

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö inimgeograafias ja regionaalplaneerimises (30 EAP)

Tallinna ühistranspordi ligipääsetavuse hindamine GPS-andmete põhjal

Martin Haamer

Juhendaja:
Anto Aasa, PhD

TARTU 2022

Annotatsioon

Tallinna ühistranspordi ligipääsetavuse hindamine GPS-andmete põhjal

Ligipääsetavus on liikumisvajaduse ennustamise ja ühistranspordi planeerimise üks olulisemaid komponente. Nüüdisaja tehnoloogiad võimaldavad mobiilsusuuringutes kasutada suurandmeid, näiteks GPS-andmeid, kuid nende kasutus on seni veel vähene. Käesoleva magistr töö eesmärk on analüüsida Tallinna ühistranspordi ligipääsetavust GPS-andmete põhjal. Tallinnas on jätkuvalt probleemiks autostumine, mida võimaldaks pidurdada kõrge ligipääsetavusega, liikumisvajadustele vastav ühistranspordisüsteem. Ligipääsetavust on hinnatud kahe erineva meetodiga: mõõtes ühistranspordi teenustaset ja hinnates dünaamilist ligipääsetavust GPS-andmetest tuvastatud liikumiste sihtkohtadele ühistranspordiga Kalamaja ja Lasnamäe idaosa piirkonna näidetel. Tulemustest selgub, et ühistranspordiga ligipääsetavuse dünaamiline hindamine võimaldab tuvastada ligipääsetavuse ajalised erinevused, mis staatilise hindamise puhul jääksid arvestamata ja seega ei annaks objektiivset ülevaadet ühistranspordiga ligipääsetavusest. Töö väärtuseks on GPS-andmete töötlemiseks loodud meetodika ning meetod nende andmete rakendamiseks liikumismahtude kaardistamiseks ja ühistranspordivõrgu analüüsimiseks. Loodud meetodikat on võimalik edaspidi rakendada agregeeritud GPS-andmetest peamiste liikumismustrite ja sihtkohtade tuvastamiseks.

Märksõnad: ühistransport, dünaamiline ligipääsetavus, GPS, GIS

CERCS kood: S230 - Sotsiaalne geograafia; S240 – Linna ja maa planeerimine

Abstract

Assessing public transport accessibility utilising GPS data

Public transport accessibility is a key component in transportation planning. Technological advancements have facilitated the use of big data such as GPS data in mobility studies, however use in accessibility studies remains limited. The aim of the thesis is to analyse public transport accessibility using GPS data in Tallinn, Estonia. Increasing car dependency is a serious problem in Tallinn, which can be mitigated with a highly accessible public transport network based on actual travel demand. Accessibility is measured using two distinct methods: calculation of public transport supply based on a service index measure; utilizing dynamic accessibility with a case study measuring the accessibility to travel destinations identified from GPS data for districts of Kalamaja and eastern Lasnamägi. The results highlight the importance of measuring accessibility dynamically in order to obtain objective results versus static measures that do not consider time-based variations in accessibility. The relevance of the thesis lies in the development of a novel methodology for identifying travel demand and destinations from GPS traces to be used in mobility studies and transport planning.

Keywords: public transport, dynamic accessibility, GPS, GIS

CERCS code: S230 – Social geography; S240 – urban and rural planning

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
Uurimistöö eesmärgid ja teema varasem uuritus	6
Töö ülesehitus	7
1. TEOREETILINE ÜLEVAADE	8
1.1 Mobiilsuse uurimise taust ja meetodid	8
1.1.1 GPS-andmed	9
1.2 Ühistranspordi olulisus	9
1.3 Ühistranspordi ligipääsetavus	11
1.3.1 Ligipääsetavuse definitsioon.....	11
1.3.2 Transpordi ligipääsetavuse olulisus	12
1.3.3 Ligipääsetavuse hindamise meetodid	13
1.3.4 Dünaamiline ligipääsetavus	15
1.3.5 Ligipääsetavuse moodsused.....	16
1.4 <i>General Transit Feed Specification (GTFS)</i>	18
1.5 Tallinna ühistranspordi hetkeolukord	19
1.6 Tallinna ühistranspordivõrgu varasemad analüüsid	20
1.6.1 „Tallinna ühistranspordisüsteemi arendamine ja liinivõrgu optimeerimine“	20
1.6.2 „Tallinna regiooni liikuvuse mudeldamine“	21
2. ANDMED JA METOODIKA	22
2.1 Lähteandmed	22
2.1.1 GPS-positioneerimise andmed	22
2.1.2 Ühistranspordiandmed	23
2.1.3 Teedevõrk	23
2.1.4 Hoonete funktsionaalsus	24
2.1.5 Transporditsoonid	24

2.2	Uurimisala	25
2.3	GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamise meetoodika arendus.....	26
2.3.1	GPS-andmete esmane analüüs	26
2.3.2	GPS-andmetest üksikute liikumiste ja peatuste tuvastamine.....	26
2.3.3	OD-maatriksi koostamine	28
2.3.4	Liikumistest sihtkohtade tuvastamine.....	29
2.4	Ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamise meetoodika	30
2.4.1	Ühistranspordivõrgustiku modelleerimine.....	30
2.4.2	Ühistranspordi teenustase	31
2.4.3	Dünaamiline ligipääsetavus sihtkohtadele ühistranspordiga	33
3.	TULEMUSED	35
3.1	Ühistranspordi teenustase	35
3.2	Dünaamiline ligipääsetavus sihtkohtadele Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidetel.....	38
3.2.1	Kalamaja elanike sihtkohtade dünaamiline ligipääsetavus.....	40
3.2.2	Lasnamäe idaosa elanike sihtkohtade dünaamiline ligipääsetavus.....	41
4.	TULEMUSTE ARUTELU JA JÄRELDUSED	44
4.1	Tulemuste hindamine	44
4.1.1	Ühistranspordi teenustase	44
4.1.2	Dünaamiline ligipääsetavus	45
4.2	Meetoodika hindamine ja olulisus.....	47
4.3	Soovitused edaspidisteks uuringuteks.....	48
5.	KOKKUVÕTE.....	49
	Summary.....	51
	TÄNUAVALDUSED	53
	KASUTATUD KIRJANDUS	54
	LISA 1. ÜTRIS avaandmete struktuur (GTFS).....	59
	LISA 2. GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamise meetoodika arendus	60

SISSEJUHATUS

Transpordist tulenevate heidete vähendamine ja jätkusuutlikkuse suurendamine on Euroopa transpordisektori suurim väljakutse (COM, 2020). Põhiline strateegia seisneb transpordivõrkude efektiivsuse tõstmisel ja jätkusuutlike liikumisviiside kasutuselevõtus. Eesti uue, 2021. aastal vastuvõetud transpordi ja liikuvuse arengukava põhifookus on samuti transpordisüsteemi keskkonnajalajälje vähendamine. Eesmärk on 2035. aastaks tõsta ühistranspordi, jalgratturite ja jalakäijate osakaal linnapiirkondades 38,7%-lt (2020. a seisuga) 60%-ni. Ligi 50% liikumistest toimub Tallinnas ja ümbritsevates piirkondades, mistõttu on peamine fookus liikumisharjumuste muutmisel Tallinnas (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium [MKM], 2021). Tallinna linnaliiklus tekitab aastas 1 400 000 tonni CO₂ heidet, 2030. aastaks on seatud eesmärk vähendada heitkogus 930 000 tonnini (Jüssi et al., 2019).

Targa transpordikorralduse aluseks on andmepõhine planeerimine ja tegelike liikumisvajaduste arvestamine. Liikumismustrite kaardistamine ja peamiste sihtkohtade tuvastamine on oluline eeldus liikumisvajadustele vastava ühistranspordi planeerimiseks. Tänapäeva andmestunud maailmas on suurandmete põhised mobiilsusandmed kujunenud üheks peamiseks allikaks liikumismustrite uurimisel (Hadjidimitriou et al., 2021). Mobiiltelefonide laialdane levik 21. sajandil on eksponentsiaalselt suurendanud mobiilsusandmete mahtu ja võimaldanud liikumismustreid uurida seni võimatu täpsusega. Olulisemad meetodid on asukoha tuvastamine mobiilpositsioneerimise ja GPS-tehnoloogiate abil. Suurandmete töötamise eelduseks on olnud arvutijõudluse kasv ning arengud andmetöötamise meetodites, mis on võimaldanud üldisi liikumismustreid tuvastada üksikisiku liikumiste põhjal (Barbosa et al., 2018).

Liikumisvajaduse tuvastamine ja ennustamine on transpordi- ja linnaplaneerijatel üks peamisi väljakutseid, mistõttu on teemat põhjalikult uuritud paljude erinevate meetoditega ja lähenemistega. Sageli põhineb liikumisvajaduse määramine omavahel tihedalt seotud mobiilsuse ja ligipääsetavuse uurimisel. Ligipääsetavus on võtmetähtsusega mõõde mõistmaks transpordivõrgu ja maakasutuse koosmõju. Vaatamata ligipääsetavuse aina kasvavale olulisusele planeerimises ja hindamises, puudub ühtne arusaam selle mõõtmisest (Boisjoly & El-Geneidy, 2017).

Tallinna ühistranspordi liinivõrk on vananenud ja ei vasta tänapäeva liikumisvajadustele. Seda kinnitab ühistranspordi osatähtsuse järjepidev langus liikumisviiside jaotuses ning isikliku auto osatähtsuse tõus (Civitta Eesti, 2021). Ühistransport ei ole isikliku sõiduautoga

konkurentsivõimeline - keskmine ühistranspordiga liikumisele kuluv aeg ümberistumisega on natuke üle poole tunni, autot kasutades kulub samale liikumisele pea poole lühem aeg (Antov et al., 2016).

Uurimistöö eesmärgid ja teema varasem uuritus

Tallinna ühistransporti on seni uuritud suhteliselt vähesel määral. Viimasel kümnendil on avaldatud kaks mahukat liinivõrgu analüüsi: Antov et al. (2017) töö oli esimene põhjalik analüüs Tallinna ühistranspordi praegusest liinivõrgust ja Kalvo et al. (2021) töö modelleeris ja analüüsis uut liinivõrku Tallinnale ja ümbritsevatele regioonile. Civitta Eesti (2021) koostatud analüüs keskendus Tallinna regiooni ühistranspordi planeerimisele, juhtimisele ja finantseerimisele. Teemal on kirjutatud ka bakalaureusetöö: Lepik (2018) keskendus Tallinna ühistranspordi konkurentsivõimele isikliku sõiduauto kasutamise võrreldes.

Autorile teadaolevalt on käesolev töö esimene, mis keskendub Tallinna ühistranspordi ligipääsetavuse põhjalikule hindamisele, uurides ka ligipääsetavuse varieerumist kellaajaliselt. Samuti on teadaolevalt tegu esimese tööga, mis rakendab GPS-andmeid liikumisvajaduste määramiseks ühistranspordi ligipääsetavuse hindamiseks Tallinna näitel.

Lähteandmetena on kasutatud Tartu Ülikooli Mobiilsuslabori loodud nutitelefonide rakenduse MobilityLog kogutud GPS-positionsioneerimise andmeid, Transpordiameti Ühistranspordi infosüsteemi avaandmeid, kaardirakenduse OpenStreetMap (OSM) ruumiandmeid ja Ehitisregistri andmeid hoonete funktsioonide määramiseks.

Uurimistöö eesmärgid on seega:

- arendada metoodika GPS-andmetest inimeste liikumismustrite peamiste sihtkohtade tuvastamiseks Kalamaja, Priisle, Seli ja Kuristiku asumite elanike näidete põhjal;
- analüüsida ühistranspordiga dünaamilist ligipääsetavust rakendades GPS-andmetest tuvastatud liikumiste Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidetele;
- tuvastada puudujäägid olemasolevas ühistransporditeenusel ja analüüsi tulemustele tuginedes teha vastavad ettepanekud teenuse parendamiseks.

Eesmärkidele tuginedes sõnastati hüpotees: Tallinna olemasolev ühistranspordivõrgustik ei võimalda Kalamaja, Priisle, Seli ja Kuristiku asumite elanikele päeva jooksul stabiilset ligipääsetavust huvialuste sihtkohtadeni kuni poole tunni ajakuluga ühistransporti kasutades.

Töö tulemusena valmis uudne meetodika GPS-andmetest liikumiste peamiste sihtkohtade tuvastamiseks, mida on kasutatud ühistranspordiga ligipääsetavuse uurimisel. Samuti on koostatud põhjalik analüüs juurdepääsetavusest Tallinna ühistranspordivõrgule ja teenuse vastavusest liikumisvajadustele Kalamaja ja Lasnamäe idaosa piirkondade näidetel.

Töö ülesehitus

Töö esimeses peatükis tutvustatakse esmalt mobiilsuse uurimise tausta ja meetodeid. Seejärel antakse põhjalik ülevaade ühistranspordi olulisusest, ligipääsetavuse kontseptsioonist ja vastavatest mõõtmismetoodikatest. Peatüki lõpus analüüsitakse Tallinna ühistranspordivõrgu hetkeolukorda ja antakse ülevaade varasematest uuringutest Tallinna ühistranspordi kohta.

Teises peatükis kirjeldatakse analüüsis kasutatavaid lähteandmeid, tutvustatakse GPS-andmete analüüsiks loodud meetodikat ja ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamise meetodikat.

Kolmandas peatükis on esitatud ühistranspordiga ligipääsetavuse analüüsi tulemused ja neljandas peatükis on tulemusi põhjalikumalt aruteletud ning hinnatud töös kasutatud meetodika asjakohasust. Lõpuosas antakse soovitusi teema edaspidiseks uurimiseks.

1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

Käesolevas peatükis tutvustatakse üldiselt mobiilsuse uurimise tausta ja meetodeid, ühistranspordi olulisust, ühistranspordi ligipääsetavuse kontseptsiooni ja erinevaid lähenemisi selle hindamiseks. Uurimistööl analüütilise osaga tutvumisele eelnevalt on tarvis mõista uurimisteema olulisuse põhjuseid, teoreetilisi käsitlusi ja uurimismeetodeid. Eraldi alapeatükis antakse ülevaade uurimisala ehk Tallinna linna ühistranspordi hetkeolukorra probleemidest ja varasematest ühistranspordivõrgu analüüsist.

1.1 Mobiilsuse uurimise taust ja meetodid

Mobiilsusel on laialdane mõju ühiskonnale ja täpne kvantitatiivne arusaam inimeste liikumistest on määrava tähtsusega mõistmaks liikumisega seotud protsesse ja selle mõjusid ühiskonnale ja keskkonnale. Inimeste mobiilsuse uurimisega on seotud paljud teadusharud, kuid geograafia eriala oli esimene, mis tegeles mobiilsusandmete analüüsiga ja kujundas vastavad teooriad liikumismustrite kirjeldamiseks. 20. sajandil uuriti mobiilsust valdavalt populatsiooni tasemel ja sellesse panustasid nii geograafid, sotsioloogid kui ka majandusteadlased (Barbosa et al., 2018).

Nüüdisaja tehnoloogilised arengud ja arvutijõudluse kasv on võimaldanud 1990-ndatest alates mobiilsuse uurimisel järjest enam keskenduda indiviidile populatsiooni asemel. Torsten Hägerstrand lõi 1950-ndatel aastatel ajageograafia aluse, mis keskendus indiviidi liikumismustritele ruumis ja ajas. Liikumismudelite täpsust piiras aga vajalike andmete omandamise keerukus (Barbosa et al., 2018). Igapäevase mobiilsuse kasv on tinginud mobiiltelefonide ja GPS-andurite laialdase leviku 21. sajandil, mis on põhjustanud eksponentsiaalse kasvu liikuvusandmete mahus (Ahas et al., 2010). Pidevast passiivsest mobiilpositsioneerimisest tuletatud CDR (ingl. k. *Call Detail Record*) ehk telefonikõnede eristuse andmed on võimaldanud mobiilsust uurida väga mahukal ajalisel skaalal. Seega on tänapäeval olemas pikaajalise ja täpse ajalise skaalaga liikumistatistika nii üksikindiviidi, kogukonna kui ka rahvastiku tasemel (Solmaz & Turgut, 2019).

Vanimad mobiilsuse uurimisel kasutatud andmestikud pärinevad rahvaloendustest. Põhjalikumad liikumismustrite taustainfot reisi põhjuse, kestuse ja liikumisevahendi kohta on uuritud lokaalsete liikuvusuuringutega. Suurenenud täpsuse ja põhjalikkuse arvelt väheneb aga uuringu ulatus — liikuvusuuringud on olnud märkimisväärselt väiksema valimiga

rahvaloendustega võrreldes. Suurima muutuse mobiilsuse uurimisel tõi kaasa mobiilpositsioneerimise tehnoloogiaga. Iga telefonikõne või -sõnumi toimumisaeg ja asukoht fikseeritakse automaatselt mobiilsidemasti täpsusega, tagades kasutajate anonüümsuse. Erinevalt rahvaloendustest ja liikuvusuuringutest võimaldab CDR andmekogumismeetod uurida üksikisikute liikumismustreid pikaajaliselt erinevatel ajaskaaladel (Barbosa et al., 2018).

1.1.1 GPS-andmed

Suurima täpsusastme mobiilsuse uurimisel võimaldab GPS-tehnoloogia ehk globaalne asukoha määramise süsteem, üldisema terminiga GNSS (ingl. k. *Global Navigation Satellite System*) ehk satelliitidel põhinev ülemaailmne navigatsioonisüsteem. Tänapäeval on enamik mobiiltelefone ja liiklusvahendeid (sõiduauto, ühissõidukid, linnarattad) varustatud GPS-võimekusega. Tehnoloogia võimaldab isiku asukohta tuvastada suurema ruumilise ja ajalise täpsusega kui mobiilpositsioneerimise abil, luues rikkaliku andmestiku inimeste liikumismustrite kaardistamiseks. GPS-andmetest on võimalik tuvastada nii individuaalseid liikumistrajekteore kui ka ajavahemikke, mil liikumine on minimaalne ehk peatuseid (Barbosa et al., 2018; Solmaz & Turgut, 2019). Agregeerides üksikisikute GPS-trajekteore alg- ja sihtpunkti põhiselt on võimalik kaardistada inimeste üldisi liikumismustreid.

GPS-andmete täpsus on varieeruv, kuna sõltub satelliitide kättesaadavusest ja ümbritsevast keskkonnast. Tihedalt hoonestatud linnaruumis on leitud, et GPS-positsioneerimise täpsus jääb vahemikku 7–13 meetrit (Merryid & Bettinger, 2019). Siseruumides on GPS-seadmete täpsus tunduvalt madalam ning põhjustab vigu asukoha fikseerimisel (Solmaz & Turgut, 2019).

1.2 Ühistranspordi olulisus

XXI sajandi teisest kümnendist alates on aina enam teadvustatud ühistranspordi olulisust elukvaliteedi tõstmisel (Bok et al., 2016). Linnastumine ja jätkuvalt kasvav linnaelanike arv on põhjustanud liikluskoormuse kasvu Euroopa riikides, mis omakorda on toonud kaasa laialdased liiklusummikud. Viimaste tagajärjel läheb kaduma enam kui 110 miljard eurot ehk 1% EL-i SKT-st aastas. Transpordist tulenevad heited moodustavad peamise osa Euroopa õhusaastest, mis on tõsine oht keskkonnale (European Court of Auditors, 2019). Liikumisevajadustele vastavad efektiivsed ühistranspordiühendused tugevdavad linna majanduse ja keskkonna konkurentsivõimet. Multimodaalne ja kasutajate vajadustele

orienteeritud transpordisüsteem võimaldab inimestel kokku hoida aastas vähemalt 300 miljonit eurot (Jüssi et al., 2019).

Isikliku sõiduauto kasutusel põhinev transpordisüsteem kahjustab rängalt nii inimeste endi kui ka keskkonna tervist. Autokasutuse vähendamise eelduseks on heal tasemel ligipääsu tagamine huvialustesse sihtkohtadesse alternatiivsete liikumisviisidega (Mavoa et al., 2012). Eelmainitu saavutamiseks on esmatähtis, et ühistranspordivõrgustik põhineks reaalsel liikumisvajadusel ning oleks tihedalt integreeritud teiste liikumisviisidega (Saghapour et al., 2016). Seetõttu on ühistranspordi analüüsimine ja hindamine võtmetähtsusega linna efektiivsele toimimisele (Bok et al., 2016).

Ühistranspordi peamine omapära teiste liikumisviisidega võrreldes on süsteemi avatus suurele kasutajaskonnale. Ühistransporditeenuse üks eesmärkidest on ligipääsetavuse võimaldamine võimalikult suurele kasutajaskonnale ning erinevalt isikliku sõiduauto, mootorratta või ka näiteks jalgrattaga liikumisele, puudub vajadus kindla isikliku liikumisvahendi olemasoluks. Ühistranspordile on omased mitmed unikaalsed tegurid, mis süsteemi ligipääsetavust tugevalt mõjutavad, näiteks kindlad transpordiliinid, sõidugraafikud ja kasutajate ruumiline paiknemine. Ühistranspordil on ühtlasi oluline roll mobiilsusõigluse seisukohast, kuna võimaldab liikuda kaugematesse sihtkohtadesse ka neil, kellel puudub isiklik liikumisvahend (Bok et al., 2016; Lei & Church, 2010).

