

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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Eesti linnade kasvu kvantifitseerimine linnalise ala tiheduse
funktsiooni näitel**

Holger Virro

Juhendaja: dotsent Jüri Roosaare

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2018

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Teoreetilised lähtekohad.....	7
1.1 Eesti linnade kasv viimase 30 aasta jooksul	7
1.2 Tihedus linnade kasvu kontekstis	8
1.2.1 Tiheduse olulisus.....	8
1.2.2 Linnalise ala tihedus.....	10
1.2.3 LAT linnade kasvudünaamika iseloomustamisel.....	10
1.3 Rahvastikutiheduse mudelid	11
1.3.1 Rahvastikutiheduse mudelite taust	11
1.3.2 Eksponentsiaalse kahanemise mudel	12
1.3.3 Gaussi jaotuse mudel.....	13
1.3.4 Pöördvõrdelise ruutsõltuvuse mudel	14
1.4 Linnalise ala tiheduse funktsioon.....	15
1.4.1 LAT funktsiooni taust	15
1.4.2 Funktsiooni üldkuju ja tuletised	16
1.4.3 Kompaktsuse indikaatorid k_p ja k_s	18
1.4.4 Valglinnastumise taseme indikaator S_r	19
2 Andmed	20
3 Metoodika.....	23
3.1 LAT andmete tuletamine	23
3.1.1 Puhvrite loomise tööriist <i>Interval Ring Buffer</i>	23
3.1.2 LAT andmete tuletamise tööriist <i>Urban Land Density (ULD) In Buffers</i>	25
3.1.3 <i>ULD Model</i> ArcGISi ModelBuilderi keskkonnas.....	26
3.1.4 LAT mudeli väljundid.....	28
3.2 Funktsiooni sobitamine ja indikaatorite tuletamine	30
3.2.1 LAT andmete sobitamine funktsiooniga	30
3.2.2 Indikaatorite tuletamine.....	31
3.3 GitHubi repositoorium	31
4 Tulemused	33
4.1 Monotsentriline lahendus.....	33

4.1.1 LAT empiirilised graafikud.....	33
4.1.2 Funktsiooni sobitamise tulemused	34
4.1.3 Linnaosade raadiuste parameetrid.....	36
4.1.4 Kompaktsus	36
4.1.5 Valglinnastumise tase.....	38
4.2 Polütsentriline lahendus	39
4.2.1 Funktsiooni sobitamise tulemused	39
4.2.2 Linnaosade raadiused, kompaktsus ja valglinnastumise tase.....	40
5 Arutelu.....	42
5.1 Monotsentriline lahendus.....	42
5.1.1 LAT funktsiooni graafikute ja parameetrite tõlgendus	42
5.1.2 Funktsioonist tuletatud indikaatorite piirangud ja võimalused	43
5.2 Polütsentriline lahendus.....	45
Kokkuvõte	47
Summary.....	49
Tänuavaldused.....	51
Allikad	52
Kasutatud kirjandus	52
Internetiallikad	55
Lisad	56

Eesti linnade kasvu kvantifitseerimine linnalise ala tiheduse funktsiooni näitel

Lühikokkuvõte. Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata Eesti linnade andmete põhjal linnalise ala tiheduse (LAT) funktsiooni kasutamise võimalikkust linnade ruumilise kasvu kvantifitseerimisel. Lähteandmetena kasutatud linnade maakasutuse rastritelt LAT andmete tuletamiseks loodi ArcGISi ModelBuilderi keskkonnas ArcPy tööriistadest koosnev mudel. Saadud andmed sobitati seejärel LAT funktsiooniga, mille parameetrid olid kompaktsuse ja valglinnastumise taseme näitajate sisendiks. Eelnevalt Hiinas täheldatud LAT sigmoidne langus CBD-st kaugenemisel leidis kinnitust ka Eesti kontekstis, mis näitab, et selle kehtivus ei sõltu linna suurusest. Küll aga mõjutas Eesti linnakeskuste väiksem LAT kohati funktsioonist tuletatud indikaatorite toimimist. Indikaator k_p sobis erineva suurusega linnade kompaktsuse võrdlemiseks, kuid andis ebaadekvaatseid tulemusi väikse LAT-ga keskuste korral. Teist kompaktsuse näitajat (k_s) väike LAT ei mõjutanud, kuid selle alusel saab objektiivselt võrrelda pigem sarnase suurusega linna. Näitaja S_r sõltus oluliselt Eesti linnade kasvu eripärasustest ja seega ei saa seda kasutada universaalse valglinnastumise indikaatorina. Kuigi mudelit oli võimalik rakendada ka mitme CBD-ga linnades, ei parandanud polütsentriline lahendus antud juhul probleemsete näitajate tulemusi.

Märksõnad: linnade ruumiline kasv, linnalise ala tihedus, kvantifitseerimine, kompaktsus, valglinnastumine

CERCS: P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia; S230 Sotsiaalne geograafia

Quantifying Urban Expansion In Estonia By Applying An Urban Land Density Function

Abstract. The aim of this thesis was to evaluate the applicability of an urban land density (ULD) model for quantifying urban expansion by applying it in the context of Estonian cities. A model was created in the ArcGIS ModelBuilder environment in order to derive the ULD data. The output ULD data was then fitted to the ULD function and the derived model parameters were used to calculate indicators for the compactness and the degree of urban sprawl of the cities. A sigmoidal decline of the ULD from the CBD outward previously observed in China was also present in Estonian cities, which indicates that its validity is independent of the size of the city. However, indicators derived from the function were affected by the lower ULD values of the Estonian CBDs. Indicator k_p could be used to compare the compactness of cities of different sizes, but the results it showed in the case of low-density CBDs were unreliable. Low ULD values did not affect the second compactness indicator (k_s); however, in order to objectively compare the compactness of cities, the observed cities would have to be of similar size. Indicator S_r was strongly affected by the specifics of the growth of Estonian cities and therefore cannot be used as a universal indicator of urban sprawl. Although the model could also be implemented in cities with more than one CBD, the polycentric solution did not improve the results of the problematic indicators in the case of the cities observed in this study.

Key words: urban expansion, urban land density, quantification, compactness, urban sprawl

CERCS: P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology; S230 Social geography

Sissejuhatus

20. sajandi teises pooles maailmas hoogustunud linnastumise protsessi tulemusena elas aastaks 2014 üle poole kogu maailma elanikkonnast linnades (United Nations, 2014). ÜRO prognooside kohaselt elab eelkõige arengumaades jätkuva kiire linnastumise tagajärjel 2050. aastaks linnades juba üle 60% maailma kogurahvastikust. Linnade kasvu seostati ajalooliselt just rahvaarvu kasvuga, mistõttu tugineti linna kasvu modelleerimisel peamiselt rahvastikuandmetele. Tänapäeva linnade elanikkonna kiire kasv on oluliselt suurendanud maailma linnade kogupindala, mille suuruseks prognoositakse 2030. aastaks kuni 1,2 miljonit km² ja mis ületab kahekordselt linnade kogupindala 2000. aastal (Seto et al., 2012). Seega kasvab linnaline ala maailmas veel kiirema tempoga kui linnarahvastik ja rahvaarvu kasvu kõrval on üha enam pööratud tähelepanu linnade pindalalise või ruumilise kasvu ja sellega kaasnevate probleemide uurimisele. Linnade kasvu käsitletakse just linnade ruumilise kasvuna ka käesolevas magistritöös.

Linnade ruumilise kasvuga on kaasnenud vajadus objektiivselt kirjeldada selle dünaamikat ja töötada välja kasvu iseloomustamiseks sobivaid meetodeid ja indikaatoreid (Seto & Fragkias, 2005). Linnade kasvu kvantifitseerimist kajastavad uuringud on toonud esile tiheduse olulisust linnade kompaktsuse ja valglinnastumise iseloomustamisel (Galster et al., 2001). Seejuures seostati ajalooliselt tihedust eelkõige rahvastikutihedusega ja 20. sajandi jooksul töötati välja mitmeid mudeleid, mis rakendasid linnade arengu hindamiseks rahvastikutiheduse andmeid (Clark, 1951; Sherratt, 1960; Smeed, 1963). Aeganõudva kogumise protsessi ja andmete ebatäpsuse tõttu ei anna rahvastikuandmed linnade ruumilisest laienemisest aga alati objektiivset ülevaadet. Satelliidipiltide kättesaadavuse ja kvaliteedi paranemise tagajärjel on rahvastikuandmed seetõttu suuresti asendunud kaugseireandmetega (Yu et al., 2016). Linnade tihedust käsitlevates uuringutes on rahvastikutiheduse asemel omakorda hakatud kasutama satelliidipiltidelt tuletatud linnalise ala tihedust (ingl *urban land density*), mida on kasutatud muuhulgas nii linnade kompaktsuse (Krehl et al., 2016) kui valglinnastumise (Tsai, 2005; Schneider & Woodcock, 2008) kvantifitseerimisel. Samas on vastavates uuringutes linnalise ala piiritlemine sageli sõltunud autori subjektiivsest hinnangust ning samuti ei ole veel välja kujunenud ühtset metoodikat linnalise ala tiheduse määratlemiseks (Weng, 2012). Lisaks

on vähe uuritud ajalooliste rahvastikutihedusel põhinevate mudelite kirjeldusvõimet kaasaegsete, satelliidipiltidelt tuletatud linnalise ala tiheduse andmete kontekstis.

Nimetatud puudusi üritab parandada antud magistritöös rakendatav teoreetiline mudel, mis kirjeldab satelliidipiltidelt tuletatud andmete põhjal linnalise ala tiheduse varieeruvust erinevates linna osades ja pakub välja uuritava linna kujust, suurusest ja konfiguratsioonist sõltumatud kvantitatiivsed indikaatorid linnade kasvudünaamika iseloomustamiseks (Jiao, 2015). Linnade kasvu kvantifitseerimise edukust mõjutab olulisel määral mudeli robustsus ja parameetrite põhjendatus, mistõttu on Jiao metoodikal eelised mitmete teiste sarnastes uuringutes rakendatud mudelite ees. Antud mudelit on seni rakendatud ainult Hiina suurlinnade puhul, mis erinevad nii linnastumise mastaabi kui ajaloo poolest muu maailma, sh Eesti linnadest. Seega on oluline hinnata mudeli kasutatavust ka väljaspool Hiinat. Eelnevast tulenevalt sõnastati käesoleva magistritöö eesmärgid järgmiselt:

- rakendada selleks loodud tööriistade abil linnalise ala tiheduse mudelit Eesti linnade ruumilise kasvu iseloomustamiseks;
- hinnata tulemuste põhjal mudeli kasutamise võimalikkust samalaadsetes uuringutes Eestis ja mujal;
- tuua esile mudeli rakendamisega kaasnevad piirangud ja pakkuda välja nende võimalikud lahendused.

1 Teoreetilised lähtekohad

Käesolevas peatükis antakse esmalt lühiülevaade linnade dünaamikast taasiseseisvunud Eestis, mis oli ühtlasi antud magistritöös vaadeldud uurimisperioodiks (ptk 1.1). Kuna töös rakendatud meetodika põhineb linnalise ala tihedusel, siis võetakse peatükis 1.2 vaatluse alla linnalise ala tiheduse mõiste ja selle roll linnade kasvu kvantifitseerimisel. Peatükis 1.3 antakse ülevaade tähtsamatest linna rahvastikutiheduse mudelitest, mis olid linnade arengu hindamisel olulisel kohal enne kaugseireandmete levikut. Viimases peatükis kirjeldatakse töös rakendatava linnalise ala tiheduse funktsiooni tausta, põhimõtteid ja sellest tuletatud indikaatoreid.

1.1 Eesti linnade kasv viimase 30 aasta jooksul

Nõukogude Liidu perioodil iseloomustas Eesti asustusvõrgu arengut kiire linnastumine, mille tagajärjel elas 1989. aastaks linnades ligikaudu 71% riigi elanikkonnast (Jauhiainen, 2005). Linnastumist soodustasid olulisel määral industrialiseerimise mõjul toimunud töökohtade arvu kasv linnades ning põllumajanduse osatähtsuse järkjärguline vähenemine maapiirkondades. Rahvaarvu kasvuga kaasnes ka linnade ruumiline kasv, seda eriti Eesti suuremate linnade – Tallinna, Tartu, Pärnu ja Narva – puhul. Nõukogudeaegsel perioodil oli ehitustegevus selgelt reguleeritud ja riiklik planeerimine suunas nii hoonestusalade ruumilist paiknemist kui ka elamurajoonide struktuuri (Jauhiainen, 2005). Enamik uutest hoonestusaladest paiknes linna administratiivsete piiride sees ja suuremates linnades oli soodustatud suurte, kõrge asustustihedusega korterelamupiirkondade (nt Lasnamäe ja Annelinn) rajamine (Ideon, 2006). Linnalähedasel maal oli arendustegevus jällegi kontsentreerunud peamiselt põllumajanduskeskuste lähisteles ning ei olnud otseselt sõltuv linnade kasvudünaamikast (Tammaru et al., 2009).

Aktiivne linnastumine oli Eesti taasiseseisvumise ajaks lõppenud ja linnade rahvaarvu iseloomustas langustrend. Lisaks mitte-eestlaste väljarände riigist oli languse põhjuseks inimeste kolimine linnade lähiümbruse valdadesse, mille tagajärjel hakkas linnade kasvu kujundama ees- ja vastulinnastumine (Jauhiainen, 2005). Turu liberaliseerimine ja selgelt välja kujunenud planeerimispraktika soodustasid kiiret hoonestusalade laienemist endistel põllumaadel, mille arendustegevust toetasid nii maareform kui elatustaseme kasv (Roose et

al., 2013). 1990. aastatel alanud hoonestusalade kasv linnade lähipiirkonnas kulmineerus 2003. aastal alanud ehitusbuumiga ja lõppes sellele järgnenud majanduskriisiga 2008. aastal (Samarüütel et al., 2010). Antud perioodil valmis enamik taasiseseisvunud Eestis rajatud uusarendustest ja kinnisvaraarendajatele antud suhteline vabadus planeeringute koostamisel andis tõuke fragmenteeritud ning väikse tihedusega elamurajoonide ja seega valglinnastumise ilmingute tekkeks (Tammaru et al., 2009).

Eesti linnadest kasvas sellel perioodil kõige rohkem Tallinn, mille ruumilise laienemise dünaamikat on kirjeldanud mitmed Eesti autorid (Metspalu, 2005; Ideon, 2006; Tammaru et al., 2009; Samarüütel et al., 2010). Uusarenduste asukohtade ruumilist asetust mõjutas seejuures olulisel määral olemasolevate keskuste (nt Saku), aga ka rannikualade lähedus (Metspalu, 2005). Tallinnast kaugemal asuvate piirkondade (nt Rae vald) arengu puhul oli oluliseks teguriks suuremate maanteede paiknemine (Samarüütel et al., 2010). Tartu lähipiirkonnas on kasv olnud kompaktsem ja peamiselt on laienemine toimunud linnaga hästi seotud asulate (nt Ülenurme) ümbruses (Roose et al., 2013). Linnalise ala kasvu on sama perioodi jooksul täheldatud ka Pärnu ja Narva puhul, kuid võrreldes suuremate linnadega on kasv olnud tunduvalt väiksem. Mõlemas linnas on laienemine toimunud nii linnu läbivate maanteede äärde rajatud uute elamurajoonide kui endiste linnasiseste tööstusalade täisehitamise arvelt (Kirsimäe, 2017). Pärnus on sarnaselt Tallinnale arengut suunanud ka rannikupiirkonnad (Samarüütel et al., 2010).

Majanduskriisi järel vähenes arendustegevus linnade lähipiirkonnas märgatavalt, millega kaasnes valglinnastumise aeglustumine (Samarüütel et al., 2010). Viimastel aastatel on ehitustegevus uuesti taastuma hakanud, kuid tänapäeva uusarendused on üldjuhul senisest kompaktsemad ja nende ruumilist paiknemist mõjutab eelkõige olemasoleva asustuse ning infrastruktuuri lähedus (Kirsimäe, 2017). Tallinnas ja Tartus võib sealhulgas täheldada teatavat taaslinnastumist (nt Kalamaja, Karlova), mida saab lugeda üheks kompaktse kasvu indikaatoriks.

1.2 Tihedus linnade kasvu kontekstis

1.2.1 Tiheduse olulisus

Linnade ruumilise arengu optimaalsust ja jätkusuutlikkust kajastavates uuringutes on levinud kompaktse ja laiali valgunud kasvu vastandamine, kusjuures sageli on kompaktne

võrdsustatud optimaalsega ning laiali valgunud kasv mitteoptimaalsega (Batty, 2008). Seejuures on olulisel kohal olnud selliste linna omaduste tuletamine, mille abil oleks võimalik üht või teist tüüpi kasvu objektiivselt hinnata. Linnade kompaktsuse hindamiseks kasutati ajalooliselt eelkõige uuritava linna kuju, mille määratlemine sõltus suuresti uurija subjektiivsest valikust (Galster et al., 2001). Andmete kogumise ning analüüsi meetodite arengu tagajärjel hakati aja jooksul linna kasvu iseloomustamiseks kasutama üha rohkem tihedust. Seetõttu hakkas kompaktselt linna iseloomustama nn optimaalse kuju asemel pigem suur tihedus (Schwarz, 2010).

Kompaktsuse kõrval on linna tiheduse analüüs tihti ka üheks valglinnastumise tuvastamise meetodiks (Dovey & Pafka, 2014). Kuigi valglinnastumist on defineeritud erinevalt, on paljud autorid toonud valglinnastunud alade peamise tunnuseks esile just väikest tihedust (Tsai, 2005). Valglinnastumist nähakse üldjuhul negatiivse protsessina, mis mõjutab nii linnade lähiümbruse looduslikku, majanduslikku kui sotsiaalset keskkonda (United Nations, 2014). Linnade laienemise arvelt on kahanenud viljaka põllumaa kogupindala ja kontrollimatu ehitustegevusega on kaasnud looduslike alade liigirikkuse vähenemine ja elupaikade killustumine. Valglinnastunud piirkonnad asuvad linnakeskusest kaugel ja ei moodusta keskusega sageli sidusat linnakeskkonda, mis vähendab ühistranspordi ja teiste avalike teenuste kättesaadavust (Galster et al., 2001). Seetõttu on valglinnastumise mõjul suurenenud nende piirkondade elanike sõltuvus autotranspordist, millega on kaasnud õhukvaliteedi langus paljudes maailma suurlinnades (Frank et al., 2006; Xu et al., 2016).

Mitmete linnade laienemisega seotud probleemide lahendamisel nähakse olulist rolli tiheduse kasvu soodustamisel ja teemakohases kirjanduses on tähelepanu juhitud tiheduse ja erinevate kvalitatiivsete näitajate vahelistele seostele (Roche Phillips, 2015). Uuringud on näiteks tuvastanud, et esineb selge seos linnade tiheduse ning efektiivse energia- ja ressursikasutuse vahel (Krehl et al., 2016; Güneralp et al., 2017). Suurem tihedus vähendab mitmeid infrastruktuuriga seotud kulutusi (teede-, vee- ja elektrivõrgud) ja võimaldab linnaelanikele pakkuda optimaalsemat teenuste ruumilist jaotust (nt koolid, ühistransport). Väiksema tihedusega linnas on avalike teenustega seotud kulud elaniku kohta seevastu tunduvalt suuremad kui kompaktses, suurema tihedusega linna puhul (Resch et al., 2016). Samuti mõjutab tihedus oluliselt linnarahvastiku ökoloogilise jalajälje suurust (Güneralp et al., 2017).

