmarajalised. Kõrvaltänavateks kvalifitseeruvad kõik kohalikku elanikkonda teenindavad tänavad, kus erandkorras võib liikuda ka ühistransport. Kõrvaltänavatel on mitmekesine alaliikide arv, hõlmates nii kitsaid (alla 5 meetri laiuseid) kui ka laiemaid tänavaid, kus on kaks sõidurada ja kõnnitee [2].

1.1.4 Ristmikud

Ristmik on koht, kus kaks või enam teed ristuvad või ühinevad. Ristmikud võivad olla reguleerimata (ilma fooride või muude liikluskorraldusvahenditeta) või reguleeritud (fooride, peatumismärkide ja teiste liikluse juhtimise seadmetega). Ristmikud projekteeritakse võttes arvesse ohutust, liikumise

tõhusust ja transpordivoogude optimeerimist, et tagada erinevate liikumisviiside sujuv ja ohutu koostoime [1].

Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmik (Joonis 3) asub Tallinnas suure tõmbekeskuse juures (Kristiine keskus). Vaadeldav objekt kujundab ennast tähtsa linna liiklussõlme, mis teenindab palju transpordiühikuid ööpäevas ning võib mõjutada kogu linna liiklusvood.



Joonis 3. Vaadeldava ristmiku skeem [3]

Ristmik on geomeetria järgi neljagaruline. Liiklus ristmikul toimub ööpäevaringselt ning on reguleeritud valgusfooride abil. Antud liiklussõlme kasutavad nii kergliiklejad (jalakäijad, jalgratturid jne), kui ka tava sõiduaudod ja rasketehnika (bussid ja veoautod). Käsitleva ristmiku läbib mitu bussi marsruute. Lõikumiskoha juures on olemas raudteesild, mis ristub Endla tänavaga 90° alt. Kogu liiklus suunatud raudtee silla alla ning ei ole eraldi reguleeritud. Piirkonna ümberehitamine piiratud raudteesillaga ning kõrval asetseva eravalduses maaga.

Antud diplomitöös Tehnika – Endla – Luise ristmikul proovitakse muuta liikluskorraldust uue foorijuhtimisprogrammiga, et vältida ummikute tekkimist. Püstitatud probleemide lahendamiseks vaatleb autor erilised lähenemisviisid valgusfooriprogrammi muutmiseks. Ainuüksi valgusfooriregulatsiooni parandamine ristmikel, ilma konstruktiivsete muudatusteta, on painedlik ja ressursisäästlik lahendus liikluse optimeerimiseks, suuteline tõhusalt kohanema kaasaegsete transpordiväljakutsetega. Eelised hõlmavad majanduslikku efektiivsust, kiirt rakendamist ja

kohanduvust koormusega. Samuti hinnatakse töö mõjud teistele ristmikutele lähiümbruses, ehk linnaosas, mis oli kirjeldatud varem (vt. 1.1.1). Need ristmikud on:

- Suur Ameerika tn.– Pärnu mnt.;
- Endla tn. – Suur-Ameerika tn.;
- Luise tn. – Suur-Ameerika tn.;
- Suur-Ameerika tn. – Toom-Kuninga tn.

1.2 Liikluskorraldus

Liikluskorraldus mängib olulist rolli linnaplaneerimisel ja teeinfrastruktuuri juhtimisel, eesmärgiga tagada efektiivne ja ohutu liiklus. Seda saavutatakse mitmete meetmete ja strateegiate abil, mille eesmärk on juhtida liiklusvooge, vähendada liiklusummikuid ning parandada liiklusohutust ja jätkusuutlikkust [1].

Üks olulisemaid liikluskorralduse vahenditest on liiklusrärgid ja teemärgistus. Need annavad juhtidele ja jalakäijatele olulist teavet ja juhiseid, reguleerides liikumist teedel ja tänavatel. Õigesti paigutatud liiklusrärgid aitavad ennetada liiklusõnnetusi ja tagada liiklusreeglite järgimise [4].

Foorijuhtimissüsteemid on teine oluline komponent liikluskorralduses. Nimetatud vahendid on ettenähtud liiklusvoogude intervalliks reguleerimiseks ristmikel, eesmärgiga tagades sujuva ja tõhusa teeületus nii sõidukitele kui ka jalakäijatele. Ajapõhised ja adaptiivsed foorisüsteemid aitavad optimeerida liiklusvoogu vastavalt päevaajale ning olemasolevatele liiklusoludele.

Liikluskorraldus on terviklik lähenemisviis, mis ühendab füüsilisi, tehnoloogilisi ja regulatiivseid meetmeid, et tagada tõhus, ohutu ja jätkusuutlik liiklus linna- ja maapiirkondades. Nimetatud võtete nimekirja lõputöö autori väitel on võtmetähtsusega aspekt linnaplaneerimisel, mis mõjutab otseselt liikluse kvaliteeti elanikele, järelkult ka viimaste elukvaliteeti [4].

Antud diplomitöös autor püüab analüüsida ja parandada ristmiku kehva liiklusolukorra foorijuhtimise muutmise abil.

1.2.1 Foorijuhtimine

Foor on teedel kasutatav elektri-optiline seade liikluse reguleerimiseks valgussignaalide abil [5]. Valgusfoorid on oluline osa liikluskorraldusest, mis aitavad reguleerida liiklust teedel, tänavatel ja ristmikel. Nende peamine eesmärk on tagada liiklejate ohutus, sujuv liiklusvoog ning vältida liiklusummikuid.

Hetkel on võimalik planeerida valgusfooriprogramme tähtsamatel ristmikel nii, et peamist liiklusvoogu reguleerivad valgusfoorid on omavahel koordineeritud, tagades sujuva liikluse. Koordineeritud foorijuhtimine on korraldus, mis seob omavahel fooride ajastused kõrval asetsevates ristmikes [6]. Ühe piirkonna foorjuhitavate ristmike fooriprogrammide töö koordineerimist nimetatakse territoriaalseks foorjuhtimiseks [1]. Siiski on nende süsteemide efektiivsus teatud tasemel piiratud sõidukijuhi reaktsiooniaja, käitumise ning sõiduki kiirendamise ja pidurdamise karakteristikute tõttu. Valgusfooride juhtimissüsteemid võivad olla tsentraliseeritud, võimaldades operaatoritel jälgida mitmeid ristmikke ühest kohast (Joonis 4). See võimaldab paremat reageerimist erakorralistele olukordadele ja võimalikele liikluskorralduse muudatustele [7].



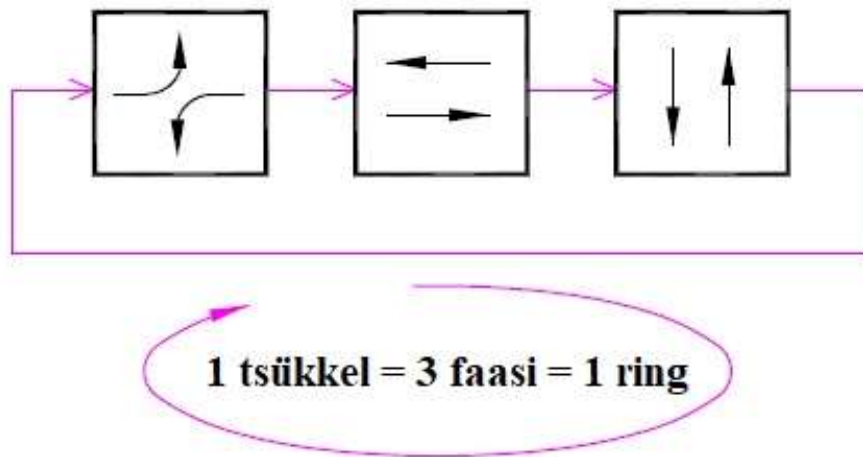
Joonis 4. Liikluskorralduskeskus [8]

Eestis on foorjuhtimine ja foorjuhtivatel ristmikel liiklemine reguleeritud järgnevates õigusaktides:

- Liiklusseadus [5];
- Linnatänavate standard [1];
- MKM määrus nr 12 „Liiklusmärkide ja teemärgiste tähendused ning nõuded fooridele“ [9].

1.2.2 Tsüklid ja taktid

Liiklusfoori tsükkel (Joonis 5) on täielik signaalide faaside jada ja aeg, mille jooksul liiklusfoor kuvab selle täieliku jada [10]. Liiklusfaas on defineeritud kui tsükliis määratud roheline, vahetuse ja vabastusintervallid kindlale liikumissuunale [10].



Joonis 5. Fooritsükkel ja faas (autori poolt koostatud)

Tänapäeval kasutatakse maailmas valgusfooriprogrammide koostamisel kolme tüüpi juhtimist: fikseeritud tsükkel, adaptiivne tsükkel ja sõiduki seadmete vahendusel reguleeritav tsükkel. Fikseeritud tsükli puhul on tegemist fooriprogrammiga, kus teatud pikkusega fooritaktid korduvad pidevalt ilma muudatusteta. Adaptiivse tsükli valgusfooriprogramm muutub vastavalt vajadustele, kasutades andmeid, mille põhjal süsteem teeb muudatusi fooritaktide pikkuses. Hetkeliiklusolukorra andmete kogumise peamiseks meetmeks, on erinevate tüüpi andurite kasutamine. Kõige sagedamini kasutatavad andurid on kaamerad, radarid ja induktiivandurid. Sõiduki seadmete vahendusel reguleeritavaid tsükleid kasutatakse laialdaselt ühistranspordis, kus ühistranspordijuhil on võimalus taotleda sõiduajal, vahetult enne ristmiku, vajalik foorisignaali ette (näiteks roheline takti pikendamine). See süsteem on kasulik olukordades, kus esineb ühistranspordi hiline misi või sõiduplaanide muutusi [7].

Fikseeritud fooritsüklite pikkus, juhul kui tsükli kestust saab valida sõltumatult teiste ristmike tööst, tuleks kahtaktilise töö korral valida 45...75s, kolmetaktilise töö korral 60...90s ja neljaktalilise töö korral 70...110s [11].

1.3 Tiptund

Tiptund (*peak hour*) on suurima liiklussagedusega ajavahemik ööpäeva lõikes, mille aeg võib olla fikseeritud täistunni või suurema (enamasti 15-minutilise) täpsusega kindlaks määratud loenduste põhjal. Oluliste tiptundidena on käsitletavad 30., 100. ja 200. tiptund. Tänavaristlõike, rambi ja ristmiku läbilaskvust tuleb kontrollida arvutusaasta eeldatava 30. ja 200. tiptunni liiklussagedusest lähtudes [1]. 30. tiptunni suurim esinemise tõenäosus on järgmistel kuudel: mai, juuni, august, september ja oktoober – need on kuud, kus liiklussagedus on enamasti aasta keskmisest 5 % kuni 10 % võrra kõrgem. Ülejäänud kuudel on 30. tiptunni esinemine vähetõenäoline. Kui suurima liiklussagedusega tiptunni liiklussagedus võib 30. tiptunni liiklussagedusest erineda 1,1 kuni 1,7 korda ja enamgi, siis 30. ja 50. tiptunni liiklussagedused erinevad enamasti üksteisest vaid 1 % kuni 2 % võrra – seega 30. tiptunni lähedast liiklussagedust esineb võrdlemisi sageli. Tööpäeva hommikune tiptund jääb üldjuhul ajavahemikku 7.30 kuni 9.00 ja õhtune tiptund ajavahemikku 16.00 kuni 18.00, laupäeval ajavahemikku kell 11.00 kuni 14.00. [1].

1.4 Simulatsioonimodelleerimine

Simulatsioonimodelleerimine on meetod, mis kasutab matemaatilisi mudeleid ja arvutiprogramme, et väljendada reaalse maailma süsteemide käitumist ja protsesse. See võimaldab analüüsida, prognoosida ja optimeerida erinevate keerukate süsteemide toimimist, ilma et peaks tegelikke eksperimente tegema või reaalseid protsesse häirima. Simulatsioonimodelleerimine on kasulik transpordi ja liikluse planeerimisel. Simulatsioon võib aidata hinnata transpordisüsteemide jõudlust, analüüsida liiklusvoogusid, testida uusi transpordiskeeme ja teha otsuseid infrastruktuuri arendamise kohta. Simulatsioonimodelleerimine võimaldab teha teoreetilisi eksperimente, hinnata alternatiivseid lahendusi ja planeerida tulevikku, aidates sellega paremini mõista keeruliste süsteemide toimimist ning langetada informeeritumaid otsuseid.

1.4.1 Modelleerimine ja simulatsioon

Modelleerimine ja simulatsioon on kaks tihedalt seotud mõistet, millel on tänapäeval teaduses ja inseneritöös suur roll. Need aitavad teadlastel ja inseneridel vähendada teadusuuringute kulusid ja ajakulu. Kaasaegsed andmete kogumise ja visualiseerimise meetodid muudavad transpordimudelite valdkonna. Need võimaldavad transpordi planeerijatel, inseneridel ja poliitikakujundajatel teha andmepõhiseid otsuseid, parandada liikluse juhtimist ning suurendada transpordisüsteemide üldist tõhusust ja ohutust.

Andmete kogumine on protsess, mille käigus kogutakse ja salvestatakse teavet erinevatest allikatest, nagu andurid, seadmed, rakendused ja kasutajad. See hõlmab erinevate andmete, näiteks teksti, numbrite, piltide ja heli kogumist.

Andmete visualiseerimine on meetod, mille abil andmed muudetakse graafilisteks esitlusteks, nagu graafikud, diagrammid ja kaardid. Seda tehakse selleks, et muuta andmed lihtsamini mõistetavaks ja võimaldada visuaalset analüüsi ning otsuste tegemist. Visualiseerimine aitab tuvastada mustreid, seoseid ja trende andmetes [12].

1.4.1.1 Modelleerimine

Modelleerimine on mudeli loomine, mis esindab objekti või süsteemi koos kõigi omaduste või alamhulkadega. Mudel on sarnane süsteemiga, mida ta kujutab, kuid lihtsustatum. Põhiline mudeli eesmärk on anda analüütikule võimalus ennustada muutuste mõju süsteemis. Ühelt poolt peaks mudel olema realistlik ligikaudne süsteemile ja hõlmama enamikku selle olulistest omadustest. Teiselt poolt ei tohiks see olla liiga keeruline, et seda ei saaks mõista ja eksperimenteerida. Hea mudel on mõistlik kompromiss realismi ja lihtsuse vahel. Mudelite eksperdid soovivad mudeli keerukust järk-järgult suurendada. Oluline küsimus modelleerimisel on mudeli usaldusväärsus. Mudeli kontrollimise meetodid hõlmavad mudeli modelleerimist teadaolevate sisendtingimustega ja mudeli väljundandmete võrdlemist süsteemi väljundandmetega. Tavaliselt on simulatsiooniuringute jaoks loodud mudel on matemaatiline mudel, mis on välja töötatud modelleerimistarkvara abil. Matemaatiline mudel kirjeldab süsteemi võrranditega. Matemaatiliste mudelite liigitused hõlmavad deterministlikke (kus sisend- ja väljundmuutujatel on fikseeritud väärtused) või stohhastilisi (kus vähemalt üks sisend- või väljundmuutuja on tõenäosuslik); staatilisi (kus aega ei arvestata) või dünaamilisi (kus arvestatakse muutuvaid ajas muutuvaid suhteid muutujate vahel). Tavaliselt on simulatsioonimudelid stohhastilised ja dünaamilised [13].

1.4.1.2 Simulatsioon

Simulatsioon on reaalse maailma või väljamõeldud süsteemi käitumise uurimise ja analüüsimise tehnika, matkides seda arvutirakenduses. Simulatsioon töötab süsteemi kirjeldaval matemaatilisel mudelil. Simulatsioonis muudetakse matemaatilise mudeli ühte või mitut muutujat ja täheldatakse teiste muutujate muutusi. Simulatsioonid võimaldavad kasutajatel ennustada reaalse maailma käitumist.

Simulatsioonid aitavad vajalikke muudatusi tehes süsteeme optimeerida ja saavutada häid tulemusi. Kasutajad saavad simulatsioone käivitada reaalsest ajast aeglasemalt või kiiremini ning see võib aidata välja selgitada üksikasju [14].

1.4.2 Lähenemisviisid

On olemas kolm peamist lähenemisviisi liikluse uurimiseks: makromodelleerimine, mikromodelleerimine ja mesomodelleerimine.

1.4.2.1 Makromodelleerimine

Makromodelleerimine kirjeldab sõidukite liikumist keskmiselt, näiteks, keskmine tihedus, keskmine kiirus, keskmine voog jne. Selle lähenemisviisi puhul on liiklusvoog võrreldakse kokkusurutava motiveeritud vedeliku liikumisega. Mistõttu seda lähenemisviisi nimetatakse ka hüdrodünaamiliseks.

1.4.2.2 Mikromodelleerimine

Mikromodelleerimine kirjeldab iga sõidukit eraldi ja seetõttu modelleeritakse iga sõiduki liikumist selgesõnaliselt modelleeritakse. Liikluse mikromodelleerimine on üks meetoditest, mille abil saab uurida teede infrastruktuuri ja transpordisüsteemi tervikuna. See võimaldab saada rohkem teedevõrgu erinevate elementide, nagu sõidukid, jalakäijad, signalisatsioonisüsteemid jne koostoimest aru

1.4.2.3 Mesomodelleerimine

Mesomodelleerimine on kesktee kahe eelneva modelleerimise liigi vahel. Modelleerimine põhineb kineetilistel võrranditel. Sellistes mudelites kirjeldatakse voolu autode jaotuse tihedusega faasis, st koordinaatide ja kiiruste ruumis [15].

Antud diplomitöös kasutatakse mikromodelleerimise lähenemisviisi. Vissim'i liiklusvoo mudel on diskreetne, stohhastiline, ajasammul põhinev mikroskoopiline mudel, mille juht-sõiduk-üksused on üksikud üksused.

1.5 PTV Vissim

Transpordi modelleerimine ning selle peamine tööriist, mis peegeldub, transpordi voogude simulatsioonis on aglomeratsioonide infrastruktuuri ning selle juhtimise kavandamise, samuti ka linnalogistika, tänapäeva asendamatu osa. Teedevõrkude ja ristmike projekteerimine, liiklusolukorra analüüs, et kõrvaldada ummikud, vähendada sõidukite hilinemisi ja parandada liiklusohutust, on

teadustööde aktuaalseks teemaks. Enamik töödest põhineb mikromudelite loomisel ja viimaste analüüsil. Mikrokoopiliste liiklusvoogude modelleerimise tarkvara PTV Vissim kasutatakse peamiselt valitud linnastu liiklusvoogude modelleerimiseks, et luua jätkusuutlik linnatranspordisüsteem ning säästeva põhimõttele vastava linnalogistika. Antud tarkvara võimaldab uurida uusi logistika planeerimise ning juhtimise vahendeid, mis soodustavad säästva linnalogistika kontseptsiooni realiseerimiseks. Samuti süsteem võimaldab simuleerida reaalsel linnaliiklust, töötada välja tõhusaid liikluskorralduse strateegiaid ja katsetada igat tüüpi ristmike erinevate arendus ja ümberkorralduse projektide puhul [16].

PTV Vissim tarkvara on PTV Groupi sõnul modelleerimisel ja simulatsioonil põhinev mikrokoopiline standardne liiklus- ja transpordiplaneerimise vahend. Käsitleva tarkvara saab kasutada järgmistes valdkondades [17]:

- Micro-, meso- ja hübriidsimulatsioonid;
- liikluse heitkoguste modelleerimine;
- ühistranspordi eelistamine;
- intelligentne liikluskorraldus;
- autonoomsete ja ühendatud sõidukite simulatsioon;
- jalakäijate liikluse modelleerimine.

Mikromodelleerimise protsess on ülesehitatud sõiduvahendi juhi jälgimise (ohutu distantssi hoidmisega) kontseptsioonil, mis sai väljatöötatud aastatel 1974 ning uuendatud aastal 1999 (Wiedemann 74 ja Wiedemann 99). Juhi jälgija mudelid annavad üldpildi liiklusvoo käitumisest, võttes arvesse üksikute sõidukite käitumist ja selle tõenäosuslikku iseloomu. Wiedemanni psühhofüüsikaline mudel, kirjeldab juhi käitumist ja reaktsioone erinevatele liiklusolukordadele. Järelikult käsitlev lähenemine põhineb psühhofüüsikalisel tajuteoorial, mis näitab, kuidas inimesed tajuvad erinevaid stiimuleid ja reageerivad neile [15].

1.6 Kalibreerimine ja valideerimine.

Vissim'i mudeli täpsus sõltub kalibreerimis- ja valideerimisprotsessidest. Need kaks etappi mängivad võtmelist rolli mudeli täpsuse, usaldusväärsuse ja kasutatavuse tagamisel.

1.6.1 Kalibreerimine

Sõidukäitumise parameetrite kalibreerimise eesmärk on tagada, et simulatsioonimudel suudaks täpselt reprodutseerida juhi käitumist. Nimetatud asjaolu on transpordi analüüsimisel ja teede

planeerimisel väga oluline, kuna täpne simulatsioonimudel võib anda täpsemaid prognoose selle kohta, kuidas teeolude või liikluspoliitika muutused võivad mõjutada juhi käitumist ning vaadeldava liiklusvoogu.

Kalibreerimine Vissim'is on sobivate parameetriväärtuste moodustamise protsess, eesmärgil simuleerida vaadeldava objekti liikluse situatsiooni, võimalikult lähimalt reaalsele näitule. Kasutatakse katse-eksituse meetodit, mille puhul võrreldakse välivaatlustingimusi simulatsiooni tingimustega. Mudel on täpne, kui simulatsioonitulemuste ja vaadeldavate andmete vaheline veamäär on suhteliselt madal.

Kalibreerimisprotsess viiakse läbi empiiriliste või väliandmete võrdlemisel väljatöötatud matemaatilise mudeli simulatsioonitulemustega. Sel juhul kasutatakse empiiriliste andmete ja simulatsioonitulemuste erinevust mudelis nõutavate parameetrite väärtuste korrigeerimiseks. Täpsete prognooside tegemiseks tuleb simulatsioonimudel esmalt kalibreerida, kasutades väliandmeid. Seda saab teha, kogudes andmeid otsestest vaatlustest, näiteks liikluse voogude kiiruse, sõidurajade, foorijuhtimissüsteemi, sõidukite tüüpide ja muude muutujate kohta, mis on seotud juhi ja sõiduki käitumisega liikluses.

Kalibreerimine aitab luua usaldusväärse mudeli, mis suudab reageerida erinevatele muutustele transpordisüsteemis, olgu selleks siis liikluskormuse suurenemine, infrastruktuuri muutused või uued liikluse juhtimise meetmed. Kalibreeritud mudel võimaldab inseneridel luua realistlikke stsenaariume ja teha ennustusi, mis põhinevad usaldusväärsetel andmetel. Nimetatud tingimused on olulised transpordiinfrastruktuuri planeerimisel ja ohutuse hindamisel [18].

1.6.2 Valideerimine

Valideerimine hõlmab mudeli tulemuste võrdlemist tegelike mõõtmistega, mis olid kalibreerimise käigus kasutatud. Antud protsess kinnitab, et mudel on õigesti kalibreeritud ja suudab teha usaldusväärseid ning andmepõhiseid prognoose. Valideeritud mudel annab kindluse, et seda saab edukalt kasutada transpordiplaneerimise ja liikluse juhtimise otsuste toetamiseks. Transpordi insenerid saavad tugineda mudeli tulemustele, et teha teadlikke otsuseid.

Antud diplomitöös valideerimisel uuritakse liiklusvoo mahtu. Modelleeritud ja vaadeldud mahtude võrdlus oli tehtud modifitseeritud hii-ruudu statistilise testi abil, mida nimetatakse GEH-statistikaks. GEH-statistika on valem, mida kasutatakse liikluskorralduses, liikluse prognoosimises ja liikluse modelleerimises, et võrrelda kahte liiklusmahtude komplekti. GEH-statistika on oma nime saanud

Geoffrey E. Haversilt, kes leiutas selle 1970. aastatel Inglismaal Londonis transpordiplaneerijana töötades. GEH-statistika ei ole tõeline statistiline test. Pigem on see empiiriline valem, mis on osutunud kasulikuks erinevatel liiklusanalüüsi eesmärkidel [19].

GEH-statistika valem (1) [19] on järgmine:

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \times (M - C)^2}{M + C}}, \quad (1)$$

kus M – liikluse maht liiklusmudelist (või uus loendus), sa/t;

C – tegelik liikluse arv (või vana loendus), sa/t.

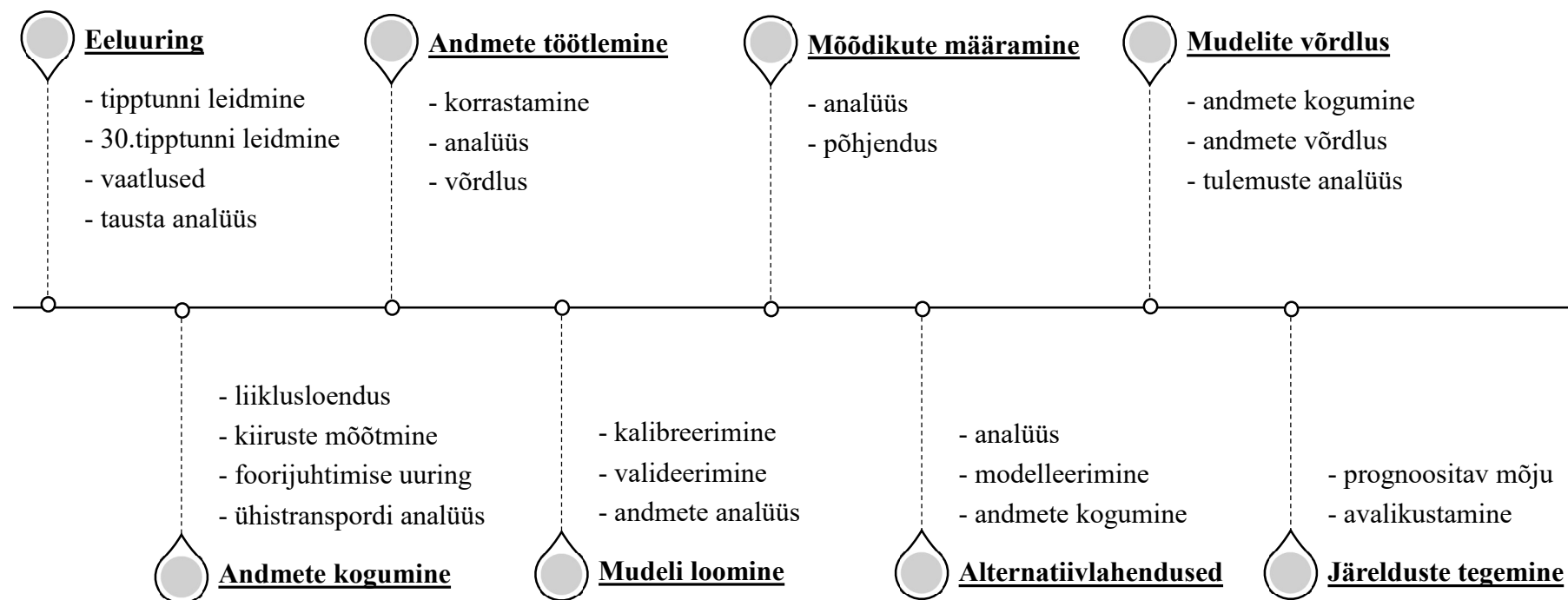
Erinevad GEH väärtused näitavad valideerimise täpsuse, mis kirjeldab järgmine tabel (Tabel 2) :

Tabel 2. GEH-statistika väärtuste hindamine

Valideerimise näidik	Tulemuse väärtus
$GEH < 5,0$	mudeli võib pidada hästi sobivaks
$5,0 \leq GEH \leq 10,0$	mudel võib vajada täiendavat uurimist
$GEH > 10,0$	mudelit ei saa pidada sobivaks

2 KASUTATUD METOOD

2.1 Metodoloogilise lähenemise kirjeldus



2.2 Andmete kogumise meetodid

Andmete kogumisel on transpordiplaneerimisel võtmeroll, kuna viimane annab vajaliku teabe transpordisüsteemide analüüsimiseks, projekteerimiseks ja efektiivsuse parandamiseks. Tõhus andmete kogumine aitab transpordiplaneerijatel teha põhjendatud otsuseid mobiilsuse parandamise, liikluse ummikute vähendamise, ohutuse suurendamise ja jätkusuutlikkuse edendamise suunas, vaadeldaval infrastruktuuri elemendil. Ilma täpsete andmeteta ei saa mudelit õigesti välja töötada, kalibreerida ega valideerida. Andmete kogumine hõlmab nii olemasolevate andmeallikate kasutamist, kui ka uute andmete kogumise korraldamist kohapeal.