Ühistranspordivõrgustik on linnasüsteemi lahutamatu osa ning kvaliteetne ja efektiivne ühistranspordisüsteem suurendab liikumisvõimalusi linnas ja seeläbi ligipääsetavust (Bok et al., 2016), vähendab energiakulu ja elanike keskkonnajalajälge, leevendab liikluskoormust, soodustab tervislikku ja aktiivset liikumist ning vähendab sotsiaalset tõrjumist (Chen et al., 2018). Ühistransporditeenuse ebaühtlane kvaliteet linnas võib põhjustada sotsiaalset tõrjumist ja liikumisvaesust — haavatavad sotsiaalsed grupid paiknevad sageli piiratud ühistransporditeenuse ja/või ligipääsetavusega aladel. Lisaks on ühistranspordil oluline roll majanduslikult kehvemal järjel olevatele inimestele liikumisvõimaluste tagamisel (Currie, 2010). Modaalnihe ühistranspordi kasuks põhineb eeldusel, et ühistransport on laialdaselt kättesaadav ja kõrge ligipääsetavusega (Saif et al., 2018).

1.3 Ühistranspordi ligipääsetavus

Transpordisüsteemide uurimisel ja planeerimisel on ligipääsetavus üks olulisemaid komponente (Lei ja Church, 2010; van Wee, 2016). Ligipääsetavuse definitsioon ja hindamise meetodika varieeruvad teadusharust ja eesmärgist sõltuvalt. Transpordiplaneerimisel on ligipääsetavust rakendatud eelkõige liikumisvajaduse ennustamisel ja ühistranspordisüsteemi planeerimisel (Bejleri et al., 2018). Viimase kahe kümnendi jooksul on ligipääsetavust käsitlevates teadustööde arvus toimunud märkimisväärne suurenemine (van Wee, 2016). Ligipääsetavuse mõõdikute ja mudelite arendamisele on keskendunud suur hulk teadustöid, kuid vähem on käsitletud ligipääsetavust kasutades ühistranspordi liikumisviisina. Põhjus võib olla ühistranspordi andmete piiratud kättesaadavuses ja süsteemi iseärasustes, mis raskendab ühistranspordiga tehtavate reise modelleerimist (Mavoa et al., 2012).

Vaatamata ligipääsetavuse aina suuremale tähelepanule ja ulatuslikumale uurimisele on kontseptsiooni rakendamine transpordiplaneerimisel piiratud ning endiselt domineerib mobiilsuspõhine lähenemine, mis on valdavalt keskendunud autoliikluse sujuvamaks muutmisele suurendades liikumiskiirusi ja vähendades ummikuid. Viimaste tulemusena on peamised investeeringud suunatud liikluse läbilaskvuse suurendamisele, ignoreerides samas alternatiive autokasutuse vähendamiseks (Boisjoly & El-Geneidy, 2017).

Transpordi- ja linnaplaneerijate seas süveneb veendumus, et transpordiplaneerimise peamine fookus peaks muutuma senisest läbilaskvuse suurendamisest ligipääsetavuse tagamisele (Kim & Lee, 2019). Seda toetab ka *travel time budget* teooria, mis väidab, et inimene kulutab igapäevasele liikumisele keskmiselt ligi tund aega sõltumata asukohast ja ajast. Seega ei ole liikumise ajakulu kokkuhoid mõistlik argument investeeringute tegemisel (Ahmed & Stopher, 2014).

1.3.1 Ligipääsetavuse definitsioon

Üldjoontes tähendab ligipääsetavus füüsilist juurdepääsu teenustele, kaupadele ja sihtkohtadele. See on mõõde teatud piirkonna eelisseisundist teiste piirkondadega võrreldes (Saif et al., 2018). Üheks laialtlevinuima ja ka vanima ligipääsetavuse definitsiooni on sõnastanud Hansen (1959), kirjeldades seda potentsiaalsete kokkupuutevõimalustena. Kaasaegsemad definitsioonid hõlmavad enamasti sihtkohtasid ja neis paiknevaid funktsioone ning vajalikke kulutusi sihtkohtadesse jõudmiseks, mis võivad olla mõõdetud näiteks ajas, vahemaas või rahalises kulus (van Wee, 2016). Käesoleva töö autori hinnangul on ühe selgema ligipääsetavuse definitsiooni sõnastanud Geurs ja Van Wee (2004): „ulatus, mil määral

maakasutus ja transpordisüsteemid võimaldavad inimestel jõuda sihtkohtadeni ja sealsete tegevusteni ühe või mitme liikumisviisiga“.

1.3.2 Transpordi ligipääsetavuse olulisus

Ligipääsetavuse mõõdikud on kujunenud transpordist tulenevate keskkonnamõjude ja liikuvusvaesuse leevendamise peamisteks vahenditeks, hinnates alternatiivsete liikumisviiside kvaliteeti ja kättesaadavust (Benenson et al., 2011). Transpordi- ja linnaplaneerijad on ligipääsetavust kasutanud transpordi efektiivsuse, sotsiaalse tõrjumise riski ja transpordiinvesteeringute hindamiseks (Stepniak & Goliszek, 2017). Ligipääsetavuse määras kajastuvad maakasutuse ja transpordisüsteemide positiivsed mõjud. Näiteks seostatakse suurenenud ligipääsetavust kõrgeenenud maahinna ja tööhõive määraga ning madalama riskiga haavatavate rahvastikurühmade sotsiaalseks tõrjumiseks (Boisjoly & El-Geneidy, 2017).

Ühistranspordiga ligipääsetavuse parendamine on oluline peamiselt kahel põhjusel.

Esiteks vähendab ühistranspordi parem ligipääsetavus sõltuvust isiklikust sõiduautost ning seeläbi vähendatakse ka autoliiklusest tulenevaid negatiivseid tervise- ja keskkonnamõjusid. Kõrgel tasemel autostumist on seostatud kasvuhoonegaaside ja liiklusummikute suurenemisega, liiklusõnnetuste arvu kasvuga, füüsilise mitteaktiivsuse suurenemisega ja sellest tingitud terviseprobleemide kasvuga (Mavoa et al., 2012).

Teiseks on elanikkonnas märkimisväärne hulk inimesi, kes oma igapäevastes liikumistes sõltuvad ühistranspordist. Mobiilsusõigluse seisukohast on oluline, et ühistransport võimaldaks isikliku sõiduautoga võrdväärset ligipääsetavust sihtkohtadele (Mavoa et al., 2012). Ligipääsetavuse mõõdiku abil on võimalik tuvastada piirkonnad, kus sihtkohtade juurdepääsetavus on piiratud (Boisjoly & El-Geneidy, 2017). Vajadust liikuda saab pidada inimesele omaseks ning ligipääsetavust mõõdikuks sellest, kui suures ulatuses on erinevatel gruppidel võimalik igapäevategevustes osaleda (Benenson et al., 2011). Piiratud ligipääs on peamiseks takistuseks inimeste täisväärtuslikule osalemisele sotsiaalses ja majanduslikus ühiskondlikus elus ning üheks peamiseks sotsiaalse tõrjutuse põhjustajaks. Ligipääsetavuse ja sotsiaalse tõrjutuse omavahelist seost uuritakse aina rohkem ning transpordiuringute fookus on nihkunud järjest enam võrdväärsuse tagamisele (Stepniak & Goliszek, 2017).

Transpordiplaneerijad ja teadlased on ligipääsetavuse põhjal ennustanud potentsiaalset ühistranspordikasutajate hulka ja andnud hinnanguid ühistransporditeenuse kvaliteeditasemele (Kim & Lee, 2019; Lei & Church, 2010). Paraku on ühistranspordi planeerimisel sageli fookus

asetatud ülalpidamiskulude vähendamisele ligipääsetavuse parendamise asemel (Saif et al., 2018).

Ligipääsetavuse kvantitatiivsest hindamisest on kujunenud oluline analüütiline lähenemine ning selle põhjal on uuritud lisaks transpordivõrkude efektiivsusele ka linna majanduslikku võimekust, sotsiaalsed ebavõrdsust, erinevate funktsioonide ruumilist võrdsust ning ka linnaelanike tervist ja elukvaliteeti (Järv et al., 2018). Ligipääsetavust on peetud väärtuslikuks indikaatoriks, mis integreerib nii maakasutuse kui ka transpordivõrgu ning seega võimaldab planeerijatel langetada otsuseid, mis käsitlevad mõlemaid valdkondi (Benenson et al., 2011).

Ligipääsetavuse mõiste on pikemat aega olnud planeerimise diskursuse oluline osa, kuid vastavate indikaatorite rakendamist on piiranud vähene arusaam mõõdikutest, mõiste varieeruvad definitsioonid ja mõõtmisega seotud probleemid (Páez et al., 2012). Transpordiplaneeringutes ja -arengukavades on ligipääsetavuse parendamisest kujunenud oluline eesmärk, kuid vastavate indikaatorite rakendamine on olnud piiratud (Boisjoly & El-Geneidy, 2017).

1.3.3 Ligipääsetavuse hindamise meetodid

Ligipääsetavust mõjutavad mitmed erinevad faktorid, millest tulenevalt on mitmeid erinevaid lähenemisi selle hindamiseks. Esiteks mõjutab ligipääsetavust maakasutus, mis määrab erinevate funktsioonide ruumilise paiknemise. Teiseks oluliseks mõjutajaks on transpordivõrgustik, mis määrab liikumisele kuluva aja, maksumuse ja liikumise mugavuse. Kolmandaks sõltub ligipääsetavus ajalistest piirangutest, mida määravad sihtkohtade lahtiolekuajad, isiklik ajakasutus ja ühistranspordi sõidugraafikud (Boisjoly & El-Geneidy, 2017). Vaatamata ligipääsetavuse olulisusele, puudub ühtne arusaam selle mõõtmiseks ning erinevad uurijad on kasutanud erinevaid mõõdikuid (Lei & Church, 2010).

Transpordiplaneerimisel ja -analüüsis rakendatakse peamiselt asukohapõhiseid ligipääsetavuse mõõdikuid (Boisjoly & El-Geneidy, 2017) individipõhiste mõõdikute asemel (Owen & Levinson, 2015). Mavoa et al. (2012) on transpordi ligipääsetavuse mõõdikud jaganud kolme kategooriasse:

1. füüsiline ligipääs ühistranspordipeatusteni;
2. ühistranspordiga liikumise ajaline kestus;
3. juurdepääs erinevatele funktsioonidele ühistranspordiga.

Järgnevalt on igat kategooriat lähemalt tutvustatud ja toodud välja olulisi uuringuid.

1.3.3.1 Füüsiline ligipääsetavus

Kõige algelisem asukohapõhine ligipääsetavuse mõõde hindab transpordisüsteemi füüsilist ligipääsetavust ehk peatusesse jõudmise ajakulu või läbitud vahemaad (Lei & Church, 2010). Peatuse teeninduspiirkonna arvutamisel on kasutatud nii eukleidilise distanttsiga puhvrit (Currie, 2010) kui ka tänavavõrgu läbimisest tulenevat vahemaad (Mavoa et al., 2012). Määravat rolli omab siinjuures liikumisele maksumuse seadmine peatusesse jõudmiseks. Läbitud vahemaast lähtudes on tüüpiliselt peatuse ligipääsetavuse hindamisel kasutatud 400 meetri distantssi bussi- ja trammi- ning 800 meetrit rongipeatuse puhul (Currie, 2010; Mavoa et al., 2012). Ajalist kulu rakendades on mitmetes uuringutes lähtutud transpordiliigile vastavalt 5- ja 10-minutilise ajakuluga, ning siinjuures mängib olulist rolli jalgsi liikumise kiirus (Stepniak & Goliszek, 2017).

Peatuse ligipääsetavuse hindamine on vajalik, kuna moodustab lahutamatu osa ühistranspordiga liiklemisel. Peatuse lähedus võib oluliselt mõjutada liikumisviisi valikut ja liikumisele kuluvat aega, kuid pelgalt füüsilise ligipääsu rakendamine ignoreerib teisi ligipääsetavust mõjutavaid faktoreid ning seega ülehindab ligipääsetavust (Lei & Church, 2010). Ainuüksi füüsilise ligipääsetavuse mõõtmine ei võimalda ühistranspordi kvaliteeti adekvaatselt hinnata, näiteks on Polzin et al. (2002) välja toonud mitmeid juhtumeid, kus ühistranspordi füüsiline ligipääsetavus piirkonnas on väga kõrge, kuid ühistranspordi osakaal liikumisviiside jaotuses kaduvväike.

1.3.3.2 Ühistranspordiga liikumise ajaline kestus

Täpsem ligipääsetavuse mõõde hõlmab lisaks peatuse füüsilisele ligipääsule ka kasutaja võimalusi sihtkohta jõudmiseks ühistranspordiga ning selle ajalist kulu. Liikumisele kuluvat aega on sageli kasutatud iseloomustamiseks sihtkoha ligipääsetavuse lihtsust (Järv et al., 2018). Ajalise kulu hindamiseks on erinevaid lähenemisi, varasemad uuringud on valdavalt kasutanud läbitud vahemaad ja liikumisviisi keskmist kiirust, keerulisemad mudelid arvestavad lisaks keskmise ühistranspordi kasutamise oote- ja ümberistumisajaga ning uuemad mudelid rakendavad sõidugraafiku informatsiooni. Ühistranspordiga liikumise ajakulu sõltub suuresti marsruutidest ja sõidugraafikutest, seega pelgalt läbitud vahemaa rakendamine ajakulu hindamisel võib põhjustada märkimisväärseid vigu (Lei & Church, 2010). O'Sullivan et al. (2000) rakendasid ajaliselt lühima teekonna mudelit kasutades Dijkstra algoritmi ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamiseks, mille tulemusel valmisid kaardid, mis kujutasid

ühistranspordiga liikumise ajakulu isokroonidena. Lei ja Church (2010) arendasid mannitud metoodikat edasi, arvestades ka dünaamilist ligipääsu eri kellaaegasid kasutades.

Ühistranspordiga liikumise ajaliskestust on võrreldud sama liikumise kestusega isikliku sõiduautot kasutades. Benenson (2011) võrdles ühistranspordiga ja isikliku autoga ligipääsetavuse erinevusi Tel Avivis. Salonen ja Toivonen (2013) uurisid Helsingi piirkonnas ajalise kulu erinevusi ühistranspordiga ja isikliku sõiduautoga sihtkohta liikumisel ning kuidas erinevused varieerusid mudeli detailsusele vastavalt.

1.3.3.3 Ühistranspordi juurdepääs erinevatele funktsioonidele

Seni käsitletud lähenemised hindavad juurdepääsu kindlatele sihtkohtadele ühistranspordiga, kuid ei arvesta sihtkohas olevate funktsioonidega. Üleüldise ligipääsetavuse oluline komponent on ligipääs võimalikult paljudele erinevatele funktsioonidele (Mavoa et al., 2012). Järgnevalt väljatoodud tööd arvutavad kindlale asukohale üleüldise ligipääsetavuse indeksi teatud funktsioonideni jõudmiseks, näiteks raamatukogudeni või toidupoodideni (Lei & Church, 2010). Mavoa et al. (2012) rakendasid *PTWAI* (ingl. k. *Public Transit and Walking Accessibility Index*) indeksi hindamiseks ligipääsu 17-le erinevale funktsioonile Aucklandis Uus-Meremaal. Farber et al. (2014) uurisid dünaamilist ligipääsu toidupoodidele ühistranspordiga Cincinnatis Ohios. Järv et al. (2018) viisid läbi sarnase uuringu Tallinnas.

Ühistranspordi erinevaid tahke on keeruline modelleerida ning seega on enamik uuringuid piirdunud ligipääsetavuse uurimisel füüsilise ligipääsu aspektist lähima peatuseni (Nassir et al., 2016; Salonen & Toivonen, 2013). Samuti on mitmed varasemad geoinfosüsteeme ehk GIS programme rakendanud tööd piirdunud ligipääsetavuse uurimisel eukleidiliste puhvrite loomisega vaatamata GIS-i tänavavõrgupõhise analüüsi võimekusele (Biba et al., 2010).

1.3.4 Dünaamiline ligipääsetavus

Ligipääsetavuse ruumilised erinevused ei ole konstantsed vaid varieeruvad kellajaliselt, kuid paljudes uuringutes ei ole kellaaja rolli ligipääsetavuse modelleerimises piisavalt teadvustatud. Enamik asukohapõhiseid ligipääsetavuse mudeleid käsitlevad ühistranspordiga ligipääsetavust ajas muutumatuna. Üheks põhjuseks võib olla vastava ajalise lahutusega ruumiandmete puudumine (Järv et al., 2018). Uued ajapõhised andmestikud on loonud seni olematud võimalused ligipääsetavuse dünaamika uurimiseks. Enamik dünaamilist ligipääsu arvestavad lähenemised rakendavad lühima teekonna algoritme ja sõidugraafikuid kiireima ühendusaja tuvastamiseks kahe asukoha vahel kindlal ajahetkel (Nassir et al., 2016). Näidete hulka

kuuluvad (Farber et al., 2014; Järv et al., 2018; Lei & Church, 2010; Owen & Levinson, 2015; Salonen & Toivonen, 2013; Stepniak & Goliszek, 2017).

Ligipääsetavus erinevate liikumisviisidega varieerub päeva lõikes märgatavalt — liiklusummikud tipptunnil pikendavad autoga või ebapiisava eraldiseisva infrastruktuuri tõttu ühistranspordiga liikumise ajakulu oluliselt (Farber et al., 2014). Ühistransporti mõjutavad lisaks veel väljumisajad ja väljumissagedus ning ümberistumiste sünkroniseerimine (Bok et al., 2016). Seega on ligipääs ühistranspordiga olemuselt dünaamiline ning selle staatiline hindamine ei võimalda ligipääsetavuse erinevaid tahke adekvaatselt hinnata (Farber et al., 2014). Väljumissageduse hindamisel võib summeerida väljumiste arvu mingi perioodi jooksul, näiteks nädala (Currie, 2010) või klassifitseerida teenust keskmise väljumiste sageduse põhjal (Bok et al., 2016).

Dünaamilise ligipääsetavuse hindamisel on ajasamm olnud uuringutes varieeruv. Rakendatud on ühe-minutilist (Farber et al., 2014; Owen & Levinson, 2015), viie-minutilist (Fransen et al., 2015), 12-minutilist (Järv et al., 2018), 15-minutilist ajasammu (Stepniak & Goliszek, 2017) ja pikemaid, isegi mitmetunniseid ajasamme. Kõrge ajaline lahtusvõime võimaldab täpsemaid tulemusi, kuid suurendab eksponentsiaalselt nõudlust arvutijõudlusele. Stepniak et al. (2019) jõudsid erinevate ajasammude põhjal arvatud tulemuste omavahelisel võrdlemisel järeldusele, et parim kompromiss täpsuse ja arvutijõudluse suhtes on 15–20-minutiline ajasamm.

Kokkuvõttes hoomab põhjalik ühistranspordi ligipääsetavuse dünaamiline hindamine ajakulu peatusse jõudmiseks, ooteaega, sõidu kestust ja peatusest sihtkohta jõudmiseks kuluvat aega. Seni vaid üksikud uuringud arvestavad kõiki mainitud liikumise komponente (Mavoa et al., 2012).

1.3.5 Ligipääsetavuse mõõdikud

Ühistranspordiga ligipääsetavuse uurimisel rakendatakse enamasti teatud mõõdikut ligipääsetavuse ruumiliste erinevuste tuvastamiseks. Järgnevalt on tutvustatud kolme olulist mõõdikut, mis on leidnud laialdast kasutust mitmes uuringus ja ka transpordiplaneerimisel.

- *PTWAI* (ingl. k. *Public Transit and Walking Accessibility Index*) ehk ühistranspordi ja jalgsiliikumise juurdepääsusindeks, mõõdab potentsiaalset ligipääsu teatud sihtkohtadele ühistranspordiga ja jalgsi liikudes. Indeks põhineb liikumise ajakulul ja keskmisel ooteajal peatuses, kuid ei arvesta väljumiste sagedusega (Mavoa et al., 2012).

- Londoni transpordiagentuur Transport for London (TFL) on kasutanud *PTAL* (ingl. k. *Public Transport Access Level*) ehk ühistranspordi juurdepääsutase indeksit detailse mõõtmena asukoha ühenduvusest ühistranspordiga. Indeksit kasutatakse sisendina elamurajoonide planeerimisel — kõrgema *PTAL* väärtusega asukohad on sobilikumad tiheasustuseks. Indeks arvestab jalgsi liikumise aega teedevõrgus lähima ühistranspordi peatuseni, liinide ja transpordiliikide arvu peatuses ja keskmist ooteaega peatuses (Transport for London, 2014).
- Currie (2010) on tuletanud *SI* (ingl. k. *Supply Index*) indeksi, mis arvestab väljumiste sagedusega ja peatuse teeninduspiirkonnaga teatud ruumiüksuse ühistranspordi teenustaseme hindamiseks. Bussi- ja trammipeatuste puhul on rakendatud 400m, rongipeatuste puhul 800m eukleidilist puhvrit teeninduspiirkonna määramiseks. Ruumiüksuse *SI* indeks arvutatakse valemiga:

$$SI_R = \sum N \left(\frac{S_{Pn}}{S_R} * VA_P \right),$$

kus SI_R on ruumiüksuse R teenustase, N on peatuste puhvrite arv ruumiüksuses, S_P on peatuse puhvri pindala, S_R on ruumiüksuse pindala ja VA_P on peatuse väljumiste arv ühes nädalas (täpsem selgitus ja näide on peatükis 2.4.2). Indeksi peamine puudujääk on eeldus, et rahvastiku paiknemine ja sihtkohad on ruumiüksuse siseselt ühtlaselt jaotunud (Currie, 2010). Mitmed hilisemad uuringud on valemit edasiarendanud, kasutades näiteks pindala asemel katastriüksuseid (Bejleri et al., 2018) ja võttes arvesse ka rahvaarvu (Jaramillo et al., 2012; Saghapour et al., 2016). Viimased on lähtunud asjaolust, et rahvastik on ruumiüksuse siseselt ühtlaselt jaotunud.