1.2.2 Linnalise ala tihedus

Tihedust on linnade kasvu uurimisel käsitletud erinevalt ja enne kaugseireandmete laialdast levikut seostati linna tihedust üldjuhul rahvastikutihedusega (ptk 1.3). GIS-i ja kaugseire areng võimaldas linnauuringutes hakata kasutama lähteandmetena satelliidipilte, mille abil saab linnade dünaamikat jälgida isegi reaajas (Yu et al., 2016). Kaugseireandmete kasutuselevõtuga kaasnes aga vajadus üheselt defineerida linnalist ala kui teistest pindadest või maakasutusest eristatavat nähtust. Siiski võib linnalise ala määratlemine sõltuda nii töö eesmärgist kui kaugseireandmete täpsusklassist (Weng, 2012). Väga kõrge resolutsiooniga satelliidipildid võimaldavad rakendada objektipõhist klassifitseerimist ja seega on linnalise ala eristamisel kasutatud näiteks minimaalset hoonetevahelist kaugust (Blaschke, 2010). Kuna tavaliselt kasutatakse linna kasvu hindamisel keskmise resolutsiooniga satelliidipilte (nt Landsat), siis on linnalise ala defineerimisel rohkem levinud aga nn vettpidava kihi (ingl *impervious surface*) mõiste, mis hõlmab enda alla linna iseloomustavad tehislükud alad (teed, katused), mille saab ülejäänud maakasutusest eristada spektraalsete omaduste alusel (Weng, 2012; Yu et al., 2016).

Kuigi ka linnalise ala tihedust (edaspidi LAT) on käsitletud erinevalt (näiteks hoonete tihedusena), tähendab LAT kaugseirealastes uuringutes enamasti satelliidipiltidelt tuletatud linnalise ala pikslite kogupindala osakaalu uuritava piirkonna pindalast (Schneider & Woodcock, 2008). Kompaktsuse ja valglinnastumise hindamise puhul on enamasti oluline mitte linna üldine või keskmine tihedus, vaid tiheduse muutused linna erinevates osades. Linna ruumiliseks jagamiseks kasutatakse seejuures sageli kontsentrilisi puhvreid, mille keskpunktina kasutatakse omakorda linna ärikeskust ehk CBD-d (ingl *Central Business District*), mille ümber loodud puhvrite LAT põhjal on võimalik tuletada mitmesuguseid linnade ruumilise kasvu karakteristikuid (Tsai, 2005). CBD on üldjuhul kõige suurema LAT-ga piirkonnaks ja kuna CBD-d asuvad enamasti kesklinna piirkonnas, on vastavates uuringutes CBD sageli võrdsustatud üldise linnalise ala keskusega (Yu et al., 2016). Antud metoodikat on CBD-de asukoha määramise puhul rakendatud ka käesolevas töös, kuna klassikalist, suurlinnades esinevat ärikeskust ei ole võimalik Eesti linnades esile tuua.

1.2.3 LAT linnade kasvudünaamika iseloomustamisel

Erinevad kvantitatiivsed näitajad – tuntud ka kui maastikumeetrika indeksid – on olnud juba pikemat aega linnade kasvu iseloomustamisel levinud abivahendiks (Seto & Fragkias, 2005). Kvantifitseerimisel kasutatavad indeksid saab jagada kolme rühma, millest tiheduse

näitajad moodustavad mitmekesisuse ja ruumilise mustri indeksite kõrval ühe suurema rühma (Tsai, 2005). Enamjaolt käsitletakse selliste näitajate puhul aga LAT asemel mingit muud tiheduse vormi. Näiteks on nii kompaktsust kui valglinnastumist üritatud hinnata kõikvõimalike serva- või eraldise tiheduse indikaatoritega (Clifton et al., 2008; Yu et al., 2016). Inimgeograafilistes uuringutes on jällegi levinud rahvastikutihedusel põhinevad indeksid (Schwarz, 2010).

Kuigi autorid on toonud esile LAT olulisust linnade kasvudünaamika kvantifitseerimisel, on selle kasutamine indikaatorite välja töötamisel olnud seni üsna tagasihoidlik. Üldjuhul arvestatakse LAT-d omaette näitajana, mida kasutatakse paralleelselt teiste indikaatoritega (fragmenteeritus, eeltoodud tihedused jne) linna ajalis-ruumilise kasvu iseloomustamiseks (Galster et al., 2001; Schneider & Woodcock, 2008; Schwarz, 2010; Dovey & Pafka, 2014). Sellisel juhul on LAT muutus ajas ja erinevates uurimispiirkonna osades (nt keskus, tagamaa) sageli üheks valglinnastumise tuvastamise vahendiks. Lisaks on LAT erinevusi linnas kasutatud CBD kui kõige tihedama piirkonna piiritlemisel (Angel et al., 2007). Suurt LAT väärtust on lisaks kasutatud ühe kompaktsuse indikaatorina (Krehl et al., 2016).

1.3 Rahvastikutiheduse mudelid

1.3.1 Rahvastikutiheduse mudelite taust

Rahvastikuandmete kasutamine linnade arenguga seotud ajalis-ruumiliste nähtuste matemaatiliseks modelleerimiseks on käinud linnageograafiaga kaasas selle algusaegadest alates, kuid esimesed tõsisemad katsetused toimusid valdkonnas siiski 20. sajandi esimeses pooles (Burghes & Zielinski, 1979). Antud perioodist pärineb näiteks nn Zipfi mudel, mille kohaselt on linnade optimaalsete rahvaarvude suurus riigis lineaarses sõltuvuses riigi suurima linna rahvaarvust (Jauhiainen, 2005). Nagu eelnevalt mainitud (ptk 1.2), on erinevad tiheduse vormid ja tihedusel põhinevad näitajad üheks oluliseks linnade kasvudünaamika kvantifitseerimise osaks. Rahvastikuandmete kättesaadavus ja kvaliteet jõudsid 20. sajandi keskpaigaks sellisele tasemele, mis võimaldas erinevatel autoritel kasutada rahvastikutihedust linnade arengut kirjeldavate mudelite sisendina (Clifton et al., 2008). Kuigi aegade jooksul on välja töötatud paljusid rahvastikutihedusel põhinevaid mudeleid, ei ole neist mitmed laiemat kasutust leidnud (Burghes & Zielinski, 1979). Teiste seast on esile tõusnud kolm erinevat tüüpi mudelit, mis selgitavad linna rahvastikutiheduse

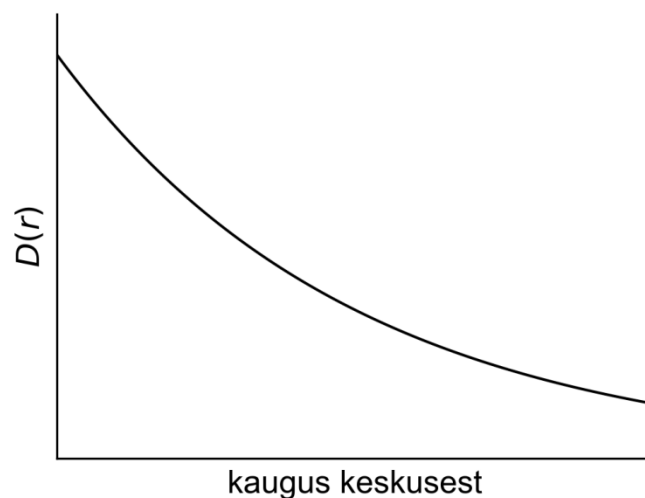
langust CBD-st kaugenemisel vastavalt eksponentsiaalse kahanemise (ptk 1.3.2), Gaussi jaotuse (ptk 1.3.3) ja pöördvõrdelise ruutsõltuvuse (ptk 1.3.4) funktsioonide abil (Chen & Feng, 2012).

1.3.2 Eksponentsiaalse kahanemise mudel

Üheks esimeseks linna rahvastikutiheduse ruumilist muutust kirjeldavaks mudeliks oli nn Clarki mudel, mille üldkuju graafik on toodud joonisel 1. Mudel põhines eksponentsiaalse kahanemise funktsioonil ja sõnastas tiheduse languse keskusest kaugenedes võrrandiga

$$D(r) = Ae^{-br}, \quad (1)$$

kus $D(r)$ on rahvastikutihedus, A rahvastikutihedus keskses, e Euleri arv ($\approx 2,71828$), b tiheduse vähenemise kiirust määrav parameeter ja r kaugus keskusest (Clark, 1951). Parameeter b väärtus sõltub uuritava linna kompaktsusest ja on seda suurem, mida kompaktsem on linn. Clark kasutas mudeli välja töötamiseks mitmete tema kaasaegsete Euroopa ja Ameerika suurlinnade andmeid ja tõi kõvera kuju põhjendamiseks esile kaks peamist seaduspärasust: rahvastikutiheduse maksimum asub üldjuhul linna keskses ja aja jooksul kasvab keskuse tiheduse vähenemise arvelt eeslinnade rahvastikutihedus. Mudeli autor märkis siiski, et linna ärikeskuse tihedus ei täida alati üldkuju poolt kirjeldatud kriteeriumit ja seega tuleks keskusena käsitleda pigem CBD lähiümbruse elamupiirkonda (Clark, 1951).



Joonis 1. Clarki (eksponentsiaalse kahanemise) mudeli üldkuju.

Clarki mudeli sõnastamisest alates on see olnud paljude autorite uurimisobjektiks ning mudelile on pakutud mitmesuguseid parandusi (Newling, 1969; Lee, 1976; Burghes & Zielinski, 1979). Sageli ei ole aga uuritavate linnade rahvastikutiheduse languse puhul Clarki kirjeldatud eksponentsiaalse kahanemise kõverat tuvastatud, seda eriti kaasaegsete, väikse tihedusega valglinnastunud linnade puhul. Sellegipoolest on Clarki täheldatud seaduspärasusi kasutatud mitmete teiste nähtuste, näiteks linna fraktaalsuse (Chen & Feng, 2012) modelleerimisel.

1.3.3 Gaussi jaotuse mudel

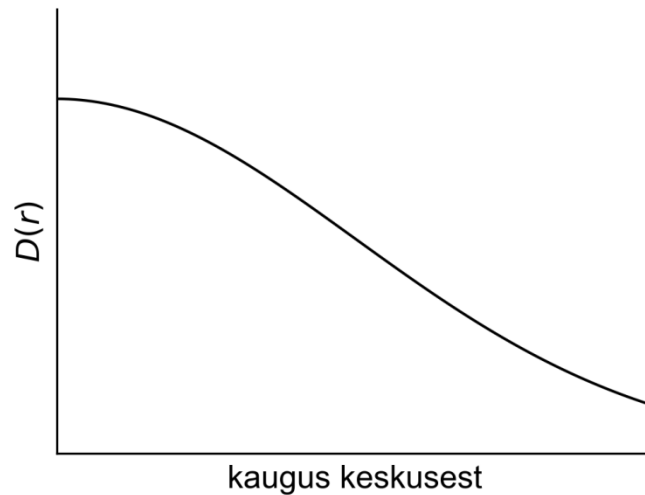
Joonisel 2 on toodud Sherratt-Tanneri mudelina tuntud rahvastikutiheduse mudeli üldkuju, mis kasutas tiheduse kahanemise kirjeldamiseks Gaussi ehk normaaljaotuse funktsiooni põhimõtteid. Mudel töötati välja esmalt Austraalias Sydney hoonestustiheduse andmete põhjal Sherratti poolt (1960), kes esitas selle võrrandi kujul

$$D(r) = Ae^{\left(\frac{-r^2}{2\gamma^2}\right)}, \quad (2)$$

kus γ on uuritava linna ruumilist ulatust tähistav parameeter ja ülejäänud parameetrid kattuvad Clarki mudeli omadega (ptk 1.3.2). Parameeter γ eemaldamiseks pakkus hiljem Tanner (1961) välja täpsustatud variandi kujul

$$D(r) = Ae^{\left(\frac{-\pi Ar^2}{N}\right)}, \quad (3)$$

kus N on uuritava linnalise ala rahvaarv. Võrreldes Clarki mudeliga on Sherratt-Tanneri mudel kirjeldanud rahvastikutiheduse langust linnas mõnevõrra täpsemalt ja selle eelisena on toodud esile ka parameeter b puudumisest tingitud matemaatilist lihtsust (Dacey, 1971; Burghes & Zielinski, 1979). Sarnaselt Clarki funktsioonile on ka Sherratt-Tanneri mudelile ette heidetud ebatäpsust linna CBD tiheduse kirjeldamisel (Newling, 1969; Burghes & Zielinski, 1979).



Joonis 2. Sherratt-Tanneri (Gaussi jaotuse) mudeli üldkuju.

1.3.4 Pöördvõrdelise ruutsõltuvuse mudel

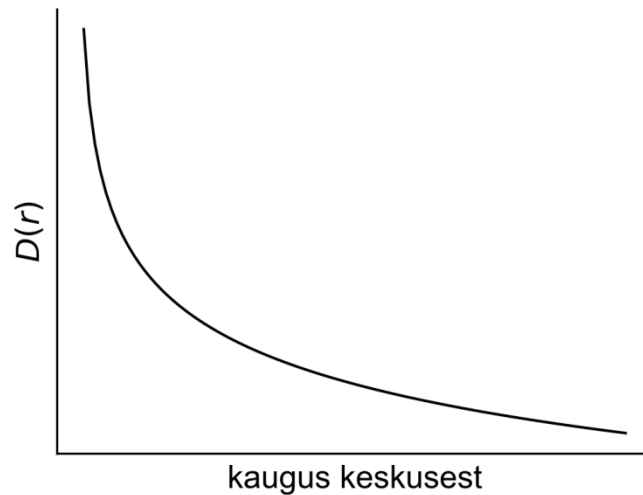
Pöördvõrdelise ruutsõltuvuse funktsiooni abil üritas rahvastikutihedust linnas modelleerida Smeed (1963), kelle loodud mudeli üldkuju graafik on näidatud joonisel 3. Mudeli võrrand esitati kujul

$$D(r) = Ar^{-b}, \quad (4)$$

kus kõik parameetrid on tuletatud Clarki mudelist (ptk 1.3.2). Smeedi mudeli esialgne versioon oli rahvastikutiheduse languse kirjeldamisel ebatäpsem kui Clarki ning Sherratt-Tanneri mudelid ja nii nagu eelmiste mudelite puhul, esinesid ka Smeedi formuleeritud funktsiooni korral probleemid CBD tiheduse kirjeldamisel (Burghes & Zielinski, 1979). Hilisemad autorid on sellegipoolest näinud Smeedi mudeli puhul teatud eeliseid eeltoodud mudelite ees ning on üritanud võrrandit täiendades linnade kasvu täpsemaks kirjeldamiseks kaasata määramatuse ja fraktaalset dimensiooni parameetreid (Batty & Kim, 1992; Batty & Longley, 1994). Näiteks on Chen (2009) esitanud rahvastikutiheduse languse mudeli kujul

$$\rho(r) = Cr^{D_f-d}, \quad (5)$$

kus $\rho(r)$ on rahvastikutihedus, C tiheduse proportsionaalne komponent, r kaugus linna keskusest, D_f fraktaalne dimensioon ja d linnalise ala ruumilist ulatust tähistav parameeter.



Joonis 3. Smeedi (pöördvõrdelise ruutsõltuvuse) mudeli üldkuju.

1.4 Linnalise ala tiheduse funktsioon

1.4.1 LAT funktsiooni taust

Enamik eelmises peatükis vaadeldud rahvastikutiheduse mudelitest on välja töötatud ajal, mil kaugseireandmed kas puudusid või mõjutas nende rakendamist linnade kasvu modelleerimisel andmete kvaliteet ja kättesaadavus, mis olid alles arenemisjärgus. Seetõttu ei olnud vastavate mudelite välja töötamiseks veel sobivat alternatiivi rahvastikuandmetele. Rahvastikuandmete kogumine tänapäeva suurlinnades on aga kallis ja aeganõudev protsess, mistõttu uuendatakse rahvaloenduse andmeid sageli mitme aasta tagant. Kiiresti laienevates linnades ei anna rahvastikuandmed seega alati objektiivset ülevaadet nende komplekssest kasvudünaamikast (Schneider & Woodcock, 2008). Seetõttu on linnade ruumilise kasvu uuringutes tänapäeval rahvaloenduse andmed suuresti asendunud kaugseireandmetega.

Kuigi satelliidipiltidelt tuletatud LAT kasutamine linnade struktuuri ja dünaamika iseloomustamisel on olnud viimastel aastatel üsna levinud (ptk 1.2.3), ei leidunud pikka aega LAT andmetel põhinevat analoogi rahvastikutiheduse mudelite poolt kirjeldatud seaduspärasuste uurimiseks. Selle puudujäägi kõrvaldamiseks on tänaseks töötatud välja nn linnalise ala tiheduse (LAT) funktsioon (ingl *urban land density function*), mis kirjeldab LAT langust linnas CBD-st kaugenemisel (Jiao, 2015). Mudel töötati välja 28 Hiina linna LAT andmete põhjal ja näitas väga head kirjeldusvõimet nii erineva suuruse kui CBD-de konfiguratsiooniga (mono- ja polütsentrilised, lineaarsed) linnade korral. LAT andmed

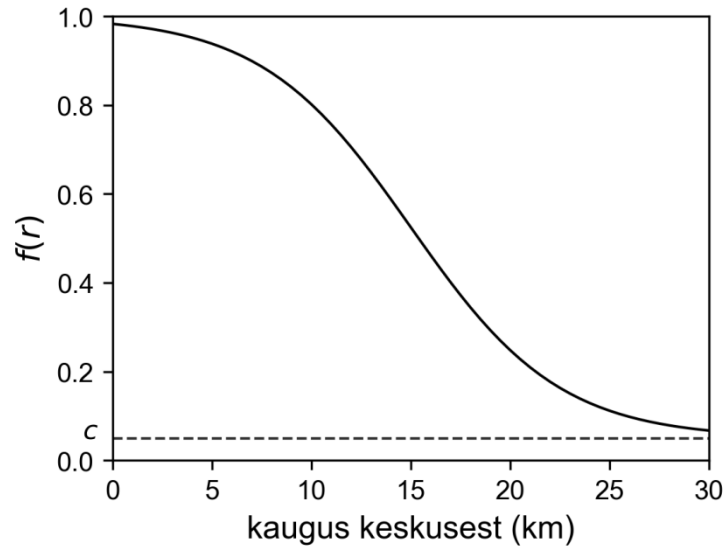
tuletati linnade kolme ajahetke maakasutuse rastritelt CBD-de ümber moodustatud ühe kilomeetri laiuste kontsentriliste puhvrite abil ja sobitati seejärel funktsiooniga eraldi iga linna ja iga ajahetke jaoks. LAT funktsioonist tuletati indikaatorid, mille abil oli võimalik võrrelda uuritavate linnade kompaktsust ja valglinnastumise taset (ingl *degree of urban sprawl*).

1.4.2 Funktsiooni üldkuju ja tuletised

Erinevalt eeltoodud rahvastikutiheduse mudelitest, kus tiheduse languse kirjeldamiseks kasutati eksponentsiaalse kahanemise või pöördvõrdelisi funktsioone, iseloomustas Jiao uuringu (2015) tulemuste põhjal LAT langust linnas sigmoidne kõver (joonis 4). Selle kohaselt toimub LAT langus linnakeskuse piires aeglaselt, kiireneb eeslinnades järsult ning aeglustub uuesti linna tagamaal. LAT funktsioon esitati järgmise võrrandiga

$$f(r) = \frac{1 - c}{1 + e^{\alpha\left(\frac{2r}{D} - 1\right)}} + c, \quad (6)$$

kus f on LAT, r kaugus linna keskusest, e Euleri arv, α funktsiooni kõverat kontrolliv parameeter, c tagamaa LAT ning D eeslinna ja tagamaa piiri kaugus CBD-st. Viimase kolme parameetri väärtused leiti funktsiooni sobitamise tulemusena. Parameeter α väärtus jäi üldjuhul vahemikku 2–6. Üldise seaduspärasusena ajas linnade laienemise mõjul tagamaa tihedus kasvas ja tagamaa piir nihkus keskusest kaugemale. Seejuures oli c funktsiooni asümptoodiks, millest allapoole LAT ei langenud (joonis 4).



