

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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Tallinna maakasutuse modelleerimine rakk-automaadi ja üldplaneeringute info abil**

**Kermo Kaio**

Juhendaja: PhD Evelyn Uuema

Tartu 2022

## **Annotatsioon**

### **Tallinna maakasutuse modelleerimine rakk-automaadi ja üldplaneeringute info abil**

Magistritöö eesmärk on modelleerida Tallinna ja lähipiirkonna maakasutusmuutuseid ja prognoosida selle seis aastaks 2050. Modelleerimisel kasutati Copernicuse *Urban Atlas*-e 2006, 2012 ja 2018 aasta andmeid, üldplaneeringute ruumiandmeid ja CA-Markovi mudelit. Ühtlasi kasutati analüütiliste hierarhiate meetodit (AHP), mis muutis mudelit täpsemaks. 2050. aasta prognoosi kohaselt jätkub Tallinna lähipiirkonna laienemine, kus uus asustus rajatakse peamiselt olemasolevate asulate ja teede lähedusse. Lisaks prognoositi üha rohkem uut asustust põllu- ja rohumaa asemel metsadele. Üldplaneeringud võimaldasid prognoosida linnasiseseid muutusi, muutes mudelit täpsemaks. Maakasutuse modelleerimine on abiks ratsionaalsemate maakasutuse otsuste tegemisel, et tagada linna jätkusuutlik areng.

Märksõnad: linnade kasvu modelleerimine, linnade maakasutusmuutused, üldplaneeringud, CA-Markov, analüütiliste hierarhiate meetod

CERCS kood: P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

## **Abstract**

### **Modeling urban land use of Tallinn by using cellular automata and general plans**

The aim of this thesis is to model urban land use changes in Tallinn and make a prediction for year 2050. Modeling was carried out using functional zoning data, Copernicus Urban Atlas 2006, 2012 and 2018 land cover data and CA-Markov model. Analytic Hierarchy Process (AHP) was also used, which increased the accuracy of the model. Prediction results showed the continuation of urban expansion near pre-existing urban areas and roads. Prediction also indicated the increase in forest land use for new urban areas. Functional zoning data allowed to model changes inside the city, making the model more accurate. Land use change models help city planners to make better land use choices and to maintain cities sustainable development.

Keywords: Urban growth modelling, urban land use change, functional zoning, CA-Markov, Analytic Hierarchy Process

CERCS code: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

# Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Teooria .....	6
1.1 Maakasutuse modelleerimine.....	6
1.1.1 Agendipõhised mudelid .....	7
1.1.2 Markovi ahelad .....	10
1.1.3 Rakk-automaat .....	10
1.1.4 CA-Markov .....	11
1.1.5 Analüütiliste hierarhiate meetod (AHP) .....	19
1.2 Tallinn ja valginnastumine.....	21
1.2.1 Tallinna linnaosad ja üldplaneeringud .....	25
2. Andmed ja meetodika.....	29
2.1 Uurimisala ja andmed .....	29
2.2 Tegurite ja piirangute kaardid .....	30
2.3 Modelleerimise meetodika.....	32
2.4 Mudeli kalibreerimine.....	34
2.4.1 Tiheda ja hõreda asustusega asulate AHP .....	34
2.4.2 Tööstus/äri ja üldkasutatava maa AHP .....	37
2.5 Üldplaneeringutega modelleerimine.....	40
3. Tulemused.....	44
3.1 Maakasutuse analüüs .....	44
3.2 Mudeli kalibreerimine.....	53
3.3 2050. aasta mudel.....	55
4. Arutelu ja järeldused .....	59
Kokkuvõte.....	63
Summary .....	65
Tänuavaldused .....	67
Kasutatud kirjandus .....	68
Lisad.....	77