- Ruumiüksuse ligipääsetavuse hindamisel on laialdaselt kasutatud mõõdet, mis summeerib kindla aja jooksul juurdepääsetavate sihtkohtade hulga. Mõõdet tuntakse kumulatiivse ligipääsetavusena ja selle valem on järgmine:

$$A_i = \sum_{j=1}^j B_j O_j,$$

kus A_i on kumulatiivne ligipääsetavus punktist i sihtkohtadeni ruumiüksuses j , O_j on sihtkoha kaal ja B_j on binaarne väärtus sõltuvalt sellest, kas ruumiüksus on eelmääratud ajavahemiku θ jooksul juurdepääsetav ($B_j = \begin{cases} 1 & kui j \leq \theta \\ 0 & kui j > \theta \end{cases}$) (Goliszek et al., 2020).

1.4 *General Transit Feed Specification (GTFS)*

Ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamisel on varasemalt peamine täpsust kahandav tegur olnud ühistranspordiga sõiduaegade määramine. Mugava meetodi puudumine sõidugraafikute rakendamiseks analüüsis on 2010-ndatele eelnevalt sundinud ligipääsetavust hindama lihtsustatud transpordimudelitel alusel. Näiteks on ühistranspordiliinidele määratud keskmine kiirus ja väljumiste arv tunnis, millest tuletatakse sõiduaeg kahe asukoha vahel (Owen & Levinson, 2015).

GTFS (ingl. k. *Genral Transit Feed Specification*) on muutunud viimase kümnendi jooksul *de facto* standardiks ühistranspordi sõiduplaanide ja marsruutide talletamiseks. GTFS loodi erinevate ühistranspordi teenusepakkujate andmestike ühtsele formaadile viimiseks, võimaldades teenusepakkujateülest reisiplaneerimist. Ülemaailmselt GTFS andmestike põhjal reisiplaneerimise võimaldamise hea näide on Google Transit, mida rakendab Google Maps (Wessel & Farber, 2019).

Lisaks hõlpsale reisiplaneerimisele võimaldab GTFS andmestruktuur lihtsa vaevaga uurida reisiaegasid ükskõik millise kahe asukoha vahel linnas või isegi üleriigiliselt. Seetõttu on GTFS laialdaselt rakendatud transpordiligipääsetavuse uurimisel mitmes erinevas kontekstis. GTFS kajastab siiski vaid planeeritud sõiduplaani, tegelik olukord võib ühistranspordi hilinemise tõttu sõiduplaanist erineda. Seega võib esineda märgatav erinevus sõiduplaani põhjal arvatud ligipääsetavuse ja tegeliku ligipääsetavuse vahel (Wessel & Farber, 2019). Google on 2015. aastast arendanud GTFS realtime'i, mis kajastab muudatusi ühistranspordi sõiduplaanis ja marsruutides reaalsajas (Kaeoruean et al., 2020).

Reaalne ühistranspordi teenus ei vasta kunagi täielikult GTFS-is sätestatud tingimustele. Ühissõiduki ajakulu peatuste vahel liikumisel mõjutab muuhulgas liiklus, sisenevate ja väljuvate reisijate arv ja fooritsüklid. Wessel ja Farber (2019) võrdlesid ühistranspordi sõidu ajakulu GTFS põhjal sõidukite GPS andmetega ning leidsid, et keskmiselt ülehindab GTFS ligipääsetavust 5-15%.

1.5 Tallinna ühistranspordi hetkeolukord

Tallinna linn koos naaberomavalitsustega on Eesti kõige suurema transpordikoormuse ja tihedama pendelrändega piirkond. Pealinna elanike arv on jätkuvalt kasvamas, millega kaasneb autode arvu ja igapäevase autoliikluse kasv, suurendades liikluskoormust ja liikumisele kuluvat keskmist aega. Autode arv elanike kohta ja liiklussagedus on kogu piirkonnas viimase kümnendi jooksul kiiresti kasvanud ning samaaegselt on vähenenud jalgsi ja ühistranspordiga liikumiste osakaal. Ühistranspordi osatähtsus liikumisviiside jaotuses on alates 2014. aastast järjepidevalt vähenenud, langedes 2019. aastal 44%-ni kõikidest liikumistest. Isikliku auto osatähtsus on seevastu liikunud samal perioodil tõusvas joones. Eelmainitud trendi on süvendanud valglinnastumine ja töökohtade ümberpaiknemine, mis on suurendanud transpordikuluid nii leibkondadele kui ka ettevõtetele sõiduautost sõltuvuse tõttu (Civitta Eesti, 2021).

Linnas tervikuna ei ole ühistransport konkurentsivõimeline võrreldes isikliku sõiduautoga. Antov et al. (2016) arvutasid, et keskmine ühendusaeg peatuste vahel koos ümberistumisega on Tallinnas 33,2 minutit. Kui lisada sõiduajale ajakulu peatusest/peatusesse liikumisele, kulub ühe ühistranspordiga tehtavale reisile keskmiselt aega 41,7 minutit. Samu reise isikliku sõiduautoga tehes on keskmiseks ajakuluks 16,3 minutit tiptunnil (Antov et al., 2016). Tallinn 2035 arengustrateegias on seatud eesmärk, et ühistranspordiga ei kuluks keskmiselt rohkem kui pool tundi sihtkohta jõudmiseks ning linnakeskuse ja teiste keskuste vahel mitte rohkem kui 20 minutit (Tallinna Linnavolikogu, 2020).

Ühistranspordiga ligipääsetavuse vaatekohast on üks peamisi probleeme Tallinna ja Harjumaa ühistransporditeenuste killustatus ja erinevate piletisüsteemide olemasolu, mis ei soosi liikumisel mitme transpordiliigi kombineerimist (Jüssi et al., 2019). Teine oluline probleem on kesklinnapõhine liinivõrk, mis ei võimalda ümberistumisteta liikumisi ülejäänud linnaosade vahel. Ümberistumised kesklinnas võivad peatuste hajutatusest tingituna nõuda distantsilt pikkade ja ajakulukate vahemaade läbimist (Antov et al., 2017). Statistika kohaselt peab 32% tallinlastest peamisse sihtkohta jõudmiseks tavaliselt tegema ümberistumisi, sh 25% tavaliselt ühe ümberistumise ja 8% kaks või rohkem (Civitta Eesti, 2021).

1.6 Tallinna ühistranspordivõrgu varasemad analüüsid

1.6.1 „Tallinna ühistranspordisüsteemi arendamine ja liinivõrgu optimeerimine“

Käesoleva sajandi teise kümnendi esimene põhjalik liinivõrgu analüüs algatati 2014. aastal Tallinna Transpordiameti ja Tallinna Tehnikaülikooli Logistikainstituudi koostöös pealkirjaga „Tallinna ühistranspordisüsteemi arendamine ja liinivõrgu optimeerimine“, mille teise etapi tulemusi esitati 2017. aastal. Uuringu eesmärk oli tuvastada hetkeolukorra ühistranspordi kasutus ning liikumisvajaduste analüüsi põhjal modelleerida uus liinivõrk. Uuringule eelnevalt puudus Tallinna Transpordiametil ülevaade, millised on liikumiste peamised lähtekohad ja sihtkohad ning nendevaheline liikumishõudlus (Antov et al., 2016).

Ühistranspordikasutust hinnati sõitude registreerimissüsteemi (ühiskaardi valideerimisandmed) ja sõitjate automaatloenduse andmete (APC – *Automatic Passenger Counting*) põhjal. Valideerimisandmed sisaldasid kasutaja ühissõidukisse sisenemise asukohta ja aega ning olid esitatud poole tunni täpsusega. Märkimisväärne on asjaolu, et autoritel puudus teadmine, kui suure osa moodustasid valideeritud sõidud sõitude koguarvust. Lisaks reisija valideerimata jätmisele ei olnud kohustatud sõitu registreerima mitmed sotsiaalsed grupid, näiteks 65-aastased ja vanemad isikud, kes samas moodustasid ühistransporti kõige aktiivsemalt kasutava sotsiaalse grupi. Seega ei saa pidada valideerimisandmeid esinduslikuks allikaks ühistranspordi kasutuse kohta. Andmestiku esinduslikkust üritati parandada rakendades APC-andmeid, kuid need ei hõlmanud kõiki ühissõidukite väljumisi ega marsruute. APC-andmeid võrreldi valideerimisandmetega kindlates peatustes teatud väljumiste puhul, kuid tulemuste varieeruvus oli väga suur, ulatades 60%-ist 141%-ni. Valideerimisandmestik taandati sõitude hinnangulisele koguarvule APC-andmeid rakendades (Antov et al., 2016).

Uuringus jõuti järeldusele, et olemasoleva liinivõrgu laiaulatuslik kiire muutmine pole vajalik ega otstarbekas, et Tallinna ühistranspordi liinivõrk on tervikuna hea ning uutesse arengupiirkondadesse on lisatud vajalikke liine, ning et ühistransporditeenus tagab tervikuna liikumisvõimaluse kogu linnas vajalikul, kohati ka heal tasemel. Uuringus tehti seitse konkreetset ettepanekut liinivõrgu optimeerimiseks lühiajalises perspektiivis, nendest on antud töö kirjutamise hetkeks realiseerinud vaid üksainus (Antov et al., 2017).

1.6.2 „Tallinna regiooni liikuvuse mudeldamine“

2021. aastal valmis Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi ja Rahandusministeeriumi tellimusel Flou OY ja inphysica technology OÜ teostatud uuring „Tallinna regiooni liikuvuse mudeldamine“. Vastupidiselt TTÜ uuringule jõuti järeldusele, et kogu Tallinna regiooni ühistranspordivõrgu ümberkorraldamisest oleks võimalik saavutada märkimisväärset kasu. Uus liinivõrk võimaldaks märgatavat ühistranspordi osakaalu kasvu liikumisviiside jaotuses.

Uuringu üks peamisi eesmärke oli Tallinna südalinna ümberistumise piirkonna liinide ja peatuste paiknemise ümberkujundamine, mis võimaldaks vähendada praeguse liinivõrgu ülekoormatust ja parendada ümberistumiste mugavust südalinnas. Lokaalsete transpordisõlmpunktide loomine linna teistesse piirkondadesse tagaks transpordivõrgu ühendatavuse kesklinna läbimata, suurendades ühistranspordi veovõimet kasvava elanikkonna tulevaste liikumisvajaduste rahuldamiseks (Kalvo et al., 2021).

2. ANDMED JA METOODIKA

Selles peatükis kirjeldatakse lähteandmeid ja antakse põhjalik ülevaade uurimisprotsessist. Esimeses alapeatükis 2.1 on ülevaade analüüsis kasutatud lähteandmetest. Järgnevas alapeatükis 2.2 on tutvustatud uurimisala ja analüüsis kasutatud ruumiüksust. Alapeatükis 2.3 on esitatud GPS-andmete töötlemise metoodika arendust. Viimases alapeatükis 2.4 on esitatud ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamise metoodikat.

Andmete korrastamisel ja töötlemisel on kasutatud peamiselt R-programmeerimiskeelt RStudio keskkonnas. GPS-andmete töötlemise metoodika arendamisel on samuti rakendatud RStudiot. Tulemuste visualiseerimisel, ruumianalüüsi teostamisel ja transpordivõrgustiku modelleerimisel on kasutatud ArcGIS Pro programmi *Network Analyst* laiendusega.

2.1 Lähteandmed

2.1.1 GPS-positsioneerimise andmed

Liikumismahtude ja sihtkohtade tuvastamiseks on analüüsitud GPS-seadmetega varustatud nutitelefonide positsioneerimise andmeid. Käesolevas töös kasutatav andmestik ja selle valim on loodud segregatsiooni uurimiseks Tallinnas, mistõttu ei ole autor saanud otsustada valimi suuruse ja koostamise põhimõtete üle. Valim koosnes 93-st isikust, kellest 36 elukohad asusid Põhja-Tallinnas Kalamaja piirkonnas ja 57 elukohad Lasnamäel Kuristiku, Priisle ja Seli asumites. Andmed hõlmavad vahemikku 01.09.2021 – 01.12.2021. Andmestiku iga rida esindab üht asukoha fikseeringut, kokku on terve valimi kohta natuke alla 22,3 miljoni asukoha fikseeringu. Lähteandmete tunnustest on kasutatud isiku unikaalset identifikaatorit, positsioneerimise kellaaega, koordinaate ja hinnangulist täpsust.

2.1.1.1 MobilityLog rakenduse asukoha määramise tööpõhimõte

Satelliitnavigatsiooni asukohaandmed (ehk GPS) on kogutud Tartu Ülikooli mobiilsusuuringute labori arendatud Androidi platvormil töötava rakenduse MobilityLog abil. GPS-il põhinevate andmekogumiskrakenduste probleem on kõrge energiatarve, mis võib põhjustada seadme aku kiire tühjenemise. MobilityLog rakenduse eripära GPS-andmete kogumisel seisneb selles, et andmekogumine on aktiivne vaid perioodil, mil seadme andurid tuvastavad liikumise. Kui liikumist ei ole teatud aja tuvastatud, lülitub rakendus n-ö unerežiimile energia säästmiseks (Aasa & Veiler, 2021).

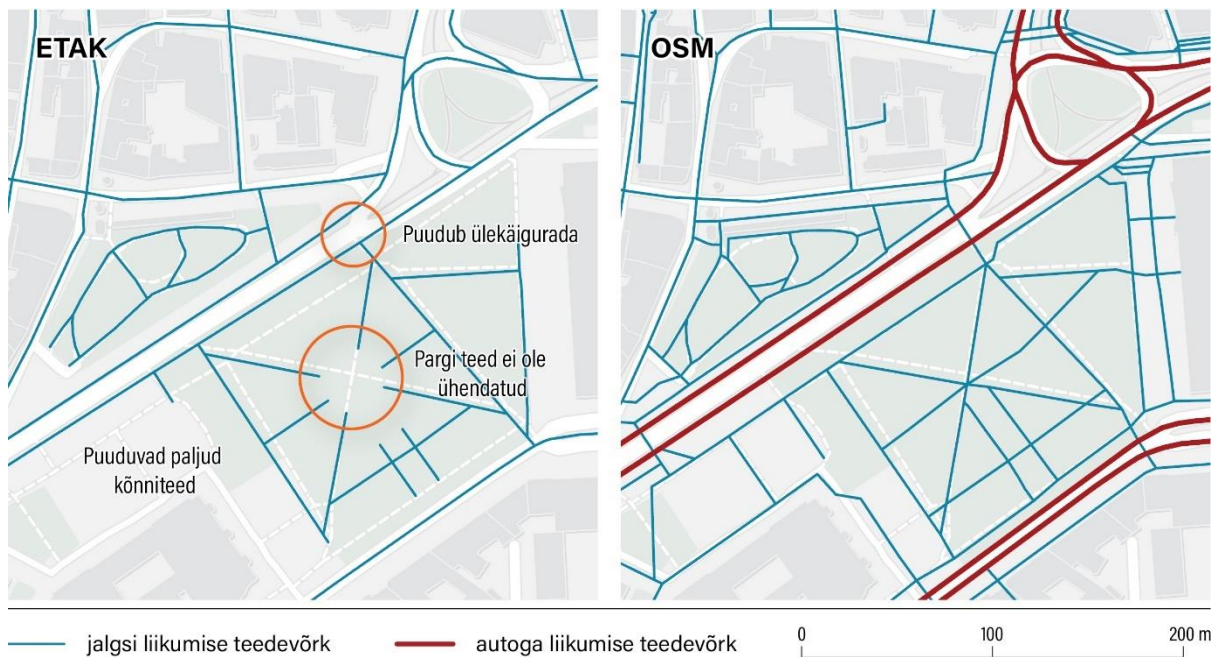
GPS-andmeid kogutakse liikumise vältel iga sekundi tagant. Seadme edastatud andmetele teostatakse automaatset kvaliteedikontrolli vigaste ja/või ebaloogiliste kirjete eemaldamiseks. Seejärel arvutatakse algoritmipõhiselt automaatselt seadme liikumistrajektorid ja peatuskohad (Aasa & Veiler, 2021).

2.1.2 Ühistranspordiandmed

Ühistranspordiandmed pärinevad Ühistranspordi infosüsteemist (ÜTRIS), mida haldab Transpordiamet. Andmestik on lihtsustatud struktuuriga avaandmetena allalaetav GTFS kujul (vt lisa 1). Töös kasutatud GTFS andmestik on 23.03.2022 seisuga. Uurimisalast tulenevalt eraldati GTFS andmestikust Tallinna linnasiseselt ühistransporditeenust pakkuvad vedajad ehk Tallinna Linnatranspordi ja Elroni teenuste andmed. Lisaks teenindavad Tallinnas asuvaid peatuseid Harju maakonnaliinid ja kommertsliinid, kuid nende teenus on suunatud ümbritsevate valdade teenindamiseks ja seetõttu ei ole nende andmeid analüüsis kaasatud.

2.1.3 Teedevõrk

Jalgsi liikumise teedevõrgustik on modelleeritud kaardirakenduse OpenStreetMap (OSM) andmete põhjal. Töös otsustati OSM andmestiku kasuks ETAK-i (Eesti topograafia andmekogu) teede andmestiku asemel, kuna kahe andmestiku omavahelisel võrdlemisel ilmnes, et OSM andmestik on tunduvalt põhjalikum ja kvaliteetsem (vt joonis 1). ETAK-i teedekihi olid mitmed kõnnitee ühendused puudulikud või katkendlikud, mistõttu oleks modelleerimisele eelnevalt olnud vaja teostada suur hulk parandusi. OSM andmestik on seevastu äärmiselt põhjalik ning selle sobilikkust kinnitab andmestiku varasem kasutus uuringutes (Salonen & Toivonen, 2013).



Joonis 1. Näide ETAK-i ja OSM-i andmetike erinevustest.

2.1.4 Hoonete funktsionaalsus

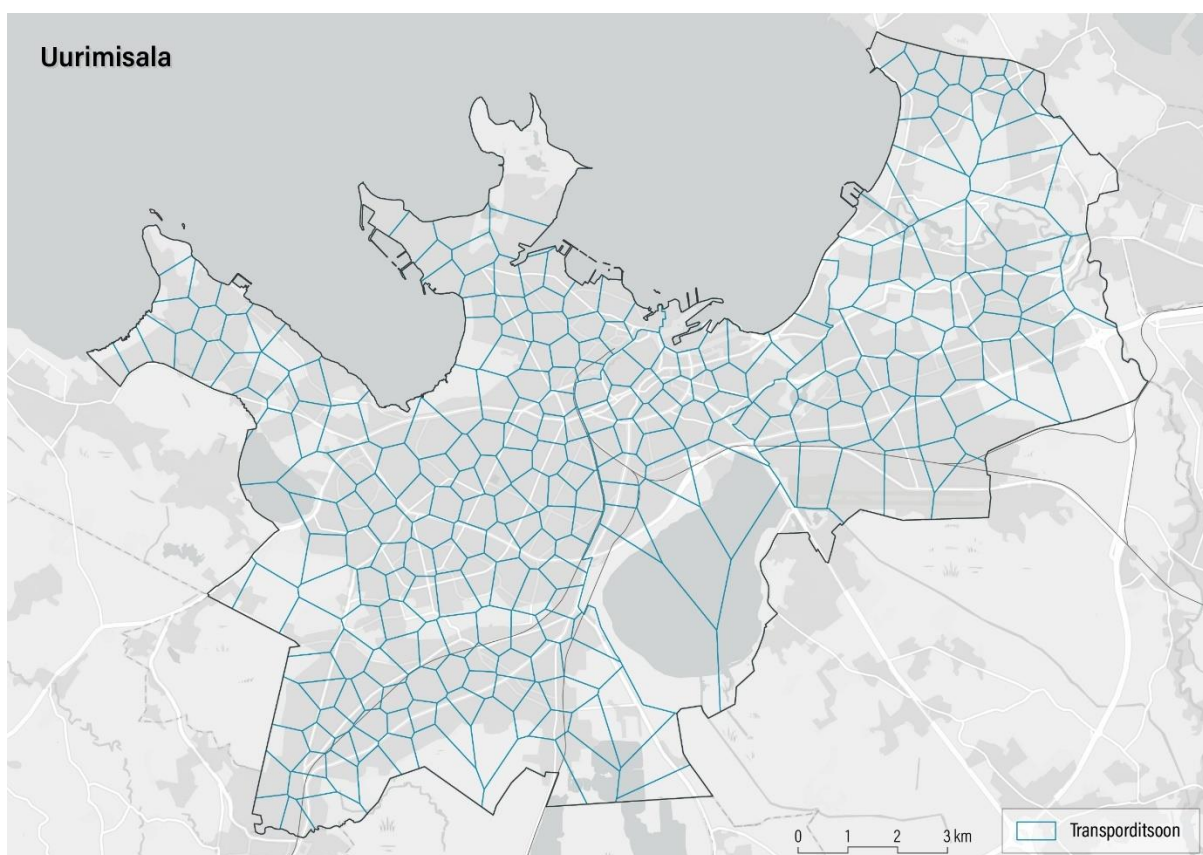
Ühistranspordi teenustaseme *SI* arvutamisel on rakendatud Currie (2010) modifitseeritud valem, mis rakendab ruumiüksuse pindala asemel funktsioonide arvu. Hoonete funktsioonide kiht põhineb Ehitisregistri andmetel ja on loodud ja kasutatud autori bakalaureusetöös, mis uuris Tallinna linna multifunktsionaalsust (Haamer, 2020). Sõltuvalt hoone kasutusotstarbetest võib ühel hoonel olla üks kuni mitu erinevat funktsiooni. Näiteks on eluhooned valdavalt monofunktsionaalsed, kuna sisaldavad enamasti vaid eluruume. Kaubanduskeskus võib seevastu lisaks kaubanduspindadele sisaldada veel büroopindasid, spordiasustusi ja meelelahutusasustusi ehk tegu on multifunktsionaalse hoonega.