Antud diplomitöö autor võtab käsile järgmised andmete kogumise meetodid.

2.2.1 Vaatlus ja loendus

Vaatlus ja loendamine on äärmiselt olulised tegevused transpordi planeerimisel ja modelleerimisel. Nimetatud tegevused võimaldavad koguda reaalselt andmestikku liikumise, liiklusvoogude, reisimise harjumuste ja transpordivajaduste kohta. Allpool autor toob esile täiendavaid selgitusi, miks vaatlused ja loendused oma olulisuse poolepealt mängivad võtmelist rolli:

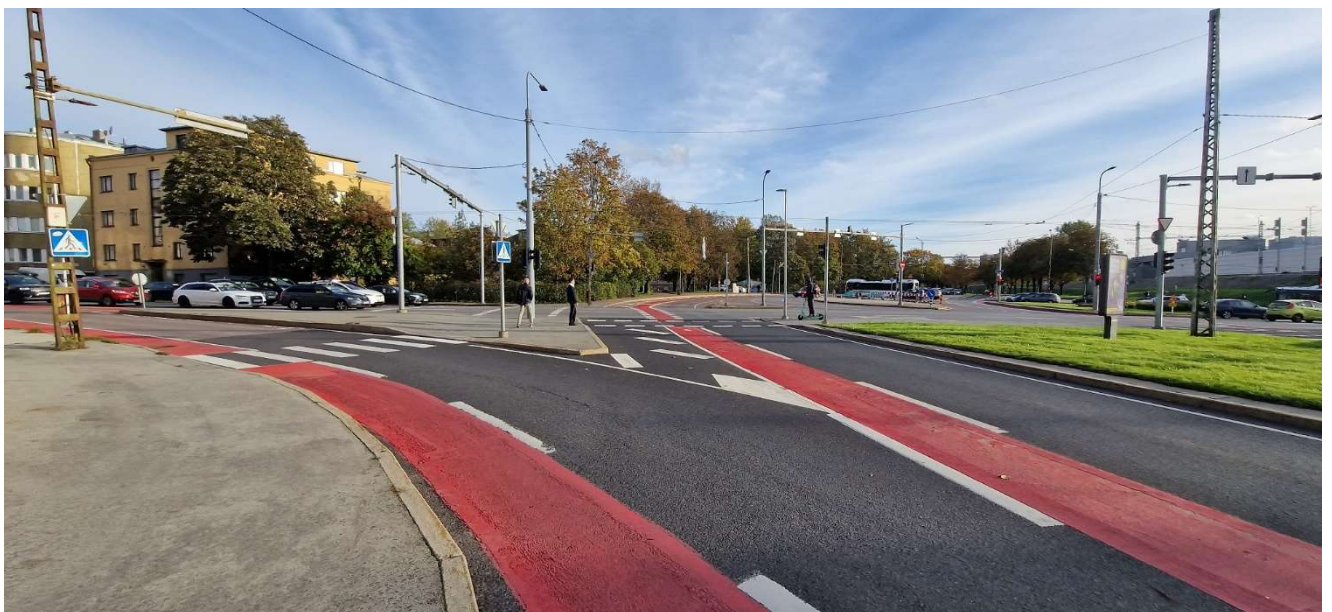
- andmete kvaliteet ja täpsus – vaatlused ja loendused annavad otsese ülevaate tegelikest tingimustest ja olukordadest teedel ja transpordisüsteemides. Nimetatud viisil kogutud andmed on sageli täpsemad kui mudelid või prognoosid ning võimaldavad planeerijatel ja modelleerijatel paremini mõista vaadeldava liikluse olukorra ja dünaamikat;
- mudeli kalibreerimine – andmete kogumine võimaldab kalibreerida ja valideerida transpordimudeleid. Kui reaalsete andmetega võrreldakse mudelite ennustusi, saab kindlaks teha, kui hästi mudelid tegelikkust kajastavad. Viimane aitab suurendada mudelite usaldusväärsust ja täpsust;
- liiklusvoogude mõistmine – vaatlused ja loendused aitavad mõista liiklusvoogusid, liiklusummikuid ja liikumismustreid. Saadetud teave on hädavajalik, et teha otsuseid liiklusvoo juhtimise, teede laiendamise või liikluskorralduse uuendamise kohta;
- transpordi planeerimine – andmete põhjal saab paremini planeerida transpordisüsteemi arengut ja infrastruktuuriinvesteeringuid. Käsitlevad tegevused võimaldavad tuvastada transpordivajadusi ja kitsaskohti ning kujundada tõhusaid ja jätkusuutlikke lahendusi;
- transpordisüsteemi efektiivsuse parandamine – andmete põhjal saab paremini hinnata transpordisüsteemi toimimist ja leida võimalusi selle efektiivsuse ja jätkusuutlikkuse parandamiseks.

2.2.2 Transpordi infrastruktuuri objekti vaatlus

Liikluseloendus kohapeal (Joonis 6) on kõige traditsioonilisem meetod, mida kasutavad liiklusinsenerid ja liiklusanalüütikud, et koguda olulist teavet liiklusvoogude ja teede kasutamise kohta. See hõlmab füüsilist kohalolekut määratud kohtades, kus spetsialistid jälgivad, registreerivad ja analüüsivad erinevaid liiklusparameetreid. Need parameetrid hõlmavad sõidukite arvu, sõidukiirust, sõidukite tüüpe, tee geomeetria ja liikluse tihedust. Liikluseloendus kohapeal on efektiivne meetod täpsete ja ajakohaste liiklusandmete kogumiseks. Niisuguse meetodi peamiseid eeliseid on:

- täpsus – liikluseloendus kohapeal võimaldab saada väga täpseid andmeid liiklusvoogude kohta, kuna need pärinevad otse teedelt ja determineeritud vaatluskohtadest;
- aktuaalsus – kuna andmeid kogutakse reaalajas, on need alati ajakohased;
- kohalike tingimuste kohandamine – kohapealne liikluseloendus võimaldab kohandada andmekogumise meetodeid vastavalt konkreetsetele kohalikele tingimustele ja vajadustele, tagades seeläbi täpsemaid tulemusi.

Samuti autori väitel, on oluline tuua esile täpsustuse mille kohaselt, kohapealne vaatluse meetod ei taga kõige täpsema tulemuse, kuna see on ajaliselt ja ruumiliselt piiratud, mis tähendab, et võib tekkida lünklikus ja liiklusolukorra muutmised väljaspool määratud aegu ja piirkonda. Järelikult kirjeldatud meetodiga saadatud andmed, interpoleerimise käigus, tulevatele süsteemi seisunditele (prognoos) võivad osutada puudulikeks.



Joonis 6. Vaatluse objekt (autori poolt koostatud)

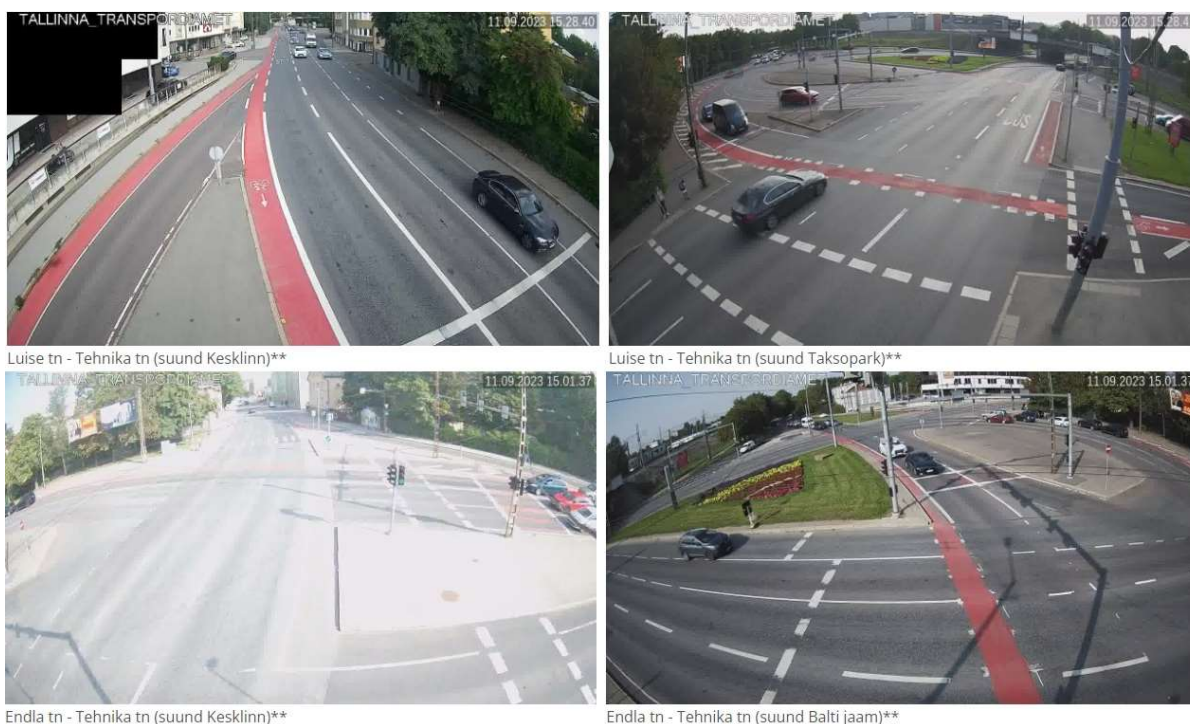
Vaatluse meetod on efektiivsem, kui seda kombineeritakse teiste tehnoloogiate ja andmekogumise meetoditega, nagu video kaamerate ja sensorite kasutamine. Niisugune lähenemisviis aitab saada täpsema ja kogu ulatusega ülevaate liiklusest ning teeoludest vaatluse piirkonna kohta. Antud diplomitöös, autori poolt, sai olla kasutatud kombineeritud andmete kogumise meetod.

2.2.3 Liikluskaamerad

Liikluse loenduse sooritamisel oli samuti kaasatud linnatänavate kaamerate süsteem, mis on avalikult kättesaadav veebilehelt – <https://ristmikud.tallinn.ee/> (Joonis 7). Diplomitöö autor kasutas Tallinna Transpordiameti poolt antud õiguse liikluskaamerate videosalvestuste läbivaatamiseks. Saadud võimalus tõstis loenduse täpsuse ning tagas paremad uurimuse tulemusi. Videosalvestus aitas sooritada nii transpordivahendite, kui ka jalakäijate loendust.

Töö käigus oli kasutatud andmed liikluskaameratest järgmistel ristmikel:

- Luise tn. – Tehnika tn.
- Endla tn. – Tehnika tn.
- Suur-Ameerika tn. – Pärnu mnt.



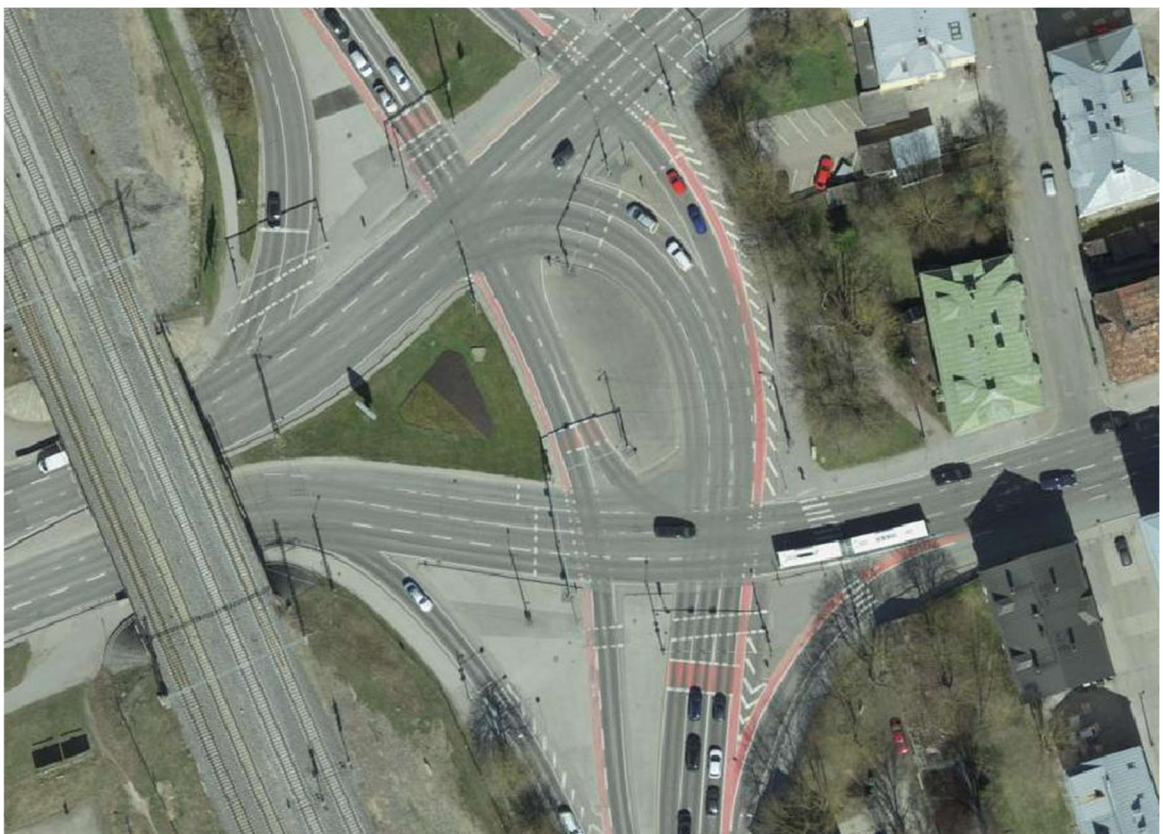
Joonis 7. Liikluskaamerate vaade

2.2.4 Kaardirakendused

Detailjoonised, kaardid ja õhufotod võivad olla kasulikud, et anda teavet kohaskeemi kohta. Internet pakub väärtuslikku ressursi kaartide ja õhufotode jaoks, mis võivad olla kasulikud võrguga tutvumise algstaadiumis viitena.

Saadaval olevatest õhufotode valikutest pakub X-GIS [3] (Joonis 8) hetkel kõige kõrgema eraldusvõimega pilte, Tallinna kesklinnast. Juhtudel, kus õhufotod on kas takistatud või ebaselged, näitab *Google Maps*'i '3D' valik kaldu pilte, mis pakuvad alternatiivset vaadet. Üks kasulikumaid veebipõhiseid tööriistu on tänavatasandil tehtud panoraamfotograafia, mis näitab sõiduki juhi vaadet teede võrgule, kasutades 360° kaameratega tehtud pilte. Näited hõlmavad *Google Streetview*'d (Joonis 9). Millist tööriista iganes kasutatakse, on oluline märkida aasta, mil pildid on tehtud, tagamaks, et need sobivad ettenähtud otstarbeks.

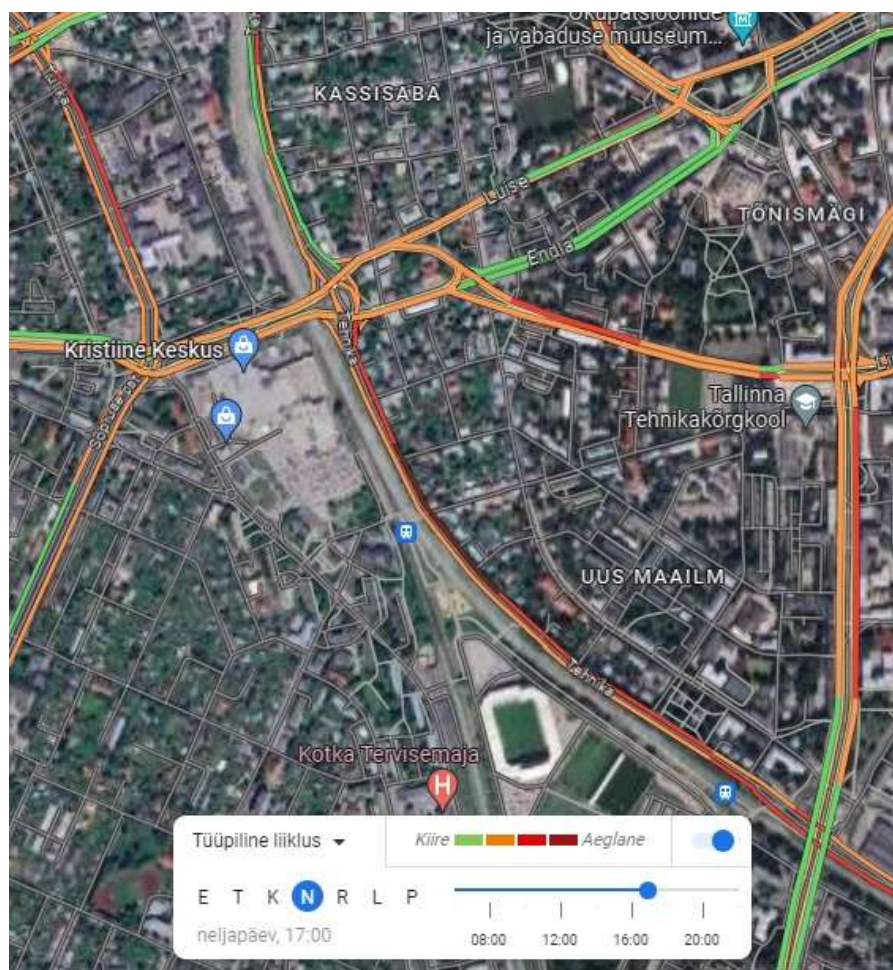
Mitmed veebipõhised tööriistad võivad näidata tüüpilisi liiklusolusid teatud päeval või kellaajal, sealhulgas *Google Maps*'i liiklusolude funktsioon (Joonis 10).



Joonis 8. X-GIS ortofoto [3]



Joonis 9. Google Maps Street View vaade



Joonis 10. Tüüpilise liikluse pilt (allikas: Google Maps)

2.2.5 Seire süsteem

Tallinna liikluse seiresüsteem on Tallinna Transpordiameti tellimisel loodud süsteem, mis loendab ja samas ka klassifitseerib seirepunktides sõidukeid. Seirepunkte on hetkel 11, jälgitavaid sõiduradu 156 ning klasside arv 5. Jälgitavad sõidukite klasside arv, mida nimetatud süsteem, suudab tuvastada ning klassifitseerida on:

- sõiduautod;
- veoautod;
- autorongid;
- tavabussid;
- liigendbussid;
- liigitamata sõidukid.

Spetsialisti kasutajaliidese kaudu saavad volitatud spetsialistid teha erinevaid päringuid kogutud andmetest. Avaliku väljundina kujutatakse vastavalt liikluse hetkeseisule eri värvi nooli Tallinna kaardil (Joonis 11).

Aruandevormidega saab teha päringuid loendusandmetest, mis on säilitatud 15 minutiliste loendustulemuste koondina, iga anduri kohta eraldi. Aruandevormid annavad võimaluse pärida loendusandmeid erinevate põhimõtete järgi. Diplomitöös kasutatakse järgmised päringud seire süsteemist:

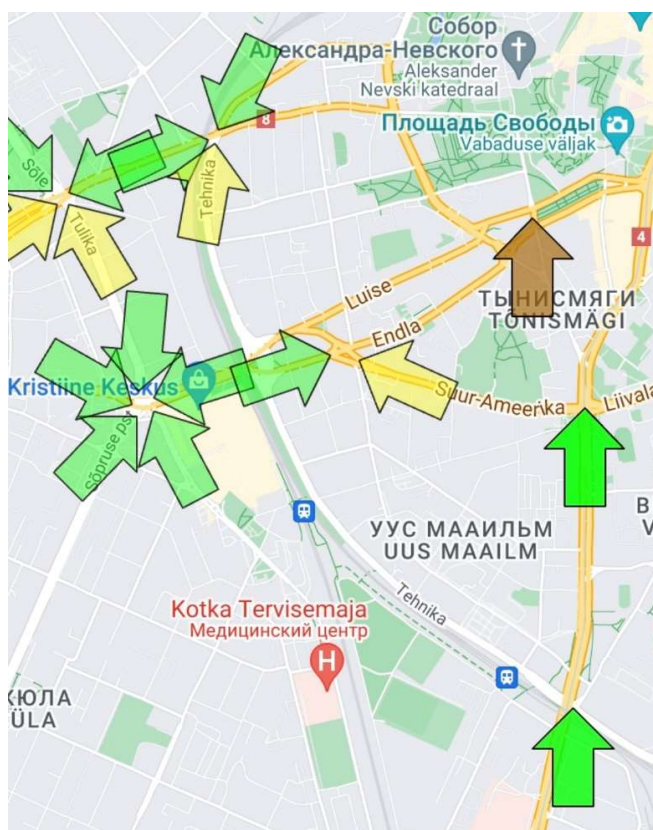
- Ristmiku loendustulemuste aastakokkuvõte nädalate ja päevade lõikes;
- Ristmiku loendustulemuste nädalakokkuvõte päevade ja tundide lõikes;
- Ristmiku ühe päeva loendustulemuste kokkuvõte sõidukiliikide lõikes.

Seireanduritena kasutatakse ADEC Technologies AG (Šveits) andureid TDC 3-5-F-B-45-SA, milledele on koostatud vastavalt hanke tingimustele spetsiaalne eritarkvara (tuvastatakse ka linnaliinide bussid ning eristatakse lühikesi ja pikki busse). Andurid on mõeldud lugema otse enda alt läbi sõitvaid sõidukeid (sõiduraja kohased), seega on nad paigaldatud iga sõiduraja kohale täpselt keskele ning iga sõiduraja lugemiseks kasutatakse ühte andurit. Detektorid ühendavad kolm tehnoloogiat (Doppleri radar, ultraheli ja passiivne infrapuna). Mööduvad sõidukid genereerivad signaale igas alamsüsteemis. Doppleri radar mõõdab iga sõiduki kiirust. Ultraheliosa skaneerib sõiduki profiili, et määrata kindlaks sõidukiklassid ja eraldada sõidukid liiklusvoos täpse mahuteabe saamiseks. Mitmekanaliline infrapuna andur edastab sõiduraja valikulist teavet, mis aitab sõiduradade vahel liikuvaid ja sõidurada vahetavaid sõidukeid õigesti arvestada [20]. Andurid edastavad

loendatud sõidukite info reaalajas kesk serverisse, kus teostatakse iga veerandtunni täitumise järel koondi kokkuarvutamine, seejärel muutuvad andmed aruannetes kättesaadavaks. Kui peaks juhtuma, et mingil põhjusel andmete laekumine ristmikult hilineb rohkem kui ühe päeva või jäävadki puudu, siis iga uue nädala alguses tehakse eelmise nädala andmete läbivaatus, puudu jäänud andmed asendatakse tegelikega, kui põhjuseks oli hilinevad laekumine ning muudel juhtudel prognoositutega, lisades sel juhul andmetele vastava eritunnuse. Samas koostatakse ka viimase nelja nädala andmetest keskmiste väärtuste andmestik, mida kasutatakse erakorraliste liiklussageduste leidmisel ja väljatoomisel [21]. Seiresüsteemi looja ja haldaja on Signaal TM AS.

Diplomitöö autor kasutab oma töös andmeid SEIRE süsteemist järgmistest ristmikutest (Joonis 11):

- Endla tn. – Suur-Ameerika tn.;
- Suur-Ameerika tn. – Liivalaia tn. – Pärnu mnt.;
- Tehnika tn. – Paldiski mnt.;
- Tehnika tn. – Vana-Lõuna tn.;
- Endla tn. – Sõpruse pst. – Tulika tn.



Joonis 11. SEIRE süsteemi vaade

2.2.6 Kiiruste mõõtmine

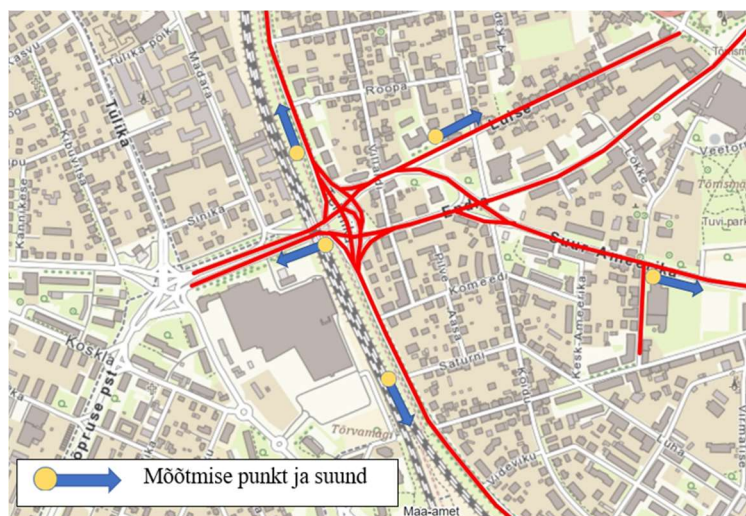
Kiiruste mõõtmine on üks põhilistest andmete kogumise meetoditest liikluse modelleerimisel ja transpordiplaneerimisel. Kiirusandmed on olulised transpordisüsteemide ja teede projekteerimisel, andes inseneridele vajaliku teabe teede ja ristmike kujundamiseks vastavalt liiklusnõuetele. Järelikult võimaldab meetod paremini kohandada transpordiinfrastruktuuri vastavalt tegelikele liiklusvajadustele, luues tõhusamaid ja ohutumaid liikluslahendusi. Meetodi rakendamisel on mitmeid olulisi põhjuseid ja eeliseid.

Üks oluline aspekt on võime mõista liiklusolukordade dünaamikat, mida saavutatakse kiiruste mõõtmisega, mis võimaldab meil jälgida ja analüüsida, kuidas liiklus erinevates kohtades ja erinevatel ajahetkedel muutub. Teine oluline eelis on võimalus hinnata liikluse sujuvust. Kiiruste mõõtmise abil saame hinnata, kui sujuvalt liiklus liigub, ning tuvastada võimalikud ummikualad või liikluse aeglustumised. See omakorda on oluline transpordiplaneerimise kontekstis, kus soovime leida viise liiklusvoogude sujuvamaks muutmiseks.

Meetod aitab ka liiklusvoogude juhtimisel, eriti intelligentsete transpordisüsteemide (ITS) raames. Kiirusandmed on vajalikud, et tõhusalt juhtida liiklusvoolusid ja võimaldada parandusi liikluse juhtimise seadmetele, näiteks fooridele.

