

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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Kohalike omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemine
ruumiliste optimeerimismeetoditega**

Andres Kasekamp

Juhendaja: PhD Raivo Aunap

Tartu 2021

Annotatsioon

Kohalike omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemine ruumiliste optimeerimismeetoditega

Haldusterritoriaalse reformi eesmärgiks on luua võimekamad kohalikud omavalitsused. Eestis viidi 2017. aastal läbi haldusreform, mis tugines peamiselt rahvaarvu miinimumkriteeriumile. Ekspertid on toonud välja ka teisi kriteeriume ja olulisi aspekte haldusreformi läbiviimiseks. Antud töö eesmärgiks on välja selgitada, milliseid omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemise lahendusi annavad etteantud kriteeriumite ja parameetrite põhjal territooriumi kujundamise tööriistad ning millised on algoritmilise lähenemise peamised eelised ja puudused. Territooriumi kujundamise tööriistad loovad lahendusi, mis tasakaalustavad elementaariüksuste muutujate tegevuse mõõduga seonduvaid kriteeriume ja arvestavad ruumiliste piirangutega. Töös on arutletud kriteeriumite seadmise üle ja kasutatud kolme GIS-tööriista ülesande lahendamiseks. Selgus, et kõige sobivamaid tulemusi annab geneetilisel algoritmil põhinev *Build Balanced Zones*, mille sisendparameetrid leiti koodi abil. Täiendavalt on kasutatud omavalitsussüsteemide analüüsimiseks sihifunktsiooni, mille muutujad põhinesid rändkaupmehe probleemi lahenduste ning kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega lõikumiste kirjeldaval statistikal.

Märksõnad: territooriumi kujundamine, omavalitsussüsteem, ruumiline optimeerimine, geneetiline algoritm, rändkaupmehe probleem

CERCS kood: P175 Informaatika, süsteemiteooria, S230 Sotsiaalne geograafia

Abstract

Delineation of local government units' administrative territory with spatial optimization methods

The objective of administrative-territorial reform is to create more efficient local governments. Administrative reform in Estonia took place in 2017 and was mainly based on minimum population criteria. Experts have proposed additional criteria and aspects to consider when carrying out an administrative reform. The purpose of this thesis was to find out how territory design tools delineate local government units based on specified criteria and parameters, and what are the main advantages and disadvantages of an algorithmic approach. Territory design tools find optimal solutions that balance criteria based on basic areal units' activity measure and spatial constraints. In this thesis, setting the criteria has been discussed and three GIS tools have been used to solve the problem. It was found that the most suitable results can be generated with Build Balanced Zones, which uses a genetic algorithm. The input parameters for the tool were found with a code. Additionally, an objective function was created to analyze the resulting local government systems. The function's variables were derived from traveling salesman problem solutions and intersections with parishes and suburban areas.

Key words: territory design, local government system, spatial optimization, genetic algorithm, travelling salesman problem

CERCS code: P175 Informatics, systems theory, S230 Social geography

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Teoreetiline ülevaade	7
1.1. Haldusterritoriaalne korraldus ja asustussüsteem	7
1.2. Haldusterritoriaalne reform.....	8
1.2.1. Haldusreformi käsitlus maailmas.....	8
1.2.2. Haldusreformid Eestis.....	9
1.3. Ruumiline optimeerimine	13
1.3.1. Territooriumi kujundamine	14
1.3.2. Geneetilised algoritmid.....	17
2. Andmed.....	20
3. Metoodika	25
3.1. Alusandmestiku töötlemine	25
3.1.1. Tõmbe- ja teenuskeskused	26
3.2. <i>Build Balanced Zones</i>	28
3.2.1. <i>Build Balanced Zones</i> optimaalsete parameetrite leidmine	33
3.3. <i>Territory Design</i>	35
3.4. AZTool.....	36
3.5. Kriteeriumite määramine	37
3.6. Lahenduste järelanalüüs.....	38
3.6.1. Rändkaupmehe probleem.....	39
3.6.2. Lõikumine kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega	40
4. Tulemused.....	42
4.1. <i>Build Balanced Zones</i>	42
4.1.1. Tavaline servakülgnevus.....	42
4.1.2. Modifitseeritud servakülgnevus.....	46
4.2. <i>Territory Design</i>	50
4.3. AZTool.....	52
5. Arutelu	54
5.1. Kriteeriumid.....	54
5.2. Tööriistade lahendused	57

6. Järeldused.....	60
Kokkuvõte.....	61
Summary.....	63
Tänuavaldused	65
Kasutatud kirjandus	66
Lisad.....	72

Sissejuhatus

Haldusterritoriaalseid reforme peetakse üheks kõige põhjalikumaks ja keerulisemaks viisiks omavalitsussüsteemi ümberkujundamisel (Ebinger, Kuhlmann ja Bogumil, 2019). Sellegipoolest on viimaste aastakümnete jooksul Euroopa riikides hoogustunud haldusterritoriaalsete reformide läbiviimine, et luua võimekamad kohalikud omavalitsused (edaspidi KOV) ja ühtlasem omavalitsussüsteem (Swianiewicz, Gendźwiłł ja Zardi, 2017). Sarnastele eesmärkidele toetudes viidi ka 2017. aastal Eestis läbi haldusreform, mille tulemusel vähenes KOV-de arv 213-lt 79-le (Rahandusministeeriumi..., 2019).

Paljude Majandusliku Koostöö ja Arengu Organisatsiooni (inglise keeles *OECD*) liikmesriikide regionaalpoliitika eesmärgiks on territoriaalse ühtsuse saavutamine, piirkondade jätkusuutlikkus ning keskuse ja tagamaa lõhestumise vähendamine, mida on võimalik saavutada tänu efektiivsema territoriaaljaotusega (OECD, 2010). Teaduskirjandust ja riikide haldusreformide analüüsidest selgus, et haldusterritoriaalse korralduse muutmisel pole üheski riigis kasutatud algoritmipõhist lähenemist. Drew (2020) leiab, et üheks haldusreformide ebaõnnestumise põhjuseks on see, et otsustajad võtavad aluseks subjektiivse hinnangu ja ei toetu piisavalt analüüsidele, et moodustada loogilised piirkonnad.

Haldusterritooriumi piiritlemine on geoinformaatikas võrreldav ruumilise optimeerimise teel territooriumi kujundamisega. Probleem on olemuselt mitme eesmärgiga ja keerukuselt NP-raske (*NP-hard*), mistõttu on selle lahendamisel sobilik kasutada GIS-tööriistu elementaarüksuste vaheliste ruumisuhete visualiseerimiseks ja modelleerimiseks. Viimastel aastatel on tänu arvutusvõimekuse kasvule lahendatud sellelaadseid probleeme väga edukalt heuristiliste otsingumeetodite abil, eelkõige geneetiliste algoritmidega (*genetic algorithms*) (Tong ja Murray, 2012). Käesolevas töös kasutatakse kolme heuristilisel otsinguvõtetal põhinevat tööriista: ArcGIS Pro tööriistad *Build Balanced Zones* ja *Territory Design* ning vabavaraline AZTool.

Haldusreformi kavade väljatöötamisel on läbi aegade pakutud välja erinevaid kriteeriume (Viks, 2018; Taluste, 2018; Kaldmäe, 2018), mis teeb tööriistade parameetrite seadmise ja kriteeriumite määramise keeruliseks. Ühtlasi toob Bennett (1997) välja, et ideaalset omavalitsust luua on raske, kuna teenuspiirkondi on keeruline klassifitseerida ja ühiskonnamuutused tingivad paratamatult omavalitsuste üle- või alapiiritlemise. Antud töö kriteeriumid põhinevad suures osas 2017. aasta haldusreformil, kohaliku omavalitsuse ülesannetel ja seisukohtadel omavalitsussüsteemist, mis on toodud välja haldusreformi kohta ilmunud artiklites. Sellest lähtuvalt arvestatakse rahvaarvuga, rahvaarvu prognoosidega, tõmbe- ja teenuskeskustega, gümnaasiumitega, ruumiliste piirangutega (kompaktsus ja külgnevus), teedevõrgustikuga, kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega. Territooriumi kujundamise algoritmid põhinevad ruumiliste piirangutega tsoonide moodustamisel ning süsteemisese ühtluse saavutamisel läbi elementaarüksuste tegevuse mõõdu (*activity measure*) sihtväärtuste tasakaalustamise, mis kattub küllaltki hästi haldusterritoriaalse reformi eesmärkidega.

Töö eesmärgiks on välja selgitada, milliseid omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemise lahendusi annavad etteantud kriteeriumite ja parameetrite põhjal territooriumi kujundamise

tööriistad ning millised on algoritmilise lähenemise peamised eelised ja puudused. Töö eesmärgi täitmiseks otsustati, et algoritmide otsinguruum peab olema võimalikult suur, mistõttu ei eemaldatud enne analüüsi praeguseid omavalitsusi, mis on juba kriteeriumid täitnud, ega rakendatud erandeid tulenevalt maakonnapiiridest, saarelisusest või kultuurilisest eripärast.

Eesmärgi täitmiseks on püstitatud järgnevad uurimisküsimused:

- 1) Kuidas määrata ja kohandada haldusreformi kriteeriume geoinfosüsteemis?
- 2) Milline tööriist on sobivaim kohalike omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemiseks?
- 3) Milliseid täiendavaid ruumilisi optimeerimismeetodeid on võimalik rakendada lahenduste analüüsimiseks?

Magistritöö ülesehitus on järgnev. Töö teoreetilises osas antakse ülevaade Eesti kohalikust omavalitsussüsteemist ja haldusreformi põhimõtetest. Kuna Eestis arvestati 2017. aasta haldusreformis välisriikide kogemusi (Viks, 2018), antakse haldusterritoriaalse reformi alapeatükis ülevaade ka haldusreformi protsessist mujal maailmas. Lõpetuseks vaadeldakse territooriumi kujundamist ruumiliste optimeerimismeetodite abil. Andmete peatükis kirjeldatakse territooriumi kujundamisel kasutatavaid elementaarüksusi ehk asustusüksusi ja muid alusandmeid. Metoodika osas antakse ülevaade alusandmestiku tötlusprotsessist ja kasutatud tööriistadest. Töös valitud elementaarüksustel puuduvad osad sobilikud atribuutandmed, mida saab kasutada tegevuse mõõduna, mistõttu pidi omavahel ühendama erineva geograafilise suurusega üksused. Kuna tööriistu pole varem kasutatud mitme eesmärgiga optimeerimisülesannete lahendamisel, kirjeldatakse esmalt nende parameetreid. Tulemuste osas tuuakse välja võimalikud omavalitsusüksuste piiritlemise teel tekkinud omavalitsussüsteemide lahendused ja nende kirjeldav statistika. Arutelus analüüsitakse kasutatud haldusreformi kriteeriumite ühildumist tööriistadega ja saadud lahendusi. Järelduste osas antakse vastused uurimisküsimustele.

1. Teoreetiline ülevaade

1.1. Haldusterritoriaalne korraldus ja asustussüsteem

Eestis kehtib ühetasandiline omavalitsussüsteem, mille korralduse õiguslik alus on sätestatud kohaliku omavalitsuse korralduse seadusega (1993) (edaspidi KOKS), Eesti territooriumi haldusjaotuse seadusega (1995) (edaspidi ETHS) ja haldusreformi seadusega (2016) (edaspidi HRS).

Kohalikul omavalitsusel on läbi aegade olnud oluline roll kohalike elanike elu kujundamisel. Mäeltsemees (2006a) on eristanud kolm kohaliku omavalitsuse tähendust:

- haldusterritoriaalne üksus;
- kohaliku omavalitsuse organ;
- kogukondliku elu korraldamise vorm.

Vallad kui omavalitsusüksused hakkasid Eestis välja kujunema 19. sajandil ning neid on ümber kujundanud mitmed reformid. Taasiseseisvunud Eesti kohaliku omavalitsuse süsteemi loomist mõjutasid 1939. aasta valdade piirid ning nõukogudeaegsed külanõukogud. Ajalooliselt on tähtsaks haldusüksuseks olnud ka kihelkonnad. Kuigi kihelkonnad kaotasid oma haldusõigused 1925. aastal, on nad tänapäevani säilinud rahva teadvuses ja näitavad kogukondade ühte kuuluvustunnet (Mäeltsemees, 2006b).

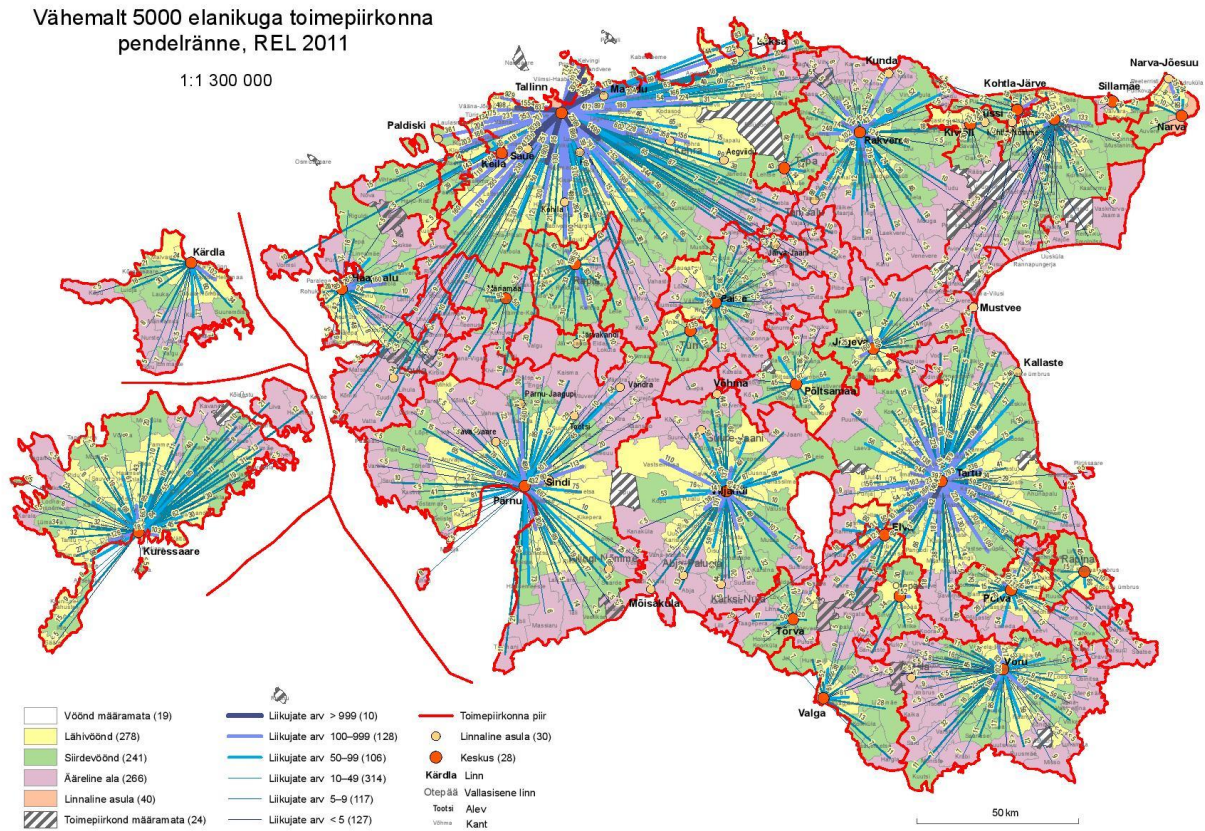
Eesti territooriumi haldusjaotus, haldusterritoriaalse korralduse muutmise ning haldusüksuste piiride ja nimede muutmise alused ja kord sätestatakse ETHS-s. Vastavalt ETHS § 2¹ lg 1 ja 2 on haldusterritoriaalne korraldus Eesti territooriumi jagunemine haldusjaotusel põhinevateks haldusüksusteks, kus korraldatakse riiklikku või omavalitsuslikku haldamist. Vald jaguneb asulateks ehk asustusüksusteks (külad, alevikud, alevid ja vallasisesed linnad), mis on arvestuse aluseks riiklikes toimingutes (ETHS, 1995).

Kohaliku omavalitsuse ülesanded, vastutus ja korraldus ning omavalitsusüksuste vahelised suhted on kindlaks määratud KOKS-iga. Püüasustusega väikesaarte erisused on sätestatud püüasustusega väikesaarte seaduses. KOV-i ülesandeks on näiteks korraldada omavalitsusüksuses ruumilist planeerimist, ühistransporti ning teede ja tänavate korrashoidu, kui need ülesanded ei ole antud kellegi teise täita. Omavalitsusüksus korraldab ka koolieelsete lasteasutuste, kohalike asutuste ja koolide ülalpidamist, kui need on omavalitsusüksuse omanduses (KOKS, 1993).

Eesti asustussüsteem on viimase 100 aasta jooksul püsinud hierarhilisena, kus selgete tõmbekeskustena saab eristada pealinna, regioonikeskuseid ning maakonnakeskuseid. Tõmbekeskuse tugevust näitab pendelrändajate arv ning tagamaa ulatus (Ahas, *et al.*, 2010). Viimase paari aastakümne jooksul on tõusnud lähitagamaa roll keskuskohtade ümber (Raagmaa, 2011). Joonisel 1 on välja toodud 2014. aasta Statistikaameti uuringus tuvastatud tõmbekeskused koos vähemalt 5000 elanikuga toimepiirkondadega.

Sarnaselt ülejäänud Euroopaga on Eestis alates taasiseseisvumisest süvenenud ääremaastumine, mis on lisaks väiksematele omavalitsustele mõjutanud ka maakonna- ja regioonikeskused. See on mõjutanud kogu riigi majanduslikku arengut ja avalike teenuste kättesaadavust (Plüske-Altöf *et al.*, 2020; Riigikontrolli aastaaruanne Riigikogule, 2020). Inimesed kolivad kodukohast mujale, kui teenused puuduvad piisaval sõidukaugusel (Raagmaa, 2011).

Perioodil 2010–2013 läbiviidud KOV-de võimekuse hindamine näitas, et ääremaaliste KOV-ide võimekus on keskuseliste KOV-idega võrreldes tunduvalt madalam (Noorkõiv ja Ristmäe, 2014).



Joonis 1. Toimepiirkonnad (Allikas: Siseministeerium, Statistikaamet, 2014).

1.2. Haldusterritoriaalne reform

1.2.1. Haldusreformi käsitlus maailmas

Haldusterritoriaalse korralduse muutmisel arutlevad poliitikud ja teadlased peamiselt selle üle, kas paremad on suure või väikese rahvaarvuga omavalitsused (Houlberg, 2010). Omavalitsuste liitmised on laiemalt levinud ja põhjalikumalt uuritud kui lagunemised. Suure omavalitsuse moodustamist põhjendatakse enamasti sellega, et omavalitsuste majanduslikud kulutused vähenevad, kergem on täita ülesandeid ja pakkuda avalikke teenuseid ning nende juhtimine on

professionaalsem. Ühtlasi sunnivad omavalitsusi ühendama demograafilised muutused ja asustusüksuste arengud. Lisaks rahvaarvule on mõned haldusreformid rõhutanud vajadust moodustada ka loogilised teenuspiirkonnad, mis arvestavad transpordivõrgustikuga (Swianiewicz *et al.*, 2017). Siiski on mitmed uurimused (Steiner ja Kaiser, 2017; Tavares, 2018; Allers ja Geertsema, 2016) leidnud, et kuigi suuremate omavalitsuste loomisel on mitmeid positiivseid mõjusid omavalitsussüsteemile, ei tasu neid ülehinnata, ning sageli on riikides jäänud soovitud tulemused saavutamata.

Samas leitakse, et suurte omavalitsustega võrreldes arvestatakse väiksemates KOV-ides rohkem kohaliku esindusdemokraatiaga (Tavares, 2018). Näiteks Voda ja Svačinová (2020) on välja toonud, et Tšehhi ühinenud omavalitsuste vallavolikogus on poliitilistel ja sotsiaalmajanduslikel keskustel parem esindatus kui väiksematel asulatel. Selline omavalitsussüsteem võib omakorda süvendada ebavõrdsust ja ääremaastumist. Väiksemaid KOV-e on kritiseeritud väitega, et neid on keerulisem juhtida (Ebinger, Kuhlmann ja Bogumil, 2019).

Bennetti (1997) sõnul saab ideaalseks omavalitsuseks pidada sellist, mille toimepiirkond kattub administratiivsete piiridega ja mis suudab kohaneda ühiskonnamuutustega. Selline üksus järgib ka Christalleri keskuskohtade teooriat. Teenuste tarbimisest tekkivaid toimepiirkondi ja kogukonnatunnet on aga raske piiritleda, mistõttu on selliste omavalitsuste loomine väga keeruline. Ühtlasi leiab Houlberg (2010), et omavalitsuse optimaalsele suurusele ja mastaabiefekti saavutamisele pole kindlat tõestust, kuna see oleneb vaadeldavatest kriteeriumitest ja valitsemissüsteemist. Samuti peaks haldusterritoriaalse reformiga käima kaasas omavalitsuste rahastamisreformid, ülesannete muutmine ja omavalitsuste vahelise koostöö suurendamine (Swianiewicz *et al.*, 2017).

Territoriaalpiiride muutmisel peaks arvestama ka kogukonna identiteediga, et omavalitsusel oleks kergem pakkuda inimestele vajaminevaid teenuseid. Majanduslikust vaatenurgast lähtudes peaks ühinevate haldusüksuste majanduslik võimekus olema võimalikult sarnane ning et nad kasutaksid sama tõmbekeskuse teenuseid (Drew, 2020). Näiteks kui ühendada omavalitsused, kus esimese ressursid on suunatud sotsiaalteenuste ja teisel teedevõrgu korrashoiule, võib tekkida omavalitsus, mis kulutab üleliia ressursse mõlema teenuse peale (Allers ja Geertsema, 2016).

1.2.2. Haldusreformid Eestis

ETHS-i järgi on haldusterritoriaalse korralduse muutmine uue haldusüksuse moodustamine või haldusüksuste arvu vähendamine. HRS-is on välja toodud haldusterritoriaalse korralduse muutmise viisid. Nendeks on kahe või enama KOV üksuse ühinemise tulemusel uue KOV üksuse moodustamine ning ühe KOV üksuse suurenemine selle liitumise teel ühe või mitme piirneva KOV üksusega.

Haldusterritoriaalse korralduse muutmisel arvestatakse järgnevaid asjaolusid:

- ajalooline põhjendus;
- mõju elanike elutingimustele;
- elanike ühtekuuluvustunne;

- mõju avalike teenuste osutamise kvaliteedile;
- mõju haldussuutlikkusele;
- mõju demograafilisele situatsioonile;
- mõju transpordi ja kommunikatsiooni korraldusele;
- mõju ettevõtluskeskkonnale;
- mõju hariduslikule olukorrale;
- omavalitsusüksute terviklikkus (ETHS, 1995).

Pärast taasiseseisvumist on Eestis välja töötatud mitmeid omavalitsusreformi kavasad ning soodustatud KOV-de ühinemist, et parandada haldussuutlikkust, haldusterritoriaalset jaotust ja majanduslikku potentsiaali. Haldusterritoriaalse jaotuse muutmise põhjenduseks on toodud näiteks valdade väiksus, ebaloogiline kuju ning vähene sisemine ühtsus. Varasemad kavad panid rõhku ka keskus-tagamaa terviklikkusele, mille aluseks olid nii ajaloolised kui ka praegused sotsiaal-majanduslikud ruumisuhed (Kaldmäe, 2018). Aastatel 1996-2014 vähenes ühinemiste tulemustel omavalitsuste arv 254-lt 213-le (Rahandusministeeriumi..., 2019).

2001. aastal kavandatud haldusreformi kriteeriumites on välja toodud, et omavalitsusüksus peab olema territoriaalselt terviklik ja tugevate sidemetega keskus-tagamaasüsteem. Muudatusi sooviti teostada lähtuvalt suurematest tõmbekeskustest või väiksemate keskuste kogumist ning omavalitsusi moodustada liitmise või territoriaalse ümberjagamise teel. Rahvaarvu miinimumkriteeriumiks toodi eelistatult 3500 ja 4500 elanikku, kui linnalähise valla elanikud on koondunud elama linna satelliitasulatesse (Siseministeerium, 2001).

2012. aastal loodi mitmeid mudeleid omavalitsussüsteemi reformimiseks, millest enim toetust sai niinimetatud tõmbekeskuste mudel. Selle alusel selgitati esmalt välja tõmbekeskused, millest lähtuvalt omavalitsused ühinevad. Selle tulemusel oleks pidanud moodustama umbes 30-50 omavalitsust, kus on enamasti vähemalt 10 000 elanikku. Veel toodi välja süsteemid, mille järgi oleks moodustatud 70-100 vähemalt 3000 elanikuga omavalitsust või 20-25 vähemalt 25 000 elanikuga omavalitsust, mille puhul oleks erand tehtud Hiiumaale. Mudelites mainiti ka vajadust kohandada omavalitsuste tööülesandeid, näiteks arendada piirkondlike ühistranspordikeskusi. (Viks, 2018)

2015. aastal leppis valitsus kokku kohaliku omavalitsuse reformi tegevuskavas, mis teostati 2017. aastal (Rahandusministeeriumi..., 2019). Eesmärgiks oli luua võimekamad omavalitsused, mis arendavad ühiskonnaelu, võimaldavad aegruumiliselt paremini kättesaadavaid avalikke teenuseid ning tagavad ühtlasema piirkondliku arengu. Nende eesmärkide täitmine pidi korrastama riigihaldust ning hoidma kokku kulusid (Haldusreformi seadus, 2016). Haldusreformi põhimõtete väljatöötamisel tugineti ekspertkomisjoni arvamusele, uuringutele, rahvusvaheliste organisatsioonide soovitudele ja Eesti lähiriikide kogemustele. Selle põhjal toodi peamiselt välja, et paljud omavalitsused ei suuda oma väiksuse tõttu täita kõiki neile antud ülesandeid (Taluste, 2018).

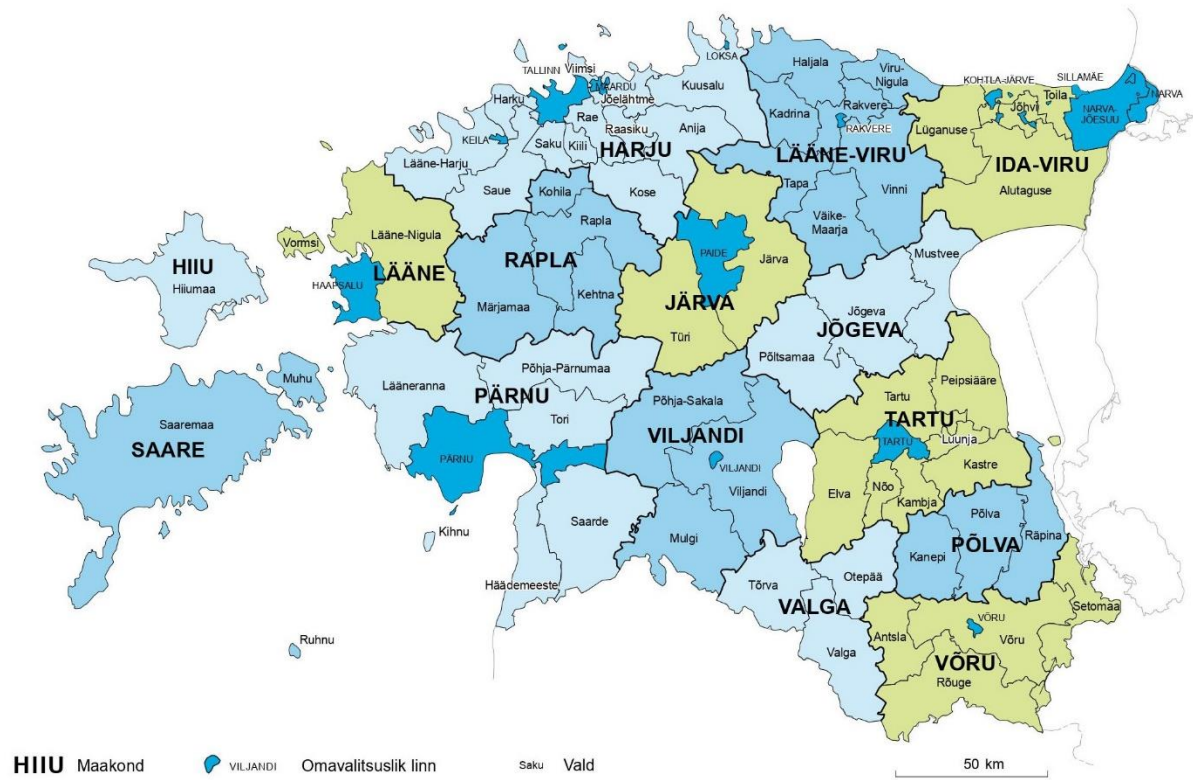
Ekspertkomisjon tõi välja, et kuigi pole olemas ideaalset KOV-i suurust ja üksused on erinevad, peaksid kriteeriumid olema objektiivselt hinnatavad. Ruumilisest aspektist tugineti vajadusele luua omavalitsussüsteem, mis moodustab loogilise terviku. Haldusterritoorium peaks olema ideaalselt

kooskõlas asustussüsteemiga, teenuskeskuste tagamaaga, igapäevase töö- ja õpirändega ning piirkonna kohaliku identiteediga. Sellegipoolest leiti, et mitmetele teenustele on raske seada areaalipõhist elanike arvu miinimumlävendit (Sepp ja Noorkõiv, 2018).

Miinimumkriteeriumi valikutena toodi välja 3500, 5000 ja 11 000 elaniku nõue. Soovitusliku suuruse kriteeriumiks oli KOV üksus, kus elab vähemalt 11 000 elanikku, mis põhines nõudel, et omavalitsusel peaks olema piisav suutlikkus kolme paralleeliga gümnaasiumi pidamiseks. Miinimumsuuruse kriteeriumiks valiti 5000 elanikuga omavalitsus, kuna see oli ekspertide hinnangul piisav ülesannete täitmiseks. Uuringute põhjal paranesid mastaabiefekti näitajad kuni 5000 elaniku suuruseni, pärast mida olid muutused väiksemad (Taluste, 2018; HRS, 2016). Kui KOV ei suutnud endale leida ühinemiskasutajat, rakendas valitsus sundliitmist, mille aluseks võeti omavalitsuse loogiline tõmbekeskus. Valitsusel oli õigus kriteeriumi täitmiseks viia ühe omavalitsuse territooriumiosa teise omavalitsuse koosseisu. Kriteeriumi täitmiseks kaaluti ka naabrite ühendamist aritmeetilise tehte abil (Taluste, 2018). Mikli (2018) arvates oleks võimekamad omavalitsused moodustunud optimaalse suuruse seadmisel. Nimelt võib 5000 inimest kanda demograafiliste ja majanduslike erinevuste tõttu ka erinevat tähendust omavalitsustes.

2017. aasta haldusreformi tulemusena vähenes KOV-ide arv 213-lt 79-le ning suurenes KOV-ide keskmine elanike arv ja keskmine omavalitsusüksuse pindala. Saarelisust tulenev erand tehti Kihnule, Ruhnule, Vormsile ja Muhumaale ning kultuurilise eripära erand Setomaale. Seetõttu pole Setomaal ka tervenisti ühist piiri, vaid Luhamaa nulk on lahusmaatükk. Haldusreformi tugevate külgedena on välja toodud lihtsa kriteeriumi seadmist, erandite võimaldamist ning osavaldade mudelit (Rahandusministeeriumi..., 2019). Haldusjaotus pärast haldusreformi on joonisel 2.

Teisest küljest on Raagmaa (2018) toonud välja, et haldusreform oleks võinud rohkem arvestada keskuste tugevusega, selle loogilise tagamaaga ning piirkonna kohaliku identiteediga. Ühtlasi toob ta välja, et haldusreformis seatud rahvaarvu miinimumkriteerium pole võimeline arvestama piisavalt funktsionaalsete toimepiirkondadega ega tuleviku arenguteedega. Sepp (2018b) toob välja, et on keeruline luua omavalitsussüsteemi, mis pöörab tähelepanu kõigile nõuetele. Kaldmäe (2018) sõnul oleks varasemate halduspoliitiliste teadmiste kasutamine aidanud omavalitsuse piiride loomisele kaasa. Samas on endised riigihalduse ministrid ka leidnud, et lähiaastate jooksul on raske anda hinnangut haldusreformile (Aas, Korb ja Aab, 2018).



Joonis 2. Eesti haldusjaotus pärast haldusreformi (Allikas: Valner, 2018).

1.3. Ruumiline optimeerimine

Ruumiline optimeerimine on optimeerimisülesande lahendamine ruumiliste omadustega muutujate, funktsioonide ja piirangute modelleerimisega geograafilises ruumis. Neid ülesandeid on objektide ruumilise komponendi tõttu raske matemaatiliselt modelleerida ning need on arvutuslikult aeganõudvad ja ressursikulukad. Ühtlasi esineb ülesannetes sageli korruga mitmeid kriteeriume ja võimalikke lahendusi. Seetõttu eelistatakse heuristilisi otsingumeetodeid täpsetele (Tong ja Murray, 2012).