Joonis 4. LAT funktsiooni üldkuju parameetrite väärtuste $\alpha = 4$, $c = 0,05$ ja $D = 30$ korral.

Tihedust on CBD piiride määramisel kasutatud ka varasemates uuringutes (Angel et al., 2007; Schneider & Woodcock, 2008), kuid üldjuhul on linna osadeks jagamisel probleeme valmistanud selleks sobivate LAT lävendite leidmine. LAT erinevuste alusel jaotati Jiao uuringus (2015) linnaline ala neljaks osaks (keskus, ees- ja sisemine linn ning tagamaa), mille piirid leiti funktsiooni tuletiste põhjal (joonis 5). Esimese tuletise ekstreemumina tuletati punkt p_0 koordinaatidega

$$r_0 = \frac{D}{2}, \quad f_0 = \frac{1+c}{2} \quad (7)$$

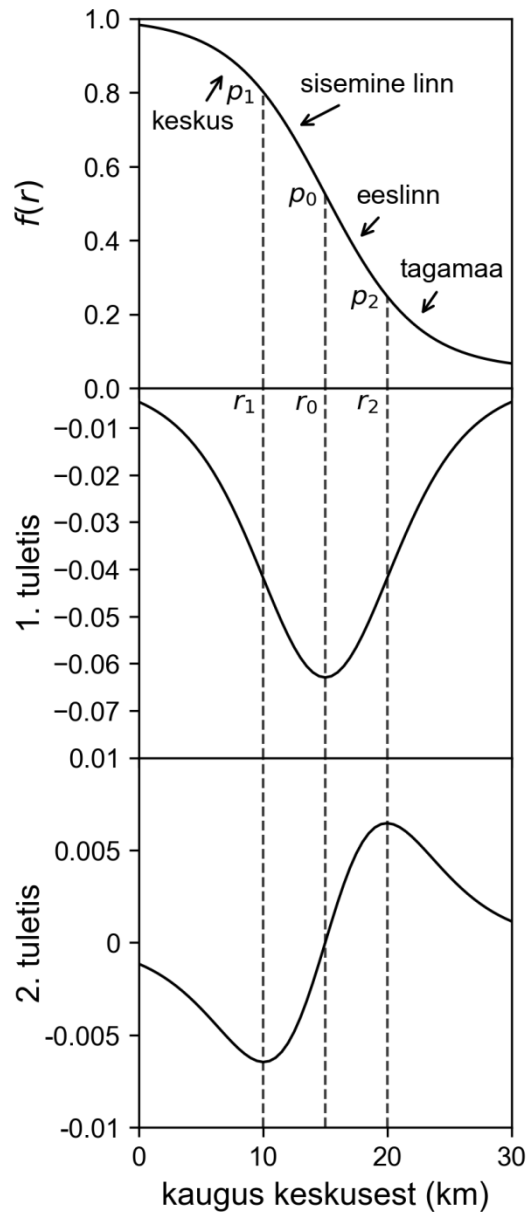
kui lävend, kus LAT kõige kiiremini väheneb. Teise tuletise ekstreemumid tähistasid aga punkte, kus LAT languse kiirus kõige kiiremini muutus. Keskuse piiri määranud punkti p_1 koordinaatideks olid vastavalt

$$r_1 = \frac{D}{2} \left(\frac{-1,316957}{\alpha} \right), \quad f_1 = 0,788675(1-c) + c \quad (8)$$

ning eeslinna piiri määranud p_2 koordinaatideks

$$r_2 = \frac{D}{2} \left(\frac{1,316957}{\alpha} \right), \quad f_2 = 0,211325(1-c) + c. \quad (9)$$

Saadud koordinaadid olid omakorda funktsioonist tuletatud indikaatorite sisendiks.



Joonis 5. LAT funktsiooni tuletised ja tiheduse languse kiiruse muutuse lävendid.

1.4.3 Kompaktsuse indikaatorid k_s ja k_p

Paljud teemakohased uuringud on üritanud linnade kompaktsust kirjeldada linna kuju põhjal, mis sõltub olulisel määral uurija subjektiivsest hinnangust linnalise ala piiritlemisel. Probleemi kõrvaldamiseks pakkus Jiao (2015) välja kaks uut kompaktsuse näitajat, mis on tuletatud LAT funktsiooni parameetrite alusel. Esimene kompaktsuse indikaator k_s esitati võrrandiga

$$k_s = \frac{f_1 - f_2}{r_2 - r_1} = \frac{0,57735(1 - c)\alpha}{1,316957D}, \quad (10)$$

kus α , c ja D on LAT funktsiooni parameetrid. Kompaktse linna tunnuseks oli seejuures suurem k_s . Näitaja rakendamisel selgus, et mida suurem oli parameetri D väärtus, seda väiksem oli üldjuhul k_s ehk suuremad linnad osutusid sõltumata teistest teguritest vähem kompaksemaks kui väiksemad, mistõttu sobis k_s eelkõige sarnase suurusega linnade võrdlemiseks. Tagamaa piiri parameetri mõju vähendamiseks tuletati kompaktsuse näitaja k_p võrrandi

$$k_p = \frac{r_2 - r_1}{D} = \frac{1,316957}{\alpha}, \quad (11)$$

kaudu, mille puhul oli kompaktse linna tunnuseks väike k_p väärtus. Erinevalt eelmisest näitajast oli antud indikaatori abil võimalik objektiivselt võrrelda ka erineva suurusega linnade kompaktsust.

1.4.4 Valglinnastumise taseme indikaator S_r

Kuna valglinnastumise üheks peamiseks indikaatoriks on väikse tihedusega linnalise ala juurdekasv, siis oli LAT funktsiooni abil võimalik hinnata uuritava linna valglinnastumise taset, kasutades selleks funktsiooni tuletiste kaudu leitud parameetreid (Jiao, 2015). Valglinnastumise taseme indikaator S_r väljendati kujul

$$S_r = \frac{\delta r_2}{\delta r_1} = \frac{(r_2^i - r_2^{i-1})r_1^{i-1}}{r_2^{i-1}(r_1^i - r_1^{i-1})}, \quad (12)$$

kus δr_1 ja δr_2 on vastavalt keskuse ja eeslinna raadiuse muut, r_1^i ja r_2^i keskuse ja eeslinna raadiused hetkel i ning r_1^{i-1} ja r_2^{i-1} nende raadiused hetkel $i - 1$. Kui väikse tihedusega eeslinna raadiuse kasv ületas uurimisperioodil tihedama keskuse kasvu, siis iseloomustas uuritava linna laienemist kalduvus valglinnastumise suunas. Sellisel juhul oli S_r -i väärtus suurem kui üks. Kompaktse kasvuga linnade puhul seevastu oli näitaja ühest väiksem. Ühe ja sama linna erinevate perioodide väärtusi võrreldes oli seega võimalik vaadelda linna ruumilise kasvu ajalist dünaamikat. S_r oli üldjuhul rakendatav sõltumata linna suuruselt, kuid näitaja andis ebaadekvaatseid tulemusi üksikute linnade puhul, kus δr_1 ja δr_2 olid nullilähedased või negatiivsed.

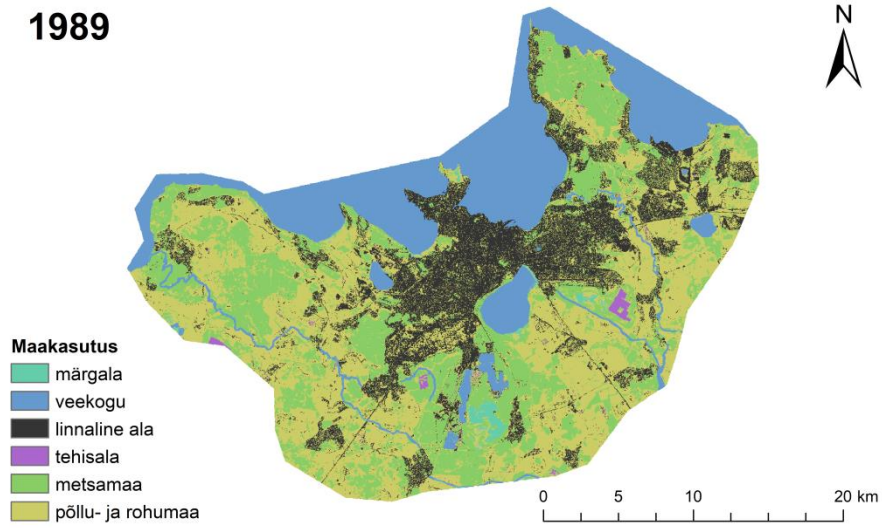
2 Andmed

Käesolevas töös kasutati lähteandmetena Eesti nelja suurima pindalaga linna – Tallinna, Tartu, Pärnu ja Narva – klassifitseeritud maakasutuse rasterpilte, mis pärinevad Kirsimäe 2017. aasta magistritööst (Kirsimäe, 2017). Maakasutuse rastrite loomiseks kasutas ta Landsati 30 m resolutsiooniga satelliidipilte. Maakatteandmed klassifitseeriti näidisalade abil tarkvaraga ArcGIS 10.2 kuude klassi, mille kirjeldused on toodud tabelis 1. Klassifitseerimise täpsust hinnati Kapa kordajaga, mille väärtus (88%) ületas maakasutuse klassifitseerimise täpsuse tinglikuks alampiiriks loetava väärtuse (85%). Antud täpsusastme saab lugeda piisavaks ka käesolevas töös rakendatava mudeli kontekstis, kuna Jiao (2015) kasutas mudeli välja töötamiseks maakasutuse rasterpilte, mille klassifitseerimise täpsus jäi vahemikku 85–93%. Näitena on joonisel 6 toodud Tallinna klassifitseeritud maakasutuse rastrite aegrida. Teiste linnade rastrite aegread on toodud lisades 1–3.

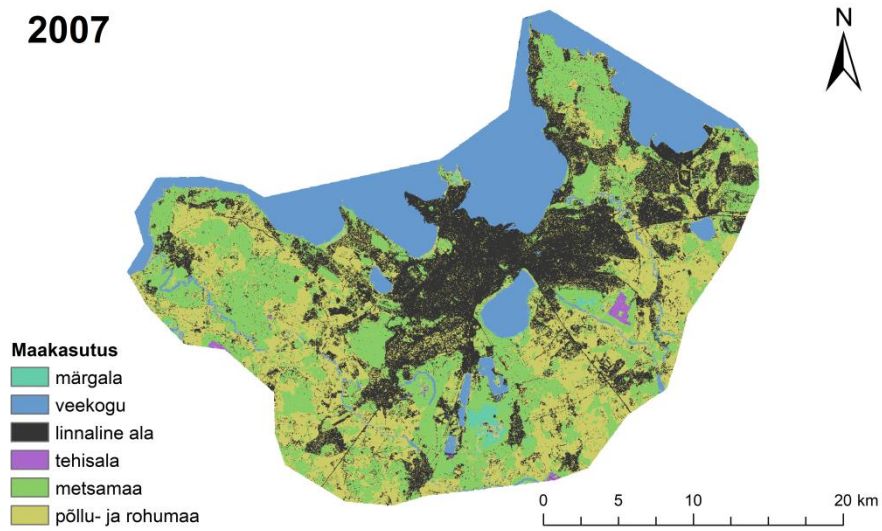
Tabel 1. Rasterpiltide maakasutuse klassid (Kirsimäe, 2017).

Maakasutuse klass	Kirjeldus
Veekogu	Seisu- ja vooluveekogud
Tehisala	Asulast selgelt eristatavad, inimtekkelised alad (nt karjäärid)
Metsamaa	Kõik metsaalad
Põllu- ja rohumaa	Kõik põllu- ja rohumaad
Asula	Kõik vettpidava kihiga alad
Märgala	Kõik märgalad

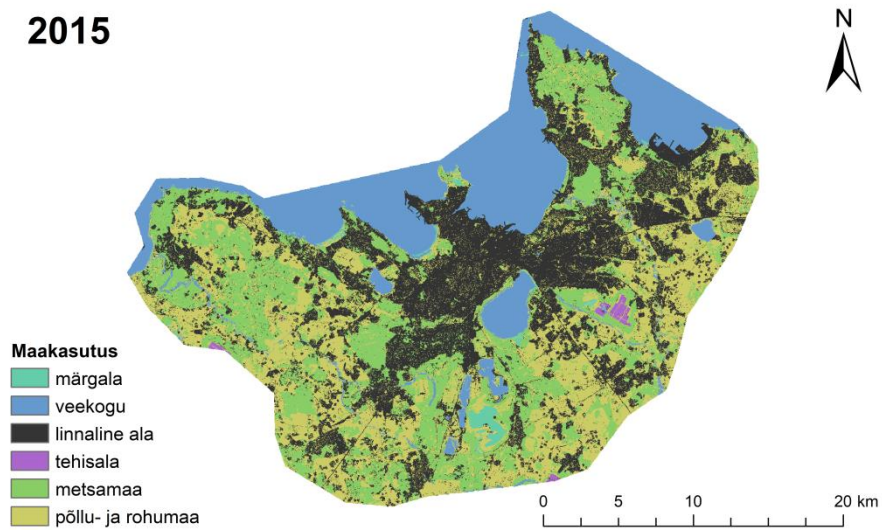
1989



2007



2015



Joonis 6. Tallinna maakasutuse rastrite aegrida.

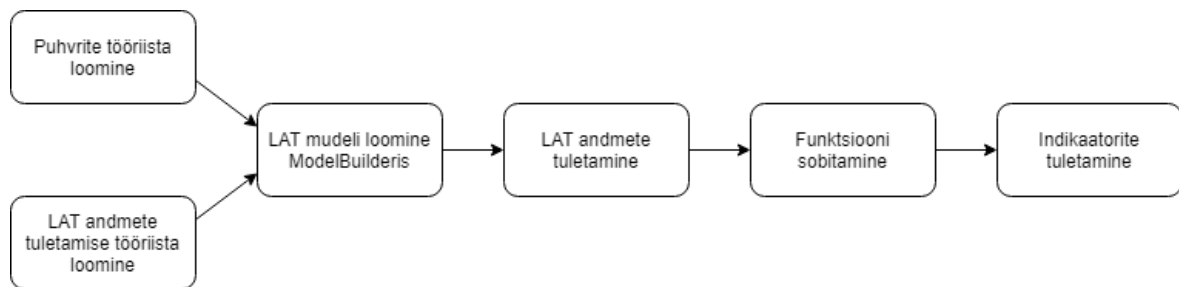
Käesolevas töös kasutati linnade maakasutuse kolme ajahetke rasterpilte (tabel 2), mis annavad edasi Eesti linnade ruumilise kasvu dünaamikat viimase 30 aasta jooksul. Täiendavate andmetena kasutati töös linnade CBD asukoha määramisel (ptk 3.1.1.1) ka Maa-ameti kaardiserveri ortofoto ja tänavanimede kaardikihte ning Eesti haldusjaotuse andmeid (Maa-amet, 2017) ja OpenStreetMapi Eesti teedevõrgu andmeid (Geofabrik, 2017).

Tabel 2. Töös vaadeldud linnade maakasutuse rastrite ajaline jaotus.

Linn	Aastad		
Narva	1989	2007	2015
Pärnu	1989	2007	2016
Tallinn	1989	2007	2015
Tartu	1989	2007	2016

3 Metoodika

Metoodikaosas antakse kõigepealt ülevaade linnade maakasutuse rastritest LAT andmete tuletamise protsessist, milleks loodi ArcGISi Pythoni teegi ArcPy võimalusi rakendades spetsiaalsed tööriistad ja vastav mudel. Seejärel kirjeldatakse saadud andmete sobitamist LAT funktsiooniga ja kompaktsuse ning valglinnastumise taseme näitajate leidmist, mis viidi läbi Pythonis. Töövooskeem on toodud joonisel 7.

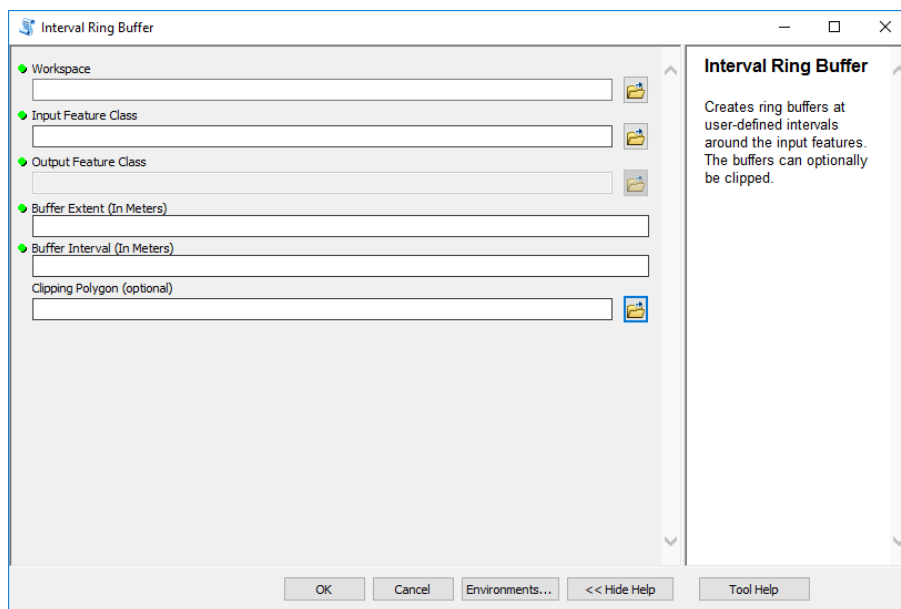


Joonis 7. Käesolevas töös rakendatud töövooskeem.

3.1 LAT andmete tuletamine

3.1.1 Puhvrite loomise tööriist *Interval Ring Buffer*

Maakasutuse rastrite ruumiliseks jagamiseks kasutati linnade CBD-de ümber loodud kontsentrilisi puhvreid, mis on levinud meetod erinevate nähtuste ruumiliste erinevuste uurimiseks teemakohastes uuringutes (Seto & Fragkias, 2005). Selleks modifitseeriti ArcGISi tööriista *Multiple Ring Buffer* (Esri, 2016a) ArcPy versiooni ja loodi uus tööriist *Interval Ring Buffer*, mis võimaldab luua sisendiks antud CBD nähtuseklassi ümber kontsentrilisi ringpuhvreid (joonis 8). CBD võib olla määratud nii punkti, joone kui polügoniga ning vastavaid nähtusi võib ühe nähtuseklassi sees olla ka mitu, kuna CBD-st samal kaugusel asuvad kattuvad puhvrid liidetakse ja neid käsitletakse edaspidi ühe puhvrina. See võimaldab tööriista kasutada ka polütsentrilise CBD-de asetuse korral. Puhvrite ulatus määrab kõige kaugema puhvri välimise piiri ja puhvrite intervall vahemaa, mille tagant puhvreid luuakse ehk näiteks ulatus 5000 m ja intervall 1000 m tähendab seda, et kokku luuakse viis ringpuhvrit (1000, 2000, 3000, 4000 ja 5000 m). Valikulise sisendina on võimalik kasutada ka lõikepolügoni, millega saab üleliigsed puhvri osad lõpptulemusest eemaldada.