## Sissejuhatus

Maailm pidevalt linnastub – kui 1900. aastal elas 14% maailma rahvastikust linnades, siis 2000. aastaks elas juba 47% (Brockerhoff, 2000). Alates aastast 2007 elab pool maailma elanikkonnast linnades ning eeldatakse, et aastaks 2030 tõuseb protsent 60 peale (United Nations Sustainable Development Goals, i.a). Ajalugu on näidanud, et linnad on kõige dünaamilisemad paigad Maal (Araya ja Cabral, 2010) – viimaste dekaadide jooksul on maailma linnad kasvanud kõige kiiremini, mis on põhjustanud suuri maakasutuse muutusi linnalähedastel aladel (Achmad *et al.*, 2018). Maakasutusmuutused mõjutavad nii mulda, vett kui ka õhku, mistõttu lokaalsed või regionaalsed muutused kujunevad ajapikku üha suuremaks probleemiks (Noszczyk, 2019). Kiire linnastumine toob endaga kaasa slummide tekke, puuduliku ja ülekoormatud infrastruktuuri, õhusaaste ja planeerimata valglinnastumise (United Nations Sustainable Development Goals, i.a). Linnade jätkusuutliku arengu tagamiseks on vaja linnade kiiret laienemist kontrollida ja suunata õige poliitikaga (Achmad *et al.*, 2018). Olgugi et linna laienemisega kaasneb positiivne mõju majandusele, kaasneb sellega ühtlasi negatiivne mõju looduslikule keskkonnale ja ökosüsteemidele (Allen ja Lu, 2003). Tänapäevased keskkonnaprobleemid ongi põhiliselt seotud linnade kasvust tingitud maakasutuse muutustega, mistõttu linnasid peab analüüsima ja vaatlema, et lisaks linna laienemise kontrollile tagada efektiivsed maakasutuse planeeringud ja strateegiad (Araya ja Cabral, 2010). Probleemide ennetamiseks kasutatakse maakasutuse modelleerimist, mis aitab aru saada muutustest ning tuleviku prognoosimise abil teha paremaid otsuseid (Noszczyk, 2019). Ka Tallinn on viimaste dekaadide jooksul märgatavalt laienenud ning mõjutatud valglinnastumisest, mistõttu linna ebapraktiliste maakasutuse otsuste ennetamine on tähtis ja vajalik. Linnade maakasutuse modelleerimine aitab vältida mitmeid probleeme, näiteks planeerimata valglinnastumine, ning ühtlasi tagaks linnade jätkusuutliku arengu.

Magistritöö eesmärgiks on modelleerida Tallinna maakasutust ja selle muutuseid ning prognoosida maakasutuse seis aastaks 2050. Modelleerimisel kasutatakse hetkel kehtivaid üldplaneeringuid sisendina, mis peaksid suunama maakasutust. Seetõttu on teiseks eesmärgiks vaadelda, kuidas linna maakasutus areneks planeeringutest lähtuvalt ja ilma. Ühtlasi on eesmärgiks vaadelda analüütiliste hierarhiate meetodi (AHP) mõju mudeli täpsusele. Eesmärkide saavutamiseks on kasutusel *Urban Atlas*-e maakasutusandmed aastate 2006, 2012 ja 2018 kohta (Land Copernicus,

i.a). 2006 ja 2012 aasta andmed on abiks mudeli täpsuse hindamisel ning 2006 ja 2018 aasta andmed on abiks tuleviku prognoosimisel.

Magistritöö on jagunenud neljaks osaks – teooria ülevaade, meetodika ja andmete kirjeldus, töö tulemus ning arutelu ja järeldused. Teooria annab esmalt ülevaate maakasutuse mudelite rollist, nende tähtsusest, jagunemisest meetodite põhjal ja Eestis tehtud mudelitest. Seejärel antakse ülevaade agendi-põhisest ja rakk-automaadi modelleerimisviisist, mis on kaks peamist meetodit, millega modelleeritakse linnade maakasutust. Ühtlasi kirjeldatakse teoorias integreeritud mudelit, IDRISI CA-Markovit, mida kasutatakse töö praktilises osas, kus prognoositakse Tallinna maakasutusmuutuseid, ja analüütiliste hierarhiate meetodit (AHP). Teooria viimane osa annab ülevaate Tallinna valglinnastumisest ning Tallinna linnaosadest ja nende üldplaneeringutest.

# 1. Teooria

## 1.1 Maakasutuse modelleerimine

Modelleerimisega uuritakse nii maakasutuse kui ka maakatte muutusi. Pealtnäha sarnased terminid on tegelikkuses erineva põhimõttega – maakasutus kirjeldab, kuidas ja mis eesmärgiga inimene kasutab maad, maakate aga ei kirjelda maad, vaid määrab selle oleku (Coffey, 2013; Kumar ja Rawat, 2015). Nii maakatte kui ka maakasutuse muutuste uurimisel kasutatakse peamiselt kaugseiret (Lo ja Choi, 2004).

Modelleerimine on parim viis, kuidas keerulisi maakasutuse protsesse kirjeldada ja lihtsustada (Noszczyk 2019). Maakasutusmuutuste modelleerimine aitab analüüsida muutusi ja sellest tulenevaid tagajärgi, mille põhjal on omakorda võimalik teha järeldusi, milliseid maakasutuse planeerimise ja poliitika võtteid kasutada (Verburg *et al.*, 2004). Maakasutusmuutuste mudelitega on võimalik teha erinevate stsenaariumitega tuleviku prognoose, mille abil vaadeldakse mitmesuguste tegurite mõju maakasutusele (Dalla-Nora *et al.*, 2014). Eelnev on kasulik linnastumise protsesside uurimisel, kuna erinevad stsenaariumid aitavad teha ratsionaalseid otsuseid linnade planeerimisel (Achmad *et al.*, 2018). Noszczyk (2019) on määranud maakasutuse mudelitele 6 rolli:

- aitab teha ratsionaalseid ja informeeritud otsuseid
- määrab maakasutuse olukorra ja muutuste trendid ning hindab selle dünaamilisust
- aitab jälgida maakasutusmuutusi ja aru saada maakasutuse protsessidest
- on suhtlusviis erineva valdkonna teadlaste vahel (maakasutus on interdistsiplinaarne valdkond, mistõttu see ühendab erineva valdkonna teadlasi kokku)
- lihtsustab maakasutusmuutuste ja selle mõjutegurite vahelisi suhteid
- tuleviku prognoosid aitavad planeerijaid suunata otsuste tegemisel

Maakasutuse modelleerimistes on võimalik eristada 6 erinevat meetodit – agendipõhine, neurovõrk (*artificial neural network*), rakk-automaat, majanduspõhine, Markovi ahelad ja statistilised mudelid (Lantman *et al.*, 2011). Igal meetodil on omad head ja vead, seega õige meetodi valik sõltub eesmärgist, uurimisküsimusest, uurimisala mõõtkavast ja olemasolevatest andmetest (Dang ja Kawasaki, 2016; Lambin ja Geist, 2006). Mõned mudelid on väga tundlikud andmete kvaliteedi suhtes, samas mõne mudeli puhul on võimalik häid tulemusi saada ka halva

kvaliteediga andmetega (Noszczyk 2019). Õige mudeli valimise probleemi on vähendanud tänapäeval tekkinud integreeritud mudelid, kuna ükski mudel ei võta arvesse kõiki maakasutuse muutuse omadusi (Castella ja Verburg, 2007). Integreeritud mudeleid on mitmeid, näiteks LUPAS (Van Paassen *et al.*, 2007) ja SWARM (Perez ja Dragicevic, 2012) (agendi-põhise ja rakk-automaadi integratsioon), CLUE (Castella ja Verburg, 2007) (agendi-põhise, rakk-automaadi ja statistiliste mudelite integratsioon), MANNCA (Ding *et al.*, 2013) (neurovõrgu ja rakk-automaadi integratsioon), DINAMICA (Thapa ja Murayama, 2011) ja CA-Markov (markovi ahelate ja rakk-automaadi integratsioon) ning teised (Noszczyk 2019). Linnade maakasutusmuutuste uurimisel on enim kasutatud meetoditeks agendi-põhine ja rakk-automaat (Hosseinali *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2019).

Eestis on tehtud mitmeid maakasutuse muutuste uuringuid. Hannes Palang uuris oma doktoritöös (1998) 20. sajandi maastiku muutusi, mille põhjal tehti mitme stsenaariumiga tuleviku prognoosid. Urmas Peterson ja Raivo Aunap (1998) uurisid kaugseire meetoditega 1990-ndate põllumajandusmaad ja selle muutusi Eestis. Anneli Poska ja teised (2007) kasutasid CA-Markovi mudelit ja õietolmu andmeid, millega analüüsis Rõuge maakatte muutusi. Eveli Sisask (2008) vaatles 20. sajandi Eesti maakasutust ja selle muutuseid ning ühtlasi modelleeris CA-Markovi mudeliga 2050. aasta tulevikuprognoosi. Piia Kirsimäe (2017) uuris oma magistratöös LCM-i mudeliga Tallinna, Tartu, Pärnu ja Narva maakasutusmuutusi ja modelleeris prognoosi aastaks 2030.

### **1.1.1 Agendipõhised mudelid**

Maakasutusmuutusi põhjustab peamiselt inimtegevus, mistõttu on huvi agendipõhiste mudelite vastu viimastel aastatel suurenenud (Parker *et al.*, 2001; Noszczyk, 2019). Agendipõhine mudel on simulatsioon otsuste tegijatest (agentidest), kelle käitumine sõltub vastavalt etteantud reeglitele (Farmer ja Foley, 2009). Agentidele määratud reeglid kujutavad ratsionaalseid otsuseid ja käitumist (Huigen, 2003). Agendil on mitmeid omadusi, mis hõlmavad agendi vaatenurki, eesmärke ning eelistusi erinevate valikute suhtes (Valbuena *et al.*, 2010b). Agendid suhtlevad omavahel ja mõjutavad üksteist uurimisalas (Bonabeau, 2002). Agentide otsuseid ja valikuid mõjutavad ka välised tegurid, milleks võivad olla näiteks eeskirjad, laenu ja vajadus kauba üle (Valbuena *et al.*, 2010b). Agendid on autonoomsed ja heterogeensed ning nad mõjutavad keskkonda ja teevad otsuseid vastavalt keskkonnale (Bert *et al.*, 2011; Hoisseinali *et al.*, 2012).