Heuristilised meetodid võrdlevad iteratsioonide kaupa potentsiaalseid lahendusi ja üritavad võimalikult väikse ajaga selgitada välja optimaalseima lahenduse. Metaheuristika on kõrgem klass heuristilisi meetodeid, mis on sobilikud mitme eesmärgiga ja arvutuslikult keerulisemate probleemide lahendamiseks. Tuntuimateks algoritmideks on geneetiline algoritm, libalõõmutamine (*simulated annealing*) ja tabu otsing. Need algoritmid kasutavad lahenduse leidmiseks otsinguruumis iseõppimist ja juhuslikkust (Sörensen ja Glover, 2013). Metaheuristilisi meetodeid on viimase kahekümne aasta jooksul pidevalt edasi arendatud, et leida vastavalt suurenevale andmestikule ja arenevale arvutustehnikale ka sobivamaid lahendusi. Seejuures tegeletakse algoritmide kombineerimisega, parameetrite seadistamisega ja sisemiste struktuuride muutmisega, et vähendada töötulusaega ja vältida otsinguruumis lokaalsesse miinimumi kinni jäämist. (Dokeroglu *et al.*, 2019; Gibbs, Maier ja Dandy, 2011; De Falco, Della Cioppa ja Tarantino, 2002)

Ruumilise optimeerimisega on võimalik leida parim ressursside ruumiline jaotus ja mõista ruumilise mustri tähendusi, mistõttu on seda kasutatud erinevate probleemide lahendamisel transpordigeograafias, poliitigeograafias, maakasutuse planeerimisel ja ringkondade ümberkujundamisel. Paljud geograafia põhiteooriad põhinevad ruumilisel optimeerimisel, näiteks Christalleri keskuskohtade teooria (Tong ja Murray, 2012). Christalleri keskuskohtade teooria alusel koosneb süsteem kindla hierarhia ja paiknemisega asulatest ja tagamaast, mis tuleneb teenuste tarbimisest. Administratsiooni printsiibi järgi ($K=7$) katab suurem keskuskoht tervenisti väiksema asula. Teooria kasutab sirgjoonelisi kaugusi asulate vahel, mitte teedevõrgustikust tulenevaid kaugusi (Christaller, 1933, cit. Jauhiainen, 2005). Keskuskohtade teooriale tuginedes on Edgar Kant välja selgitanud Eesti keskuskohtade ja tagamaade võrgustiku ning rakendanud seda 1938. aasta omavalitsusreformis (Tammiksaar *et al.*, 2018).

Üks tuntumaid ruumilise optimeerimise ülesandeid on rändkaupmehe probleem, mis tähendab marsruudi loomist etteantud punktide vahel. Eesmärgiks on seejuures minimeerida läbitud distantsi või aega. Kuna tegemist on NP-raske probleemiga, lahendatakse seda enamasti metaheuristiliste võtetega (El-Sherneby, 2010). Rändkaupmehe probleemi lahendamiseks on rakendatud tabu otsingut (Li ja Alidaee, 2016). Selle otsingumeetodiga pannakse läbivaadatud lahendused keelu alla ja lokaalsest miinimumist väljasaamiseks valitakse olemasolevatest lahendustest välja parim.

1.3.1. Territooriumi kujundamine

Territooriumi kujundamine on väiksemate geograafiliste üksuste ehk elementaarüksuste (*basic areal unit*) grupeerimine suuremateks tsoonideks vastavalt etteantud kriteeriumitele. Kõige tuntumad territooriumi kujundamise probleemid on seotud valimisringkondade ja müügipiirkondade ümberkujundamisega, et luua ühtlasem ja tõhusam territoriaalsüsteem. Näiteks valimisringkondade moodustamisel üritatakse vähendada tahtlikku piiridega manipuleerimist ehk valijavalimist (*gerrymandering*) ning müügipiirkondade loomisel suurendada müügipotentsiaali. (Kalcsics, Nickel ja Schröder, 2005). Geneetilised algoritmid on üks enim levinud meetodeid territooriumi kujundamisel (Bacaó, Lobo ja Painho, 2005; Datta, *et al.* 2013; Biswas, *et al.*, 2020), kuid on rakendatud ka K-keskmiste klasterdamist (Moreno, Pereira, Yushimito, 2020 ja Tabu otsingut (Butsch, Kalcsics ja Laporte, 2014).

Territooriumi kujundamine on NP-raske, mille lahendamisel on mõistlik kasutada heuristilisi meetodeid (Biswas *et al.*, 2020; Altman, 1997). NP-rasked on algoritmiline keerukusklass ülesandeid, mis on raskemad kui ülesanded, mida saab lahendada Turingi masinaga mittedetermineeritud polünomiaalse ajaga (Altman, 1997). Eagleson, Escobar ja Williamson (2002) toovad välja, et geograafilise keskkonna piiritlemine administratiivsete tegevuste täideviimiseks on enamasti koordineerimata ning GIS-i kasutamine abistab seega piiride loomisel. Algoritmide abil administratiivpiiride ümberjaotamise meetodeid saab jagada kaheks: olemasolevate piirkondade ümberjaotamine ja väiksemate administratiivüksuste agregeerimine. Agregeerimine on GIS-iga kergesti teostatav, kuna administratiivüksused põhinevad enamasti ruumilisel hierarhial, kus suurema järguga haldusüksused on moodustatud madalama järguga üksustest. Samas sõltub algoritmide efektiivsus ka sellest, kuivõrd hästi suudetakse probleemi modelleerida ehk valida elementaarüksused ja sõnastada kriteeriumid (Cockings, *et al.*, 2011). Territooriumi kujundamisel puudub erinevatelt teistest optimeerimisülesannetest kindel matemaatiline mudel, mis teeb kriteeriumite määramise keeruliseks (Kalcsics ja Rios-Mercado, 2019).

Elementaarüksused on enamasti vallad, posti sihtnumbrid või rahvaloendusüksused, mis määratakse tavaliselt vaid ühte tsooni ja mis on esindatud GIS-is polügonidena. Iga üksusega kaasnevad atribuudid, mida kutsutakse tegevuse mõõduks, nagu näiteks rahvaarv või müügipotentsiaal (Kalcsics ja Rios-Mercado, 2019).

Väärtuste määramisel kriteeriumitele eristatakse rangeid ja nõrku piiranguid. Rangeid piiranguid peab algoritm kindlasti täitma, kuid nõrku piiranguid arvestab algoritm soovitusliku sihtväärtusena (Butsch *et al.*, 2014). Nõrkadeks piiranguteks on enamasti tegevuse mõõdu võrdsus (valemis 1 on välja toodud rahvaarvu võrdsuse sihifunktsioon) ja kompaktsus. Kompaktsuse arvutamiseks on mitmeid meetodeid, kuid enamasti on eesmärgiks lähendada tsooni võimalikult palju ringile (valem 2 ja joonis 3), tänu millele on võimalik vähendada ka sõiduaegu tsoonides (Bacaó, *et al.*, 2005; Kalcsics, *et al.*, 2005). Müügipiirkondade kujundamisel on levinud teedevõrgustiku sõiduaegadega arvestamine (Moreno, Pereira ja Yushimito, 2020). Lisaks on kriteeriumitena kasutatud ka topograafilisi barjääre (Eagleson, *et al.*, 2002), kattumist teiste administratiivüksustega, sotsiaalmajanduslike näitajaid ja tsooni suurust (Datta *et al.*, 2013).

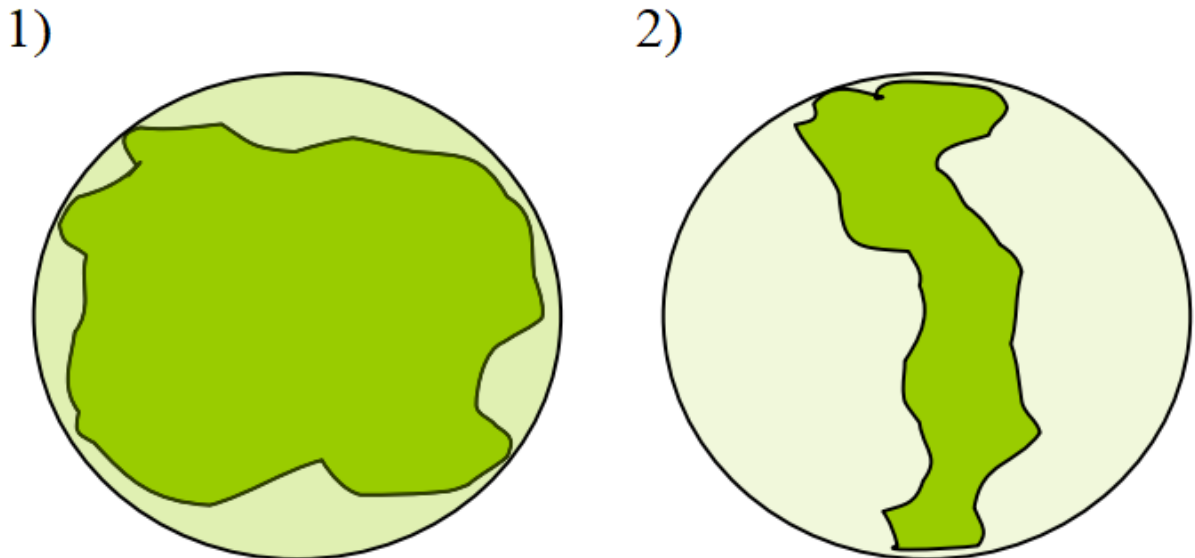
Kriteeriumitele, millele on seatud nõrk piirang, võib anda ülesandes erineva kaalu, mis määrab, kui võrd arvestatakse algoritmis etteantud muutujaga (Bacao, *et al.*, 2005; Kalcsics, *et al.*, 2005).

$$\min \sum_j |P_j - \mu|, \quad (1)$$

kus P_j on rahvaarv j -ndas tsoonis ja μ on keskmine rahvaarv tsoonides (Bacao, *et al.*, 2005).

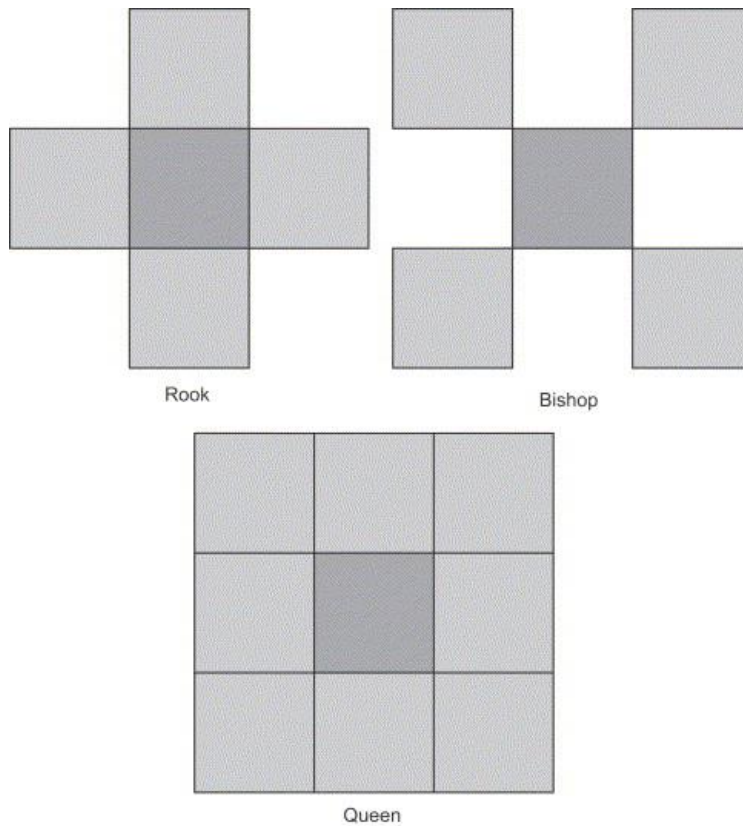
$$\text{Kompaktsus} = \sum_j \sum_{i \in Z_j} d_{ij}, \quad (2)$$

kus d_{ij} on eukleidiline distant i -nda elementaariüksuse ja j -nda tsooni keskkoha vahel (Bacao, *et al.*, 2005). Autorid on nimetanud seda „radiaalseks kompaktsuseks“.

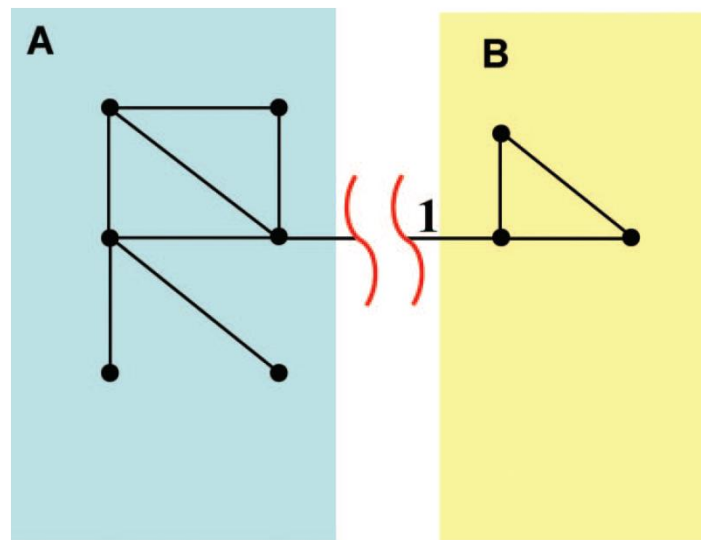


Joonis 3. Kõrge kompaktsusega tsoon (vasakul) ja madala kompaktsusega tsoon (paremal) (Allikas: Datta *et al.*, 2013).

Külgnvussuhted defineeritakse graafi abil $G = (V, E)$, kus elementaariüksused on tipud V (*node*), mida ühendavad kaared E (*edge*) (Biswas, *et al.*, 2020). Külgnvus näitab, kus jagavad elementaariüksused omavahel serva või nurka, mis antakse edasi tõeväärtusega. Selle põhjal eristatakse servakülgnvust, tipukülgnvust ning servaga ja tipuga külgnvust (joonis 4). (Grubestic, 2008). Külgnvussuhe on alati range piirang, mille defineerimine aitab vältida lahustükke tsoonides ja parandab algoritmi otsingu kiirust (joonis 4) (Tony ja Murray, 2012; Biswas, *et al.*, 2020).



Joonis 4. Külgnevuse tüübid. Servakülgnevuse (*rook*) puhul jagavad üksused ainult ühiseid servasid, tipukülgnevuse (*bishop*) puhul vaid ühiseid nurkasid, serva ja tipuga külgnevuse (*queen*) korral jagavad üksused nii ühiseid servasid kui nurkasid (Allikas: Grubestic, 2008).



Joonis 5. Külgnevus tsoonide A ja B vahel. Kui kaar (tähistatuna „1“) eemaldatakse, kaob ära tippude ühendus tsoonides A ja B (Allikas: Tong ja Murray, 2012).

Statistikaameti 2014. aasta uuring on loonud keskus-tagamaasüsteemil põhinevad toimepiirkonnad (joonis 1). Keskusteks on linnalised asulad, mis omavad suurt tööjõupotentsiaali ning kus on kättesaadavad avalikud teenused ja haridusasutus. Tagamaaks on kandidid, kust toimub tööranne keskusesse. Toimepiirkondade moodustamisel ei seatud takistuseks administratiivpiiride ületamist, küll aga pidid toimepiirkonnad olema territoriaalsed tervikud, mis tähendab, et seal ei tohtinud olla lahustükke. Lahustükkide eemaldamiseks rakendati mitmesuguseid kriteeriume, näiteks kandi tööranne voogude osatähtsuse ja administratiivse kuuluvuse vaatamine ning eritähistuste rakendamine. Lisaks on toimepiirkondadele seatud rahvaarvu kriteeriumid, moodustades süsteemid, mille üksustes on vähemalt 5000 ja 10 000 elanikku. Seejuures on võimalikke ühendamisi uuritud juhtumipõhiselt ja ruumilise kontekstiga arvestades. Bruno *et al.* (2017) on loonud matemaatilised mudelid Itaalia NUTS 3 territoriaalsüsteemi parandamiseks. Optimeerimise kriteeriumiteks võeti piirkondade minimaalne suurus ja rahvaarv, keskuslinna olemasolu, kompaktsus ja külgnevus. Seejuures arvestati külgnevust järelanalüüsis. Tulemustest selgus, et kõige paremaid tulemusi annab mudel, mille elementaarüksused on väiksed ja mis leiab ise optimaalseima lahenduse otsinguruumis, mitte ei lähtu valitsuse seatud territoriaalsetest piirangutest.

1.3.2. Geneetilised algoritmid

Geneetiline algoritm (GA) on populatsioonipõhine otsingumeetod, mis kuulub evolutsiooniliste algoritmide perekonda. GA leiab sobiva lahenduse otsinguruumis katse- ja eksitusmeetodil ning selle sisemisi protseduure ja parameetreid saab võrrelda loodusliku valikuga. GA-d on kasutatud paljudes teadusvaldkondades uurimisprobleemide lahendamisel (Eiben ja Smith, 2015).

Algoritmi otsinguruum koosneb kandidaatlahendustest (indiviididest) ehk populatsioonist. GA algab algpopulatsiooni suuruse ja iteratsioonide arvu (generatsioonide) määramisega, mis oleneb etteantud probleemi eeldatavast keerukusest ja sobivast lahenduse täpsusest. Kuigi suurema algpopulatsiooni ja generatsioonide arvu valik aitab leida tõenäolisemalt paremaid lahendusi, muudab see ka otsinguaja tunduvalt pikemaks (Gibbs, *et al.*, 2011). Sobiva parameetrite kombinatsiooni leidmine, mis optimeerib nii otsinguaega kui ka tulemust, on keeruline ülesanne. Kucukkoc, Karaoglan ja Yaman (2013) on GA optimaalse parameetrite kombinatsiooni tuvastamisel kasutanud tasandeid, kus koodiga tõsteti generatsioonide arvu suuremate ja algpopulatsiooni väiksemate sammudega.

Iga lahendus omab unikaalses kombinatsioonis parameetreid ehk „fenotüüpilisi“ tunnuseid, mis näitavad tema suhet ümbritseva otsinguruumiga ja on kodeeritud ta „genotüüpi“ binaarkoodina. Iteratsioonisammu käigus valitakse kaks või enam lahendust ehk vanemat, mille „genotüüpide“ juhuslik rekombineerimine loob uued lahendused ehk järglased. Rekombineerimine vanemate vahel toimub iteratsioonisammul paralleelselt. Vanemate valik sõltub varasemalt paika pandud sobivusfunktsioonist, mis näitab, kui hästi täidab lahendus optimeerimisülesande kriteeriumeid. Loodud järglasi hinnatakse enne järgmist iteratsiooni samuti sobivusfunktsiooniga ning selle põhjal luuakse uus populatsioon ehk põlvkond, mis koosneb vanematest ja järglastest, kuid mille arv ei ületa algset populatsiooni. GA pseudokood on toodud välja algoritmis 1 ning järglaste loomine joonisel 6 (Eiben ja Smith, 2015).

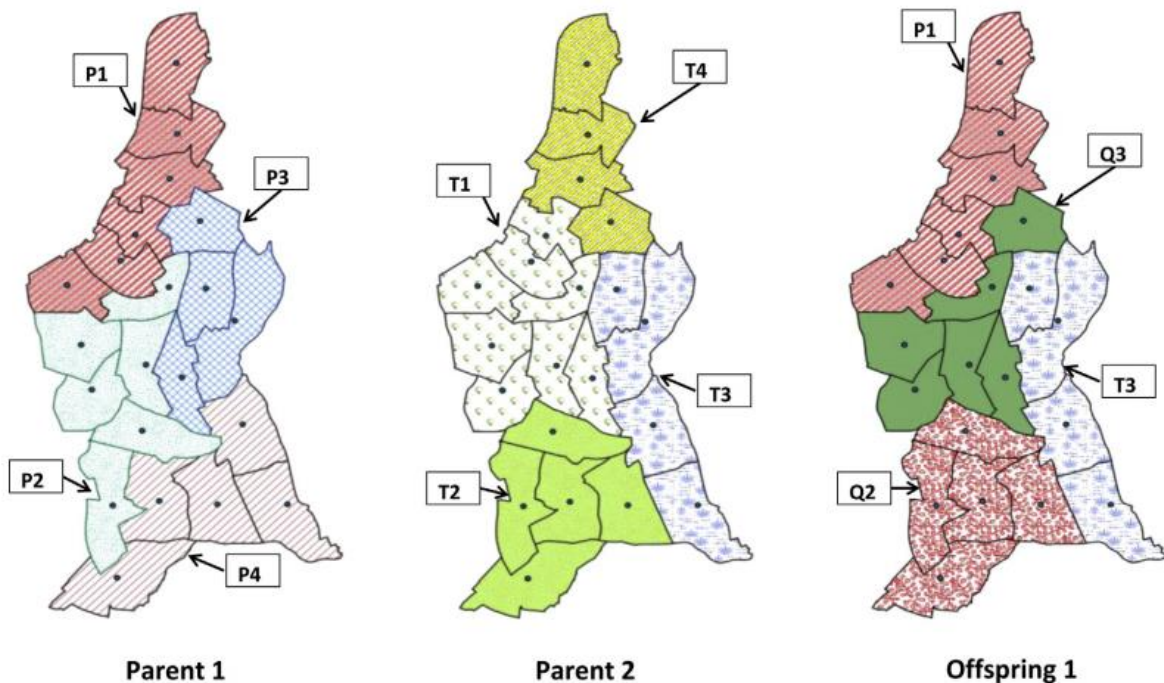
Algoritm 1. Geneetilise algoritmi pseudokood (kohandatud Eiben ja Smith, 2015 järgi).

LOO algpopulatsioon juhuslike potentsiaalsete lahendustega

HINDA iga lahendust

KORDA KUNI lõpetamistingimus on täidetud:

- 1) VALI vanemad
 - 2) REKOMBINEERI vanemate paare
 - 3) MUTEERI loodud järglasi
 - 4) HINDA uusi lahendusi
 - 5) VALI lahendused järgmiseks generatsiooniks
-



Joonis 6. Elementaarüksuste (*parent*) ristumine järglase (*offspring*) kujundamisel (Allikas: Datta, *et al.*, 2013).

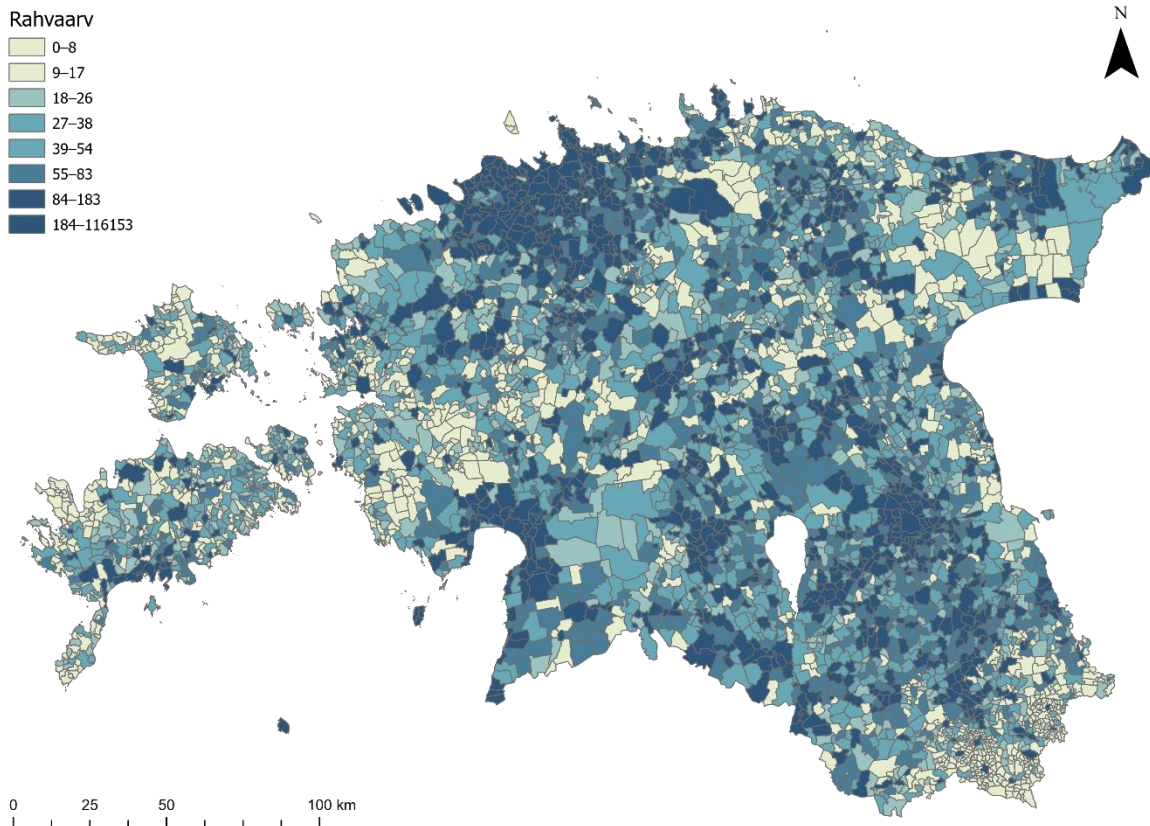
Sarnaselt teiste heuristiliste meetoditega on GA probleemiks lokaalsesse miinimumi kinni jäämine, mille vältimiseks rakendatakse lahenduste mitmekesistamist. Näiteks, ehkki lahenduste valikul eelistatakse parima sobivusskooriga lahendusi, kaasatakse valikusse ka madalama sobivusega lahendused, millel võib olla häid „fenotüüpilisi“ tunnuseid. Ühtlasi rakendatakse lahendustele juhuslikult muteerumist, mis tähendab väikseid muutusi lahenduse „genotüübis“ (Eiben ja Smith, 2015).

Mutatsioonimäärade valik sõltub suuresti uurimisülesandest, kuid tavaliselt hoitakse see võimalikult madal. Nimelt võib kõrge mutatsioonimäär küll aidata kiiremini jõuda lokaalse miinimumini madala generatsioonide arvu ja algpopulatsiooni korral, kuid globaalse miinimumi leidmisel on see ebaefektiivsem (De Falco, *et al.*, 2002).

Algoritmi lõpetamise tingimuseks on enamasti maksimaalne generatsioonide arv (Datta, *et al.*, 2013), arvutusaeg või kui lahenduse sobivus ei parane teatud aja või generatsioonide arvu jooksul (Eiben ja Smith, 2015).

2. Andmed

Antud töös moodustatakse kohalikud omavalitsused asustusüksuste baasil (joonis 7). Andmed pärinevad Statistikaameti kaardirakendusest SHP-failina ning vastavad 1. jaanuari 2020 seisule. Inimeste elukohaallikaks on andmetes märgitud rahvastikuregistrijärgne elukoht. Kokku on kaardil 4712 üksust, millest 284-l puudub väärtus, kuna konfidentsiaalsuse tõttu on elanike arv vahemikus 0–3 asendatud „<4“-ga.



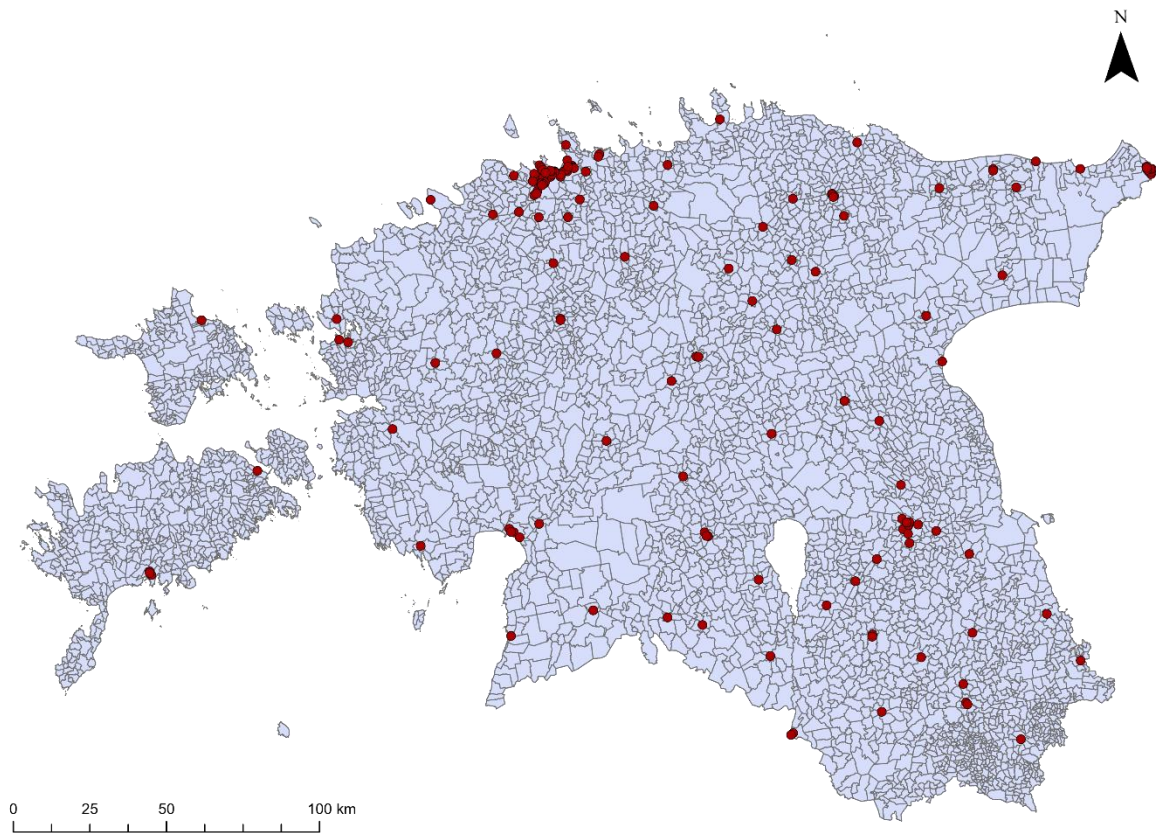
Joonis 7. Rahvaarv asustusüksustes seisuga 1. jaanuar 2020 (Allikas: Statistikaamet, 2020).

Antud töös kasutatakse rahvastikuprognose aastate 2030 ja 2045 kohta, mis on avaldatud maakondade lõikes (tabel 1). 2019. aasta Statistikaameti rahvastikupronoosi kohaselt kaheneb Eesti rahvaarv 2045. aastaks 2,7% võrra. Maakondade lõikes kasvab rahvaarv vaid Harju- ja Tartumaal, ülejäänutes on märgata kahanemistrendi.

Tabel 1. Rahvastikuproгноosid maakondade lõikes aastatel 2030 ja 2045 (Allikas: Statistikaamet, 2019).