Joonis 8. Tööriista *Interval Ring Buffer* kasutajavaade. Sisendiks on töökeskkond (*Workspace*), CBD nähtuseklass (*Input Feature Class*), puhvrite ulatus meetrites (*Buffer Extent*), puhvrite intervall (*Buffer Interval*) ja valikuline lõikepolügon (*Clipping Polygon*).

3.1.1.1 Linnade CBD-d

Tabelis 3 on toodud töös vaadeldud linnade CBD-de asukohtade kirjeldused ja ärikeskust tähistavate punktide ristkoordinaadid L-EST'97 süsteemis. Selleks, et jälgida CBD LAT muutust aja jooksul, määras Jiao (2015) oma töös keskuste asukohad vastavalt kõige varasema ajahetke (antud juhul 1989) seisule. Sama lähenemist üritati käesolevas töös järgida ka Eesti linnade puhul, kuid kuna kohalikud autorid on ärikeskuste täpse asukoha temaatikat varem käsitlenud vaid Tallinna ja Tartu kontekstis ning pigem kaasajal (Vahtra, 2014; Padrik, 2016), siis tuleb märkida, et siinkohal on tegemist autoripoolse subjektiivse tõlgendusega. Ärikeskuse asukoha määramisel arvestati Narvas Kreenholmi piirkonna ning Pärnu ja Tartu puhul vanalinna kaubanduspindade tänasest suuremat tähtsust 1989. aastal. Polütsentrilise lahenduse jaoks määrati Pärnu ja Tallinna puhul lisaks tinglikud allkeskused ka vastavalt Sindi ja Maardu linnadesse.

Tabel 3. Töös vaadeldud linnade CBD-de asukohad.

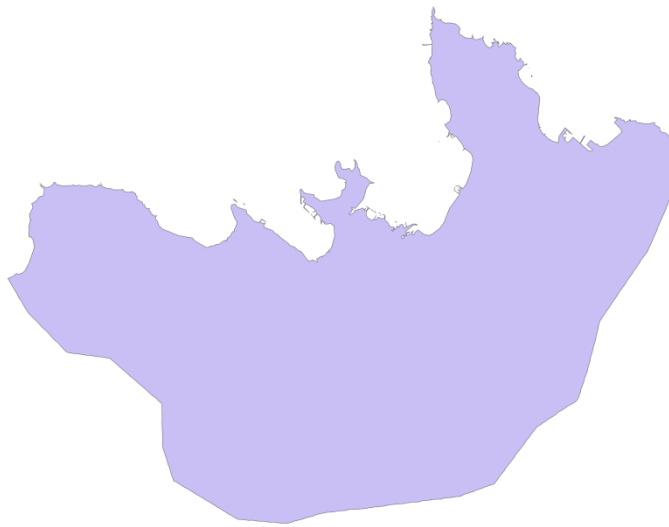
Linn	Asukoha kirjeldus	Punkti koordinaadid	Allkeskus	Allkeskuse koordinaadid
Narva	26. juuli ja Kreenholmi tn ristmik	X: 6588187,27 Y: 738006,29	-	-
Pärnu	Pühavaimu ja Rüütli tn ristmik	X: 6471687,33 Y: 529322,96	Sindi	X: 6474368,06 Y: 538509,09

Tabel 3. (Jätkub.)

Linn	Asukoha kirjeldus	Punkti koordinaadid	Allkeskus	Allkeskuse koordinaadid
Tallinn	Gonsiori ja A. Laikmaa tn ristmik	X: 6588884,11 Y: 542987,97	Maardu	X: 6593950,06 Y: 557564,83
Tartu	Raekoja platsi ja Rüütli tn ristmik	X: 6474320,95 Y: 659219,38	-	-

3.1.1.2 Lõikepolügonid

Käesolevas töös määrati ringpuhvrite ulatus iga linna puhul selliselt, et puhvrid katsid ära vastava linna maakasutuse rastri, mille tulemusena tekkisid rastrist väljaulatuvad puhvri osad. Nende osade eemaldamiseks loodi esmalt maakasutuse rastrite vektoriseerimise teel polügonid, kasutades selleks ArcGISi tööriista *Raster to Polygon* (Esri, 2016b). Narva, Pärnu ja Tallinna puhul eraldati saadud polügonidest omakorda tööriista *Clip* (Esri, 2016c) ning Eesti maakondade polügonide abil maismaa osad. Tulemuseks saadud lõikepolügonid (joonis 9) olid tööriista *Interval Ring Buffer* sisendiks.



Joonis 9. Ringpuhvrite lõikepolügon Tallinna näitel.

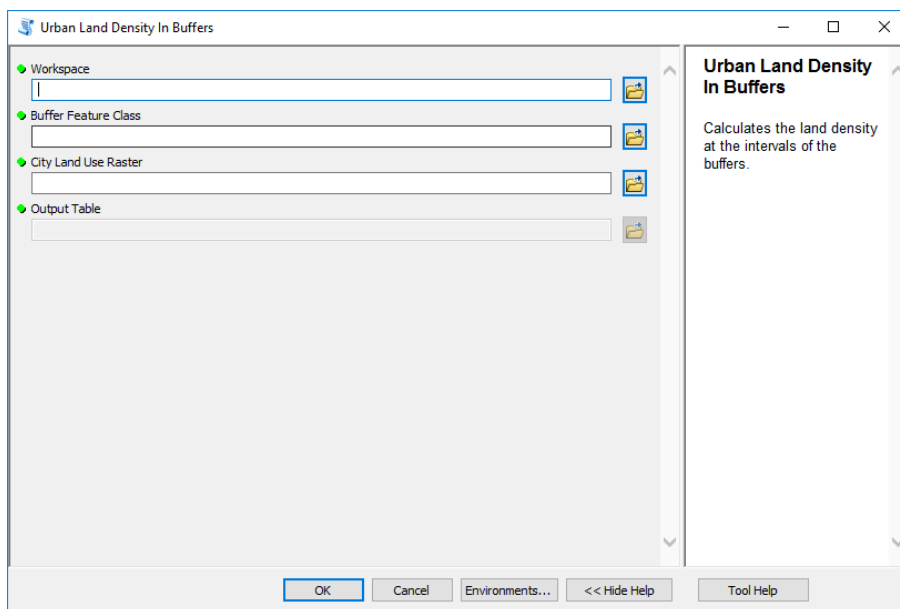
3.1.2 LAT andmete tuletamise tööriist *Urban Land Density (ULD) In Buffers*

LAT väärtuste leidmiseks CBD ringpuhvrites loodi tööriist *Urban Land Density (ULD) In Buffers* (joonis 10), mis rakendab osaliselt ArcGISi lisapaketi Spatial Analyst tööriista *Tabulate Area* (Esri, 2016d) ArcPy versiooni. Tööriista sisendiks on töökeskkond, puhvrite

nähtuseklass ja linna maakasutuse raster ning väljundiks on tabel, mis näitab linnalise ala tihedust erineva kaugusega CBD puhvrites. Puhvri LAT väärtuse tuletamine põhineb valemil

$$LAT = \frac{S_{LA}}{S - (S_M + S_V)}, \quad (13)$$

kus LAT on vastava puhvri linnalise ala tihedus, S_{LA} linnalise ala pindala, S puhvri pindala, S_M märgalade ja S_V veekogude pindala puhvris. Märgalad ja veekogud saab lugeda linna ruumilist kasvu piiravaks teguriks, kuna linnade laienemise modelleerimisel on täheldatud, et antud maakasutuse klasside asendumine linnalise alaga on ajas võrreldes teistega (nt metsa- ja põllumaa) tunduvalt väiksema tõenäosusega (Kirsimäe, 2017). Kuna rastrite arvukad märgalad ja veekogud oleks oluliselt mõjutanud puhvrite LAT väärtusi, otsustati nende pindala puhvri pindalast maha lahutada.

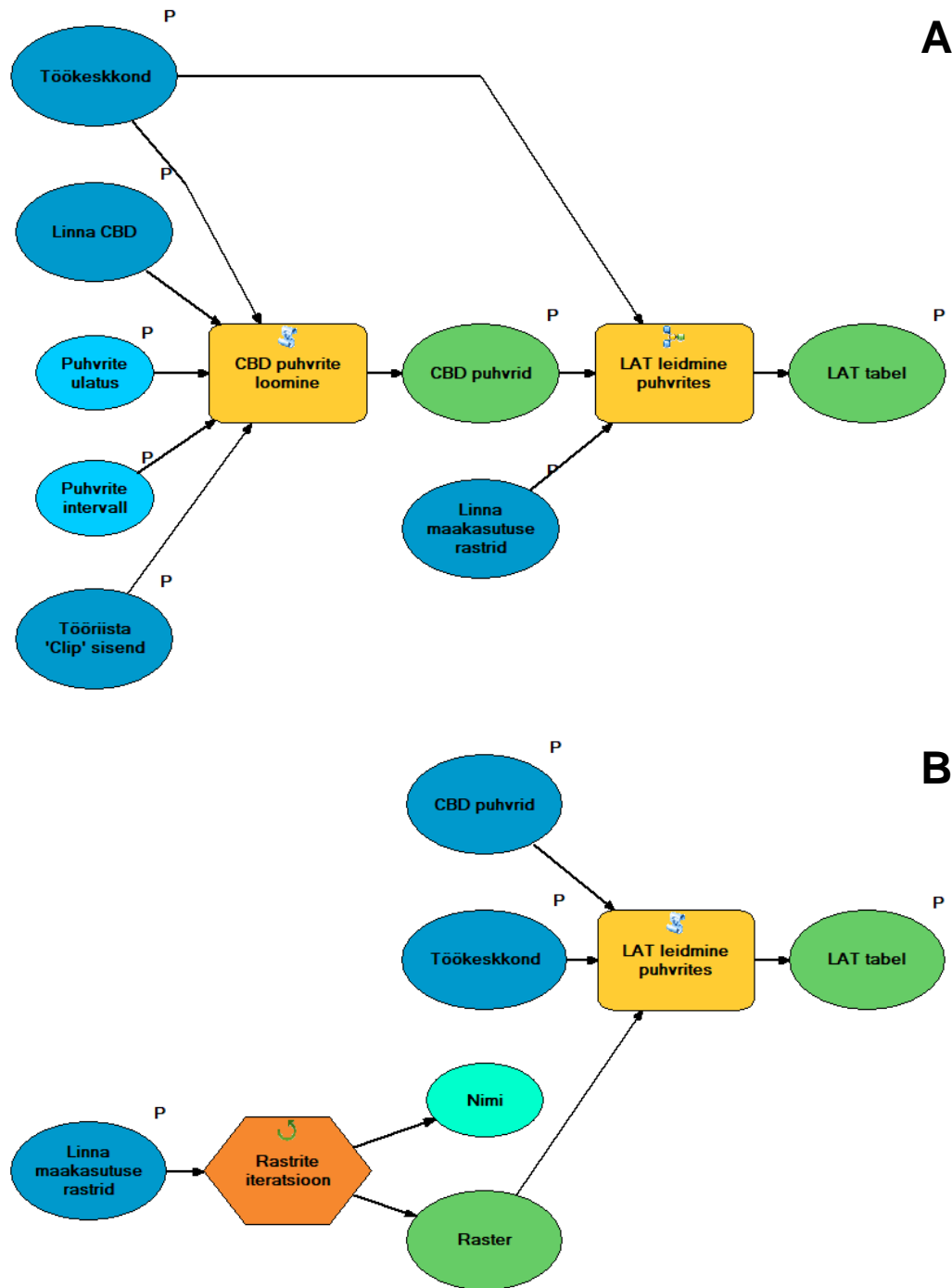


Joonis 10. Tööriista *Urban Land Density In Buffers* kasutajavaade. Sisendiks on töökeskkond (*Workspace*), puhvrite nähtuseklass (*Buffer Feature Class*) ja linna maakasutuse raster (*City Land Use Raster*).

3.1.3 ULD Model ArcGISi ModelBuilderi keskkonnas

Tööriistade kombineerimisel koostati ArcGISi ModelBuilderi keskkonnas nn *ULD Model* (ULDM), mis hõlmab töövoogu CBD ringpuhvrite loomisest LAT väärtuste arvutamiseni (joonis 11). LAT tabelid tuletati eraldi iga linna kolme ajahetke jaoks, seevastu ühe ja sama

linna puhvrite parameetrid ajast ei sõltunud. Igal mudeli iteratsioonil uute puhvrite loomise vältimiseks viidi seetõttu LAT tabelite loomine üle alammudelisse, mille ülesandeks on linna rastrite iteratsioon ja LAT väärtuste leidmine vastavates puhvrites. Mudeli sisendiks on seega kõik tööriista *Interval Ring Buffer* sisendid (ptk 3.1.1) ja kaust uuritava linna kolme ajahetke maakasutuse rastritega.

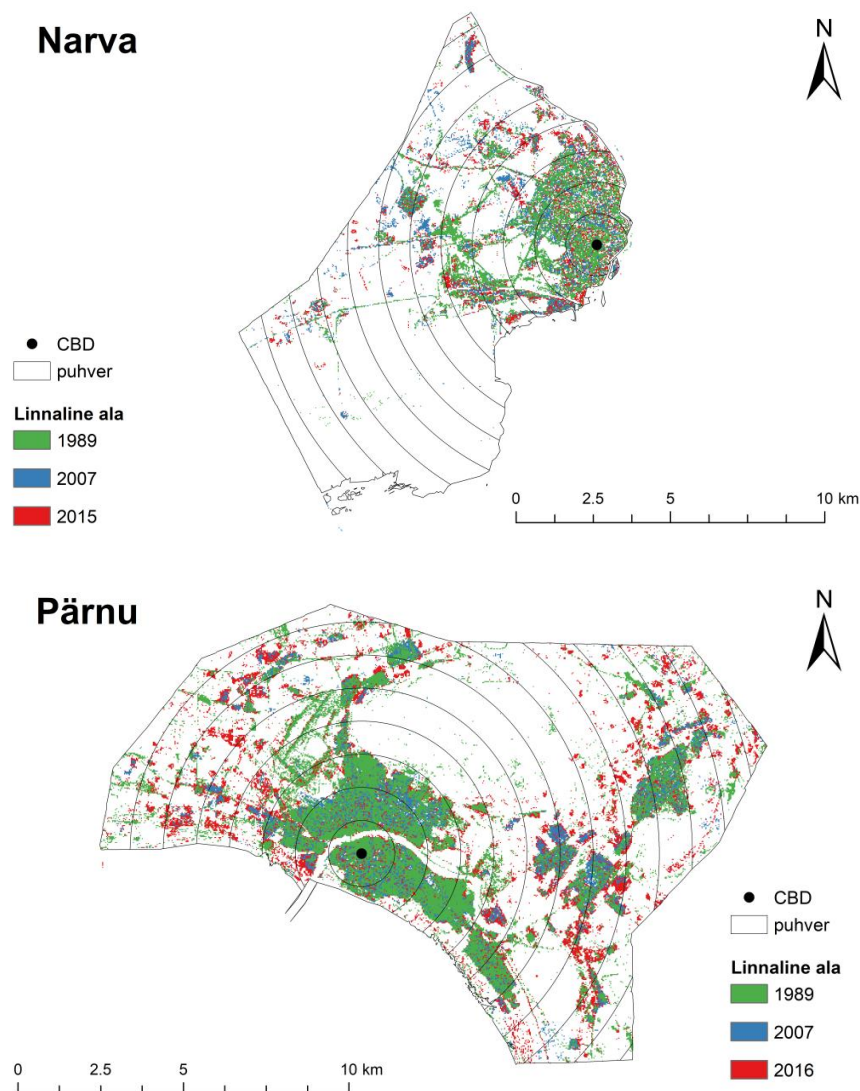


Joonis 11. ULD Model (A) ja alammudel (B) ArcGISi ModelBuilderi keskkonnas.

3.1.4 LAT mudeli väljundid

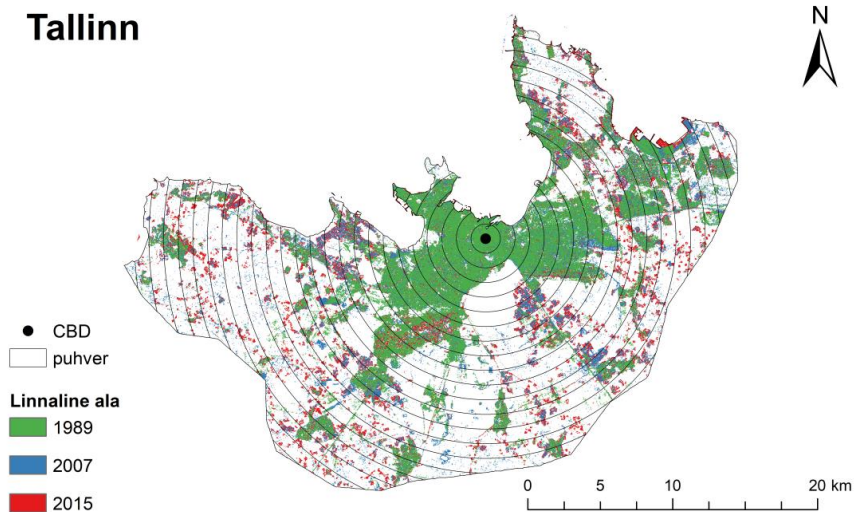
3.1.4.1 CBD-de puhvrid

ULDM-i esimeseks väljundiks olnud ringpuhvrid on CBD-de monotsentrilise asetuse korral toodud joonisel 12 ja polütsentrilisel juhul lisas 4. Nagu eelnevalt mainitud (ptk 3.1.1.2), sõltus puhvrite ulatuse parameeter antud töös vaadeldava ala suurusest. Sellest tulenevalt oli Narva ja Pärnu puhul puhvrite ulatuseks vastavalt 13000, Tartus 14000 ja Tallinnas 25000 m. Intervalliks määrati 1000 m, mida kasutas oma töös linna jagamiseks ka Jiao (2015). Tulenevalt Eesti ja Hiina linnade suuruse erinevustest kaaluti esialgu väiksema intervalli (500 m) kasutamist, aga kuna mudeli sobitamise (ptk 3.2.1) tulemused erinesid hiljem minimaalselt, siis ei olnud siinkohal põhjust meetodikat muuta.

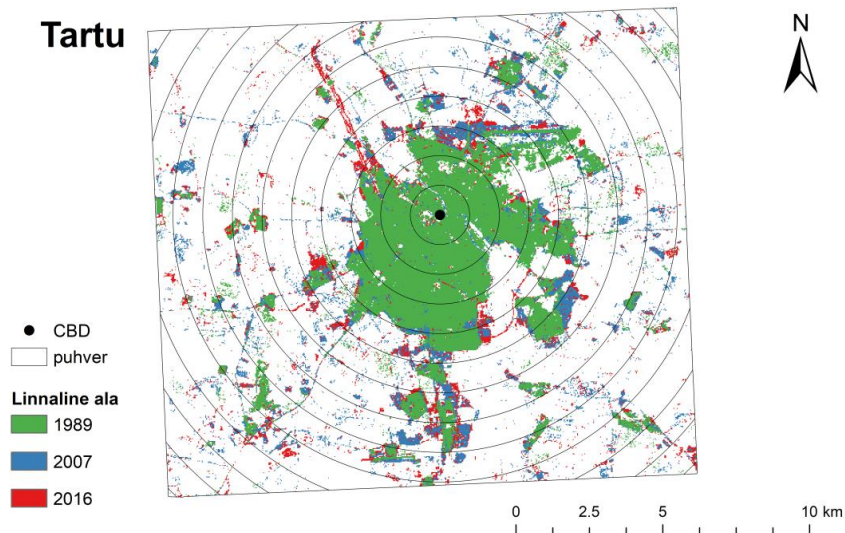


Joonis 12. Linnalise ala jagamine kontsentriliste puhvritega (monotsentriline variant).