Agendid võivad olla aatomid, bioloogilised rakud, loomad, autod ja erinevad organisatsioonid (Hoisseinäli *et al.*, 2012). Maakasutuse uuringutes on agendiks tavaliselt maakorraldajad, kes teevad maakasutusotsuseid kombineerides individuaalseid teadmisi ja eesmärke, mullakvaliteedi ja topograafia andmeid ning eelnevaid maamajanduse otsuseid (Parker *et al.*, 2001). Maakasutuse uurimisel on agendipõhistel mudelitel 2 põhilist komponenti – uurimisala kaart ja agentide mudel, mis järgib inimeste võimalike otsuste tegemist (Noszczyk, 2019). Agentide käitumise modelleerimiseks on integreeritud mudelisse mitmeid andmeallikaid, näiteks ekspertide teadmised, hiljutised trendid ja olemasolevad mudelid uurimisala kohta (Murray-Rust *et al.*, 2013). Maakasutuse uuringutes on agendid tihti kategoriseeritud klassideks vastavalt nende positsioonile ühiskonnas ja eesmärkidele, mida tahetakse saavutada (Hoisseinäli *et al.*, 2012). Agendid võivad ühtlasi jaguneda sotsiaalseteks klassideks (näiteks sissetulek ja haridus) või ühiskondlikeks organisatsioonideks (näiteks külakogud ja kohalikud omavalitsused) (Parker *et al.*, 2001). Agendipõhisel modelleerimisel on tihti abiks stsenaariumid ehk erinevad võimalikud tuleviku olukorrad, kuna maakasutus ja inimtegevus on väga dünaamilised (Valbuena *et al.*, 2010a). Mudelil on 5 peamist kasutusala – poliitika analüüs ja planeerimine, kaasav modelleerimine (*participatory modelling*), maakasutuse ruumiliste muustrite uurimine, sotsioloogia vaadete testimine ja maakasutuse funktsioneerimise uurimine (Matthews *et al.*, 2007).

Agendipõhistel modelleerimistel on mitmeid meetodeid. Hoisseinäli *et al.* (2012) uurimuses on igale agendile antud uurimisalas asukoht ning piiratud ja miinimum arv liikumisi. Maakasutuse areng on jaotatud kaheks etapiks, milles iga etapp märgib ühte aastat. Esimeses etapis liiguvad agendid uurimisalas ja märgivad pikslid, mida nad külastasid. Teises etapis valitakse need pikslid, mis sobivad nende kategooriale kõige rohkem ning alustavad selle muutmist. Lisaks võistlevad ühisele pikslile kandideerinud kategooriad omavahel, mille tulemusel muudab pikslit selle võitnud kategooria. Piksli endale saanud võitja selgitatakse punktiskoori teel – arvesse võetakse agendi klassi ja eelnevatel võistlustel kaotatud pikslite arv. Bert *et al.* (2011) uurimuses aga tähistab mudelis üks aasta ühte põllumajandustsükli. Enne igat põllumajandustsükli määravad farmerid enda eesmärgid tulevaseks tsükliks. Vastavalt eesmärkidele otsustab farmer aasta ehk tsükli jooksul, kas vähendatakse, suurendatakse või ei muudeta enda põllumaad. Põllumaa suurendamiseks peavad farmerid rentima ala, seega nende otsused sõltuvad majanduslikust seisust.

Agendipõhiste mudelite tugevusteks on selle ruumiline struktuur, mudeliga on hea täiendada teisi modelleerimise tehnikaid, igat mõjutegurit hinnatakse eraldi ja mudelisse on võimalik lisada ja kokku panna erinevaid teoreetilisi vaatenurki (Huigen, 2003; Matthews *et al.*, 2007; Noszczyk, 2019). Agendipõhine mudel suudab anda väga paindliku ülevaate heterogeensetest otsuste tegijatest (Parker *et al.*, 2001). Agendipõhised mudelid vajavad aga väga mahukaid sisendandmeid ja suuri arvutuslikke ressursse, mistõttu on maakasutuse uuringud limiteeritud väiksematele aladele nagu linn või küla (National Research Council, 2013). Agendipõhised mudelid keskenduvad ainult kõige lihtsamatele maakasutuse aspektidele ning ei võta arvesse kõiki tegureid, näiteks rännet ning regionaal- ja globaalmajanduslikke tegureid ja nende mõju (Dang ja Kawasaki, 2016). Lisaks sellele on agentide otsuste-tegemise reeglite täpsust ja õigsust väga raske hinnata, mistõttu mudeli tulemusi on keeruline valideerida (Valbuena *et al.*, 2010a; Noszczyk, 2019).