Maakond	Rahvaarv 2019	Rahvaarv 2030	2019– 2030 muutus, %	Rahvaarv 2045	2019– 2045 muutus, %
Harjumaa (ilma Tallinnata)	164390	191692	16,61	225450	37,14
Hiumaa	9387	8913	-5,05	7682	-18,16
Ida-Virumaa	136472	115438	-15,41	86734	-36,45
Jõgevamaa	28734	24770	-13,8	19300	-32,83
Järvamaa	30286	25979	-14,22	20021	-33,89
Läänemaa	20507	18308	-10,72	14896	-27,36
Lääne-Virumaa	59325	52442	-11,6	42515	-28,34
Põlvamaa	25006	22027	-11,91	17939	-28,26
Pärnumaa	85938	80681	-6,12	72708	-15,39
Raplamaa	33311	31336	-5,93	27091	-18,67
Saaremaa	33108	31170	-5,85	27532	-16,84
Tartumaa	153271	156229	1,93	160790	4,91
Valgamaa	28370	24163	-14,83	18889	-33,42
Viljandimaa	46371	41258	-11,03	33706	-27,31
Võrumaa	35782	32093	-10,31	26822	-25,04

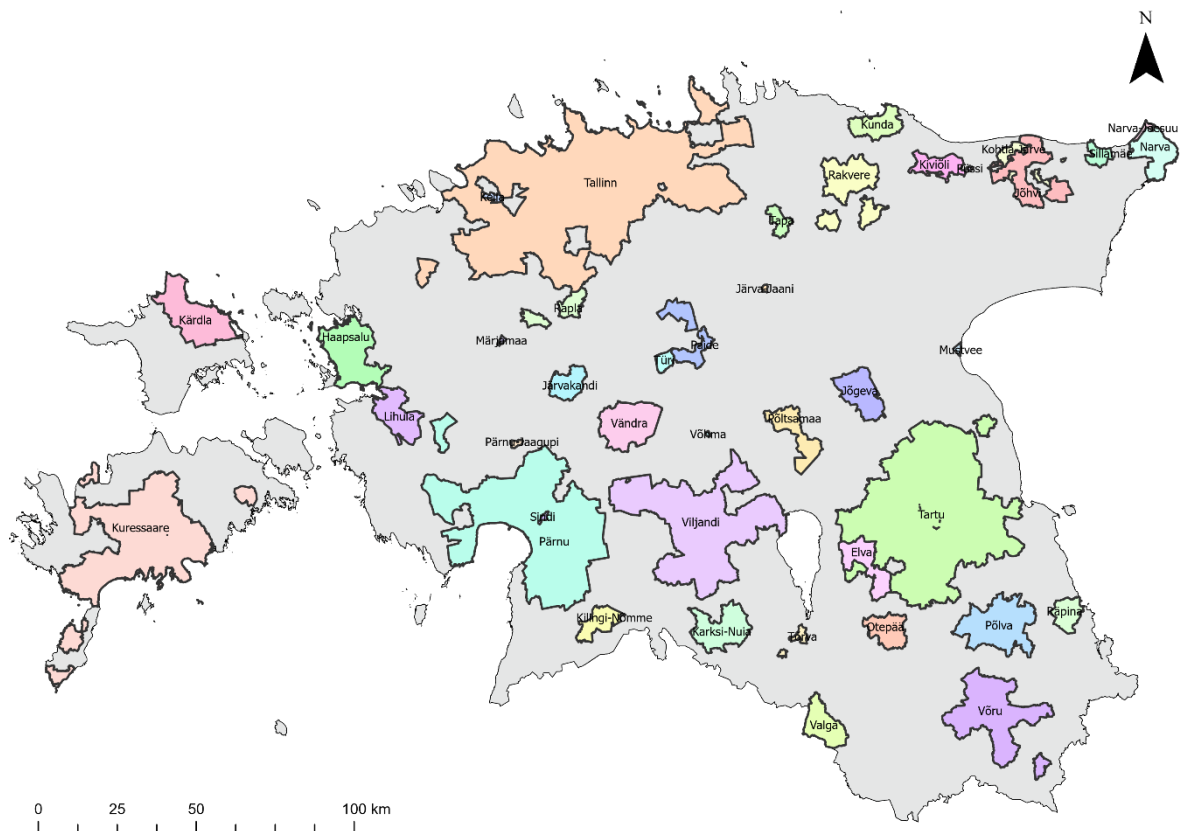
Gümnaasiumite andmestik pärineb Eesti Hariduse Infosüsteemi (EHIS) õppeasutuste päringust, kust laeti alla gümnaasiumite aadresse sisaldav CSV-fail. Pärast andmevormingu korrastamist kasutati Maa-ameti massgeokodeerimise teenust, et luua gümnaasiumite punktobjektid (joonis 8).



Joonis 8. Gümnaasiumid (märgitud punaste punktidenä) (Allikas: Eesti Hariduse Infosüsteem, 2020).

Töös kasutatud teenuskeskused pärinevad Sepp *et al.* (2015) analüüsist, milles on välja toodud hierarhiatasemel 1–4 keskused igas maakonnas. Selle koostamisel analüüsiti maakonnaplaneeringuid, iga kandi teenuseid ja nende kättesaadavust sõidukauguste põhjal ning ka maakonna rahvastikuprognosi jätkusuutlikkuse väljaselgitamiseks. Näiteks on 4. tasandi keskusel olemas regionaalsed teenused, nagu riigigümnaasium ja võistlusstaadion, kuid 1. tasandi keskusel on vaid algkool ja vaba aja keskus.

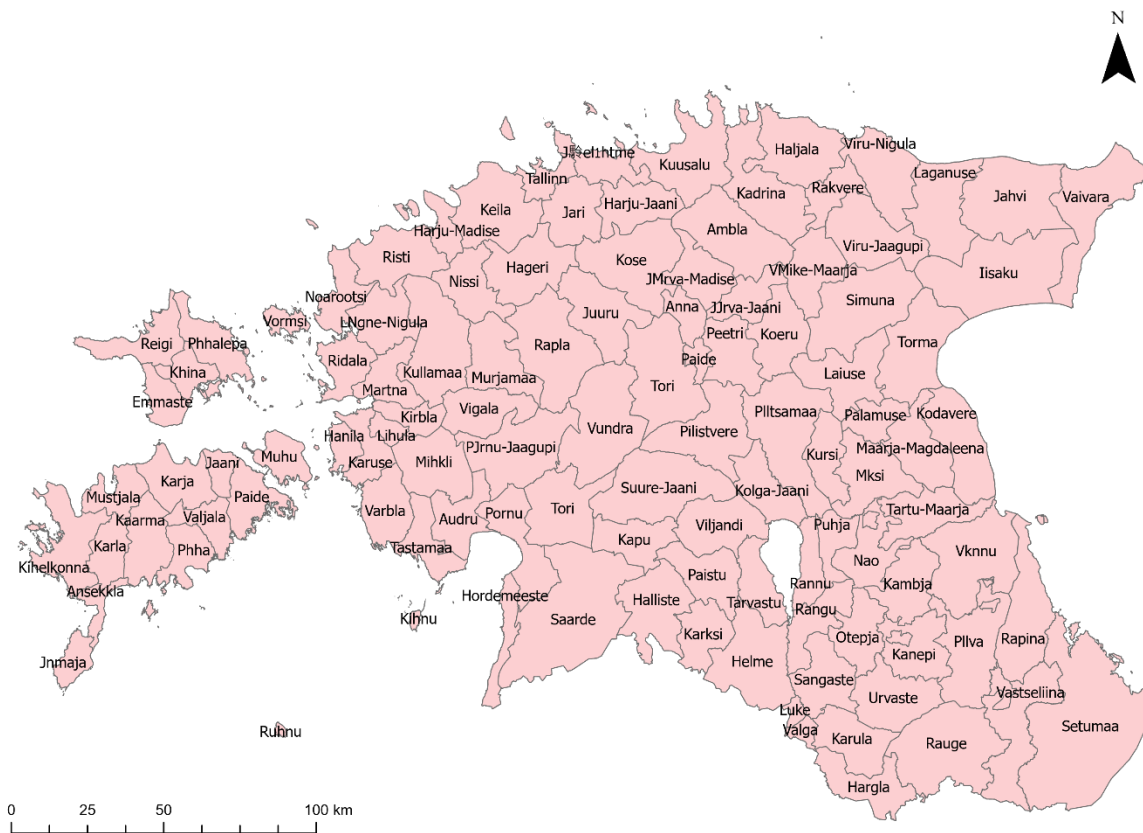
Töös kasutatud tõmbekeskuste andmetabel pärineb Statistikaameti toimepiirkondade uuringust (Siseministeerium, Statistikaamet, 2014). Tõmbekeskuste määramine põhines kantide peamisel pendelrände sihtkohal ehk linnalisel asulal, kuhu käib tööle kõige suurem osatähtsus kandi Eestis hõivatutest. Järelanalüüsis on kasutatud ka tõmbekeskuseid koos nendega lähivööndiga (joonis 9).



Joonis 9. Tõmbekeskuste lähivööndid (Allikas: Siseministerium, Statistikaamet, 2014).

Teedevõrgustikuna kasutatakse töös ArcGIS Online’st pärinevat krediitipõhist teenust, mis on kättesaadav ArcGIS Pro-s koos portaali kasutajakontoga ja *Network Analyst* laiendusega (Esri, 2020b). Teedevõrgustik võimaldab analüüsida ka omavalitsusi, mis on ühendatud veeteedega.

Kihelkondade SHP-fail pärineb Eesti Kohanimeraamatu kaardilisast (Kallasmaa, *et al.*, 2016). Kihelkondi on 110, kihelkondade tähistamiseks on kasutatud algset nimekuju (joonis 10).



Joonis 10. Kihelkondade andmekiht (Allikas: Eesti Kohanimeraamatu kaardilisa, 2016).

3. Metoodika

Magistritöö andmetöötlus põhines enamjaolt ArcGIS Pro tööriistadel ja Python'i ArcPy moodulil, mida kasutati integreeritud arenduskeskkonnas (*integrated development environment*) PyCharm. Kõik töö käigus loodud skriptid on kättesaadavad versioonihalduskeskkonna GitHub repositooriumis¹, kus on erinevad andmetöötluse etapid eristatud kataloogides. Töö läbiviimiseks kasutatud tarkvara ja arvuti tehniline spetsifikatsioon on välja toodud lisas 1.

Kõik töös kasutatud algoritmid loovad esmase lahenduse lähtuvalt pseudojuhuslike arvude generaatori poolt väljastatud juhuslike arvude järjestusest. Lahendusi üritatakse erinevate optimeerimisvõtete abil järgnevate iteratsioonide jooksul läbi elementaarüksuste vahetamise parandada. Kuna generaatori poolt väljastatud juhuslikku algväärtust (*random seed*) on võimalik kasutada samade parameetritega tulemuste taasloomiseks, on seda kasutatud lahenduste kirjeldamisel. Territooriumi kujundamisel kasutatakse moodustunud piirkondade kirjeldamiseks enamasti terminit „tsoon“. Kuna antud töö eesmärgiks on piiritleda omavalitsusüksusi, on lõplike lahenduste kirjeldamiseks kasutatud termineid „omavalitsus“ ja „omavalitsussüsteem“.

3.1. Alusandmestiku töötlemine

Elementaarüksused ehk asustusüksused vajasisid töötlemist, et nende atribuutandmeid saaks sobilikult tööriistade parameetrina kasutada. Esmalt eemaldati asustusüksuste objektiklassist suure rahvaarvuga linnalised asulad (Tallinn, Tartu, Narva ja Pärnu), kuna need üksused ületavad mitmekordselt töös seatud rahvaarvu kriteeriumi ning enne 2017. aasta haldusreformi olid need selgepiirilised linnalised haldusüksused. Ka üks varasem reformikava on toonud välja iseseisvate üksustena üle 40 000 elanikuga linnad (Viks, 2018). Lisaks näitasid esmased katsetused tööriistadega, et väga suure rahvaarvuga üksused mõjutavad väga tugevalt sobivusskoori arvutamist ja lahenduse leidmist. Kuigi Kohtla-Järve on samuti suure rahvaarvuga asula, käsitletakse analüüsis selle linnaosasid eraldi asustusüksustena. Nimelt on tõmbekeskuste uuringutes Kohtla-Järve linnaosasid eristatud ning välja toodud selle piirkonna keeruline geograafia (Ahas ja Silm, 2013; Siseministeerium, Statistikaamet, 2014). Seega on töös 4702 elementaarüksust 701 020 elanikuga, millest 76-l on üks või enam gümnaasium.

Gümnaasiumite objektiklassi ühendamisel asustusüksustega on kasutatud ArcGIS-i ruumilise päringu tööriista *Spatial Join* meetodit *Completely Contains*. Seejärel on antud igale asustusüksusele väärtus 1 (asub gümnaasium või gümnaasiumid) või 0 (gümnaasium puudub). Asustusüksuste sidumisel maakonnaga loodi esmalt asustusüksuse piirides asetsev keskpunkt (*Feature To Point*), mis ühendati meetodi *Completely Within* abil maakonnaga. Seejärel ühendati asustusüksuse keskpunkt taas asustusüksusega. Asustusüksuste rahvaarvu leidmiseks aastate 2030 ja 2045 kohta on kasutatud rahvaarvu muutust rahvastikuproгноosi andmetabelist (tabel 1).

¹ https://github.com/AndresKasekamp/msc_thesis

3.1.1. Tõmbe- ja teenuskeskused

Nii tõmbe- kui ka teenuskeskusele on antud vastavalt tugevusele tegevuse mõõt. Töös kasutatud tõmbekeskusi töödeldi esmalt statistikatarckvaraga R, millega viidi tõmbekeskused peamise pendelrände sihtkohaks olemise põhjal kvartiilidesse (joonis 11). Enne kvartiilidesse viimist on sarnaselt asustusüksuse rahvaarvule eemaldatud Tallinn, Tartu, Pärnu ja Narva. Iga kvartiilile anti väärtus skaalal 0,25–1. Seejärel ühendati moodustunud andmetabel asustusüksustega kasutades tööriista *Join*. Asustusüksuse tõmbekeskuse väärtused on näidatud tabelis 2. Ülejäänud asustusüksustele on antud tegevuse mõõduks 0.

```
commute_4 <- transform(commute_3, Q = cut(commute_3$Freq,
    breaks = quantile(commute_3$Freq,
    probs = seq(0, 1, 0.25)),
    labels = c(0.25, 0.5, 0.75, 1),
    include.lowest = TRUE))
```

Joonis 11. Kvartiilide loomise koodilõik. *commute_3* – eemaldatud asustusüksustega andmetabel, *commute_4* – väljundtabel.

Tabel 2. Tööriistades kasutatud tõmbekeskuste tegevuse mõõdu väärtus.

Asustusüksus	Peamine pendelrände sihtkoht	Väärtus algoritmis
Järvakandi, Maardu, Narva-Jõesuu, Püssi, Sindi, Suure-Jaani, Võhma, Tamsalu, Kunda, Pärnu-Jaagupi, Sillamäe	1–3	0,25
Järva-Jaani, Keila, Kilingi-Nõmme, Abja-Paluoja, Karksi-Nuia, Antsla, Otepää, Tapa, Türi, Mustvee, Räpina	4–7	0,5
Märjamaa, Vändra, Elva, Kiviõli, Lihula, Tõrva, Kohtla-Järve ² , Põltsamaa, Jõgeva	8–15	0,75
Rapla, Kärddla, Valga, Põlva, Haapsalu, Paide, Viljandi, Jõhvi, Võru, Rakvere, Kuressaare	15–57	1

Teenuskeskuste ühendamiseks oli vajalik kasutada mitut arvutusvõtet, kuna kantide geograafia erineb asustusüksuste omast. Esmalt ühendati teenuskeskuste uuringu andmetabelid *Join* tööriista abil kantide objektiklassiga. Teiseks loodi asustusüksuse objektiklassist punktobjektid, mis ühendati üks mitmele *Completely Contains* meetodi abil kantidega. Kolmandaks selgitati funktsiooni abil välja, millise ühendatud asustusüksuse rahvaarv on suurim kandi sees (joonis 12) ning selle põhjal anti asustusüksusele väärtus (tabel 3) skaalal 0,25–1 vastavalt hierarhiatasemele. Ülejäänud asustusüksustele on antud tegevuse mõõduks 0. Kuigi uuringus on kasutatud Jõhvi-

² Nii Järva kui Ahtme asustusüksusele on antud Kohtla-Järve põhjal väärtuseks 0,8.

Ahtme-Järvet ühe vööndina, on nad kõik määratud eraldi 4. tasandi teenuskeskusteks. Saarelised teenuskeskused täidavad uuringu alusel piirkonnas erinevat funktsiooni, kuid üldiselt saab pidada neid võrdväärseks 2. tasandi teenuskeskustega.

Tabel 3. Tööriistades kasutatud teenuskeskuste tegevuse mõõdu väärtus.

Asustusüksus	Väärtus algoritmis
Meremäe, Misso, Orava, Haanja, Voore, Maarja-Magdaleena, Koosa, Vara, Laeva, Rahinge, Vana-Kuuste, Roiu, Mehikoorma, Kolkja, Hellenurme, Mooste, Krootuse, Mikitamäe, Tilsu, Sinimäe, Kuremäe, Oru, Voka, Lüganuse, Kohtla-Nõmme, Sompa, Raja, Lohusuu, Tudu, Tudulinna, Viru-Nigula, Ulvi, Sadala, Sõmeru, Simuna, Roela, Vaimastvere, Aegviidu, Lehtse, Väätša, Kolga, Koigi, Roosna-Alliku, Albu, Jäneda, Annikoru, Hargla, Lüllemäe, Sangaste, Siimusti, Hummuli, Tännassilma, Leie, Kõo, Imavere, Adavere, Halliste, Paistu, Kabala, Ala, Olustvere, Vastemõisa, Viiratsi, Mõisaküla, Kõpu, Valgu, Tammiste, Surju, Alavere, Ardu, Kärü, Oru, Kose-Uuemõisa, Vaida, Neeme, Sutlema, Hagudi, Kabala, Raikküla, Alu, Kaerepere, Väana-Jõesuu, Harkujärve, Haiba, Turba, Varbola, Sipa, Martna, Palivere, Uuemõisa, Linnamäe, Harju-Risti, Padise, Klooga, Vasalemma, Emmaste, Kõrgessaare, Kergu, Koonga, Jõõpre, Varbla, Panga, Kärneri, Laimjala, Kõljala, Aste, Mustjala, Salme	0,25
Vastseliina, Lasva, Rõuge, Parksepa, Sõmerpalu, Varstu, Palamuse, Kallaste, Pala, Tabivere, Lähte, Luunja, Ülenurme, Kõrveküla, Melliste, Võnnu, Kambja, Nõo, Vastse-Kuuste, Ahja, Saverna, Veriora, Värska, Kanepi, Narva-Jõesuu, Iisaku, Mäetaguse, Toila, Püssi, Torma, Avinurme, Aseri, Vinni, Laekvere, Haljala, Rakke, Võsu, Aravete, Järva-Jaani, Rõngu, Puhja, Puka, Tsirguliina, Puurmani, Mustla, Rannu, Kolga-Jaani, Võhma, Järvakandi, Sauga, Are, Sindi, Tori, Häädemeeste, Uulu, Paikuse, Aruküla, Raasiku, Kaiu, Kehtna, Juuru, Kiili, Lagedi, Kostivere, Pringi, Randvere, Kiisa, Luige, Ääsmäe, Suurupi, Harku, Kaasiku, Riisipere, Kullamaa, Taebala, Pürksi, Nõva, Rummu, Hullo, Käina, Pärnu-Jaagupi, Tootsi, Kivi-Vigala, Audru, Tõstamaa, Lemsi, Virtsu, Liiva, Ruhnu, Valjala, Leisi, Iide, Kihelkonna, Kärla	0,5
Antsla, Alatskivi, Elva, Räpina, Sillamäe, Mustvee, Kiviõli, Kunda, Kadrina, Koeru, Väike-Maarja, Tamsalu, Tapa, Loksa, Kuusalu, Otepää, Tõrva, Põltsamaa, Karksi-Nuia, Suure-Jaani, Abja-Paluoja, Vändra, Kilingi-Nõmme, Kehra, Türi, Kose, Jüri, Peetri, Loo, Haabneeme, Maardu, Saku, Kohila, Keila, Saue, Laagri, Tabasalu, Märjamaa, Paldiski, Kärkla, Lihula, Orissaare	0,75
Võru, Jõgeva, Põlva, Ahtme, Jõhvi, Järve, Rakvere, Paide, Valga, Viljandi, Rapla, Haapsalu, Kuressaare	1

```

def set_ser_am(joined_output, join_id, activity_measure, service_code,
population):
    # NumPy järjendi loomine kantide ja asustusüksuste ühendusest
    arr = arcpy.da.TableToNumPyArray(joined_output, (join_id,
activity_measure, service_code, population)).tolist()
    # Järjendi sorteerimine ja kandi suurima rahvaarvuga asustusüksuse
väljaselgitamine
    arr_lst_sorted = sorted(arr, key=lambda x: (x[2], -x[-1]))
    settlement_id = [next(group)[:2]
                    for key, group in groupby(arr_lst_sorted, key=lambda x:
x[2])]
    return settlement_id

```

Joonis 12. Asustusüksuste teenuskeskuse väärtuse väljaselgitamise funktsioon. *joined_output* – kantide ja asustusüksuste ühendus, *join_id* – ühendamisel loodud objekti identifikaator, *activity_measure* – keskuse tegevuse mõõt, *service_code* – kandi identifikaator, *population* – rahvaarv asustusüksuses. Kasutatud on *ArcPy* ja *Itertools*’i mooduleid.

3.2. Build Balanced Zones

Build Balanced Zones (eesti keeles Tasakaalustatud Tsoonide Kujundaja, edaspidi BBZ) on geneetilisel algoritmil põhinev ArcGIS Pro tööriist, mis loob vastavalt kasutaja määratud kriteeriumitele ruumiliselt külgnevad tsoonid. Tsoonide loomisele võib seada mitmeid kriteeriumeid lähtuvalt atribuutandmetest ja ruumilistest suhetest (tabel 4) (Esri, 2020a).

Tabel 4. BBZ parameetrite selgitus (kohandatud Esri, 2020a järgi).

Parameeter	Selgitus
Sisendandmed (<i>Input Features</i>)	Elementaarüksuste objektiklass, mida kasutatakse tsoonide moodustamiseks.
Väljundandmed (<i>Output Features</i>)	Objektiklass, mis sisaldab andmeid moodustatud tsoonide kohta. Tsooni kuulumise näitamiseks luuakse igale üksusele tähis <i>ZONE_ID</i> veergu.
Tsooni loomise meetod (<i>Zone Creation Method</i>)	Algoritmi peamine parameeter tsoonide loomisel. Võimalik on valida kolme meetodi vahel: atribuudi sihtväärtus (<i>attribute target</i>), tsoonide arv ja atribuudi sihtväärtus (<i>number of zones and attribute target</i>) ning tsoonide arv (<i>number of zones</i>).
Tsooni loomise kriteerium sihtmärgiga (<i>Zone Building Criteria With Target</i>)	Täpsustab valitud muutujate sihtväärtused ja osakaalud.

Tabel 4. (Jätkub.)

Tsooni tunnused (<i>Zone Characteristics</i>)	Määrab, millist ruumilist kriteeriumit peaks tsoonide moodustamisel arvestama: võrdne ala (<i>equal area</i>), kompaktsus (<i>compactness</i>) või võrdne arv elementaarüksusi (<i>equal number of features</i>). Algoritmi kompaktsuse valem puudub.
Ruumilised piirangud (<i>Spatial Constraints</i>)	Määrab külgnevussuhted tsoonisest üksteise vahel. Valida saab nelja meetodi vahel: külgnevus ainult servade vahel (<i>Contiguity Edges Only</i>), külgnevus servade ja tippude vahel (<i>Contiguity Edges and Corners</i>), kärbitud Delaunay triangulatsioon (<i>Trimmed Delaunay Triangulation</i>) ning ruumiliste kaalude saamine failist (<i>Get Spatial Weights From File</i>).
Algpopulatsiooni suurus (<i>Population Size</i>)	Algpopulatsioon vaikeväärtusega 100.
Generatsioonide arv (<i>Number of Generations</i>)	Generatsioonide arv vaikeväärtusega 50.
Mutatsioonimäär (<i>Mutation Factor</i>)	Mutatsioonimäär vaikeväärtusega 0.1 skaalal 0-1. See on jäetud igal käivitamisel samaks.
Koonduvuse tabel (<i>Output Convergence Table</i>)	Tulemuste tabel, mis sisaldab andmeid iga generatsiooni parima sobivusskoori (<i>fitness score</i>) ning sobivusskoore kriteeriumite kohta.

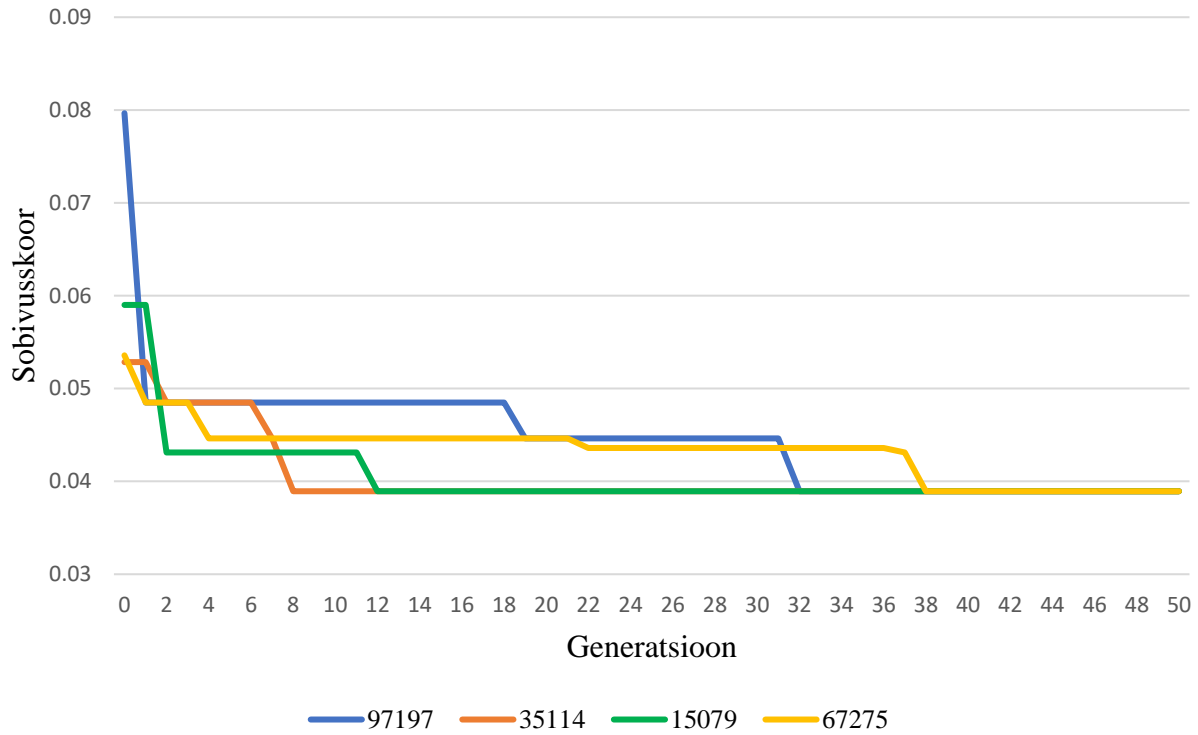
Iteratsioonide vältel paraneb lahendus geneetilise algoritmi otsingumeetodite abil. Igale tööriista lahendusele arvutatakse sobivusskoor, mis on ühikuteta tulemus ja näitab, kui võrd hästi on leitud lahenduses arvestatud etteantud kriteeriumitega (valem 3). Madalamad väärtused tähendavad paremaid tulemusi ning ideaalseks tulemuseks on 0, mille saavutamine keerulisemate ülesannete puhul on võimatu.

$$\text{Lahenduse sobivusskoor} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c \left(\frac{v_j - v_{ij}}{v_j} \right)^2, \quad (3)$$

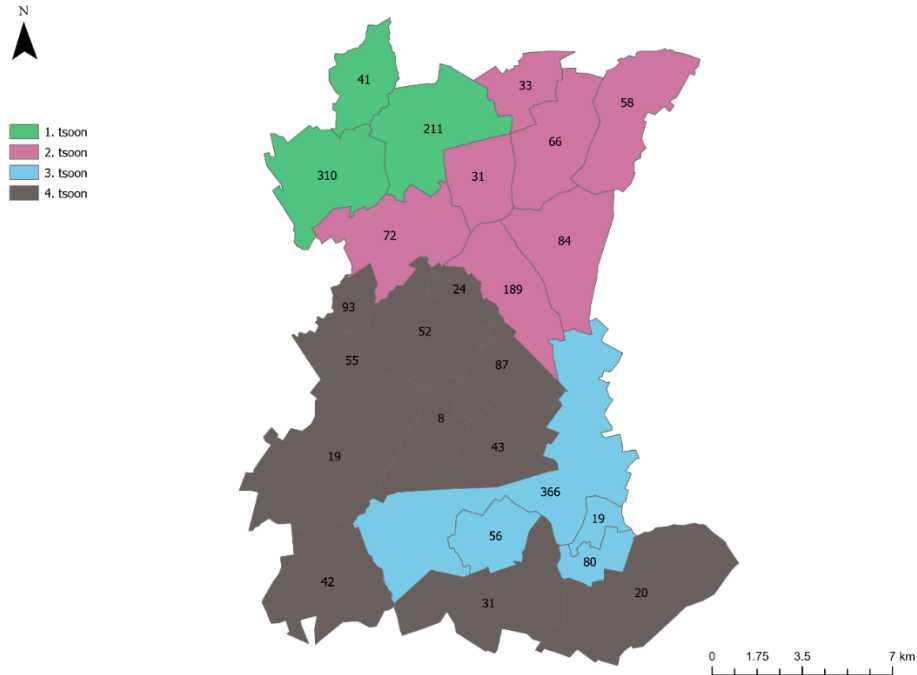
kus n on tsoonide arv lahenduses, c on etteantud kriteeriumite koguarv, V_j on läviväärtus j -ndale kriteeriumile ja V_{ij} on j -nda kriteeriumi summa i -ndas tsoonis.

Väiksemal alal ja väheste kriteeriumitega leiab tööriist eeldatava globaalse miinimumi, kuna võimalikke lahendusi on vähe. Näitena on loodud väiksem testala, mis koosneb 25-st elementaarüksusest, kus elanike koguarv on 2090. Kriteeriumiteks seati 500 inimest tsoonis, kompaktsus ja servakülgnevus. Jooniselt 13 on näha, et hoolimata kasutatud juhuslikust algväärtusest saavutavad kõik lahendused 50 generatsiooni jooksul sama sobivusskoori

(0,038942). Samas saab välja tuua, et initsialiseerides juhusliku algväärtusega 35114 saavutatakse eeldatav globaalne miinimum kaheksa generatsiooni jooksul, kuid algväärtusega 15079 38 generatsiooni jooksul. Tulemuseks oli 4 tsooni, mille rahvaarvu ruutkeskmine viga oli 38,891, keskmine kompaktsus 0,823 ja kompaktsuse ruutkeskmine viga 0,181. Kartograafiline lahendus on toodud välja joonisel 14.



Joonis 13. Sobivusskooride koondumine erinevate juhuslike algväärtuste korral.

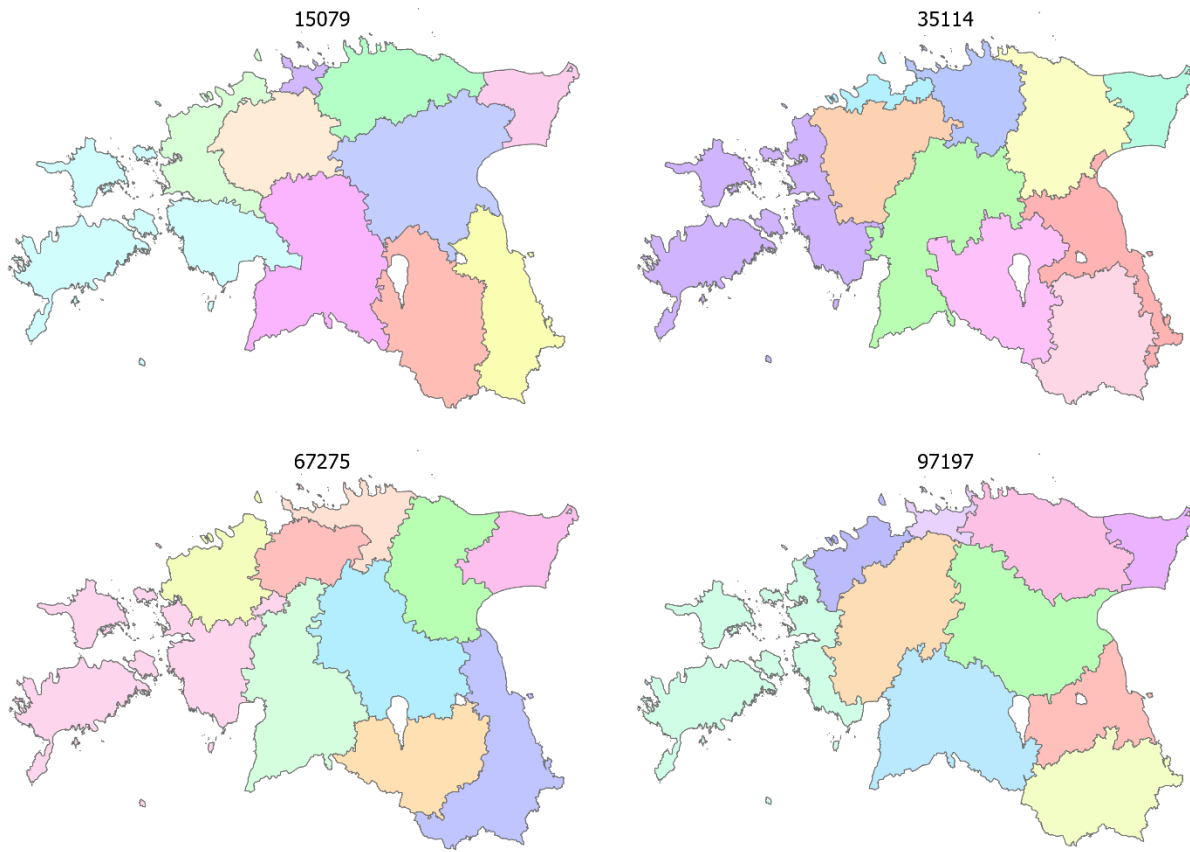


Joonis 14. Omavalitsuse piiritlemise optimeerimisülesande testala kartograafiline lahendus.