Tallinn



Tartu



Joonis 12. (Jätkub.)

3.1.4.2 LAT tabelid

Teiseks väljundiks olid LAT tabelid, mille ULDM väljastas eraldi iga linna kolme ajahetke jaoks. Kuna LAT funktsiooni sobitamine toimus kolme ajahetke koondandmete põhjal, tuli linna kolm LAT tabelit liita ja luua koondtabelid (tabel 4), mis olid hiljem funktsiooni parameetrite optimeerimise algoritmi sisendiks (ptk 3.2.1). Tabelite liitmiseks kasutatud Pythoni koodifail (*TablesToCSV.py*) ja koondtabelite CSV-failid on saadaval metoodika peatüki lõpus viidatud GitHubi repositooriumis.

Tabel 4. LAT koondtabel Pärnu näitel (monotsentriline variant).

r (km)	1989	2007	2016
1	0,691596	0,864978	0,932849
2	0,586031	0,796273	0,879267
3	0,466495	0,5855	0,676715
4	0,260863	0,26721	0,407523
5	0,175876	0,204094	0,323512
6	0,146744	0,191149	0,320185
7	0,115156	0,164986	0,265274
8	0,079186	0,113367	0,193399
9	0,092099	0,130205	0,210232
10	0,21476	0,241713	0,325394
11	0,126603	0,182982	0,283007
12	0,104491	0,128625	0,238246
13	0,060382	0,08434	0,22132

3.2 Funktsiooni sobitamine ja indikaatorite tuletamine

3.2.1 LAT andmete sobitamine funktsiooniga

Funktsiooni sobitamise protsess algas LAT koondtabelite andmemassiivideks (ingl *record array*) teisendamisega, milleks kasutati Pythoni numbrilise andmetöötluse teeki NumPy (Oliphant, 2006). Saadud massiivid olid sisendiks teadusarvutuste teegi SciPy parameetrite optimeerimise paketi *optimize* funktsioonile *curve_fit* (SciPy, 2017) kujul

$$popt, pcov = curve_fit(f, xdata, ydata, p0, bounds, method), \quad (14)$$

kus *popt* ja *pcov* on vastavalt optimeeritud parameetrite ning nende kovariatsioonide massiivid, *f* sobitav funktsioon, *xdata* sõltumatute muutujate massiiv, *ydata* sõltuvate muutujate jada (ingl *sequence*), *p0* vaikeparameetrite jada, *bounds* parameetrite usalduspiiride ennik (ingl *tuple*) ning *method* mudeli sobitamise algoritm. Sobitavaks funktsiooniks oli antud juhul LAT funktsioon, sõltumatud muutujad puhvrite raadiused (ehk esimene tulp tabelis 4) ja sõltuvad muutujad puhvrite LAT väärtused kolmel ajahetkel (teine kuni neljas tulp tabelis 4). Vaikeparameetrid ja parameetrite ülemised ning alumised usalduspiirid määrati Jiao (2015) funktsiooni üldkujule tuginedes (tabel 5). Sobitamise

meetodina kasutati nn usalduspiirkondade algoritmi (ingl *Trust Region Algorithm*), mis on mõeldud eelkõige hõreda lähteandmestikuga mittelineaarsete optimeerimise probleemide lahendamiseks (Yuan, 1999). Algoritmi eesmärgiks on parameetrid tuletada iteratiivselt vastavalt ette antud usalduspiiride vahemikule, kasutades nende sobivuse hindamiseks vähimruutude meetodit.

Tabel 5. LAT funktsiooni vaikeparameetrid ning nende alumised ja ülemised usalduspiirid.

Parameeter	Vaikeväärtus	Alumine piir	Ülemine piir
α	4	0	∞
c	0,05	0	1
D	30	0	∞

Võrrandi 14 väljundiks olnud optimeeritud parameetrite massiivid kirjutati CSV-failidesse, mida kasutati sisendina kompaktsuse ja valglinnastumise näitajate arvutamisel (ptk 3.2.2). Kovariatsioonide põhjal arvutati determinatsioonikordajad (R^2), mille kaudu sai hinnata funktsiooni sobitamise edukust. Parameetrite CSV-failid koos funktsiooni sobitamise koodifailiga (*model_fitting.py*) on leitavad peatüki 3 lõpus viidatud repositooriumist.

3.2.2 Indikaatorite tuletamine

Peatükis 1.4 toodud linnaosade raadiuste, kompaktsuse ja valglinnastumise näitajate arvutamiseks teisendati vastavad võrrandid esmalt Pythoni funktsioonideks, mida seejärel rakendati parameetrite massiividele. Selleks kasutati Pythoni andmeanalüüsi ja -töötlusteeki Pandas (McKinney, 2010), mis võimaldas andmemassiivides tulbapõhiseid arvutusi. Tulemuseks saadud indikaatorite massiivid kirjutati CSV-failidesse, mis on lisatud koos nende arvutamise koodifailiga (*index_calc.py*) peatüki 3 lõpus viidatud repositooriumisse.

3.3 GitHubi repositoorium

Kõik käesolevas töös kasutatud andmed, tööriistad ja koodifailid on koondatud GitHubi repositooriumisse (Virro, 2018), kuhu on lisatud kausta *uld-model*

- ArcGISi tööriistakast *ULDModel.tbx* koos peatükis 3.1 kirjeldatud tööriistade ja mudelitega;
- vastavate tööriistade Pythoni koodifailid;
- geoandmebaas *ULDModel.gdb.zip* linnade CBD-de, lõikepolügonide ja puhvrite nähtuseklassidega ning LAT tabelitega;
- linnade maakasutuse rastrid (*rasters.zip*);

ning kausta *data-analysis*

- funktsiooni sobitamise sisendiks olnud LAT CSV-failid;
- saadud parameetrite CSV-failid;
- parameetrite põhjal leitud indikaatorite CSV-failid;
- funktsiooni sobitamise ja indikaatorite arvutamise Pythoni koodifailid.

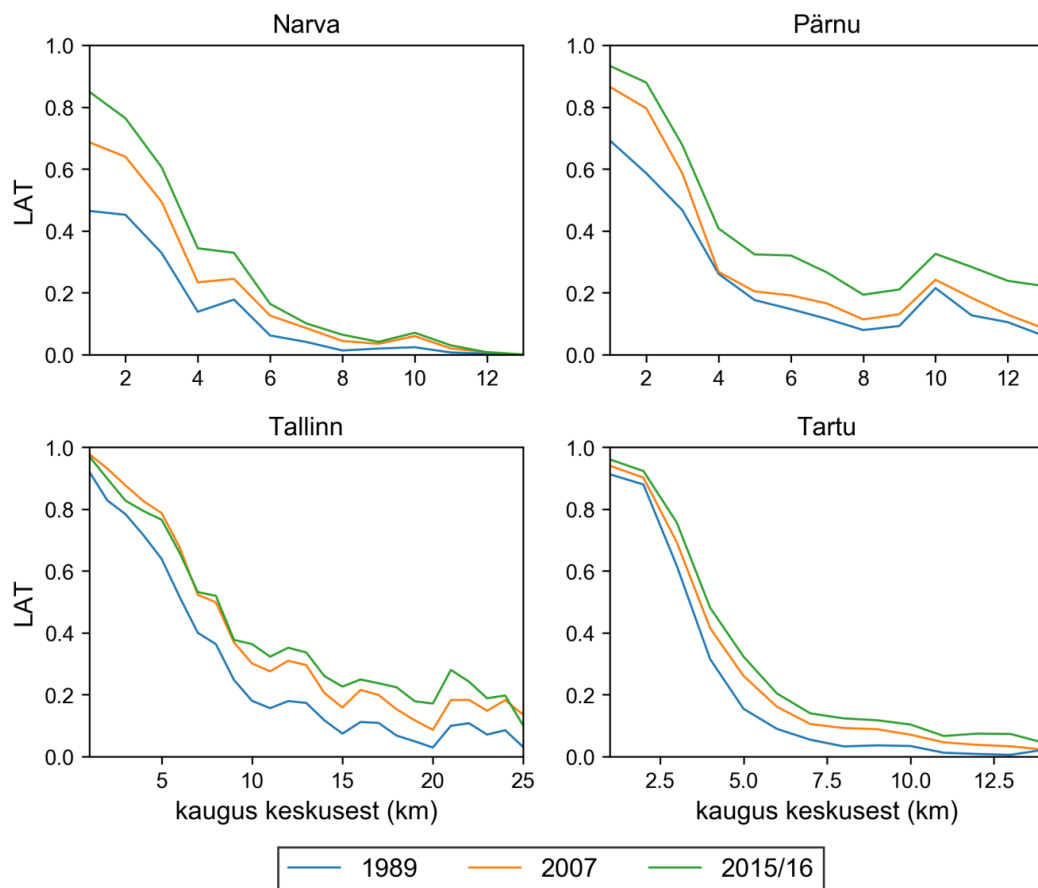
4 Tulemused

Peatüki esimeses osas (ptk 4.1) antakse ülevaade uuringu tulemustest linnade CBD-de monotsentrilise asetuse korral. Pärnu ja Tallinna puhul katsetatud polütsentrilise lahenduse tulemused on toodud alapeatükis 4.2.

4.1 Monotsentriline lahendus

4.1.1 LAT empiirilised graafikud

Joonisel 13 on toodud ULDM-i väljundiks olnud LAT empiiriliste andmete graafikud, mis kirjeldavad LAT langust CBD-st kaugenemisel. LAT sigmoidne langus tuvastati kõigi linnade puhul, kuid LAT languse kiirus ja graafiku sujuvus sõltus nii linna kompaktsusest kui monotsentrilisusest. Kompaktse linna (antud juhul Tartu) LAT oli keskuses suur ja tagamaal väga väike, kusjuures LAT langes CBD-st kaugenedes väga kiiresti. Vähem kompaktsama linna (nt Tallinn) puhul oli langus tunduvalt aeglasem ja LAT linna tagamaal seetõttu suurem. Linnade monotsentrilisust iseloomustas graafiku sujuvus. Kõige rohkem sarnanes nn klassikalisele monotsentrilisele linnale siinkohal Tartu, mille graafik oli väga lähedane LAT funktsiooni üldkuju graafikule. Pärnu ja Tallinna puhul tuvastatud LAT kasvu tagamaal põhjustasid tõenäoliselt lähipiirkonna sekundaarsed keskused (Sindi ja Maardu) ning sellest tulenevalt uuriti neid linna ka polütsentrilise CBD-de asetuse korral (ptk 4.2). Narva puhul paistis silma LAT väga väike väärtus linna keskuses aastal 1989, mille põhjuseks oli teistest linnadest väiksem linnalise ala osakaal maakasutuse rastril (lisa 1).



Joonis 13. Vaadeldud linnade empiirilised LAT graafikud.

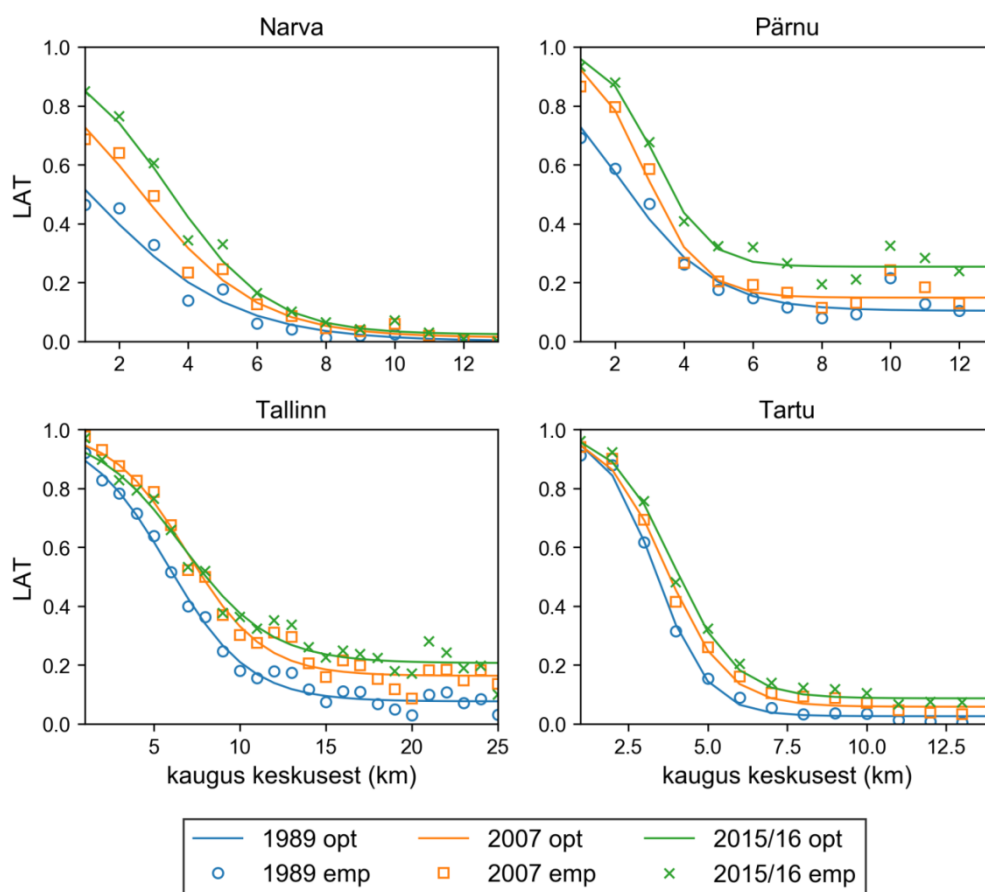
4.1.2 Funktsiooni sobitamise tulemused

LAT funktsiooni sobitamisel saadud optimeeritud parameetrid on toodud tabelis 6 ning empiiriliste ja optimeeritud LAT graafikute võrdlus joonisel 14. Determinatsioonikordajad näitasid parameetrite kõrget sobivust kõigi linnade puhul. Teistest natuke madalamad olid vaid Pärnu kordajad, mistõttu oli optimeeritud LAT graafik ka mõnevõrra robustsem. Narva 1989. ja 2007. aasta ning Pärnu 1989. aasta graafikute kujud sarnanesid mõnevõrra Clarki eksponentsiaalse languse graafikule (ptk 1.3.2). Üldiselt kasvasid uurimisperioodi jooksul nii tagamaa tiheduse (c) kui tagamaa piiri (D) parameetrid kõigi linnade puhul. Tagamaa tihedus oli suurem Pärnus ja Tallinnas, mille üheks põhjuseks olid siinkohal jällegi sekundaarsed keskused. Lisaks võisid parameetrit c mõjutada linnadevahelised erinevused uusarenduste ruumilises jaotuses – mida enam laiali valgunud on ehitustegevus, seda suurem LAT linna tagamaal. Parameetri D kasv sõltus uurimisperioodi jooksul eelkõige LAT kasvust. Seetõttu muutus tihedama CBD-ga Tartu ja Tallinna parameeter vähem kui väiksematel linnadel. LAT ja D seos tuli hästi esile Narva näitel, kus perioodil

1989–2007 suurenes parameeter LAT kasvu tõttu üle kahe korra. Tallinnas seevastu vähenes perioodil 2007–2015 koos keskuse LAT-ga ka D .

Tabel 6. LAT funktsiooni optimeeritud parameetrid (monotsentriline variant).

Linn	1989				2007				2015/16			
	α	c	D	R^2	α	c	D	R^2	α	c	D	R^2
Narva	0,546	0,000	2,263	0,96	1,555	0,013	5,257	0,98	2,414	0,023	6,926	0,99
Pärnu	1,561	0,104	4,263	0,96	3,541	0,148	5,759	0,97	4,177	0,253	6,304	0,98
Tallinn	2,481	0,077	11,662	0,99	3,136	0,163	13,894	0,98	2,164	0,207	13,353	0,98
Tartu	4,076	0,026	6,737	0,99	3,860	0,058	7,381	0,99	4,047	0,087	7,844	0,99



Joonis 14. Vaadeldud linnade empiiriliste ja optimeeritud LAT graafikute võrdlus (monotsentriline variant).

4.1.3 Linnaosade raadiuste parameetrid

Kuna nii kompaktsuse kui valglinnastumise taseme näitajate sisendiks olid linnakeskuse ja eeslinna raadiused (ptk 1.4.2), siis leiti järgmiseks parameetrid r_1 (keskuse raadius), r_0 (sisemise linna raadius) ja r_2 (eeslinna raadius), mis on toodud tabelis 7. Üldiselt on kasvanud ajas kõik raadiuste parameetrid, kuid erinevalt Jiao tööst (2015), kus eelkõige kasvas ajas väikse tihedusega eeslinna raadius, kasvas protsentuaalselt enamiku Eesti linnade (v.a Tartu) korral pigem keskuse raadius. Siinkohal on ilmselt põhjuseks Eesti linnakeskuste (eelkõige Narva ja Pärnu) väiksem LAT uurimisperioodi alguses, mistõttu LAT kasvuga kaasnes ka kiire keskuse raadiuse kasv. Kõrvalekaldena tuli esile Narva, kus parameetri r_1 väärtus oli 1989. aastal negatiivne. See võib näidata, et tunduvalt tihedama keskusega Hiina linnade põhjal välja töötatud valem r_1 arvutamiseks vajab toimimiseks piisavalt tihedat keskust, kuna valemis esinev konstant ($-1,316957$) põhjustab madalast tihedusest tuleneva parameetri α väikese väärtuse puhul negatiivseid tulemusi.

Tabel 7. Linnaosade raadiuste parameetrid perioodil 1989–2015/16 (monotsentriline variant).

Linn	1989			2007			2015/16		
	r_1	r_0	r_2	r_1	r_0	r_2	r_1	r_0	r_2
Narva	-1,60	1,13	3,86	0,40	2,63	4,85	1,57	3,46	5,35
Pärnu	0,33	2,13	3,93	1,81	2,88	3,95	2,16	3,15	4,15
Tallinn	2,74	5,83	8,93	4,03	6,95	9,86	3,31	6,68	10,04
Tartu	2,28	3,37	4,46	2,43	3,69	4,95	2,65	3,92	5,20

4.1.4 Kompaktsus

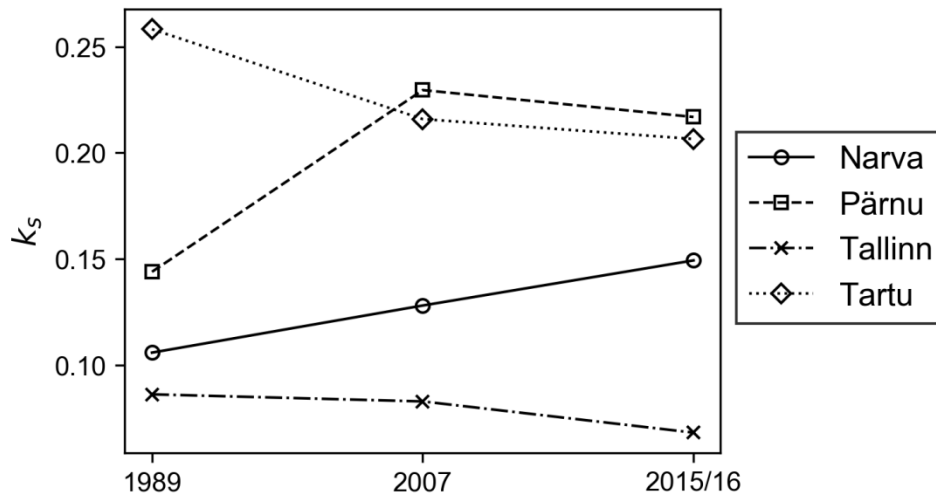
Kompaktsuse näitajatest vaadeldi esmalt indikaatorit k_p , mille Jiao (2015) töötas välja erineva kuju ja suurusega linnade võrdlemiseks (joonis 15). Tallinna ja Tartu kompaktsus ajas oluliselt ei muutunud, kuna raadiuse parameetrite suhteline kasv oli suuremate linnade puhul väiksem. Seejuures oli Tartu vaadeldud linnadest kõige kompaktsem. Indikaator k_p tuletatakse eelmises punktis kirjeldatud parameetrite r_1 ja r_2 alusel ning kuna Narva 1989. aasta r_1 oli negatiivne, siis andis k_p sel aastal Narva puhul ebatõenäoliselt kõrge väärtuse. Kui Jiao uuringus jäi k_p vahemikku 0,17–0,69, siis Narva ja Pärnu puhul esinesid aastatel 1989 ja 2007 ka suuremad väärtused, mille põhjuseks oli jällegi Eesti linnade väiksem

LAT. Kuna Hiina linnades on pinnaühiku kohta rohkem linnalist ala ja vähem rohealaid ning väikse tihedusega eeslinna, siis võivad Hiina suurlinnad osutada antud näitaja alusel kompaktsemaks kui tunduvalt väiksema pindalaga Eesti linnad. Näitaja sõltuvust LAT-st iseloomustas hästi ka Narvas ja Pärnus tiheduse kasvuga kaasnenud kiire kompaktsuse kasv uurimisperioodi teises pooles.