Ohutuse ja liiklusohutuse analüüsimisel on kiirusandmed hädavajalikud. Need aitavad tuvastada riskipiirkondi, kus kiiruseületamine on levinud ja võib suurendada liiklusõnnetuste ohtu.

Käesolevas lõputöös autor kasutab kiiruste mõõtmiseks Tallinna Tehnikakõrgkooli seadet TraffPatrol XR. Kiirus mõõdetud punktides ning suundades, mis on joonisel märgitud (Joonis 12).

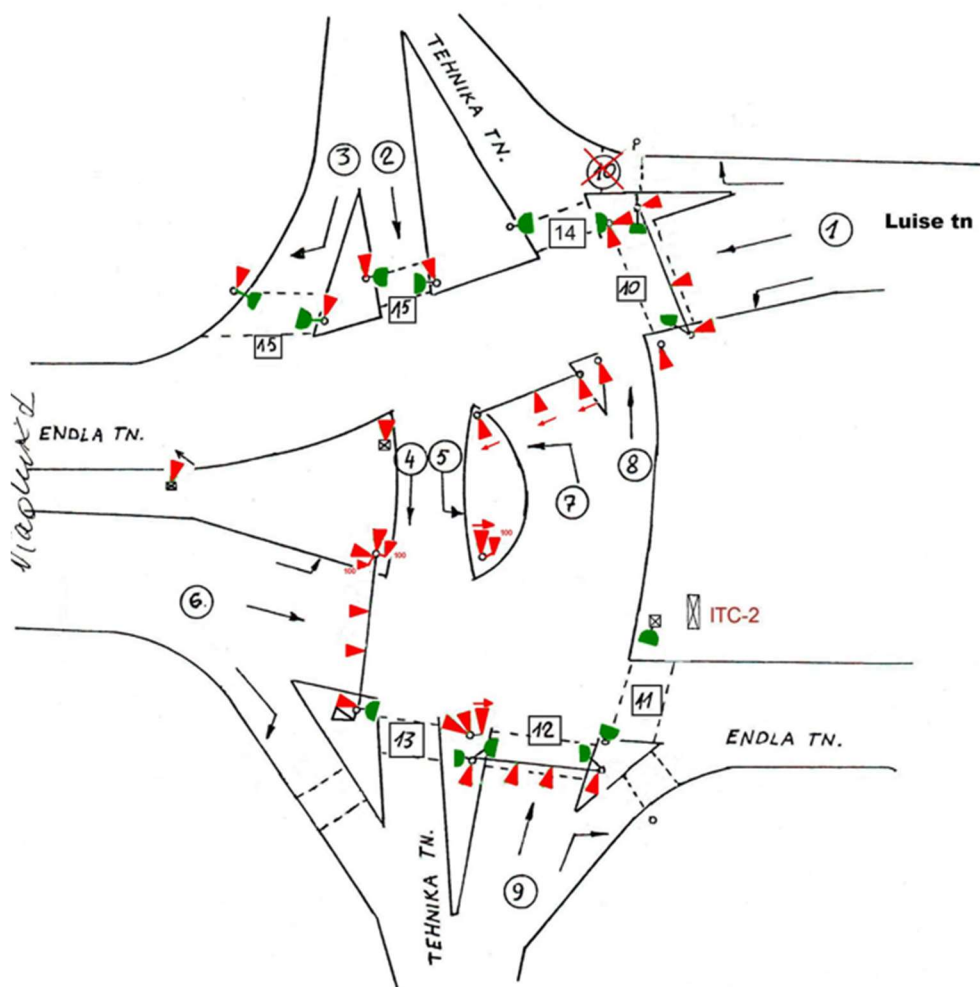


Joonis 12. Kiiruste mõõtmise skeem (autori poolt koostatud)

2.2.7 Foorid

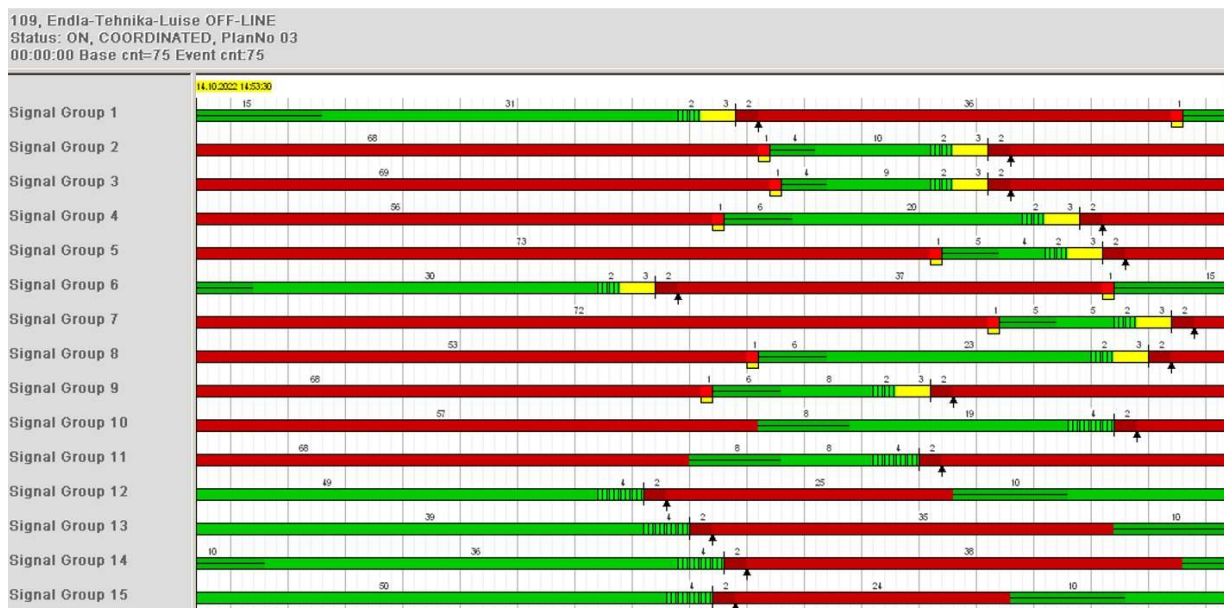
Andmed Tallinna foorijuhtimissüsteemist olid saadud Tallinna Transpordiameti liikluskorralduse osakonnast. Nende põhjal oli modelleeritud järgmiste fooriobjektide hetkeseisu töö:

- 107_Liivalaia_Parnu_S_Ameerika;
- 108_Endla_S_Ameerika_Luise;
- 109_Endla_Tehnika_Luise;
- 205_JKR_Kristiine_keskus.



Joonis 13. Tehnika – Endla – Luise ristmiku fooriobjektide skeem (allikas: Tallinna Transpordiamet)

Andmed süsteemi olid sisestatud vastavalt fooriobjektide paigutus skeemide (Joonis 13) ning fooritaktide alusel (Joonis 14).



Joonis 14. Tehnika – Endla – Luise fooriobjektide taktide jaotus (allikas: Tallinna Transpordiamet)

Lõputöö vaadeldava piirkonna fooriprogrammideks on fikseeritud aja intervallidega. Antud süsteem on levinuimaks lähenemisviisiks valgusfooriprogrammidele Eestis. Skeemi kohaselt järgib valgusfoor kindlat tsüklit, kus iga faas kestab määratud aja ning tsüklil kordub regulaarselt ilma automaatsete kohandusteta. Seda tüüpi programmide eeliseks on nende lihtsus ja stabiilsus, kuid nende efektiivsus võib olla piiratud, kuna nad ei suuda kohanduda muutuvate liiklustritega.

Tallinnas enamik fikseeritud tsüklite põhiseid süsteemid, kasutavad standardset valgusfooride signaalskeemi: punane – punane/kollane – roheline – roheline (vilkuv) – kollane. Niisugune skeem võimaldab selgelt juhtida liiklejaid igas faasis, tagades ohutu liikumise ristmikul. Joonisel (Joonis 14) on näha, et Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmiku fooriprogrammil kasutatakse fikseeritud aja intervallidega skeemi. Sõidukitele (grupid 1-9) on ettenähtud fooritakt, kus on punase tule järgi on 1 sekund punane/kollast tuld ning edasi läheb roheline takt, mis lõpeb 2 sekundilise vilkuva rohelise tulega mille järel tuleb 3 sekundit kollast tuld. Jalakäijate jaoks (grupid 10-15) on ettenähtud järgmine skeem – punane takt pluss roheline takt, mis lõpeb 4 sekundilise vilkuva rohelise tulega.

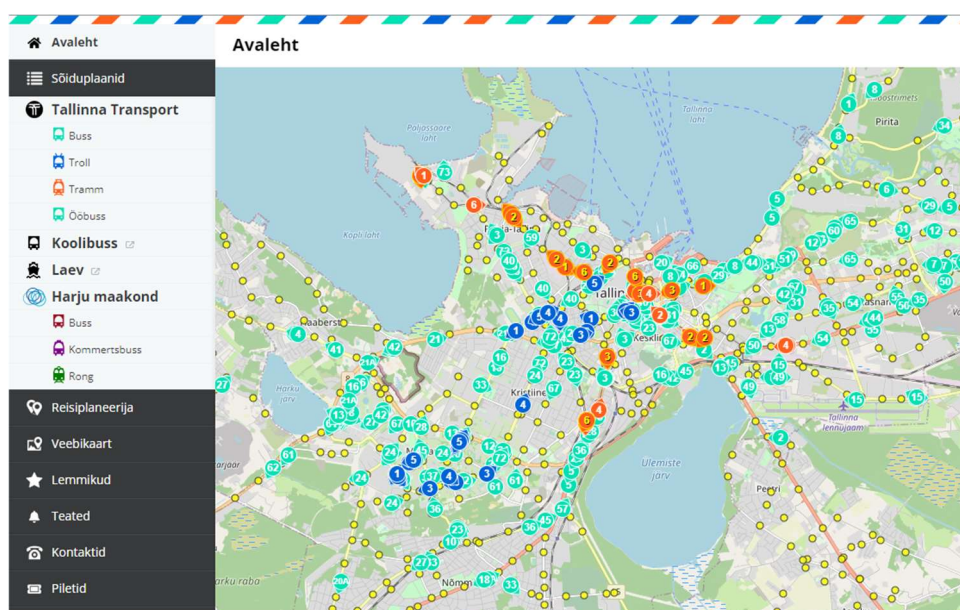
Tallinna linna on kasutusel Swarco Omnia foorijuhtimisüsteem, mis oli paigaldatud 2020 aastas. Swarco Omnia on tänapäevane ja innovatiivne valgusfooride juhtimisüsteem, mis on loodud liiklusvoogu dünaamiliseks reguleerimiseks (real ajas juhtimine). Süsteemi eesmärk on pakkuda adaptiivset liikluskorraldust, mis suudab kohanduda muutuvate liiklusoludega, tagades seeläbi sujuva ja efektiivse liikluse ristmikel. Antud süsteem võib kasutada reaajas andmeid, mida kogutakse erinevatest allikatest, nagu liiklusandurid, kaamerad ja muud seadmed. See võimaldab süsteemil

pidevalt jälgida liiklusvoogu ja analüüsida ristmiku hetkeseisu. Olles varustatud tehisintellekti funktsionaalsusega, suudab Swarco Omnia teha dünaamilisi kohandusi fooriprogrammides vastavalt liiklusmustritele. Lisaks adaptiivsusele pakub Swarco Omnia süsteem ka võimalusi andmete kogumiseks ja analüüsimiseks, mis aitavad liikluskorraldajatel teha informeeritud otsuseid liikluskorralduse parandamiseks. Visuaalsed esitusviisid võimaldavad reaajas jälgida liiklusolusid ja süsteemi toimimist, muutes selle tõhusaks tööriistaks linnade ja teede liikluskorralduses [22].

2.2.8 Ühistransport

Antud diplomitöös vaadeldakse nii sõiduautode, kui ka ühistranspordi süsteemi, kuna see on lahutamatu osa Tallinna transpordivõrgust. Kuigi Vissim on peamiselt keskendunud sõiduautode ja muude sõidukite liikumise modelleerimisele, saab seda ka kohandada ja kasutada ühistranspordi simulatsioonide jaoks. Modelleerimisel võib kavandada ühistranspordi peatusi ning marsruute, et analüüsida teenuse efektiivsust ja selle mõju liiklusvoogudele. Diplomitöös kasutatud tarkvara võimaldab simuleerida liikluskorralduse ja signaalseadistuste muutusi, mis võivad mõjutada ühistranspordi liikumist. Andmete kogumisel Tallinna ühistranspordi kohta oli kasutatud Tallinna Transpordiameti poolt loodud veebilehekülg <https://transport.tallinn.ee/>, mille abil võib jälgida kogu ühistranspordi ajakava (Joonis 15).

Eelmainitud veebilehe info alusel Vissim'i mudelis oli modelleeritud kokku 23 ühistranspordiliini, millest kolm on trammiliinid ning ülejäänud on bussiliinid. Ühistranspordi ajakava ning saabumised peatustesse olid kohandatud vastavalt olemasolevatele andmetele ning vaatlusele kohapeal.



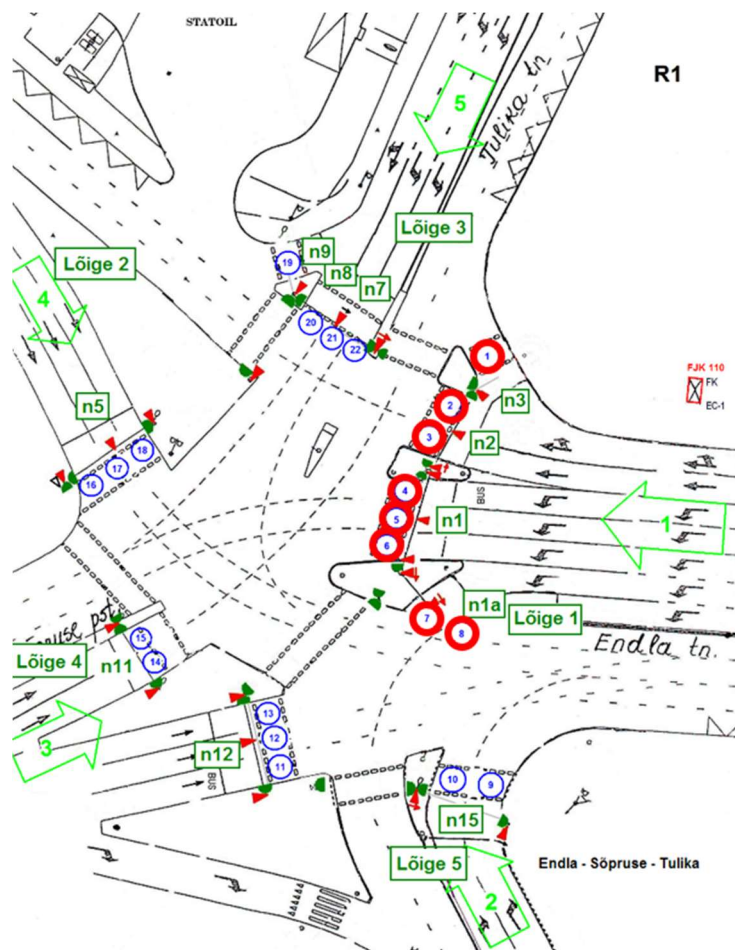
Joonis 15. Kuvatõmmis <https://transport.tallinn.ee/>

2.3 Tiptunni määramine

Tipp tunni määramise meetodiks kasutatakse antud diplomitöös seiresüsteemi (vt. 2.2.5), et leida 2023. aasta andmete statistikal õhtuse tiptunni aja ning teostada sellel ajal liikluse uuringu, mis on andmete sisendiks modelleerimisel. Antud töö eesmärk on analüüsida õhtuse tiptunni liiklust, kuna eeluuringute käigus, mis oli viidud vaatluse abil, õhtune liiklusolukord selles piirkonnas on kõige problemaatiline.

Kasutades seiresüsteemi sisseehitatud instrumente olid võetud andmed uuritava ristmiku kõrvalt asetsevast Sõpruse – Endla – Tulika ristmiku suunast, mis läheb linnast välja (LVS). Vaadeldavad suunad (1-8) on (märgitud punasega joonisel) (Joonis 16):

- Endla LVS – PP Tulika (Paldiski mnt. suunas);
- Endla LVS – Endla LVS;
- Endla LVS – Sõpruse LVS;
- Endla LVS – VP Tulika (Kotka tn. suunas).



Joonis 16. Sõpruse – Endla – Tulika ristmiku seireandurite skeem [21]

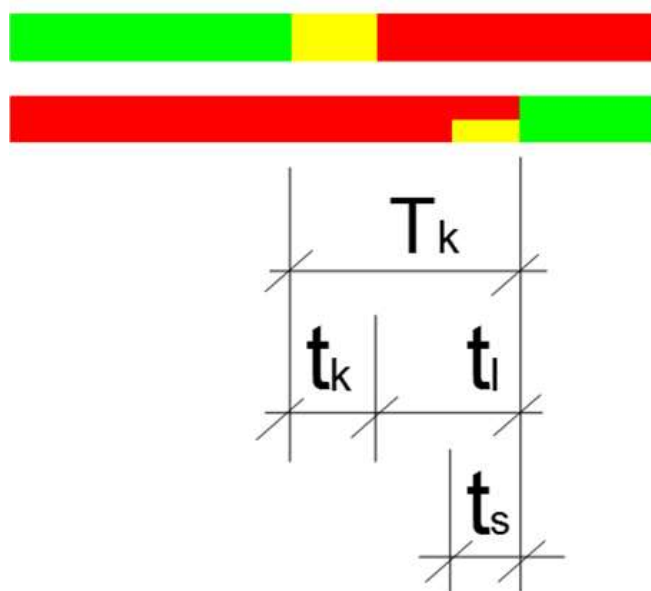
Käsitleva suuna ning ristmiku valiku põhjuseks, uuritava ristmiku tipptunni määramiseks on asjaolu, kus õhtusel ajal kõige koormatuid liiklus on suunatud linnast välja ning suurim osa voogust läbib esialgu Tehnika – Endla – Luise ristmik, kus omakorda oli määratud probleemne koht liikluses.

Töö käik on järgmine:

1. Antud ristmiku andmete põhjal võib autor kindlaks määrata, millal täpselt (nädal ja nädala päev) esineb kõige tihedam liiklus ööpäeva lõikes. Selleks kasutusele sai võetud aruanne „Ristmiku loendustulemuste aastakokkuvõte nädalate ja päevade lõikes“.
2. Kui oli teada konkreetne päev, millal liiklus on kõige ummistatuim, lõputöö autor järgmise aruanne („Ristmiku ühe päeva loendustulemuste kokkuvõte sõidukiliikide lõikes“) alusel määras täpse tipptunni aja.

2.4 Reguleeritava ristmiku kaitseaegade arvutamine

Kui kahele foorigrupile pole võimalik üheaegselt anda rohelist aega (nn konflikt-suundade foorigrupid), peab nende foorigruppide roheline aja vahel olema siirdetakt või taktid, mis moodustavad kaitseaja (Joonis 17). Kaitseage on selleks, et ühe foorigrupi lubava tule lõpul stoppjoone ületanud sõiduk jõuaks ristmiku kriitiliselt alalt lahkuda enne, kui teise foorigrupi roheline aja algul liikumist alustanud sõiduk jõuab ristmiku konfliktalasse, kus võib toimuda sõidukitevaheline kokkupõrge [11].



Joonis 17. Fooriobjekti kaitseaja skeem [23]

Kaitseaeg (T_k) arvutatakse valemiga (2) [11]:

$$T_k = t_k + t_l - t_s, \quad (2)$$

kus t_k – kollase märgutule kestus, s;

t_l – lahkumisaeg, s;

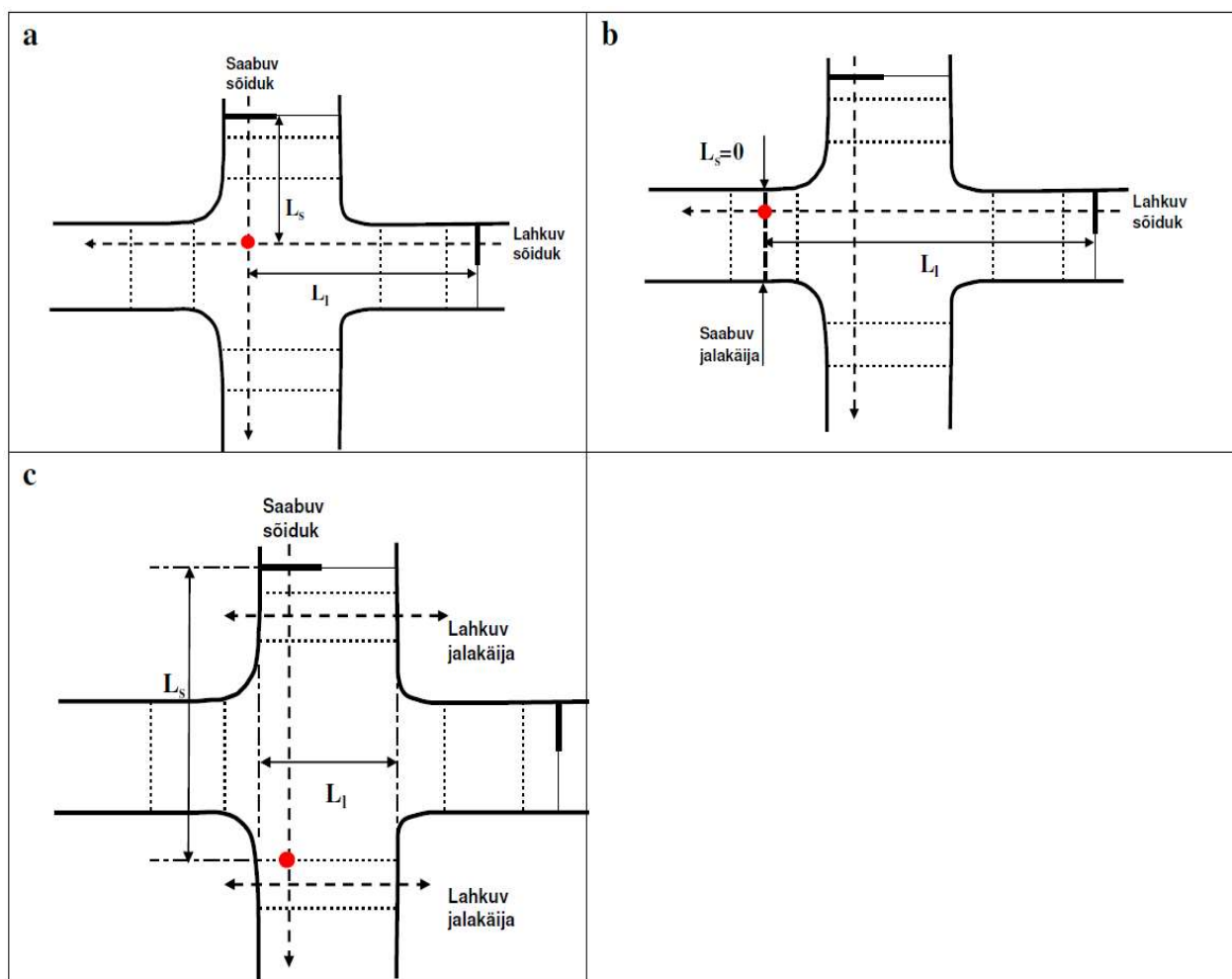
t_s – saabumisaeg, s.

Kollase märgutule (t_k) kestus on soovitatav valida asulas ühtselt 3 s [11].

2.4.1 Saabumis- ja lahkumisaeg

Joonisel (Joonis 18) on näha eriliste konfliktide variandid:

- lahkuv sõiduk – saabuv sõiduk;
- lahkuv sõiduk – saabuv jalakäija;
- lahkuv jalakäija – saabuv sõiduk.



Joonis 18. Konfliktide variandid ristmikul, kus L_s – saabumistee, L_l – lahkumistee

2.4.2 Lahkumisaeg

Mootorsõiduki lahkumisaeg (t_l) arvutatakse valemiga (3) [11]:

$$t_l = \frac{(L_l + 6)}{v_l}, \quad (3)$$

kus L_l – lahkumisteedekonna pikkus, m;

v_l – lahkumiskiirus, m/s.

Mootorsõidukite lahkumiskiiruseks võetakse üldiselt 8 m/s ($v = 30$ km/h). Ristmikul, kus on selge sõiduradade märgistus ja hea nähtavus, võib lahkumiskiiruseks võtta ka 10 m/s ($v = 36$ km/h).

Jalakäijate lahkumiskiiruseks on otstarbekas valida 1,2 m/s. Pikkadel ülekäiguradadel (üle 15 m) võib lahkumiskiiruse jalakäijale valida ka suurema, kuid mitte rohkem kui 1,4 m/s. Rohke jalakäijaliiklusega ülekäiguradadel või neil, mida kasutavad lapsed või vanurid, on suurim lahkumiskiirus 1,2 m/s [11].

2.4.3 Saabumisaeg

Saabumisaeg (t_s) arvutatakse valemiga (4) [11]:

$$t_s = \frac{L_s}{v_s}, \quad (4)$$

kus: L_s – saabumisteedekonna pikkus, m;

v_s – lahkumiskiirus, m/s.

Saabumiskiirus sõltub ristmikul kehtivast kiiruspiirangust järgmiselt (Tabel 3):

Tabel 3. Saabumiskiiruse sõltuvus kiirusepiirangust

Kiirusepiirang, km/h	Saabumiskiirus, m/s
50	11
60	13
70	16

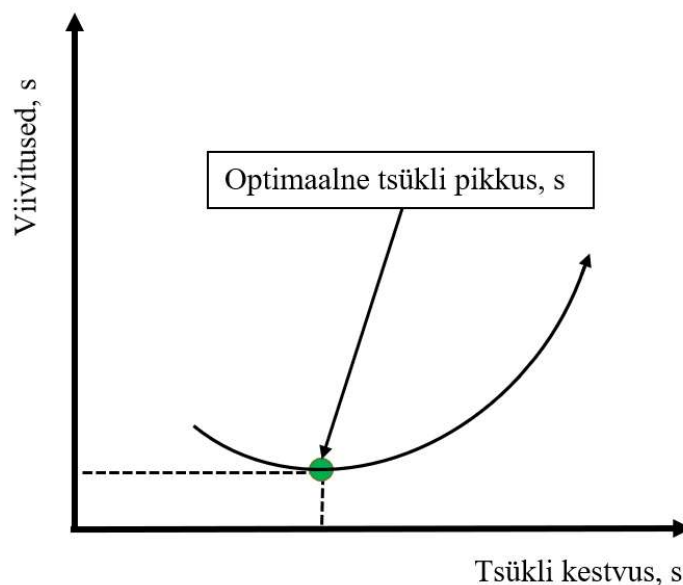
2.4.4 Arvutuse etapid

1. ristmikujoonisele kantakse sõidutrajektoord;
2. tehakse kindlaks konfliktsuunad ja -tsoonid;
3. mõõdetakse lahkumis- ja saabumisteede pikkused;
4. valitakse liiklusvoogude lahkumis- ja saabumiskiirused;

5. arvutatakse kaitseaegade pikkused;
6. foorigruppide vahelised kaitseajad kantakse maatriksisse;
7. valitakse taktijärjestuse variandid;
8. sooritatakse variantide valik eelsusel, et kogu töötsükli vältel oleks kaitseaegade summa minimaalne.