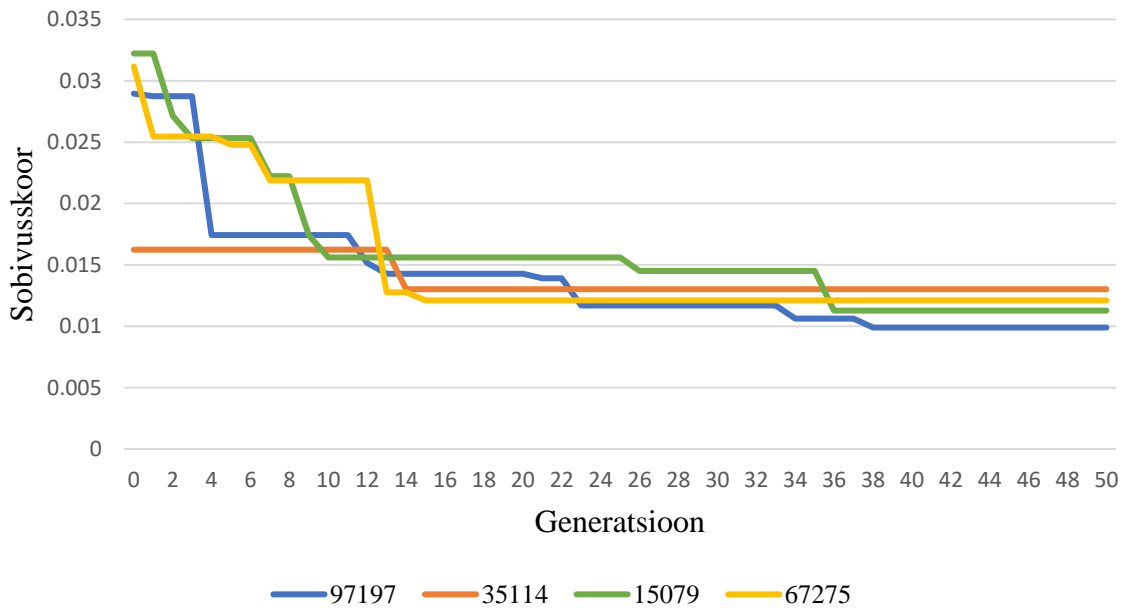
Samas kui kasutati tervet alusandmestiku optimeerimisülesande lahendamiseks, on sobivusskoori kujunemisel näha suuremat varieeruvust ja globaalne miinimum jääb vaikeväärtuste puhul saavutamata. Näitena seati esialgu ülesande kriteeriumiteks 70 000 inimest tsoonis, kompaktsus ja servakülgnvus. Joonisel 15 on välja toodud territoriaalsüsteemi kartograafilised lahendused, kus on näha, et alati moodustatakse 10 tsooni, kuid nende muutujate ruutkeskmises veas on erinevusi (tabel 5). Jooniselt 16 ilmneb, et esimestel generatsioonidel on parima sobivusskooriga juhuslik algväärtus 35114, aga lõpuks on see halvima sobivusskooriga. Samas juhuslik algväärtus 97197 on küll 4. generatsioonis halvima sobivusskooriga, kuid saavutab 38. generatsiooniks parima sobivusskoori. Seega jääb lahendus parameetrite vaikeväärtuse korral kinni lokaalsesse miinimumi.

Tabel 5. Lahenduste kirjeldav statistika.

Juhuslik algväärtus	Keskmine rahvaarv tsoonis	Rahvaarvu ruutkeskmise viga	Keskmine kompaktsus	Kompaktsuse ruutkeskmise viga
97197	70102	3113,177	0,917	0,089
35114	70102	4575,54	0,914	0,094
15079	70102	4089,18	0,917	0,089
67275	70102	4568,539	0,915	0,089



Joonis 15. Kartograafilised lahendused erinevate juhuslike algväärtuste puhul.



Joonis 16. Juhuslike algväärtuste sobivusskoorid.

3.2.1. Build Balanced Zones optimaalsete parameetrite leidmine

Antud töös loodi *Python*'i skript, et selgitada välja BBZ optimaalsed parameetrid ülesande lahendamiseks. Skript põhineb iteratiivselt tööriista käivitamisel ning sobivusskooride lugemisel koonduvuse tabelist ja vajadusel parameetrite tõstmisel (loodud skripti plokk skeem on toodud välja joonisel 17). Enne skripti alustamist on kasutajal võimalik määrata mitmed muutujad (tabel 6). Skript loob tulemuste tabeli, kuhu on lisatud igal iteratsioonil leitud sobivusskoorid koonduvuse tabelist, kasutatud generatsioonide arv, algpopulatsiooni suurus ja BBZ töötluse ajakulu.

Kui algpopulatsiooni suurusele ja generatsioonide arvule anda piisavalt kõrge väärtus, on lahendus alati sama sobivusskooriga, olenemata kasutatud juhuslikust algväärtusest, mida oli näha ka joonisel 13. Ühtlasi saadakse sedaviisi parem sobivusskoor kui tööriista käivitamisel nõrgemate parameetritega. Tööriista testimisel selgus, et mitme kriteeriumi ja terve alusandmestiku korral on siiski väga keeruline saavutada olukorda, kus iga juhuslik algväärtus väljastab sama sobivusskoori ehk eeldatava globaalse miinimumi. Seetõttu viidi sobivusskoor üle sobiva skoori vahemikuks, mille ülemise ja alumise piiri määrab kasutaja tolerantsina (tekkiv hulk on toodud välja valemis 4). Skripti lõpetamise kriteerium on hulkade kogumi ühisosa tekkimine etteantud korduste arvuga (valem 5).

$$A = \{x \in \mathbb{R}^+ | (1 - t) * s \leq x \leq (1 + t) * s\}, \quad (4)$$

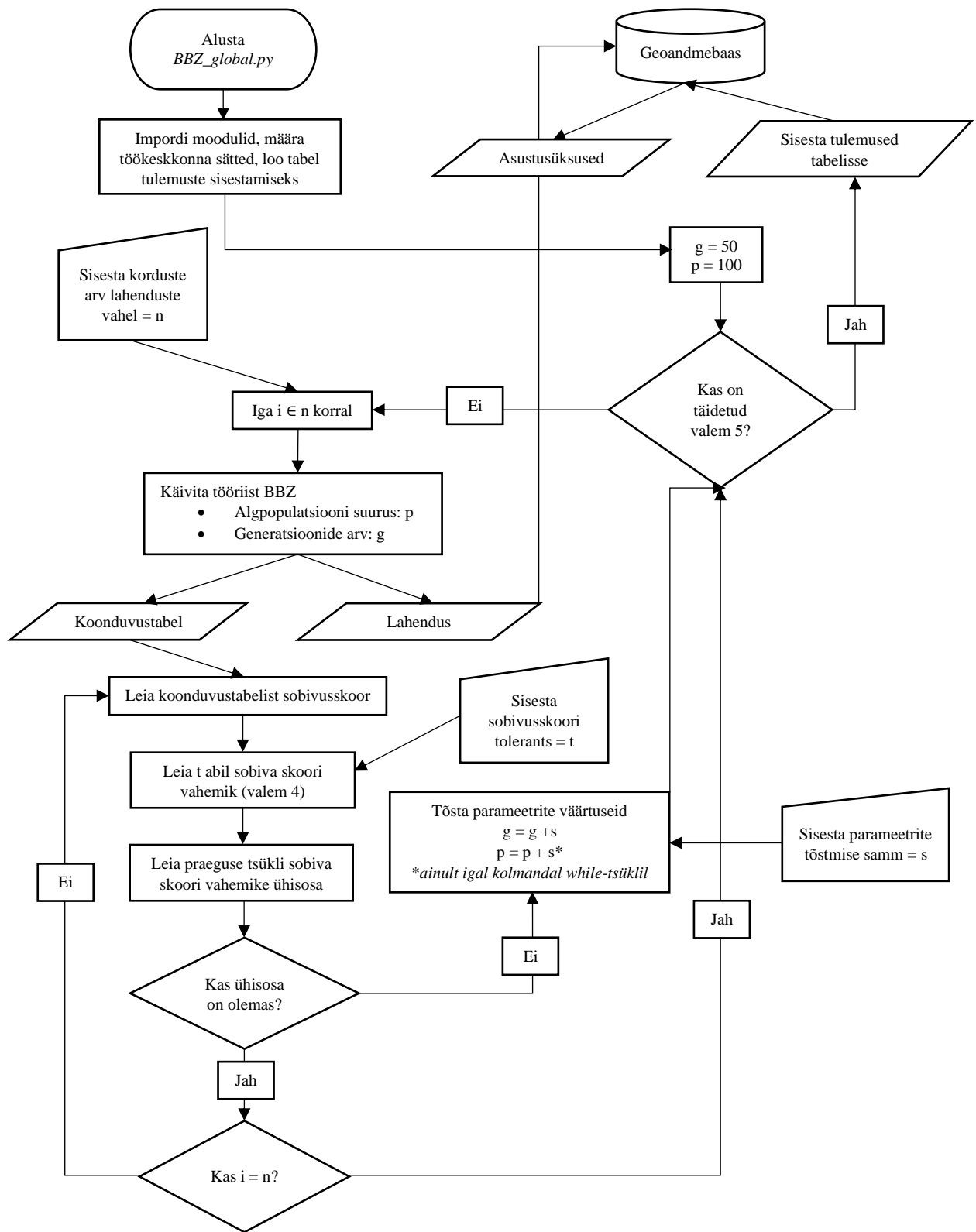
kus s on sobivusskoor ja t on kasutaja määratud sobivusskoori tolerants.

$$\bigcap_{i=1}^n A_i, \quad (5)$$

kus n on etteantud korduste arv ning A_i on sobivusskoori vahemiku hulk.

Tabel 6. Skripti käivitamisel kasutatud muutujad, nende väärtused ja selgitus. Lisaks on võimalik tulemused salvestada ajutisse geoandmebaasi.

Muutuja	Väärtus	Selgitus
<i>reps</i>	4	Määrab, mitu korda peavad BBZ käivitamisel samade parameetritega sobivusskoorid moodustama hulkade kogumi ühisosa.
<i>step</i>	50	BBZ parameetrite tõstmise samm, kui ühisosa ei õnnestunud moodustada, seejuures generatsioonide arv tõuseb kiiremini kui algpopulatsiooni suurus.
<i>tol</i>	±2,5%	Sobivusskoori tolerants, mida kasutatakse sobiva skoori vahemiku moodustamiseks.
<i>ppf</i>	75%	Paralleeltöötluse tegur, mis määrab BBZ käivitamisel, mitmele protsessori tuumale jaotatakse andmetöötlus.



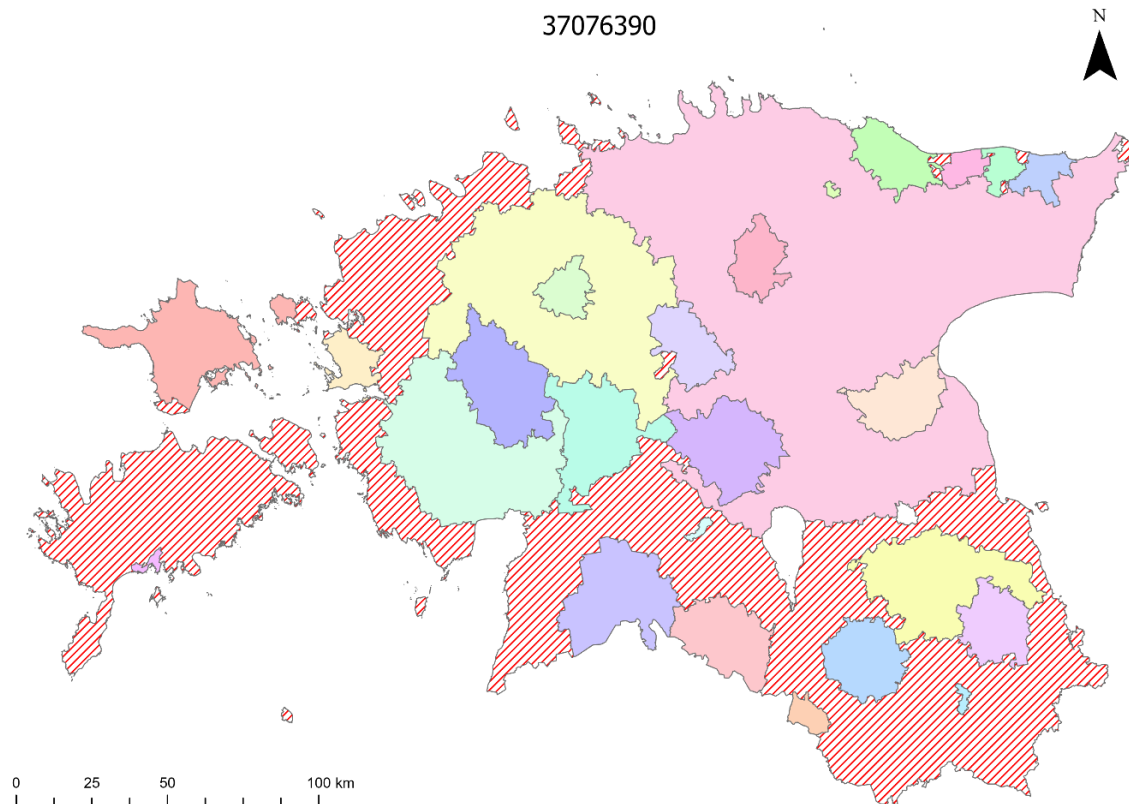
Joonis 17. BBZ optimaalsete parameetrite otsingu skripti plokk skeem.

3.3. Territory Design

Territory Design (eesti keeles Territooriumi Kujundaja, edaspidi TD) on osa ArcGIS-i ärianalüüsi (*Business Analyst*) laienduse tööriistakomplektist. Tööriist kasutab heuristilist optimeerimisalgoritmi, kuid selle täpne tööpõhimõte ei ole tööriista autorite poolt avalikustatud (Esri, 2020c).

Sarnaselt BBZ-le saab ka TD abil määrata kriteeriumitele sihtväärtused ja määrata neile erinevad kaalud. Erinevalt BBZ-st saab tööriistaga määrata nii rangeid kui nõrku piiranguid muutujatele, anda kaalu kompaktsusele ja lukustada eelnevalt elementaarüksused, mida ei kasutata lahenduse otsimisel. Samas pole polügonide puhul võimalik kasutada muid külgnõu tüüpe peale servakülgnõu. Kuigi algoritmil puuduvad sobivusskoorid lahenduste ja kriteeriumite mõju hindamiseks, saab enne käivitamist määrata kvaliteedi, mis põhjustab ka pikema töötlusaja.

Lahenduse leidmisel seati parameetrina alati maksimaalne kvaliteet (200%). Kriteeriumite seadmisel katsetati ka rangeid piiranguid, mis tähendas, et igas tsoonis peab olema vähemalt 1 tõmbe- ja teenuskeskus ja 1 gümnaasium. Rahvaarvule seati range piiranguna 5000 inimest ja nõrga piiranguna ehk ideaalväärtusena 11 000 inimest. Paraku ei andnud see terviklikku ruumilist lahendust (joonis 18). Lahenduse kirjeldav statistika on tabelis 7.



Joonis 18. Rangete piirangutega lahendus, tsoonid on tähistatud erineva värviga. Tsoonidesse määramata elementaarüksused on tähistatud punase viirutusega.

Tabel 7. Lahenduse kirjeldav statistika rangete piirangute seadmisel. Keskmise ja ruutkeskmise vea arvutamisel on kasutatud vaid moodustatud tsoonide väärtuseid.

Muutuja	Keskmine	Ruutkeskmise viga
Rahvaarv (2020)	19084,269	25918,648
Rahvaarv (2030)	17932,681	25850,028
Rahvaarv (2045)	16149,192	25620,63
Teenuskeskus	3,144	0,75
Tõmbekeskus	1,029	2,909
Gümnaasium	2,154	0,792

Seega seati tööriistale nõrgad piirangud sihtväärtusena ning loodi kaks näidislahendust. Lahenduste leidmise kiirendamiseks viidi tööriist graafilisest kasutajaliidesest skriptiks.

3.4. AZTool

AZTool on Southamptoni ülikoolis loodud vabavaraliselt kättesaadav tsoonide kujundamise tööriist, mis on kirjutatud VB.NET programmeerimiskeeles ja põhineb Openshaw (1977) algoritmil (Cockings, 2021). Tööriista on peamiselt kasutatud loendusringkondade moodustamisel (Cockings, *et al.*, 2011; Mokhele, Mutanga ja Ahmed, 2016).

Tööriistaga AZTImporter peab esmalt konverteerima asustusüksuste SHP-fail PAT- ja AAT-failideks, mis sisaldavad endas informatsiooni vastavalt külgnvussuhete ja atribuutide kohta. AZTool'i käivitamise parameetrid määratakse XML-failis ning tulemused väljastatakse CSV-failis, mille peab visualiseerimiseks avama GIS-is.

Tulemuste väljastamisel puudub informatsioon sobivusskooride kohta, selle asemel on tehtud märged, kas iteratsioonis õnnestus lahendust parandada. Tööriista parameetrites saab määrata iteratsioonide arvu ja üksuste vahetamise arvu iteratsioonis. Tööriistal on mitmeid valikuid kriteeriumite määramiseks. Sihtväärtuse määramisel saab seada nõrga piirangu tolerantsiga ja kaaluga ning ranged piirangud. Kui tsoonide esmase moodustamise või tsoonide optimeerimise faasis ei suuda algoritm jääda nõrga piirangu tolerantsi piiresse või rahuldada ranged piiranguid, siis tulemust ei väljastata.

Lisaks saab tööriistale seada mitmeid ruumilisi piiranguid. Tsoonide kompaktsusega arvestamiseks kasutatakse valemit $\frac{P^2}{S}$, kus P on tsooni ümbermõõt ja S on pindala. Külgnvussuhete arvestamisel saab vältida tipukülgnvust üksuste vahel.

Kriteeriumite määramisel katsetati esmalt rangete piirangute seadmist, kuid algoritm ei väljastanud tulemusi. Parameetrina ei kasutatud vaikesätetes määratud *IRABasedTractCount*'i, mis tähendab tsoonide arvu määramisel rangelt sihtväärtusest lähtumist. See parameeter ei suutnud mitme kriteeriumi tasakaalustamisel leida optimaalset arvu tsoone. Rahvaarvu kriteeriumitele seati

tolerantsiks 1000000, et tööriist suudaks kiiremini esimesel iteratsioonil leida juhusliku lahenduse. Gümnaasiumi ning teenus- ja tõmbekeskuse kriteeriumitele seati tolerantsiks 20, et iga lahendus eelistaks variante, kus on 0.8–1.2 gümnaasiumi ning teenus- ja tõmbekeskust. Kui kõikidele kriteeriumitele seada kõrge tolerants, ei suuda algoritm sobivat lahendust leida. Tööriistaga loodi kaks lahendust, mille parameetriteks määrati 25 vahetust iteratsioonis ja 100 iteratsiooni.

3.5. Kriteeriumite määramine

Kohalike omavalitsusüksuste piiritlemise kriteeriumid põhinevad ruumilistel teguritel ja elementaarüksuste tegevuse mõõtu sihtväärtustel. Kriteeriumiteks on praeguse rahvaarvu (2020. a) ja rahvaarvu prognooside (aastad 2030 ja 2045), gümnaasiumi, teenus- ja tõmbekeskuse sihtväärtused omavalitsuses (tabel 8). Kuigi nimetatud kriteeriumeid võib tõlgendada minimaalväärtusena ehk range piiranguna, puudus BBZ-l selleks võimalus ning TD ja AZTool'i kasutades ei andnud selle seadmine sobivaid tulemusi. Kõik algoritmid lubavad samaaegselt tasakaalustada mitmete muutujate sihtväärtuseid. Rahvastikuprognosile tuginevatele andmetele ja tõmbekeskuse olemasolule on antud väiksem osakaal kui praegusele rahvaarvule, gümnaasiumile ja teenuskeskusele. Rahvaarvu sihtväärtus tuleneb HRS (2016) soovituslikust rahvaarvust omavalitsuses. Samas seaduses on mainitud ka gümnaasiumi olemasolu vajadust omavalitsuses. Gümnaasiumi kriteeriumi täitmine eeldab sisuliselt vastava tegevuse mõõduga elementaarüksuse olemasolu omavalitsuses. Tõmbe- ja teenuskeskuste kriteeriumi saab täita ka mitme madalama tegevuse mõõduga elementaarüksuse põhjal.

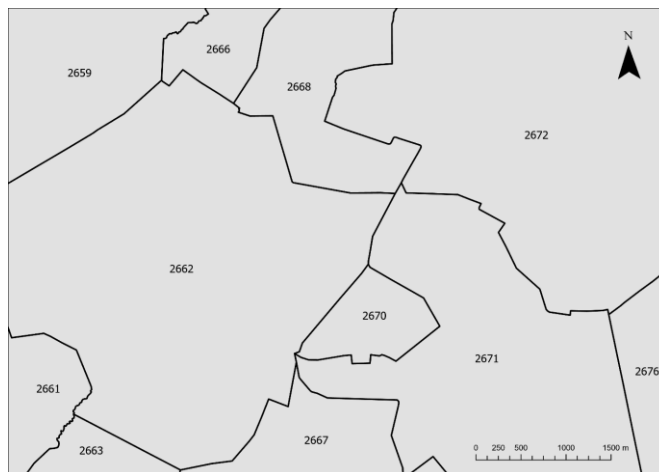
Tabel 8. Tegevuse mõõdul põhinevate kriteeriumite määramine tööriistades.

Muutuja	Sihtväärtus	Kaal
Rahvaarv (2020)	11 000	100%
Rahvaarv (2030)		75%
Rahvaarv (2045)		50%
Tõmbekeskus	1	100%
Teenuskeskus		
Gümnaasium		

Kompaktsusele polnud ainult BBZ puhul võimalik määrata kaalu, teiste tööriistade puhul on antud kompaktsusele maksimaalne võimalik kaal ehk 100%.

Külgnõu arvestamisel on kasutatud tööriistade sisest servakülgnõu kriteeriumit. Lisaks loodi tööriistaga *Spatial Weights Matrix* servakülgnõu puhul põhinev ruumisuhete maatriks, mida kasutati külgnõu suhete modelleerimiseks tööriistas BBZ. Sealsest maatriksist eemaldati elementaarüksuste vaheline külgnõu, kui naaberüksuste vaheline piir on alla 250 m. Ehkki tegemist on servakülgnõu suhete, võib see anda ebasobilike kujuga omavalitsusi. Näiteks joonisel 19 on eemaldatud külgnõu suhete üksuste 2671 ja 2668 vahel ning 2671 ja 2662 vahel. Kokku oli

elementaarüksuste vahel 26 748 kahepoolset servakülgnevuse suhet, millest eemaldati 784. Piiri pikkus ja naabrussuhted selgitati välja tööriistaga *Polygon Neighbors*.



Joonis 19. Elementaarüksuste vahelised piirid.

Tulemuste kirjeldamiseks väljastavad tööriistad BBZ ja AZTool kasutajale lahenduste kirjeldava statistika, TD puhul on töö autor arvanud selle pärast lahenduse leidmist. Kirjeldava statistikana on välja toodud muutujate keskmine ja ruutkeskmine viga.

Lahenduse tsoonide ehk omavalitsuste hindamiseks on lisatud neile ka Polsby-Popperi testi põhjal arvatud kompaktsuse skoor (valem 6). Väärtused on vahemikus 0-1, kõrgemad väärtused näitavad kompaktsemat üksust (Corcoran ja Saxe, 2014). BBZ ja TD omavalitsuste kirjeldav statistika on töö lisades.

$$PP(D) = \frac{4\pi A(D)}{p^2}, \quad (6)$$

kus D on tsoon, p on tsooni ümbermõõt ja $A(D)$ on tsooni pindala.

Kuna TD puhul ei ole välja toodud kompaktsuse valemit dokumentatsioonis, kasutatakse valemit 6 ka omavalitsussüsteemi kompaktsuse hindamiseks.

3.6. Lahenduste järelanalüüs

Pärast BBZ generatsioonide arvu ja algpopulatsiooni määramist loodi selle alusel 10 omavalitsussüsteemi lahendust mõlema külgnevustüübiga. Nende lahenduste sobivusskoorid saavutavad enam-vähem sarnase väärtuse olenemata juhuslikust algväärtusest, mistõttu ei erine märkimisväärselt ka nende kirjeldav statistika. Täiendavalt on analüüsitud omavalitsussüsteemi teedevõrgustikku ning kattumist kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega. Sisendandmestikuna on kasutatud vaid BBZ abil loodud omavalitsussüsteeme, kuna see tööriist suutis ainsana luua terviklikud lahendused ning ühe süsteemi analüüsimine on aeganõudev, näiteks ühe omavalitsussüsteemi teedevõrgustiku peale kulub ligi 15 minutit.

Analüüsimise aluseks oli sihifunktsiooni koostamine (valem 7), mis näitab, milline lahendus täidab lahenduste seast kõige paremini kõiki etteantud kriteeriume ehk kattub kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega ning omab ühtlast ja kiire sõiduajaga teedevõrgustikku. Sihifunktsiooni arvutamiseks on muutujate väärtused normaliseeritud ning neile pole antud osakaalusid.

$$\min(x_1 + x_2 + x_3 + x_4), \quad (7)$$

kus x_1 on omavalitsussüsteemi normaliseeritud lõikumiste koguarv kihelkondadega, x_2 on normaliseeritud lõikumiste koguarv tõmbekeskuste lähivöönditega, x_3 on normaliseeritud sõiduaja standardhälve ja x_4 on normaliseeritud keskmine sõiduaj.

3.6.1. Rändkaupmehe probleem

Teedevõrgustikuga arvestamiseks on kasutatud ArcGIS Pro *Network Analyst* laiendust ja *ArcPy* moodulit. Skript leiab esmalt iga omavalitsussüsteemi igas omavalitsuses kolm suurimat teenuskeskust (joonis 20). Kui teenuskeskuste tugevused asustusüksuste vahel on võrdsed, on eelistatud esmalt tugevamaid tõmbekeskusi ja seejärel suurema rahvaarvuga üksusi. Leitud asustusüksuste punktojektide alusel lahendatakse igas omavalitsuses tabu otsingul põhinev rändkaupmehe ülesanne (joonis 21) (Esri, 2020b). Iga omavalitsuse prima leitud marsruudi sõiduajaga kasutati standardhälbe ja keskmise sõiduaja arvutamiseks omavalitsussüsteemis.

```
def subset_zones(features_in, zone_count, center_count):
    # Tsükkel erinevate omavalitsuste töötlemiseks
    for i in range(1, zone_count + 1):
        # Omavalitsuse viimine kihile
        arcpy.MakeFeatureLayer_management(in_features=features_in,
out_layer="Zone", where_clause="ZONE_ID = {}".format(i))
        # Omavalitsuse sorteerimine atribuutide alusel
        arcpy.management.Sort(in_dataset="Zone", out_dataset="Zone_sorted",
            sort_field=[["Teenuskeskus", "DESCENDING"],
["Tõmbekeskus", "DESCENDING"], ["Rahvaarv", "DESCENDING"]],
spatial_sort_method="UR")
        # Omavalitsuse kolme suurima keskuse viimine kihile
        arcpy.MakeFeatureLayer_management(in_features="Zone_sorted",
out_layer="all_centres_lyr", where_clause="OBJECTID IN
{}".format(tuple(center_count)))
        all_centres_point = "all_centres_point" + str(i)
        # Keskuste konverteerimine punktojektiks
        arcpy.FeatureToPoint_management(in_features="all_centres_lyr",
out_feature_class=all_centres_point, point_location="INSIDE")
        # Suurima keskuse dubleerimine
        with arcpy.da.SearchCursor(all_centres_point, '*') as cursor:
            for row in cursor:
                if row[0] == 1:
                    with arcpy.da.InsertCursor(all_centres_point, '*') as cur:
                        cur.insertRow(row)
                    del cur
        del cursor
```

Joonis 20. Suurimate teenuskeskuste väljaselgitamise funktsioon. *features_in* – omavalitsussüsteem, *zone_count* – omavalitsuste arv, *center_count* – keskuste arv omavalitsuses.

```

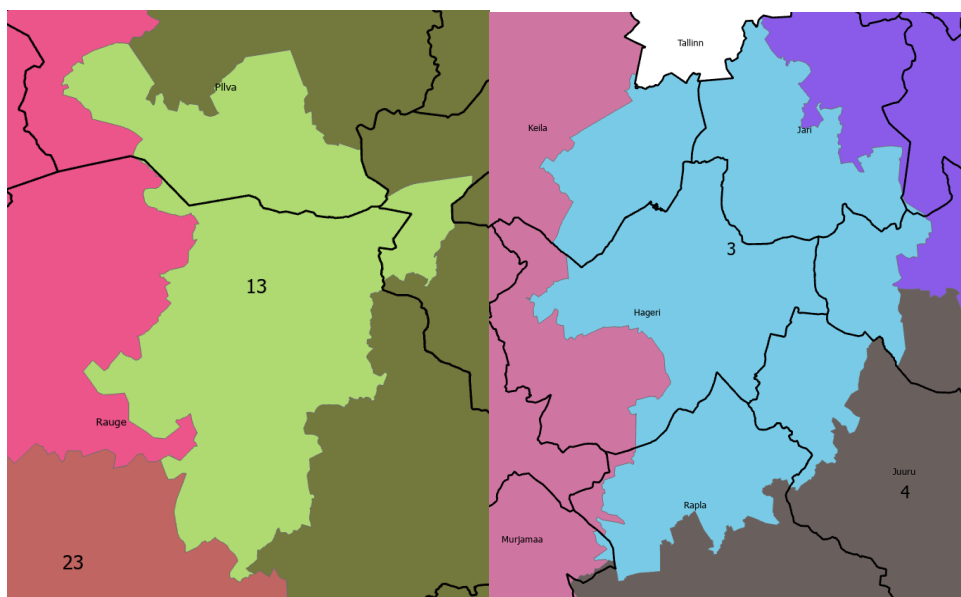
# Teedevõrgustiku analüüsikihi lisamine
arcpy.MakeRouteAnalysisLayer_na(network_data_source=arcpy.GetActivePortalURL(
), layer_name=solution_route, travel_mode="", sequence="PRESERVE_BOTH",
time_of_day="", time_zone="LOCAL_TIME_AT_LOCATIONS",
line_shape="ALONG_NETWORK", accumulate_attributes="",
generate_directions_on_solve="")
# Suurimate teenuskeskuste lisamine kihile
arcpy.AddLocations_na(in_network_analysis_layer=solution_route,
sub_layer="Stops", in_table=zone, field_mappings="", search_tolerance="5000
Meters", sort_field="", search_criteria="", match_type="MATCH_TO_CLOSEST",
append="CLEAR", snap_to_position_along_network="NO_SNAP", snap_offset="5
Meters", exclude_restricted_elements="EXCLUDE", search_query="")
# Rändkaupmehe ülesande lahendamise
arcpy.Solve_na(in_network_analysis_layer=solution_route,
ignore_invalids="SKIP", terminate_on_solve_error="TERMINATE",
simplification_tolerance="", overrides="")

```

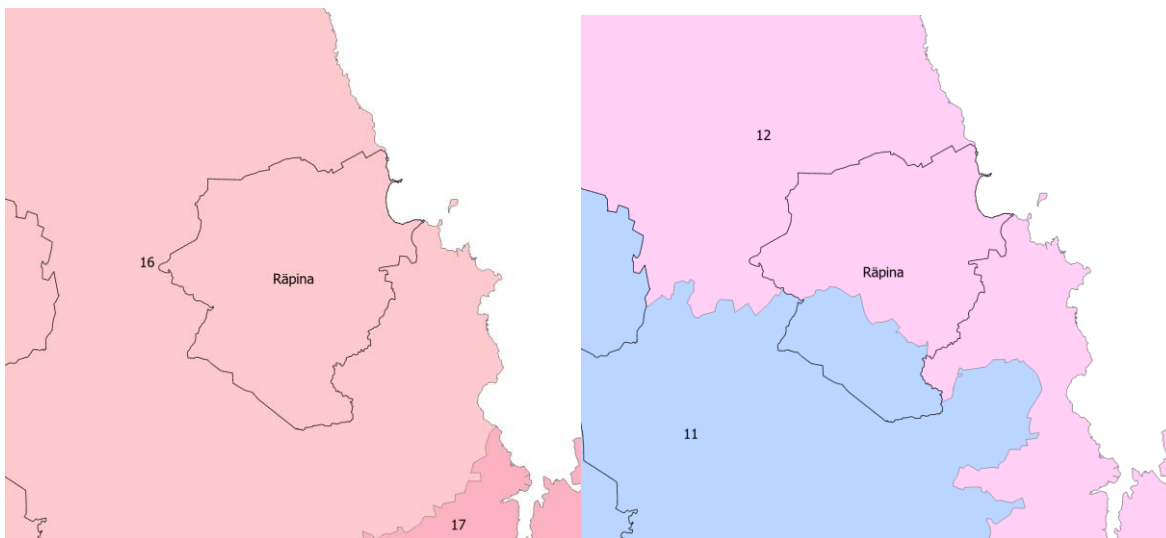
Joonis 21. Rändkaupmehe ülesande lahendamise koodilõik. *solution_route* – lahenduse marsruudi kiht, *zone* – omavalitsuse teenuskeskused.