Joonis 15. Kompaktsuse näitaja k_p muutus perioodil 1989–2015/16. Kompaktset linna iseloomustab väiksem k_p .

Teise LAT funktsioonist tuletatud kompaktsuse näitaja k_s tulemused erinesid mõnevõrra eelmisest indikaatorist (joonis 16). Kompaktsemad linnad olid jällegi Pärnu ja Tartu, mille graafikud kujutasid endast ümber pööratud k_p graafikuid. Erinevalt k_p -st ei esinenud aga Narvas 1989. aastal eeltoodud probleeme, mis võib näidata, et väiksem LAT indikaatori toimimist nii palju ei mõjuta. Jiao juhtis oma töös tähelepanu sellele, et k_s sõltub oluliselt tagamaa piiri parameetrist D ja seetõttu võivad suuremad linnad tunduda vähem kompaktsemad kui nad tegelikult on. Antud juhul oli seega selgelt kõige mittekompaktsem Tallinn, kus D oli kuni kaks korda suurem kui suuruselt järgmise linna puhul.



Joonis 16. Kompaktsuse näitaja k_s muutus perioodil 1989–2015/16. Kompaktset linna iseloomustab suurem k_s .

4.1.5 Valglinnastumise tase

Tabelis 8 on toodud valglinnastumise taseme väärtused, mis näitavad, kui palju on mingil perioodil kasvanud väiksema tihedusega eeslinna piir võrreldes tihedama keskusega. Tuleb tõdeda, et kui Hiina linnade põhjal tuletatud kompaktsuse näitajad töötasid Eesti oludes üsna hästi, siis indikaator S_r kuigi adekvaatseid tulemusi ei andnud. Peamiseks põhjuseks oli siinkohal näitaja arvutamise meetodika. Jiao uuringus (2015) oli eelduseks, et ajas on kasvanud enam väikse tihedusega eeslinna piir r_2 , mille muut δr_2 oli seega suurem kui δr_1 . Eesti linnade puhul (v.a Tartu perioodil 1989–2007) kasvas rohkem aga r_1 , kuna LAT keskuses oli uurimisperioodi alguses üldjuhul väiksem. Seetõttu esinesid nii Narva kui Tallinna puhul siinkohal ka negatiivsed väärtused. Valglinnastumist sai antud näitaja alusel hinnata adekvaatselt ainult Tartu puhul, kus uurimisperioodi esimeses pooles viitas S_r kalduvust laiali valgunud ja teises pooles kompaktse kasvu suunas.

Tabel 8. Valglinnastumise taseme ja eeslinna ning keskuse raadiuse muudu väärtused perioodil 1989–2015/16 (monotsentriline variant).

Linn	1989–2007			2007–2015/16		
	δr_2	δr_1	S_r	δr_2	δr_1	S_r
Narva	-1,59	7,72	-0,21	0,20	5,69	0,04
Pärnu	0,01	5,80	0,00	0,35	1,38	0,26
Tallinn	2,57	11,55	0,22	0,71	-7,07	-0,10
Tartu	1,12	0,67	1,67	0,61	1,06	0,57

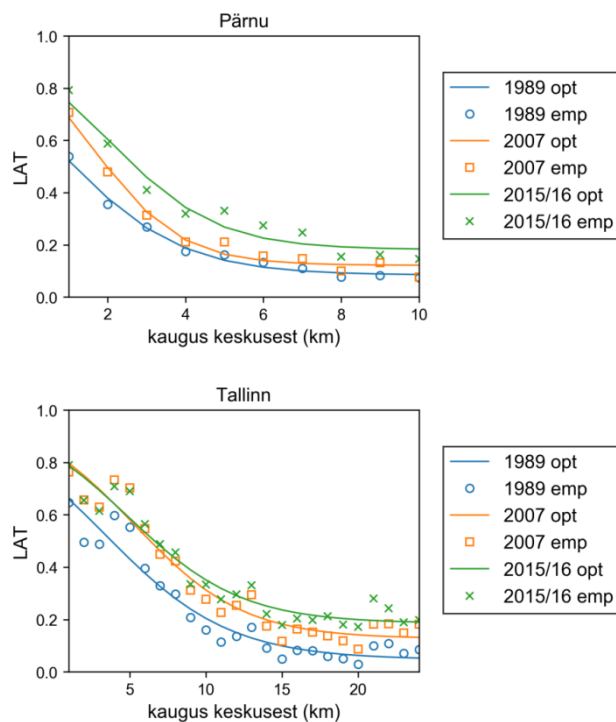
4.2 Polütsentriline lahendus

4.2.1 Funktsiooni sobitamise tulemused

LAT funktsiooni sobitamise tulemused polütsentrilise CBD-de asetuse korral on toodud tabelis 9 ja joonisel 17. Mõlema linna puhul olid parameetrite c ja D väärtused väiksemad kui monotsentrilise lahenduse korral. Sekundaarsete keskuste kasutamine tähendas seda, et keskmistamise tulemusena vähenes Sindi ja Maardu väiksema tiheduse mõjul ka suuremate linnade LAT. Seetõttu vähenesid nii tagamaa tiheduse kui tagamaa piiri parameetrid. LAT optimeeritud graafikuid iseloomustas Pärnu ja Tallinna puhul sigmoidse languse asemel pigem eksponentsiaalne langustrend.

Tabel 9. LAT funktsiooni optimeeritud parameetrid (polütsentriline variant).

Linn	1989				2007				2015/16			
	α	c	D	R^2	α	c	D	R^2	α	c	D	R^2
Pärnu	0,575	0,084	1,742	0,99	1,491	0,122	3,332	0,98	1,535	0,182	4,178	0,96
Tallinn	0,836	0,047	6,815	0,93	1,471	0,127	10,585	0,94	1,310	0,185	9,794	0,94



Joonis 17. Empiiriliste ja optimeeritud LAT graafikute võrdlus (polütsentriline variant).

4.2.2 Linnaosade raadiused, kompaktsus ja valglinnastumise tase

Keskmistatud LAT mõjutas polütsentrilise lahenduse korral oluliselt linnaosade raadiuste parameetrite väärtusi (tabel 10). Mõlema linna parameetrite väärtused olid väiksemad kui monotsentrilisel juhul ja lisaks esinesid CBD raadiuse (r_1) puhul ka negatiivsed väärtused, mille põhjuseid vaadeldi juba Narva näitel peatükis 4.1.3. Kuna Tallinnas oli r_1 negatiivne kahel juhul, siis võib oletada, et Tallinna ja Maardu LAT erinevused olid suuremad kui Pärnu ja Sindi puhul, mistõttu keskmistamine mõjutas rohkem just Tallinna väärtusi.

Tabel 10. Linnaosade raadiuste parameetrid perioodil 1989–2015/16 (polütsentriline variant).

Linn	1989			2007			2015/16		
	r_1	r_0	r_2	r_1	r_0	r_2	r_1	r_0	r_2
Pärnu	-1,12	0,87	2,86	0,19	1,67	3,14	0,30	2,09	3,88
Tallinn	-1,96	3,41	8,77	0,56	5,29	10,03	-0,03	4,90	9,82

Raadiuse parameetrite puhul täheldatud probleemide tõttu olid kompaktsuse näitaja k_p väärtused ebatõenäoliselt kõrged (tabel 11). Indikaatorit k_s need seevastu ei mõjutanud, kuid mõlemad linnad osutusid vähem kompaksemaks kui monotsentrilise lahenduse korral. Nii nagu monotsentrilise lahenduse puhul, ei andnud valglinnastumise taseme indikaator S_r negatiivsete raadiuse muutude tõttu adekvaatseid tulemusi (tabel 12). Näitajate põhjal saab öelda, et polütsentriline lahendus oleks vajanud toimimiseks piisavalt suuri ja tiheda CBD-ga sekundaarseid keskusi ning Pärnu ja Tallinna puhul oli õigustatud siiski monotsentriline lahendus.

Tabel 11. Kompaktsuse näitajate väärtused perioodil 1989–2015/16 (polütsentriline variant).

Linn	1989		2007		2015/16	
	k_p	k_s	k_p	k_s	k_p	k_s
Pärnu	2,29	0,13	0,88	0,17	0,86	0,13
Tallinn	1,57	0,05	0,90	0,05	1,01	0,05

Tabel 12. Valglinnastumise taseme ja eeslinna ning keskuse raadiuse muudu väärtused perioodil 1989–2015/16 (polütsentriline variant).

Linn	1989–2007			2007–2015/16		
	δr_2	δr_1	S_r	δr_2	δr_1	S_r
Pärnu	-0,31	3,77	-0,08	0,14	0,32	0,45
Tallinn	-2,46	22,05	-0,11	-0,12	-5,85	0,02

5 Arutelu

Arutelu esimeses osas tõlgendatakse LAT funktsiooni sobitamise protsessi tulemusi ja seejärel antakse hinnang antud töös vaadeldud kompaktsuse ja valglinnastumise taseme indikaatorite rakendatavuse kohta linnade kasvu iseloomustamisel monotsentrilise CBD-de asetuse puhul. Teises alapeatükis täiendatakse järeldusi polütsentrilise lahenduse tulemuste põhjal.

5.1 Monotsentriline lahendus

5.1.1 LAT funktsiooni graafikute ja parameetrite tõlgendus

Kuigi Narva ja Pärnu näitel esinesid LAT languse graafikute puhul ka erandid (ptk 4.1.2), kinnitasid funktsiooni sobitamise tulemused eelnevalt Jiao (2015) poolt sõnastatud LAT sigmoidset langust linna CBD-st kaugenemisel. Seega kirjeldab sigmoidne kõver üldjuhul LAT langust täpsemalt, kui varasemalt linna tiheduse vähenemise esitamiseks kasutatud eksponentsiaalse (Clark, 1951), Gaussi (Sherratt, 1960; Tanner, 1961) või pöördvõrdelise ruutsõltuvuse (Smeed, 1963) kahanemise mudelid. Kuigi algne mudel töötati välja Hiina suurlinnade andmete põhjal, näitasid tulemused, et LAT languse kõver ei sõltu uuritava linna rahvaarvust või pindalast. Sarnaselt Hiina linnadele kahanes ka Eesti linnades LAT CBD ulatuses aeglaselt, kiirenes seejärel eeslinnas ning aeglustus linnalähedasel tagamaal. Küll aga näitasid Narva 1989. ja 2007. aasta ning Pärnu 1989. aasta graafikud, et teatud juhtudel võib kõvera kuju osas esineda kõrvalekaldeid, mida siinkohal põhjustas väga väike LAT väärtus mõlema linna keskses. Seetõttu ei eristunud CBD kui linna kõige tihedam piirkond selgelt ülejäänud linnast, millega kaasnes täheldatud eksponentsiaalne langus. Sellest tulenevalt saab öelda, et LAT funktsiooni toimimine sõltub eelkõige CBD tihedusest, mitte linna suurusest, ning mudel võiks töötada ka piisavalt tiheda keskusega väikelinnade kontekstis.

Tiheduse analüüs on sageli üheks linnade ruumilise kasvu uurimise meetodiks (ptk 1.2.1) ja linnade kolme ajahetke LAT graafikute võrdlemisel saab iseloomustada linnade ajalist kasvudünaamikat ka antud juhul. Üldiselt kasvas LAT ajas kõigi linnade puhul, kuid kasvu ruumiline ja ajaline jaotus sõltus siinkohal uuritavast linnast. Eesti linnade lähiümbruses oli arendustegevus kõige aktiivsem 21. sajandi algusaastatel (ptk 1.1), mis jäi käesolevas töös

esimesse uurimisperioodi, ning enamiku linnade puhul oli seetõttu LAT kasv suurim perioodil 1989–2007. Erandiks oli siiski Pärnu, kus LAT kasvas proportsionaalselt enam uurimisperioodi teises pooles (2007–2016). Kuna Tartus on linnalise ala kasv toimunud linna vahetus lähiümbruses (Roose et al., 2013), siis on LAT kasvanud eeslinna piirkonnas tagamaast rohkem. Sellest tulenevalt oli Tartu kui kompaktsemalt kasvanud linna puhul LAT langus keskusest kaugenedes kiirem kui teistes linnades. Pärnu ja Tallinna tagamaa LAT kasv viitab aga hajusale ruumilisele arengule, mida on mõlema linna puhul täheldatud juba varasemalt (Metspalu, 2005; Ideon, 2006; Samarüütel et al., 2010). Narva ja Pärnu keskuste LAT suur kasv on seletatav endiste tühermaade täisehitamisega (Kirsimäe, 2017).

LAT funktsiooni sobitamisel leitud determinatsioonikordajad näitasid mudeli parameetrite head kirjeldusvõimet kõigi vaadeldud linnade korral (ptk 4.1.2). Kuna nii tagamaa tihedust kirjeldanud parameeter c kui eeslinna ja tagamaa vahelise piiri parameeter D sõltusid LAT-st, siis mõjutas LAT muutus ka antud parameetrite ajalist käitumist. Arendustegevusega kaasnenud LAT kasv linna tagamaal põhjustas omakorda parameeter c väärtuse kasvu. Samasugune tendents esines ka parameeter D puhul – LAT kasv uurimispiirkonnas nihutas tagamaa piiri ajas keskusest järjest kaugemale. Mõlema parameetri kasv oli taas suurem uurimisperioodi esimeses pooles, kuna Eesti linnad laienesid aastatel 1989–2007 kiiremini kui hilisemal perioodil.

Kolmas parameeter α oli LAT funktsiooni puhul kõverat kontrollivaks parameetriks (ptk 1.4.2). Jiao uuringus (2015) esinesid antud parameetri väärtused enamiku linnade korral vahemikus 2–6 ja parameetri väärtused olid enamasti sarnased ka Eesti linnades. Erandina tulid jällegi esile Narva (1989. ja 2007. aasta) ja Pärnu (1989), kus α oli kahest väiksem. Seega avaldus siinkohal seos kõvera kuju ja α väärtuse vahel: kui α oli teatud alampiirist väiksem, siis iseloomustas graafikut sigmoidse languse asemel pigem eksponentsiaalne kahanemine. Seejuures ei olnud parameeter α otseselt sõltuv LAT suuruselt, kuna näiteks 2015. aastal oli tunduvalt tihedama CBD-ga Tallinnas α väärtus kaks korda väiksem kui Narvas.

5.1.2 Funktsioonist tuletatud indikaatorite piirangud ja võimalused

Kahest LAT funktsioonist tuletatud kompaktsuse näitajast tõi Jiao oma töös (2015) esile eelkõige indikaatorit k_p , mis sõltus vähem tagamaa piiri parameetrist ja võimaldas seega võrrelda erineva suurusega linnu. Antud näitaja alusel oli kõige kompaktsemaks linnaks

Tartu, mida saab taas põhjendada teistest linnadest kompaktsema ruumilise arenguga (ptk 1.1). Tallinna puhul tuvastatud väiksem kompaktsus oli seevastu laiali valgumisele kalduva kasvu tunnuseks. Kui Tartu kompaktsus püsis uurimisperioodi jooksul stabiilsena, siis Tallinn oli aastal 2007 natuke kompaktsem kui teistel aastatel. Siinkohal oli põhjuseks k_p arvutamise meetodika: kuna raadiuste parameetrid sõltusid parameetrist α , siis kaasnes suurema α väärtusega ka suurem kompaktsus. Sõltuvus α -st tuli veel enam esile Narva (1989. ja 2007. aasta) ja Pärnu (1989) puhul, kus eelnevalt mainitud (ptk 5.1.1) väiksed α väärtused põhjustasid väga kõrgeid k_p väärtusi, mis ületasid Jiao uuringus vaadeldud Hiina linnade maksimumväärtust (0,69). Seega tuleks k_p kasutamisel arvestada, et väga väikse tihedusega CBD korral ei ole võimalik kompaktsust adekvaatselt hinnata. Parameeter α väärtuse normaliseerumisel k_p taastus, kuid tulenevalt väiksest keskuse LAT-st oli Narva siiski teistest vähem kompaktsem.

Teise kompaktsuse indikaatori (k_s) puudusena oli välja toodud selle sõltuvust parameetrist D , mis võib põhjustada suuremate linnade näilist mittekompaktsust. Seetõttu oli Tallinn kogu uurimisperioodi jooksul teistest linnadest tunduvalt vähem kompaktsem. Indikaatorit k_s mõjutas parameeter α vähem kui k_p -d ning Narva ja Pärnu väärtused olid arvestatavad ka väikse α korral. Seega sobiks k_s ka väiksema tihedusega CBD-ga linnade kompaktsuse võrdlemiseks eeldusel, et linnad on sarnasest suurusklassist. Juhul, kui uuritavate linnade hulgas esineb teistest selgelt suuremaid linnu, peaks eelistama aga indikaatorit k_p , kuid sõltuvalt α väärtusest ei anna näitaja alati objektiivseid tulemusi.

Kuna valglinnastunud piirkonna üheks tunnuseks on loetud väikest LAT-d, siis on selle kasutamine valglinnastumise kvantifitseerimisel olnud üsna levinud (Tsai, 2005; Schwarz, 2010; Dovey & Pafka, 2014). Jiao (2015) pakkus valglinnastumise tuvastamiseks välja nn valglinnastumise taseme näitaja S_r , mis kujutas endast väikse tihedusega eeslinna ja tiheda keskuse raadiuste kasvu suhet, kusjuures ühest väiksem väärtus viitas uurimisperioodil kompaktsele kasvule ja ühest suurem laiali valgumisele. Käesolevas töös oli Tartu ainsaks linnaks, mille puhul tuvastati kalduvus valglinnastumisele (perioodil 1989–2007). Samas näitasid nii kompaktsuse indikaatorid kui peatükis 1.1 viidatud uuringud, et kuigi ka Tartus oli tagamaa ehitustegevus aktiivsem uurimisperioodi esimeses pooles, oli linnalise ala kasv teistes linnades vähem kompaktsem kui Tartus. Seetõttu oleks S_r võinud valglinnastumist näidata ka teiste linnade puhul. Indikaator S_r töötati välja Hiina oludes, kus 20. sajandi lõpu ja 21. sajandi alguse linnade kasvu iseloomustas väga kiire valglinnastumine, mistõttu

oli Jiao töös enamiku linnade puhul väiksema tihedusega eeslinna raadius kasvanud palju kiiremini kui CBD raadius. Eesti linnade keskuste LAT oli uurimisperioodi alguses Hiina linnadest väiksem ja keskuse LAT kasvu tagajärjel suurenes keskuse raadiuse parameeter üldjuhul (v.a Tartus) kiiremini kui eeslinna raadius. Sellise kasvudünaamika tulemusena olid aga S_r -i väärtused enamjaolt nullilähedased või negatiivsed.