2.5 Optimaalse fooritsükli arvutamine

Kui on teada tsükli kogupikkust, saame arvutada selle kogupikkusest kollase ja punase perioodi pikkuse ja saada roheline signaali kuvamiseks saadaoleva koguaja. Tõhusus eeldab, et tsükli pikkus peaks olema piisavalt pikk, et täita kõiki kriitilisi liigutusi, kuid mitte kauem. Kui tsükkel on liiga lühike, toimub tunni jooksul nii palju faasimuutusi, et nende muutuste tõttu kaotatud aeg on kasutatava roheline ajaga võrreldes kõrge. Kuid kui tsükkel on liiga pikk, pikeneb viivitus, kuna sõidukid ootavad ristmikul väljumiseks oma järjekorda. Joonisel (Joonis 19) on selle nähtuse graafiline kujutis.



Joonis 19. Viivituse sõltuvus tsükli pikkusest

Selle optimeerimisprobleemi lahendamiseks on juba välja töötatud mitu meetodit, kuid Webster'i võrrand on kõige levinum. Webster'i võrrand, mis minimeerib ristumise viivitust, annab optimaalse tsükli pikkuse funktsioonina kaotatud aegadest ja kriitilistest voolusuhetest. Paljud juhendid kasutavad aluseks antud võrrandit ja teevad ainult väikeseid muudatusi, et need sobiksid nende eesmärkidega [24]. Webster'i võrrand (5) on näidatud allpool.

$$C_o = \frac{1,5L + 5}{1 - \sum (V/s)}, \quad (5)$$

kus C_o – optimaalne tsükli pikkus, s;

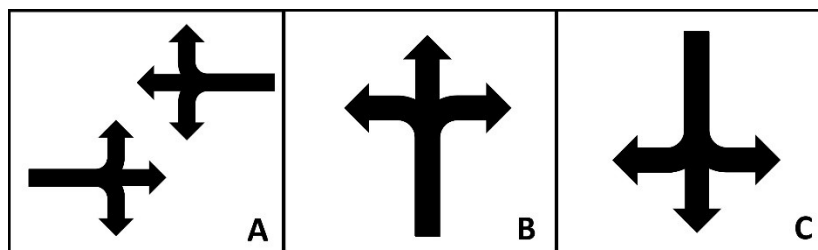
L – kõigi faaside kaotatud aja summa (tavaliselt võetakse kaitseaegade summana), s;

V/s – kriitiliste suundade liiklussageduste ja küllastusvoolu suhe.

2.6 Foorifaasid

Foorjuhtimise projekteerimise keskseim osa on fooriprogrammi (taktijaotuse või lülitusgraafiku) projekteerimine. Tavaliselt võimaldab suurem taktide arv ristmikul sujuvamalt läbida rohkem liiklussuundi, mis parandab sõidu ohutust ja mugavust. Siiski suureneb suurema taktide arvuga ka siirdetaktidele kuluv aeg, mille tulemusel võib ristmiku kogu läbilaskvus veidi väheneda. [1].

Diplomitöös vaadeldava ristmiku foorijuhtimise projekteerimisel pakub autor 3-taktide jaotuse skeemi (Joonis 20), mis sarnaneb olemasoleva skeemiga antud ristmikul. Antud skeemi rakendamisel on arvestatud standardi [1] soovitustega ning samuti tagatud kõik võimalikud liikumis manöövrid. Käsitleva skeemi järgi esimesel A-taktil liiguvad Endla ja Luise tänavate suunad, teisel B-taktil liigub suund Tehnika tänaval (AleCoq Arena poolt) ja kolmandal C-taktil Tehnika suund (Paldiski maantee poolt). Konfliktis olevad omavahel A-taktis pöörded vasakule ja tagasipöörded Endla ja Luise suundadest niisuguse skeemi korral teostatakse teise ja kolmanda taktide ajal ristmiku keskmisest osast, kus on selleks eraldi ettenähtud puhvertsoonid.



Joonis 20. Kolmetaktiline foorireguleerimine (autori poolt koostatud)

Fooriprogrammi kavandamisel on esmalt vaja kindlaks määrata sõidusuunad ja jalakäijate ületusteed, kus on võimalik liikuda samal ajal. Seejärel tuleb tuvastada sõidusuunad ja ülekäigurajad, kus võib esineda konflikte erinevate liikumissuundade vahel (näiteks parempöörde konflikt jalakäijatega) [1]. Mudeli koostamisel olid arvestatud kõik konfliktis olevad liiklusvood nii sõiduk – sõiduk, kui ka sõiduk – jalakäija paarides.

2.7 Rohelise tule kestus

2.7.1 Sõidukid

Rohelise tule kestus iga manöövri jaoks sõltub liiklussagedusest ühele sõidurajale, kogu tsükli kestusest ja sõidukitevahelistest tühikutest. Seda leitakse valemiga (6) [11]:

$$t_r = t_0 - q_i + \frac{T \times m_i \times q_i}{3600}, \quad (6)$$

kus t_r – liiklusvoo tarbeks vajalik vähim roheline aeg, s;

t_0 – esimese sõiduki viivitus ehk aeg rohelise tule süttimise momendist kuni sõiduki liikuma hakkamiseni ja see võetakse võrdseks teede projekteerimise normides rakendatava keskmise reageerimisajaga $t_0 = 2$ s;

T – foori tsükli kestus, s;

m_i – ühe sõidurada liiklussagedus antud suunal, sa/t;

q_i - keskmine autode vaheline intervall, s.

Vähim autode vaheline intervall on 2 s, kuid väikese raadiusega pöörete sooritamisel, on otstarbekas seda suurendada järgmiselt (Tabel 4):

Tabel 4. Autode vaheline intervalli sõltuvus pöörderaadiusest

Pöörderaadius, m	Autode vaheline intervall, s
6-15	2,3
16-25	2,2
26-35	2,1

Selle valemi abil leitud rohelise tule kestus võib tagada läbilaskvuse taseme $z = 1$. Lähtuvalt standardilt EVS 843:2016 punkt 7.2.5 (4) - Läbilaskvusarvutused 30. tipptunni liiklussagedustega peavad tagama läbilaskvuse taseme $z \leq 1$ [1]. See tähendab, et antud valemiga arvutatud rohelise tule kestused vastavad standardile, kuid see näitab ka, et läbilaskvuse ressurss on täielikult ära kasutatud. Seetõttu on alati soovitatav võtta arvutatud roheliste tulede kestused kriitilistes suundades 20-25% võrra pikemad. Samuti tuleb märkida, et rohelise tule kestuse arvutamisel tuleb täiendavalt arvestada, et vähim normaalne rohelise tule kestus on 8 sekundit ja vähim erandlik rohelise tule kestus on 6 sekundit [23].

Rohelise tule kestuste määramisel on vaja arvestada, et oleks rahuldatud järgmine tingimus (7):

$$T = \sum t_{ri} + \sum T_k, \quad (7)$$

kus T – foori tsükli kestus, s;

$\sum t_{ri}$ – kõigi tsükli kestel esinevate rohelise fooritule aegade summa, s;

$\sum T_k$ – kõigi tsükli kestel rakendatavate kaitseaegade summa, s.

2.7.2 Jalakäijad

Jalakäijatele määratakse minimaalne roheline aeg, arvestades nõuet, et jalakäija, kes on oodanud rohelist foorituld, peaks suutma ületada kogu sõidutee või, kui olemas, jõuda vähemalt ohutussaareni, kui muud tingimused ei võimalda kogu sõidutee ületamist. Samal ajal tuleb võtta arvesse tänava ületajate arvu ja vajalikke kaitseaegu, et tagada ohutus ka eakatele ja liikumispuuetega inimestele [1].

Jalakäijate minimaalse rohelise tule kestuse antud töö autor arvutab kasutades HCM2000 metoodikat ja valemi (8) [25], tingimusel, et ülekäigurada laius ületab 3 m:

$$G_p = 3,2 + \frac{L}{S_p} + \left(0,81 \times \frac{N_{ped}}{W_e}\right), \quad (8)$$

kus 3,2 – jalakäijate viivitused rohelise tule süttimisel, s;

L – ülekäigurada pikkis, m;

S_p – keskmine jalakäijate kiirus, m/s;

N_{ped} – jalakäijate maht rohelise tule keskuse ajal, tk;

W_e – ülekäigurada efektiivne laius, m;

2.8 Tulemuste hindamise mõõdikud

Vastavalt standardile [1] liiklustingimusi iseloomustavad kvantitatiivsed tegurid on:

- linna kiirteel sõidukite tihedus, sa/km;
- teekonna kiirus, km/h;
- tipptunni arvutuslik liiklussagedus, sa/h;
- läbilaskvuse kasutustase;
- ooteaeg ristmikel, s (eraldi mootorsõidukitele, jalgratturitele ja jalakäijatele);

Käesoleva lõputöö autor vaatamata standardis ette toodud mõõdikutele, kasutab tulemuste hindamiseks teenindustaseme näitajad, mis omakorda sisaldavad endas teekonna kiiruse ja sõidukite tiheduse kombineeritud näitajad. Samuti rakendusele sai võetud ühendusaja mõõdik, mis

reprodutseerib liiklussageduse, kasutustaseme läbilaskevõime ning sõidukiiruse mõõdikute väärtusi. Diplomitöös autor võrdleb samuti ka rahalisi näitajaid, mis omakorda peegeldavad muutuste sotsiaalset ja majanduslikku mõju, vaadeldavale ristmikule.

2.8.1 Teenindustase (LOS)

Teenindustase (*level of service, LOS*) on kindlatele kriteeriumitele tuginev sõidu- ja liiklusolude hinnang, mis väljendab tee kasutaja liikumismugavust ja -tingimusi. Väljendub tasemetena A, B, C, D, E, F [1]. Põhi- ja jaotusmagistraali teenindustaseme määrab keskmine sõidukiirus (Tabel 5). Sõltuvalt kiiruspiirangust jagatakse tänavad kolme liiki:

- I – kehtib asula üldine kiiruspiirang;
- II – kehtib asula üldisest kiiruspiirangust kõrgem kiiruspiirang;
- III – kehtib asula üldisest kiiruspiirangust madalam kiiruspiirang [1].

Tabel 5. Teenindustase sõltuvus kiirusest [1]

Näitaja	Kiirusepiirangu tase		
	I	II	III
Kiirusepiirang, km/h	50	60-70	30-40
Vaba liiklusvoo keskmine kiirus, km/h	45	60	30
Teenindustase	Keskmine sõidukiirus, km/h		
A	≥ 40	≥ 55	≥ 30
B	30-40	45-55	25-30
C	20-30	35-45	20-25
D	15-20	30-35	15-20
E	10-15	20-30	10-15
F	< 10	< 20	< 10

2.8.2 Ühendusaeg

Ühendusaeg on oluline mõõdik ristmiku töö planeerimisel, eriti liiklusvoo sujuvuse ja ristmiku tõhususe seisukohast. Planeerides optimaalset ühendusaega, saab vähendada sõidukite ooteaega ja seeläbi suurendada ristmiku tõhusust. Samuti kiir ühendusaeg aitab vältida liiklusummikuid ja tagab, et liiklusvoolud saavad läbida ristmiku kiiresti ja efektiivselt. See on eriti oluline tiptunnil ja suurima liiklussageduse perioodidel. Optimeeritud ühendusaeg võib aidata vähendada heitgaase ja parandada energiaefektiivsust, kuna sõidukid ei pea ootama ebatõhusate liiklusreguleerimissüsteemide tõttu.

Antud diplomitöös kasutab autor tulemuste hindamisel erilisi teelõike (Tabel 6).

Tabel 6. Hinnatavad teelõigud ning nende pikkused, kus: *TP* – tagasipööre; *PP* – parem pööre; *OS* – otse sõit; *VP* – vasak pööre; *LSS* – linna sisenev suund; *LVS* – linnast väljuv suund

nr	Ühenduslõik	Distsants, m
1	Endla LSS – TP Endla LVS	560,0
2	Endla LSS – PP Tehnika AleCoq	678,7
3	Endla LSS – OS Endla LSS	1083,6
4	Endla LSS – VP Tehnika põhja poole	1019,0
5	Endla LSS – PP Suur Ameerika	1216,8
6	Tehnika põhja – PP Endla LVS	789,2
7	Tehnika põhja – OS Tehnika AleCoq	894,8
8	Tehnika põhja – VP Endla LSS	1469,1
9	Tehnika põhja – VP Suur Ameerika LSS	1602,4
10	Tehnika AleCoq – PP Suur Ameerika	1737,4
11	Tehnika AleCoq – PP Endla LSS	1604,4
12	Tehnika AleCoq – VP Endla LVS	1109,6
13	Tehnika AleCoq – OS Tehnika (põhja)	1568,9
14	Suur-Ameerika LVS – PP Endla LSS	1173,6
15	Suur-Ameerika LVS – VP Tehnika AleCoq	1415,4
16	Suur-Ameerika LVS – PP Tehnika põhja	1561,8
17	Suur-Ameerika LVS – OS Endla LVS	1144,5
18	Luisse LVS – PP Tehnika põhja	1302,3
19	Luisse LVS – VP Tehnika AleCoq	1155,8
20	Luisse LVS – OS Endla LVS	884,8
21	Toom-Kuninga – PP Suur-Ameerika LSS	525,1
22	Toom-Kuninga – VP Tehnika AleCoq	1260,0
23	Toom-Kuninga – VP Endla LVS	989,2
24	Toom-Kuninga – VP Tehnika Põhja	1406,4

Eriliste stsenaariumite modelleerimisel saame võrrelda, kuidas muutub ühendusaeg erilistes tingimustes. Võrdlemisel kasutatakse põhjana vabavoolu tulemused. *Free-flow conditions* (vabavoolu tingimused) on seisund, kus liiklus liigub läbi teeinfrastruktuuri ilma oluliste takistusteta

või ummikuteta. See tähendab, et sõidukid liiguvad sujuvalt ja kiiresti, järgides teatud kiirusepiiranguid, kuid ilma tõsiste liikluspiiranguteta, nagu pikad ooteajad ristmikel või tee kitsendustes. Vaba liikluse tingimused on olulised, kui hinnatakse teeinfrastruktuuri tõhusust ja võimekust. Kui liiklus on vaba ja sõidukid liiguvad optimaalselt, suureneb tee läbilaskevõime, mis viib parema liiklusvoo juhtimiseni ning vähendab ummikuid ja ooteaegu. See on oluline eesmärk infrastruktuuri planeerimisel ja haldamisel, et tagada liiklusohutus ja tõhusus [26].

2.8.3 Majanduslik efektiivsus

Erilised muudatused foorijuhtimissüsteemis antud ristmikul võivad kaasa tuua mitmeid majanduslikke eeliseid ja efektiivsuse parandamise mõjusid. Käesolevas diplomitöös pakub autor innovatiivse hindamisviisi, mis tugineb ajalisele kokkuhoiule. Sujuvam liiklusvoog ja vähim ooteaeg tähendavad, et sõidukid kulutavad vähem aega tee peal, järelikult viimane toob kaasa aegsäästu nii äri- kui ka erakasutajatele, mis võib omakorda positiivselt mõjutada üldist majanduslikku tootlikkust. Teisiti öeldes, kui teede infrastruktuur toimib hästi, sõidukite ajalised viivitused langevad, mis väljendatakse positiivselt isikute saamata jäänud tulus, ehk kasus, mida isik oleks vastavalt asjaoludele tõenäoliselt saanud (inkrementaalne kulu).

Vissim tarkvara funktsioon aitab hinnata modelleeritud transpordisüsteemi võrgu tuginedes parameetritele „viivitused“ (*delay total*). Antud näitaja põhjal käesoleva diplomitöö autor saab vajalikud andmed (väljendatud sekundites), mis iseloomustavad kogu mudeli tõhusust, mille alusel võib võrrelda nii transpordivahendite viivitused eriliste stsenaariumite rakendamisel, kui ka sellest saamata jäänud tulu. Ajalist kokkuhoiu on defineeritud valemiga (9), kus väljendatakse kogu süsteemi rahalist erinevust olemasolevas olukorras (stsenaarium 0) ja kavandatud tingimustes (teised stsenaariumid):

$$\Delta T = T_o - T_p , \quad (9)$$

kus ΔT – olemasoleva olukorra ja projekti lahenduse rahaline vahe, euro;

T_o – saamata jäänud tulu olemasolevas olukorras, euro;

T_p – saamata jäänud tulu projekteeritud variandis, euro.

Kui tulemus on negatiivne, tähendab see, et tegevused ei põhjusta kulude vähenemist (nii ajalist, kui ka rahalist), vaid kasvu ja vastupidi.

Parema mõistmise ja piltlikkuse jaoks pakub diplomitöö autor väljendada modelleeritud süsteemis kaotatud ajakulu rahaühikutes. Selleks defineeritakse valemi (10), mida rakendatakse nii baasstsenaariumi (T_o), kui ka teiste stsenaariumite (T_p) jaoks:

$$T_o = t_o \times M, \quad (10)$$

kus T_o – kaotatud ajakulu rahaühikutes, euro;
 t_o – ajalised viivitused kogu süsteemis, s;
 M – ooteaja maksumus, euro/s.

Ooteaja maksumuse arvutamisel lõputöö autor lähtub Tallinna linnaelanike keskmisest brutopalgast 2023 a. II kvartalis, mille väärtus hetkeseisuga oli 2093 eurot [27]. Autor leidis ooteaja väärtust ümber arvutades viimast, maksumuses inimese kohta sekundides. Selleks autor toob esile järgmise valemi (11):

$$M = P \div t_s, \quad (11)$$

kus M – ooteaja maksumus, euro/s;
 P – keskmine tallinna elaniku kuupalk, euro;
 t_s – kuu töökoormus, s.

Ooteaja maksumus vastavalt valemile (11) on:

$$M = 2093 \div 576000 = 0,0036, \text{ euro/s.}$$

Tulemusena arvutatakse ja võrreldakse, kas rakendatud stsenaarium mõjutab positiivselt või negatiivselt liiklusolukorrale aasta lõikes. Pakutud lähenemisviis hindamisele on väga lihtsustatud. Antud juhul arvesse võetakse, et aastas 2023 on 254 tööpäeva ning iga öhtune tiptund on sarnane. Meetod ei arvesta erilised faktorid nagu: süsteemi kasutajate erisused (rasketehnika, bussid), sotsiaalsed erinevused (madalama sissetuleku inimesed või töötu), lähte- ja sihtpunkti omadused, kütusekulud ja nii edasi. Hetkel Eestis ei eksisteeri täpse mudeli majanduslikku efektiivsuse hindamiseks. Suurbritannias niisuguse analüüsi jaoks rakendatakse hindamis- ja modelleerimisväärtuste juhend (*TAG data book*) [28].

2.9 Kalibreerimine

Mudeli loomisel ja kalibreerimisel arvestab töö autor tabelis (Tabel 7) kirjeldatud parameetrid ning meetmed nende kalibreerimiseks.

Tabel 7. Kalibreerimise parameetrid

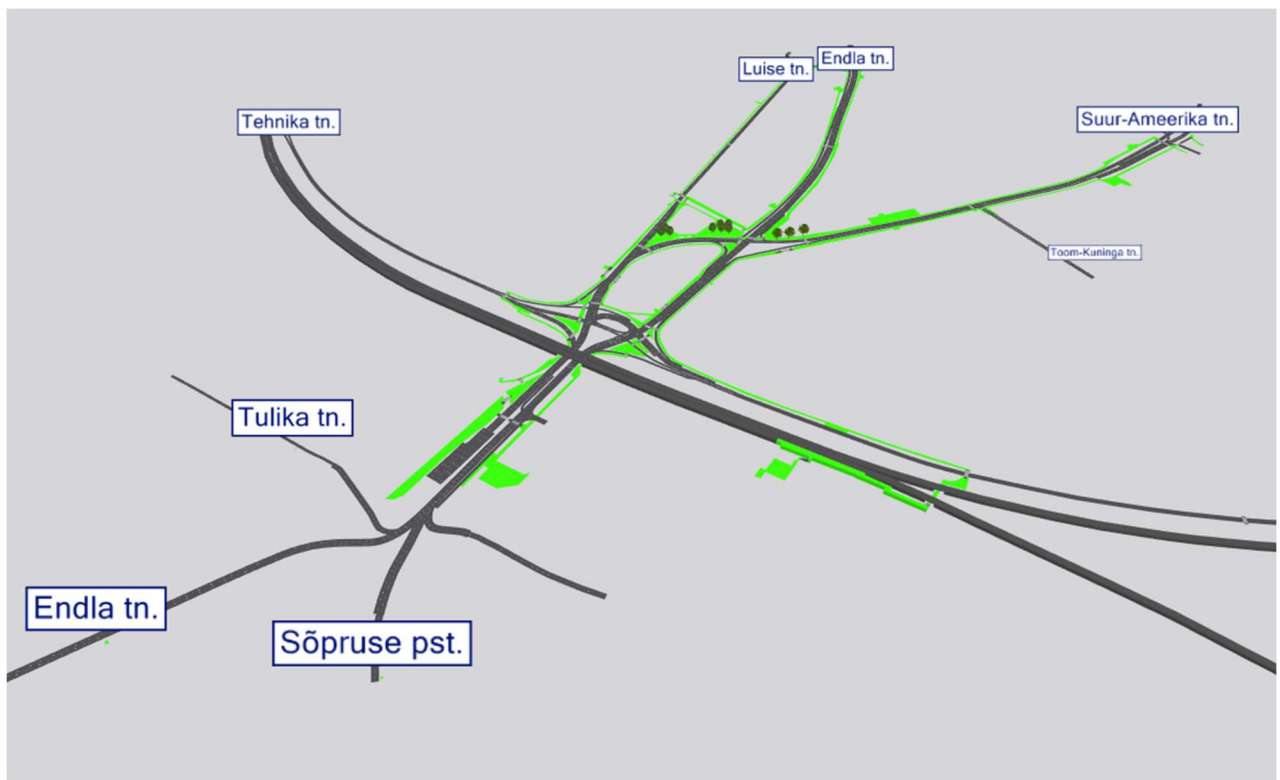
Parameeter	Arvestatav tegur	Kalibreerimise meetod
Liiklusteed ja nende geomeetria	Sõidutee ja sõiduraja laius	Maa-ameti portaal [3]
	Pöörded ja nende raadiused	Maa-ameti portaal [3]
	Liiklussuunad	Andmed vaatlusest
	Teede liigid	Veebileht [2]
	Ülekäigurajad (pikkused ja laiused)	Maa-ameti portaal [3]
	Nähtavuskaugused	Andmed vaatlusest
	Alandatud kiiruse alad	Andmed vaatlusest
Liikluskorraldusvahendid	Liikluse reguleerivad märgid	Andmed vaatlusest
	Fooriobjektide paigaldus	Maa-ameti portaal [3]
	Teemärgistus	Andmed vaatlusest
Konflikti tsoonid	Sõidueesõiguse prioriteedid	Andmed vaatlusest
	Juhtide käitumised	Andmed vaatlusest
Foorijuhtimine	Fooriobjektid	Tallinna Transpordiamet
	Foorigrupid	Tallinna Transpordiamet
	Fooritaktid ja -tsüklid	Tallinna Transpordiamet
Sõidukid ja jalakäijad	Sõidukite ja jalakäijate maht	Andmed vaatlusest, seire [21]
	Raskeveokite osakaal	Seire [21]
	Marsruudid	Andmed vaatlusest, seire [21]
	Kiirused	Mõõtmised kohapeal
	Käitumine	Andmed vaatlusest
Ühistransport	Ühistranspordirajad ja peatused	https://transport.tallinn.ee/
	Marsruudid	https://transport.tallinn.ee/
	Ajagraafikud	https://transport.tallinn.ee/
Simuleerimine	Periood	Vissim kasutusjuhend [28]
	Juhuslik seeme	Vissim kasutusjuhend [28]
	Jooksude arv	Vissim kasutusjuhend [28]

2.10 Stsenaariumid

2.10.1 Stsenaarium 0 – baasstsenaarium

Baasstsenaariumis kasutatakse kalibreeritud ja valideeritud piirkonna liikluse mudeli (Joonis 21). Mudel peegeldab olemasoleva olukorra ning täielikul määral vastab tõele. Selle stsenaariumi võetakse aluseks teiste stsenaariumite tulemuste võrdlemisel. Diplomitöö autor lähtub analüüsil järgmisest väidest – kui teised välja mõeldud ning rakendatud stsenaariumid annavad paremad tulemused, siis saadatud tulemisi saab peeta heaks sisendiks olemasoleva olukorra parandamiseks.

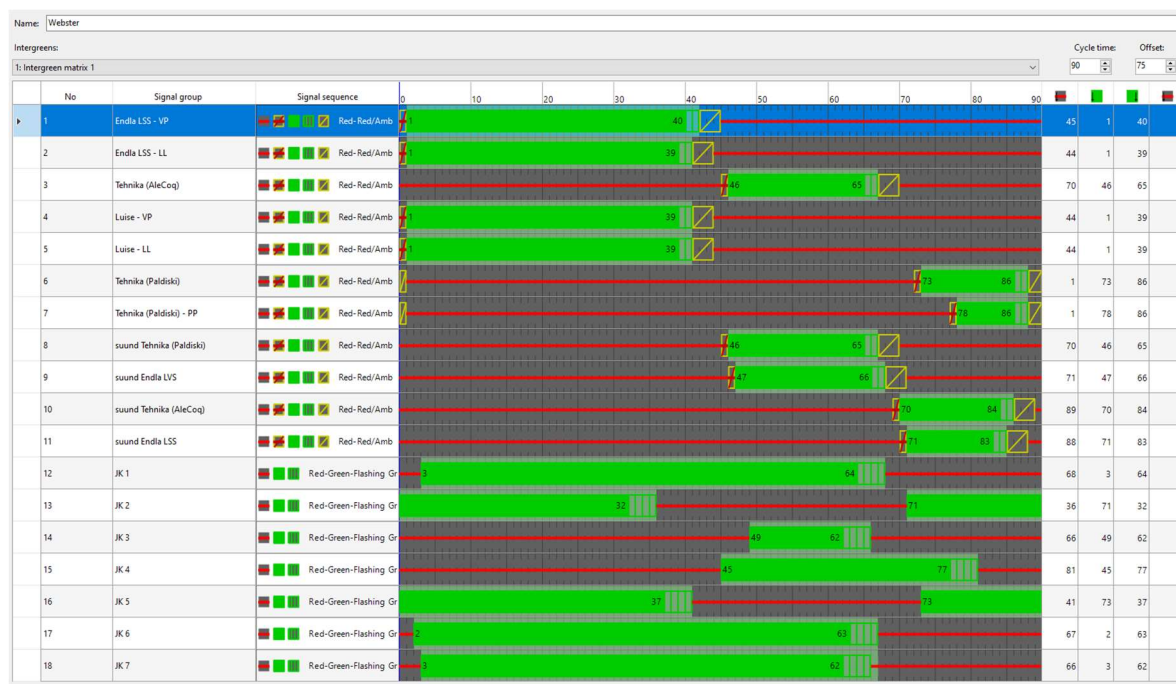
Tulemuste võrdlemiseks kasutab autor edaspidi lõikes 2.8 eelmainitud mõõdikud.



Joonis 21. Baasstsenaariumi skeem (kuvatõmmis Vissim tarkvarast)

2.10.2 Stsenaarium 1 – Webster'i ja T.Metsvahi arvutuse metoodika

Esimeses pakutavas stsenaariumis kasutab diplomitöö autor fooriprogrammi koostamiseks eelmistes peatükkides (2.5 ja 2.7) saadud andmed optimaalse fooritsükli ja rohelise tule kestuste kohta. Kasutades koostatud kaitseaja maatriksi oli loodud uus fooriprogramm, mis on esitatud joonisel (Joonis 22).



Joonis 22. Stsenariumi 1 fooriprogramm (kuvatõmmis Vissim tarkvarast)

Uue fooriprogrammi rakendatakse analüüsitava ristmikul ning püütakse aru saada, kas see mõjutab positiivselt või negatiivselt nii ristmiku liiklusele, kui ka kogu piirkonna liiklusolukorrale.