3.6.2. Lõikumine kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega

Omavalitsussüsteemi kattumine kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega on leitud tööriistaga *Tabulate Intersection*, mis väljastab lõikumise tabeli, mis näitab kahe piirkonna tsoonide vahelist lõikumiste koguarvu (joonis 22 ja 23). Sobivaimaks lahenduseks saab pidada omavalitsussüsteemi, kus on võimalikult vähe lõikumisi sisendandmestike vahel ehk kihelkonnad ja lähivööndid püsivad eelistatult terveni omavalitsuste piiride sees või ei lõika omavalitsuste piirjooned korraga mitut kihelkonda ja lähivööndit.



Joonis 22. Omavalitsusel „13“ lõikumine kolme kihelkonnaga (vasakul) ja omavalitsuse „3“ lõikumine üheksa kihelkonnaga (paremal).



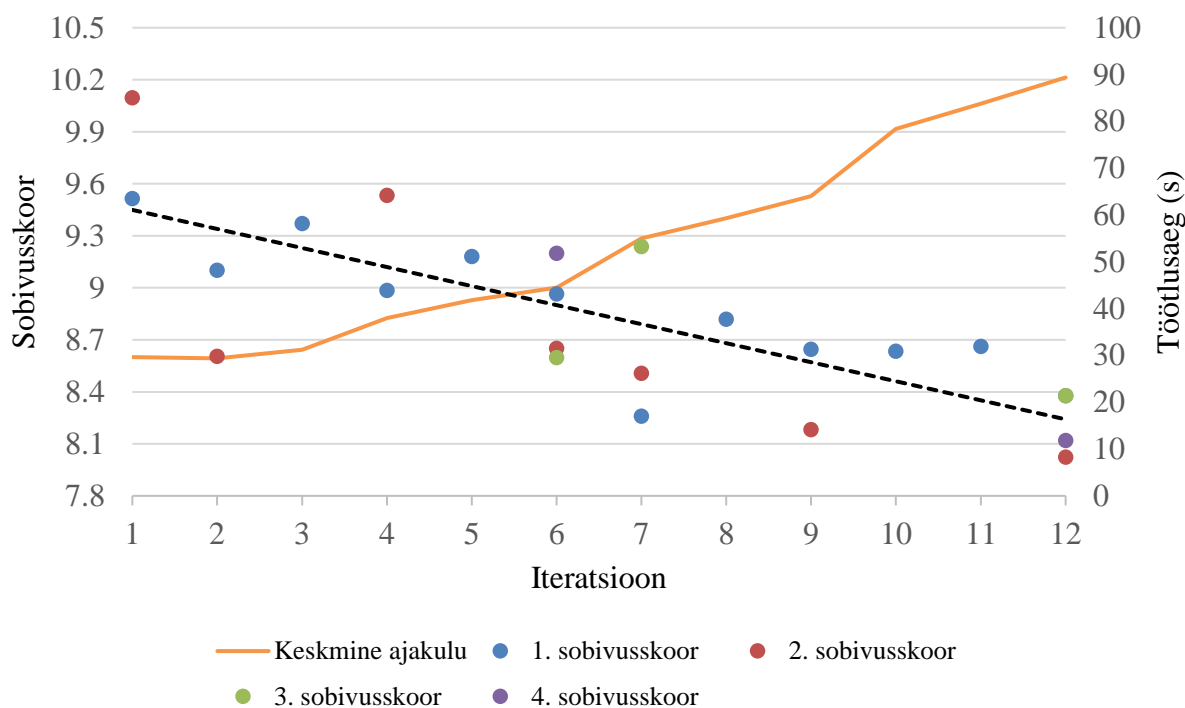
Joonis 23. Rõpina lähivõõnd püsib tervenisti omavalitsuse „16“ sees (vasakul), lähivõõnd on jaotatud omavalitsuste „11“ ja „12“ vahel (paremal).

4. Tulemused

4.1. Build Balanced Zones

4.1.1. Tavaline servakülgnevus

Tavalise servakülgnevuse kasutamisel osutusid optimaalseteks parameetriteks 600 generatsiooni ja algpopulatsioon suurusega 250, mille korral läks ühe lahenduse leidmiseks keskmiselt ligi 90 sekundit. Algsete parameetrite juures oli töötusaeg keskmiselt ligi 30 sekundit. Väljastatud lahenduste sobivusskoorid on vahemikus 8,119–8,377. Skripti tulemused on toodud välja joonisel 24.



Joonis 24. Tavalise servakülgnevuse optimaalsete parameetrite otsingu tulemused. Lineaarne trendijoon (must katkendjoon) on leitud samas iteratsioonis väljastatud sobivusskooride keskmise põhjal. Keskmine ajakulu näitab iteratsioonis tööriista töötusaega.

Pärast BBZ käivitamist etteantud parameetritega ning täiendava analüüsi rakendamist täitis sihifunktsiooni kõige paremini juhuslik algväärtus 91745 (tabel 9). Kasutatud algväärtuste kihelkondadega löikumine on vahemikus 239–258, tõmbekeskuste lähivöönditega löikumine 74–81, sõiduaja standardhälve 45–60 minutit ja keskmine sõiduaeg 103–116 minutit. Tabelis 10 on välja toodud kahe parima juhusliku algväärtuse kirjeldav statistika, kust nähtub, et nende ruutkeskmise vea vahel pole suuri erinevusi. Algväärtusega 91745 on omavalitsussüsteemis 25 omavalitsust ja algväärtusega 53010 24 omavalitsust. Paremini on täidetud kriteeriumid, millele

on seatud kõrgem kaal. Muutujatele, millele seati kaaluks 100%, ei täidetud rahvaarvu sihtväärtust ainult algväärtuse 53010 omavalitsuses „22“. Samas on märgata, et mõnes omavalitsuses on rahvaarvu sihtväärtus mitmekordselt ületatud, näiteks algväärtusega 53010 omavalitsustes „9“ ja „16“ ning algväärtusega 91745 „12“, mistõttu on rahvaarvul ka kõrge ruutkeskmine viga. Lahenduste sobivusskoorigid erinevad küll üsna palju: algväärtusel 91745 on see 7,946, mis on isegi madalam skriptiga väljaselgitatud sobiva skoori vahemikust, kuid algväärtusel 53010 on see 8,824, mis on kõrgem sobiva skoori vahemikust. Tulemuste kartograafilised lahendused on toodud välja joonistel 25 ja 26. Omavalitsuste kirjeldav statistika on lisades 2 ja 3.

Tabel 9. Kasutatud juhuslike algväärtuste kihelkondadega (KK_C – koguarv ja KK_N – normaliseeritud väärtus) ja tõmbekeskuste lähivöönditega löikumine (TL_C – koguarv ja TL_N – normaliseeritud väärtus), sõiduaja standardhälve (SD_N – normaliseeritud väärtus) ja keskmine ($Kesk_N$ – normaliseeritud väärtus) ning sihifunktsiooni tulemus.

Juhuslik algväärtus	Löikumine				Sõiduaeg				Tulemus
	KK_C	KK_N	TL_C	TL_N	SD	SD_N	Kesk	$Kesk_N$	
53010	239	0,174	79	0,714	47,752	0,148	108,927	0,456	1,492
46517	258	1	81	1	50,856	0,370	103,384	0	2,370
86661	248	0,565	77	0,429	49,149	0,248	107,132	0,308	1,55
91745	251	0,696	74	0	50,696	0,359	106,364	0,245	1,3
46569	236	0,043	79	0,714	48,397	0,194	115,545	1	1,95
16043	245	0,435	79	0,714	50,867	0,371	106,968	0,295	1,815
14816	248	0,565	76	0,286	45,694	0	111,589	0,675	1,526
85985	248	0,565	80	0,857	55,1	0,675	108,423	0,414	2,512
90594	251	0,696	80	0,857	50,932	0,376	107,138	0,309	2,237
22504	235	0	79	0,714	59,631	1	106,856	0,286	2,0

Tabel 10. Juhuslike algväärtuste 53010 ja 91745 muutujate keskmine ja ruutkeskmine viga (RMSE).

Muutuja	53010		91745	
	Keskmine	RMSE	Keskmine	RMSE
Rahvaarv (2020)	29209,167	24814,923	28040,800	23289,328
Rahvaarv (2030)	28226,329	26005,523	27097,276	24267,363
Rahvaarv (2045)	26536,863	27839,488	25475,389	25880,651
Teenuskeskus	4,938	4,633	4,74	4,418
Tõmbekeskus	1,115	0,342	1,07	0,433
Gümnaasium	3,167	2,799	3,040	2,676
Kompaktsus	0,887	0,123	0,886	0,126

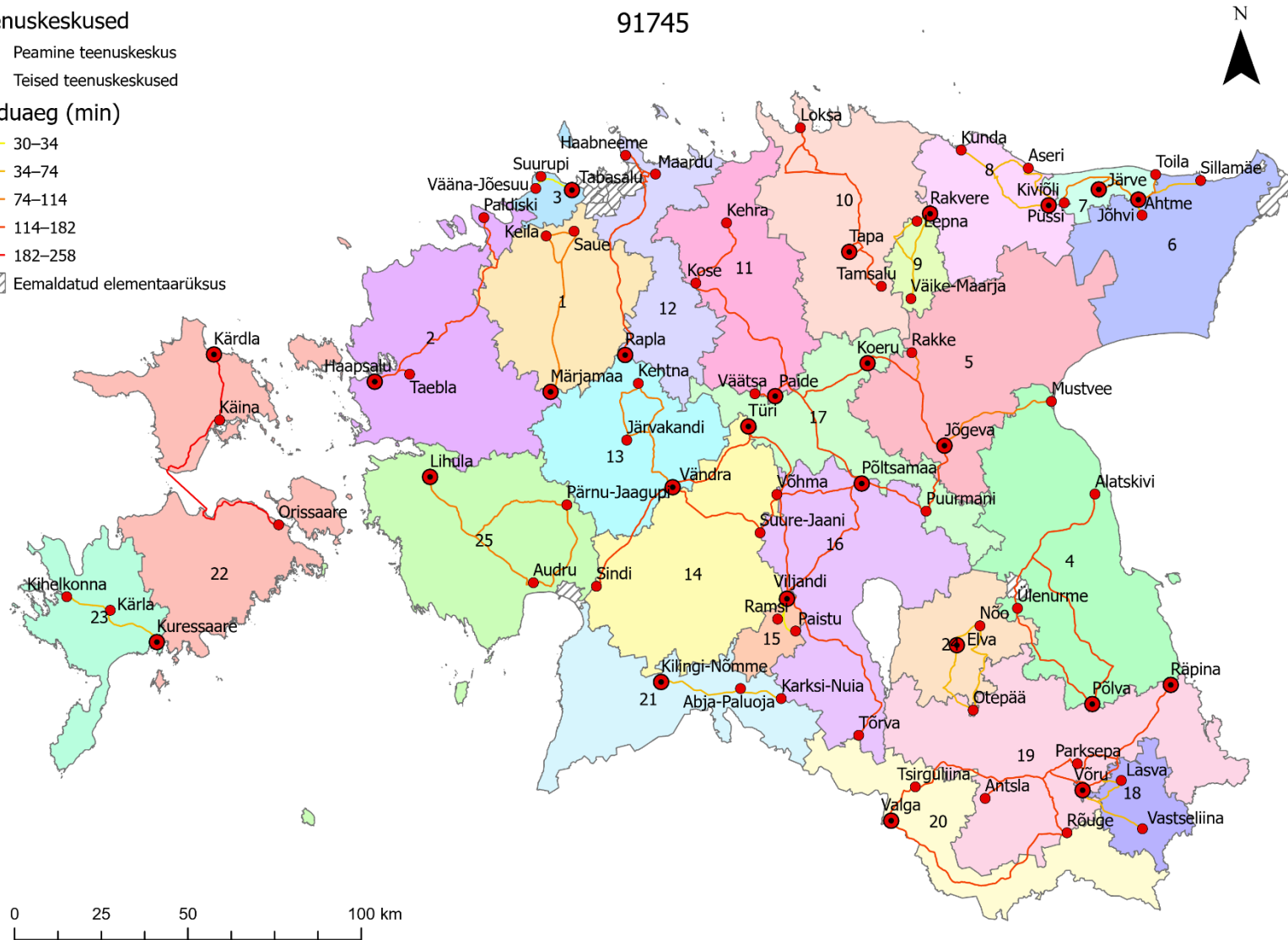
Teenuskeskused

- Peamine teenuskeskus
- Teised teenuskeskused

Sõiduaeg (min)

- 30–34
- 34–74
- 74–114
- 114–182
- 182–258

▨ Eemaldatud elementaarüksus



Joonis 25. Lahendus juhusliku algväärtusega 91745.

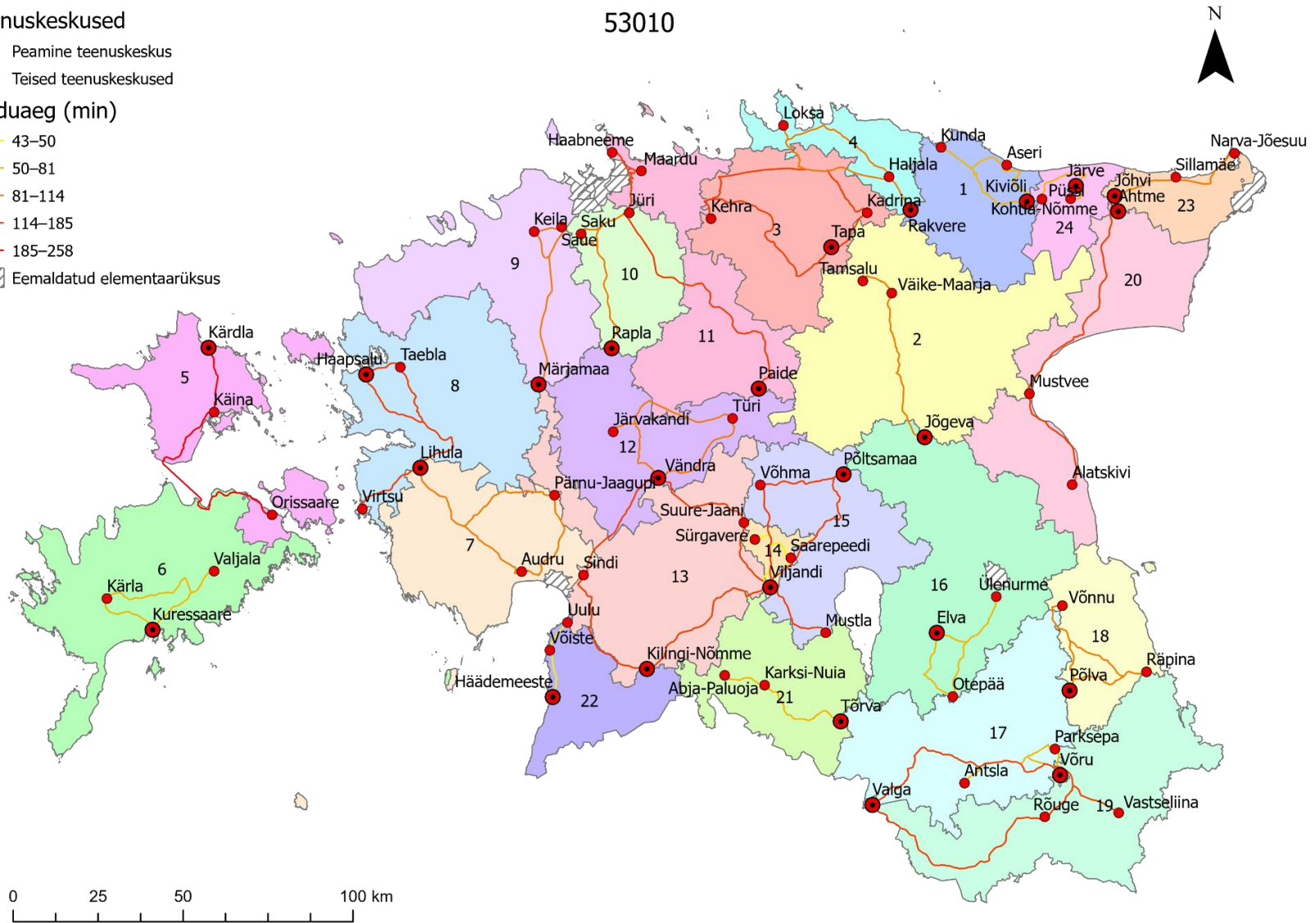
Teenuskeskused

- Peamine teenuskeskus
- Teised teenuskeskused

Sõiduaeg (min)

- 43–50
- 50–81
- 81–114
- 114–185
- 185–258

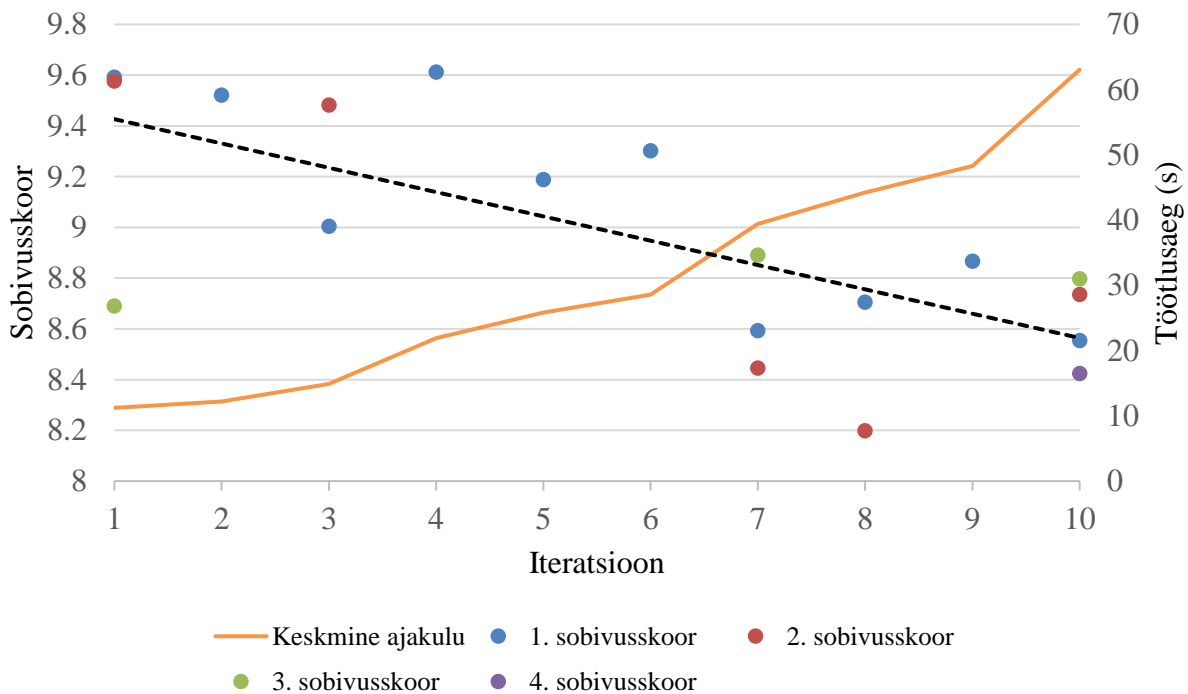
▨ Eemaldatud elementaarüksus



Joonis 26. Lahendus juhusliku algväärtusega 53010.

4.1.2. Modifitseeritud servakülgnevus

Modifitseeritud servakülgnevuse kasutamisel osutusid optimaalseteks parameetriteks 500 generatsiooni ja algpopulatsiooni suurusega 250, mille korral läks ühe lahenduse leidmiseks keskmiselt ligi minut. Algsete parameetrite juures oli töötusaeg keskmiselt ligi 15 sekundit. Väljastatud lahenduste sobivusskoorid on vahemikus 8,425–8,798. Skripti tulemused on toodud välja joonisel 27.



Joonis 27. Modifitseeritud servakülgnevuse optimaalsete parameetrite otsingu tulemused. Lineaarne trendijoon (must katkendjoon) on leitud samas iteratsioonis väljastatud sobivusskooride keskmise põhjal.

Pärast BBZ käivitamist etteantud parameetritega ning täiendava analüüsi rakendamist täitis sihifunktsiooni kõige paremini juhuslik algväärtus 48493 (tabel 11). Kasutatud algväärtuste kihelkondadega löikumine on vahemikus 230–246, tõmbekeskuste lähivöönditega löikumine 70–79, sõiduaja standardhälve 32–52 minutit ja keskmine sõiduaeg 96–114 minutit. Tabelis 12 on välja toodud kahe parima juhusliku algväärtuse kirjeldav statistika, kust ilmneb, et nende ruutkeskmise vea vahel pole suuri erinevusi. Algväärtusega 48493 on omavalitsussüsteemis 23 omavalitsust ja algväärtusega 27051 24 omavalitsust. Paremini on täidetud kriteeriumid, millele on seatud kõrgem kaal. Muutujatele, millele seati kaaluks 100%, ei täidetud rahvaarvu sihtväärtust ainult ühes omavalitsuses ehk Hiiumaal (algväärtusega 27051 omavalitsus „22“ ja algväärtusega 48493 omavalitsus „23“). Siiski on märgata, et mõnes omavalitsuses on rahvaarvu sihtväärtus mitmekordselt ületatud, näiteks algväärtusega 27051 omavalitsustes „1“ ja „2“ ning algväärtusega 48493 omavalitsuses „7“, mistõttu on rahvaarvul ka kõrge ruutkeskmise viga. Mõlema algväärtuse sobivusskoorid on halvemad skriptiga tuvastatud sobiva skoori vahemikust (8,874 algväärtusega

48493 ja 9,072 algväärtusega 27051). Tulemuste kartograafilised lahendused on toodud välja joonistel 28 ja 29. Omavalitsuste kirjeldav statistika on lisades 4 ja 5.

Tabel 11. Kasutatud juhuslike algväärtuste kihelkondadega (KK_C – koguarv ja KK_N – normaliseeritud väärtus) ja tõmbekeskuste lähivöönditega löikumine (TL_C – koguarv ja TL_N – normaliseeritud väärtus), sõiduaja standardhälve (SD_N – normaliseeritud väärtus) ja keskmine ($Kesk_N$ – normaliseeritud väärtus) ning sihifunktsiooni tulemus.

Juhuslik algväärtus	Löikumine				Sõiduaeg				Tulemus
	KK_C	KK_N	TL_C	TL_N	SD	SD_N	Kesk	$Kesk_N$	
27051	240	0,625	77	0,778	31,582	0	96,680	0,024	1,426
759	240	0,625	72	0,222	42,328	0,537	105,16	0,490	1,875
1794	242	0,75	76	0,667	51,583	1	101,291	0,277	2,694
81124	235	0,313	75	0,556	43,135	0,578	107,581	0,624	2,069
48493	242	0,75	70	0	39,667	0,404	96,622	0,020	1,175
11355	239	0,563	79	1	35,411	0,191	114,415	1	2,754
10159	230	0	79	1	39,952	0,418	105,252	0,495	1,914
93280	244	0,875	76	0,667	42,466	0,544	103,830	0,417	2,503
35056	246	1	73	0,333	35,348	0,188	96,253	0	1,522
6106	243	0,813	76	0,667	35,993	0,221	106,534	0,566	2,266

Tabel 12. Juhuslike algväärtuste 27051 ja 48493 muutujate keskmine ja ruutkeskmine viga (RMSE).

Muutuja	27051		48493	
	Keskmine	RMSE	Keskmine	RMSE
Rahvaarv (2020)	28040,800	25400,032	29209,167	24808,054
Rahvaarv (2030)	27097,296	26995,495	28226,329	26115,513
Rahvaarv (2045)	25475,389	29249,817	26536,863	28089,471
Teenuskeskus	4,74	4,632	4,938	4,577
Tõmbekeskus	1,070	0,328	1,115	0,357
Gümnaasium	3,040	2,85	3,167	2,915
Kompaktsus	0,887	0,124	0,894	0,116

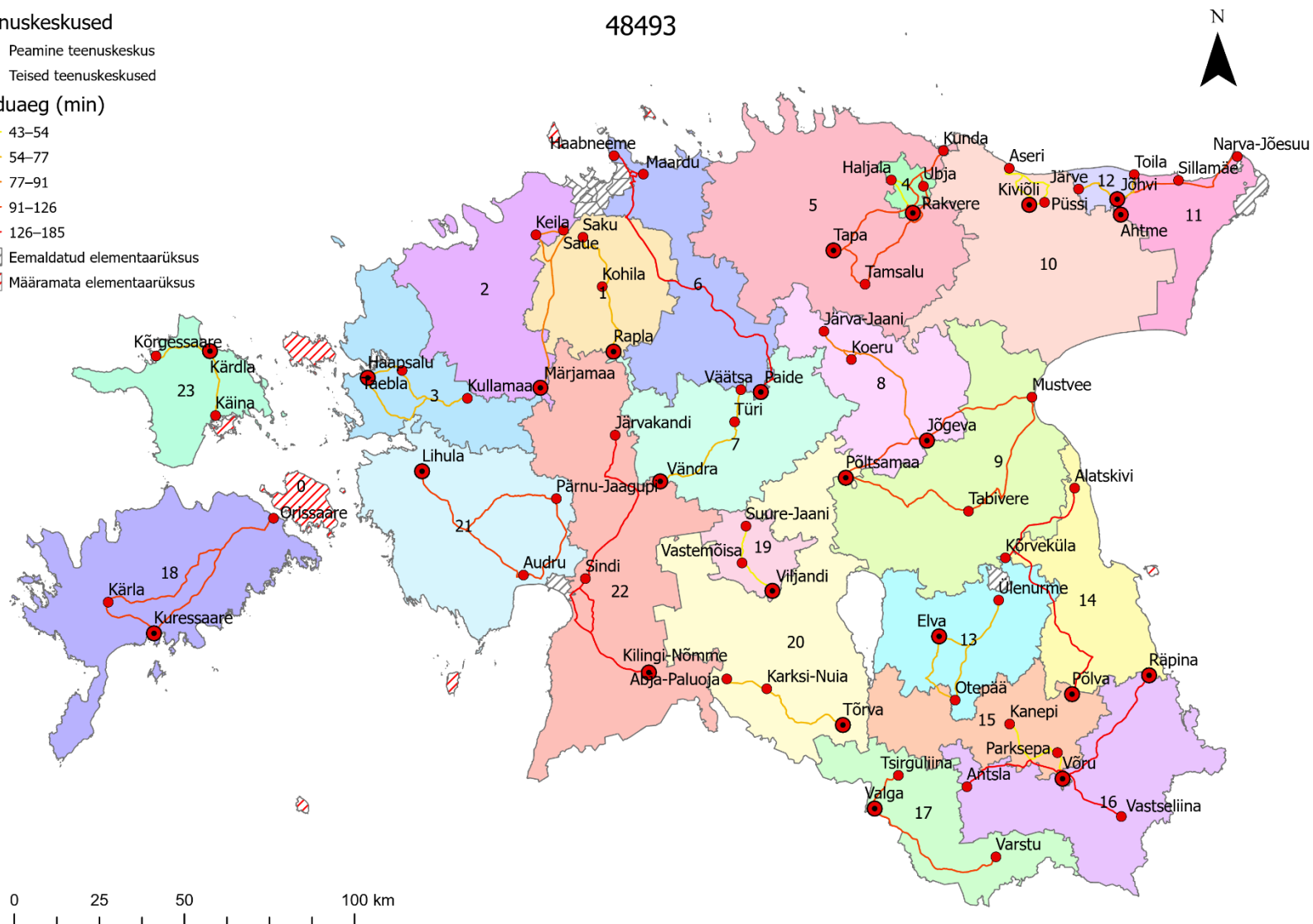
Teenuskeskused

- Peamine teenuskeskus
- Teised teenuskeskused

Sõiduaeg (min)

- 43–54
- 54–77
- 77–91
- 91–126
- 126–185

- ▨ Eemaldatud elementaarüksus
- ▨ Määramata elementaarüksus



Joonis 28. Lahendus juhusliku algväärtusega 48493.

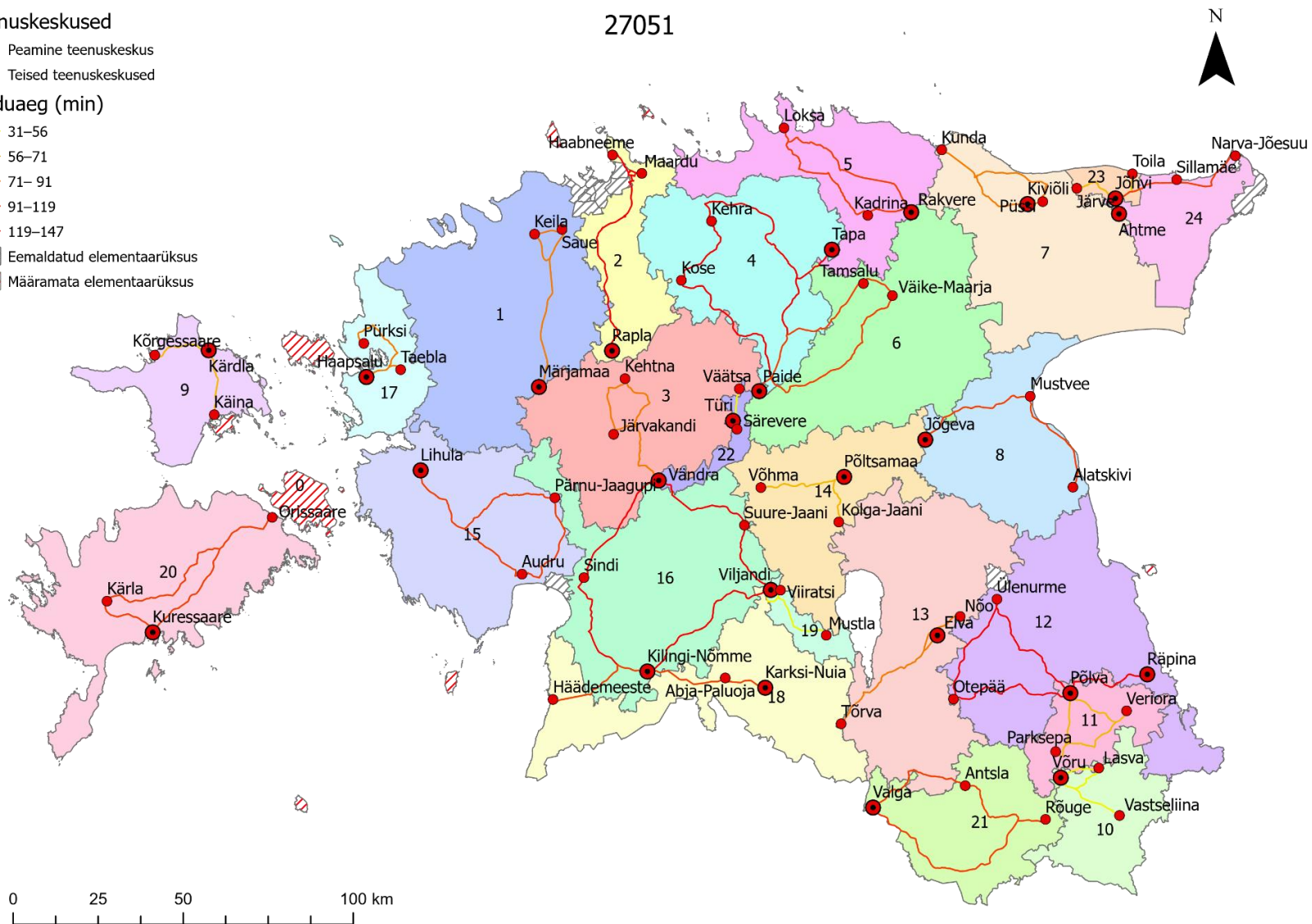
Teenuskeskused

- Peamine teenuskeskus
- Teised teenuskeskused

Sõiduaeg (min)

- 31–56
- 56–71
- 71–91
- 91–119
- 119–147

- Eemaldatud elementaarüksus
- Määramata elementaarüksus



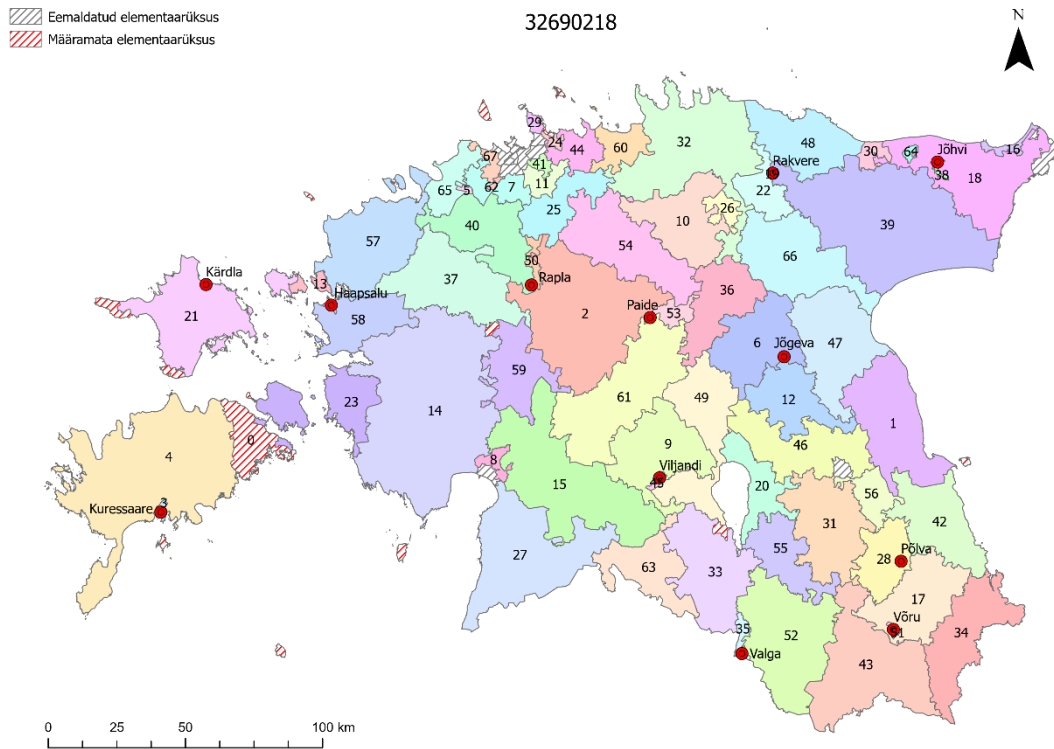
Joonis 29. Lahendus juhusliku algväärtusega 27051.