Hosseinali *et al.* (2012) uurisid Iraanis Qazvini linna maakasutuse arengut, kus agentideks olid maakasutuse arendajad. Modelleerimiseks kasutati 3 kaarti – atraktiivsed alad, ligipääsetavus ja maa väärtuse kaart, milles on arvestatud maahind, mulla kvaliteet ja reljeef. Agendid jaotati viieks erinevaks klassiks vastavalt erinevatele kriteeriumitele. NetLogo 4.1 versioonis oleva agendipõhise mudeliga viidi läbi modelleerimine, mille tulemusena saadi nelja erineva stsenaariumi abil linnastumise simulatsioonid aastaks 2030. Stsenaariumitest leiti, et maakasutusmuutused toimuvad peamiselt erinevate külade ja linna lähedal. Küllaga on muutused hajusad ümber linna, mistõttu on vajalik selle pidev jälgimine ja kontrollimine. Lisaks toimusid muutused kõige rohkem parema kliima ja atraktiivsema elukeskkonnaga aladel. Sellest järeldati, et linna laienemist ja maakasutuse muutusi on võimalik suunata muutes teisi alasid atraktiivsemaks, näiteks parandades infrastruktuuri või rajades uusi parke ja tehisjärvi.

Valbuena *et al.* (2010a) uurisid Austraalia Tara linna maakasutusmuutuseid, kus agentideks olid farmerid. Modelleerimiseks kasutati katastriandmeid, maakatte andmeid ja mullakaarte. Agentide käitumisreeglistik joonistus läbi farmerite intervjuude, mille käigus saadi teada farmerite vaatenurgad. 3 erineva stsenaariumi abil tehti modelleerimine ajavahemiku 2007–2022 kohta. Modelleerimiseks kasutati NetLogo 4.1 agendipõhist mudelit. Kõigi 3 erineva stsenaariumi põhjal muutus kõige rohkem kirde ja edela piirkond. Uuringust leiti, et intervjuud farmeritega ei ole piisavalt hea andmeallikas, et aru saada, kuidas erinevad tegurid mõjutavad farmerite otsuseid ja sealt tulenevaid maakasutuse muutuseid. Puuduste likvideerimiseks oleks vajalik läbi viia ka

erinevad eksperimendid ning rollimängud, et tekiks laiem pilt farmerite käitumisest ja otsustest. Siiski suutis mudel väga hästi modelleerida poliitika muutumisest tulenevaid farmerite otsuseid.

### **1.1.2 Markovi ahelad**

Markovi mudelit kasutatakse maakasutusmuutuste kvantitatiivseks vaatlemiseks ja prognoosimiseks, võimaldades vaadelda ka maakasutuskategooriate vahelisi muutusi (Lantman *et al.*, 2011). Igale pikslile on määratud maakasutuskategooria ja üleminekutõenäosus, mil vaadeldava ala maakasutuskategooria muutub teiseks kategooriaks (Pontius, 2006; Dang ja Kawasaki, 2016). Markovi ahel eeldab, et maakasutusmuutuste intensiivsus on ajas statsionaarne ning muutused on ühesuunalised (Lantman *et al.*, 2011). Maakasutusmuutused toimuvad vastavalt ajasammule ning sõltuvad eelneval ajasammul toimunud muutustest (Kumar *et al.*, 2014). Meetod ei ole ruumiline ning see on selle peamiseks puuduseks (Noszczyk, 2019). Markovi ahelatega suudetakse anda täpsed maakasutuse üleminekud ja muutused, kuid puudub informatsioon, kus on muutus toimunud (Louca *et al.*, 2015). Ruumilise aspekti puudumise lahendusena on Markovi ahelat tihti integreeritud rakk-automaadiga, näiteks CA-Markov (Achmad *et al.*, 2018; Tajbakhsh *et al.*, 2016; Fitawok *et al.*, 2020).

### **1.1.3 Rakk-automaat**

Rakk-automaat on defineeritud kui rakkude süsteem, mis on ajas ja ruumis diskreetne (Noszczyk 2019). Rakk-automaat koosneb viiest põhielemendist: võrk (*grid*), rakud, ülemineku reeglid, mis määravad ruumilised ja dünaamilised protsessid, ajasammud ja naaberrakud, mis mõjutavad üksteist (Liu *et al.*, 2019; Dang ja Kawasaki, 2016). Uurimisala võrk on jagatud ühtlase suurusega rakkudeks ning igale rakule on antud väärtus, mis muutub vastavalt etteantud reeglitele, näiteks veekogud ei saa muutuda teiseks kategooriaks, ja mille muutust mõjutavad naaberrakud (Schweitzer *et al.*, 2011). Rakk-automaadi efektiivsus maakasutuse modelleerimistes on juba varasemalt tõestatud, mistõttu on meetodit laialdaselt kasutatud (Noszczyk 2019). Rakk-automaadi eesmärk linnade maakasutuse modelleerimisel on leida tegurid, mis mõjutavad linna ning vaadelda teguritest kujunevaid mustreid, mis võivad aset leida tulevikus (Liu *et al.*, 2019).