Võrreldes olemasoleva fooriprogrammiga (Joonis 14) pakutav lahendus annab rohkem rohelist aega sellele suunale (Tehnika tn. AleCoq Arena poolt), kus tekib tipptunniajal ummik. Lähtudes arvutustest ning mõõdetud liiklussagedustest leiab diplomitöö autor, et eelmainitud suuna (foorirühmad 3, 8 ja 9 (Joonis 22)) sujuva liikluse tagamise jaoks on vajalik vähemalt 19 s (Tabel 10). Programm, mis on rakendatud praegu antud ristmikul, annab sellele suunale vaid 12 s, mis antud juhul puudulik aeg vasakpööret sooritamiseks. Kogu tsükel pikkusega 90 s algab rohelse tulega Endla ja Luisse suundade jaoks (rühmad 1, 2, 4 ja 5), fooritakti lõpus kaks viimast sekundit on roheline vilkuv tuli; vilkuvale rohelisele fooritulele järgneb kollane foorituli, mille pikkus on 3 sekundit. Järgmisel faasil antakse sõiduesõigus Tehnika tänava suunale, mis tuleb AleCoq Arena poolt (rühmad 3, 8 ja 9). Viimasel fooritsükli faasil antakse rohelist tuld Tehnika tänava suunale, mis liigub Paldiski maantee poolt (rühmad 6, 7, 10 ja 11). Antud fooriprogrammis aeg viimase suuna jaoks on viidud miinimumini, sest kogutud andmed liiklusköormuse kohta näitavad, et hetkel kehtiv taktipikkus kestusega 16 s on ebavajalik. Uuel fooriprogrammil see oli vähendatud kuni 12 sekundini. Jalakäijate liikumised gruppides 12-18 tagatud teistest sõidusuundadest konfliktivabalt, ning vastavad arvutatud minimaalsele kestusele (Tabel 11).

2.10.3 Stsenaarium 2 – fooriprogrammi arvutamine, fikseeritud tsükliga

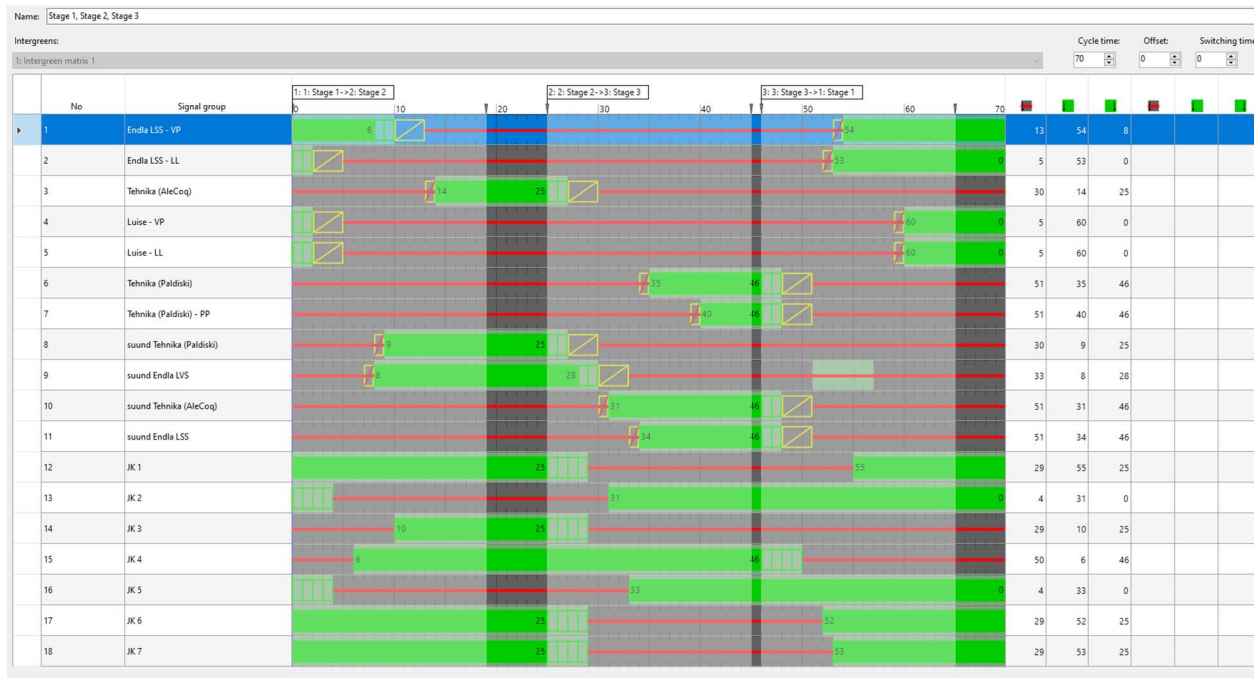
Modelleeritud stsenaariumi signaaljuhtseadme või kõigi signaaljuhtseadmete ajatabeli signaali kvaliteeti saab parandada etapi-põhiste fikseeritud ajajuhtimisseadmete rohelise ajastuse optimeerimisega, mis on sisseehitatud Vissim'i tarkvara sisse.

Selleks loeb Vissim korduvalt kogu võrgu simulatsiooni tulemusi. Kõik juhtseadmed on selles protsessis lukkustatud, välja arvatud valitud signaaljuhtseadmed. Seega eelnevad signaaljuhtseadmed ei oma mõju, modelleeritavale transpordi situatsioonile. Simulatsioonid jätkuvad seni, kuni etappide roheliste aegade muutused viivad voo (maht) suurenemiseni või keskmise sõiduki hilinemise vähenemiseni. Parima tulemusega etapipikkused omavad kõrgeimat transpordivoogu läbilaske väärtusi ja madalaimat keskmist sõiduki hilinemist vaadeldaval ristmikul.

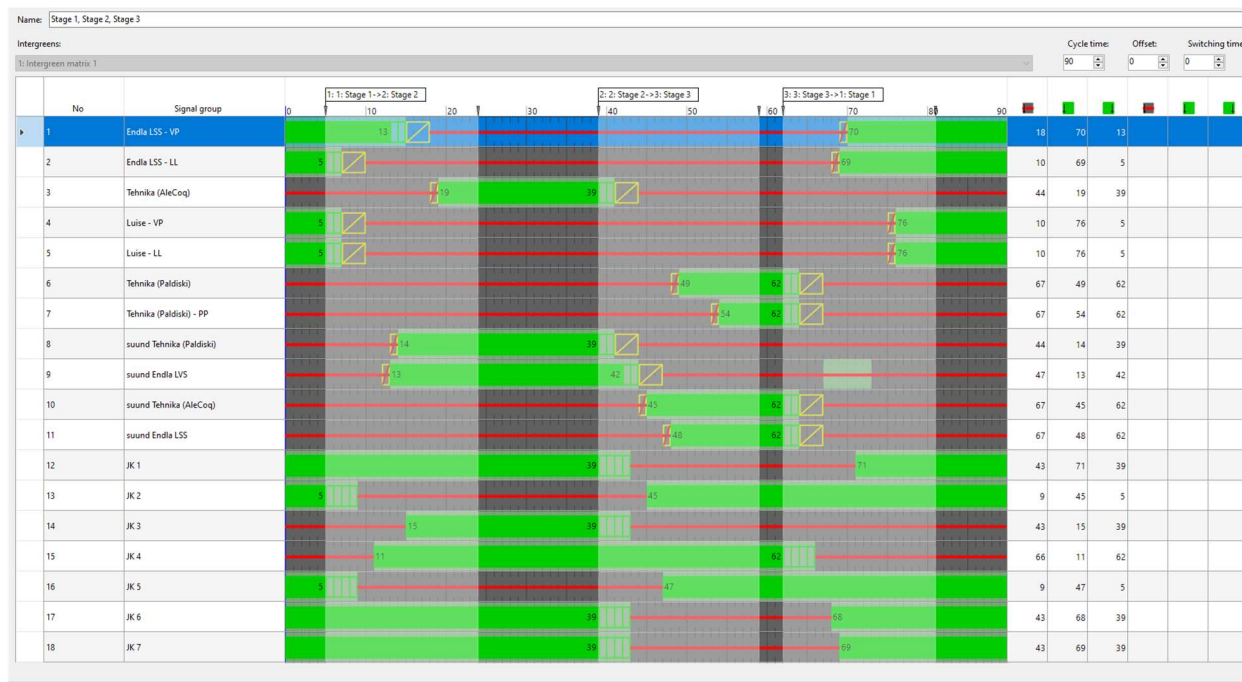
Foorijuhtimise optimeerimise järjestus on järgmine [28]:

1. Keskmise viivitus: tarkvara sisseehitatud algorütm määrab kõigi sõidukite keskmise viivituse, mis on läbinud sõlmede rajad, millel on signaalgruppide signaalipead, kasutades igale signaalgrupile automaatselt loodud sõlme hindamist kogu simulatsiooni ajal;
2. Signaalgrupi optimeerimine: iga etapi jaoks määratakse signaalgrupp, kus sõidukitel on kõige suurem viivitus;
3. Parima etapi valik: valitakse etapp, millel on kõige madalam maksimaalne keskmine viivitus;
4. Halvima etapi valik: valitakse etapp, millel on kõrgeim maksimaalne keskmine viivitus;
5. Aja reguleerimine: parimast etapist vähendatakse üks sekund rohelist aega ja halvima etapi jaoks lisatakse üks sekund rohelist aega;
6. Optimeerimise kriteeriumid: signaali programm loetakse paremaks kui teine, kui üks järgmistest kriteeriumidest on täidetud:
 - a. Kui sõidukite koguarvu voog, mis vaadeldava sõlme läbib simulatsiooni jooksul, on märgatavalt suurenenud vähemalt 25 sõiduki võrra või 10%, kui see on väiksem;
 - b. Kui voog ei ole oluliselt vähenenud rohkem kui 25 sõiduki võrra või 10% võrra ning keskmine viivitus kõikidel sõidukitel on vähenenud;
7. Optimeerimise lõpetamine: optimeerimine lõpetatakse järgmistel juhtudel:
 - a. Kui signaali programm ei parane 10 simulatsiooni jooksul;
 - b. Kui voog väheneb rohkem kui 25% võrreldes parima signaaliprogrammiga;
 - c. Kui keskmine viivitus suureneb rohkem kui 25%.

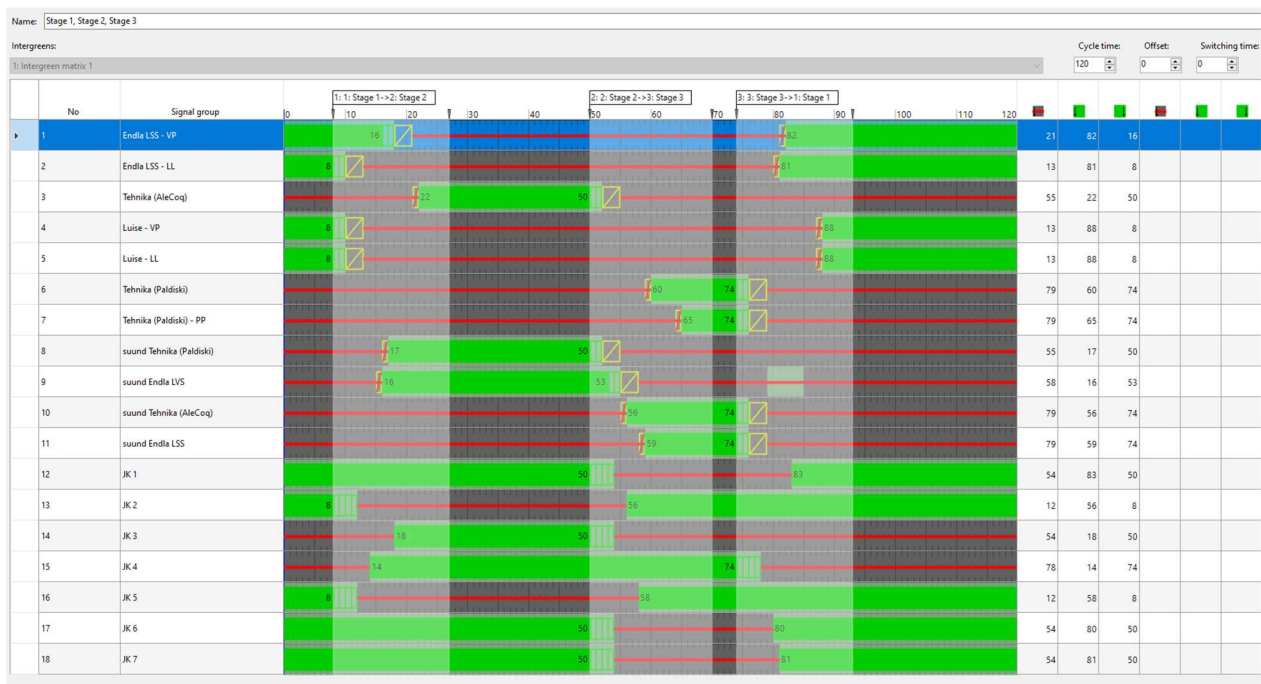
Autor rakendab antud loogikat ning koostab kolm erist fooriprogrammi, mille tsükli pikkused on 70 (Joonis 23), 90 (Joonis 24) ja 120 sekundit (Joonis 25). Niisugune lähenemisviis aitab võrrelda ja hinnata mitmesuguseid variandid liiklusolukorra parandamiseks. Nende fooriprogrammidega koostatud stsenaariume edaspidi käsitleb autor kui 2a, 2b ja 2c.



Joonis 23. Vissim'i abil optimeeritud fooritsükkel 70 s



Joonis 24. Vissim'i abil optimeeritud fooritsükkel 90 s



Joonis 25. Vissim'i abil optimeeritud fooritsükkel 120 s

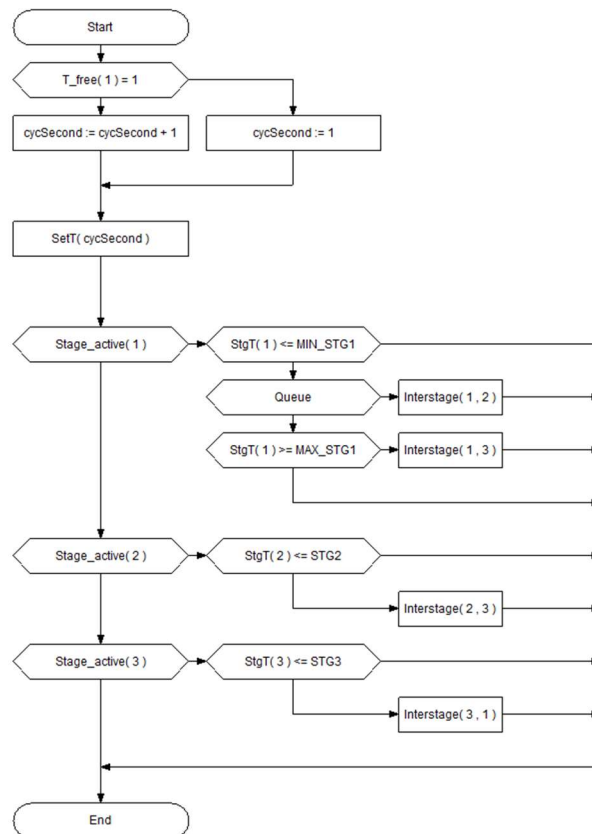
2.10.4 Stsenaarium 3 – kohanduv foorijuhtimissüsteem

Viimases stsenaariumis rakendatakse fooriprogrammi tsükliga, mis on pikkusega 90 s. Antud tsüklipikkus on soovitatav 3-taktilisel foorijuhtimisel [11].

Kõige madalama liiklussagedusega sõidusuunale, mis on antud juhul Tehnika tänava põhja suund, ehk Paldiski maantee poolt, paigaldatakse mudelis andurid - seaded, mis registreerivad nende mõjupiirkonnas liikuvaid või seisvaid sõidukeid [1]. Andurid hakkavad fikseerima liikluskorrumust ning muutuvad fooritulede lülitushetkede sõltuvalt liiklusolukorrast risti- ja ristmikul. Andurite paigutamiskohad on kooskõlas standardiga [1] ning need paigaldatakse 10 m kaugusel stoppjoonest, kuna tegemist on muutuva roheline tule tsükli kestusega.

Samuti eemaldatakse antud sõidusuunalt foorirühm, mis tagab paremat pööret Endla tänavale (linnast väljuv suund). Pakutav lahendus tingitud sellega, et parempöörjate maht on liiga madal ning ei nõua eraldi foorijuhtimist. Käesolev väide on standardiga [1] kooskõlas (par. 8.1.5 Kergliikluse lõikumised mootorsõidukite liiklusvoogudega). Antud liiklusuunal fooriobjekti asemel paigaldatakse eesõigusmärk 221 „Anna teed”, mis kohustab juhti andma teed lõikuval teel ning osutusmärk 544 „Ülekäigurada“, mis tähistab reguleerimata ülekäigurada [9].

Andurite juhtimise jaoks diplomitöö autor loob fooriprogrammi juhtimisloogikat, kasutades VAP-keelt (*Vehicle Actuated Programming*). Koostatud loogika on esitatud joonisel (Joonis 26).



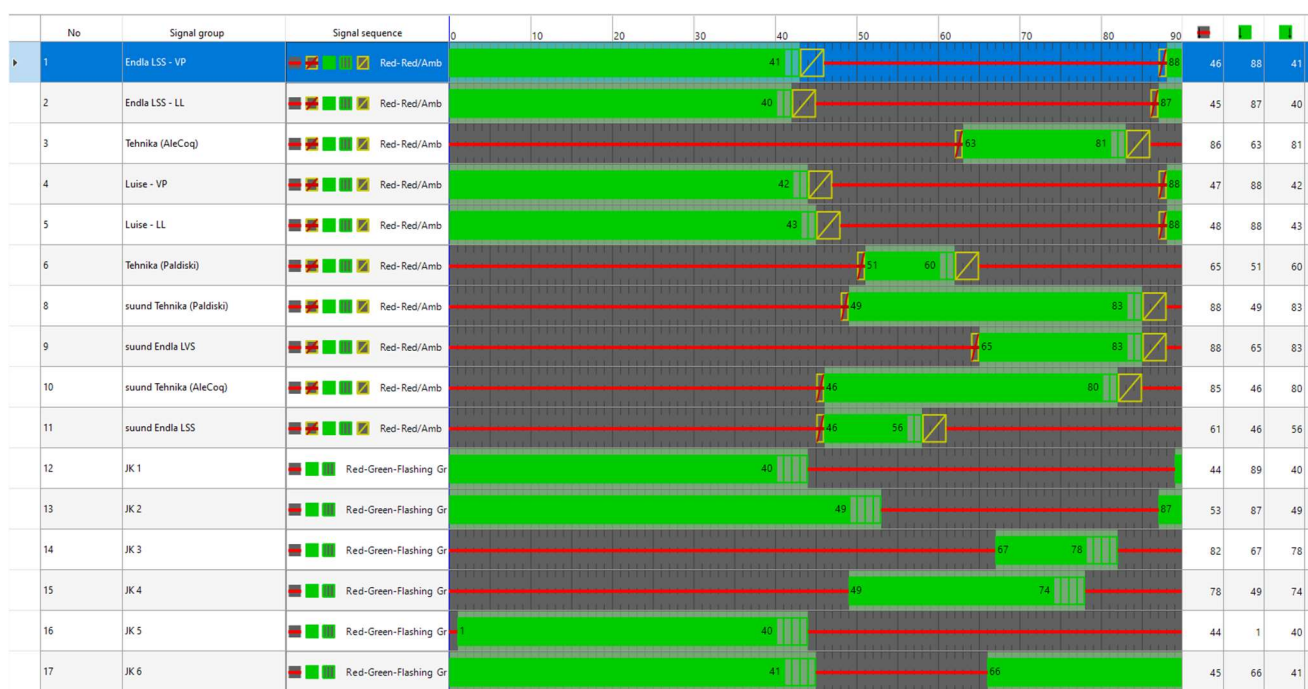
Joonis 26. VAP-keele abil koostatud foorijuhtimise loogika

2.10.5 Stsenaarium 4 – meetodite kombineerimine

Viimase stsenaariumi koostamisel kasutab autor kaks kombineeritud meetodi. "Proov ja viga" on esimene kasutatud meetod, mis on iteratiivne protsess, kus otsuseid tehakse kogemuste kaudu, katsetatakse ja vajadusel korrigeeritakse. Sensitiivsusanalüüs on teine meetod, mis võimaldab hinnata, kuidas süsteemi tulemusi mõjutavad muutused selle komponentides. See aitab tuvastada kriitilisi elemente ja mõista sügavamalt süsteemi dünaamikat. Mõlema meetodi kombineerimine võimaldab eksperimenteerida uute lahendustega, õppides samal ajal süsteemi toimimise põhimõtteid sensitiivsusanalüüsi abil. See integreeritud lähenemisviis võimaldab paindlikku kohanemist ja sügavat mõistmist süsteemi täiustamisel. Koostatud matemaatiline mudel võimaldab jälgida, kuidas sooritatud muudatused fooriprogrammis mõjutavad kogu süsteemi. Käsitlev vaatlus aitab reaalajas kontrollida, kas ümberkorraldus avaldab positiivse või negatiivse mõju mudeli toimimisele.

Niisuguse lähenemisviisi kasutades oli koostatud uus fooriprogramm kestusega 90 s. Programmi põhjaks oli võetud olemasolev kava. Muutused olid sooritatud niimoodi, et sõidusuunale Tehnika tänava poolt, kus nõudlus on kõige suurem, antakse rohkem rohelist aega, ehk 18 s (endine 14 s). Selle muudatuse tõttu väheneb roheline aja kestus Tehnika tänava suuna jaoks, mis tuleb Paldiski

maantee poolt, neli sekundi võrra, ehk kuni 9 sekundini. Vastavalt ristmike läbilaskvuse arvutamise metoodikale [11], vähim normaalne roheline tule kestus on 8 s ja vähim erandlik roheline tule kestus 6 s. Uues fooriprogrammis see tingimus kõige koormamata suuna jaoks on tagatud. Ülejäänud foorigruppide taktipikkused olid säilitatud ning jalakäijate liikumised olid korraldatud sõidusuundadega konfliktivabalt. Uue fooriprogrammi loomisel oli kasutatud autori poolt koostatud siirdetaktide maatriksi. Terve fooriprogrammi võib näha joonisel (Joonis 27).

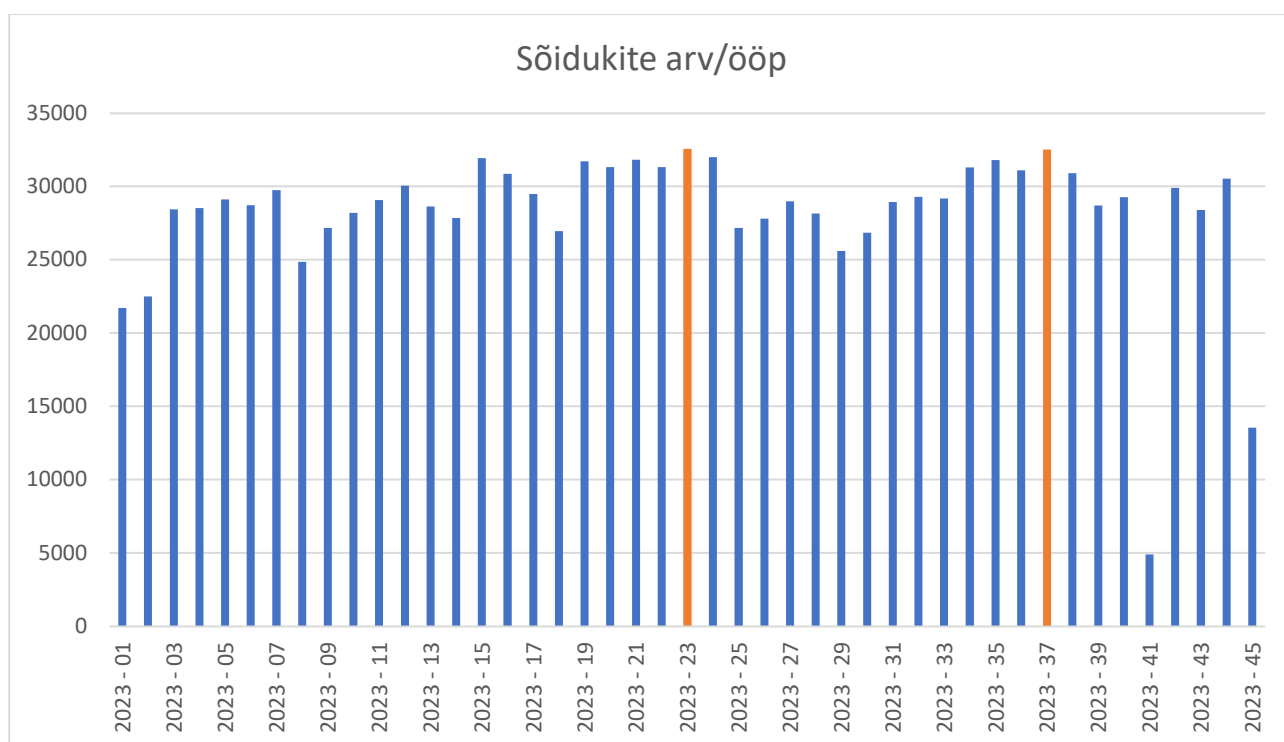


Joonis 27. Stsenariumi 4 fooriprogramm

3 TULEMUSED

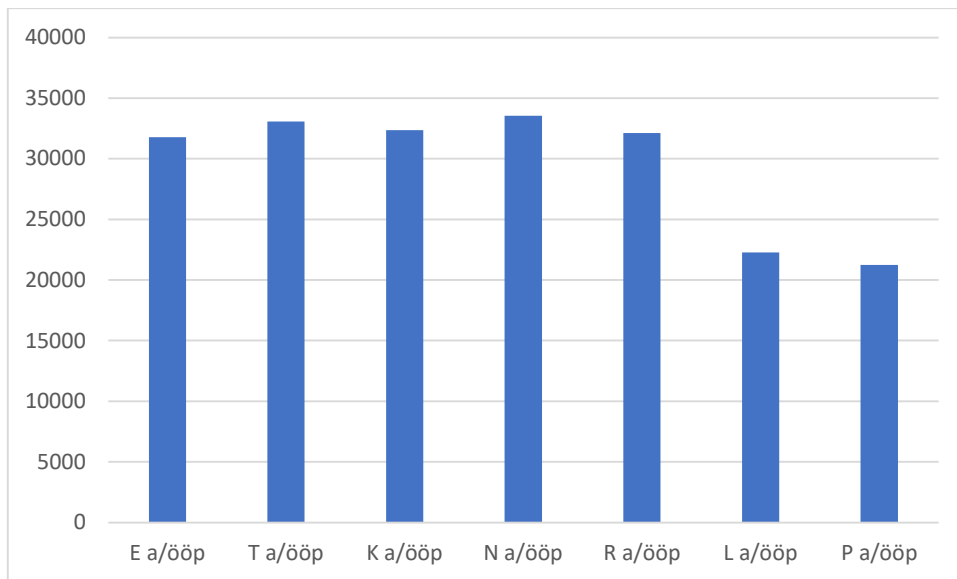
3.1 Tiptund

Vastavalt käesoleva lõputöö metodoloogilisele lähenemisele, mis sai kirjeldatud antud diplomitöös peatükis 2.3, olid saadud järgmised tulemused. Kõige suurem koormus aastas 2023 ristmikul Sõpruse – Endla – Tulika esines 23. ja 37. nädalas (32573 ja 32514 vastavalt) ehk juunis ja septembris (Joonis 28), mis vastab standardile [1].