2.1.5 Transporditsoonid

Töös on ruumiüksustena kasutatud transporditsoone, mis on loodud Kalvo et al. (2021) analüüsi „Tallinna regiooni liikuvuse mudeldamine“ raames, kus neid kasutati samuti liikuvuse modelleerimisel. Tsoonid on genereeritud töökohtade ja eluhoonete kaalutud keskmiste klasteranalüüsi põhjal. Tsoonide ruumikujud on iga omavalitsuse jaoks arvatud Thiesseni polügoonidest moodustuva tessellatsiooni põhjal. Iga tsooni kohta on teada rahvaarv, töökohtade arv ja õppekohtade arv.

2.2 Uurimisala

Töös on keskendunud Tallinna linnale. Tallinna kui Eesti suurim linn on suurima ühistranspordi võrgustikuga ja -kasutusega ning tihedaimate igapäevaste liikumistega piirkond kogu riigis (Civitta Eesti, 2021). Uurimisala koosneb 270-st transporditsoonist (vt joonis 2). Tsooni suurus varieerub — hõredalt asustatud piirkondades on tsoonid suuremad. Keskmiselt on tsooni rahvaarv 1704 elanikku ja keskmine pindala on 0,58 km². Transporditsoone on varemgi kasutatud erinevates transpordi- ja liikuvusuuringutes (Antov et al., 2016; Fransen et al., 2015; Kalvo et al., 2021), kuna tsoonide moodustamisel üritatakse minimeerida tsoonidevahelisi erinevusi, luues võimalikult võrdse aluse tulemuste hindamiseks.



Joonis 2. Uurimisala piirid transporditsoonidega.

2.3 GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamise meetoodika arendus

2.3.1 GPS-andmete esmane analüüs

Esimene etapp GPS-andmete töötlemisel on eraldada pidevast asukoha fikseeringute aegreast perioodid, mil isik on liikunud kahe asukoha vahel ehk liikumised ning perioodid, mil isik on viibinud pikemat aega kindlas asukohas ehk teinud peatuse. GPS-andmed on eelnevalt klassifitseerinud, kas osa liikumisest või peatusest, kuid klassifitseerimise täpsus ei vasta antud töö eesmärkidele. Kasutatud algoritm on määratlenud peatusena vaid juhud, kui seade on teatud aja olnud statsionaarne ehk seadme andurid ei ole liikumist tuvastanud. See põhjustab olukordi, kus lühiajalised peatused (näiteks poeskäigud) või pikaajaline liikumine kindlal väikesel alal (näiteks ühe hoone piires) ei kajastu peatusena vaid osana pikemaajalisest liikumisest.

Sihtkohtade tuvastamiseks ja seeläbi ligipääsetavuse täpsemaks määratlemiseks on töö eesmärkidest lähtuvalt koostatud uus meetoodika GPS asukoha andmetest liikumiste ja peatuste tuvastamiseks.

2.3.2 GPS-andmetest üksikute liikumiste ja peatuste tuvastamine

Uuritavates GPS-andmetes on peatus määratletud rangete kriteeriumite alusel, mistõttu järeldatakse, et tegelikke liikumisi ei ole valesti peatusena klassifitseeritud. Seetõttu analüüsitakse vaid andmeridu, mis olid eelnevalt määratletud liikumistena. Kuna eesmärk ei olnud GPS-andmete põhjal uurida liikumistrajektoore, vaid iga liikumise lähte- ja sihtkohta, oli andmekogumise ajaline lahutus analüüsi jaoks liiga suur (1 sekund). Andmemahu vähendamiseks on agregeeritud iga kasutaja asukoha fikseeringud kaheminutilisteks perioodideks ja arvutatud läbitud vahemaa ning perioodi keskmine positsioneerimise täpsus. Keskmine täpsus on oluline näitaja liikumiste ja peatuste tuvastamisel. GPS-seadme täpsus on tunduvalt madalam siseruumides või kohtades, kus avatud taevas on piiratud, mistõttu ei lange asukoha fikseerimine reaalse asukohaga kokku ning tekib tihe punktipilv kasutaja asukoha ümber.

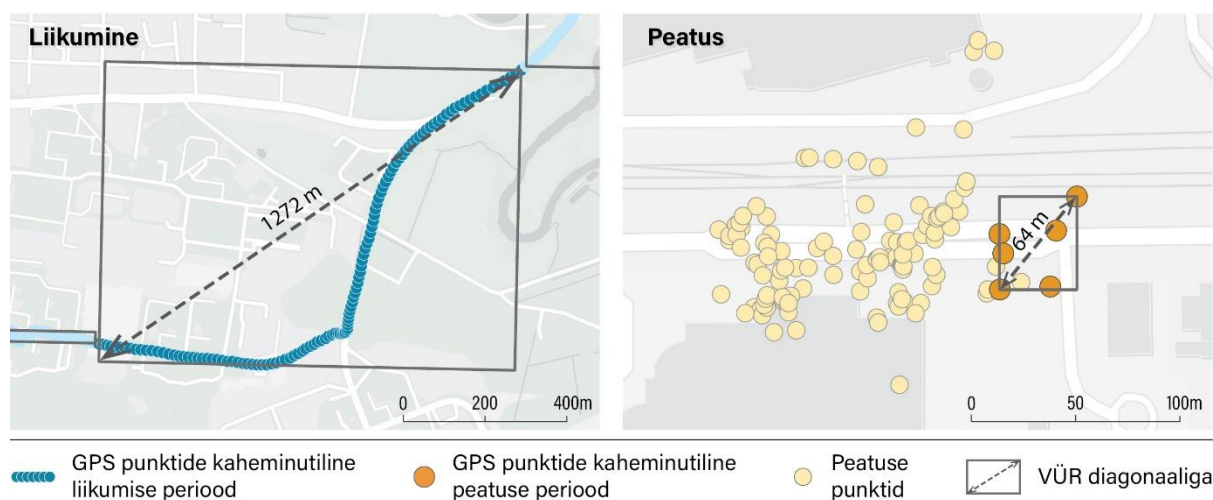
Ajalise perioodi valikul on lähtutud kahest põhimõttest.

1. Periood peab olema piisavalt pikk, et liikumisviisist sõltumata oleks ajavahemikus läbitud vahemaa piisav, vältimaks olukorda, kus peatuseid määratakse ekslikult liikumisteks.

2. Periood peab olema piisavalt lühike, et liikumise alg- ja lõpp-punkt oleks tsooni täpsusega määratavad ning vältimaks olukorda, kus lühiajalised peatused määratakse ekslikult liikumise osana.

Erinevaid perioodipikkuseid katsetades on rakendatud kaheminutilist perioodi. Jalakäija keskmise liikumiskiirusega 4,5 km/h läbib kahe minuti jooksul 150 meetrit, mis on enamasti piisavalt pikk distantis eristamiseks liikumisi peatustest. Valitud perioodi pikkus võimaldab liikumise alg- ja lõpp-punkti määrata transporditsooni täpsusega. Ühtlasi on kaheminutilist perioodi rakendanud Hadjidimitriou et al., (2021) liikumismustrite tuvastamisel GPS-andmetest.

Metoodika arusaadavamaks selgitamiseks on võetud kasutusele abistavad tähised. Igale kahe minutilisele perioodile P arvutati väikseim ümbritsev ristkülik VÜR (ingl. k. *bounding box*) ja leiti selle diagonaali d pikkus. Juhul, kui $d_P > 100\text{m}$ ja keskmine positsioneerimise täpsus $PT_P < 20\text{m}$, määrati periood liikumiseks ning vastasel juhul peatuseks. Mitme erineva d väärtuse katsetamise järel valiti 100m, kuna klassifitseerimise tulemusi ruumiliselt hinnates eristas 100m lävend kõige täpsemalt liikumisi peatustest (vt joonis 3). PT lävendi valikul lähtuti keskmisest väärtusest, milleks oli 20.86m.

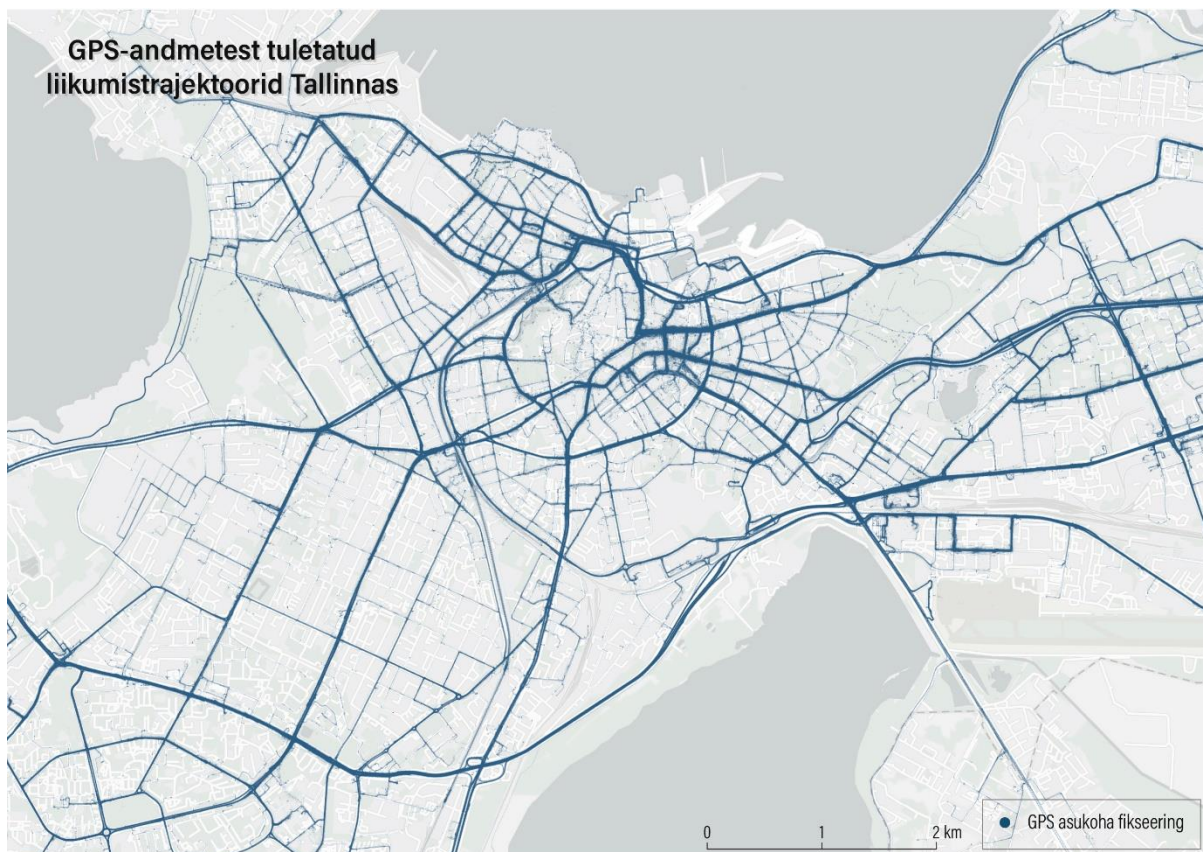


Joonis 3. Näide GPS-andmete klassifitseerimisest kaheminutilise perioodi VÜR diagonaali põhjal.

Üksikute ebaloogiliselt klassifitseeritud perioodide kõrvaldamiseks seati järgmised reeglid.

- Kui liikumisena klassifitseeritud perioodile eelnes ja järgnes peatusena klassifitseeritud periood, muudeti vaatluse all olev periood peatuseks.
- Kui liikumisena klassifitseeritud perioodile eelnes peatusena klassifitseeritud periood ja ajavahe järgneva perioodiga oli > 30 min, muudeti vaatluse all olev periood samuti peatuseks.

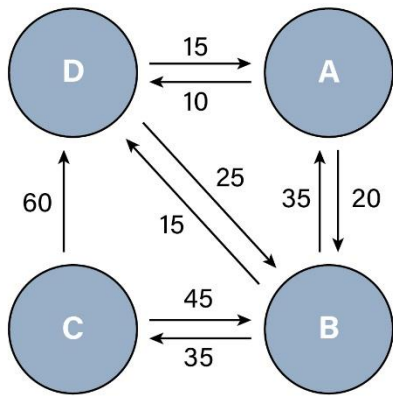
Seejärel tuvastati järjestikused liikumisena klassifitseeritud perioodid ning leiti tervikliku liikumise M alg- ja lõpp-punkt. Juhul kui kahe järjestikuse liikumise M vaheline aeg oli < 10 min, kombineeriti järjestikused liikumised üheks pikemaks liikumiseks. See võimaldas vältida olukordasid, kus näiteks bussi ootamine peatuses või ümberistumine oleksid käsitletud omaette sihtkohana. Liikumise alg- ja lõpp-punkti asukoht määrati esimese ja viimase P tsentroidina ning leiti nende omavaheline kaugus. Pistelise kontrolli tulemusena GIS-programmiga selgus, et meetodika töötab eesmärgipäraselt. GPS-andmetest tuletatud liikumised on visualiseeritud joonisel 4.



Joonis 4. GPS-andmetest tuletatud liikumistrajektoord Tallinna kesklinnas. Aluskaart ESRI hallkaart.

2.3.3 OD-maatriksi koostamine

Transpordiplaneerimises ja mobiilsusuuringutes on agregeeritud liikumiste esitamisel muutunud standardiks OD-maatriksite koostamine ehk liikumiste lähte- ja sihtkohad esitatuna maatrikskujul (ingl. k. *Origin-Destination matrix*). OD-maatriks T on $n \times m$ dimensioonidega maatriks, kus n on lähtekohtade hulk ja m sihtkohtade hulk (vt joonis 5). Iga maatriksi ruut T_{ij} sisaldab tavaliselt liikumiste arvu tsoonist i tsooni j , kuid võib ka sisaldada liikumise ajakulu või läbitud vahemaad teatud ajahetkel (Barbosa et al., 2018).



	A	B	C	D	T_j
A		20	0	10	30
B	35		35	15	85
C	0	45		60	105
D	15	25	0		40
T_i	50	90	35	85	260

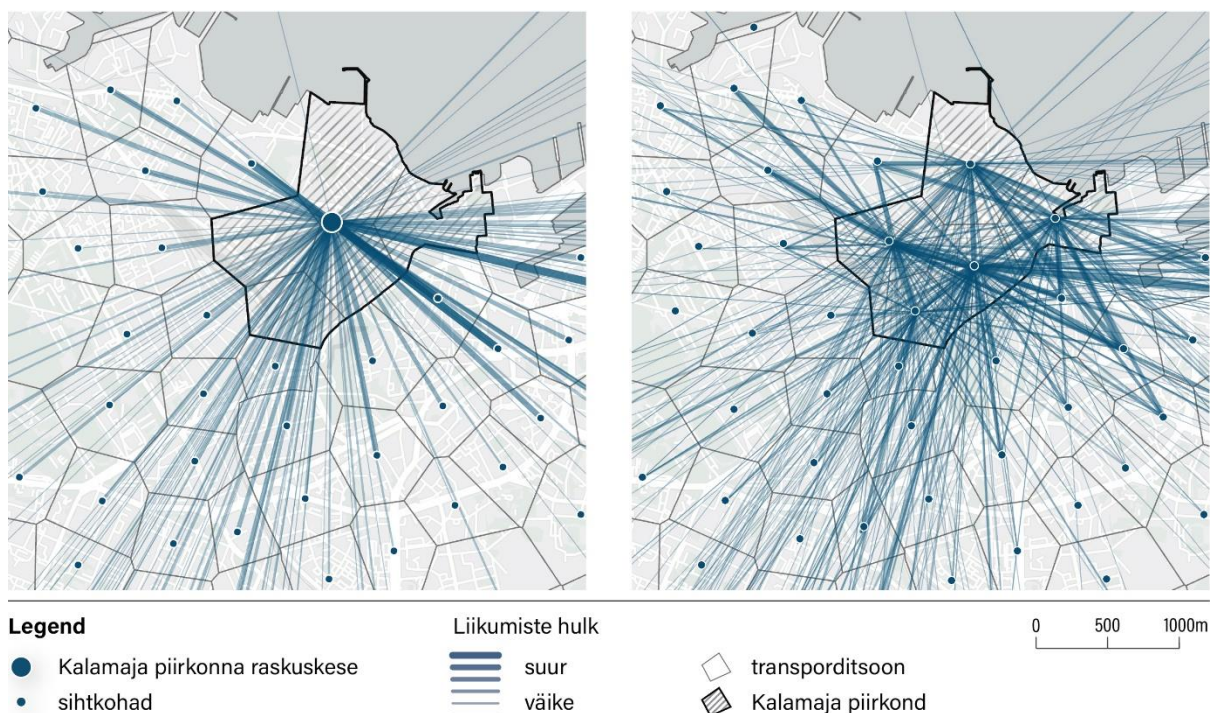
Joonis 5. OD-matriksi koostamise näide.

Iga liikumise M alg- ja lõpp-punkti asukohale vastavalt määrati liikumisele lähtetsooni i ja sihtsooni j tunnus. Seejärel eemaldati tsoonisisesed liikumised $i = j$ ning summeeriti kõikide isikute liikumised lähtetsoonist i sihtsooni j , moodustades OD-matriksi agregeeritud liikumistest. Kokku on matriksis kajastatud 8926 liikumist.

2.3.4 Liikumistest sihtkohtade tuvastamine

GPS-andmete valimis olevate isikute elukohad on kontsentreerunud Kalamajja ja Lasnamäe idaosasse, mistõttu ei ole andmete põhjal võimalik hinnata üldisi liikumismustreid terves linnas kõikide piirkondade vahel. Sellele vaatamata on võimalik analüüsida Kalamajja ja Lasnamäe idaosas elanike liikumisi ja peamisi sihtkohtasid, kuid tuleb arvestada, et valimi väike suurus ei võimalda järeldusi laiendada üldpopulatsioonile.

Kuna valimis olevate isikute elukohad nii Kalamajas kui ka Lasnamäe idaosas on jaotunud mitme transporditsooni vahel, on kummaski piirkonnas moodustatud uus agregeeritud tsoon, mis võimaldab paremini tuvastada piirkonna elanike peamisi sihtkohtasid. Joonisel 6 on Kalamajja liikumiste põhjal ilmestatud, miks on tsoonide liitmine vajalik. Visualiseerides kõiki piirkonnast alanud või lõppenud liikumisi ühest konkreetses punktist, tulevad nii kaardil kui ka OD-matriksis tugevamalt esile peamised liikumissuunad ja sihtkohad. Tagajärjena kaovad moodustatud piirkonna sisesed liikumised, kuid analüüsis keskendutakse eelkõige pikematele liikumistele ning seega tulemusi ei mõjuta nimetatud liikumiste eemaldamine. Moodustatud piirkonna liikumiste alg- ja lõpp-punktiks on määratud agregeeritud transporditsoonide raskuskese (ingl. k. *mean center*), mille arvutamisel on rakendatud transporditsooni rahvaarvu kaaluna. Raskuskese on punkt, millest kauguste ruutude summa kõigi punktide juurde on minimaalne (Roosaare et al., 2019).



Joonis 6. Agregeeritud transporditsoonide mõju liikumiste esitamisele. Vasakpoolsel joonisel on liikumiste alg- või lõpp-punktiks määratud moodustatud piirkonna (viirutatud ala) kaalutud raskuskese. Parempoolsel on liikumised esitatud iga transporditsooni jaoks eraldi.

Üksikute valimisolevate isikute elukohad asusid kaugemates tsoonides, mistõttu neid ei hõlmatud agregeeritud tsooni moodustamisel.

2.4 Ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamise meetodika

Käesolevas alapeatükis on käsitletud ligipääsetavuse hindamise meetodikat. Ligipääsetavuse hindamiseks on eelnevalt vajalik modelleerida ühistranspordi võrgustik ning seejärel tuvastada ühistranspordi teenustaseme ruumilised erinevused, mille alusel tuvastada puudulikku ühistranspordiühendusega piirkonnad. Ligipääsetavust on hinnatud kahe erineva meetodiga. Esiteks on arvatud iga transporditsooni ühistranspordi teenustase *SI* indeksi abil. Teiseks on hinnatud dünaamilist ligipääsetavust ehk ligipääsetavuse varieeruvust päeva vältel GPS-andmetest tuvastatud sihtkohtadele Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidetel.

2.4.1 Ühistranspordivõrgustiku modelleerimine

Tallinna ühistranspordivõrgustiku modelleerimisel kasutati ArcGIS Pro laiendusi *Network Analyst*, *Public Transit Tools* ja *Transit Network Analysis Tools*. Viimane on 2019. aastal loodud ja pidevalt uuendatud allalaetav lisapakett ühistranspordi dünaamiliseks modelleerimiseks ja ligipääsetavuse analüüsimiseks (Esri, 2022). *Network Analyst*-i on

ühistranspordiga liikumiste modelleerimisel rakendatud mitmetes eelnevates uuringutes (Farber et al., 2014, 2016; Fransen et al., 2015; Owen & Levinson, 2015; Salonen & Toivonen, 2013).

Network Analyst-i ühistranspordiga liikumise mudel koosneb kahest kihist: 1) ühistranspordi võrgustiku kiht, mis sisaldab peatuseid ja ühistranspordiliinide võimaldatud peatustevahelisi ühendusi; 2) teedevõrk, mida kasutatakse jalgsi liikumise modelleerimisel. Kahte kihti ühendavad omavahel ühistranspordipeatused, mis võimaldavad liikumise modelleerimisel kasutada mõlemat võrgustikku mistahes kahe asukoha vahel liikudes uurimisalas.