Rakk-automaat on kõige lihtsam ruumilise modelleerimise meetod, samas on võimalik kasutada väga keerulisi algoritme (Lagarias, 2012). Rakk-automaat lubab lisada palju erinevaid reegleid, mida kasutaja saab detailselt defineerida (Noszczyk 2019). Meetodi tugevuseks on selle ruumilisus, mistõttu tulemused on illustratiivsed (Lagarius, 2012; Noszczyk 2019). Rakk-automaat

on aga väga tundlik ruumilise lahutuse osas – tulemused võivad oluliselt muutuda, kui muuta rakkude suurust (Moreno *et al.*, 2009). Samuti on rakk-automaat tundlik mõõtkava suhtes, mistõttu on raske mudelit ja selle parameetreid üle tuua teistesse uuringutesse (Noszczyk 2019). Mudeli tulemused on oletuslikud ning puudub teoreetiline side üleminekureeglite ja inimeste poolt tehtud otsuste vahel (National Research Council 2013). Rakk-automaat ei suuda empiirilisel kirjeldada maakasutuse muutusi (Moghadam ja Helbich, 2013). Linnade modelleerimise praktiseerimine on jätkuvalt limiteeritud, kuna mudelid ülelihtsustavad kompleksseid ja mitmedimensionaalseid linnastumise protsesse (Liu *et al.*, 2019). Samuti ei võta rakk-automaat arvesse majanduslikke tegureid ja inimese laialdast mõju tiheasustusega alades (Noszczyk 2019). Rakk-automaat on limiteeritud vaatlema ainult linnade laienemist ja valglinnastumist ning mitmedimensionaalseid protsesse nagu gentrifikatsioon ja linnade tihenemine pole võimalik uurida (Liu *et al.*, 2019). Linnade modelleerimisel on rakk-automaadi puuduste vähendamiseks meetodit integreeritud teiste meetoditega nagu agendi-põhise, näiteks CLUE-S mudel (Castella ja Verburg, 2007; Zhou *et al.*, 2016) ja markovi ahelatega, näiteks CA-Markov (Achmad *et al.*, 2018; Tajbakhsh *et al.*, 2016; Fitawok *et al.*, 2020), ja DINAMICA (Thapa ja Murayama, 2011).

#### **1.1.4 CA-Markov**

CA-Markov on integratsioon Markovi ahelatest ja rakk-automaadist, mis on laialdast kasutust leidnud maakasutusmuutuste uuringutel. CA-Markovi integreeritud mudel elimineerib rakk-automaadi ja Markovi ahelate omavahelised puudujäägid ning muudab mudeli efektiivsemaks vahendiks maakasutusmuutuste uurimistes (Arsanjani *et al.*, 2012). CA-Markovil puudub piirang sisestatud maakasutuskategooriate arvu vastu ning mudel suudab simuleerida üleminekuid iga maakasutuskategooria vahel olenemata kategooriate arvust (Pontius ja Malanson, 2005). CA-Markovi mudelis simuleeritakse kvantitatiivne muutus Markovi ahelatega ning ruumiline muutus rakk-automaadiga (Olmedo *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2015). Markovi ahel annab tulemuseks erinevate maakasutuskategooriate pindalad ning muutuste suuruse erinevate kategooriate vahel ning rakk-automaat muutuste asukoha kaardil (Mas *et al.*, 2014). Kvantitatiivsete väärtuste saamiseks ekstrapoleeritakse iga kategooria juurdekasv ja kadu eelneval ajasammul (Pontius ja Malanson, 2005; Olmedo *et al.*, 2015). Muutuste asukoha saamiseks on rakk-automaadil 2 printsiipi – külgnõlvuse printsiip (*contiguity rule*) ja sobivuskaardid (Pontius ja Malanson, 2005).

Külgnevuse printsiip tähendab, et pikslil on suurem tõenäosus muutuda kategooriaks, mis on selle kõrval (Araya ja Cabral, 2010). Külgnevuse printsiibil on kasutusel sobivusväärtus (*suitability value*), mis määrab piksli sobivuse muutuda teiseks kategooriaks (Pontius ja Malanson, 2005). Iga ajasammu järel määratakse pikslile uus sobivusväärtus, mis on mõjutatud kõrvalolevatest kategooriatest – mida rohkem on ühe kategooria piksleid uuritava piksli kõrval, seda suurem on piksli sobivusväärtus muutuda teiseks kategooriaks (Pontius ja Malanson, 2005). Kõrvalolevate pikslite tõenäosusi aitab filtreerida naabruskonnafilter (*spatial filter, neighborhood filter*), mis võtab modelleerimisel arvesse lähedust teisele kategooriale (Olmedo *et al.*, 2015). Naabruskonnafiltri sätestab mudeli kasutaja ise ning see on tihti määratud 5 x 5 pikslit (Araya ja Cabral, 2010).