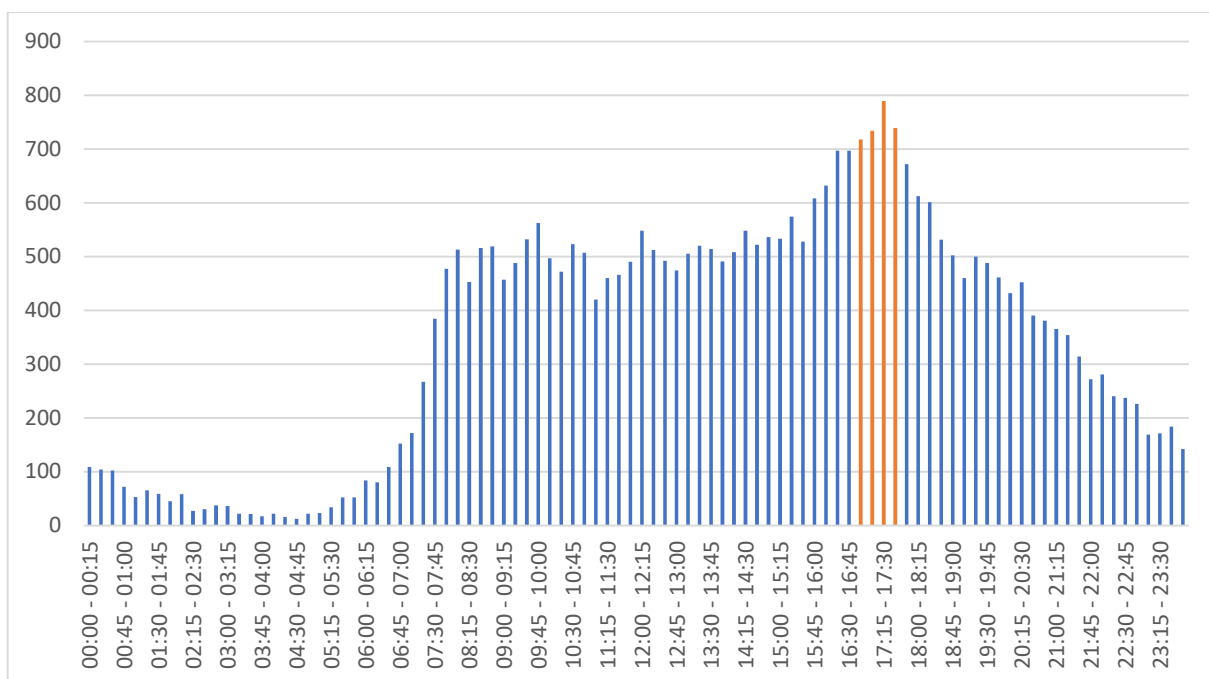


Joonis 28. Ööpäevased sagedused nädalate lõikes

Kõige suuremad liiklusvoolud võime jälgida teisipäeval ja neljapäeval (Joonis 29). Sellest lähtuvalt oli valitud konkreetne kuupäev, millal liiklus ristmikul oli kõige tihedam ning see on 08. juuni 2023 a. Sel neljapäeval läbis antud ristmiku 33546 sõidukit ööpäevas. Selleks, et defineerida tiptunni ajalist perioodi oli koostatud järgmine diagramm (Joonis 30), millest selgub, et tiptund antud ristmikul esineb ajavahemikul 16:45 - 17:45. Tiptunnil läbis antud ristlõiget 2980 sõidukit tunnis. Antud ajaintervall oli võetud põhjuseks edaspidiseks uurimistöoks.



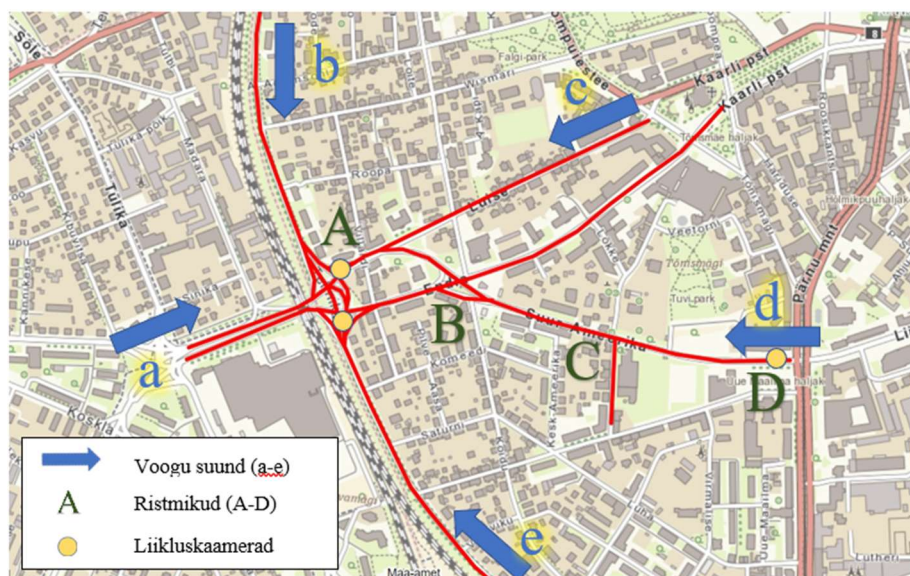
Joonis 29. Liiklusvoog nädalapäevade lõikes



Joonis 30. Tiptunni esinemine

3.2 Liiklusloenduse tulemused

Vastavalt andmete kogumise metodoloogiale, mis oli kirjeldatud peatükis 2.2 ja tuginedes järgmisele skeemile (Joonis 31) olid kogutud andmed sõidukite, jalakäijate ja rasketehnika osakaalu kohta. Andmete kogumise päevad ja kellaajad esitatud tabelis (Tabel 8).



Joonis 31. Piirkonna ristmikud ja nende analüüsi sisend

Tabel 8. Andmete kogumise käik

Kuupäev	Kellaeg	Andmete kogumise viis	Tulemus
19.04.2023 a.	16:00 – 17:00	Vaatlus kohapeal	Liiklusolukorra eeluuring
20.04.2023 a.	17:00 – 18:00	Vaatlus kohapeal	Liiklusolukorra eeluuring
07.09.2023 a.	16:30 – 17:30	Vaatlus kohapeal	Tehnika – Endla – Luise ristmiku andmed suundade kohta, mis ei ole võimalik kätte saada teistest allikatest
07.09.2023 a.	17:00 – 17:30	Vaatlus kohapeal	Toom-Kuninga – Suur-Ameerika tn. ristmiku andmed sõidukite ja jalakäijate kohta
07.09.2023 a.	16:30 – 17:30	Liikluskaamerate video analüüs	Täiendav andmete kogumine marsruutide ning mahtude kohta ristmikutel: Tehnika – Endla – Luise ja Pärnu mnt – Liivalaia – Suur-Ameerika.
07.09.2023 a.	16:30 – 17:30	Liikluskaamerate video analüüs	Andmete kogumine jalakäijate kohta
31.09.2023 a.	11:00 – 13:00	Kiiruste mõõtmine	Iga liiklussuunda kiiruse profiil

3.2.1 Sõidukid

Koondtabel, mis peegeldab diplomitöös vaadeldava piirkonna liikluse mahud ning marsruudid erilistes ristmikkudes on esitatud lisas (Lisa 1).

3.2.2 Jalakäijad

Mudeli koostamisel arvestas diplomitöö autor samuti jalakäijate mahud, erinevatel ristmikutel. Mahtude loendus on esitatud tabelis (Tabel 9), mis põhineb joonisele (Joonis 31). Eriti tähtsateks modelleerimisel peab autor kaks ülekäigurada järgmistel ristmikutel: Suur-Ameerika tn. – Toom-Kuninga tn. ja Suur-Ameerika tn. – Pärnu mnt. Need tõstab autor esile ning pöörab tähelepanu mudeli kalibreerimisel.

Suur-Ameerika tänaval asuv ülekäigurada mõjutab otseselt kogu liiklusele nii käsitleval, kui ka Toom-Kuninga tänaval. Antud ülekäigurada on reguleeritud fooriga ning jalakäijate jaoks tee ületamine korraldatud väljakutsenuppu abil. See tähendab, et inimeste arv, mis ületab teed antud kohal on otseselt seotud kogu tänava liiklusvooluga.

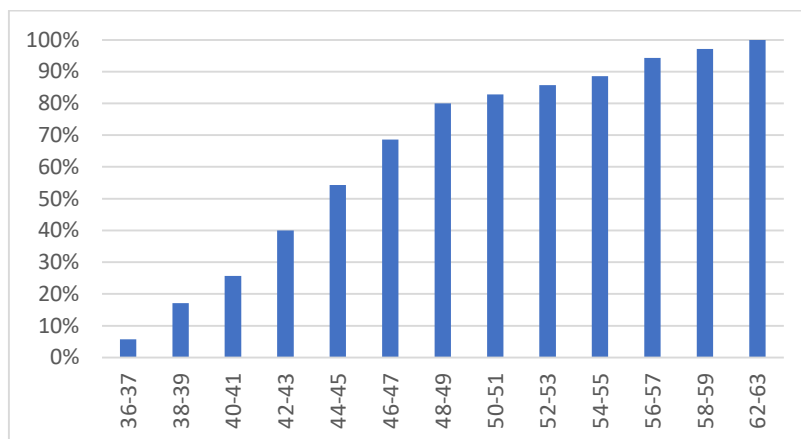
Samuti töö autor pöörab eraldi tähelepanu ülekäigurajale, mis tagab kergliiklejate tee ületamist ristmikul Suur-Ameerika tn. – Pärnu mnt. Antud ristmikul nii sõidukite, kui ka jalakäijate roheline faas tagatud ühel ja samal ajal, mis tähendab seda, et parema pöõret sooritajad Suur-Ameerika tänavalt Pärnu maanteele peavad andma teed jalakäijatele. Niisugune olukord otseselt mõjutab Suur-Ameerika tänava liikluse linna sisenevas suunas, kuna pöõret paremale tehakse rajalt, mis samuti lubab liiklemist otse suunas.

Tabel 9. Jalakäijate loenduse tulemused

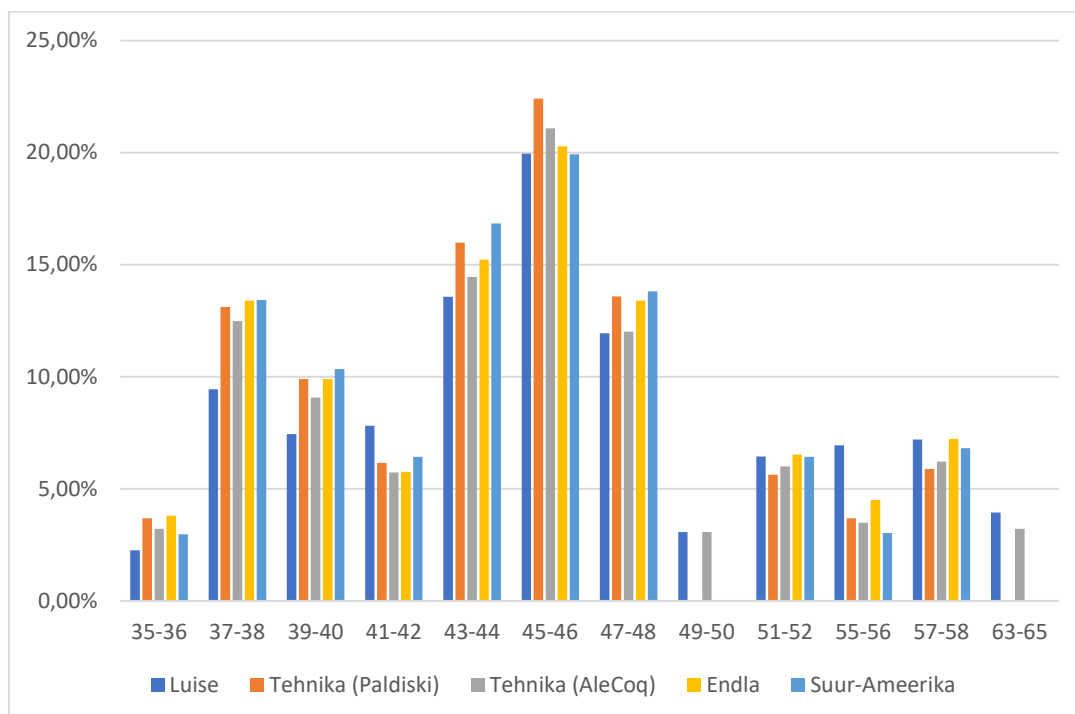
Ülekäiguraja asetus	Ristmik A (Tehnika - Endla - Luise)	
	JK loendus, in/t	Allikas
Tehnika tn. (Paldiski)	84	kaamerad, käsiloendus
Tehnika tn. (AleCoq)	148	kaamerad, käsiloendus
Endla tn. (LSS)	60	kaamerad, käsiloendus
Luise tn. (LVS)	28	kaamerad, käsiloendus
	Ristmik C (Toom-Kuninga - Suur-Ameerika)	
Suur-Ameerika tn.	58	käsiloendus
	Ristmik D (Suur-Ameerika - Pärnu mnt. - Liivalaia)	
Pärnu mnt.	188	kaamerad, käsiloendus

3.2.3 Kiiruste profiilid

Kasutades eelmises peatükis kirjeldatud meetodikat (vt. 2.2.6) ja vastavalt kohapeal kogutud andmetele olid tehtud tänavate (Joonis 12) kiiruste profiilid, mis kasutatakse mudeli koostamisel ja kalibreerimisel. Üks näide Luise tänava profiilist esitatud kumulatiivse sageduse kiiruste graafikus (Joonis 32). Koondgraafik kiiruste mõõtmistest on esitatud joonisel (Joonis 33). Antud graafik peegeldab kiiruste suhtelist sagedust erilistes tänavates.



Joonis 32. Kumulatiivne kiiruste sagedus Luise tänaval



Joonis 33. Kiiruste suhtelised sagedused

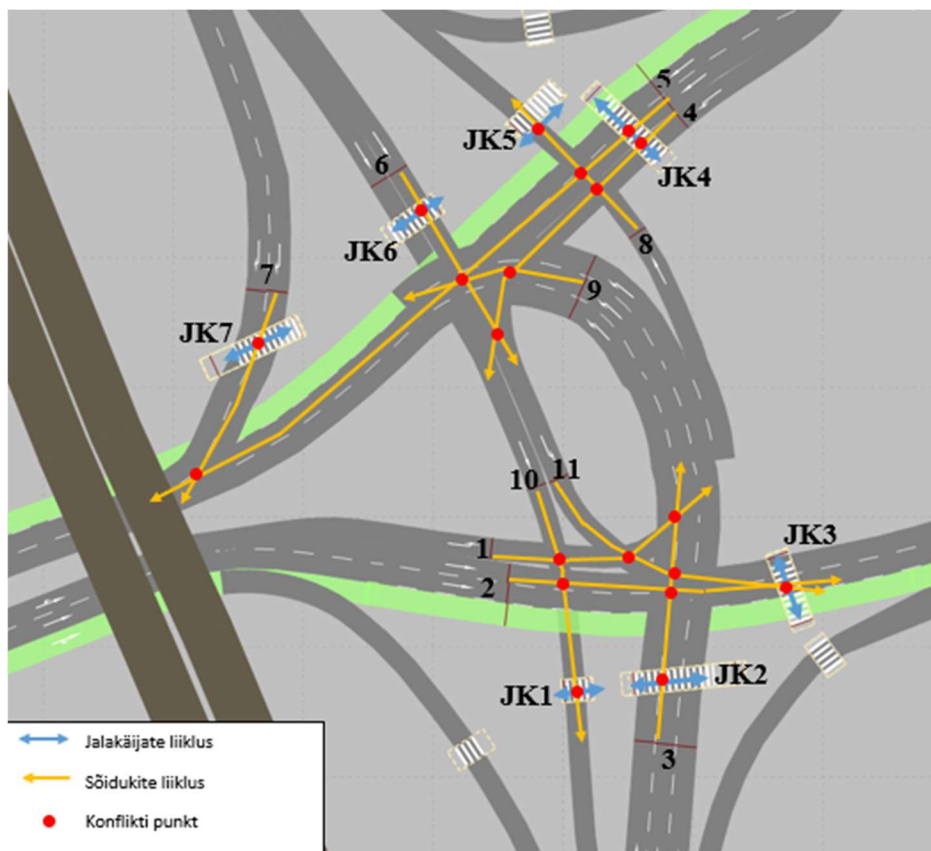
3.2.4 Rakseveokite osakaal

Mudeli loomisel arvestab diplomitöö autor samuti rasketehnika ja raskesõidukite osakaalu. Kogutud andmete abil mudeli kalibreeritakse. Loenduse andmed on esitatud lisas (Lisa 2).

3.3 Kaitseaja arvutamise tulemused (*intergreen matrix*)

Vastavalt kaitseaja arvutamise metodoloogiale, mis oli kirjeldatud antud diplomitöö punktis 2.4, oli esialgu koostatud uuritava ristmiku konfliktpunktide skeem (Joonis 34), mille alusel edaspidi oli tehtud kaitseaegade maatriks (Joonis 35).

Teelõikude pikkuste määramiseks kasutas autor Maa-ameti kaardirakenduse [3] sisseehtatud mõõtmisvahendeid, kuna mõõtmine kohapeal ei ole võimalik ohtlikkuse tõttu, mis on tingitud ristmiku ööpäevase kasutusega. Töö käigus olid mõõdetud nii sõidukite teekonnad, kui ka jalakäijate jaoks ettenähtud ülekäiguradade pikkused ja laiused.



Joonis 34. Ristmiku konfliktpunktide skeem (autori poolt koostatud)

		SAABUV LIIKLUSVOOG																		
LAHKUV LIIKLUSVOOG		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	JK 1	JK 2	JK 3	JK 4	JK 5	JK 6	JK 7	
	1			4							3	3								
	2			4							3	4			8					
	3	5	3									4		4						
	4						7		5	6						4				
	5						6	10	4	6						4				
	6				3	2				3								4		
	7					0				1									5	
	8				3	3											6			
	9				3	3	5	10												
	10	5	5											7						
	11	6	5	5												9				
	JK 1										2									
JK 2			10																	
JK 3		5									5									
JK 4				10	10															
JK 5								5												
JK 6						6														
JK 7							11													

Joonis 35. Kaitseaegade maatriks (autori poolt koostatud)

Maatriksil on märgitud ristmikule saabuvad ning lahkuvad sõidukite liiklusvood (rühmad 1 – 11) ja samuti jalakäijate rühmad (JK 1 – JK 7). Numbritega täidetud lahtrid näitavad kõik võimalikud konfliktpunktid eriliste liiklusvoogude vahel ning tähendavad aja vajadust, sekundites, mis on tarvis sõidukile või jalakäijale, et lahkuda konfliktpunktist ohtliku liiklusolukorra tekitamata.

Edaspidi antud maatriks kasutati aluseks, käesolevas lõputöös kirjeldatud ning katsetatud, modelleerimise meetodil, fooriprogrammide koostamiseks.

3.4 Optimaalse fooritsükli arvutamise tulemused

Arvestades kõik vajalikud parameetrid, mis olid kirjeldatud peatükis 2.5, sai leitud, Webster'i valemi (5) abil, optimaalse fooritsükli kestuse, mis võrdub antud juhul 89 s.

Vastavalt standardile [1] modelleerimisel kasutatakse 3-taktiliseks foorijuhtimiseks tsükli, mis võrdub 90 s.

3.5 Rohelise tule kestuse arvutamise tulemused

3.5.1 Sõidukid

Roheliste tulede arvutamisel autoliikluse jaoks olid arvestatud kriteeriumid, mis kirjeldab oma juhendis Tiit Metsvahi [11] ja diplomitöö autor peatükis 2.7.1. Need on: esimese sõiduki viivitus

roheline tule süttimisel fooripeal, autodevaheline intervall, fooritsükli kestvus ning liiklussagedus igal sõidusuunal. Sõiduki viivitus ning intervall oli võetud eelmainitud juhendist [11]. Vajalik fooritsükli eelarvutus oli teostatud valemi (6) abil, mille tulemus on olemas eelmises peatükis 3.4. Liiklussagedused olid saadud, autori poolt, andmete kogumise käigus.

Taktide ajaliste intervallide arvutuse tulemused on esitatud järgmises tabelis (Tabel 10):

Tabel 10. Rohelise tule kestuse ajad sõidukite jaoks

Takti tähis	Liiklussuund	Rohelise takti pikkus, s
A	Endla – Luise	38
B	Tehnika (AleCoq poolt)	19
C	Tehnika (Paldiski mnt poolt)	13

Selleks, et kontrollida kas saadud tulemused on õiged kasutame valemi (7), mille abil liidame kõigi tsükli kestel esinevate rohelise fooritule aegade summa (70 s) ning kõigi tsükli kestel rakendatavate kaitseaegade summa (18 s). Arvutamise käigus saadud summa (88 s) ei pea ületama kogu fooritsükli pikkuse (90 s). Antud juhul väide on õige.

3.5.2 Jalakäijad

Lähtuvalt meetodist, mis oli kirjeldatud eelmises osas (vt. 2.7.2) ja kasutades valemi (8) jalakäijate minimaalse rohelise tule kestuse arvutamiseks, sai diplomitöö autor ristmiku Tehnika – Endla – Luise eriliste ülekäiguradade (Joonis 34) jaoks järgmised tulemused (Tabel 11):

Tabel 11. Minimaalne rohelise tule kestus jalakäijate jaoks

Ülekäiguraja tähis	Minimaalne rohelise tule kestus, s
JK 1	6,7
JK 2	11,9
JK 3	11,3
JK 4	13,7
JK 5	9,9
JK 6	9,9
JK 7	14,5

3.6 Mikrosimulatsioonide tulemused

Tuginedes materjalidele metodoloogia osast ning arvestades saadud tulemused eriliste foorijuhtimise komponentide kohta olid koostatud mitmesugused stsenaariumid, mis on kokku seitse. Need stsenaariumid olid simuleeritud PTV Vissim tarkvaras. Iga stsenaariumi osas oli sooritatud 25 simulatsiooni, mis annab representatiivne tulemus [18] eriliste aspektide võrdlemiseks.

3.6.1 Stsenaarium 0

Olemasoleva olukorra baasmudel, mida autor käsitleb diplomitöös nagu stsenaarium 0, kasutatakse edaspidi aluseks eriliste stsenaariumite võrdlemiseks. Seega on väga tähtis, et transpordivoogude mudel on koostatud õige ning täpselt peegeldab vaadeldava ristmiku olukorra.

Mudeli täpsuse hindamiseks kasutab autor peatükis 1.6.2 kirjeldatud GEH-statistika meetodi. Andmete kogumise jaoks mudelis olid projekteeritud spetsiaalsed mõõtepunktid, mis on märgitud punasega joonisel (Joonis 36). Kõik sõidukid, mis läbisid antud punktid, olid võetud arvesse ning valemi (1) abil oli sooritatud mudeli valideerimine.



Joonis 36. GEH-statistika mõõtepunktid (autori poolt koostatud)

GEH-statistika lõpptulemused on esitatud järgmises tabelis (Tabel 12).

Tabel 12. GEH-statistika tulemused

	Endla	Luise	Tehnika (P)	Tehnika (A)	Suur-Ameerika	Toom-Kuninga
M (mudelist)	1787	894	408	783	1390	153
C (kogutud)	1849	888	400	904	1400	152
GEH	1,5	0,2	0,4	4,2	0,3	0,1

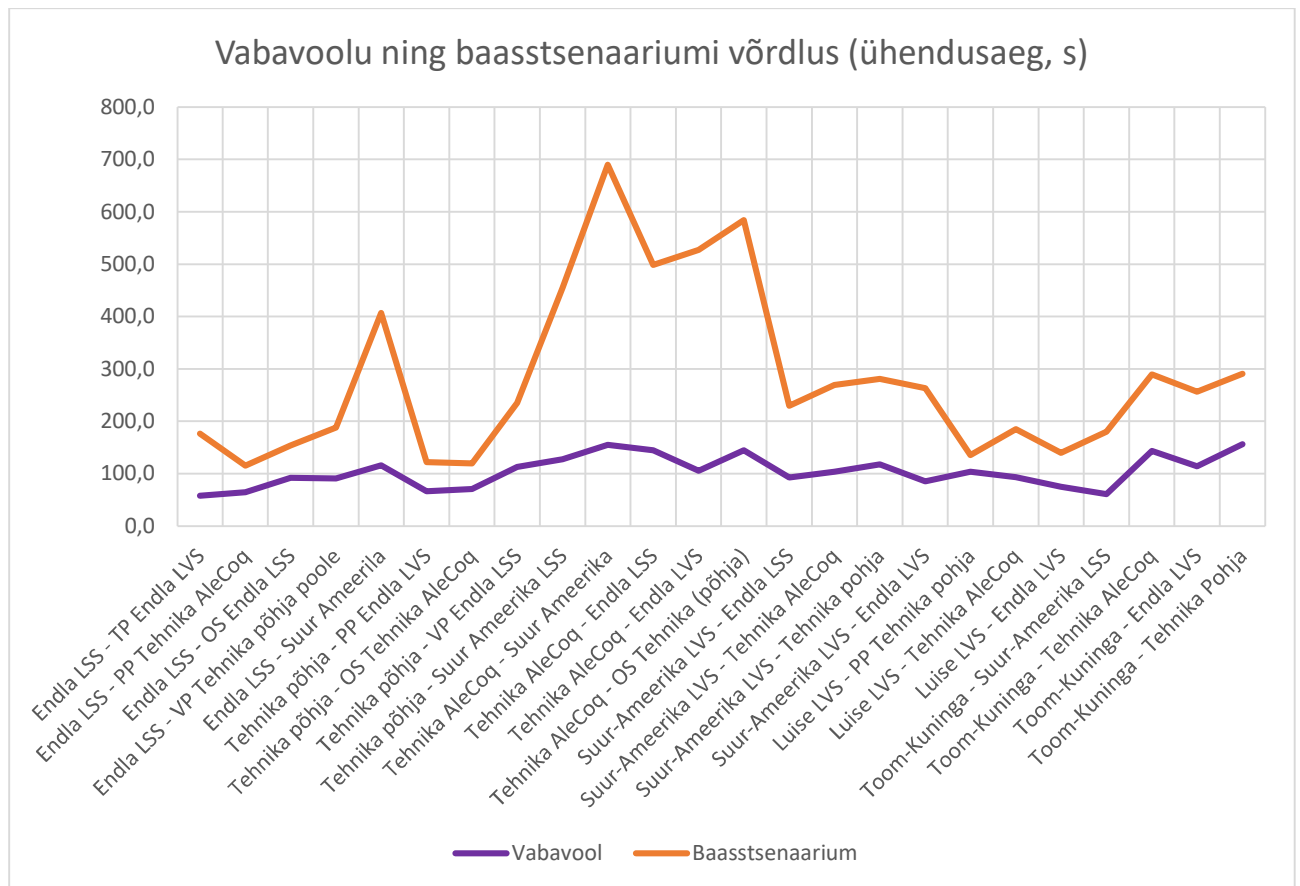
Vastavalt GEH-statistika väärtuste hindamisele (Tabel 2), mudeli toimimist võib pidada hästi sobivaks, kui GEH-väärtus on vähem, kui 5,0. Tabelist saadud andmete põhjal võime väita, et mudel on koostatud õigesti ning läbis valideerimist. Samuti see tähendab, et kõik võrdlemiseks saadud andmed võib peeta tõe vastavaks.