GTFS to Public Transit Data Model tööriist konstrueerib GTFS-andmestikust ArcGIS keskkonnas interaktiivse ühistranspordi mudeli. Mudelis on kajastatud ühistranspordiliinid, peatused, väljumisajad ja sõidugraafikupõhine sõiduaeg. Ühistranspordivõrgu ja jalgsi liikumise teedevõrgu omavaheliseks ühendamiseks on vajalik ühendada GTFS-andmestikus olevad peatuste asukohad lähima teelõiguga, kus on jalgsi liikumine lubatud. Selleks on rakendatud *Connect Public Transit Data Model to Streets* tööriistaga, võimaldades mõlema liikumisviisi kasutamist mudelis. Erinevates uuringutes on peatuse ja tänava vahelisi ühendusi kasutatud sõiduki sisenemiseks ja väljumiseks kuluva aja modelleerimiseks, kuid antud töös ei põhjusta ühendused lisajakulu.

Mudelis kasutatav teedevõrk ületab uurimisala piire, vältimaks jalgsi liikumise kunstlikku piiramist administratiivpiiridega. Lisaks on digitaliseeritud puuduolevad ühendused raudteejaamade ümbruses, ilma milleta oleks rongipeatuste ligipääsetavus mudelis ebarealistlikult väike. Jalgsi liikumine on piiratud sõiduteel kohtades, kus on võrgustikus ruumikujuna esindatud eraldiseisev kõnnitee sõiduteega paralleelselt, üldjuhul peamiste magistraaltänavate osas. Töös on liikumisviisina kasutatud Esri eelmääratud *Public transit and walking* liikumisviisi, kuid algse 5 km/h kõndimiskiiruse asemel on Stępniaak & Goliszek (2017) analüüsi tulemusena rakendatud 4,5 km/h.

2.4.2 Ühistranspordi teenustase

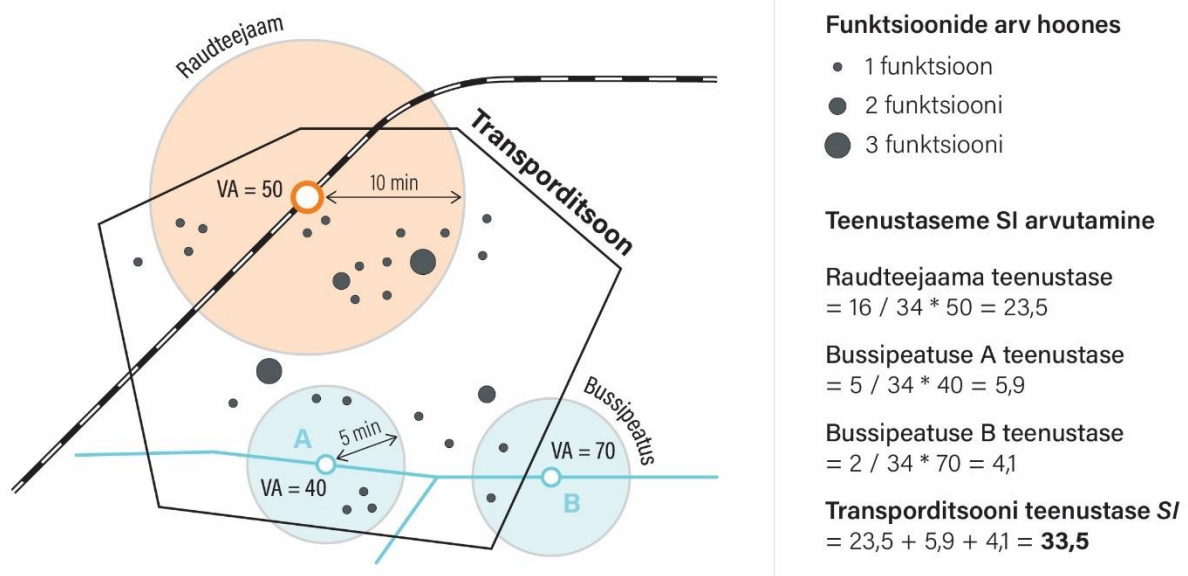
Ühistranspordi teenustase *SI* on võrdlemisi lihtne ligipääsetavuse näitaja, mis iseloomustab ühistranspordi kasutamismugavust ehk seda, kui lähedal asub peatus ja kui sage on väljumiste arv. Teenustaseme arvutamisel on võetud aluseks Currie (2010) valem (vt peatükk 1.3.5), kuid selle komponente on lähteandmetele vastavalt muudetud täpsema teenustaseme arvutamiseks. Esiteks on valemis peatuse teeninduspiirkonna arvutamisel rakendatud läbitud vahemaad

teedevõrgus eukleidilise kauguse asemel, mis ülehindab ligipääsetavust (vt peatükk 1.3.3). Teiseks ei ole valemis rakendatud peatuse teeninduspiirkonna ja transporditsooni pindala omavahelist suhet, vaid funktsioonide arvu suhet. Funktsioonid ei ole tsoonisiselt ühtlaselt jaotunud, mistõttu on peatuse asukoht oluline mõjutaja teenustaseme arvutamisel. Multifunktsionaalsed hooned, näiteks hooned, kus on lisaks elamutele veel äripinnad ja kohvik, omavad valemis suuremat kaalu, kuna võib eeldada, et need on olulisemad sihtkohad kui monofunktsionaalsed hooned. Alternatiiviks funktsioonidele oleks kasutada tsooni elamute vahel jaotatud rahvaarvu ühes hoones asuvate elamute arvu põhjal, kuid siinkohal ilmneb probleem, et igas transporditsoonis ei ole elamispindasid, mistõttu ei oleks võimalik kõikidele transporditsoonidele teenustaset arvutada.

Rakendatud valem on järgmine:

$$SI_{taz} = \sum N \left(\frac{F_{P_n}}{F_{taz}} * VA_P \right)$$

kus SI_{taz} on transporditsooni taz teenustase, N on teeninduspiirkondade hulk igas transporditsoonis, F_{P_n} on peatuse teeninduspiirkonnas asuvate funktsioonide arv, F_{taz} on transporditsoonis asuvate funktsioonide arv ja VA_P on peatuse väljumiste arv päevas. Bussi- ja trammipeatuse puhul on arvatud 5 minuti jalgsi liikumise teeninduspiirkond, rongipeatuse puhul 10 minuti teeninduspiirkond. Väljumiste arv on esitatud tüüpilise tööpäeva kohta ehk arvestatud ei ole nädalavahetuse ja riigipühade sõidugraafikuga.



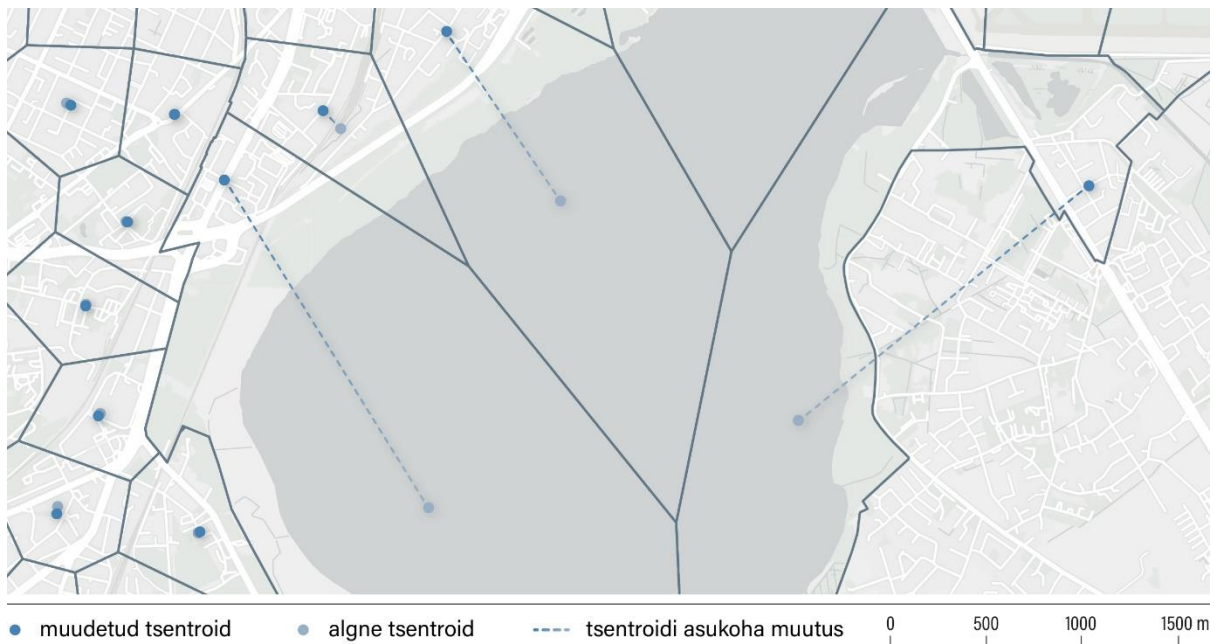
Joonis 7. Lihtsustatud näide teenustaseme SI arvutamisest.

Joonisel 7 on esitatud lihtsustatud skeem teenustaseme arvutamisest, millest ilmneb multifunktsionaalsete hoonete olulisem kaal. Transporditsooni 34-st funktsioonist asuvad 16 raudteejaama teeninduspiirkonnas, kusjuures kaks hoonet on multifunktsionaalsed. Kuigi joonisel on lihtsuse mõttes esitatud eukleidilised puhvrid, on tegelik arvutus tehtud teeninduspiirkondade põhjal piki tänavavõrku. Oluliseks tähelepanek võib pidada asjaolu, et peatuse teeninduspiirkond panustab tsooni teenustasemesse ka siis, kui peatus ei asu tsooni piires (bussipeatus B skeemil).

2.4.3 Dünaamiline ligipääsetavus sihtkohtadele ühistranspordiga

Ühistranspordi teenustase ei kajasta ajakulu ühest piirkonnast teise liikumisel, kuid liikumise ajakulu on oluline mõjutaja liikumisviisi valikul ja ligipääsetavuses. Lisaks on teada, et ühistranspordiga liikumise ajakulu on suuresti varieeruv ja sõltub konkreetsest liikumise algusajast (vt peatükk 1.3.4). Dünaamilise ligipääsetavuse hindamisel on laialdaselt kasutatud kumulatiivse ligipääsetavuse mõõdet kindlatele sihtkohtadele (vt peatükk 1.3.5). See tähendab, et on analüüsitud, kui suur hulk sihtkohtasid on ligipääsetav kindla aja jooksul mingist lähtepunktist ja kuidas see kellajaliselt varieerub. Antud töös on analüüsitud Kalamajast ja Lasnamäe idaosast ühistranspordiga ja jalgsi liikudes sihtkohtade ligipääsetavuse varieeruvust päeva lõikes. Päev on defineeritud perioodina, mil ühistransport töötab tiheda sõidugraafikuga ehk kella 06:00-st 23:45-ni. Tulenevalt Tallinna arengustrateegias püstitatud eesmärgist, et keskmine liikumisaeg ühistranspordiga ei ületaks poolt tundi (Tallinna Linnavolikogu, 2020), on analüüsitud kuni pooletunnise liikumise jooksul ligipääsetavate sihtkohtade hulka. Ühistranspordiga ligipääsetavust on analüüsitud veerandtunnise intervalliga ning kokku on arvatud 72 pooletunnise liikumise teeninduspiirkonda kummagi piirkonna liikumiste alguspunktist lähtuvalt.

Liikumise ajakulu modelleerimisel on algpunktina kasutatud vastava piirkonna raskuskeset ja lõpp-punktina üldjuhul transporditsoonide geomeetrilist keskpunkti ehk tsentroide, mis on ühendatud teedevõrguga. Juhul kui transporditsooni kujust või maakasutusest tulenevalt ei langenud tsooni tsentroid hoonestatud alale, liigutati tsentroid asukohta, mis oleks potentsiaalseid sihtkohti ja maakasutust arvestades kõige sobivamas kohas (vt joonis 8). Vastasel juhul oleks ajakulu mõnda transporditsooni liikumisel ebamõistlikult pikk või liikumine lausa võimatu.



Joonis 8. Näide tsooni tsentroidi liigutamisest Ülemiste järve piirkonnas.

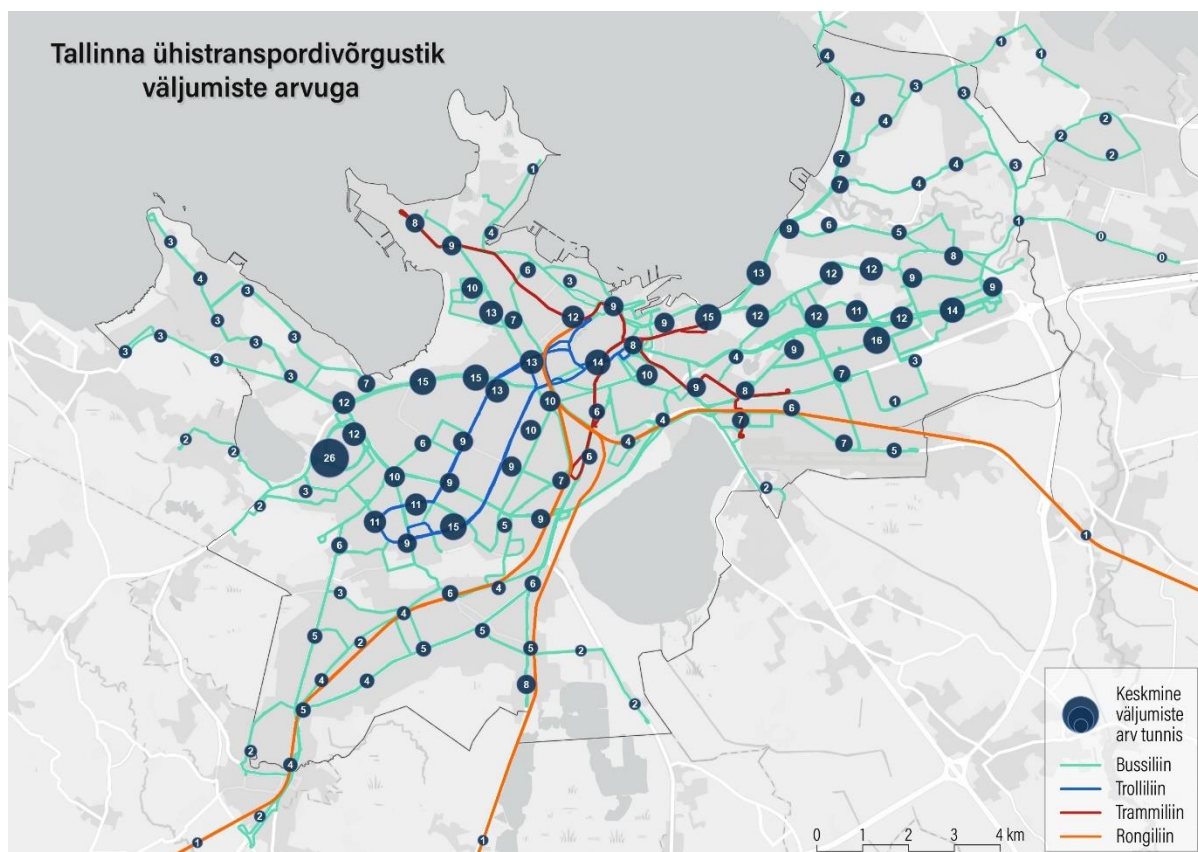
Liikumise modelleerimisel rakendatakse uksest ukseni lähenemist (ingl. k. *door to door approach*), mistõttu kujuneb lõplik ajakulu kahe asukoha vahelisel liikumisel mitmest osast:

1. liikumine lähtetsooni tsentroidist ühistranspordi peatusesse;
2. ühistranspordi sõiduki ooteaeg peatuses;
3. ühistranspordiga sõidu kestus sõidugraafiku põhjal;
4. vajadusel ümberistumisele kuluv aeg;
5. peatusest sihtsooni tsentroidi liikumine.

GPS-andmetest on tuvastatud Kalamaja ja Lasnamäe idaosa elanike liikumismustrid. Kuna eesmärk on uurida ligipääsetavust nimetatud piirkondade näidetel, on analüüsitud vaid neid liikumisi, mis kas algasid või lõppesid nimetatud piirkondades. Seega ei ole uuritud teiste transporditsoonide vahelisi liikumisi. Liikumiste sihtkohad on agregeeritud transporditsooni tasemele, mille põhjal on koostatud OD-matriks, mis sisaldab liikumiste arvu Kalamaja ja Lasnamäe idaosa ning ülejäänud transporditsoonide vahel.

3. TULEMUSED

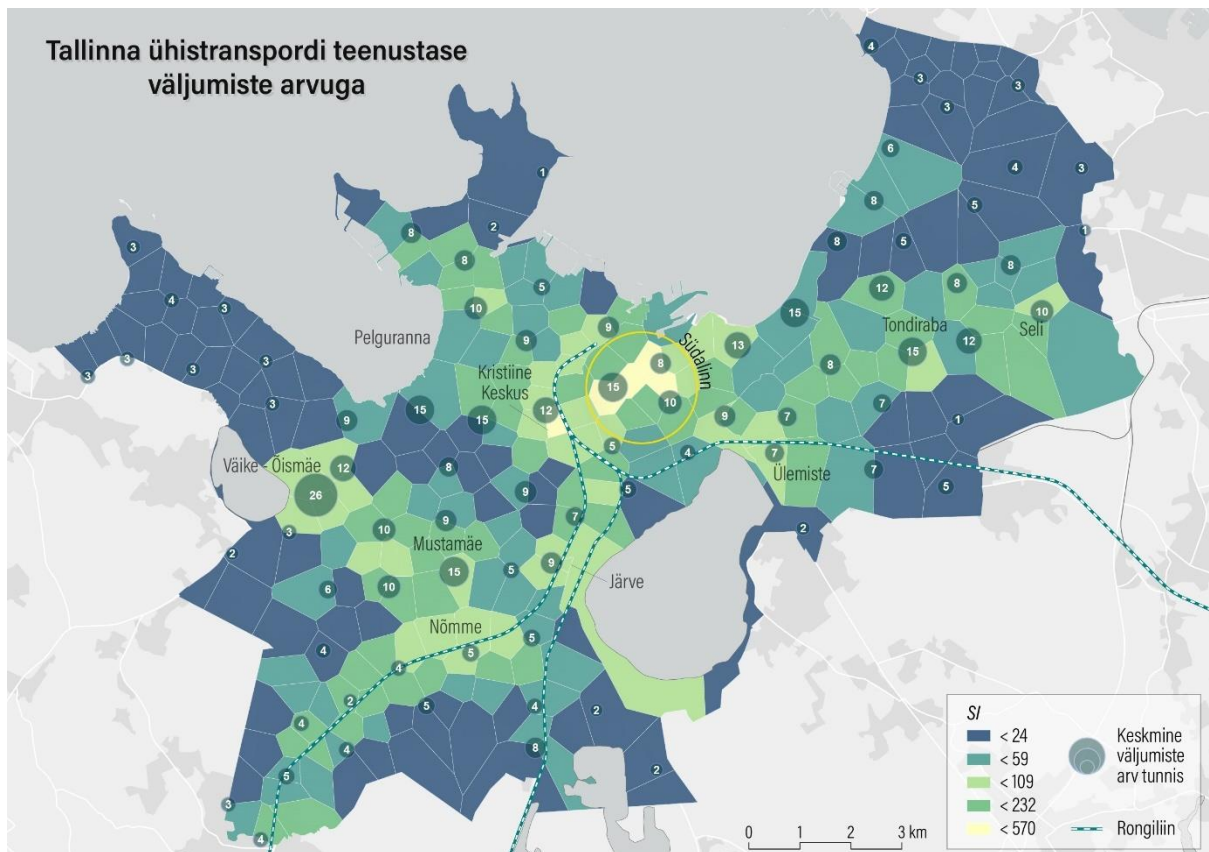
Käesolevas peatükis esitatakse ja visualiseeritakse GPS-andmetest tuvastatud liikumisi ja sihtkohti ja ühistranspordiga ligipääsetavuse tulemusi eelmises peatükis kirjeldatud meetodikale vastavalt. Tulemuste selgemaks mõistmiseks on koostatud ülevaatlük kaart Tallinna ühistranspordi võrgustikust, mis on ligipääsetavuse analüüsi aluseks (vt joonis 9).



Joonis 9. Tallinna ühistranspordi võrgustik väljumiste arvuga. Aluskaart ESRI hallkaart.

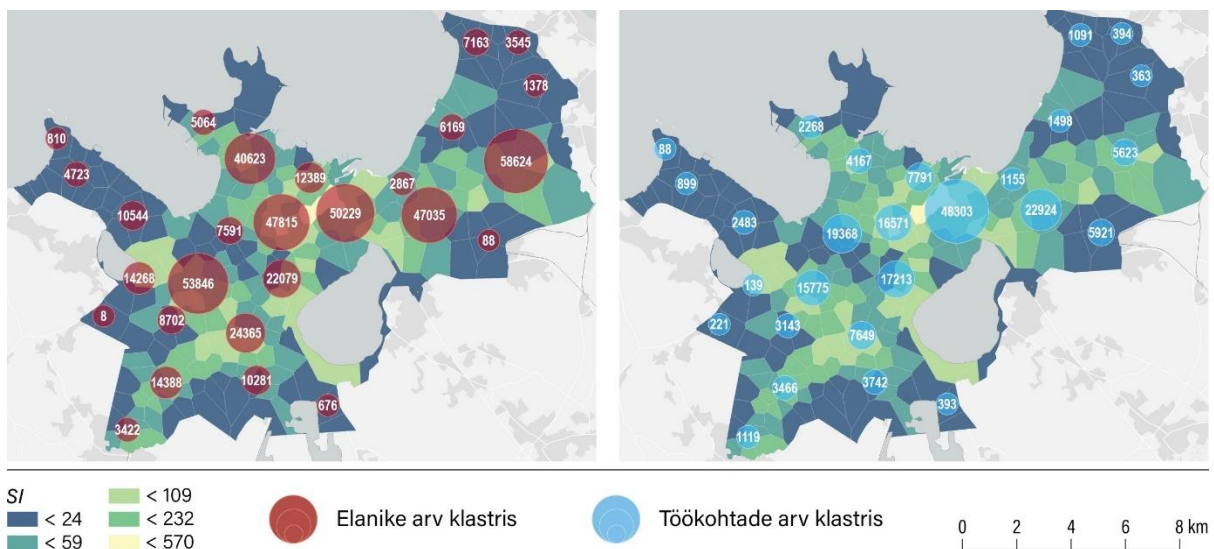
3.1 Ühistranspordi teenustase

Ühistranspordi teenustaseme indeksi SI arvutuse tulemused on visualiseeritud joonisel 10, kus tulevad selgelt esile kõrgema teenustasemega piirkonnad.