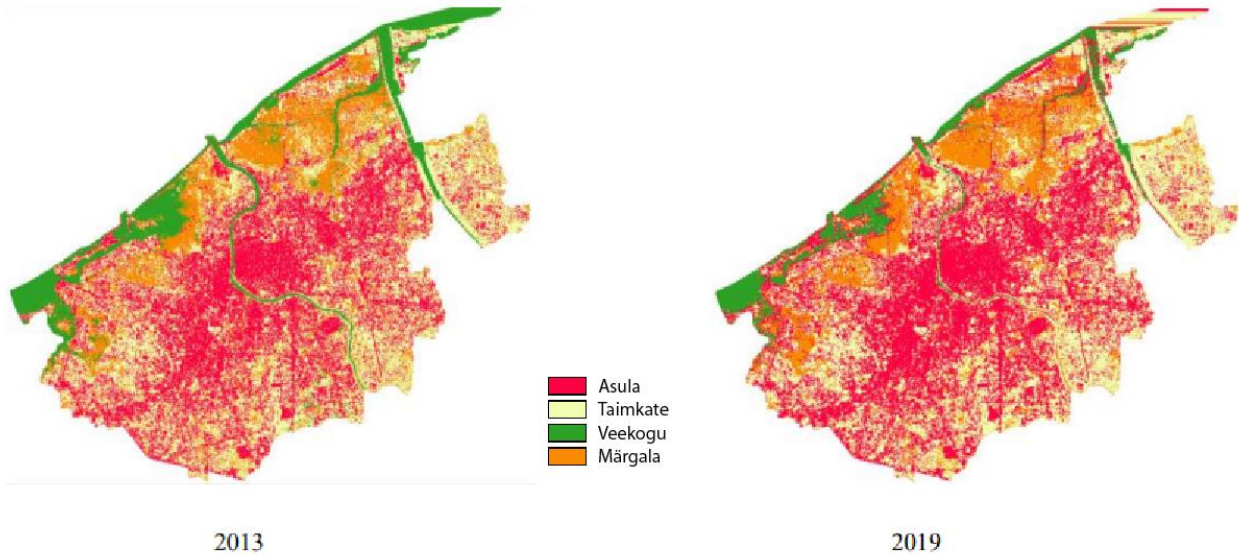
Sobivuskaartide abil leitakse alad, mis on kõige sobilikumad muutusteks (Araya ja Cabral, 2010; Mas *et al.*, 2014; Olmedo *et al.*, 2015). Ühtlasi määratakse sobivuskaartide abil võimalikud kategooriate vahelised muutused (Tajbakhsh *et al.*, 2016). Sobivuskaarte luuakse kriteeriumikaartide abil, mida on võimalik jagada kaheks – tegurid ja piirangud (Araya ja Cabral, 2010). Teguriteks võivad olla näiteks nõlvakalded, mullakvaliteet, karjamaade sobivuskaart, maa-asulate rahvastikutihedus, maakatte kaardid ja lähedus erinevatele teedele (kiirteed, maanteed jne), linnaalale, linnapiirile, küladele, veekogudele, kaitsealadele ja põllumajandusmaale (Araya ja Cabral, 2010; Mas *et al.*, 2014; Tajbakhsh *et al.*, 2016). Piiranguteks võivad olla näiteks veekogud, olemasolevad linnaalad ning looduskaitsealad (Araya ja Cabral, 2010). Piirangud on tõeväärtused, mille väärtusteks on 0 (väär ehk ei sobi) ja 1 (tõene ehk sobib), teguritel on aga sobivusväärtused vahemikus 0 (kõige vähem sobiv) ja 255 (kõige rohkem sobiv) (Araya ja Cabral, 2010). Sobivuskaarte on võimalik teha IDRISI mudelis *MCE Decision Wizard*, mis kasutab hägusloogikat (*Fuzzy logic*) ja mitme-kriteeriumi hindamise meetodeid nagu analüütiliste hierarhiate meetod ehk AHP ja järjestatud kaalutud keskmistamine ehk OWA (*Ordered Weighted Averaging*) (Eastman, 2012). *Fuzzy* tööriist võimaldab kasutada sigmoid- ja lineaarfunktsioone ning j-kujulist kasvukõverat, mille abil viiakse teguri kaardid 0-255 skaalale (Eastman, 2006; Araya ja Cabral, 2010).