Vastavalt pakutud mõõdikutele teenindustase kohta (vt. 2.8) lõputöö autor sai Vissim'i tarkvara abil kolme ristmikke kohta järgmised tulemused.

Tabel 13. Baasstsenaariumi teenindustasemed

Vaadeldav ristmik	Teenindustase
Tehnika tn. – Endla tn. – Luise tn.	E
Suur-Ameerika tn. – Endla tn. – Luise tn.	E
Suur-Ameerika tn. – Pärnu mnt.	E

Määratud mudeli piirkonna tulemused on leitavad ühendtabelis lisas (Lisa 3). Kokku oli hinnatud 24 lõiku eriliste distantsidega. Baasstsenaariumi tulemused võrdleb autor vabavoolu (*free-flow*) tingimustega, ehk tingimustel, kus liikuvatel objektidel puuduvad eestakistused. Graafiline diagramm (Joonis 37) näitab erinevust. Eksisteeriv erinevus on loomulik, sest vabavoog on kunstlik olukord, mille puhul transpordivahendite jaoks puuduvad mingid takistused, näiteks valgusfoorid või sõidukid teistest suundadest ning jalakäijad. Samuti diagrammilt võime näha, et kõige raskendatud liiklus on Tehnika tänava suunas (AleCoq staadioni poolt).



Joonis 37. Vabavoolu ja baasstsenaariumi võrdlusdiagramm

Hinnates majanduslikku efektiivsust ning lähtuvalt baasstsenaariumi simuleerimise saadud andmetest võib väita, et võrreldes vabavoolu tingimustega, olemasoleva olukorra kogu viivitus võrdub 322 306 s. Antud tulemust saab tõlgendada, kui kogu süsteemi kasutajate saamata jäänud tulu näol, ühel öhtusel tiptunnil, mis võrdub 1160 euro või 294 716 euro aastas. Edaspidi diplomitöös tehakse viivituste võrdlust baasstsenaariumi andmetega.

3.6.2 Stsenaarium 1

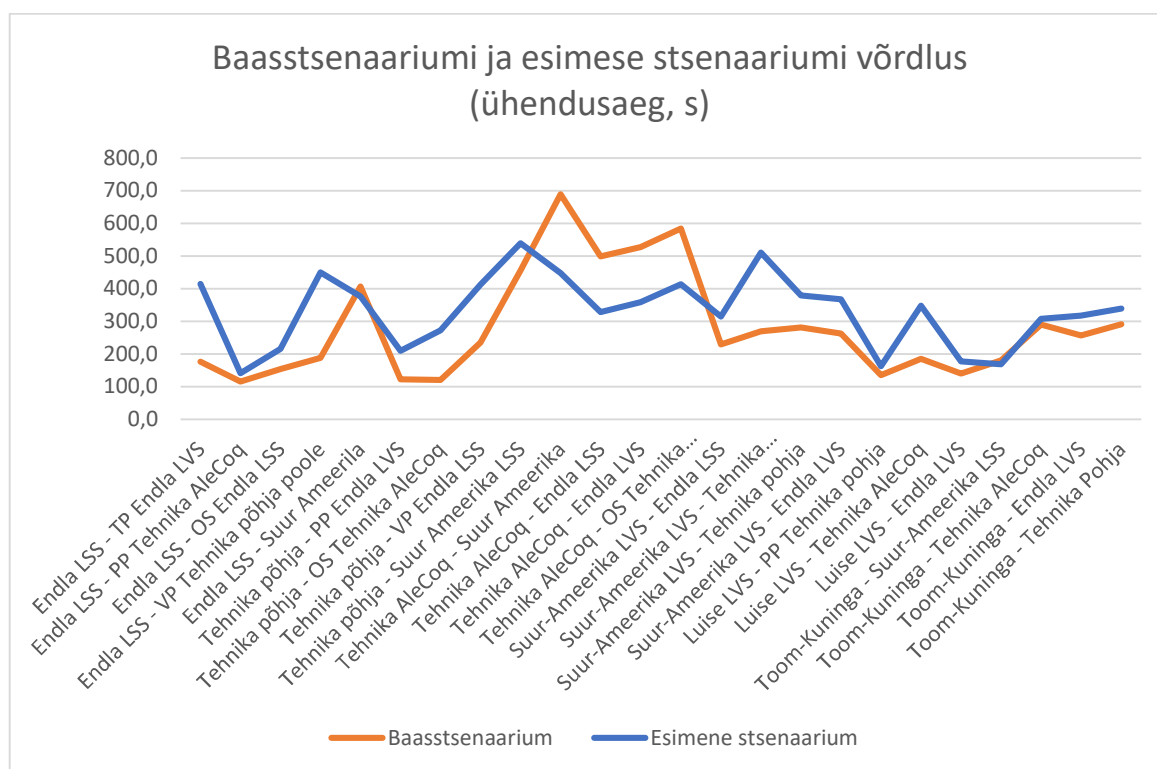
Antud stsenaariumi koostamiseks oli kasutatud erilised arvutuslikud meetodid, millistest oli kirjeldatud metodoloogilises osas, tuginedes T.Metsvahi [11] ja Webster [24] teoreetilistele allikatele. Lähtuvalt arvutustest, MS EXCEL programmi abil, olid saadud erinevad näitajad, mida autor rakendab Tehnika – Endla – Luise tänavate fooriprogrammi koostamisel.

Esimese stsenaariumi ristmikke teenindustasemete simuleerimise tulemused on toodud järgmises tabelis (Tabel 14). Samuti võrreldakse neid baasstsenaariumiga.

Tabel 14. Baasstsenaariumi ja stsenaariumi 1 teenindustasemed

Vaadeldav ristmik	Stsenaariumi nr. / teenindustase	
	0	1
Tehnika - Endla - Luise	E	E
Suur-Ameerika - Endla - Luise	E	E
Suur-Ameerika - Pärnu mnt.	E	E

Ühenduskiiruste tulemused, mis on teiseks mõõdikuks stsenaariumite hindamisel, on toodud lõputöö lisas (Lisa 3). Näitlikkuse jaoks pakub diplomitöö autor graafilist võrdlust baasstsenaariumi ja stsenaariumi 1 vahel (Joonis 38). Diagrammilt sai toodud nähtus, kus enamikel suundades eksisteerib ühendusaja kasv ning ainult Tehnika tänaval (AleCoq staadioni poolt) ühendusaeg langeb. Kogu süsteemi tõhusus antud stsenaariumis langes 17% võrra, mis tähendab üldist ühendusaja kasvu.



Joonis 38. Baasstsenaariumi ja stsenaariumi 1 võrdlusdiagramm

Majandusliku efektiivsuse arvutamisel kasutatud Vissim'i abil saadud tulemus viivituse kohta, mis võrdub 421 004 s. Antud juhul on näha viivituste maht võrreldud, nagu eelmisel stsenaariumil, vabavooluga. Tulemused võrreldes baasstsenaariumiga tõusevad ning selle korral kogu süsteemi

kasutajate saamata jäänud tulu ühel öhtusel tipptunnil samas tõuseb 355 euro võrra või 90 243 euro võrra aastas.

3.6.3 Stsenaarium 2

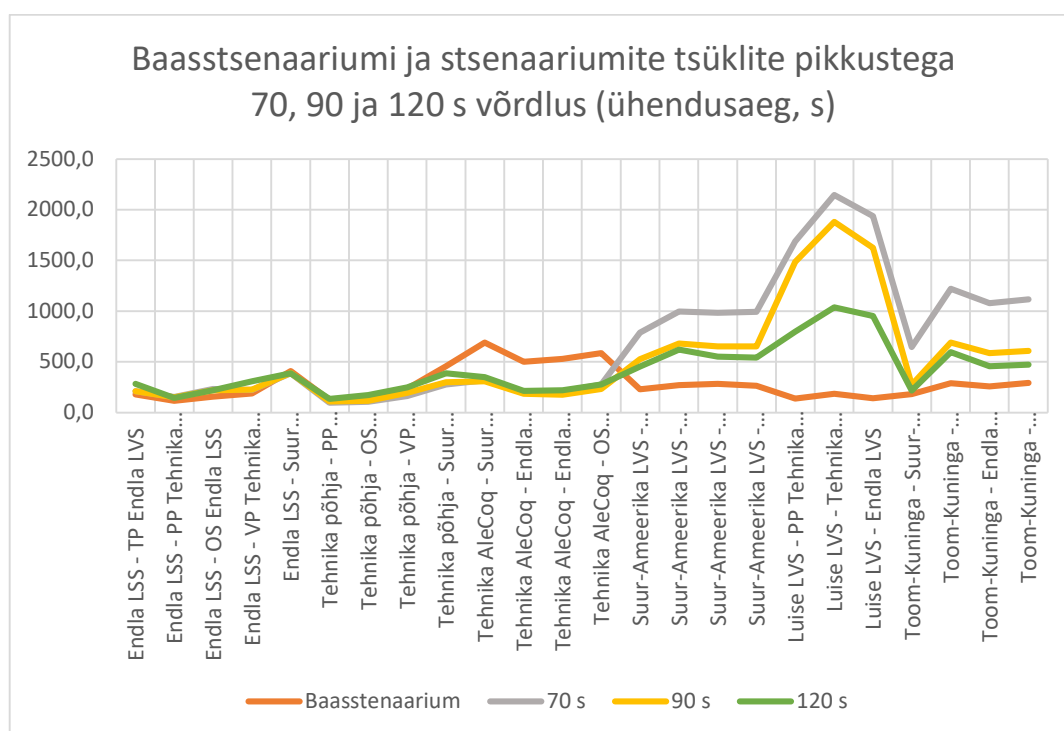
Antud peatükis esitatud tulemused stsenaariumist, kus oli Vissim'i sisseehitatud funktsiooni abil koostatud kolm valgusfooriprogrammi tsüklite pikkustega 70, 90 ja 120 s (stsenaariumite tähised 2a, 2b ja 2c vastavalt). Need lahendused vaadeldakse korraga.

Teenindustaseme tulemused on väljendatud järgmises tabelis (Tabel 15).

Tabel 15. Teise stsenaariumi teenindustaseme tulemused

Vaadeldav ristmik	Stsenaariumi nr. / teenindustase			
	0	2a	2b	2c
Tehnika - Endla - Luise	E	F	E	F
Suur-Ameerika - Endla - Luise	E	F	F	F
Suur-Ameerika - Pärnu mnt.	E	F	F	F

Järgmises graafikus (Joonis 39) esitatud stsenaariumite tulemused ühendusaja kohta.



Joonis 39. Teise stsenaariumi tulemused võrdluses baasstsenaariumiga

Jooniselt (Joonis 39) sai toodud, lõputööautori poolt, rakendatud stsenaariumid, kus leidis kajastust suurt ühendusaja kasvu Suur-Ameerika, Luise ning Toom-Kuninga suundadel.

Antud stsenaariumi majandusliku efektiivsuse hindamise võrdlemiseks vaadeldakse kolme erilist simulatsiooni tulemused korraga. Selleks Vissim'i andmete põhjal koostatud järgmine tabel (Tabel 16):

Tabel 16. Majandusliku efektiivsuse näitajad teises stsenaariumis

Stsenaariumi nr.	Viivitus, s	Raha (tunnis), euro	Raha (aastas), euro
0	322 306	1160	294 716
2a	645 556	2324	590 296
2b	57 5436	2071	526 179
2c	529 833	1907	484 479

Tabelist võime järeldada, et kõik uued rakendatud fooriprogrammid tsüklitega 70, 90 ja 120 s, mis vastavad variantidele 2a, 2b ja 2c, väljendavad negatiivse mõju kogu transpordisüsteemile.

3.6.4 Stsenaarium 3

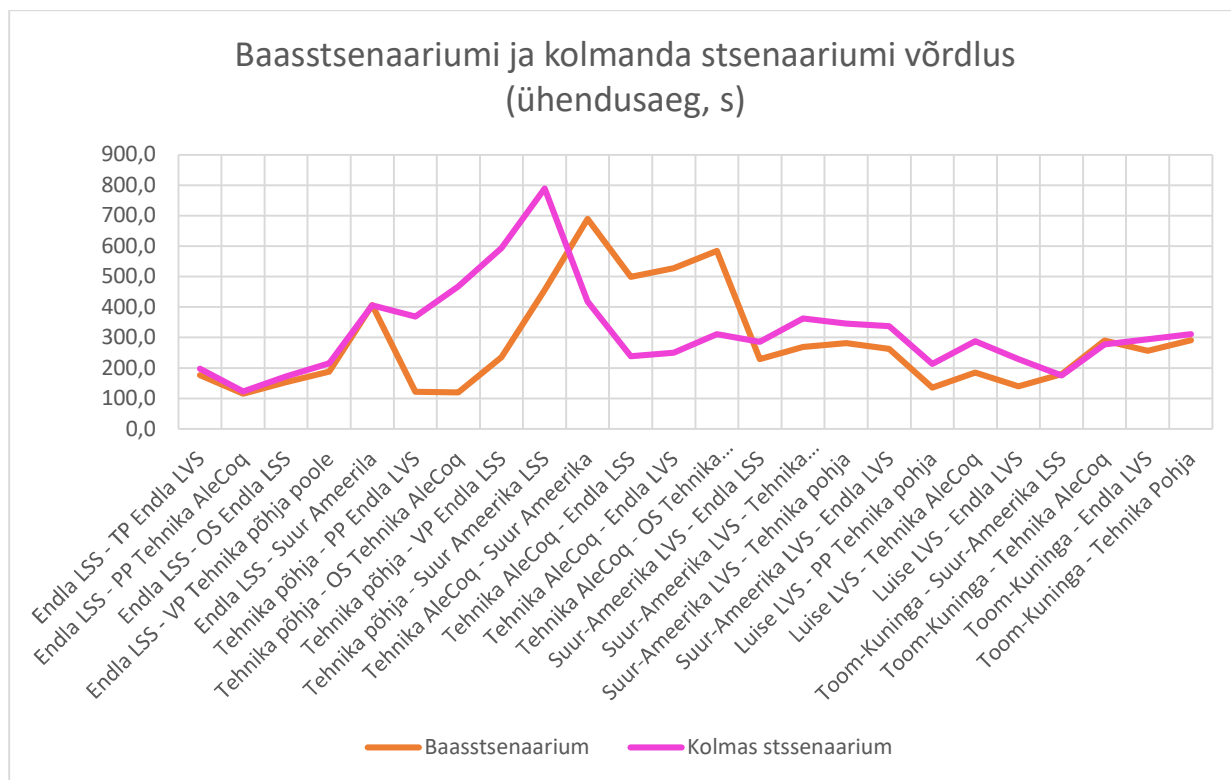
Kolmandas variandis sai rakendatud lahendus, mis osaliselt kaasab intelligentset transpordijuhtimist (andurid ning nendega kohanduv foorijuhtimissüsteem). Samuti oli ümberkorraldatud pööre paremale Tehnika tänavalt (Paldiski mnt. suunalt).

Teenindustaseme tulemused on väljendatud järgmises tabelis (Tabel 17).

Tabel 17. Kolmanda stsenaariumi teenindustaseme tulemused

Vaadeldav ristmik	Stsenaariumi nr. / teenindustase	
	0	3
Tehnika - Endla - Luise	E	E
Suur-Ameerika - Endla - Luise	E	E
Suur-Ameerika - Pärnu mnt.	E	E

Järgmises graafikus (Joonis 40) esitatud stsenaariumite tulemused ühendusaja kohta.



Joonis 40. Kolmanda stsenaariumi tulemused võrdluses baasstsenaariumiga

Majandusliku efektiivsuse arvutamisel on kasutatud Vissim'i abil saadud tulemus viivituse kohta, mis võrdub 352 424 s. Saadetud tulemused, võrreldes baasstsenaariumiga, muutuvad ning käsitleval korral, kogu süsteemi kasutajate saamata jäänud tulu ühel, õhtusel tiptunnil, kasvab 108 euro võrra või 27 540 euro võrra aastas.

3.6.5 Stsenaarium 4

Viimases stsenaariumis, diplomitöö autor, kasutab kombineeritud meetodi fooriprogrammi optimeerimiseks.

Teenindustaseme tulemused on väljendatud järgmises tabelis (Tabel 18).

Tabel 18. Neljanda stsenaariumi teenindustaseme tulemused

Vaadeldav ristmik	Stsenaariumi nr. / teenindustase	
	0	4
Tehnika - Endla - Luise	E	D
Suur-Ameerika - Endla - Luise	E	E
Suur-Ameerika - Pärnu mnt.	E	E

Baasstsenaariumi ja neljanda stsenaariumi võrdlus (ühendusaeg, s)

Test Case	Baasstsenaarium (s)	Neljanda stsenaarium (s)
Endla LVS - TP Endla LVS	180	190
Endla LVS - PP Tehnika AleCoq	120	110
Endla LVS - OS Endla LVS	130	140
Endla LVS - VP Tehnika põhja poole	180	190
Endla LVS - Suur Ameerika	400	430
Tehnika põhja - OS Tehnika LVS	120	110
Tehnika põhja - VP Endla LVS	120	130
Tehnika põhja - Suur Ameerika LVS	230	280
Tehnika AleCoq - Endla LVS	680	530
Tehnika AleCoq - Endla LVS	500	420
Suur-Ameerika LVS - Endla LVS	520	230
Suur-Ameerika LVS - Tehnika (põhja)	580	280
Suur-Ameerika LVS - Endla LVS	230	180
Suur-Ameerika LVS - Tehnika AleCoq	270	240
Luike LVS - Endla LVS	280	230
Luike LVS - PP Tehnika põhja	260	220
Luike LVS - Tehnika põhja	130	190
Toom-Kuninga - Tehnika AleCoq	180	270
Toom-Kuninga - Endla LVS	140	180
Toom-Kuninga - Suur-Ameerika LVS	170	160
Toom-Kuninga - Tehnika LVS	280	250
Toom-Kuninga - Endla LVS	250	230
Toom-Kuninga - Tehnika Põhja	290	250

Neljanda stsenaariumi tulemused majandusliku efektiivsuse kohta näitavad, et kogu süsteemi viivitus võrdub 277 355 s. Antud suurus on baasstsenaariumi koguviivitust (322 306 s) väiksem 44 950 s võrra, mis omakorda näitab, et pakutud lahendus toob kaasa süsteemi kasutajatele rahalist säästu. Väljendades seda rahaühikutes lõputöö autor järeldab, et ühe õhtuse tipptunni jooksul stsenaarium säästab liiklejatele 162 euro kokku, mis annab ühe aasta jooksul 41 103 euro rahasäästu.

4 TULEMUSTE ANALÜÜS JA JÄRELDUSED

4.1 Tulemuste analüüs

Tulemuste võrdlemiseks ja hindamiseks kasutab autor koondtabelid määratud mõõdikutega, mis olid kirjeldatud metodoloogilises osas (vt. 2.8).

4.1.1 Teenindustase

Esimesena hinnatakse lõplikku teenindustaset kolmest ristmikust, mis olid modelleeritud Vissim süsteemis. Tabelis (Tabel 19) sai toodud stsenaariumite järjenumbreid, kus 0 on baasstsenaarium, millele järgnevad teised kavandatud variandid.

Tabel 19. Teenindustasemete koondtabel

Vaadeldav ristmik	Stsenaariumi nr. / teenindustase						
	0	1	2a	2b	2c	3	4
Tehnika – Endla – Luise	E	E	F	E	F	E	D
Suur-Ameerika – Endla – Luise	E	E	F	F	F	E	E
Suur-Ameerika – Pärnu mnt.	E	E	F	F	F	E	E

Saadud tulemuste põhjal on näha, et piirkonna hetkeseisu olukord (0-stsenaarium) on kehv, mis vastab reaalse seisundile. Antud teenindustasemet kõikidel vaadeldavatel ristmikel, iseloomustab tase E, mis tähendab, et läbilaskvuse tase, kiirus ja liiklussagedus pidevalt muutuvad. Sõidukijuht ei saa vabalt valida kiirust ja manöövrid on sageli sunnitud. Väikese autode vahelise intervalli ja sõidukiiruse vähenemise tõttu on liiklusolud juhile keerulised.

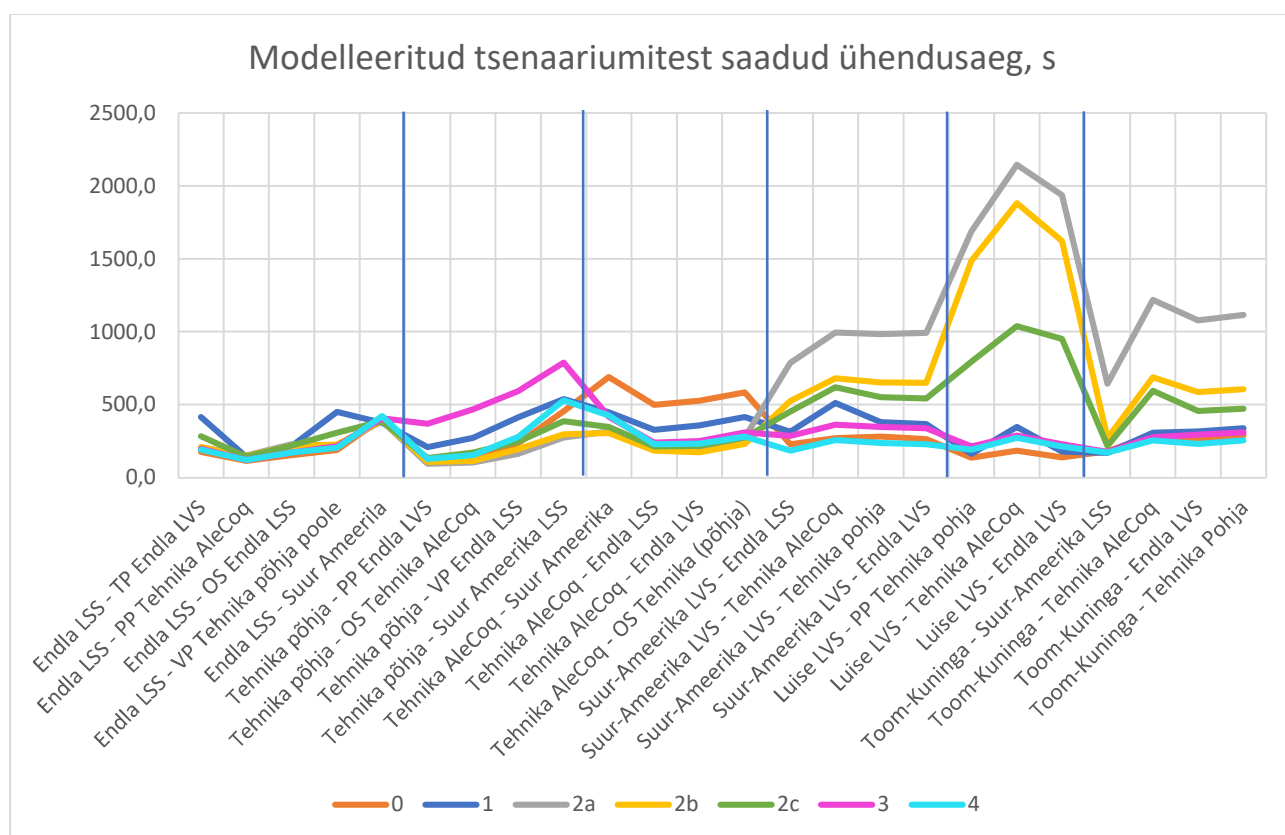
Projekteeritud stsenaariumid 1 ja 3 ei avalda, ei hea ega halb mõju lõputöös kajastatud olukorrale. Kolm stsenaariumi teisest seeriast pigem halvendavad üldist pildi ning toovad kaasa teenindustaseme langevust F tasemeni. Niisugust liiklust karakteriseerib lakkav liiklusvoog, kus ükski sõiduk ei liigu vabalt. Kiirus ja liiklussagedus muutuvad pidevalt ning teatud perioodidel võivad langeda nulli.

Neljanda stsenaariumi puhul võime jälgida Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmikul väikest olukorra parandamist, mis on kajastatud teenindustaseme tõstmisel D tasemeni. Vaatamata sellele liiklusvoog hinnatakse sel juhul ebastabiilsusele lähenevaks ning liiklustingimused juhi jaoks on

pingelised. Teenindustaseme tõstmisel kiirused jäävad pigem vastuvõetaval tasemel, kuid aeg-ajalt võivad järsku muutuda.

4.1.2 Ühendusaeg

Tulemuste analüüsi teises osas diplomitöö autor hindas rakendatud stsenaariumite mõju transpordivahendite ühendusaegadele. Antud kriteeriumi mõõdiku määramisel oli kasutusse võetud 24 teelõiku eriliste pikkustega (Tabel 6), mis vastavad väärtustele x-skaalal graafikus (Joonis 42). Graafikust lähtuvalt võime eraldi hinnata iga suunda tõhusust pärast muudatuste rakendamist, võrreldes neid baasstsenaariumiga.



Joonis 42. Ühendusaegade koondgraafik

Graafiku mõistmise lihtsustamiseks ning mugava võrdluse osutamiseks, jagab autor saadud andmed kuueks rühmaks, mis vastavad iga sõidusuunda alguspunktile. Need rühmad on:

- Endla tn. suund (linna sisenev)
- Tehnika tn. põhjalt liikuv suund (Paldiski mnt. poolt)
- Tehnika tn. lõunalt liikuv suund (AleCoq Arena poolt)
- Suur-Ameerika tn. suund (linnast väljuv)

- Luise tn. suund (linnast väljuv)
- Toom-Kuninga tn. suund (Suur-Ameerika tn. poole)

Koostatud tabeli (Tabel 20) alusel autor analüüsis, kuidas välja näevad keskmised ühendusajad iga rühma jaoks ning jälgis, missugustel suundadel eksisteerib ajaline kasv või langus. Tabeli lõpus sai arvutatud, mitu protsendi võrra muutub saadud keskmine tulemus algsest näitajast, ehk baasstsenaariumist. Antud juhul negatiivne tulemus peegeldab rakendatud stsenaariumi positiivset mõju kogu süsteemile (ühendusaja langus) ning vastupidi (ühendusaja kasv).

Tabel 20. Ühendusaegade muutus võrreldes baasstsenaariumiga

Rühm	Stsenaariumi nr. / Keskmine ühendusaeg, s						
	0	1	2a	2b	2c	3	4
Endla LSS	208,1	319,6	239,7	238,3	267,9	222,7	222,6
Tehnika (Paldiski mnt.)	233,0	358,3	159,4	178,8	234,5	554,7	272,8
Tehnika (AleCoq Arena)	575,0	386,9	249,8	223,5	263,4	304,2	291,8
Suur-Ameerika LVS	260,7	392,7	939,0	627,1	540,9	332,9	227,2
Luise LVS	153,3	229,0	1923,5	1663,3	928,5	243,1	226,0
Toom-Kuninga	254,2	283,1	1013,5	537,6	434,9	264,5	228,7
Kokku	283,0	332,0	684,0	518,7	417,5	319,5	244,7
Kasv / langus, %		17%	142%	83%	48%	13%	-14%

Käesolevast tabelist (Tabel 20) võime teha järeldust, et ainult neljas stsenaarium avaldab positiivset mõju kogu süsteemile, mis väljendub keskmise ühendusaja langusel 14% võrra. Antud stsenaariumi rakendamisel näeme kõige suuremat positiivset mõju Tehnika (AleCoq Arena suund), Suur-Ameerika ja Toom-Kuninga suundadele. Näiteks Tehnika tänava suuna ühendusaeg, uue fooriprogrammi rakendamisel, näitab peaaegu kahekordne (1,97) ajaline võit, ehk 283,2 sekundit (vana aeg 575,0 s; uus aeg 291,8 s). Ikkagi antud stsenaarium avaldab negatiivset mõju teistele suundadele nagu Endla, Tehnika (Paldiski mnt. poolt) ja Luise. Kõige negatiivseim mõju saab antud juhul Luise tänava suund, kus ühendusaeg suurenes 72,7 sekundi võrra (vana aeg 153,3 s; uus aeg 226,0 s). Vaadeldava olukorra diplomitöö autori poolt hinnatakse loomulikuks, sest iga süsteem peab olema tasakaalus. Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmiku fooriprogrammi korrigeerimisel kogu tsükli pikkus jäi samaks, ehk 90 s. Rohelise aega kestus ühele suunale oli suurendatud ning teisele vähendatud. Selles ongi põhjus, miks teised suunad said kannatada.