Tulemuste põhjal saab seega järeldada, et S_r -i rakendamise edukus sõltub olulisel määral uuritava riigi või piirkonna linnade ruumilise kasvu eripärasustest ja seda ei saa kasutada universaalse valglinnastumise indikaatorina. Siiski sobiks valglinnastumise tuvastamiseks osaliselt mõned teised antud töös käsitletud näitajad ja parameetrid. Kuna valglinnastumist on vastandatud kompaktsuse ruumilise kasvuga (ptk 1.2.1), võiks vastavate näitajate muutus – k_p puhul suurenemine ja k_s -i korral vähenemine – tähendada linna kalduvust hajusale kasvule. Lisaks viitab valglinnastumisele osaliselt tagamaa piiri parameetri (D) kiire kasv uuritava perioodil, kuna see näitab väikse tihedusega eeslinna laienemist. Kuna suuremate linnade D väärtus on enamasti suurem kui väiksema pindalaga linnadel, tuleks siinkohal erinevate linnade võrdlemiseks kasvu väljendada protsentides.

5.2 Polütsentriline lahendus

Pärnu ja Tallinna LAT graafikute puhul täheldatud sekundaarsete keskuste mõju tõttu (ptk 4.1.1) viidi funktsiooni sobitamise ja indikaatorite tuletamise protsess antud linnades läbi ka polütsentrilise CBD-de asetuse korral. Sindi ja Maardu allkeskuste LAT oli tunduvalt väiksem kui Pärnus ja Tallinnas ning keskmistamise tulemusena vähenes mõlema linnalise ala keskuse LAT väärtus. See mõjutas omakorda kõigi funktsiooni parameetrite väärtusi ja näiteks parameeter α oli kõigil juhtudel tinglikust alampiirist ehk kahest väiksem. Linnade LAT langust iseloomustas eksponentsiaalne kõver, nagu sai eelnevalt täheldatud Narva ja Pärnu puhul ka monotsentrilise lahenduse korral. Väikse α väärtusega kaasnesid jällegi väga suured k_p väärtused, mistõttu ei saanud antud näitaja põhjal linnade kompaktsust hinnata. Indikaatorit k_s mõjutas α väärtus küll vähem, kuid nii Pärnu kui Tallinn olid LAT keskmistamise tagajärjel vähem kompaktsamad kui monotsentrilise lahenduse puhul. S_r -i väärtused olid taas negatiivsed või nullilähedased.

Tulemuste põhjal saab öelda, et antud juhul polütsentriline lahendus end ei õigustanud ja sekundaarsete keskuste lisamine probleemsete indikaatorite toimimist ei parandanud. Jiao

tõi oma uuringus (2015) polütsentrilise lahenduse näiteks linnastud, kus aja jooksul kokku kasvanud suuremate linnade tõttu ei olnud ärikeskuste asukohta võimalik üheselt määrata. Allkeskuste LAT oli seetõttu palju suurem kui Sindis või Maardus ning ei põhjustanud parameetrite ega indikaatorite tuletamisel antud töös täheldatud probleeme. Seega sõltub polütsentrilise lahenduse toimimine suuresti allkeskuste LAT-st. Käesoleva töö tulemuste põhjal tuleks Eesti oludes eelistada pigem siiski monotsentrilist CBD-de asetust.

Kokkuvõte

Linnade ruumilist kasvu käsitlevates uuringutes on olulisel kohal olnud erinevate tihedusel põhinevate indikaatorite kasutamine, kuna tiheduse analüüs on sageli üheks osaks linnade kasvu iseloomustamisel. 20. sajandi jooksul töötati välja mitmeid mudeleid, mis põhinesid ajalis-ruumilise kasvudünaamika kirjeldamisel linnade rahvastikutiheduse varieeruvusele. Mitme aasta tagant uuendatavad rahvaloenduse andmed ei võimalda aga alati objektiivselt hinnata tänapäeva linnade ruumilist kasvudünaamikat. Seega on rahvastikutihedus linnade kasvu kvantifitseerimise kontekstis asendunud satelliidipiltidelt tuletatud linnalise ala tihedusega (LAT). Sellegipoolest ei ole veel kujunenud välja ühtset meetodikat LAT määramise ja selle kaudu tuletatud linnade kasvu iseloomustavate näitajate valiku osas.

Käesoleva töö eesmärgiks oli rakendada Hiina linnade andmete põhjal tuletatud LAT funktsiooni Eesti linnade kontekstis, hinnata seeläbi funktsiooni kasutamise võimalikkust linnade ruumilise kasvu kvantifitseerimisel ja tuua esile selle piirangud ning nende võimalikud lahendused. Lähteandmetena kasutati Eesti nelja suurema linna kolme ajahetke (1989, 2007 ja 2015/16) maakasutuse rasterpilte. ArcPy tööriistade kombineerimise tulemusena loodi ArcGISi ModelBuilderi keskkonnas mudel, mille abil tuletati rastritelt LAT andmed, mis sobitati LAT funktsiooniga. Tuletatud parameetrid olid kompaktsuse ja valglinnastumise taseme näitajate sisendiks. Eesti linnade tiheduse analüüs tuvastas LAT sigmoidse langustrendi CBD-st kaugenemisel, mis näitab, et seaduspärasus ei sõltu linna suuruselt ja mudel võiks seega olla rakendatav ka väiksemate linnade puhul. Funktsiooni head kirjeldusvõimet kinnitas ka LAT ajalis-ruumiline käitumine, mis oli kooskõlas Eesti viimase kolmekümne aasta linnade kasvudünaamikaga. Kompaktsete linnade (Tartu) LAT langes CBD-st kaugenedes seejuures kiiremini kui hajusa ruumilise arenguga linnades (nt Tallinn).

LAT funktsioon töötati välja Hiinas, kus linnakeskused on enamasti tunduvalt tihedamad kui Eestis. Sellest tulenevalt mõjutas Eesti linnade väiksem LAT nii kompaktsuse kui ka valglinnastumise taseme indikaatorite toimimist. Tulemuste põhjal saab järeldada, et kuigi esimese töös vaadeldud kompaktsuse näitaja (k_p) eeliseks oli selle rakendatavus erineva suurusega linnade võrdlemisel, on selle alusel võimalik hinnata ainult piisavalt tiheda CBD-ga linnade kompaktsust. Võib eeldada, et kuna Narva ja Pärnu puhul uurimisperioodi

alguses täheldatud probleemid on iseloomulikud linnadele, kus klassikaline CBD puudub, siis on indikaator sellegipoolest kasutatav enamiku suuremate linnade puhul nii Euroopas kui mujal. Teine kompaktsuse indikaator (k_s) näitas stabiilseid tulemusi ka väikse LAT-ga linnades, kuid sõltus selgelt tagamaa piiri kaugusest linnakeskusest, põhjustades suuremate linnade näilist mittekompaktsust. Seetõttu on antud näitaja kasutamise eelduseks uuritavate linnade sarnane suurusklass ja indikaator võiks leida rakendust näiteks väikelinnade kasvu iseloomustamisel, kus k_p kasutamist takistab keskuse väike LAT.

Valglinnastumise taseme näitaja (S_r) välja töötamisel arvestati Hiina linnade ruumilise kasvu dünaamikaga, mida iseloomustas väikse tihedusega eeslinnade kiire laienemine viimastel kümnenditel. Eestis oli üldjuhul kiiremini kasvanud aga tihedam CBD, mistõttu andis indikaator enamasti nullilähedasi või negatiivseid väärtusi ja valglinnastumist sai objektiivselt hinnata vaid Tartu puhul. Seega saab järeldada, et S_r -i kasutamise edukus sõltub oluliselt uuritavate linnade kasvu eripärasustest ja seda ei saa kasutada universaalse valglinnastumise indikaatorina. Valglinnastumise iseloomustamiseks saaks töös vaadeldud näitajatest siiski osaliselt kasutada kompaktsuse indikaatoreid ja tagamaa piiri parameetrit. Seejuures näitaks nii kompaktsuse vähenemine kui tagamaa piiri kiire kasv kalduvust valglinnastumisele.

Kompaktsuse ja valglinnastumise taseme indikaatorite rakendamisel täheldatud probleemid tulid Pärnus ja Tallinnas esile ka polütsentrilise CBD-de asetuse korral, sest sekundaarsete keskuste lisamise tagajärjel vähenes kogu linnalise piirkonna LAT. Seega polütsentriline CBD-de asetuse antud juhul tulemusi ei parandanud ja Eesti kontekstis tuleks eelistada monotsentrilist varianti. Polütsentrilise lahenduse toimimiseks peaks uuritava linnalise ala sekundaarsete keskuste puhul olema selgelt eristatav suure tihedusega CBD, mis üldjuhul aga väiksemates linnades puudub. Polütsentrilise CBD-de asetuse rakendatavus avaldub seetõttu eelkõige linnastutes, kus ei ole aja jooksul kokku kasvanud linnade tõttu enam võimalik ühte selget keskust eristada.

Quantifying Urban Expansion In Estonia By Applying An Urban Land Density Function

Holger Virro

Summary

The use of various density-based indicators has played a key role in studying the expansion of cities, as density analysis is often used to describe the characteristics of urban growth. In the 20th century, several models based on the variability of urban population density were developed for describing the spatiotemporal growth dynamics of cities. However, census data updated every few years does not always allow for an objective assessment of the spatial dynamics of contemporary cities. Thus, urban land density (ULD) derived from satellite images has replaced population density in the context of urban growth quantification. However, a common methodology for defining the ULD and for the selection of urban growth indicators derived from it is yet to be developed.

The aim of this thesis was to apply the ULD function developed on the basis of the data of Chinese cities in the context of Estonian cities and thus assess the applicability of the function in quantifying the urban expansion of cities. Land use raster images of three time points (1989, 2007 and 2015/16) for four major Estonian cities were used as input data. ArcPy tools were used to create an ArcGIS ModelBuilder model that was used to extract the ULD data from the raster. The data was then fitted to the ULD function and the derived model parameters were used to calculate indicators for the compactness and the degree of urban sprawl of the cities. A sigmoidal decline of the ULD from the CBD outward was confirmed by the density analysis indicating that the rule does not depend on the size of the city and the model could be applied in the case of smaller cities. This was also confirmed by the spatiotemporal behavior of the ULD, which followed the urban growth dynamics previously described in Estonia. In compact cities, the decline of the ULD was faster than in cities characterized by dispersed urban growth.

The ULD function was developed in China, where the density in city centers is usually significantly higher than in Estonia. As a result, the lower ULD in Estonian cities affected the applicability of the compactness and urban sprawl indicators. The advantage of the first compactness indicator (k_p) was its applicability when comparing cities of different sizes;

however, it can only be used in the case of cities with sufficiently high ULD values. It can be assumed that, since the problems observed in Narva and Pärnu are characteristic of cities without clearly defined CBDs, the indicator is nonetheless applicable to most major cities in Europe and elsewhere.

The urban growth dynamics of Chinese cities characterized by the rapid expansion of low-density suburbs in recent decades were taken into account when developing the urban sprawl indicator S_r . In Estonia, however, the radius of the CBD has generally grown faster than the radius of the suburbs, which is why the indicator produced very low or negative values and could only be used to objectively evaluate urban sprawl in Tartu. Thus, it can be concluded that the applicability of S_r depends to a great extent on the growth dynamics of the cities and cannot be used as a universal indicator of urban sprawl. The compactness indicators and parameter D , however, could be partially used for the characterization of urban sprawl. In this case, both the reduction in compactness and the rapid growth of D would indicate a tendency towards sprawl.

Problems regarding the implementation of the compactness and urban sprawl indicators persisted in Pärnu and Tallinn when using the polycentric solution due to lower ULD values caused by the addition of secondary CBDs. Therefore, as the polycentric solution did not improve the results, the monocentric solution should be used in the context of Estonia. For the polycentric solution, the secondary centers of the study area should have clearly distinguishable, high-density CBDs, which in general, however, are not present in smaller cities. The applicability of the placement of polycentric CBDs is nonetheless evident in urban agglomerations where there is no longer possible to distinguish a single urban core.

Tänuavaldused

Kõigepealt soovin tänada oma juhendajat Jüri Roosaaret suurepärase koostöö ja igakülgse abi eest kogu magistr töö valmimise protsessi jooksul. Sisukate vestluste temaatika ulatus sageli geoinformaatikast kaugemale ja kasulikku nõu sain kõige muu hulgas ka haridustee ja karjääri planeerimise vallas.

Täna ka Piia Kirsimäed, kelle magistr tööst pärinesid käesolevas töös lähteandmetena kasutatud maakasutuse rasterpildid.

Lõpuks soovin tänada Tartu Ülikooli Sihtasutust, kes toetas minu õpinguid Tartu Raefondi stipendiumiga.

Allikad

Kasutatud kirjandus

Angel, S., Parent, J., and Civco, D. (2007). Urban Sprawl Metrics: An Analysis Of Global Urban Expansion Using GIS. 12.

Batty, M. (2008). The Size, Scale, and Shape of Cities. *Science* 319, 769–771.

Batty, M., and Kim, K.S. (1992). Form Follows Function: Reformulating Urban Population Density Functions. *Urban Stud.* 29, 1043–1069.

Batty, M., and Longley, M. (1994). *Fractal Cities - A Geometry of Form and Function*. Acad. Press Lond.

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 2–16.

Burghes, D.N., and Zielinski, C. (1979). Urban population density models. *Int. J. Math. Educ. Sci. Technol.* 10, 373–385.

C Seto, K., Güneralp, B., and Hutyrá, L. (2012). Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 16083–16088.

Chen, Y. (2009). A New Model of Urban Population Density Indicating Latent Fractal Structure. *Int. J. Urban Sustain. Dev.* 1, 89–110.

Chen, Y., and Feng, J. (2012). Fractal-based exponential distribution of urban density and self-affine fractal forms of cities. *Chaos Solitons Fractals* 45, 1404–1416.

Clark (1951). Urban Population Densities. *J. R. Stat. Soc.* 114, 490–496.

Clifton, K., Ewing, R., Knaap, G.J., and Song, Y. (2008). Quantitative analysis of urban form: A multidisciplinary review. *J. Urban.* 1, 17–45.

Dacey, M.F. (1971). SOME COMMENTS ON POPULATION DENSITY MODELS, TRACTABLE AND OTHERWISE. *Pap. Reg. Sci.* 27, 119–136.

Dovey, K., and Pafka, E. (2014). The urban density assemblage: Modelling multiple measures. *URBAN Des. Int.* 19, 66–76.

Frank, L.D., Sallis, J.F., Conway, T.L., Chapman, J.E., Saelens, B.E., and Bachman, W. (2006). Many Pathways from Land Use to Health: Associations between Neighborhood Walkability and Active Transportation, Body Mass Index, and Air Quality. *J. Am. Plann. Assoc.* 72, 75–87.

- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M.R., Wolman, H., Coleman, S., and Freihage, J. (2001). Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and measuring an elusive concept. *Hous. Policy Debate* 12, 681–717.
- Güneralp, B., Zhou, Y., Ürge-Vorsatz, D., Gupta, M., Yu, S., Patel, P.L., Fragkias, M., Li, X., and Seto, K.C. (2017). Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 8945–8950.
- Ideon, A. (2006). Eeslinnastumisest Tallinna linnastus. Magistritöö. Tartu Ülikool.
- Jauhiainen, J. (2005). Linnageograafia. Linnad ja linnaurimus modernismist postmodernismini (Urban geography. Cities and urban research from modernity to postmodernity).
- Jiao, L. (2015). Urban land density function: A new method to characterize urban expansion. *Landsc. Urban Plan.* 139, 26–39.
- Kirsimäe, P. (2017). Eesti nelja suurima linna maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine aastaks 2030. Magistritöö. Tartu Ülikool.
- Krehl, A., Siedentop, S., Taubenböck, H., and Wurm, M. (2016). A Comprehensive View on Urban Spatial Structure: Urban Density Patterns of German City Regions. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 5, n° 76.
- Lee, R. (1976). A Dynamic Feedback Approach to Modelling Spatial Population Density. *Environ. Plan. Econ. Space* 8, 753–766.
- McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proc. 9th Python Sci. Conf.* 51–56.
- Metspalu, P. (2005). Uuselamuehitus ja planeerimispraktika areng Harjumaa näitel. Magistritöö. Tartu Ülikool.
- Newling, B.E. (1969). The Spatial Variation of Urban Population Densities. *Geogr. Rev.* 59, 242–252.
- Oliphant, Travis E. (2006). *Guide to Numpy* (USA: Trelgol Publishing).
- Padrik, J. (2016). Tallinna elamufondi füüsiline regeneratsioon ja seosed sotsiaalsete muutustega naabruskondades. Magistritöö. Tartu Ülikool.
- Resch, E., Bohne, R.A., Kvamsdal, T., and Lohne, J. (2016). Impact of Urban Density and Building Height on Energy Use in Cities. *Energy Procedia* 96, 800–814.
- Roche Phillips, L. (2015). A comparative study of growth management effectiveness and urban sprawl in two thoroughbred landscapes in the U.S. *Appl. Geogr.* 65, 58–69.
- Roose, A., Kull, A., Gauk, M., and Tali, T. (2013). Land use policy shocks in the post-communist urban fringe: A case study of Estonia. *Land Use Policy* 30, 76–83.

- Samarüütel, A., Selvig, S.S., and Holt-Jensen, A. (2010). Urban sprawl and suburban development around Pärnu and Tallinn, Estonia. *Nor. Geogr. Tidsskr. - Nor. J. Geogr.* 64, 152–161.
- Schneider, A., and Woodcock, C. (2008). Compact, Dispersed, Fragmented, Extensive? A Comparison of Urban Growth in Twenty-five Global Cities Using Remotely Sensed Data, Pattern Metrics and Census Information. *Urban Stud.* 45, 659.
- Schwarz, N. (2010). Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landsc. Urban Plan.* 96, 29–47.
- Smeed, R.J. (1963). The road space required for traffic in towns. *Town Plan. Rev.* 33, 270–292.
- Seto, K.C., and Fragkias, M. (2005). Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landsc. Ecol.* 20, 871–888.
- Sherratt, G.G. (1960). A model for general urban growth. *Manag. Sci. Models Tech. Proc. Sixth Int. Meet. Inst. Manag. Sci. Conserv. Natl. Arts Métiers Paris 7 - 11 Sept. 1959* 2.
- Tammaru, T., Leetmaa, K., Silm, S., and Ahas, R. (2009). Temporal and Spatial Dynamics of the New Residential Areas around Tallinn. *Eur. Plan. Stud.* 17, 423–439.
- Tanner, J.C. (1961). *Factors Affecting the Amount of Travel* (H.M. Stationery Office).
- Tsai, Y.-H. (2005). Quantifying Urban Form: Compactness versus “Sprawl.” *Urban Stud.* 42, 141–161.
- United Nations, D. of E. and S.A. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*.
- Vahtra, J. (2014). Linna ruumiline geomeetria, funktsioonide kättesaadavus ja mitmekesisus - Tartu linna konfiguratsiooniline uuring. *Magistritöö. Eesti Maaülikool*.
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sens. Environ.* 117, 34–49.
- Wolman, H., Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M., Furdell, K., and Sarzynski, A. (2005). The Fundamental Challenge in Measuring Sprawl: Which Land Should Be Considered?*. *Prof. Geogr.* 57, 94–105.
- Xu, G., Jiao, L., Zhao, S., Yuan, M., Li, X., Han, Y., Zhang, B., and Dong, T. (2016). Examining the Impacts of Land Use on Air Quality from a Spatio-Temporal Perspective in Wuhan, China. *Atmosphere* 7, 62.
- Yu, X., Zhang, B., Li, Q., and Chen, J. (2016). A method characterizing urban expansion based on land cover map at 30 m resolution. *Sci. China Earth Sci.* 59, 1738–1744.
- Yuan, Y. (1999). A Review of Trust Region Algorithms for Optimization. *ICM99 Proc. Fourth Int. Congr. Ind. Appl. Math.*

Internetiallikad

Esri (2016a). Multiple Ring Buffer.