4.2. Territory Design

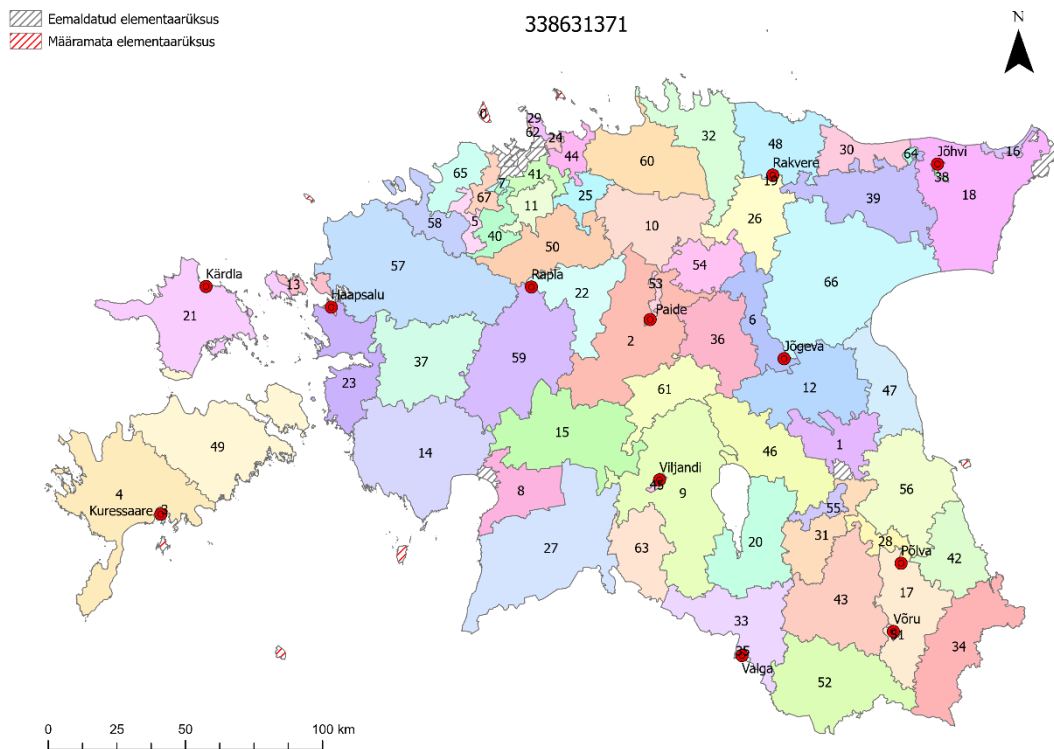
Tööriista töötusaeg lahenduse leidmisel oli ligikaudu 15 min. Mõlemas lahenduses on 67 omavalitsust ning nende kirjeldav statistika on väga sarnane. Teenuskeskuse muutujal on sama ruutkeskmine viga. Paremini on täidetud kriteeriumid, millele on seatud kõrgem kaal (tabel 13). Samas jäävad paljudes omavalitsustes rahvaarvud alla seatud ideaalväärtuse (lisad 6 ja 7). Väikesaared on mõlema lahenduse puhul jäänud määramata. Lisaks on juhusliku algväärtusega 3269028 jäänud suur osa Ida-Saaremaast ja väiksemad osad maismaast omavalitsustesse määramata. Kartograafilised lahendused on toodud välja joonistel 30 ja 31.

Tabel 13. Juhuslike algväärtuste 32690218 ja 338631371 muutujate keskmine ja ruutkeskmine viga (RMSE).

Muutuja	32690218		338631371	
	Keskmine	RMSE	Keskmine	RMSE
Rahvaarv (2020)	10309,118	3684,777	10309,118	3447,898
Rahvaarv (2030)	9962,234	3842,598	9962,234	3587,777
Rahvaarv (2045)	9365,952	4683,211	9365,952	4462,601
Teenuskeskus	1,743	0,5	1,743	0,5
Tõmbekeskus	0,393	0,748	0,393	0,735
Gümnaasium	1,118	0,533	1,118	0,56
Kompaktsus	0,163	0,838	0,170	0,834



Joonis 30. Lahendus juhusliku algväärtusega 32690218.



Joonis 31. Lahendus juhusliku algväärtusega 338631371.

4.3. AZTool

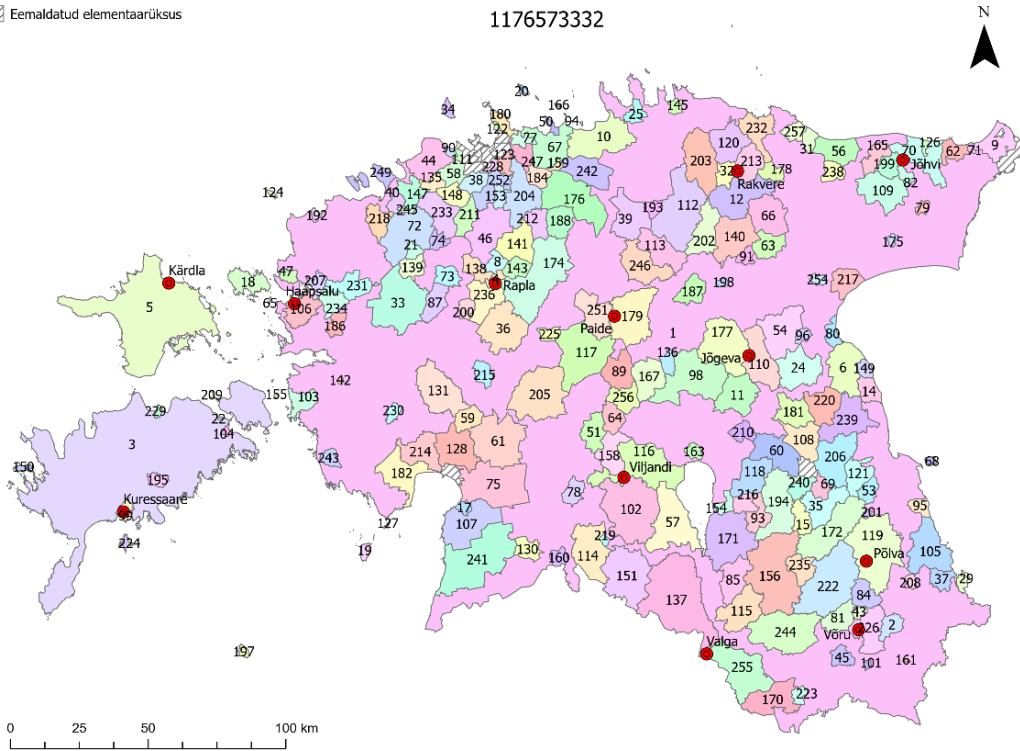
AZTool'i töötusaeg lahenduste loomiseks oli ligi 20 minutit. Juhusliku algväärtusega 1176573332 tekkis 212, algväärtusega 221253804 211 omavalitsust. Samas on väikesaared määratud eraldi omavalitsustesse, mistõttu on keeruline hinnata süsteemi kirjeldavat statistikat, kuid mõlemas lahenduses on see küllaltki sarnane. Paremini on täidetud kriteeriumid, millele on seatud kõrgem kaal (tabel 14). Juhusliku algväärtusega 1176573332 paranes tulemus viimast korda 35. iteratsioonil, algväärtusega 221253804 ainult esimesel iteratsioonil. Kartograafilised lahendused on toodud välja joonistel 30 ja 31. Moodustatud omavalitsused kasvavad lähtuvalt ühest kriteeriumist ning selle täitmisel lõpetavad kasvamise. Seetõttu on märgata üksusi, mis on väga ebaloomuliku kujuga, näiteks joonisel 31 omavalitsus „1“ ning joonisel 32 omavalitsus „2“.

Tabel 14. Juhuslike algväärtuste 1176573332 ja 221253804 muutujate keskmine ja ruutkeskmine viga (RMSE).

Muutuja	1176573332		221253804	
	Keskmine	RMSE	Keskmine	RMSE
Rahvaarv (2020)	3306,698	9045,439	3322,37	9013,714
Rahvaarv (2030)	3195,433	9009,906	3210,578	8983,177
Rahvaarv (2045)	3004,173	9046,157	3018,411	9028,143
Teenuskeskus	0,559	0,75	0,562	0,75
Tõmbekeskus	0,126	0,917	0,127	0,917
Gümnaasium	0,358	0,807	0,36	0,805
Kompaktsus	56,071	151,994	86,781	156,652

Eemaldatud elementaarüksus

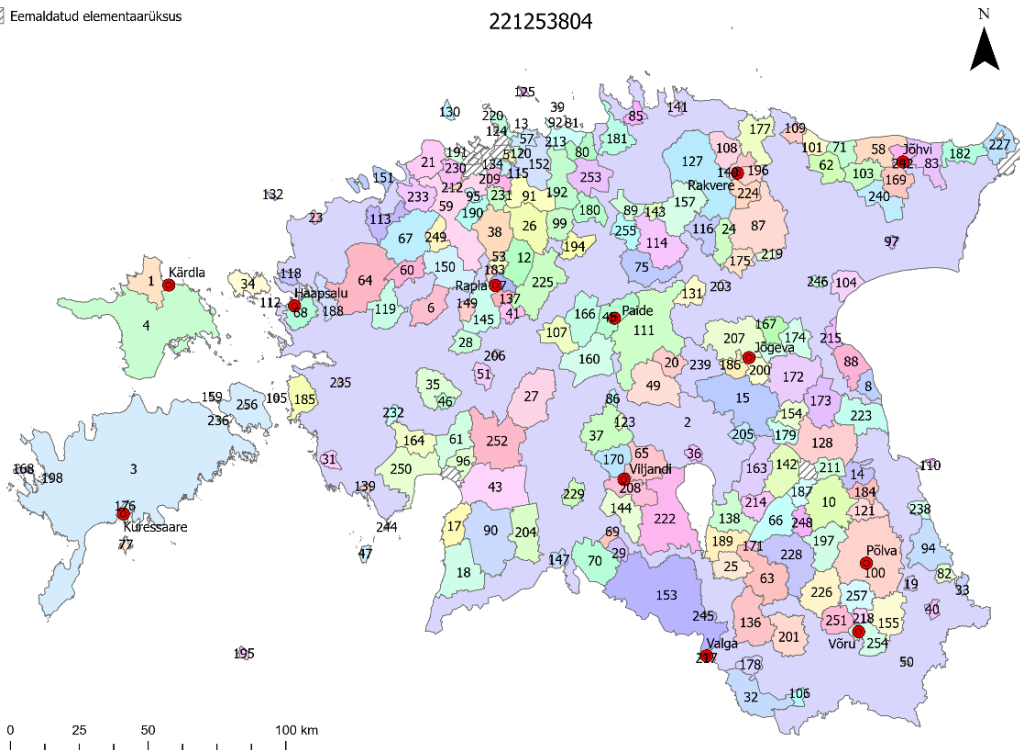
1176573332



Joonis 31. Lahendus juhusliku algväärtusega 1176573332.

Eemaldatud elementaarüksus

221253804



Joonis 32. Lahendus juhusliku algväärtusega 221253804.

5. Arutelu

5.1. Kriteeriumid

Elementaarüksuste valikust sõltub iga algoritmipõhise territooriumi kujundamise ruumiline lahendus. Suurearvulise elementaarüksuste kogumi ehk asustusüksuste kasutamine võimaldas hinnata algoritmide tulemusi ja võimekust ülesande lahendamisel. Suuremate elementaarüksuste kasutamine (näiteks kandidid või endised omavalitsused) annaks erinevaid tulemusi, kuna tegevuse moodsuga seotud andmed on agregeeritud teistmoodi. Seda nimetatakse elementaarüksuste probleemiks (*Modified Areal Unit Problem* ehk MAUP), mille Mokhele *et al.* (2016) on välja toonud loendusringkondade loomisel. Näiteks kantide kasutamine võib parandada omavalitsuste kompaktsust ja kuju, kuid seetõttu üldistatakse ka rohkem atribuutandmeid.

Kasutatud kriteeriumid põhinesid haldusreformi artiklite autorite poolt välja toodud olulistel aspektidel, mida peaks arvestama haldusterritooriumi ümberkujundamisel, KOV-i ülesannetel ja 2017. aasta haldusreformil. Andmete valikul oli oluline, et nende muutujaid on võimalik kasutada kvantitatiivselt ehk tegevuse moodsuna ja need on ühtlaselt kättesaadavad terves Eestis. Kuna tööriistad lubasid sisendandmestikuna kasutada vaid ühte objektiklassi, pidi sooritama erinevad ülekatteoperatsioonid, et anda asustusüksusele vajaminevad atribuutandmed. See tekitab aga probleeme koolide ja keskuste tegeliku ruumilise paiknemise edasiandmises omavalitsussüsteemis.

Territooriumi kujundamiseks on loodud mitmeid tööriistu ja algoritme, aga enamasti keskenduvad need ühe kriteeriumi, kompaktsuse ja külgnevuse tasakaalustamisele. Antud töö eesmärgiks oli tasakaalustada mitme muutuja sihtväärtuseid, mis teaduskirjanduse ülevaatamisel pole ruumiliste optimeerimisülesannete puhul levinud, ning arvestada ka ruumiliste piirangutega. Kuna töö uurimiseesmärk ja meetodika on ainulaadsed, on keeruline seda võrrelda teiste territooriumi kujundamise uuringutega. Küll aga kasutati ettepanekuid arvestada teenuskeskusi (Siseministerium, Statistikaamet, 2014) ning seada sihtväärtus rahvaarvu kriteeriumile (Bruno *et al.*, 2017). Mõlema uuringu puhul tõid autorid välja, et see võib aidata kaasa piirkondade moodustamisele.

Tööriistad võimaldasid määrata kaalusid, tänu millele oli võimalik eelistada ülesande lahendamisel erinevaid kriteeriume. Eriti ilmne oli selle vajadus rahvastikuproгноosil põhinevate kriteeriumite korral, kus tuleviku rahvaarv omavalitsussüsteemis pole sama tähtis kui praegune rahvaarv. Ehkki haldusreformi kriteeriumite minimaalsed väärtused olid sõnastatud kui rangete piirangutena, võimaldasid tööriistad neid siiski efektiivselt kasutada vaid nõrkade piirangutena. Rangete piirangute võimaluse seadmine puudus BBZ-s, AZTool ei väljastanud tulemust ning TD puhul põhjustas range piirangu seadmine ligi 2-tunnise töölusaja, kus paljud elementaarüksused jäid tsoonidesse määramata.

Tõmbe- ja teenuskeskuse olemasolu kriteeriumite kasutamine ja väärtuste määramine oli omavoliline, kuid tugines suuresti asustussüsteemi hierarhilisele ülesehitusele. Haldusreformiga

seonduvates artiklites pole selgesõnaliselt välja toodud, millise kriteeriumi alusel arvestada teenuskeskustega. Sellegipoolest pidas magistr töö autor vajalikuks eristada keskuste tüüpe, et suunata algoritme arvestama nii tõmbe- kui teenuskeskustega territooriumi kujundamisel. Tööriistades anti rohkem kaalu teenuskeskuse muutujale, et täita omavalitsuses esmalt teenuskeskuse vajadus ning võimaluse korral arvestada ka tõmbekeskustega. Eesmärgiks oli saavutada olukord, kus omavalitsustes ei puuduks peamine keskus ja abistavad teenuskeskused ning poleks nõrku keskuseid. Kuigi enamasti on keskustüüpide väärtused sarnased, on erinevused nähtavad Tallinna mõjualas. Näiteks Laagri ja Peetri alevikud on küll välja toodud tugevate teenuskeskustena, kuid tõmbekeskustena neid eristatud pole. Omavalitsussüsteemi moodustamine ainult teenuskeskuste baasil võib põhjustada olukorra, kus paljudes omavalitsustes puuduks tõmbekeskus. Tõmbekeskustega arvestamist on erinevad reformikavad pidanud haldusterritoriaalse korralduse muutmisel oluliseks aspektiks (peatükk 1.2.2.). Samas kui luua omavalitsussüsteem ainult tõmbekeskustele põhinedes, moodustuvad suurlinnade ümbruses liialt suured üksused, mida ei saa enam pidada optimaalseks ruumiliseks lahenduseks.

Teenuskeskuste määramine põhines Sepp *et al.* (2015) analüüsil, mille hierarhiatasemeid on kasutatud algoritmides väärtustena. Samas on sealsete hierarhiatasemed määratud maakondade kaupa, mis kallutab algoritme arvestama praeguste maakonnakeskustega. Tõmbekeskuste täpse arvu piiritlemine sõltub suuresti kasutatavast meetodikast, uuringutes on välja toonud erineval arvul tõmbekeskusi (Ahas, *et al.*, 2010; Ahas ja Silm, 2013; Siseministeerium, Statistikaamet, 2014). Siseministeeriumi ja Statistikaameti (2014) uuring oli välja toonud kergesti kasutatava tõmbekeskuste andmetabeli, mis võimaldas pärast suurlinnade eemaldamist luua kvartiilid tõmbekeskustest.

Elementaarüksustena eemaldati analüüsist Tallinn, Tartu, Narva ja Pärnu, millega külgnevaid asustusüksusi võib pidada nende lähitagamaaks, mis sõltuvad keskuskoha teenustest. Nende kaasamine aitaks paremini arvestada loogiliste keskustega, kuid suuremate asustusüksuste rahvaarvu väärtus mõjutab liialt sobivusskoori arvutamist. Lisaks puudusid antud töös pendelrände vood, mis näitaksid asustusüksuste vahelise suhte tugevust. Siiski arvestati Statistikaameti 2014. aasta toimepiirkondade uuringus välja toodud tõmbekeskuste lähivõõndeid järelanalüüsis.

Gümnaasiumi olemasolu kriteeriumit võib pidada teenuskeskuse tugevuse täienduseks, kuna kõrgema hierarhiatasemega teenuskeskustes on automaatselt olemas ka gümnaasium. Samas aitas see vältida olukorda, kus omavalitsus on moodustatud nõrkadest teenuskeskusest või on ühes omavalitsuses võrreldes teistega tunduvalt rohkem gümnaasiume. Nõrga piirangu seadmine eelistab lahendusi, kus igas omavalitsuses on ideaalis sihtväärtusega seatud arvul gümnaasiume ja gümnaasiumite arv omavalitsuste vahel erineb võimalikult vähe.

Samuti võib pidada rahvastikuprognoside loomist asustusüksustes maakonnaprognoside põhjal ebatäpseks. Sellegipoolest leiab töö autor, et see annab põhimõttelise ettekujutuse demograafilistest muutustest erinevates Eesti regioonides ning võimaldab seega arvestada tulevikuga. Kuigi 2017. aasta haldusreform ei juhindunud rahvastikuprognosist kui kriteeriumist, toodi ühe haldusreformi põhjusena välja, et demograafilised trendid näitavad elanike arvu vähenemist ääremaalistes omavalitsustes (Sepp ja Noorkõiv, 2018). Samuti on rõhutatud vajadust arvestada tuleviku arengusuundadega haldusreformi läbiviimisel (Raagmaa, 2018). Ka

teenuskeskuste uuring on kasutanud teenuskeskuste analüüsimisel maakondade rahvastikuprognose (Sepp *et al.*, 2015).

Tööriistad võimaldasid arvestada haldusreformiga seotud ruumiliste piirangutega. Kuigi haldusreformiga seonduvates artiklites ei ole välja toodud ametlikku definitsiooni omavalitsuse kujule, peetakse üksuste terviklikkust ja loomulikku kuju oluliseks (peatükk 1.2.). Seetõttu otsustati, et need peaksid olema võimalikult kompaktsed ehk ideaalis ringikujulised. Kompaktsuse kriteeriumi kasutamine täidab ka osaliselt hea ühenduvusega teedevõrgu vajadusega arvestamise. Haldusreform pidi omavalitsusüksuste haldusterritooriumi moodustamisel oluliseks lahustükkide vältimist, mida oli võimalik tööriistades külgnevustüübi määramisel edukalt teha. BBZ ja AZTool võimaldavad rakendada ka kasutaja poolt loodud külgnevusmaatriksit. Sellest lähtuvalt kasutati BBZ-s lahenduse loomiseks nii tavalist servakülgnevust kui ka modifitseeritud servakülgnevust. Tavaline servakülgnevus liidab elementaarüksuste vahelise külgnevuse puudumisel üksuse teise lähima üksusega. Seeläbi määratakse küll iga elementaarüksus tsooni, kuid tekivad tsoonid, mis ühendavad lahustükkidena saari ja maismaad. Modifitseeritud külgnevuse kasutamisel ei liida tööriist külgnevuse puudumisel üksust teise lähima elementaarüksusega. Samas oli märgata, et omavalitsustesse määramata üksused grupeeritakse tsooni 0, mida tööriist kasutab siiski sobivusskoori arvutamisel. See võib olenevalt tsoon 0 struktuurist tulemusi väga palju mõjutada ning ei anna õiget ettekujutust lahendusest. Probleemi lahendamiseks peaks leidma kirjeldava statistika vaid terviklike omavalitsuste kohta ning sobivusskoori arvutamisel arvestama ka sellega, kui suur osa elementaarüksustest jääb omavalitsustesse määramata.

Kuigi teedevõrgustikku, kihelkonnapiire ega lähitagamaid pole otseselt võimalik algoritmides optimeerimiskriteeriumina kasutada, loodi lahenduste täiendavaks analüüsiks skriptid ja sihifunktsioon. Lahenduste loomine ja nende täiendav analüüsimine on üsna aeganõudev, eriti *Network Analyst*'iga, mistõttu hinnati vaid kümnet lahendust nii tavalise servakülgnevusega kui ka modifitseeritud servakülgnevusega. Lahendused loodi lähtuvalt sisendparameetritest, mis tuvastati skriptiga *BBZ_global.py*. Teedevõrgustiku analüüs põhines rändkaupmehe ülesande lahendamisel igas tekkinud omavalitsuses ning kirjeldava statistika abil omavalitsussüsteemi hindamisel. Eesmärgiks oli pöörata tähelepanu omavalitsuste ülesannetele korraldada ühistransporti ning hoida korras teid ja tänavaid (KOKS, 1993), millega seotud liiklusvood toimuvadki peamiselt tekkinud marsruudil. Kihelkonnapiiridega ja lähitagamaaga arvestamine seisnes lõikumise tabeli loomisel omavalitsustega. Kõige sobivam on lahendus, kus on vähe lõikumisi, kattudes seega paremini kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega. Kihelkonnapiiridega arvestamist on ka varasemad haldusreformi kavad pidanud oluliseks (Kaldmäe, 2018). Datta *et al.* (2013) on territooriumi kujundamise algoritmi koostamisel kasutanud ühe sihifunktsioonina ka teiste administratiivpiiridega kattumist. Optimaalseks lahenduseks pidasid nad sellist, kus tsoonid lõikuvad omavahel võimalikult vähe, mis parandab regionaalplaneerimist ning võimaldab hoida koos sarnaste väärtushinnangutega üksusi.

Antud töös ei analüüsitud erinevate kriteeriumite mõju tulemustele, kuid erinevaid kaalusid või sihtväärtusi seades võib jõuda sobivamate tulemusteni omavalitsussüsteemi moodustades. Näiteks on haldusreformi kavades välja toodud ka kõrgemad rahvaarvu kriteeriumid (Viks, 2018). Lisaks sellele oleks võimalik keskenduda tööriistade täiendavate parameetrite uurimisele. BBZ-iga saab

moodustada ka üksused, mille tsentroidid on võimalikult samal kaugusel etteantud punktobjektist või mis on samades proportsioonides lähtuvalt kategoorilisest muutujast. TD-ga saab moodustada tsoonid, mis kasutavad mõnda muud atribuutandmete statistilist näitajat, nagu näiteks standardhälve või maksimumväärtus. AZTool'iga saab arvestada sotsiaalset homogeensust lahenduses.

5.2. Tööriistade lahendused

Töös kasutatud tööriistad loovad küllaltki erinevaid haldusterritoriaalseid lahendusi. Kriteeriumeid määrates üritati hoida need võimalikult sarnased, et paremini võrrelda saadud lahendusi. Kuigi kõik algoritmid põhinevad heuristilistel otsingumeetoditel, erineb suuresti nende täpsemate parameetrite sättimine. Näiteks BBZ puhul saab määrata geneetilise algoritmiga seonduvaid parameetreid, TD-ga lahenduse kvaliteeti ning AZTool'iga iteratsioonide arvu ja kriteeriumite tolerantsi.

Heuristiliste optimeerimisalgoritmidega kaasneb paratamatult juhuslikkus, mis teeb tulemuste hindamise keeruliseks ja puudub selge ülevaade, kas saavutati globaalse miinimumi lähedane tulemus või jäädki kinni lokaalsesse miinimumi. BBZ-iga oli võimalik luua skript tugevamate parameetrite seadmiseks; TD ja AZTool'iga sarnast võimalust polnud, kuid sellegipoolest loodi skriptid tööahelate kiirendamiseks. Töö käigus loodud skriptid lubavad kiiremini tsükliliste protsesside kaudu proovida erinevaid parameetreid, et luua uusi lahendusi või analüüsida territooriumi osasid.

Selgus, et BBZ suudab edukalt lahendada kergema optimeerimisülesande, kuid vaikeväärtused polnud piisavad, et lahendada keerukamat optimeerimisülesannet. Tööriista autorid (Esri, 2020a) on sellele võimalusele tähelepanu juhtinud, tuues välja, et olenevalt tööülesandest võib globaalse miinimumini jõudmine olla võimatu. Selle lahendamiseks peaks suurendama parameetrite väärtusi. Seejuures peab aga arvestama, et parameetrite suurendamisel muutub tööriista töötlusae aina pikemaks ning pidev kriteeriumite määramine ja tulemuste võrdlemine võib kujuneda väga aeganõudvaks. Kõiki optimeerimisprobleeme polegi võimalik samade parameetritega lahendada (Wolpert, 1997). Sellest tulenevalt loodi optimaalsete parameetrite otsimise skript, et leida omavalitsussüsteemide lahendused. Ehkki erinevas teadusvaldkonnas, tugines loodud skript osaliselt Kucukkoc, *et al.* (2013) meetodikale optimaalsete parameetrite kombinatsiooni väljaselgitamisel. Skript ei leidnud küll globaalset miinimumi, kuid aitas leida parema sobivusskooriga lahendusi kui väljastati vaikeväärtustega. Eesti asustusüksustega tekkiv otsinguruum on arvatavasti liiga suur, et globaalse miinimumini jõuda. Antud töös peeti tabelis 6 välja toodud muutujaid piisavaks etteantud ülesande lahendamiseks, arvestades töötluse ajakulu ja sobivusskoorige jäämist tolerantsipiiridesse. Joonistel 24 ja 27 välja toodud töötluse ajakulu sõltub suuresti küll kasutatava arvuti tehnilistest parameetritest, kuid annab siiski hea ülevaate, kui kaua läheb parema sobivusskooriga tulemuste leidmiseks ja kuidas suureneb ajakulu olenevalt parameetritest. Olenevalt kasutatavatest juhuslikest algväärtustest võib skript lõpetada töö ka tunduvalt varem või hiljem. Paraku selgus, et isegi pärast väljaselgitatud parameetritega tööriista

käivitamist varieerusid sobivusskoorid üsna palju, mistõttu peaks kasutama madalamat tolerantsi ja rohkemate kordustega lõpetamise kriteeriumit. Skripti on lisatud muutujad, tänu millele saab koodi taaskasutada ka teistsuguste ruumiliste optimeerimisülesannete puhul.

BBZ-iga loodi kahel erineval külgnevustüübil põhinevad lahendused, mille kirjeldavad statistikad ei erine märgatavalt. Välja toodud lahendustel on omavalitsusi 23, 24 ja 25; arvatavasti moodustavad kõik juhuslikud algväärtused sellisel arvul omavalitsusi töös kasutatud kriteeriumite ja parameetritega. Kuigi rangeid piiranguid polnud tööriistaga võimalik seada, on peaaegu igas loodud omavalitsuses ületatud sihtväärtus. Samas on märgata mitme eesmärgiga optimeerimisülesande keerukust. Nimelt on paljudes omavalitsustes mitmekordselt ületatud rahvaarvu sihtväärtus, mis tuleneb vajadusest arvestada ka keskuse olemasolu kriteeriumiga ja kompaktsusega. Järelanalüüs aitas täiendavalt sihifunktsiooni abil hinnata leitud lahendusi, näiteks tavalise servakülgnevusega on parim lahendus toodud välja joonisel 25 ja modifitseeritud külgnevusega joonisel 28. Modifitseeritud külgnevuse sõiduaegade kirjeldav statistika on tunduvalt parem kui tavalisel külgnevusel, kuna tavalise servakülgnevusega omavalitsustes esineb ka praamiliiklust. Ühtlasi oli märgata, et tavalise servakülgnevusega tulemuste töötlusaeg on pikem, kuna tööriist peab leidma omavalitsusse määramata elementaarüksuse tsentroidi ja ühendama selle lähima tervikliku omavalitsusega. Seetõttu tekivad ka üsna ebasobiliku kujuga üksused, mis ühendavad suuremaid saari ja maismaad. Tavalise servakülgnevuse probleem ilmneb joonisel 26, kus on näha, et Kihnu asustusüksused on määratud erinevatesse omavalitsustesse. Samal joonisel on ka näha, et omavalitsuse „20“ keskosa on ühendatud vaid Mustvee asustusüksusega. BBZ lahenduste puhul on üldiselt märgata, et omavalitsuste keskused paiknevad omavalitsuste äärealadel. Seda võib pidada keskus-tagamaasüsteemi vaatenurgast ebasobivaks lahenduseks (Siseministeerium, Statistikaamet, 2014; Ahas, *et al.*, 2010). Keskuste loogilise lähitagamaaga arvestamiseks range piiranguna peaks enne analüüsi esmalt välja selgitama iga keskuselise elementaarüksuse ja selle lähitagamaa ning need kokku liitma. Kuigi teenuspiirkondade ulatust on keeruline välja selgitada (Bennett, 1997; Sepp ja Noorkõiv, 2018), viiks sellega arvestamine ilmselt loogilisema haldusterritoriaalse lahenduseni.