Kõige halvema toime näitavad teise rühma stsenaariumid (2a, 2b ja 2c). Nende puhul on näha, et ainult Tehnika tn. suund (AleCoq Arena poolt) sai parima tulemuse. Teised suunad aga olid raskesti ummistatud.

Esimese ja kolmanda stsenaariumi rakendamise negatiivne mõju on suhteliselt sarnane ning ulatub vastavalt 17 ja 13 protsendi.

4.1.3 Majanduslik efektiivsus

Majandusliku efektiivsuse võrdlemiseks on koostatud koondtabel (Tabel 21), millest võib leida stsenaariumite rakendamise tulemused.

Efektiivsuse hindamise põhjana võetud Vissim'i abil saadud andmed kogu süsteemi läbivate sõidukite ajaliste viivituste kohta. Viivitused determineeritud nagu aja kaotsimine, mis on tingitud erinevuses tegelikkus ning soovitud kiiruses. Kasutades meetodi, mis oli kirjeldatud peatükis 2.8.3, diplomitöö autor arvutab saamata jäänud tulu väljendatud eurodes.

Tabel 21. Majandusliku efektiivsuse näitajad

Stsenaariumi nr.	t_0 , s	T_0 , euro	t_p , s	T_p , euro	ΔT , euro	ΔT (aastas), euro
0	322 306,11	1160,30				
1			421 003,75	1515,61	-355,31	-90 249,12
2a			645 556,00	2324,00	-1163,70	-295 579,70
2b			575 436,25	2071,57	-911,27	-231 462,20
2c			529 832,91	1907,40	-747,10	-189 762,50
3			352 424,30	1268,73	-108,43	-27 540,07
4			277 355,61	998,48	161,82	41 102,73

Rakendatud stsenaariumi efektiivsuse näitaja (ΔT) tulemustest sai järeldatud, et negatiivsed arvud viitavad olukorrale, kus tegevused ei põhjusta kulude vähenemist, vaid vastupidi. Seda saab näha kõikides stsenaariumites peale neljanda.

Lõputöös viimasena kavandatud stsenaarium näitas positiivse tulemuse, mis omakorda tähendab, et antud lahendus võib tõsta efektiivsuse 161,82 euro võrra ühe öhtuse tipptunni aja jooksul. Oletades, et kõik öhtused tipptunnid antud ristmikul on alati samasugused ning aastas on neid 254 (2023 a tööpäevade arv), siis ühe aasta lõikes saamata jäänud tulu väheneb 41 102,73 euro võrra. Nimetatud

arvutuslik lähenemisviis on väga lihtsustatud, kuid hetkel Eestis puudub efektiivne hindamismetood, mis omakorda aitaks paremini, sotsiaalmajandusliku liikuvuse mõju, andmeid töödelda.

Kõige halvemad tulemused näitasid meetodi rakendamisel teise rühma stsenaariumid (2a, 2b ja 2c). Esimese ja kolmanda stsenaariumite resultaadid on ka negatiivse toimega.

4.1.4 Visuaalne võrdlus

Eelmistest tulemuste analüüsides lähtuvalt pakub autor võrrelda eraldi kaks variandi, mis on baasstsenaarium ning kõige parimate tulemustega neljas stsenaarium. Selleks pakutakse tõmmata paralleelsele kasutades Vissim'i abil loodud piirkonna soojuskaardid (*heat-map*), mis on andmete graafiline esitus, kus väärtused on kujutatud värvidega, mis vastavad sõidukite mõõtmishetke kiirustele. Autori arvates nimetatud lähenemisviis hindamisele on kõige lihtne ning piltlikult demonstreerib stsenaariumitest tulevaid erinevusi.

Joonisel (Joonis 43) sai toodud teave, kuidas jagunevad kiirused erilistes piirkonna teelõikudel baasstsenaariumis. Niisugune pilt on sarnane *Google Maps*'i kaardirakendusest saadud kuvatõmmisega (Joonis 10), mis näitab tüüpilise neljapäeva õhtuse tipptunni liikluse olukorra. Autori arvamusele sarnasus veel kord kinnitab, et koostatud liikluse mudel baasstsenaariumis vastab tõele.



Joonis 43. Baasstsenaariumi *heat-map*

Järgmiselt jooniselt (Joonis 44) sai toodud kiirused Tehnika tänaval (AleCoq Arena suund) on tunduvalt tõusnud ning keskmine kiirus koostab umbes 30 km/h. Mõlema stsenaariumi soojuskaartide läbivaatamisel selge, et eksisteeriv baasstsenaariumis ummik on ära kaotanud. Luise tänaval aga vastupidi on näha kiiruse profiili tõusu ning suuna lõikes see moodustab umbes 30-40 km/h (baasil 40-50 km/h). Samuti ristmikul Endla – Suur-Ameerika – Luise võib jalgida, et ummiku pikkus (tänaval punane osa) on kasvanud.



Joonis 44. Neljanda stsenaariumi *heat-map*

4.2 Järeldused

Käesolevas diplomitöö osas said hinnatud ja võrreldud süsteemi erilised aspektid nagu teenindustase, ühendusaeg ning majanduslik efektiivsus. Need mõõdikud olid rakendatud seitsmele stsenaariumitele, mis olid modelleeritud ning simuleeritud PTV Vissim tarkvara abil.

Tulemuste analüüs ilmselgelt näitab, et võrreldes olemasoleva olukorraga vaadeldavas piirkonnas kõige paremad tulemused näitab neljas stsenaarium. Antud stsenaarium oli koostatud kombineerides mitu lähenemisviise nagu sensitiivne analüüs ning katsetuste meetod. Foorijuhtimissüsteemis tehakse

muudatused, mille tagajärjeks on kõikide määratud mõõdikute nähtav paranemine. Vaatamata sellele, et neljanda stsenaariumi rakendamine võib kaasa tuua süsteemi mõningatel suundadel kehvemate näitajate ilmnemist, arvutused tõestavad, et piirkonna liiklus võib osutada sujuvamaks ning ummikuvabaks.

Võttes kasutusse pakutud lahendus võib väita, et diplomitöö püstitatud probleem ning uurimuse küsimused leidsid lahenduse. Vaatamata sellele, et Tehnika – Endla – Luise ristmiku teenindustase uue valgusfoori programmi rakendamisel võib kasvada, selle mõju teisele piirkonna teedele ja liiklussõlmedele on märkimisväärne väike.

Paraku, teiste stsenaariumite rakendamised toovad kaasa ainult tulemuste halvenemist.

Uuringute läbiviimisel kohapeal, mis olid teostatud vaatluse abil, märkas diplomitöö autor, et kõige ummistatuim liiklus eksisteerib Tehnika, Suur-Ameerika ning Toom-Kuninga tänavatel. Tulemustest lähtuvalt võib näha, et nende tänavate kasutajate ühendusaeg teiste tänavatega on langenud. Sellega võib järeldada, et diplomitöö eesmärk on saavutatud.

Autor pakub, eduka diplomitöö kaitsmise korral, esitada tulemused Tallinna Transpordiameti liiklusosakonnale ning Signaal AS-iga koostöös rakendada kõige parema lahenduse vaadeldava ristmiku foori juhtimisprogrammis.

KOKKUVÕTE

Diplomitöö problemaatika seisnes ummikute tekkimisel õhtusel tiptunnil Tehnika – Endla – Luise tänavate ristmikul. Antud liiklussõlme mõju kogu piirkonnale on märkimisväärselt suur, mis omakorda tekitas vajaduse koostada põhjaliku analüüsi mitte ainult ühe ristmiku, vaid laia, vaadeldavast ristmikust mõjutatud territooriumi jaoks, kaasates teisi linnateid ning infrastruktuurseid objekte.

Autor valib olukorra parandamiseks valgusfooriprogrammi muutmise meetodi. Käsitleva meetodi eelis on majanduslik efektiivsus ning võimalikult kiire kasutuselevõtt. Uue programmi koostamiseks autoril oli vaja esiteks põhjalikult uurida teoreetilist tausta. Seejärel läbi viia uuringud kogudes mitmesuguseid andmeid nii kohapeal, kui ka elektroonilisel viisil. Moodustades iseseisvalt hindamiskriteeriumid, kaaluda erilised lähenemisviisid probleemi kõrvaldamiseks.

Hetkeseisu ristmiku reguleerimise süsteemi andmed olid saadud Tallinna Transpordiameti liikluskorralduse osakonna spetsialistidelt. Linna ristmikute liikluse reguleerimist teostab Signaal AS, kes haldab foorijuhtimissüsteemi. Ettevõtte poolt koostatud fooriprogramm Tehnika – Endla – Luise ristmiku jaoks on kolmeefaasiline ning tsükli pikkusega 90 s. Uurimuse käigus sai väljaselgitatud, et antud ristmiku õhtusel tiptunnil läbib keskmiselt 5800 sõidukit. Liiklusvoogu omadused vaadeldavas ristmikul õhtusel tiptunnil võib pidada (teenindustase alusel) raskendatuks. See omakorda tähendab, et autojuhid ei saa vabalt valida sõidukiirust, ja manöövrid on sageli sunnitud. Kitsa vahemaa ja väheneva sõidukiiruse tõttu muutuvad liiklusolud juhile keeruliseks.

Ülesanne lahendamiseks kasutatakse erinevad mikrosimulatsioonide variandid, mis said loodud PTV Vissim tarkvara abil. Kokku sai koostatud seitse stsenaariumi, millest esimene on baasstsenaarium, ehk olemasoleva olukorra täpne matemaatiline mudel. Käesolev mudel kirjeldab eksisteeriva transpordivõrgu erilisi aspekte, kasutades selleks kogutud lähteandmed. Vaadeldava liiklussõlme olukorra parandamiseks sai tehtud neli eristatavat variandi, mis hõlmavad kokku kuus stsenaariumi. Nimetatud lahendused käsitlevad erinevad lähenemisviisid ning meetodid probleemi kõrvaldamiseks. Tulemuste saamisel võrreldakse neid omavahel ning ka baas stsenaariumi mudeliga. Rakendatud stsenaariumite tegevused avaldasid nii negatiivseid, kui ka positiivseid mõjusid ristmiku toimivusele. Ühendusaegade langus näitas sel juhul, et transpordivahendid võivad kiiremine saavutada oma sihtpunkti ning vastupidi.

Neljanda stsenaariumi tulemused avaldasid kõige parema mõju transpordivõrgule. Antud stsenaariumis sai rakendatud fooritsüklil pikkusega 90 s, mis on kooskõlas Eesti standardiga. Koostatud uus fooriprogramm, mis on sarnane hetkel olevaga, kuid rohkem arvestab liiklusvoogusid erilistest suundadest.

PTV Vissim tarkvara abil loodud võrk on hea instrument edaspidiseks arenguks, mis võib haarata järgmised aspektid: teiste võimalikke foorijuhtimisprogrammide läbimängimine, süsteemi laiendamine kaasates selleks kõrval asetsevad ristmikuid ning sõlmesid. Diplomitöö autori arvamusel, süsteemi veelgi parema funktsioneerimist (võrreldes parima pakutava stsenaariumiga) võivad tagada ka teised lahendused, mis näiteks hõlmavad piirkonna valgusfooride objektide ühinemist „rohelisele lainele“.

Käesolev lõputöö sai valmis kasutades kvantitatiivset uuringu meetodid, mille andmed ning tulemused tõestatud numbriliste näidikutega. Meetod keskendub mõõdetavatele suurustele, statistilistele analüüsidele ja objektiivsetele tulemustele. Seega võib väita, et saadud resultaat on usaldusväärne ja tööd võib pidada kasulikuks. Saadud tulemused võib rakendada praktikal, jälgides selle tagajärjed.

SUMMARY

Contemporary cities continually grapple with maintaining smooth and safe traffic flow, with a crucial focus on road and street infrastructure, particularly at intersections where diverse traffic flows converge. This study centers on analyzing and enhancing the Tehnika – Endla – Luise intersection in Tallinn, Estonia, a critical node in the city's traffic network facing challenges, particularly during evening rush hours, leading to congestion and complicating overall transportation.

Motivated by the necessity to explore and implement methods for enhancing traffic light regulation at the intersection, the study addresses the needs of residents, commuters, and urban planning. Ineffectively managing high traffic volumes could adversely affect the environment, causing congestion and negative externalities. The research aims to elevate traffic levels, reduce jams, and improve flow, aligning with primary traffic management goals.

Various methods for intersection improvement are explored, including examining existing traffic light systems and traffic control algorithms and analyzing traffic flows at different times. The research questions cover the current state of the intersection's traffic control system, characteristics of evening rush hour traffic flows, potential impacts of different control methods, and broader effects on surrounding intersections and the urban area.

The study seeks to balance high-traffic loads with sustainable urban development by addressing the multifaceted problem of improving traffic efficiency at the Tehnika – Endla – Luise intersection. The anticipated outcomes aim to contribute to solving traffic issues at the specific intersection and providing broader guidelines for addressing urban traffic problems.

The thesis is structured into four main sections: theoretical background, methodology, results, and consequences analysis. The theoretical section offers an overview of the studied object, describing evaluative aspects, possible problem-solving approaches, and the software used. The methodology section explains applied methods and evaluation criteria, detailing specific procedures. The third section presents PTV Vissim simulation results for the existing situation and scenarios with applied measures. In the final section, the author examines simulation results, compares them, and draws conclusions to find the most optimal solution.

The chosen method involves modifying the traffic light program, offering economic efficiency and rapid implementation. The author conducted a thorough study of the theoretical background, followed

by on-site and electronic data collection to formulate evaluation criteria and consider specific problem-solving approaches.

Data on the current state of the intersection's control system were obtained from the Traffic Management Department of the Tallinn Transport Authority, and Signaal AS manages the traffic signal system. The existing signal program is three-phased with a 90-second cycle. During the evening rush hour, an average of 5800 vehicles pass through, challenging traffic. Various microsimulation scenarios, including a base scenario and four scenarios proposing six different measures, were created using PTV Vissim software.

The results of the fourth scenario showed the most positive impact on the transportation network, involving a 90-second cycle consistent with Estonian standards and a modified signal program better accommodating traffic flows. The network created using PTV Vissim software is a valuable tool for future developments, potentially including testing other signal programs and expanding the system.

The thesis employs quantitative research methods with numerical data, focusing on measurable quantities, statistical analyses, and objective outcomes. Emphasis is placed on the reliability of obtained results and the practical applicability of findings. The research outcomes can potentially address traffic challenges at the Tehnika – Endla – Luise intersection and offer valuable insights for tackling broader urban traffic issues.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] EVS 843:2016, „Linnatänavad“, Eesti Standardikeskus, 2016.
- [2] Tallinna Linnavalitsus, „Tallinna teede liigid“, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tallinn.ee/et/tallinna-teede-liigid>. [Kasutatud 26 09 2023].
- [3] Maa-amet, „X-GIS“, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>. [Kasutatud 11 10 2023].
- [4] R. T. Underwood, Traffic management: an introduction., North Melbourne: Hargreen Publishing Company, 1990, p. 222.
- [5] „Liiklusseadus“, 01 07 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/117032011021?leiaKehtiv>. [Kasutatud 11 10 2023].
- [6] Sanderson Associates Consulting Engineers, „Traffic Signal Desing“, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.traffic-signal-design.com/traffic-signal-design-terminology.htm>. [Kasutatud 08 11 2023].
- [7] Y. Jiang, B. Zhao, M. Liu, Z. Yao, „A Two-Level Model for Traffic Signal Timing and Trajectories Planning of Multiple CAVs in a Random Environment“, *Journal of Advanced Transportation*, pp. 1-13, 2021.
- [8] J. Systemtechnik, „Traffic control center“, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.jungmann.de/en/solutions/traffic-control-center-for-traffic-management>. [Kasutatud 08 11 2023].
- [9] „Liiklusmärkide ja teemärgiste tähendused ning nõuded fooridele“, 01 01 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/123122020002?leiaKehtiv>. [Kasutatud 10 11 2023].
- [10] J. W. Buckholz, „Introduction to Traffic Signal Timing“, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Traffic%20Signal%20Timing-R1.pdf>. [Kasutatud 15 11 2023].

- [11] T. Metsvavi, Ristmike läbilaskvuse arvutamise metoodiline juhend, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2001, p. 102.
- [12] A. Sirajuddin, S. M. Abbas ja H. Zia, „Smart Cities—Opportunities and Challenges,“ *ICSC 2019*, Singapore, 2020.
- [13] A. Maria, „Introduction to modeling and simulation,“ *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, Binghamton, 1997.
- [14] C. Brown, „Erinevus modelleerimise ja simulatsiooni vahel,“ 08 02 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.strephonsays.com/modelling-and-vs-simulation-7175>. [Kasutatud 20 10 2023].
- [15] В. Н. Задорожный, А. С. Завальный ja О. Б. Шикло, „Имитационная экспертиза проектов решения транспортных проблем,“ *Омский научный вестник*, p. 4, 2015.
- [16] T. Kučera, „Design of the City Logistics Simulation Model Using PTV VISSIM Software,“ *Transportation Research Procedia* 53, pp. 258-265, 2021.
- [17] PTV Group, „PTV VISSIM,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim#usecases>. [Kasutatud 26 09 2023].
- [18] S. M. Hafram, S. Valery ja A. H. Hasim, „Calibrating and Validation Microscopic Traffic Simulation Models VISSIM for Enhanced Highway Capacity Planning,“ *International Journal of Engineering*, pp. 1509-1519, 2023.
- [19] Columbia River Crossing, „VISSIM CALIBRATION AND VALIDATION,“ 2006. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.wsdot.wa.gov/accountability/ssb5806/docs/3_Context_Constraints/TrafficData/00156_2006_08_28.pdf. [Kasutatud 15 09 2023].
- [20] A. T. AG, „Installation Manual TDC3 Series,“ Deutsche Akkreditierungsstelle, Eschenbach, Switzerland, 2017.

- [21] Signaal TM AS, „SEIRE Tallinn,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://specialist.signaal.ee/>. [Kasutatud 12 10 2023].
- [22] SWARCO, „SWARKO OMNIA,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.swarco.com/products/software/urban-traffic-management/omnia>. [Kasutatud 06 11 2023].
- [23] T. Metsvavahi, *Juhised tee-elementide läbilaskvuse arvutamiseks*, Tallinn, 2020, p. 102.
- [24] University of Idaho, „Signal Timing Design,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.webpages.uidaho.edu/niatt_labmanual/Chapters/signaltimingdesign/theoryandconcepts/CycleLengthDetermination.htm. [Kasutatud 1 11 2023].
- [25] Transportation Research Board, Highway capacity manual, Washigton: Transportation Research Board, 1997, p. 1207.
- [26] A. G. I. & C. S. Boora, „Identification of free flowing vehicles on two lane intercity highways under heterogeneous traffic condition,“ *Transportation Research Procedia*, pp. 130-140, 2017.
- [27] S. Lõvi ja ERR, „Keskmine palk oli teises kvartalis 1873 eurot, mediaanpalk 1524 eurot,“ 25 08 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.err.ee/1609076462/keskmine-palk-oli-teises-kvartalis-1873-eurot-mediaanpalk-1524-eurot>. [Kasutatud 08 11 2023].
- [28] GOV.UK, „TAG data book,“ Department for Transport, 30 11 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/tag-data-book>. [Kasutatud 16 12 2023].
- [29] PTV, „PTV Vissim and PTV Viswalk help,“ PTV Group, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISSIM_2023_ENG. [Kasutatud 10 11 2023].

LISAD

Lisa 1. Liiklusvoogude loenduse tulemused

Lisa 2. Liiklusvood ja rasketehnika osakaal

Lisa 3. Ühendusaja tulemused

Lisa 1. Liiklusvoogude loenduse tulemused

Manööver (%) Suund	Ristmik A (Tehnika - Endla - Luise)									
	Otse		Paremale		Vasakule		Tagasi		Kokku	Allikas
Tehnika (Paldiski)	189	45,4%	90	21,6%	137	33,0%	0	0,0%	415	kaamerad, käsiloendus
Tehnika (AleCoq)	160	17,7%	52	5,8%	692	76,5%	0	0,0%	904	kaamerad, käsiloendus
Endla LSS	1468	65,0%	544	24,1%	172	7,6%	76	3,4%	2260	kaamerad, käsiloendus
Luise LVS	862	97,1%	12	1,4%	14	1,6%	0	0,0%	888	vaatlus, käsiloendus
Suur-Ameerika LVS	1207	90,1%	129	9,6%	4	0,3%	0	0,0%	1340	vaatlus, käsiloendus
Ristmik B (Endla - Suur-Ameerika)										
Endla LSS	577	30,3%	1315	69,1%	12	0,6%	0	0,0%	1904	seire
Endla LVS (bussirada)	0	0,0%	67	100,0%	0	0,0%	0	0,0%	67	seire
Suur-Ameerika LVS	1200	91,2%	116	8,8%	0	0,0%	0	0,0%	1316	seire; vaatlus
Ristmik C (Toom-Kuninga - Suur-Ameerika)										
Suur-Ameerika LVS	1316	100,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	1316	seire
Suur-Ameerika LSS	1315	100,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	1315	seire
Toom-Kuninga	0	0,0%	36	23,7%	116	76,3%	0	0,0%	152	vaatlus, käsiloendus
Ristmik D (Suur-Ameerika - Pärnu mnt. - Liivalaia)										
Suur-Ameerika LSS	564	66,0%	148	17,3%	142	16,6%	0	0,0%	854	kaamerad, käsiloendus

Lisa 2. Liiklusvood ja rasketehnika osakaal

Voog a (Endla - Sõpruse - Tulika)						
Suund	Sõidua autod		Rasketehnika		Kokku	Allikas
Sõpruse LSS	525	95,8%	23	4,2%	548	Seire, 30.tipptund - 08.06.2023
Endla LSS	684	94,5%	40	5,5%	724	Seire, 30.tipptund - 08.06.2023
Tulika (Sõle)	578	99,0%	6	1,0%	584	Seire, 30.tipptund - 08.06.2023
Tulika (Kotka)	351	97,0%	11	3,0%	362	Seire, 30.tipptund - 08.06.2023
KOKKU	2138	96,4%	80	3,6%	2218	
Voog b (Tehnika - Paldiski mnt.)						
Paldiski LSS → PP Tehnika	443	98,0%	9	2,0%	452	Seire, 30.tipptund - 14.03.2023
Tehnika (Rohu)	91	91,9%	8	8,1%	99	Seire, 30.tipptund - 14.03.2023
KOKKU	534	96,9%	17	3,1%	551	
Voog c (Luise)						
Luise LVS	870	98,0%	18	2,0%	888	käsilõendus - 07.09.2023
KOKKU	870	98,0%	18	2,0%	888	
Voog d (Suur-Ameerika - Pärnu mnt. - Liivalaia)						
Liivalaia LVS	1306	99,3%	9	0,7%	1315	Seire, 30.tipptund - 11.08.2023
KOKKU	1306	99,3%	9	0,7%	1315	
Voog e (Tehnika - Vana-Lõuna)						
Vana-Lõuna → PP Tehnika	161	89,9%	18	10,1%	179	Seire, 30.tipptund - 19.04.2023
Tehnika (Veerenni)	892	97,2%	26	2,8%	918	Seire, 30.tipptund - 19.04.2023
KOKKU	1053	96,0%	44	4,0%	1097	

Lisa 3. Ühendusaja tulemused

nr	Ühenduslõik	Distsants, m	Stsenaariumi nr. / ühendusaeg, s							
			Free-flow	0	1	2a	2b	2c	3	4
1	Endla LSS – TP Endla LVS	560,0	58,2	176,3	414,7	208,4	209,3	283,1	197,6	192,1
2	Endla LSS – PP Tehnika AleCoq	678,7	64,3	115,6	141,5	152,4	148,3	142,1	122,8	121,6
3	Endla LSS – OS Endla LSS	1083,6	91,9	153,8	215,4	229,5	218,0	219,8	172,1	172,5
4	Endla LSS – VP Tehnika põhja poole	1019,0	91,0	188,1	449,9	221,6	226,1	307,9	215,7	204,6
5	Endla LSS – PP Suur Ameerika	1216,8	115,6	406,8	376,4	386,5	389,9	386,4	405,5	422,2
6	Tehnika põhja – PP Endla LVS	789,2	66,4	122,1	209,1	96,4	109,7	135,7	368,2	127,8
7	Tehnika põhja – OS Tehnika AleCoq	894,8	70,5	119,8	271,8	103,6	114,1	170,4	467,5	154,0
8	Tehnika põhja – VP Endla LSS	1469,1	112,6	234,8	412,8	163,1	194,7	245,4	593,7	279,1
9	Tehnika põhja – VP Suur Ameerika LSS	1602,4	127,2	455,4	539,5	274,5	296,8	386,4	789,4	530,5
10	Tehnika AleCoq – PP Suur Ameerika	1737,4	154,8	690,0	447,6	315,5	305,9	347,8	418,0	425,2
11	Tehnika AleCoq – PP Endla LSS	1604,4	144,6	498,6	327,8	203,4	184,2	212,8	238,8	227,4
12	Tehnika AleCoq – VP Endla LVS	1109,6	105,6	527,5	358,4	205,0	173,4	217,8	249,5	233,8
13	Tehnika AleCoq – OS Tehnika (põhja)	1568,9	144,3	583,9	413,9	275,3	230,4	275,4	310,5	280,6
14	Suur-Ameerika LVS – PP Endla LSS	1173,6	92,3	229,4	314,0	785,8	525,1	452,3	285,7	185,2
15	Suur-Ameerika LVS – VP Tehnika AleCoq	1415,4	103,9	269,3	510,6	995,4	680,8	618,6	362,6	256,7
16	Suur-Ameerika LVS – PP Tehnika põhja	1561,8	117,7	281,1	378,9	983,1	652,3	551,3	345,9	237,6
17	Suur-Ameerika LVS – OS Endla LVS	1144,5	85,4	262,9	367,1	991,7	650,0	541,3	337,3	229,1
18	Luisse LVS – PP Tehnika põhja	1302,3	103,8	135,3	161,9	1688,1	1485,0	795,0	213,1	191,8
19	Luisse LVS – VP Tehnika AleCoq	1155,8	93,3	185,1	347,9	2146,0	1882,2	1039,4	287,9	272,7
20	Luisse LVS – OS Endla LVS	884,8	75,0	139,5	177,2	1936,5	1622,8	951,2	228,5	213,5
21	Toom-Kuninga – PP Suur-Ameerika LSS	525,1	60,6	179,8	168,3	643,6	271,2	216,8	175,8	172,0
22	Toom-Kuninga – VP Tehnika AleCoq	1260,0	143,1	289,5	308,0	1219,1	687,6	594,3	277,6	255,6
23	Toom-Kuninga – VP Endla LVS	989,2	113,7	256,5	317,3	1076,9	585,3	456,3	294,2	231,6
24	Toom-Kuninga – VP Tehnika põhja	1406,4	156,3	290,9	338,7	1114,4	606,5	472,1	310,5	255,4