<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/tools/analysis-toolbox/multiple-ring-buffer.htm>.

Viimati vaadatud 18.03.2018.

Esri (2016b). Raster to Polygon.

<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon.htm>.

Viimati vaadatud 18.03.2018.

Esri (2016c). Clip. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/tools/analysis-toolbox/clip.htm>.

Viimati vaadatud 18.03.2018.

Esri (2016d). Tabulate Area. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/tools/spatial-analyst-toolbox/tabulate-area.htm>.

Viimati vaadatud 18.03.2018.

Geofabrik (2017). OpenStreetMap data for Estonia.

<http://download.geofabrik.de/europe/estonia.html>. Viimati vaadatud 09.03.2018.

Maa-amet (2017). Maa-ameti kaardiserver.

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Kaardiserver-p2.html>. Viimati vaadatud 09.03.2018.

SciPy (2017). `scipy.optimize.curve_fit` — SciPy v1.0.0 Reference Guide.

https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html. Viimati

vaadatud 21.03.2018.

Virro, H. (2018). MSc-thesis, GitHub repository. <https://github.com/hvirro/MSc-thesis>.

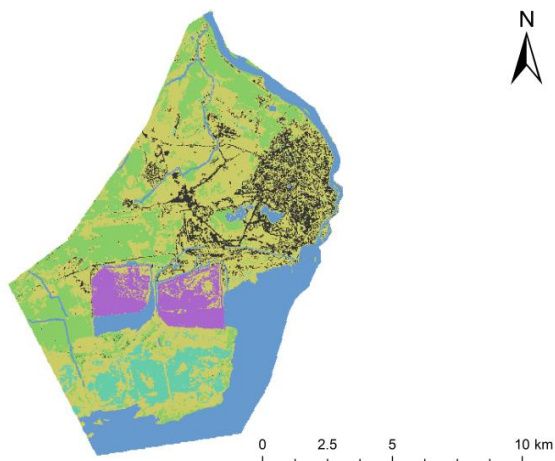
Viimati vaadatud 21.05.2018.

Lisad

Lisa 1. Narva maakasutuse rastrite aegrida.

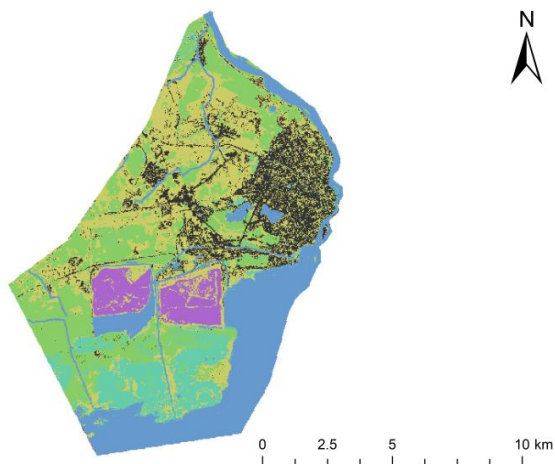
1989

Maakasutus
märgala
veekogu
linnaline ala
tehisala
metsamaa
põllu- ja rohumaa



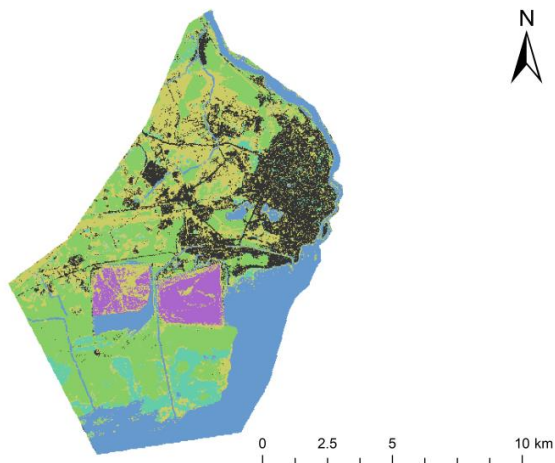
2007

Maakasutus
märgala
veekogu
linnaline ala
tehisala
metsamaa
põllu- ja rohumaa



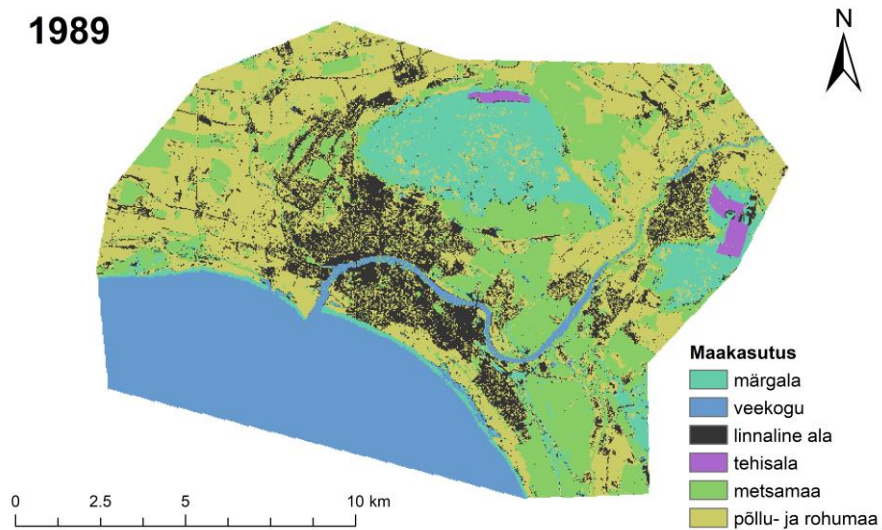
2015

Maakasutus
märgala
veekogu
linnaline ala
tehisala
metsamaa
põllu- ja rohumaa

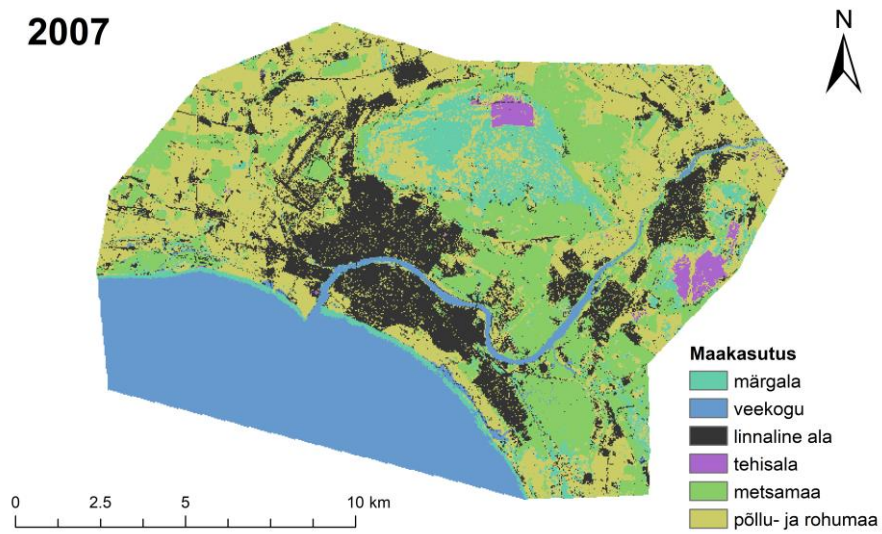


Lisa 2. Pärnu maakasutuse rastrite aegrida.

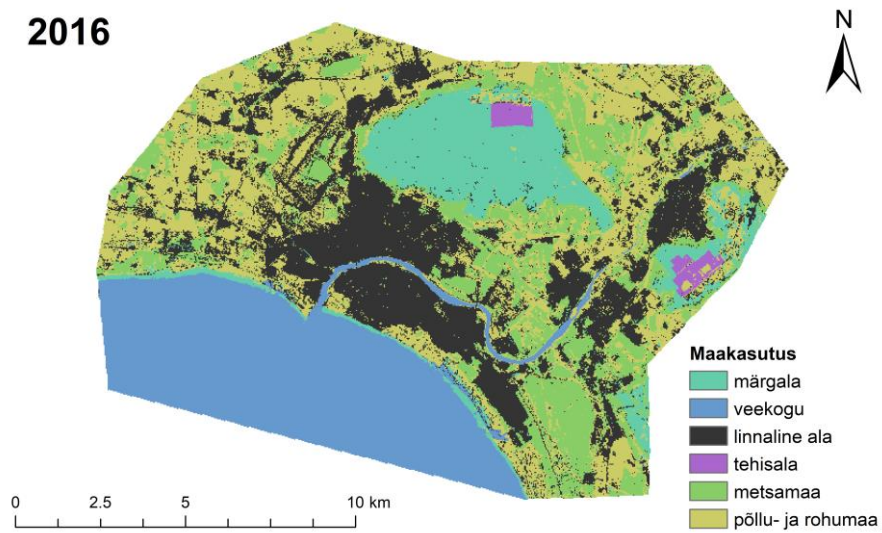
1989



2007

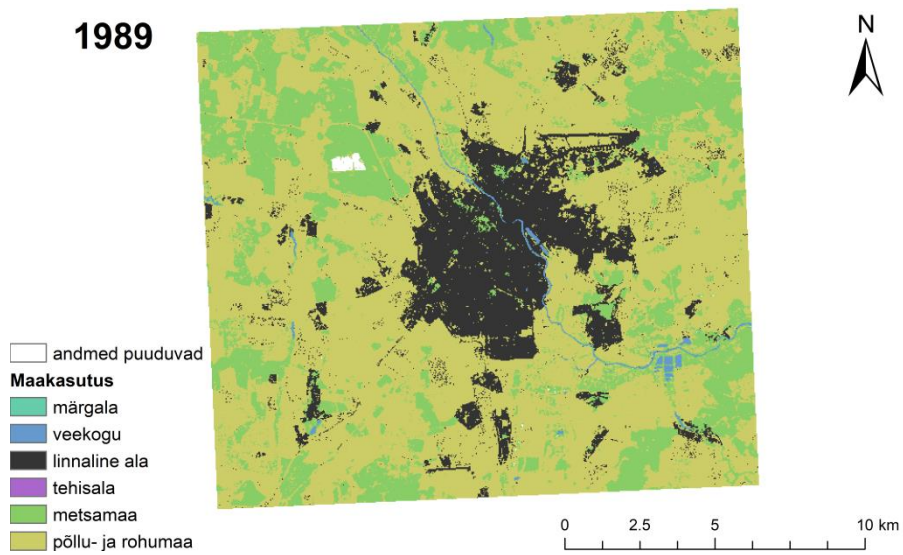


2016

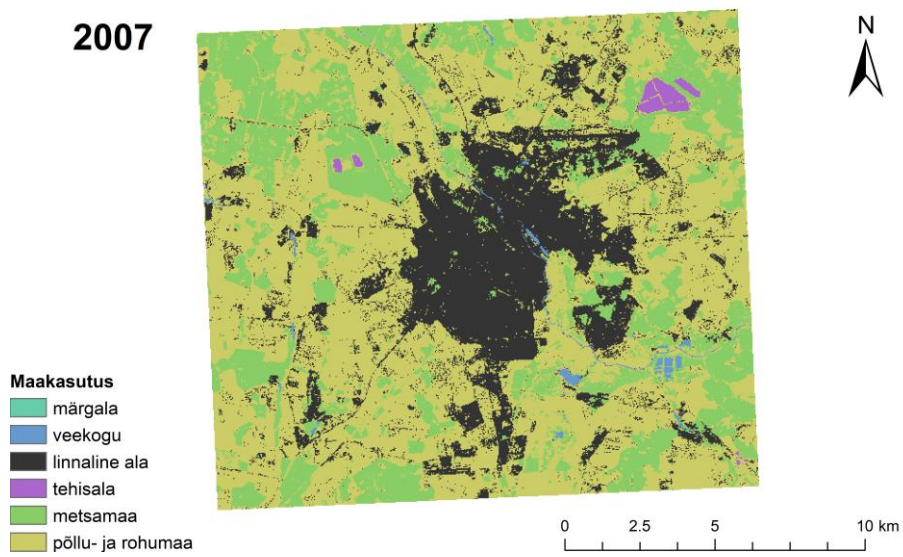


Lisa 3. Tartu maakasutuse rastrite aegrida.

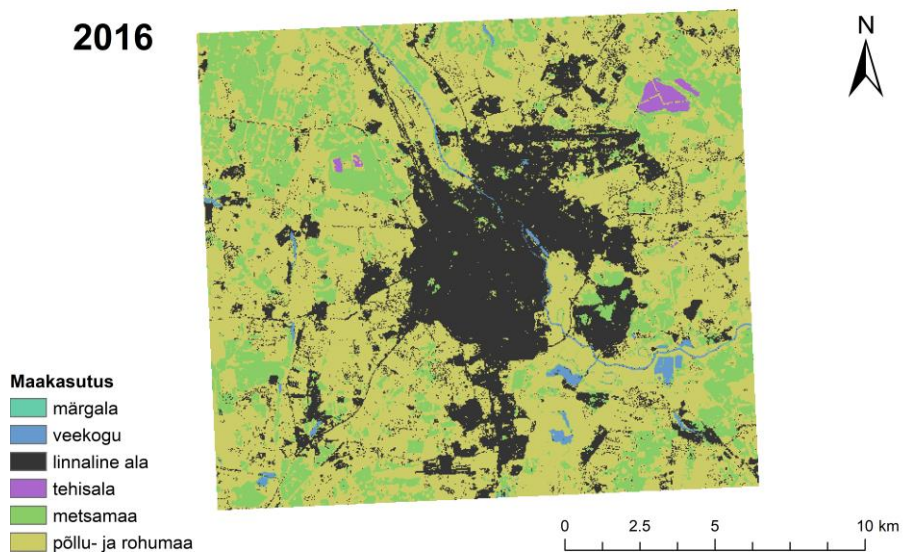
1989



2007

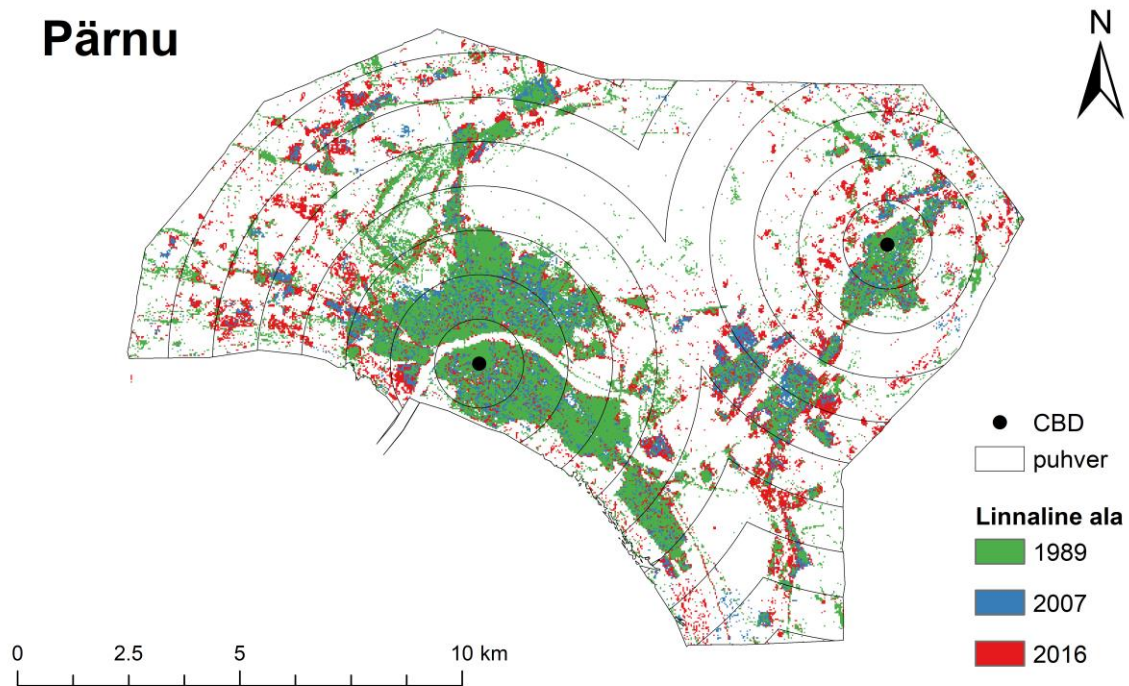


2016

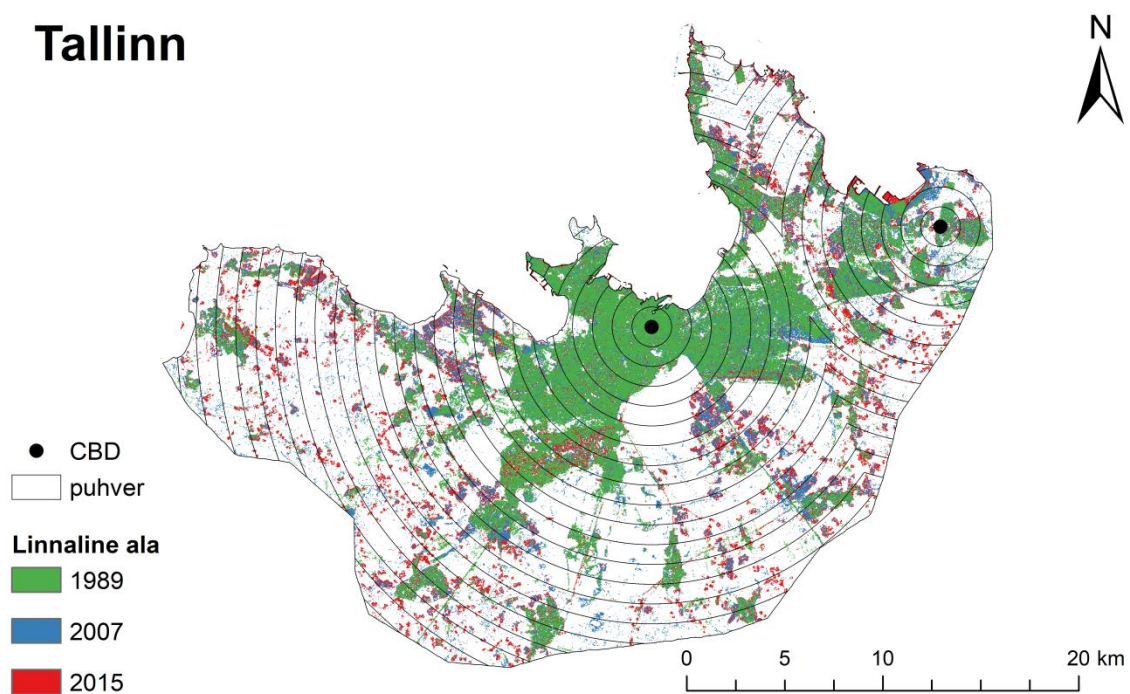


Lisa 4. Linnalise ala jagamine kontsentriliste puhvritega (polütsentriline variant).

Pärnu



Tallinn



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Holger Virro,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Eesti linnade kasvu kvantifitseerimine linnalise ala tiheduse funktsiooni näitel“,

mille juhendaja on Jüri Roosaare,

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **28.05.2018**