TD-ga loodi mõlemal käivitamise korral 67 omavalitsust omavalitsussüsteemis, mille kirjeldavad statistikad eriti ei erine. TD lahendustes on näha, et omavalitsused on küll kompaktsed ja loomuliku kujuga, kuid rahvaarv jääb enamasti alla ideaalväärtuse ning mõnes omavalitsuses pole täidetud ka keskuse olemasolu kriteeriumit (lisad 6 ja 7). Sellegipoolest võib täheldada, et omavalitsused on ühtlasemad, mistõttu on muutujate ruutkeskmised vead ka väiksemad kui BBZ-l. Ilmselt lähtus tööriist sihtväärtuse jagamisest elementaarüksuste tegevuse mõõtude summaga ning saadud arv seati optimaalseks omavalitsuste arvuks. Rangete piirangute seadmisel tekkis ruumiliselt halb lahendus, kus enamik elementaarüksusi jäi omavalitsustesse määramata. Samas on märgata, et tabelis 8 välja toodud TD rangete piirangute kirjeldav statistika sarnaneb suuresti BBZ lahenduste kirjeldavale statistikale, omades kõrget rahvaarvu ruutkeskmist viga ja palju keskuseid omavalitsuses. Ka nõrkade piirangute juures on näha, et võivad tekkida lahendused, mis pole terviklikud (joonis 30), mistõttu ei rakendatud lahendustele ka järelanalüüsi. Lahenduste täpsem hindamine on keeruline, kuna tööriist ei väljasta sobivusskoore. Kui üldistatult võrrelda BBZ ja TD lahendusi 2012. aastal välja toodud haldusreformi mudelitega (Viks, 2018), siis sarnaneb BBZ enim tõmbekeskuste ja maakondade ning TD väikevaldade ja kihelkondade

mudeliga. Samas ei saa tööriistade lahendusi võrrelda näiteks praeguse omavalitsussüsteemiga, mis tugines peamiselt 5000 inimese miinimumkriteeriumi täitmisele, millele rakendati ka mitmeid erandeid.

AZTool'iga löid juhuslikud algväärtused 211 ja 212 omavalitsust, mis samuti ei erine kirjeldavate statistikate poolest. AZTool'iga määratakse kõik lahustükid eraldi omavalitsuseks, mistõttu tekib palju üksusi, kus pole ühte või mitut kriteeriumit üldse arvestatud. Seetõttu on süsteemi tervikuna keeruline hinnata. Samuti paistavad silma suure ja ebaloomulikuma kujuga omavalitsused, mis on kasvanud ainult rahvaarvu kriteeriumit silmas pidades. Kuigi AZTool'iga saab sättida iteratsiooni parameetreid, ei parandaks arvatavasti ka see tulemusi. Nimelt ei paranenud tulemused hilisematel iteratsioonidel märkimisväärselt.

Nii TD kui ka AZTool'i puhul võib lahenduste leidmise ebaõnnestumine tuleneda paralleeltöötamise võimalikkusse puudumisest. Väiksemal skaalal ja vähemate kriteeriumitega võivad tööriistad siiski omada potentsiaali haldusterritooriumi moodustamisel, pöörates tähelepanu ka rangete piirangute ja tolerantside määramisele.

BBZ ja TD dokumentatsiooni uurides selgus, et tegemist on praeguseks veel üsna uute tööriistadega, kus on iga tarkvarauuendusega lisandunud parameetreid. Siiski puuduvad tööriistades praegu paljud võimalused, mis on olulised haldusterritooriumi kujundamisel. Seetõttu pidi näiteks lähitagamaaga ja teedevõrgustikuga arvestama järelanalüüsis, mis tekitab kahtlemata probleeme, kuna need polnud otseselt tööriista algsed kriteeriumid. Samas kui luua tsüklilise protsessi kaudu suurel arvul globaalse miinimumi lähedasi territoriaalsüsteeme ja neid hinnata järelanalüüsis, oleks ka selgemini võimalik eristada sobivamaid omavalitsusüksuste piiritlemise lahendusi. Antud töös kasutati vaid algset metoodikat selle tegemiseks, sest keeruliste optimeerimisülesannete lahendamine sõltub väga palju arvutusvõimekusest. Haldusreformiga väljatoodud eranditega arvestamist ei pidanud töö autor vajalikuks, sest saarelisuse ja kultuurilise eripära erandeid võib näha kui range piiranguna, mistõttu peaks nendega seotud elementaarüksused juba enne analüüsi eemaldama. Väikesaarte kaasamine võimaldas aga hinnata, kuidas lahendavad algoritmid mitmete lahustükkide probleemi.

Haldusterritoriaalse reformi läbiviimine tugineb paratamatult subjektiivsusele ning plaanide hindamine ja kriteeriumite määramine on keeruline. Antud töös piiritleti kohalike omavalitsusüksusi geoinformaatilisest vaatenurgast, millel on küll puudusi, kuid heuristilised otsingumeetodid on pidevalt arenev valdkond ja tulemused BBZ-iga näitasid, et see on piisavalt võimekas seesuguse keerulise ruumilise optimeerimisülesande lahendamiseks ja abistamiseks. Lõpetuseks on oluline mainida ka Altman (1997) väljatoodut, et kuigi automatiseeritud algoritmid suudavad paremini ja kiiremini moodustada administratiivpiire kui manuaalsed meetodid, peaks neid pigem kasutama abivahendina plaanide loomisel ja lõpliku otsuse peaksid tegema siiski eksperdid.

6. Järeldused

Antud töö eesmärgiks oli välja selgitada, milliseid omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemise lahendusi annavad etteantud kriteeriumite ja parameetrite põhjal territooriumi kujundamise tööriistad ning millised on algoritmilise lähenemise peamised eelised ja puudused. Selle täitmiseks vaadeldi tööriistade võimalusi kriteeriumite määramisel (1), selgitati välja sobivaim tööriist omavalitsusüksuste piiritlemiseks (2) ning uuriti täiendavaid võimalusi lahenduste analüüsimiseks (3).

1. Analüüsitud tööriistade puhul saab kasutada vaid kvantitatiivseid kriteeriume, mille peab seadma lähtuvalt elementaarüksuste muutuja tegevuse mõõdu sihtväärtusest. Efektiivselt sai kasutada vaid nõrku piiranguid, rangete piirangute ehk minimaalse või maksimaalse väärtuse seadmine tööriistades ei õnnestunud. Tööriistad võimaldavad kasutada vaid ühte objektiklassi sisendandmestikuna. Seetõttu peab eelnevalt ühildama elementaarüksused teiste geograafiliste üksustega, et arvestada kõigi seatud kriteeriumitega. Kõigi tööriistadega saab määrata erineva osakaalu kriteeriumitele ning arvestada seda ka lahenduse leidmisel. Tööriistad on väga võimekad ruumiliste piirangutega ehk külgnõuetega ja kompaktsusega arvestamisel. BBZ-iga loodud modifitseeritud servakülgnõue aitab luua sobilikuma kujuga omavalitsusüksusi kui tavaline servakülgnõue. Kuigi tööriistades on ka teisi parameetreid territooriumi kujundamiseks, ei sobinud need kokku töö eesmärgiga. Tööriistades puuduvad parameetrid teistsuguste andmetüüpidega arvestamiseks, mistõttu ei saanud kasutada näiteks teenuspiirkondi, teedevõrgustikku või kihelkonnapiire.

2. Kohalike omavalitsusüksuste piiritlemise keerukuse ja mitmete eesmärkide tõttu kasutati selle lahendamiseks heuristilisi otsingumeetodid, seda nii territooriumi kujundamisel kui ka teedevõrgustiku analüüsimisel. Tööriistad andsid küllaltki erinevaid haldusterritoriaalseid lahendusi ja nende genereerimise töötlusaeg on suhteliselt pikk. Kõige sobilikumaid tulemusi andis geneetilisel algoritmil põhinev BBZ, mis annab kasutajale tagasisidet ka lahenduste sobivusskooride kohta. Lahenduste loomisel määrati generatsioonide arv ja algpopulatsiooni suurus koodiga. AZTool ja TD ei suutnud etteantud skaalal tulemust edukalt lahendada ehk mitut eesmärki tasakaalustada ning tagasiside lahenduse kvaliteedi kohta on AZTool'il puudulik ja TD-l puudub. Need tööriistad on arvatavasti sobilikumad väiksemal skaalal ja vähemate kriteeriumitega.

3. Täiendavaks analüüsiks oli võimalik kasutada *Network Analyst* laiendust ja tööriista *Tabulate Intersection*, vastavalt rändkaupmehe probleemi lahendamiseks ning kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivõõnditega lõikumise väljaselgitamiseks. Kasutatud meetoditega ei muudetud küll olemasolevaid lahendusi, kuid tööriistade kirjeldava statistika põhjal loodi sihifunktsioon, mille abil selgitati välja parim lahendus lahenduste kogumist.

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärgiks oli välja selgitada, milliseid omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemise lahendusi annavad etteantud kriteeriumite ja parameetrite põhjal territooriumi kujundamise tööriistad ning millised on algoritmilise lähenemise peamised eelised ja puudused. Pärast teaduskirjanduse ülevaatamist selgus, et haldusterritoriaalse reformi läbiviimisel puuduvad universaalselt kokkulepitud kriteeriumid ja algoritmilist lähenemist pole üheski riigis kasutatud. Sellegipoolest peetakse oluliseks luua ühtlane territoriaalsüsteem, mis arvestab rahvastiku paiknemisega, keskuskohtadega ja ruumiliste piirangutega. Ruumilised optimeerimismeetodid sarnanevad eesmärkide poolest haldusterritoriaalse reformiga. Töös katsetati ülesande lahendamiseks kolme heuristilisel otsingumeetodil põhinevat territooriumi kujundamise GIS-tööriista: ArcGIS Pro *Build Balanced Zones* (BBZ) ja *Territory Design* (TD) ning vabavaraline AZTool.

Territooriumi kujundamine on NP-raske ruumiline optimeerimisprobleem, mis põhineb elementaarüksuste muutujate tegevuse mõõdu tasakaalustamisel. Magistritöös kasutati elementaarüksustena Statistikaameti asustusüksusi. Kuna asustusüksustel puuduvad osad sobilikud atribuutandmed, mida saab kasutada tegevuse mõõduna, oli vajalik ühendada omavahel erineva geograafilise suurusega üksused. Omavalitsussüsteemi loomise kriteeriumiteks valiti rahvaarvude (aastad 2020, 2030 ja 2045) 11 000 elaniku sihtväärtus, gümnaasiumi, tõmbe- ja teenuskeskuse olemasolu ning ruumiliselt terviklik kuju omavalitsuses. Kriteeriumid põhinesid enamjaolt 2017. aasta haldusreformil, kohaliku omavalitsuse ülesannetele ja ekspertarvamusele. Tööriistad ei suutnud anda sobilikke lahendusi rangete piirangutega, mistõttu kasutati nõrku piiranguid. Sihtväärtustele sai seada ka erinevaid osakaalusid, mis aitasid suunata algoritme arvestama rohkem antud töös olulisemaks peetud muutujatega, nagu praegune rahvaarv ning gümnaasiumi ja teenuskeskuste olemasolu. Kõik tööriistad pakkusid võimalust kasutada servakülgnest, mida peetakse omavalitsusüksuste piiritlemisel pidada kõige sobilikumaks. Kompaktsuse leidmisel kasutavad algoritmid erinevaid valemite, kuid kõigi puhul on ideaalseks kujuks ring. Ükski tööriist ei võimaldanud arvestada teiste oluliste aspektidega haldusterritooriumi piiritlemisel, nagu lähitagamaa, kihelkonnapiirid ja teedevõrgustik. Sellegipoolest loodi sihifunktsioon, mis arvestas ka nende muutujatega.

Töö tulemustest selgus, et geneetilisel algoritmil põhinev BBZ annab kõige sobivamaid lahendusi, kuna arvestab omavalitsuste moodustamisel kõigi seatud kriteeriumitega ja moodustab ruumiliselt terviklikud omavalitsusüksused. Tööriist annab sobivusskoori kaudu kasutajale ka piisavalt tagasisidet tulemuste hindamiseks. Tööriista sisendparameetrid määrati koodiga, mis tuvastas generatsioonide arvu ja algpopulatsiooni suuruse, kus hoolimata kasutatud juhuslikust algväärtusest jäävad lahenduste sobivusskoorid tolerantsipiiridesse. BBZ omavalitsuste piiritlemisel kasutati kahte tüüpi servakülgnest. Tavaline servakülgnest võib luua ebasobiliku kujuga omavalitsusi, liites lahustükkidena elementaarüksused lähima tervikliku omavalitsusega. Seetõttu kasutati ka modifitseeritud servakülgnest, kust eemaldati külgnestussuhted elementaarüksuste vahel, mille omavaheline piir on alla 250 m. BBZ-iga välja toodud lahendustes on 23 kuni 25 omavalitsust ning enamjaolt on seal ka kõik kriteeriumid täidetud. Kuigi saadud

lahendusi muuta polnud võimalik, kasutati järelanalüüsi, et välja selgitada, milline lahendus täidab lahenduste kogumist kõige paremini sihifunktsiooni kriteeriumit. Sihifunktsiooni muutujad põhinesid kirjeldaval statistikal, mis saadi rändkaupmehe probleemi lahendustest omavalitsussüsteemis ning lõikumistest kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega. Eesmärgiks oli leida omavalitsussüsteem, kus on võimalikult ühtlane ja madal sõiduaeg ning kattub võimalikult palju kihelkondadega ja tõmbekeskuste lähivöönditega. Teised tööriistad, TD ja AZTool, ei saanud mitme eesmärgi tasakaalustamisega niivõrd edukalt hakkama. Saadud tööriistad moodustasid süsteeme, kus paljudes omavalitsustes ei arvestatud etteantud kriteeriumitega või kus osa elementaarüksustest jäi omavalitsustesse määramata.

Halduspoliitika osa on haldusreform, mille eesmärgiks on luua võimekamad kohalikud omavalitsused. Haldusreformi läbiviimine tugineb paratamatult subjektiivsusele ning plaanide hindamine ja kriteeriumite määramine on keeruline. Töö autor leiab, et geneetilisel algoritmil põhinev BBZ on võimekas tööriist kvantitatiivsete kriteeriumitega arvestamisel ning seesuguse keerulise ruumilise optimeerimisülesande lahendamisel. Teiste sihtväärtuste ja kaalude seadmisega võib leida veelgi sobivamaid omavalitsussüsteemide lahendusi. Haldusterritoriaalse reformi läbiviimisel vähemalt osaliselt algoritmide, töö käigus loodud skriptide ja GIS-i kaasamine võib aidata piiritleda efektiivsemalt kohalike omavalitsusüksuste haldusterritooriumi.

Delineation of local government units' administrative territory with spatial optimization methods

Andres Kasekamp

Summary

The aim of this master's thesis was to find out how territory design tools delineate local government units based on specified criteria and parameters, and what are the main advantages and disadvantages of an algorithmic approach. After reviewing research papers, it was found that there are no universally recognizable criteria for administrative-territorial reform and an algorithmic approach has not been implemented. However, creating a balanced local government system with respect to service centers, population distribution, and spatial integrity constraints is seen as preferable. Spatial optimization algorithms are concerned with solving problems conceptually similar in objectives. For that reason, three GIS territory design tools based on heuristic search methods were used: ArcGIS Pro's Build Balanced Zones (BBZ) and Territory Design (TD), and open-source software AZTool.

To achieve the aim of the research, the following research questions were stated:

- 1) How to set and adjust administrative-territorial reform criteria in geographic information systems?
- 2) What tool is the most suitable in delineating local government units' administrative territory?
- 3) What additional spatial optimization methods can be implemented in the analysis of solutions?

Territory design is an NP-hard spatial optimization problem based on balancing the activity measures of variables in basic areal units. For this study, settlements from Statistics Estonia were selected as the basic areal units. However, as the settlements lack some of the necessary attribute data to set the criteria, several spatial operations were conducted to join datasets on a different spatial scale. Design criteria for the local government system were set to be the population's (in years 2020, 2030, and 2045) target value of 11 000 people, the presence of a gymnasium, commuting and service center, and maintaining spatial integrity in local government unit. As the tools could not successfully generate an output with hard constraints, soft constraints were used instead. Different weights were given to the variables deemed more important, such as population in 2020, the presence of a gymnasium and service center. Rook contiguity was seen as the most preferable contiguity type in delineating local government units. The tools use different compactness measures, but the ideal shape for all of them is a circle. None of the tools had parameters to consider other important aspects in delineating local government units, such as service areas, parishes, and road networks. However, an objective function was created to take road networks, parishes, and suburban areas into account.

It was found that the Build Balanced Zones, which is based on a genetic algorithm, generates the most appropriate spatial solutions, and takes all the criteria into account. Also, the tool gives

feedback to the user in the form of a fitness score. The tools' input parameters – the number of generations and population size – were determined with a code. The code was based on iteratively running the tool and finding out when, despite the random seed used to initialize the process, all the fitness scores stay within a tolerance limit. Two types of rook contiguity were used in delineating local government units. In addition to default rook contiguity, modified rook contiguity was created by removing adjacency relations between units where the boundaries are more than 250 meters. The default rook contiguity may lead to undesirable local government units. BBZ produced 23 to 25 local government units. After the initial optimization process, the tool was run 10 times with both contiguity types and an objective function was used to assess the results. The objective function variables were derived from the descriptive statistics produced by the traveling salesman problem and intersections with parishes and suburban areas. Although redesigning the solutions was not possible, the underlying idea was to determine which solution from a group of solutions overlaps the most with parishes and suburban areas while also having a uniform and low drive time. Other tools, Territory Design and AZTool, were not as successful in solving the task. Most of the local government units did not meet the criteria in resulting local government systems, and some of the basic areal units were left unassigned.

Administrative-territorial reform is a part of administrative policy, intending to create more capable local governments. Administrative-territorial reform is usually based on subjective opinion, and the evaluation of plans and setting the criteria is a difficult undertaking. The author of the thesis finds that Build Balanced Zones is a capable tool when using quantitative variables in solving the spatial optimization problem presented. Various scripts written during this thesis could help delineate local government units. Setting different target values and weights could lead to more desirable results. Using algorithms and GIS when conducting an administrative-territorial reform could help in delineating local government units' administrative territory.

Tänuavaldused

Täna juhendajat Raivo Aunapit, kes pakkus teema välja ja jagas asjakohaseid soovitusi töö kirjutamise jooksul. Täna ka Annit ja NLT-d, kes aitasid kirjavigu ja sõnastust parandada.

Kasutatud kirjandus

- Aas, A., Korb, M. ja Aab, J. (2018). Mis haldusreformis õnnestus, mis jäi tegemata? S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine* (lk 613–622). Tallinn: Menu Meedia.
- Ahas, R. ja Silm, S. (2013). Regionaalse pendelrände kordusuuring. Tartu Ülikool. Viimati vaadatud 03.03.2021, http://kodu.ut.ee/~siiri/Pendelr%C4nde%20kordusuuring_3.pdf
- Ahas, R., Silm, S., Leetmaa, K., Tammaru, T., Saluveer, E., Järv, O., Tammiksaar, E., Aasa, A., Tiru, M. ja Tähepõld, A. (2010). Regionaalne pendelrändeuuring. Lõpparuanne. Siseministeerium. Viimati vaadatud 03.03.2021, https://mobilitylab.ut.ee/wp-content/uploads/2013/04/Regionaalne-pendelr%C3%A4ndeuuring_TU_2010.pdf
- Allers, M. A. ja Geertsema, J. B. (2016). The effects of local government amalgamation on public spending, taxation, and service levels: Evidence from 15 years of municipal consolidation. *Journal of Regional Science*, 56(4), 659–682.
- Altman, M. (1997). The computational complexity of automated redistricting: Is automation the answer. *Rutgers Computer & Tech. LJ*, 23, 81.
- Bacao, F., Lobo, V. ja Painho, M. (2005). Applying genetic algorithms to zone design. *Soft Computing*, 9(5), 341–348.
- Bennett, R. J. (1997). Administrative systems and economic spaces. *Regional Studies*, 31(3), 323–336.
- Biswas, S., Chen, F., Chen, Z., Lu, C. T. ja Ramakrishnan, N. (2020). Incorporating domain knowledge into Memetic Algorithms for solving Spatial Optimization problems. C-T. Lu, F. Wang ja G. Trajcevski (toim.), *Proceedings of the 28th International Conference on Advances in Geographic Information Systems* (lk 25–35). New York: Association for Computing Machinery.
- Bruno, G., Genovese, A. ja Piccolo, C. (2017). Territorial amalgamation decisions in local government: Models and a case study from Italy. *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 61–72.
- Butsch, A., Kalcsics, J., & Laporte, G. (2014). Districting for arc routing. *INFORMS Journal on Computing*, 26(4), 809–824.
- Christaller, W. (1933). Die Zentralen Orte in Süddeutschland: eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmässigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mid städtischen Funktionen. Jena: Fischer.
- Cockings, D. (2021) Principles of automated zone design. National Centre for Research Methods online learning resource. Viimati vaadatud 07.03.2021, <https://www.ncrm.ac.uk/resources/online/all/?main&id=20416>

- Cockings, S., Harfoot, A., Martin, D. ja Hornby, D. (2011). Maintaining existing zoning systems using automated zone-design techniques: methods for creating the 2011 Census output geographies for England and Wales. *Environment and Planning A*, 43(10), 2399–2418.
- Corcoran, C. ja Saxe, K. (2014). Redistricting and district compactness. *The Mathematics of Decisions, Elections, and Games*, Providence: American Mathematical Society, 1–16.
- Datta, D., Figueira, J. R., Gourtani, A. M., & Morton, A. (2013). Optimal administrative geographies: an algorithmic approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 47(3), 247–257.
- De Falco, I., Della Cioppa, A. ja Tarantino, E. (2002). Mutation-based genetic algorithm: performance evaluation. *Applied Soft Computing*, 1(4), 285–299.
- Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T. ja Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106040.
- Drew, J. (2020). Boundary Change. *Reforming Local Government* (lk 53–72). Singapur: Springer.
- Eagleson, S., Escobar, F. ja Williamson, I. (2002). Hierarchical spatial reasoning theory and GIS technology applied to the automated delineation of administrative boundaries. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(2-3), 185–200.
- Ebinger, F., Kuhlmann, S. ja Bogumil, J. (2019). Territorial reforms in Europe: effects on administrative performance and democratic participation. *Local Government Studies*, 45(1), 1–23.
- Eesti Hariduse Infosüsteem. (2020). Õppeasutuse otsing. Viimati vaadatud 03.03.2021, <https://enda.ehis.ee/avalik/avalik/oppeasutus/OppeasutusOtsi.faces>
- Eesti territooriumi haldusjaotuse seadus. 1995. RT I 1995, 29, 356. Viimati vaadatud 13.09.2020, <https://www.riigiteataja.ee/akt/1011706>
- Eiben, A. E. ja Smith, J. E. (2015). *Introduction to evolutionary computing* (lk 1–9; 25–46; 99–101). Berliin: Springer.
- El-Sherbeny, N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University-Science*, 22(3), 123–131.
- Esri kodulehekülg. (2020a). How Build Balanced Zones works. Viimati vaadatud 28.11.2020, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/learnmore-buildbalancedzones.htm>
- Esri kodulehekülg. (2020b). ArcGIS Network Analyst. Viimati vaadatud 03.03.2021, <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-network-analyst/overview>
- Esri kodulehekülg. (2020c). Territory Design. Viimati vaadatud 19.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/business-analyst/what-is-territory-design.htm>

- Gibbs, M. S., Maier, H. R. ja Dandy, G. C. (2011). Relationship between problem characteristics and the optimal number of genetic algorithm generations. *Engineering Optimization*, 43(4), 349–376.
- Grubestic, T. H. (2008). Zip codes and spatial analysis: Problems and prospects. *Socio-economic planning sciences*, 42(2), 129–149.
- Haldusreformi seadus. 2016. RT I, 21.06.2016, 1. Viimati vaadatud 14.09.2020, <https://www.riigiteataja.ee/akt/121062016001>
- Houlberg, K. (2010). Municipal size, economy, and democracy. P. Swianiewicz (toim.), *Territorial consolidation reforms in Europe* (lk 309–332). Budapest: OSI/LGI.
- Jauhiainen, J. S. (2005). Linnageograafia (lk 101–103). Tallinn: Eesti Kunstiakadeemia.
- Kalcsics, J., Nickel, S. ja Schröder, M. (2005). Towards a unified territorial design approach—Applications, algorithms and GIS integration. *Top*, 13(1), 1–56.
- Kalcsics, J. ja Ríos-Mercado, R. Z. (2019). Districting problems. G. Laporte, S. Nickel, F. Saldanha da Gama (toim.), *Location science* (lk 705–743). Cham: Springer.
- Kaldmäe, M. (2018). Eesti haldusterritoriaalse korralduse ümberkujundamise kavad 1989–2005. S. Valner (toim), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine* (lk 323–342). Tallinn: Menu Meedia.
- Kallasmaa M., Saar E., Päll P., Joalaid M., Kiristaja A., Ernits E., Faster M., Puss F., Laansalu T., Alas M., Pall V., Blomqvist M., Kuslap M., Šteingolde A., Pajusalu K. ja Sutrop U. (2016). P. Päll ja M. Kallasmaa (toim.). *Eesti kohanimeraamat*. Tallinn: Eesti Keele Sihtasutus.
- Kohaliku omavalitsuse korralduse seadus. 1993. RT I, 26.03.2013, 6. Viimati vaadatud 13.09.2020, <https://www.riigiteataja.ee/akt/126032013006>
- Kucukkoc, I., Karaoglan, A. D. ja Yaman, R. (2013). Using response surface design to determine the optimal parameters of genetic algorithm and a case study. *International Journal of Production Research*, 51(17), 5039–5054.
- Li, H., & Alidaee, B. (2016). Tabu search for solving the black-and-white travelling salesman problem. *Journal of the Operational Research Society*, 67(8), 1061–1079.
- Maa-amet. (2020). Aadressiandmete geokodeerimise teenus. Viimati vaadatud 03.03.2021, <https://inaadress.maaamet.ee/geocoder/bulk>
- Mikli, A. (2018). 2017. aasta haldusreformi õppetunnid. S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine* (lk 593–610). Tallinn: Menu Meedia.
- Mokhele, T., Mutanga, O. ja Ahmed, F. (2016). Development of census output areas with AZTool in South Africa. *South African Journal of Science*, 112(7-8), 1–7.

- Moreno, S., Pereira, J., & Yushimito, W. (2020). A hybrid K-means and integer programming method for commercial territory design: a case study in meat distribution. *Annals of Operations Research*, 286(1), 87–117.
- Mäeltsemees, S. (2018). Mis ja miks võinuks olla teistmoodi 2017. aasta haldusreformi ettevalmistuses? S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine*. (lk 113–121). Tallinn: Menu Meedia.
- Mäeltsemees, S. (2006a). Kohalik omavalitsus: mõiste, koht avalikus halduses ja ajalooline areng. *Estonica: Entsüklopeedia Eestist*. Viimati vaadatud 01.11.2020, http://www.estonica.org/et/Riik/Kohalik_omavalitsus:_m%C3%B5iste,_koht_avalikus_halduses_ja_ajalooline_areng/
- Mäeltsemees, S. (2006b). Kohalik omavalitsus: haldusterritoriaalne jaotus ja korraldus. *Estonica: Entsüklopeedia Eestist*. Viimati vaadatud 01.11.2020, http://www.estonica.org/et/Riik/Kohalik_omavalitsus:_haldusterritoriaalne_jaotus_ja_korraldus/
- Noorkõiv, R. ja Ristmäe, K. (2014). Kohaliku omavalitsuse üksuste võimekuse indeks 2013. Tartu: Geomeedia.
- OECD. (2010). Regional Development Policy Trends in OECD Member Countries. *Regional Development Policies in OECD Countries* (lk 9–41). Pariis: OECD Publishing.
- Openshaw, S. (1977). A geographical solution to scale and aggregation problems in region-building, partitioning and spatial modelling. *Transactions of the institute of british geographers*, 459–472.
- Plüschke-Altöf, B., Loewen, B. ja Leetmaa, K. (2020). Keskuse ja ääremaa lõhe Eestis. H. Sooväli-Sepping (toim.), *Eesti inimarengu aruanne 2019/2020* (lk 44–55). Tallinn: SA Eesti Koostöö Kogu.
- Raagmaa, G. (2018). Kuivõrd haldusreform arvestas asustuse pikaajalise ümberkujunemise ja kohtade globaalse konkurentsivõimega? S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine* (lk 345–374). Tallinn: Menu Meedia.
- Raagmaa, G. (2011). Mitmest tükist koosneb Eesti? M. Servinski (toim.). *Eesti piirkondlik areng 2011* (lk 174–180). Tallinn: Statistikaamet.
- Rahandusministeeriumi kodulehekülj.* (2019). Viimati vaadatud 10.10.2020, <https://www.rahandusministeerium.ee/et/kov/haldusreform>
- Riigikontrolli aastaaruanne Riigikogule. (2020). Esmatähtsate avalike teenuste tulevik. Tallinn. Viimati vaadatud 03.03.2021, https://www.riigikontroll.ee/Portals/0/Upload/RVKS2020/RVKS_06.11.2020_TRYKKI_LOPP.pdf
- Roeva, O., Fidanova, S., & Paprzycki, M. (2015). Population size influence on the genetic and ant algorithms performance in case of cultivation process modeling. S. Fidanova (toim.), *Recent advances in computational optimization* (lk 107–120). Cham: Springer.

- Sepp, V. (2018). Eesti uus territoriaalne muster. S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine* (lk 535–552). Tallinn: Menu Meedia.
- Sepp, V. ja Noorkõiv, R. (2018). Haldusreformi kesksete kriteeriumide valik: kuidas tuli 5000 ja 11000 elaniku nõue. S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine* (lk 123–160). Tallinn: Menu Meedia.
- Sepp, V., Kivi, T., Puolokainen, T., Tali, T., Themmas, E., Valgma, Ü. (2015). Uuring era- ja avalike teenuste ruumilise paiknemise ja kättesaadavuse tagamisest ja teenuste käsitlemisest maakonnaplaneeringutes. Tartu: Tartu Ülikool.
- Siseministeerium. (2001). Haldusreform kohaliku omavalitsuse valdkonnas. Strateegia. Viimati vaadatud 03.03.2021, https://haldusreform.fin.ee/static/sites/3/2012/09/2001_haldusreform-kov-valdkonnas-strateegia.pdf
- Siseministeerium, Statistikaamet. (2014). Toimepiirkondade määramine. Koostajad A. Tõnurist, M. Servinski ja Ü. Valgma. Viimati vaadatud 03.03.2021, <https://www.stat.ee/dokumentid/77742>
- Steiner, R. ja Kaiser, C. (2017). Effects of amalgamations: evidence from Swiss municipalities. *Public Management Review*, 19(2), 232–252.
- Statistikaamet. (2020). Statistikaameti kaardirakendus. Viimati vaadatud 03.03.2021, <https://estat.stat.ee/StatistikaKaart/VKR>
- Statistikaamet. (2019). RV087: Prognoositav rahvaarv aastani 2045 maakonna ja vanuserühma järgi. Viimati vaadatud 03.03.2021, https://andmed.stat.ee/et/stat/rahvastik_rahvastikunaitajad-ja-koosseis_rahvaarv-ja-rahvastiku-koosseis/RV087
- Swianiewicz, P. (2018). If territorial fragmentation is a problem, is amalgamation a solution?—Ten years later. *Local Government Studies*, 44(1), 1–10.
- Swianiewicz, P., Gendźwiłł, A. ja Zardi, A. (2017). Territorial reforms in Europe: Does size matter. Strasbourg: Centre of Expertise for Local Government Reform, Council of Europe
- Sörensen, K., ja Glover, F. (2013). Metaheuristics. *Encyclopedia of operations research and management science*, 62, 960–970.
- Taluste, O. (2018). Haldusreformi alused ja õiguslikud valikud. S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine*. (lk 69–110). Tallinn: Menu Meedia.
- Tammiksaar, E., Jauhiainen, J. S., Pae, T., ja Ahas, R. (2018). Edgar Kant, Estonian geography and the reception of Walter Christaller's central place theory, 1933–1960. *Journal of Historical Geography*, 60, 77–88.
- Tavares, A. F. (2018). Municipal amalgamations and their effects: A literature review. *Miscellanea Geographica*, 22(1), 5–15.
- Tong, D., ja Murray, A. T. (2012). Spatial optimization in geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(6), 1290–1309.

Viks, A. (2018). Haldusreformi protsessi disain. S. Valner (toim.), *Haldusreform 2017: artiklikogumik: otsused, taustad, elluviimine*. (lk 23–47). Tallinn: Menu Meedia.

Voda, P. ja Svačinová, P. (2020). To be central or peripheral? What matters for political representation in amalgamated municipalities?. *Urban Affairs Review*, 56(4), 1206–1236.

Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1(1), 67–82.

Lisad

Lisa 1. Arvuti tehnilised andmed ja töös kasutatud tarkvarad.

Töös kasutatud arvuti parameetrid olid järgmised:

- Protsessor: Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU 2.50GHz
- Muutmälu (RAM): 8,00 GB
- Operatsioonisüsteem: Windows 10 Home 64-bit

Töös kasutatud tarkvarad:

- PyCharm Community Edition 2020.2.3
- ArcGIS Pro 2.6
- AZTool 1.0.3
- RStudio 1.3.959

Lisa 2. Omavalitsuste andmetabel tavalise servakülgnevuse juhusliku algväärtusega 91745.