Joonis 10. Tallinna ühistranspordi teenustase väljumiste arvuga. Aluskaart ESRI hallkaart.

Ootuspäraselt on teenustase kõrgeim Tallinna südalinnas, kus on olemasoleva ühistranspordivõrgu peamine sõlmpunkt ja ka lõppjaam paljudel ühistranspordiliinidel. Kõrge teenustaseme poolest tõuseb esile ka Kristiine Keskuse ümbrus, kus on oluline ühistranspordiliinide sõlmpunkt. Kõrgema teenustasemega keskustena tulevad esile veel Väike-Õismäe, Mustamäe, Nõmme keskus, Järve, Ülemiste, Pelguranna, Tondiraba ja Seli piirkonnad.



Joonis 11. Teenustase suuremate elanike arvu ja töökohtade arvu klastritega. Aluskaart ESRI hallkaart.

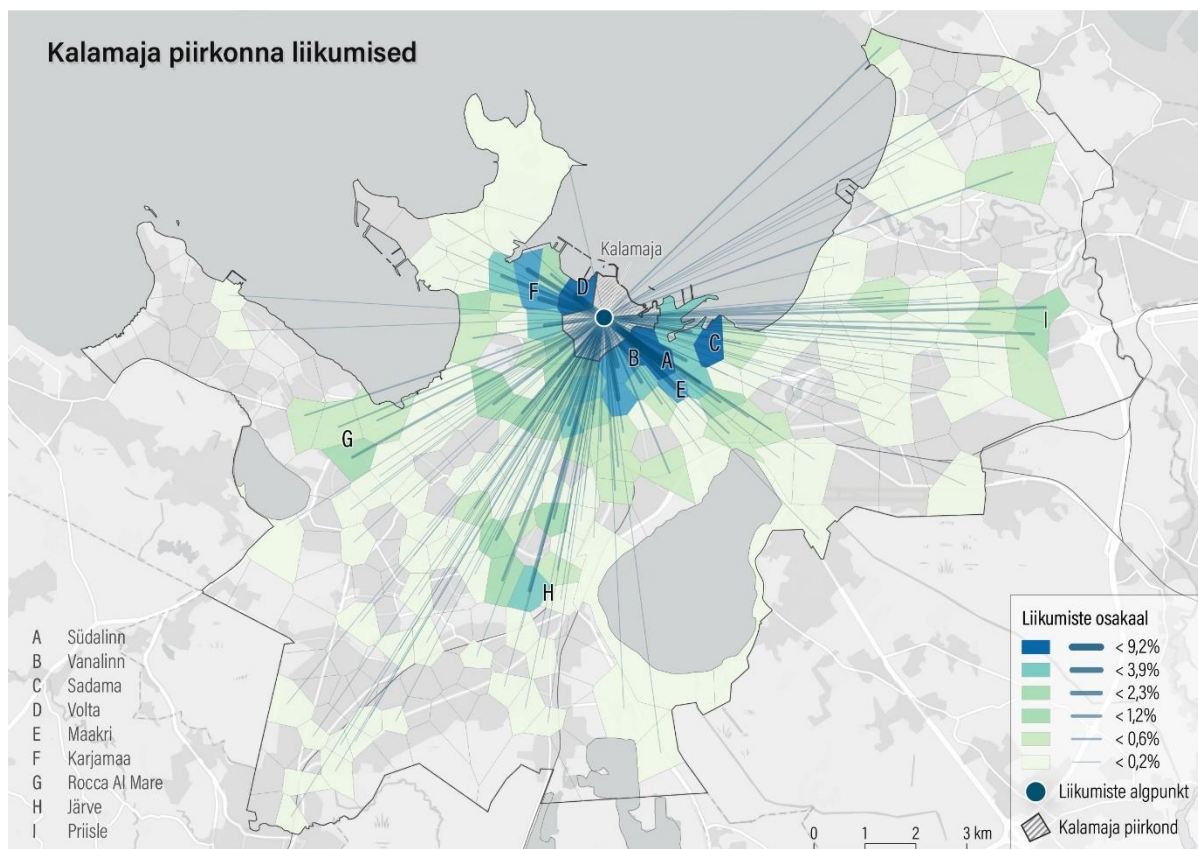
Joonisel 11 ja tabelis 1 on välja toodud elanike ja töökohade arv teenustaseme kategooriate lõikes. Kategooriad on moodustatud loomulike katkestuste meetodiga. Suurem osa elanikest elavad keskmise teenustasemega transporditsoonis (37,8%), samuti paikneb suurem osa töökohtadest (28%) keskmise teenustasemega piirkonnas. Suurim suhteline erinevus töökohtade ja elanike arvu vahel esineb kõige kõrgema teenustaseme kategooria puhul — 13,2% töökohtadest asuvad väga kõrge teenustasemega transporditsoonis, elanike arvu puhul on sama näitaja vaid 2,8%.

Tabel 1. Elanike ja töökohtade jagunemine teenustasemete lõikes.

Teenustase SI		Tsoonide arv	Elanike arv		Töökohtade arv	
	231-570	5	2,8 %	13 176	13,2 %	25 657
	109-231	37	22,7 %	104 314	20,2 %	39 238
	59-108	63	37,8 %	174 085	28,0 %	54 430
	24-58	64	21,5 %	99 234	23,0 %	44 592
	1-23	98	15,0 %	69 182	14,8 %	28 725

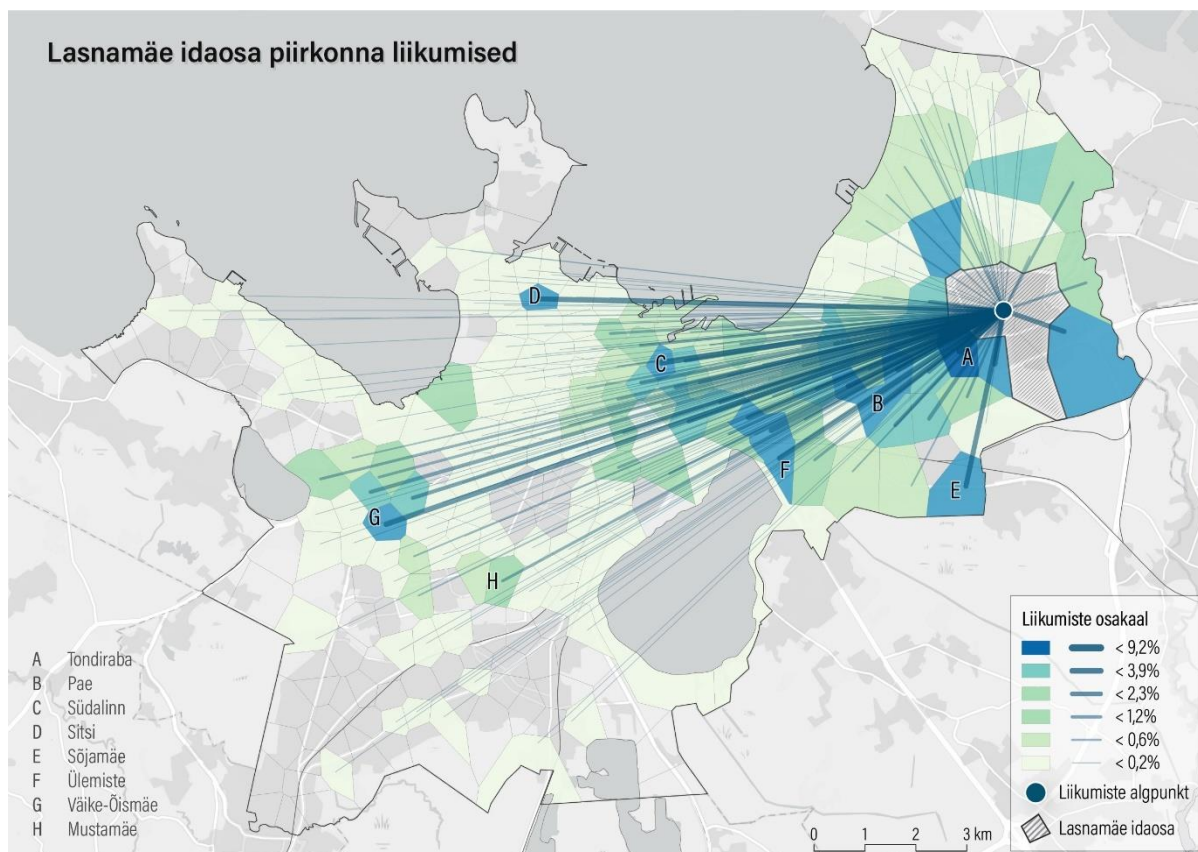
3.2 Dünaamiline ligipääsetavus sihtkohtadele Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidetel

Ühistranspordiga dünaamilist ligipääsetavust on hinnatud GPS-andmetest tuvastatud sihtkohtadele Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidetel. Kolme kuu pikkuse perioodi GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamise tulemusi on visualiseeritud esimesel kahel kaardil (vt joonised 12 ja 13).



Joonis 12. Liikumissuunad ja peamised sihtkohad Kalamaja piirkonna näitel.

Kalamaja piirkonnast algavad ja lõpevad liikumised on välja toodud joonisel 12. Kaardilt on näha, et peamiselt liigutakse Kalamaja ja Südalinna (150 liikumist), Vanalinna (129 liikumist), Sadama (128 liikumist), Volta (105 liikumist), Maakri (64 liikumist) ja Karjamaa (51 liikumist) piirkondade vahel. Kaugematest sihtkohtadest kerkivad esile Priisle, Rocca Al Mare ja Järve piirkonnad.

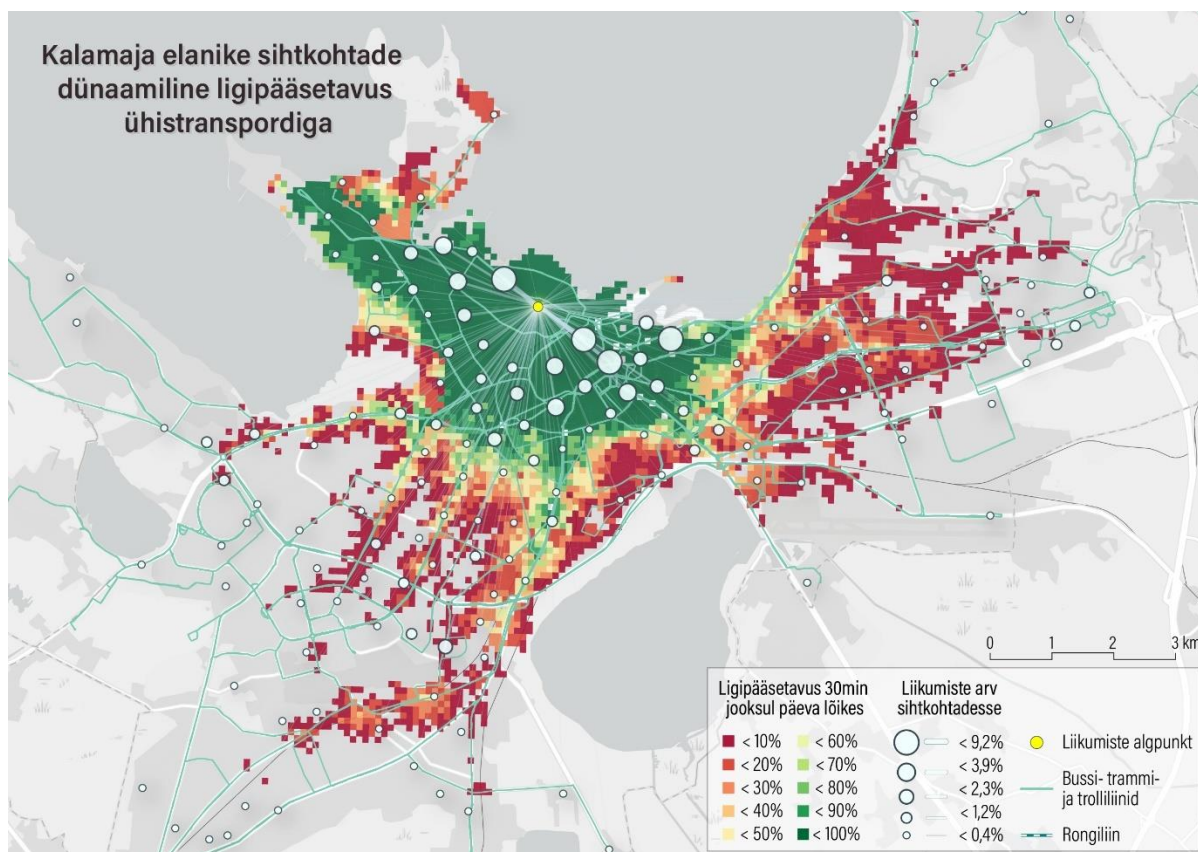


Joonis 13. Liikumissuunad ja peamised sihtkohad Lasnamäe idaosa piirkonna näitel.

Lasnamäe idaosa piirkonnast algavad ja lõppevad liikumised on välja toodud joonisel 13. Peamiselt liigutakse Lasnamäe idaosa ja Tondiraba (213 liikumist), Pae (107 liikumist), Südalinna (106 liikumist), Sitsi (102 liikumist), Sõjamäe (93 liikumist) ja Ülemiste (91 liikumist) piirkondade vahel. Kaugematest sihtkohtadest kerkivad esile Väike-Õismäe ja Mustamäe piirkonnad.

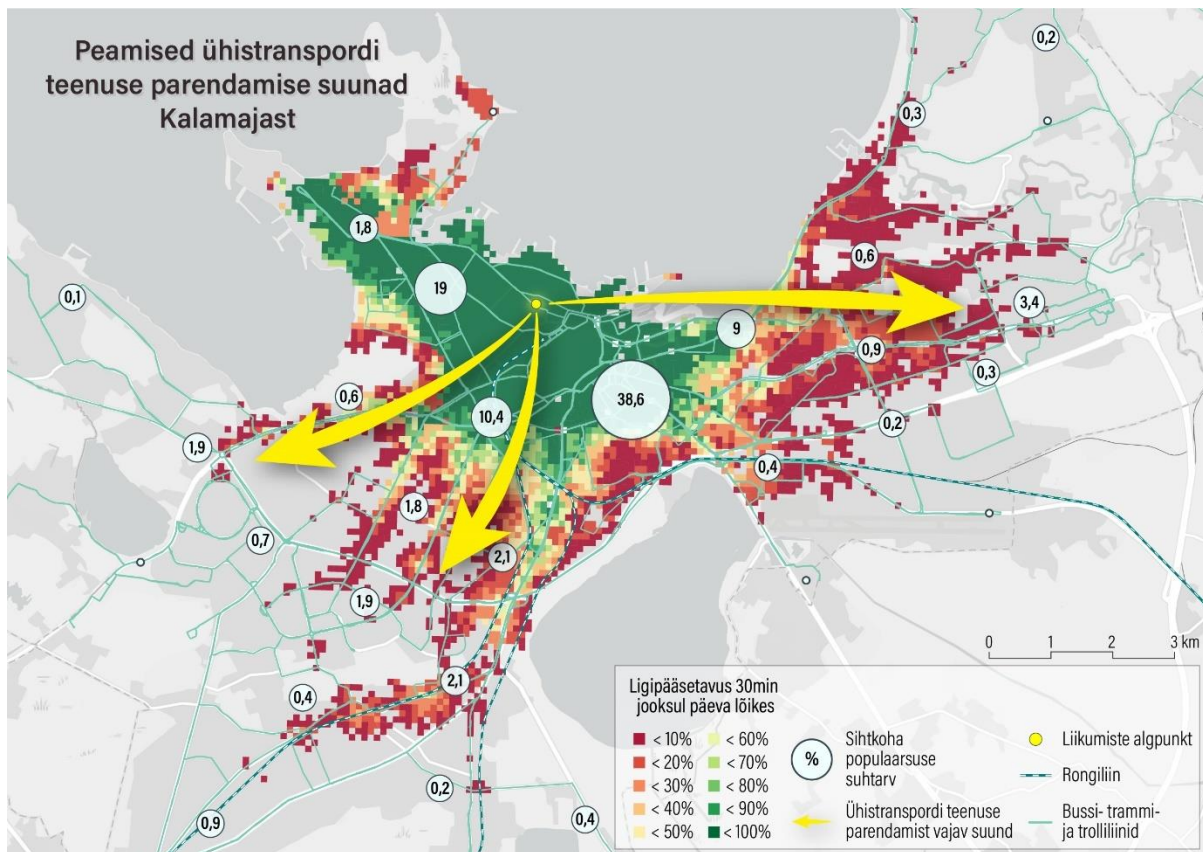
Korrates teoreetilises ülevaates esitatut varieerub ühistranspordiga ligipääsetavus liikumise algusajast sõltuvalt eelkõige sõidugraafiku tõttu. Mida pikem on liikumise alg- ja lõpp-punkti vaheline vahemaa, seda suurem on ligipääsetavuse varieeruvus. Järgnevalt on esitatud ülevaade sihtkohtade ligipääsetavusest tüüpilise tööpäeva jooksul.

3.2.1 Kalamaja elanike sihtkohtade dünaamiline ligipääsetavus



Joonis 14. Kalamaja elanike sihtkohtade dünaamiline ligipääsetavus ühistranspordiga.

Joonisel 14 on kujutatud Kalamaja elanike sihtkohtade ligipääsetavus kuni 30-minutilise ajakuluga päeva jooksul (6:00 – 23:45). Sihtkohad, kuhu liigutakse enim, on enamasti kuni poole tunni kaugusel ühistranspordi ja jalgsi liikumisel ning ligipääsetavad terve päeva vältel. Tähelepanuväärne mõju ligipääsetavusele on reisirongiliiklusel — Nõmme suunal on võimalik poole tunniga jõuda kaugematesse sihtkohtadesse kui teistel suundadel. Siiski on see võimalik vaid kuni 50% osas päevast, mis viitab rongide madalale väljumissagedusele.



Joonis 15. Peamised ühistranspordi teenuse parendamise suunad Kalamajast.

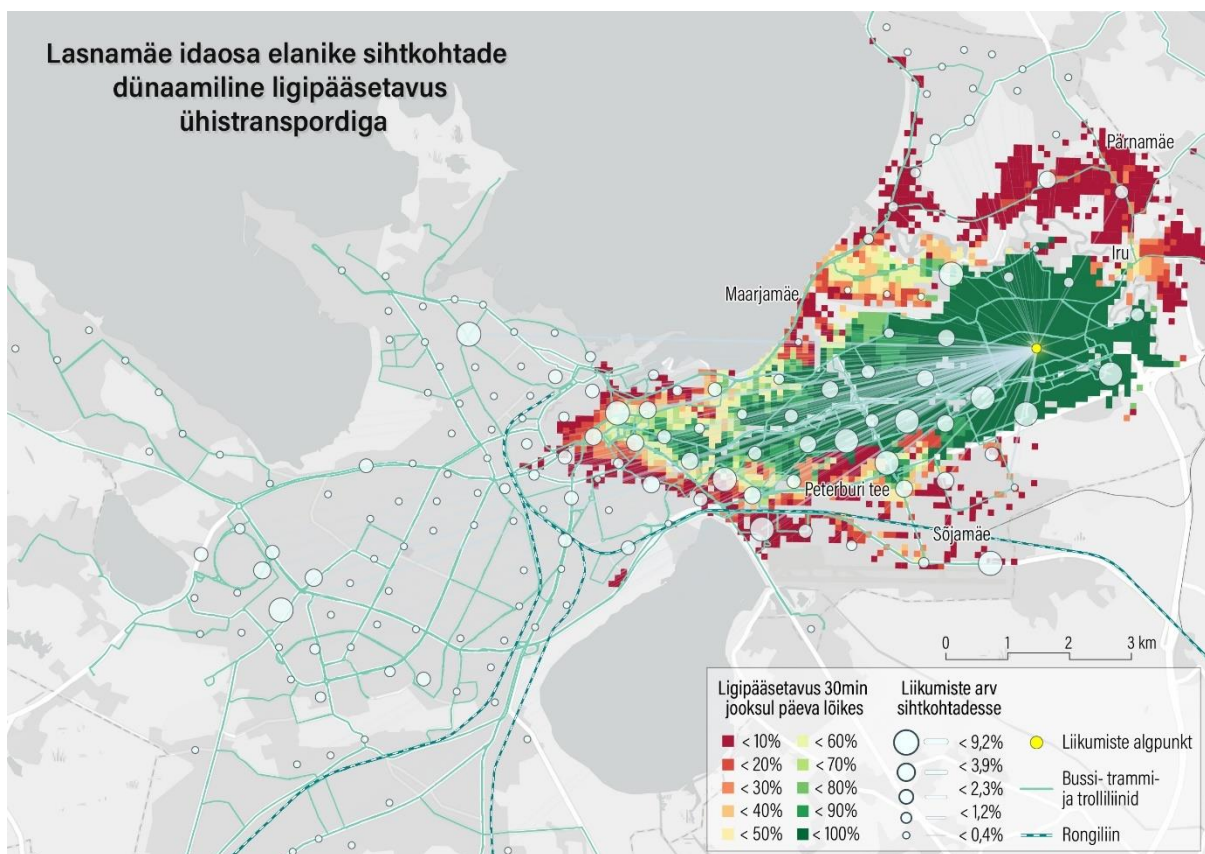
Sihtkohtasid klasterdades tulevad paremini esile need sihtkohad, kuhu ühistranspordiga ja jalgsi liikudes puudub kuni pooletunnine ühendus või on saadaval vaid piiratud aegadel päeva jooksul. Joonisel 15 on esitatud sihtkohtade klastrid ja peamised liikumissuunad, mis vajavad kiiremat ja tihedamat ühistranspordiühendust. Kokku on vähemalt ühe korra päeva jooksul pooletunnise liikumisega võimalik jõuda 89,6% huvialuste sihtkohtadeni. Nendest 77,2% on ligipääsetavad vähemalt poole päeva ulatuses ja 69,7% peaaegu terve päeva ulatuses (üle 90% liikumiste algusaegadest). Peamised sihtkohad, mis vajaksid kiiremat ja stabiilsemat ühistranspordi ühendust on Rocca Al Mare, Lasnamäe idaosa, Mustamäe ja Nõmme suundadel.