OBJECTID	Shape *	Zone ID	SUM_Rahvaavr	SUM_Rahvaavr2020	SUM_Rahvaavr2045	SUM_Teenuskeskus	SUM_Tõmbekeskus	SUM_Kool	Kompaktsus	Sõiduaeg	Peamine teenuskeskus	Teised teenuskeskused	Lõikumine kihelkondadega	Lõikumine lähivõrditega
1	Polygon	1	60978	67989.84	75908.3805	9.25	1.23	5	0.22582	91.076586	Märjamaa alev	Kella linn, Saue linn	12	4
2	Polygon	2	29272	28285.8779	26304.1714	5.75	1	5	0.056755	133.619799	Haapsalu linn	Paldiski linn, Taebla alevik	12	2
3	Polygon	3	16136	18816.1896	22128.0104	1.75	0	1	0.204508	30.444438	Tabasalu alevik	Suuruupi küla, Väina-Jõesuu küla	3	1
4	Polygon	4	48573	47202.7546	45425.5709	10	1	6	0.13507	144.614814	Põhva linn	Alatskivi alevik, Ülenurme alevik	13	3
5	Polygon	5	19966	17294.5318	13980.1364	5.5	1.25	3	0.178127	111.952761	Jõgeva linn	Mustvee linn, Rakke alevik	16	2
6	Polygon	6	51574	43626.4466	32775.2777	5.5	2.25	4	0.18439	63.109327	Jõhvi linn	Ahtme linnaosa, Sillamäe linn	4	5
7	Polygon	7	21509	18194.4631	13668.9695	2.5	1	1	0.272249	93.488409	Järve linnaosa	Püssi linn, Toila alevik	2	3
8	Polygon	8	20749	18104.8673	14363.7237	3.5	1	3	0.213265	74.955788	Kiviõli linn	Kunda linn, Aseri alevik	6	3
9	Polygon	9	19796	17499.664	14185.8136	1.75	1	2	0.295771	57.429663	Rakvere linn	Vaike-Maarja alevik, Lepna alevik	6	1
10	Polygon	10	28524	26538.811	23531.9224	5.5	1.25	6	0.127653	124.977543	Tapa linn	Tamsalu linn, Loksas linn	10	4
11	Polygon	11	30420	32062.8003	33856.3496	5.75	1	4	0.160079	125.267497	Paide linn	Kehra linn, Kose alevik	13	2
12	Polygon	12	81146	92584.1208	106234.9001	10	1.25	6	0.057094	139.919961	Rapla linn	Maardu linn, Haabneeme alevik	12	2
13	Polygon	13	13889	12996.6404	11349.2785	3.75	1	1	0.269268	83.909566	Vändra alev	Järvakandi alev, Kehtra alevik	7	4
14	Polygon	14	23020	20878.5386	17767.8902	3.5	1	3	0.221359	149.009635	Türi linn	Suure-Jaani linn, Sindi linn	11	5
15	Polygon	15	19921	17723.7137	14480.5749	1.25	1	1	0.285643	34.669885	Viljandi linn	Paistu küla, Ramsi alevik	4	1
16	Polygon	16	27436	24206.6363	19678.9973	4.5	1.75	3	0.142255	182.427905	Põhnamaa linn	Tõrva linn, Võhma linn	17	6
17	Polygon	17	12918	11203.9338	8836.0988	2.5	0	1	0.071211	138.200635	Koeru alevik	Puurmani alevik, Vätsa alevik	16	4
18	Polygon	18	15959	14313.3711	11963.3512	2.25	1	2	0.157113	56.299602	Võru linn	Vastseliina alevik, Lasva küla	5	1
19	Polygon	19	31788	28231.668	23343.2363	6.25	1	5	0.075366	132.633674	Rägina linn	Antsla linn, Parksepa alevik	17	5
20	Polygon	20	21203	18276.3235	14520.6222	3.75	1	1	0.076844	123.112095	Välga linn	Rõuge alevik, Tõrgulima alevik	11	2
21	Polygon	21	14914	13697.0543	11888.9006	4.25	1.5	4	0.094738	67.264234	Kilingi-Nõmme linn	Karksi-Nuia linn, Abja-Paluoja linn	7	4
22	Polygon	22	22216	20971.5616	18311.1212	5.25	1	2	0.013387	258.859406	Kärda linn	Orissaare alevik, Käina alevik	16	3
23	Polygon	23	20350	19159.525	16923.06	3.25	1	1	0.035181	65.719323	Kuressaare linn	Kärla alevik, Kihelkonna alevik	6	1
24	Polygon	24	27708	27802.8144	28062.3003	5	1.25	4	0.166463	62.044734	Eeva linn	Otepää linn, Nõo alevik	9	3
25	Polygon	25	21055	19767.7434	17796.2376	6.25	1	2	0.065003	114.103217	Lihula linn	Pärnu-Jaagupi alev, Audru alevik	16	3

Lisa 3. Omavalitsuste andmetabel tavalise servakülgnevuse juhusliku algväärtusega 53010.

OBJECTID	Shape *	Zone ID	SUM_Rahvaavr	SUM_Rahvaavr2020	SUM_Rahvaavr2045	SUM_Teenuskeskus	SUM_Tõmbekeskus	SUM_Kool	Kompaktsus	Sõiduaeg	Peamine teenuskeskus	Teised teenuskeskused	Lõikumine kihelkondadega	Lõikumine lähivõrditega
1	Polygon	1	18161	15822.4474	12520.598	3.5	1	3	0.226641	74.955788	Märjamaa alev	Kella linn, Saue linn	7	3
2	Polygon	2	30345	26464.1576	20999.7794	6.5	1	5	0.166093	97.180793	Haapsalu linn	Paldiski linn, Taebla alevik	19	2
3	Polygon	3	24896	24532.9356	23722.4968	5.25	1	6	0.207913	128.753104	Tabasalu alevik	Suuruupi küla, Väina-Jõesuu küla	11	4
4	Polygon	4	24287	22607.1352	20044.2178	2.75	1	2	0.072438	101.423871	Põhva linn	Alatskivi alevik, Ülenurme alevik	4	3
5	Polygon	5	13542	12804.9906	11097.7136	3.75	1	2	0.017809	258.859406	Jõgeva linn	Mustvee linn, Rakke alevik	10	3
6	Polygon	6	29194	27485.692	24280.1954	4.75	1	1	0.019228	78.526361	Jõhvi linn	Ahtme linnaosa, Sillamäe linn	12	1
7	Polygon	7	17777	16689.4013	15039.2202	5.25	1	2	0.084098	114.103217	Järve linnaosa	Püssi linn, Toila alevik	14	3
8	Polygon	8	23689	21445.2395	17875.7301	4.5	1	4	0.049575	123.727447	Kiviõli linn	Kunda linn, Aseri alevik	15	3
9	Polygon	9	66276	75970.3517	87655.5146	10.25	1.25	5	0.113923	91.076586	Rakvere linn	Vaike-Maarja alevik, Lepna alevik	12	4
10	Polygon	10	47308	51574.5606	55985.9839	7.5	1	6	0.283249	91.258209	Tapa linn	Tamsalu linn, Loksas linn	8	2
11	Polygon	11	75001	83451.7468	93565.8395	9	1.25	4	0.065227	185.785341	Paide linn	Kehra linn, Kose alevik	15	2
12	Polygon	12	21955	19623.7477	16485.7321	4.25	1.5	2	0.126193	91.481371	Rapla linn	Maardu linn, Haabneeme alevik	10	6
13	Polygon	13	21783	20175.5389	17745.9211	4.25	1	3	0.091983	146.884315	Vändra alev	Järvakandi alev, Kehtra alevik	13	4
14	Polygon	14	19661	17492.3917	14291.5809	1	1	1	0.22688	50.973569	Türi linn	Suure-Jaani linn, Sindi linn	3	1
15	Polygon	15	18916	16615.7633	13326.4998	4.5	1	2	0.161196	128.991788	Viljandi linn	Paistu küla, Ramsi alevik	12	3
16	Polygon	16	63090	62008.9903	62650.5219	10.25	1.25	8	0.141893	76.191004	Põhnamaa linn	Tõrva linn, Võhma linn	18	5
17	Polygon	17	34232	30298.3028	24909.8204	6.5	1.5	4	0.146284	73.564084	Koeru alevik	Puurmani alevik, Vätsa alevik	13	6
18	Polygon	18	15834	14159.2306	11865.1541	3.25	1.5	3	0.175704	89.33785	Võru linn	Vastseliina alevik, Lasva küla	6	3
19	Polygon	19	31456	27588.3544	22416.91	5.5	1	3	0.097852	159.653954	Rägina linn	Antsla linn, Parksepa alevik	10	3
20	Polygon	20	28889	25124.6156	20264.6421	6.25	1.25	2	0.087558	164.471685	Välga linn	Rõuge alevik, Tõrgulima alevik	9	4
21	Polygon	21	15647	13724.9419	11058.645	3	1.75	3	0.169826	74.263727	Kilingi-Nõmme linn	Karksi-Nuia linn, Abja-Paluoja linn	8	3
22	Polygon	22	5617	5272.454	4750.6365	1	0	1	0.157877	43.884133	Kärda linn	Orissaare alevik, Käina alevik	4	2
23	Polygon	23	31010	26231.359	19706.855	3.5	1.5	3	0.198821	87.275959	Kuressaare linn	Kärla alevik, Kihelkonna alevik	3	5
24	Polygon	24	23014	19467.5426	14625.397	2.25	1	1	0.265976	81.631367	Elva linn	Otepää linn, Nõo alevik	3	4

Lisa 4. Omavalitsuste andmetabel modifitseeritud servakülgnevuse juhusliku algväärtusega 48493.

OBJECTID *	Shape *	Zone ID	SUM_Rahvaarv	SUM_Rahvaarv2030	SUM_Rahvaarv2045	SUM_Teenuskeskus	SUM_Tõmbekeskus	SUM_Kool	Shape_Length	Kompaktsus	Sõiduaeg	Peamine teenuskeskus	Teised teenuskeskused	Lõikumine kihelkondadega	Lõikumine lähivõõnditega
1	Polygon	0	3734	3551.3794	3202.0175	2	0	0	585177.54257	0.014398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
2	Polygon	1	40638	43561.356	46256.0895	6.75	1	4	235940.13447	0.319795	76.667886	Rapla linn	Saku alevik, Kohila alev	10	2
3	Polygon	2	63520	72707.4467	83777.5494	9.25	1.25	5	435870.17671	0.128783	91.076586	Mäejamäe alev	Keila linn, Saue linn	9	3
4	Polygon	3	19211	17185.5784	14016.7662	4.25	1	4	605788.006993	0.05186	77.217362	Haapsalu linn	Taebla alevik, Kullamaa küla	9	1
5	Polygon	4	18101	16001.284	12971.1766	1.5	1	1	96546.577228	0.240472	43.06128	Rakvere linn	Hajjala alevik, Ujua küla	3	1
6	Polygon	5	47443	45886.7981	43167.6601	8.5	1	9	653897.763116	0.104219	115.106012	Tapa linn	Kunda linn, Tamsalu linn	16	4
7	Polygon	6	82899	93353.5904	105967.2704	9.75	1.25	6	523401.665642	0.080408	185.783341	Paide linn	Maardu linn, Haabneeme alevik	15	2
8	Polygon	7	17611	15445.5007	12360.0867	2.75	1.25	2	395544.46522	0.152814	72.748943	Vändra alev	Türi linn, Väitsa alevik	13	6
9	Polygon	8	17207	14844.2988	11569.9959	4	1.25	4	345497.260611	0.176739	87.079848	Jõgeva linn	Koeru alevik, Järva-Jaani alev	12	2
10	Polygon	9	29686	27656.9948	24889.4883	6.75	1.25	4	464565.4633	0.172404	126.098206	Põltsamaa linn	Mustvee linn, Tabivere alevik	15	4
11	Polygon	10	22046	18934.5092	14620.846	6.25	1	3	423742.439482	0.202223	46.186869	Kiviõli linn	Püssi linn, Aseri alevik	9	6
12	Polygon	11	35551	30072.5909	22592.6605	3	1.25	2	306110.889957	0.125973	105.488806	Ahtme linnaosa	Sillamäe linn, Narva-Jõesuu linn	3	5
13	Polygon	12	30337	25662.0683	19279.1635	2.75	1.75	2	78487.34928	0.378736	68.932611	Jõhvi linn	Järve linnaosa, Toila alevik	2	2
14	Polygon	13	43034	43237.5902	43701.4139	6.5	1.25	6	358229.947756	0.150903	76.191004	Eva linn	Otepää linn, Ülenurme alevik	12	3
15	Polygon	14	18686	17486.1798	15863.5651	5.25	1	2	410350.279545	0.109636	144.480554	Põlva linn	Alatskivi alevik, Kõrvetküla alevik	9	3
16	Polygon	15	27039	24026.8363	19871.0477	3.75	1	3	421913.058393	0.10017	54.252158	Võru linn	Parksepa alevik, Kanepi alevik	12	3
17	Polygon	16	21833	19507.5697	16216.1902	5.75	1	4	534756.497836	0.102547	160.984466	Räpina linn	Antsla linn, Vastselina alevik	10	3
18	Polygon	17	19139	16438.5915	12998.42	2.75	1	1	363688.079666	0.134707	112.070244	Valga linn	Tõrgu linna alevik, Vastu alevik	9	1
19	Polygon	18	31005	29191.2075	25783.758	5.75	1	2	126104.18939	0.021449	112.260023	Kuressaare linn	Orissaare alevik, Kärla küla	12	1
20	Polygon	19	22979	20444.4163	16703.4351	2	1.25	2	170753.385834	0.211625	44.601533	Viljandi linn	Suure-Jaani linn, Vastemõisa küla	5	1
21	Polygon	20	28425	25032.082	20229.3196	5.75	2	4	635908.623401	0.097568	74.263727	Tõrva linn	Karksi-Nuia linn, Abja-Paluoja linn	16	5
22	Polygon	21	18587	17440.6242	15685.5371	5	1	2	622096.117232	0.084905	114.103217	Lühula linn	Pärnu-Jaagu alevik, Audru alevik	14	4
23	Polygon	22	33367	31272.9689	27843.1251	6.75	1	3	684754.979025	0.100082	163.055685	Kilingi-Nõmme linn	Sindi linn, Järvakandi alev	13	7
24	Polygon	23	8942	8490.429	7318.1328	1.75	1	1	487759.282554	0.053355	70.586405	Kärbla linn	Kaina alevik, Kõrgessaare alevik	4	1

Lisa 5. Omavalitsuste andmetabel modifitseeritud servakülgnevuse juhusliku algväärtusega 27051.

OBJECTID *	Shape *	Zone ID	SUM_Rahvaarv	SUM_Rahvaarv2030	SUM_Rahvaarv2045	SUM_Teenuskeskus	SUM_Tõmbekeskus	SUM_Kool	Kompaktsus	Sõiduaeg	Peamine teenuskeskus	Teised teenuskeskused	Lõikumine kihelkondadega	Lõikumine lähivõõnditega
1	Polygon	0	3734	3551.3794	3202.0175	2	0	0	0.014398	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
2	Polygon	1	76176	85905.7337	97335.809	11.5	1.25	6	0.148109	91.076586	Rapla linn	Saku alevik, Kohila alev	15	4
3	Polygon	2	88165	99616.6409	113004.5526	11	1.25	8	0.106653	139.919961	Mäejamäe alev	Keila linn, Saue linn	9	2
4	Polygon	3	16196	15151.6083	13228.9308	4.25	1	1	0.185809	83.905566	Haapsalu linn	Taebla alevik, Kullamaa küla	10	6
5	Polygon	4	31179	32783.3044	34491.9271	6.5	1	5	0.228215	147.230262	Rakvere linn	Hajjala alevik, Ujua küla	14	3
6	Polygon	5	37414	35831.7856	33212.1972	4.75	1	4	0.075171	109.592865	Tapa linn	Kunda linn, Tamsalu linn	9	4
7	Polygon	6	31680	27626.676	21901.8538	6	1.25	5	0.171424	106.747136	Paide linn	Maardu linn, Haabneeme alevik	16	2
8	Polygon	7	23245	19964.888	15416.3852	5.75	1.25	4	0.21707	78.131082	Vändra alev	Türi linn, Väitsa alevik	9	6
9	Polygon	8	20204	18224.7218	15511.7724	6	1.25	3	0.210137	113.105241	Jõgeva linn	Koeru alevik, Järva-Jaani alev	9	3
10	Polygon	9	8942	8490.429	7318.1328	1.75	1	1	0.053355	70.586405	Põltsamaa linn	Mustvee linn, Tabivere alevik	4	1
11	Polygon	10	19491	17481.2219	14609.9384	2.75	1	2	0.155729	56.299602	Kiviõli linn	Püssi linn, Aseri alevik	5	1
12	Polygon	11	15202	13451.1058	11025.9886	2.25	1	2	0.137977	68.992553	Ahtme linnaosa	Sillamäe linn, Narva-Jõesuu linn	8	3
13	Polygon	12	40028	38222.3348	35852.8101	8.75	1	7	0.084289	143.91358	Jõhvi linn	Järve linnaosa, Toila alevik	15	5
14	Polygon	13	44416	43462.3511	42406.549	8.25	1.5	5	0.102145	86.401104	Eva linn	Otepää linn, Ülenurme alevik	20	6
15	Polygon	14	19891	17353.7861	13771.6661	3.5	1	1	0.141637	71.792117	Põlva linn	Alatskivi alevik, Kõrvetküla alevik	12	4
16	Polygon	15	17632	16544.3601	14888.0417	4.5	1	2	0.081254	114.103217	Võru linn	Parksepa alevik, Kanepi alevik	13	4
17	Polygon	16	26347	24425.0074	21526.8151	5	1	3	0.137046	146.584315	Räpina linn	Antsla linn, Vastselina alevik	13	5
18	Polygon	17	16502	14732.9856	11987.0528	3	1	3	0.052893	81.153877	Valga linn	Tõrgu linna alevik, Vastu alevik	5	1
19	Polygon	18	16103	14437.1439	12043.9607	2.75	1	3	0.076883	119.888533	Kuressaare linn	Orissaare alevik, Kärla alevik	10	4
20	Polygon	19	21676	19285.1372	15756.2844	2	1	2	0.16643	52.089524	Viljandi linn	Suure-Jaani linn, Vastemõisa küla	4	1
21	Polygon	20	31005	29191.2075	25783.758	5.75	1	2	0.021449	112.260023	Tõrva linn	Karksi-Nuia linn, Abja-Paluoja linn	12	1
22	Polygon	21	23037	20022.3957	16082.9328	3.75	1.5	2	0.174779	119.847738	Lühula linn	Pärnu-Jaagu alevik, Audru alevik	9	2
23	Polygon	22	7906	6819.9178	5313.7916	1	0.5	1	0.110821	31.981413	Kilingi-Nõmme linn	Sindi linn, Järvakandi alev	4	2
24	Polygon	23	28895	24442.2805	18362.7725	2.5	1.75	3	0.350793	68.932611	Kärbla linn	Kaina alevik, Kõrgessaare alevik	2	2
25	Polygon	24	35954	30413.4886	22848.767	3.25	1.25	1	0.148068	105.488606	Ahtme linnaosa	Sillamäe linn, Narva-Jõesuu linn	3	5

Lisa 6. Omavalitsuste andmetabel *Territory Design* juhusliku algväärtusega 32690218.

OBJECTID *	Stat_AU_5_SHAPE *	Stat_AU_5_Parent Territory ID	SUM_Stat_AU_5_Rahvaarv	SUM_Stat_AU_5_Rahvaarv2030	SUM_Stat_AU_5_Rahvaarv2045	SUM_Stat_AU_5_Teenuskeskus	SUM_Stat_AU_5_Tõmbekeskus	SUM_Stat_AU_5_Kool	Kompaktsus
1	Polygon	0	6924	7240.4858	7491.8879	2.25	0	0	0.011435
2	Polygon	1	7501	7633.4822	7839.8368	3	0	1	0.193757
3	Polygon	2	12136	11105.9478	9322.7434	2.5	0	0	0.19604
4	Polygon	3	12979	12219.7285	10793.3364	1	1	1	0.152747
5	Polygon	4	15074	14192.403	12535.1556	3.5	0	0	0.032515
6	Polygon	5	10044	11712.3084	13774.3416	0.75	0.5	1	0.325548
7	Polygon	6	9924	8556.9518	6670.9366	1.5	0.75	1	0.232653
8	Polygon	7	11069	12907.5609	15180.0266	0.75	0	1	0.110872
9	Polygon	8	10619	9969.1172	8984.7359	1.75	0.25	1	0.173701
10	Polygon	9	11524	10252.9028	8376.7956	1.75	0.25	1	0.15204
11	Polygon	10	5590	5095.6889	4379.0386	1.5	0	1	0.16166
12	Polygon	11	10778	12568.2258	14780.9492	1	0	1	0.218782
13	Polygon	12	6378	6053.7342	5617.8342	2.25	0	2	0.143705
14	Polygon	13	9747	8702.1216	7080.2208	1	1	1	0.057774
15	Polygon	14	14232	13326.8855	11863.0504	2.5	0	1	0.111361
16	Polygon	15	8648	8012.2936	7058.6472	2.25	0.5	1	0.138148
17	Polygon	16	15276	12921.9684	9707.898	1.25	0.5	1	0.09921
18	Polygon	17	9262	8257.5038	6843.0074	1.5	0	1	0.149544
19	Polygon	18	11421	9661.0239	7258.0455	2.25	0	1	0.084859
20	Polygon	19	15085	13335.14	10809.911	1	1	1	0.373726
21	Polygon	20	9214	9338.1758	9533.0166	1.75	0.75	1	0.088426
22	Polygon	21	9009	8535.3912	7342.6976	2	1	1	0.029464
23	Polygon	22	7409	6549.556	5309.2894	1.75	0	2	0.185042
24	Polygon	23	5865	5513.5356	4922.2405	2.5	0.75	2	0.030137
25	Polygon	24	16333	19045.9113	22399.0762	0.75	0.25	1	0.215589
26	Polygon	25	11141	12016.2143	12863.8687	2	0	2	0.155216
27	Polygon	26	8064	7128.576	5778.6624	1.5	0.75	2	0.152581
28	Polygon	27	8321	7793.8824	6997.0093	1.25	0	1	0.142836
29	Polygon	28	10872	9577.1448	7799.5728	1.5	1	1	0.201739
30	Polygon	29	15860	18494.346	21750.404	1.25	0	1	0.199941
31	Polygon	30	6573	5560.1007	4177.1415	1.25	1	1	0.222085
32	Polygon	31	14787	14683.3203	14594.6143	1.75	0	1	0.128116
33	Polygon	32	11951	12408.2075	12843.2046	1.5	0	1	0.068018
34	Polygon	33	8318	7205.9398	5750.2134	1.5	0.75	2	0.171757
35	Polygon	34	5082	4558.0458	3809.4672	1.75	0	2	0.1204
36	Polygon	35	12717	10831.0689	8466.9786	1.25	1	1	0.192668
37	Polygon	36	5922	5113.218	3985.6302	2	0.5	2	0.169026
38	Polygon	37	9379	9376.4727	9032.0194	2.25	0.75	1	0.176202
39	Polygon	38	25827	21847.0593	16413.0585	2	1.75	1	0.151322
40	Polygon	39	10674	9219.8198	7190.2434	2.25	0	1	0.220516
41	Polygon	40	12911	13801.1661	14600.3189	2.5	0	0	0.147659
42	Polygon	41	12740	14856.114	17471.636	2	0	1	0.258446
43	Polygon	42	7811	6947.6547	5760.5097	2	0.5	1	0.15614
44	Polygon	43	8861	7929.1701	6605.4844	2.25	0	1	0.159852
45	Polygon	44	11262	13132.6182	15444.7068	2.5	0	1	0.142622
46	Polygon	45	17214	15315.2958	12512.8566	1	1	1	0.316704
47	Polygon	46	15758	16039.0063	16476.24	1.25	0	0	0.130515
48	Polygon	47	8083	7102.824	5753.9151	2.25	0.5	1	0.245272
49	Polygon	48	8115	7173.66	5815.209	1.5	0.25	1	0.224932
50	Polygon	49	11163	9741.0367	7734.3057	2	0.75	1	0.117304
51	Polygon	50	5901	5551.0707	4799.2833	1.25	1	1	0.096525
52	Polygon	51	11727	10517.9463	8790.5592	1	1	1	0.281335
53	Polygon	52	8702	7588.9198	6122.6178	2	0.5	1	0.206032
54	Polygon	53	8469	7264.7082	5598.8559	1	1	1	0.172707
55	Polygon	54	8980	9986.9304	11198.5804	1.75	0	1	0.172279
56	Polygon	55	7739	7163.5087	6458.3089	2	0.5	2	0.106225
57	Polygon	56	8334	8416.235	8554.7938	2.25	0	2	0.164904
58	Polygon	57	7005	7552.7856	8153.472	2.25	0	2	0.104946
59	Polygon	58	6189	5525.5392	4495.6896	2	0	2	0.078375
60	Polygon	59	6352	5966.2729	5322.3736	2.5	1.25	1	0.121961
61	Polygon	60	4410	5142.501	6047.874	0.75	0	1	0.127097
62	Polygon	61	11855	10334.3847	8200.7159	1.75	0.75	1	0.156054
63	Polygon	62	11700	13643.37	16045.38	1.5	0	1	0.215602
64	Polygon	63	5680	5049.202	4121.8877	1.75	1	2	0.121294
65	Polygon	64	15297	12939.7323	9721.2435	1	0.75	1	0.365921
66	Polygon	65	12071	14075.9931	16554.1694	1.75	0	0	0.162007
67	Polygon	66	7692	6777.618	5466.9627	2.25	0	2	0.213586
68	Polygon	67	11470	13375.167	15729.958	1.5	0	1	0.175144

Lisa 7. Omavalitsuste andmetabel *Territory Design* juhusliku algväärtusega 338631371.

OBJEKTID *	Stat_AU_5: SHAPE *	Stat_AU_5: Parent Territory ID	SUM_Stat_AU_5_Rahvaarv	SUM_Stat_AU_5_Rahvaarv2030	SUM_Stat_AU_5_Rahvaarv2045	SUM_Stat_AU_5_Teenuskeskus	SUM_Stat_AU_5_Tõmbekeskus	SUM_Stat_AU_5_Kool	Kompaktsus
1	Polygon	0	1157	1140.8879	1103.5011	1	0	0	0.017711
2	Polygon	1	12177	12412.0161	12774.8907	1.25	0	1	0.138823
3	Polygon	2	13187	11385.1525	8885.5196	1.5	0.5	1	0.116076
4	Polygon	3	12933	12176.4195	10755.0828	1	1	1	0.153324
5	Polygon	4	10434	9823.6111	8676.9144	2.25	0	0	0.031105
6	Polygon	5	11198	13057.9878	15356.9372	1	0.5	1	0.129184
7	Polygon	6	9510	8230.5006	6454.5332	2	0.75	1	0.135751
8	Polygon	7	12040	14039.844	16511.656	1.5	0	1	0.146515
9	Polygon	8	12635	11861.738	10690.4735	1.75	0.25	1	0.17189
10	Polygon	9	15125	13412.6091	10923.0011	1.5	0	1	0.12853
11	Polygon	10	11200	10694.8159	9878.4783	2.25	0.5	1	0.21373
12	Polygon	11	9336	10789.3368	12562.2912	1.25	0	2	0.173865
13	Polygon	12	7821	7198.5012	6349.3353	2	0	2	0.16793
14	Polygon	13	9849	8793.1872	7154.3136	1	1	1	0.048799
15	Polygon	14	11166	10482.6408	9447.5526	2.25	0	1	0.123319
16	Polygon	15	9185	8556.7894	7610.9853	2.5	0.75	1	0.160007
17	Polygon	16	15276	12921.9684	9707.898	1.25	0.5	1	0.09921
18	Polygon	17	11189	9966.9501	8249.4906	1.5	0	1	0.13559
19	Polygon	18	10008	8465.7672	6360.084	1.5	0	1	0.13158
20	Polygon	19	15085	13335.14	10809.911	1	1	1	0.373726
21	Polygon	20	9234	9038.0474	8822.507	2.25	0	1	0.15492
22	Polygon	21	9023	8552.9934	7361.1472	2	1	1	0.031371
23	Polygon	22	8418	7895.8768	6818.9668	1.75	1	1	0.190099
24	Polygon	23	6341	5797.6537	4960.9114	2	0.75	2	0.032006
25	Polygon	24	16055	18721.7355	22017.827	0.75	0.25	1	0.274449
26	Polygon	25	8448	9851.2128	11585.5872	2.25	0	2	0.153468
27	Polygon	26	9556	8446.0368	6844.7216	1.5	0	2	0.187992
28	Polygon	27	8341	7742.0035	6842.4025	2	0.5	2	0.1796
29	Polygon	28	6663	5893.9335	4838.7471	1	1	1	0.087477
30	Polygon	29	12003	13996.6983	16460.9142	0.5	0	0	0.12259
31	Polygon	30	9259	7903.2827	6035.4271	1.5	0.75	1	0.151155
32	Polygon	31	10862	10474.8658	10027.8723	1.5	0.5	1	0.120161
33	Polygon	32	8004	8175.4439	8288.7316	1.25	0	1	0.085279
34	Polygon	33	7435	6332.3895	4950.223	1.75	0.75	1	0.174084
35	Polygon	34	5278	4733.8382	3956.3888	1.75	0	2	0.139559
36	Polygon	35	12040	10254.468	8016.232	1	1	1	0.454041
37	Polygon	36	8342	7179.9638	5575.9628	1.5	0.75	2	0.259762
38	Polygon	37	5540	5160.1786	4429.0347	1.25	0.75	2	0.201107
39	Polygon	38	25827	21847.0593	16413.0585	2	1.75	1	0.151322
40	Polygon	39	6665	5697.0547	4361.4747	2.75	0.25	2	0.121974
41	Polygon	40	11456	12882.346	14530.935	2	0	1	0.111004
42	Polygon	41	16187	18875.6607	22198.8518	1.25	0	0	0.117177
43	Polygon	42	6916	6105.1684	4987.4272	1.75	0.5	1	0.209242
44	Polygon	43	10268	9091.8668	7469.5093	1.75	0	1	0.201549
45	Polygon	44	9946	11598.0306	13639.9444	2.5	0	1	0.116801
46	Polygon	45	17214	15315.2958	12512.8566	1	1	1	0.316704
47	Polygon	46	11623	11526.3987	11413.8171	2.25	0	1	0.180428
48	Polygon	47	7072	6804.0713	6448.9398	3.25	0.5	1	0.163206
49	Polygon	48	11657	10304.788	8353.4062	1.75	0.25	1	0.17137
50	Polygon	49	10000	9419.128	8309.1888	3.25	0	1	0.029965
51	Polygon	50	12655	12879.8643	12707.2102	2.25	0	1	0.155351
52	Polygon	51	11727	10517.9463	8790.5592	1	1	1	0.281335
53	Polygon	52	6830	6077.1466	5029.5154	2.25	0.5	1	0.224046
54	Polygon	53	8342	7155.7676	5514.8962	1	1	1	0.116687
55	Polygon	54	5636	4903.8598	3872.7571	1.75	0.75	3	0.192873
56	Polygon	55	12005	12236.6965	12594.4455	1.75	0.75	2	0.134616
57	Polygon	56	7815	7529.3159	7152.5347	2.25	0	1	0.190033
58	Polygon	57	10298	9868.8877	9011.1633	2.75	0	1	0.154312
59	Polygon	58	8315	9696.1215	11403.191	2.75	0	1	0.081001
60	Polygon	59	11417	10733.8919	9390.4061	3.25	0.5	0	0.207744
61	Polygon	60	6872	8013.4392	9424.2608	1	0	1	0.203203
62	Polygon	61	7699	6764.2781	5423.1013	2.5	0.5	1	0.178331
63	Polygon	62	7729	9012.7869	10599.5506	1.25	0	1	0.326789
64	Polygon	63	5784	5146.0248	4204.3896	1.75	1	2	0.249297
65	Polygon	64	15297	12939.7323	9721.2435	1	0.75	1	0.365921
66	Polygon	65	14987	17476.3407	20553.1718	1.25	0	0	0.202473
67	Polygon	66	9716	8459.0738	6694.6189	3	0	1	0.291763
68	Polygon	67	11712	13657.3632	16061.8368	1.5	0	1	0.168893

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Andres Kasekamp**,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Kohalike omavalitsusüksuste haldusterritooriumi piiritlemine ruumiliste optimeerimismeetoditega“,

mille juhendaja on Raivo Aunap,

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.

Andres Kasekamp

Tartus, **24.05.2020**