3.2.2 Lasnamäe idaosa elanike sihtkohtade dünaamiline ligipääsetavus

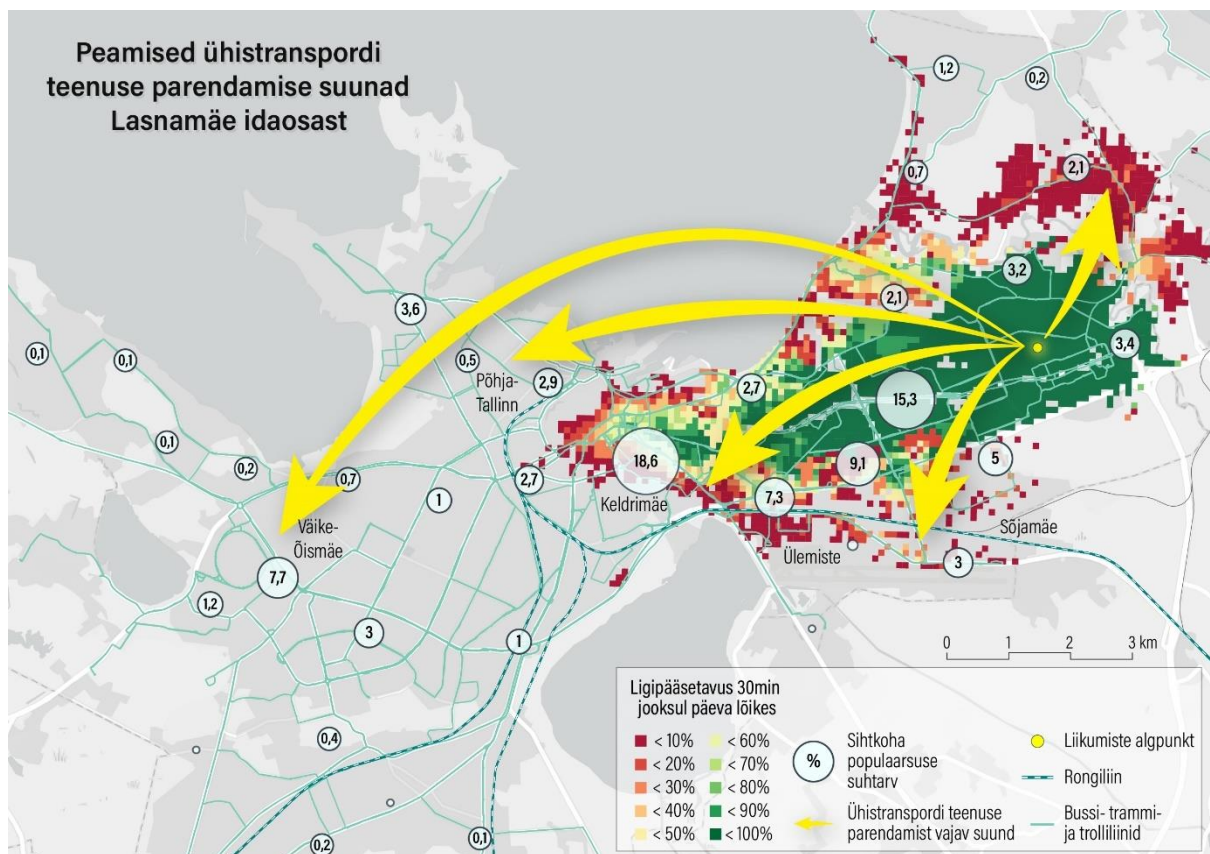
Sarnaselt eelnevale näitele on joonisel 16 kujutatud Lasnamäe idaosa elanike sihtkohtade ligipääsetavuse määr päeva jooksul. Võrreldes Kalamajaga on Lasnamäe idaosa liikumiste puhul tunduvalt suurem osakaal sihtkohti, milleni ei ole võimalik jõuda kuni pooletunnise ühistranspordi ja jala liikumisega või on võimalik vaid piiratud kellaaegadel. Üldjoontes on Lasnamäe linnaosaga, täpsemalt Laagna tee ja Narva maantee ümbrusega, tagatud kiire ja stabiilne ühistranspordiühendus terve päeva vältel.

Erinevalt Kalamaja näitest on tulemustes märgata järske ruumilisi üleminekuid, kus ligipääsetavuse määr kõrvuti asuvates ruutudes erineb enam kui poole võrra. Vaatamata Iru, Pärnamäe, Maarjamäe ja Sõjamäe piirkondade eukleidilisele lähedusele, on kuni pooletunnise liikumisega ligipääsetavus mainitud piirkondadesse olulisel määral varieeruv. Üks põhjuseid on piirkonna füüsilises geograafias — Lasnamägi on Piritast ja Maarjamäest eraldatud klindiga, mis piirab piirkondade vahelisi liikumisvõimalusi. Teine põhjus tuleneb Tallinna ühistranspordi liinivõrgust — Iru ja Pärnamäe piirkondades on vaid üksikud väljumised tunnis (vt joonis 9).

Mõnevõrra üllatav on Peterburi tee ja Sõjamäe piirkonna madal ligipääsetavuse määr. Sõjamäe puhul on näitaja osalt põhjendatav madala teenustasemega (vt joonis 10), kuid Peterburi tee ääres on teenustase Sõjamäega võrreldes kõrgem. Siinkohal võib tegu olla piirkonna industriaalse maakasutusega, mis ei võimalda otseseid jalgsi liikumise ühendusi.



Joonis 16. Lasnamäe idaosa elanike sihtkohtade dünaamiline ligipääsetavus ühistranspordiga.



Joonis 17. Peamised ühistranspordi teenuse parendamise suunad Lasnamäe idaosast.

Sihtkohtasid klasterdades on vähemalt ühe korra päeva jooksul kuni poole tunnise liikumisega ligipääsetav tunduvalt väiksem arv huvialustest sihtkohtadest (69,5%) Kalamaja näitega võrreldes (vastav näitaja 89,6%) (vt joonis 17). Nendest kuni 43% on ligipääsetavad vähemalt poole päeva ulatuses ja 36% peaaegu terve päeva ulatuses. Peamised sihtkohad, mis vajaksid kiiremat ja stabiilsemat ühistranspordi ühendust, on kesklinn, Ülemiste, Sõjamäe, Keldrimäe, Põhja-Tallinn ja Väike-Õismäe piirkonnad.

4. TULEMUSTE ARUTELU JA JÄRELDUSED

Käesolevas peatükis arutatakse ja võetakse kokku töö tulemused ning hinnatakse metoodika sobivust ja kitsaskohtasid. Peatüki lõpus tuuakse välja soovitused ja ettepanekud edaspidisteks uuringuteks käsitletud teemal.

4.1 Tulemuste hindamine

Ühistranspordiga ligipääsetavust hinnati kahe erineva meetodiga. Esiteks arvutati ühistranspordi teenustase igale transporditsoonile, mille tulemusena valmis ülevaade teenustaseme ruumilistest erinevustest. Teiseks uuriti Kalamaja ja Lasnamäe idaosa piirkondade dünaamilist ligipääsetavust GPS-andmetest tuvastatud sihtkohtadele.

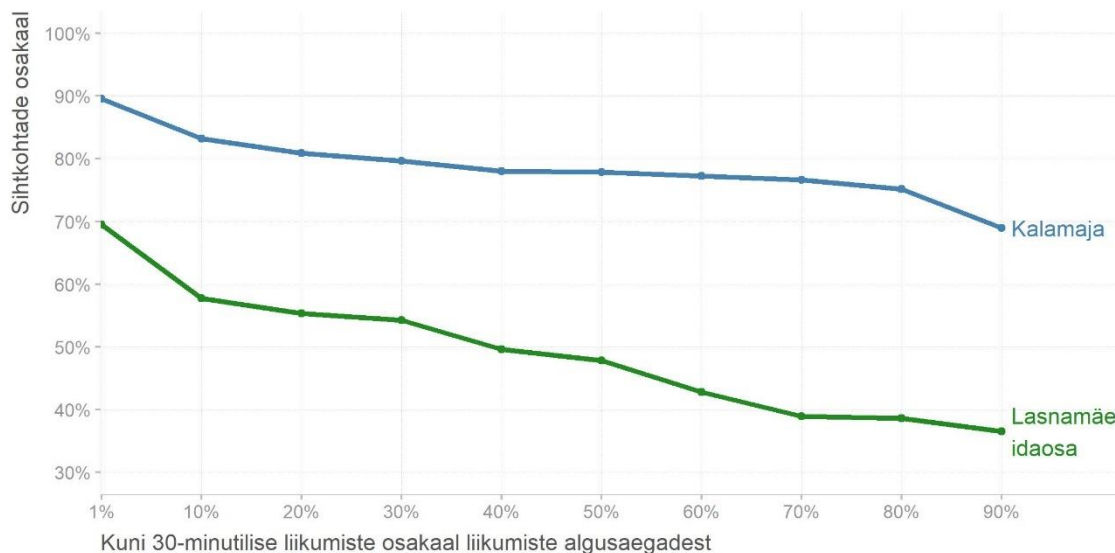
4.1.1 Ühistranspordi teenustase

Tulemustest on ilmne, et ühistransporditeenus Tallinnas on kontsentreerunud teatud piirkondadesse. Varasemad uuringud on ühistransporditeenuse kättesaadavust Tallinnas pidanud väga heaks, kuna valdavale enamikule elanikest jääb lähim peatus lühikese jalutuskäigu kaugusele (Antov et al., 2017; Lepik, 2018). Ainuüksi peatuse füüsilist lähedust arvestades ülehinnatakse ühistranspordiga ligipääsetavust (vt peatükk 1.3.3), mida kinnitavad käesoleva töö tulemused. Kesklinnast kaugemal paiknevates elurajoonides (nt Kakumäel, osa Nõmmest, Pirital ja Mustjões) on keskmine peatusest väljumiste arv tunnis viis korda või vähem, mis vähendab piirkonna elanike ligipääsetavust ühistranspordiga. 37,8% Tallinna elanikest elavad keskmise teenustasemega piirkondades (*SI* väärtused 59–108), kuid umbes sama suurusjärg elanikke ehk 36,5% elavad suhteliselt madala teenustasemega piirkondades (*SI* väärtused 1-58).

Ühistranspordi eesmärk ei saagi olla võrdse tasemega teenuse pakkumine terves linnas, kuna rahvastiku, töökohtade ja oluliste teenuste paiknemine ei ole linnas ühtlaselt jaotunud. On selge, et ühistransporditeenus on koondunud suurema liikumisnõudlusega piirkondadesse, kuid kasutatud meetod võimaldab tuvastada piirkonnad, kus oleks potentsiaalne vajadus teenustaset tõsta. Ühistranspordi konkurentsivõime tõstmiseks on oluline, et kõrge teenustase oleks ligipääsetav võimalikult suurele elanikkonnale, kuid paraku seavad rahalised vahendid sageli piiri teenustaseme tõstmisele.

4.1.2 Dünaamiline ligipääsetavus

Tulemused tõestavad ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamisel kellajaliste erinevustega arvestamise olulisust. Ligipääsetavuse staatiline hindamine ühel konkreetsel kellajal võib tõsiselt ülehinnata või mõnel juhul ka alahinnata piirkonna ligipääsetavust, kuna ühistranspordi teenus baseerub kindlate intervallidega sõidugraafikul. Nii Kalamaja kui ka Lasnamäe idaosa näite puhul tulid selgelt esile piirkonnad, kuhu on tagatud stabiilne pooletunnine ühistranspordiühendus ja piirkonnad, kuhu kuni poole tunniga jõudmine sõltub suuresti liikumise algusajast. Kui Kalamaja puhul asus valdav enamus huvialustest sihtkohtadest stabiilse pooletunnise ühistranspordiga liikumise teeninduspiirkonnas (69,7% sihtkohtadest kuni poole tunniga ligipääsetav vähemalt 90% päevast), oli Lasnamäe idaosa puhul vastav näitaja tunduvalt madalam (36,6% vähemalt 90% päevast) (vt joonis 18).



Joonis 18. 30-minutilise ajakuluga ligipääsetavate sihtkohtade osakaal päevasest liikumiste algusaegadest.

Joonise 18 põhjal saab järeldada, et Kalamaja piirkonna ühistranspordivõrk on tunduvalt paremas vastavuses piirkonna liikumiste teenindamisega võrreldes Lasnamäe idaosaga. Siinjuures on oluline täheldada, et Kalamaja puhul asuvad liikumiste peamised sihtkohad piirkonnale võrdlemisi lähedal, mistõttu ei ole probleemiks ka jalgsi ja ühistranspordiga poole tunniga sihtkohta jõudmine.

Ühistranspordiga liikumise ajakulu mõjutab mitu tegurit, kuid peamiseks mõjutajaks on sõidugraafikust tulenev väljumiste sagedus. Lisaks on oluliseks mõjutajaks otseliini

olemasolu — ümberistumise vajadus põhjustab lisaajakulu, mille kestus sõltub erinevate ühistranspordiliinide sõidugraafikute sünkroniseerimisest ja ümberistumise mugavusest. Liikumise algusajast sõltuvalt võib kahe asukoha vahelise liikumise ajakulu erineda märgatavalt. Joonisel 19 on näitena välja toodud ühistranspordiga liikumise ajakulu varieerumine Lasnamäe idaosa ja Ülemiste vahel liikudes päeva jooksul.



Joonis 19. Lasnamäe idaosa ja Ülemiste vahelise liikumise kestuse varieeruvus ühistranspordiga. Vähem kui poole tunniga jõuab Ülemisteni vaid 5,5% päevast.

Mõnel üksikul juhul päevas on võimalik Ülemistesse jõuda napilt alla poole tunni, kuid ajakulu võib ületada ka kolmveerand tundi ja kesköö paiku ületada terve tunni tulenevalt liini sulgemisele eelnevast sõidugraafiku hõrenemisest.

Mõlema ligipäätavuse hindamise meetodi puhul tuli esile reisirongiliikluse mõju kiiremate ja kättesaadavamate ühistranspordiühenduste tagamisel. Teenustaseme arvutamisel oli raudteepeatustele määratud kahekordne teeninduspiirkond, mis kajastab rongiga liikumise suuremat atraktiivsust bussiga võrreldes. Selle tulemusena on Nõmme läbiva raudteeäärsed transporditsoonid tunduvalt kõrgema teenustasemega teiste sama piirkonna tsoonidega võrreldes. Dünaamilise ligipäätavuse hindamisel Kalamaja näitel ilmneb samuti raudtee mõju — poole tunniga on võimalik Kalamajast jõuda Hiiuni, küll vaid üksikudel aegadel päevas. Seega saab järeldada, et ligipäätavuse parendamisel etendab olulist rolli just rööbastranspordi arendamine.

4.2 Metoodika hindamine ja olulisus

Isikliku sõiduautoga liikumise vähendamiseks ja ühistranspordi kasutuse soosimiseks on teostatud ligipääsetavuse analüüs olulise tähtsusega. Liikudes sihtkohta, kuhu pooletunnine ühistranspordiühendus ei ole tagatud või on võimalik vaid üksikutel kellaaegadel, ei ole ühistransport isikliku sõiduautoga konkurentsivõimeline, mistõttu eelistatakse autoga liikumist. Kasutatud metoodika võimaldab tuvastada liikumissuunad, kuhu on vaja tagada senisest kiirem ja sagedasem ühistranspordiühendus vähendamaks sõltuvust isiklikust sõiduautost. Metoodikat on vajalik rakendada ka teistes Tallinna piirkondades madala ühistranspordiga ligipääsetavuse piirkondade tuvastamiseks.

Liikumisvajaduste tuvastamisel on GPS-andmete ja teiste suurandmete põhine mobiilsuseuurimine asendamatu väärtusega, kuna võimaldab liikumismustreid tuvastada ulatuslikul ajalisel skaalal. Mobiilsusandmete analüüs ja agregeeritud liikumiste OD-matriksi koostamine on aga keeruline ja aeganõudev protsess, mis nõuab suurt arvutijõudlust. Antud töös kasutatud 22,3 miljonit GPS-seadme asukoha fikseeringut nõudis üle 70 tunni töötlust liikumiste ja sihtkohtade tuvastamiseks RStudio keskkonnas. Käesoleva töö käigus arendatud metoodika eesmärgipärast toimimist tõestati hinnates ligipääsetavust ühistranspordiga, kuid keeruline on hinnata metoodika täpsust liikumiste tuvastamisel. Metoodika edasiarendamisel ja kalibreerimisel oleks kindlasti vaja tulemusi valideerida, näiteks liikumispäevikuga kõrvutades.

Töös rakendatud ühistranspordiga liikumise ajakulu hindamisel on tehtud lihtsustusi, mis võivad tulemusi moonutada. Esiteks on ajakulu arvutamisel liikumised modelleeritud punktist eemale liikudes, kuid täpsema ajakulu arvutamiseks kahe asukoha vahel liikudes tuleks ühtlasi modelleerida liikumist punkti poole. Liikumine on modelleeritud tüüpilisel tööpäeval, mistõttu võib nädalavahetustel ja riigipühadel ligipääsetavus esitatust erineda.

Tegelik liikumise ajakulu mingil kellaajal võib arvutatust erineda mitmel põhjusel. Esiteks ei esinda transporditsooni tsentroid tegelikku liikumise alg- ja lõpp-punkti, mistõttu võib reaalne liikumine tsoonist suuruselt sõltuvalt kesta 1–10 minutit kauem. Teiseks, mudel rakendab ühistranspordiga liikumisel ajakulu sõidugraafikupõhiselt ega arvesta hilinemiste või võimalike katkestustega. Siiski ei ole sõidugraafikus peatuste vaheline ajakulu päeva jooksul konstantne, vaid arvestab mõnevõrra suurema ajakuluga tipptundidel, mil liikluskoormus on tänavatel suurem. Kolmandaks ei ole mudelis ülempiiri ümberistumiste arvul, mistõttu ei pruugi kõige kiirem liikumine kahe asukoha vahel olla kõige mugavam või realistlikum. On ka

võimalik, et lähestikku asuvate transporditsoonide vahel on kõige kiirem liikumisviis jalgsi, mistõttu ei ole ühistransporti liikumisel kasutatud ning ajakulu peegeldab jalgsi liikumist teedevõrgus.

Mudeli täpsust on võimalik tõsta kasutades reaalaaja andmeid. Tallinna ühistranspordi sõidukid on varustatud GPS-seadmetega, mille abil oleks võimalik tuvastada tegelik peatuste vaheline sõiduaeg eri kellaaegadel. Jalgsi liikumise ajakulu täpsust oleks samuti võimalik GPS-andmete põhjal parendada, kuid eeldaks suuremahulist ja pikaajalist uuringut.

4.3 Soovitused edaspidisteks uuringuteks

GPS-andmete kasutamisel mobiilsusuuringutes on kõige olulisem, et valim põhjal leitud tulemused oleksid laiendatavad üldpopulatsioonile. Selleks on vajalik uuringu eesmärkidest tulenevalt koostada sobiv valim, mida paraku ei olnud käesoleva töö tarbeks võimalik teha.

Ühistranspordi planeerimise ja hindamise juures on kõige olulisem analüüsida, kuidas vastab teenus reaalsele liikumisvajadustele. Tallinna ühistranspordiga ligipääsetavuse uurimisel linnaüleselt oleks vaja kasutada GPS-andmeid, mille valim oleks ühtlaselt jaotunud kõikide transporditsoonide vahel. Liikumismustrite paremaks kaardistamiseks tuleks kasutada pikema perioodi GPS-andmeid, näiteks poole aasta kuni aasta liikumisandmeid. Lisaks toimub intensiivne igapäevane pendelränne Tallinna ja naaberomavalitsuste vahel, mistõttu oleks vajalik uurimisala laiendamine.

Ühistranspordiga liikumise ajakulu võimalikult täpseks modelleerimiseks oleks tulevikus mõistlik rakendada *GTFS realtime* andmestikku, mis kajastab sõidu aega reaajas. Välismaal on *GTFS realtime* juba kasutuses, kuid Eestis ei ole veel seda võimalust.

5. KOKKUVÕTE

Ligipääsetavusest on kujunenud oluline kontseptsioon nii linna- kui ka transpordiplaneerimises. Vaatamata ligipääsetavuse hindamise laialdasele tähelepanule domineerib transpordiplaneerimises endiselt mobiilsuspõhine lähenemine, mis keskendub eelkõige autoliikluse sujuvamaks muutmisele. Tallinnas on aina suurenev autostumine tõsiseks probleemiks, mille leevendamisel nähakse lahendusena ühistranspordi kasutuse tõstmist. Ühistranspordiga ligipääsetavuse parendamiseks on määrava tähtsusega, et liinivõrk põhineks reaalsel liikumisvajadustel. Suurandmete, näiteks GPS-tehnoloogia rakendamine mobiilsuse uurimisel, võimaldab tuvastada linnaelanike üldisi liikumismustreid ja huvialuseid sihtkohtasid, mis on transpordiplaneerimisel asendamatu väärtusega.

Käesoleva töö raames loodi metoodika GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamiseks, mida kasutati ühistranspordiga ligipääsetavuse hindamisel. ArcGIS Pro programmi *Network Analyst* laiendust kasutati Tallinna ühistranspordivõrgu modelleerimisel. Tulemusena valmis põhjalik analüüs ligipääsetavusest, mis hõlmas nii ühistranspordi teenustaseme arvutamist Tallinna linnale kui ka ühistranspordiga dünaamilise ligipääsetavuse hindamist Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidetel.

Tulemustest selgus, et ühistranspordi teenustase varieerub transporditsoonide lõikes märgatavalt ning kõrgeim teenustase on kesklinna piirkonnas. Madalaima teenustasemega piirkonnad on kesklinnast kaugemale jäävad elurajoonid. Dünaamilise ligipääsetavuse hindamisel GPS-andmetest tuvastatud sihtkohtadele Kalamaja ja Lasnamäe idaosa näidete põhjal selgus, et ühistranspordiga liikumise ajakulu varieerub päeva jooksul märgatavalt. Kalamaja elanikel on ühistranspordiga tagatud stabiilne juurdepääs valdavale enamusele huvialustest sihtkohtadest — poole tunni jooksul on olenemata liikumise algusajast juurdepääsetav peaaegu 70% sihtkohtadest. Lasnamäe puhul on vastav näitaja pea poole madalam. Viimasest tulenevalt on ühistranspordiga ligipääsetavuse parendamiseks Lasnamäel vajalik tagada olemasolevast kiiremad ühendused sihtkohtadele Väike-Õismäe, Põhja-Tallinna, Ülemiste ja Pirita suundadel. Ühtlasi tõusis esile reisirongiliikluse olulisus kiirete transpordiühenduste tagamisel.

Tulemuste põhjal saab töö sissejuhatuses püstitatud hüpoteesi osaliselt kinnitada — olemasolev ühistranspordivõrgustik võimaldab Kalamaja elanikel jõuda valdava enamuse huvialaste sihtkohtadeni kuni poole tunni ajakuluga kasutades ühistransporti, kuid ei võimalda seda samal määral Lasnamäe idaosa elanikele.

Uurimistöös teostatud ligipääsetavuse analüüsi tulemused on oluliseks sisendiks Tallinna ühistranspordi konkurentsivõime tõstmisel ja seeläbi isikliku sõiduautoga liikumise vähendamiseks. Kahtlemata on Tallinna ühistranspordi dünaamilise ligipääsetavuse tervikpildi saamiseks vajalik lisaks Kalamaja ja Lasnamäe idaosa piirkondadele hinnata ligipääsetavust ka teistes Tallinna piirkondades sarnase meetodika alusel. Ajakulu arvutamisel edaspidistes uuringutes on otstarbekam lähtuda reaalaandmetest, kasutades näiteks ühissõidukite GPS-andmeid või potentsiaalselt *GTFS realtime* andmestikku, mida käesoleva töö koostamise ajal ei ole Eestis veel kasutusel.

Töö käigus arendati välja meetodika GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamiseks. Meetodika eesmärgipärast toimimist tõestati hinnates ligipääsetavust sihtkohtadele ühistranspordiga. Edaspidistes mobiilsusuuringutes on võimalik väljatöötatud lähenemist kasutada liikumismustrite tuvastamiseks, eeldusel et toimub meetodi täiendav kalibreerimine uuringutulemuste parema täpsuse saavutamiseks.

Assessing public transport accessibility utilising GPS data

Martin Haamer

Summary

Transport policies across Europe are ever increasingly focusing on reducing transport emissions and facilitating sustainable means of transport. Tallinn, Estonia is facing serious problems caused by constantly rising levels of car usage. Tallinn's public transportation network is several decades old and urgently needs reconfiguration in order to meet the current travel demand, which could alleviate car dependency. High levels of accessibility and a public transportation network based on actual travel demand is the key in achieving the aforementioned goal. Ever increasing daily mobility and the widespread availability of GPS equipped smartphones has exponentially increased the quantities of mobility data available, facilitating the study of individual travel patterns on a large temporal scale and resolution. Despite the widespread use of big data such as GPS in mobility studies, the use of big data in accessibility studies remains limited.

The aim of the thesis is to assess public transport accessibility in Tallinn based on GPS data by developing a methodology for identifying travel patterns and destinations from GPS traces. Accessibility is measured using two distinct methods: calculation of public transport supply based on a service index measure and utilizing dynamic accessibility with a case study measuring the accessibility to travel destinations identified from GPS data for districts of Kalamaja and eastern part of Lasnamägi. To the knowledge of the author, this thesis is the first of its kind to incorporate GPS data in the analysis of dynamic location-based accessibility by public transport in Tallinn.

Public transport data in GTFS format and data from OpenStreetMaps (OSM) has been used to create a model of the public transport network in Tallinn using ArcGIS Pro Network Analyst. The model was used to simulate movement by public transit and walking between any two locations at different times of departure.

The results reveal that public transport supply across Tallinn varies substantially, with the highest levels of supply in the city centre. Assessing dynamic accessibility by public transport to destinations identified from GPS data in the districts of Kalamaja and eastern part of Lasnamägi reveal major fluctuations in travel time based on the time of travel. The residents

of Kalamaja can reach most of the identified destinations within half an hour's journey with minor fluctuations during the day, however the residents of Lasnamägi have a substantially lower level of access to identified destinations within half an hour and travel times vary considerably. Another key finding of the research is the importance of commuter train traffic in providing reliable and fast travel connections.

The relevance of the thesis lies in the development of a novel methodology for identifying travel demand and destinations from GPS traces to be used in mobility studies and transport planning. Further studies using GPS data should include larger sample sizes and ensure that the study participants are equally distributed across the study area. A longer temporal span of data collection, for example half a year up to a year is also recommended, however this does require a large amount of computational power.

The results highlight the importance of considering temporal aspects in accessibility analysis in order to obtain objective results. Further research and analysis of dynamic accessibility by public transport is definitely necessary as the current research has focused on only two distinct districts of Tallinn. Also, travel time calculation in future research should be based on real time positioning data, for example GTFS realtime, which at the time of current research has not been available in Estonia.

TÄNUAVALDUSED

Soovin tänada oma ema ja isa, kes olid suureks toeks töö tagasisidestamisel ja võimaldasid minul pühenduda täielikult töö kirjutamisele. Samuti soovin tänada oma juhendajat, Anto Aasat kaasamõtlemise ja andmete võimaldamise eest. Lisaks tänan Indrek Gailani ja Mari Jüssiit varasemate uuringute materjalide saatmise eest, Ago Tomingat töö tagasisidestamise eest ja Merli Ilvest keeleliste soovitude eest.

Martin Haamer

30.05.2022

KASUTATUD KIRJANDUS

- Aasa, A., & Veiler, M. (2021). *Kriminaalhooldusaluste asukoha ning suhtlemispiirangute kontrollnõuete ja kohustuste täitmist jälgiva mobiilirakenduse algoritmide arendus ja testimine.*
- Ahas, R., Silm, S., Järv, O., Saluveer, E., & Tiru, M. (2010). Using mobile positioning data to model locations meaningful to users of mobile phones. *Journal of Urban Technology*, 17(1), 3–27. <https://doi.org/10.1080/10630731003597306>
- Ahmed, A., & Stopher, P. (2014). Seventy Minutes Plus or Minus 10 — A Review of Travel Time Budget Studies. *Transport Reviews*, 34(5), 607–625. <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.946460>
- Antov, D., Antso, I., Rõuk, H., & Mäe, R. (2016). *Tallinna ühistranspordisüsteemi arendamine, liinivõrgu optimeerimine vahearuanne nr.1* (Issue 1). https://uuringud.tallinn.ee/file_download/705
- Antov, D., Antso, I., Rõuk, H., & Mäe, R. (2017). *Tallinna ühistranspordisüsteemi arendamine, liinivõrgu optimeerimine II etapp, aruande 1. osa.* https://uuringud.tallinn.ee/file_download/768
- Barbosa, H., Barthelemy, M., Ghoshal, G., James, C. R., Lenormand, M., Louail, T., Menezes, R., Ramasco, J. J., Simini, F., & Tomasini, M. (2018). Human mobility: Models and applications. *Physics Reports*, 734, 1–74. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.01.001>
- Bejleri, I., Noh, S., Gu, Z., Steiner, R. L., & Winter, S. M. (2018). Analytical Method to Determine Transportation Service Gaps for Transportation Disadvantaged Populations. *Transportation Research Record*, 2672(8), 649–661. <https://doi.org/10.1177/0361198118794290>
- Benenson, I., Martens, K., Rofé, Y., Kwartler, A., Benenson, I., Kwartler, A., Martens, K., & Rofé, Y. (2011). Public transport versus private car GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area. *Ann Reg Sci*, 47, 499–515. <https://doi.org/10.1007/s00168-010-0392-6>
- Biba, S., Curtin, K. M., & Manca, G. (2010). A new method for determining the population with walking access to transit. *International Journal of Geographical Information Science*. <https://doi.org/10.1080/13658810802646679>

- Boisjoly, G., & El-Geneidy, A. M. (2017). The insider: A planners' perspective on accessibility. *Journal of Transport Geography*, *64*, 33–43. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2017.08.006>
- Bok, J., Kwon, Y., Schuetze, T., Tieben, H., Chelleri, L., Ostermeyer, Y., & Wolfram, M. (2016). Comparable Measures of Accessibility to Public Transport Using the General Transit Feed Specification. *Sustainability 2016*, *Vol. 8*, Page 224, 8(3), 224. <https://doi.org/10.3390/SU8030224>
- Chen, Y., Bouferguene, A., Li, H. X., Liu, H., Shen, Y., & Al-Hussein, M. (2018). Spatial gaps in urban public transport supply and demand from the perspective of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *195*, 1237–1248. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.021>
- Civitta Eesti. (2021). *Tallinna regiooni liikuvuse ühendatud planeerimis-, juhtimis- ja finantseerimisanalüüs*.
- COM. (2020). *Putting European transport on track for the future*. https://transport.ec.europa.eu/document/download/be22d311-4a07-4c29-8b72-d6d255846069_en#:~:text=The Commission will work towards, revising the relevant EU legislation.
- Currie, G. (2010). Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs. *Journal of Transport Geography*, *18*(1), 31–41. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2008.12.002>
- Esri. (2022). *Transit Network Analysis Tools User's Guide*. <https://github.com/Esri/public-transit-tools/blob/master/transit-network-analysis-tools/UsersGuide.md>
- European Court of Auditors. (2019). *Audit preview: Urban mobility in the EU*. April. <https://www.eca.europa.eu/hu/Pages/DocItem.aspx?did=49865>
- Farber, S., Morang, M. Z., & Widener, M. J. (2014). Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets. *Applied Geography*, *53*, 149–159. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2014.06.012>
- Farber, S., Ritter, B., & Fu, L. (2016). Space-time mismatch between transit service and observed travel patterns in the Wasatch Front, Utah: A social equity perspective. *Travel Behaviour and Society*, *4*, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2016.01.001>
- Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G., & Witlox, F. (2015).

- Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. *Journal of Transport Geography*, 48, 176–187. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2015.09.008>
- Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2003.10.005>
- Goliszek, S., Połom, M., & Duma, P. (2020). Potential and cumulative accessibility of workplaces by public transport in Szczecin. *Bulletin of Geography. Socio-Economic Series*, 50(50), 133–146. <https://doi.org/10.2478/bog-2020-0037>
- Haamer, M. (2020). *Tallinna linnaruumi multifunktsionaalsuse ja asustustiheduse uurimine Ehitisregistri andmetel* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/68337>
- Hadjidimitriou, N. S., Lippi, M., & Mamei, M. (2021). A Data Driven Approach to Match Demand and Supply for Public Transport Planning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(10), 6384–6394. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2991834>
- Jaramillo, C., Lizárraga, C., & Grindlay, A. L. (2012). Spatial disparity in transport social needs and public transport provision in Santiago de Cali (Colombia). *Journal of Transport Geography*, 24, 340–357. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2012.04.014>
- Järv, O., Tenkanen, H., Salonen, M., Ahas, R., & Toivonen, T. (2018). Dynamic cities: Location-based accessibility modelling as a function of time. *Applied Geography*, 95, 101–110. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2018.04.009>
- Jüssi, M., Konsa, P., Kalvo, R., Luts, L., Sarv, K., & Vahter, L. (2019). *Tallinna regiooni säästva linnaliikuvuse strateegia 2035* (Vol. 45, Issue 45). https://www.mnt.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/tallinna_liikuvuskva_2019november_portrait.pdf
- Kaeoruean, K., Phithakkitnukoon, S., Demissie, M. G., Kattan, L., & Ratti, C. (2020). Analysis of demand–supply gaps in public transit systems based on census and GTFS data: a case study of Calgary, Canada. *Public Transport*, 12(3), 483–516. <https://doi.org/10.1007/S12469-020-00252-Y/FIGURES/28>
- Kalvo, R., Haapamäki, T., Krause, C., Mäkinen, S., Ramseier, R., & Rannala, M. (2021). *TALLINNA REGIOONI LIKUVUSE MUDELDAKINE*. Grupp trükiagentuur OÜ.
- Kim, J., & Lee, B. (2019). More than travel time: New accessibility index capturing the connectivity of transit services. *Journal of Transport Geography*, 78(January), 8–18.

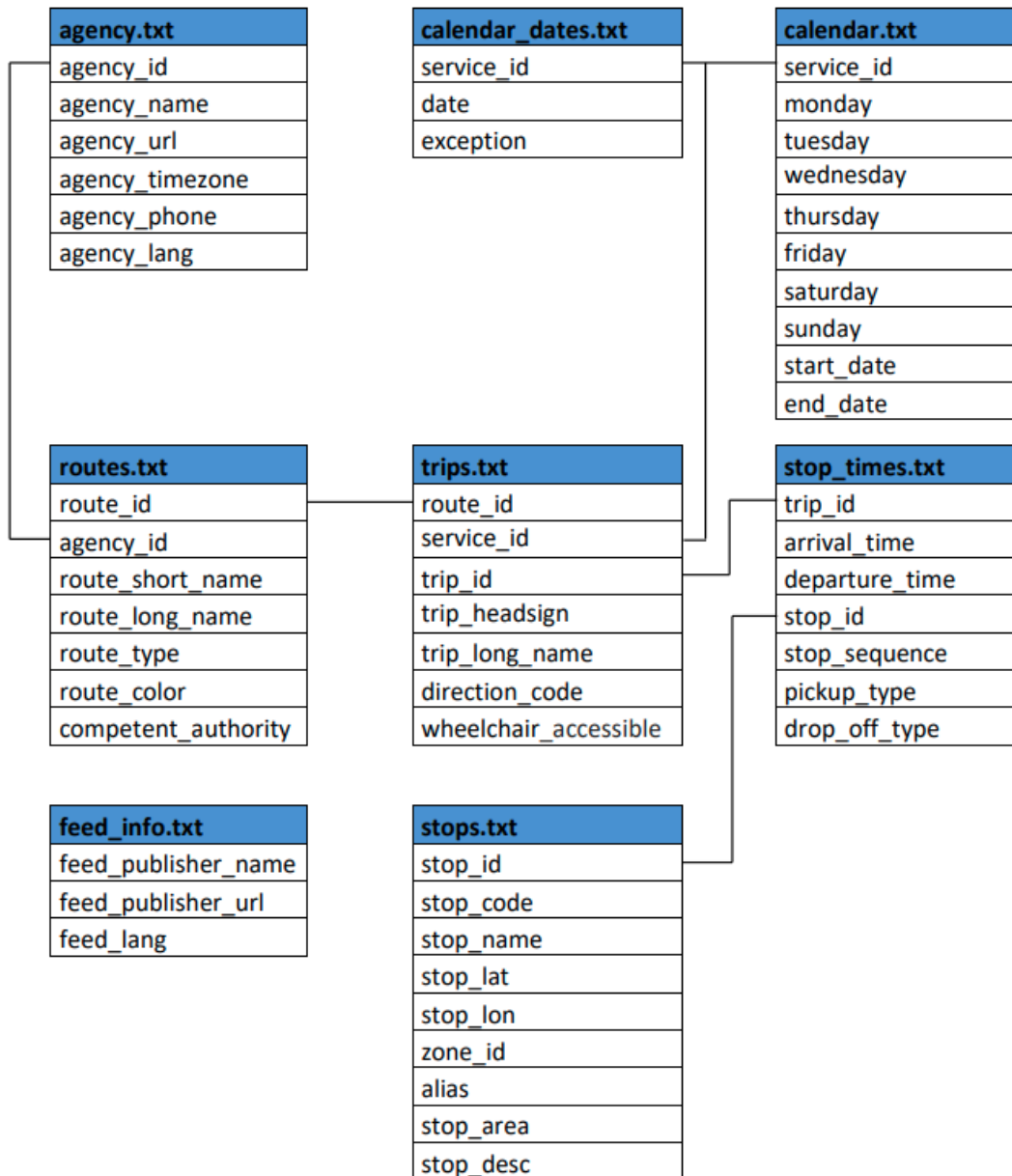
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.05.008>

- Lei, T. L., & Church, R. L. (2010). Mapping transit-based access: integrating GIS, routes and schedules. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/13658810902835404*, 24(2), 283–304. <https://doi.org/10.1080/13658810902835404>
- Lepik, L. (2018). *Ühistranspordi konkurentsivõime tallinnas* [Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/1296edb7-4bb9-4e67-8c4f-1a267bee82e3>
- Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. (2021). *Transpordi ja liikuvuse arengukava 2021-2035*. <https://www.mkm.ee/media/6865/download>
- Mavoja, S., Witten, K., McCreanor, T., & O’Sullivan, D. (2012). GIS based destination accessibility via public transit and walking in Auckland, New Zealand. *Journal of Transport Geography*, 20(1), 15–22. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2011.10.001>
- Merryid, K., & Bettinger, P. (2019). *Smartphone GPS accuracy study in an urban environment*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219890>
- Nassir, N., Hickman, M., Malekzadeh, A., & Irannezhad, E. (2016). A utility-based travel impedance measure for public transit network accessibility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 26–39. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2016.03.007>
- O’Sullivan, D., Morrison, A., & Shearer, J. (2000). Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: an isochrone approach. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/136588100240976*, 14(1), 85–104. <https://doi.org/10.1080/136588100240976>
- Owen, A., & Levinson, D. M. (2015). Modeling the commute mode share of transit using continuous accessibility to jobs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 74, 110–122. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2015.02.002>
- Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2012.03.016>
- Polzin, S. E., Pendyala, R. M., Navari, S., Polzin, S. E., & Navari, S. (2002). Development of Time-of-Day-Based Transit Accessibility Analysis Tool. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1799-05>
- Roosaare, J., Mõisja, K., & Aunap, R. (2019). *Geoinformaatika*. Tartu Ülikooli Kirjastus.

- Saghapour, T., Moridpour, S., & Thompson, R. G. (2016). Public transport accessibility in metropolitan areas: A new approach incorporating population density. *Journal of Transport Geography*, *54*, 273–285. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2016.06.019>
- Saif, M. A., Zefreh, M. M., & Torok, A. (2018). Public Transport Accessibility: A Literature Review. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, *47*(1), 36–43. <https://doi.org/10.3311/PPtr.12072>
- Salonen, M., & Toivonen, T. (2013). Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport. *Journal of Transport Geography*, *31*, 143–153. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2013.06.011>
- Solmaz, G., & Turgut, D. (2019). A Survey of Human Mobility Models. *IEEE Access*, *7*, 125711–125731. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939203>
- Stępniaak, M., & Goliszek, S. (2017). Spatio-temporal variation of accessibility by public transport—the equity perspective. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, *October*, 241–261. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45123-7_18
- Stępniaak, M., Pritchard, J. P., Geurs, K. T., & Goliszek, S. (2019). The impact of temporal resolution on public transport accessibility measurement: Review and case study in Poland. *Journal of Transport Geography*, *75*, 8–24. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2019.01.007>
- Tallinna Linnavolikogu. (2020). *Tallinna arengustrateegia „Tallinn 2035“*. [https://www.riigiteataja.ee/aktiis/4291/2202/0009/17122020 maaruse nr 26 Lisa.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/aktiis/4291/2202/0009/17122020%20maaruse%20nr%2026%20Lisa.pdf#)
- Transport for London. (2014). *Assessing Transport Connectivity in London*. content.tfl.gov.uk/connectivity-assessment-guide.pdf
- van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, *51*, 9–16. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2015.10.018>
- Wessel, N., & Farber, S. (2019). On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility. *Journal of Transport and Land Use*, *12*(1), 475–500. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1502>

LISA 1. ÜTRIS avaandmete struktuur (GTFS)

5. Avaandmete relatsiooniskeem



Allikas: <https://www.transpordiamet.ee/media/1339/download>

LISA 2. GPS-andmetest liikumiste ja sihtkohtade tuvastamise metoodika arendus

Metoodika arendamise kood on saadaval Githubi koodihoidlas lingil:
<https://github.com/mahrtinh/Magistrit-GPS-metoodika-arendus->

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Martin Haamer**,

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose:
Tallinna ühistranspordi ligipääsetavuse hindamine GPS-andmete põhjal,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on **Anto Aasa**,

(juhendaja nimi)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Martin Haamer

30.05.2022