Modelleerimisel esineb probleeme seal, kus ühele pikslile võivad pretendeerida mitu kategooriat (Mas *et al.*, 2014; Olmedo *et al.*, 2015). CA-Markov kasutab probleemi lahendamiseks MOLA algoritmi (*Multi-objective land allocation*), mis määrab parima võimaliku kategooria, mille piksli

endale sellistes olukordades võtab (Pontius ja Malanson, 2005). CA-Markovi mudelis eeldatakse, et muutuvad pikslid, millel on kõige suurem tõenäosus, mistõttu pikslid paremusjärjestatakse (Mas *et al.*, 2014).

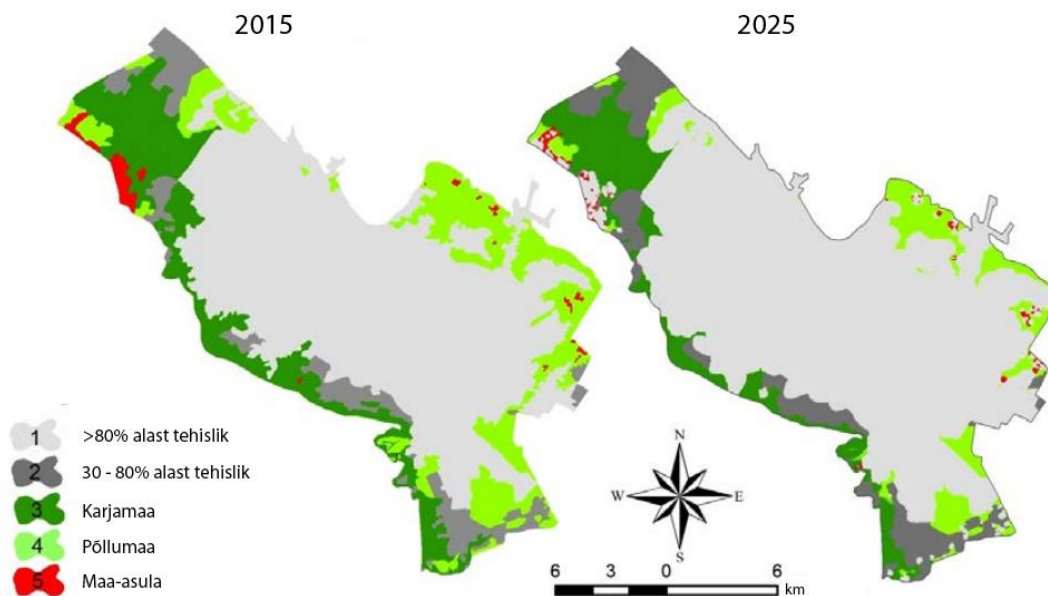
CA-Markovi efektiivseks modelleerimiseks on vajalik mudeli kalibreerimine ja selle valideerimine (Tang ja Di, 2019). Kalibreerimisel leitakse vajalikud tegurid, piirangud ning nende parameetrid (Pontius ja Malanson, 2005). CA-Markovi mudelit kalibreeritakse kahe erineva aasta referentskaardiga ajahetkedel  $t_0$  ja  $t_1$ , millest modelleeritakse ajahetk  $t_2$ , mille tulemus valideeritakse vastava ajahetke referentskaardiga (Pontius ja Malanson, 2005; Olmedo *et al.*, 2015). CA-Markovi mudeli tulemuste valideerimiseks on võimalik kasutada Kapa indeksit (*Cohen's Kappa Agreement Index*), kus hinnatakse Kapa kordajaga kahe kaardi ühildumist (Tajbakhsh *et al.*, 2016). IDRISI *Validate* tööriist jaotab aga Kapa eri komponentideks: Kno, mis näitab modelleeritud kaardi üleüldist sarnasust referentskaardiga, Klocation, mis näitab mudeli asukoha täpsust, ja Kstandard, mis kirjeldab juhuslikult valitud mudeli ja referentskaardi ala vahelist sarnasust (Ozturk, 2015). Tulemuseks on Kapa väärtused vahemikus 0-1 (Tajbakhsh *et al.*, 2016). Kui Kapa kordaja on üle 0,8 ehk 80%, siis mudel on piisavalt täpne ning sellega on võimalik teha tuleviku prognoose (Araya ja Cabral, 2010; Ozturk, 2015).

Achmad *et al.* (2018) uurisid Indoneesias CA-Markovi mudeliga Banda Acehi linna maakasutust, kus võrreldi muutusi aastatel 2013 ja 2019. Mudeli valideerimisel saavutati 89%-line täpsus. Tulemustest leiti, et linn on arenenud ranniku poole (joonis 1), mis tõstab kahjustuse suurust tsunami korral ning vajab suuremat tähelepanu linnaplaneerimisel.



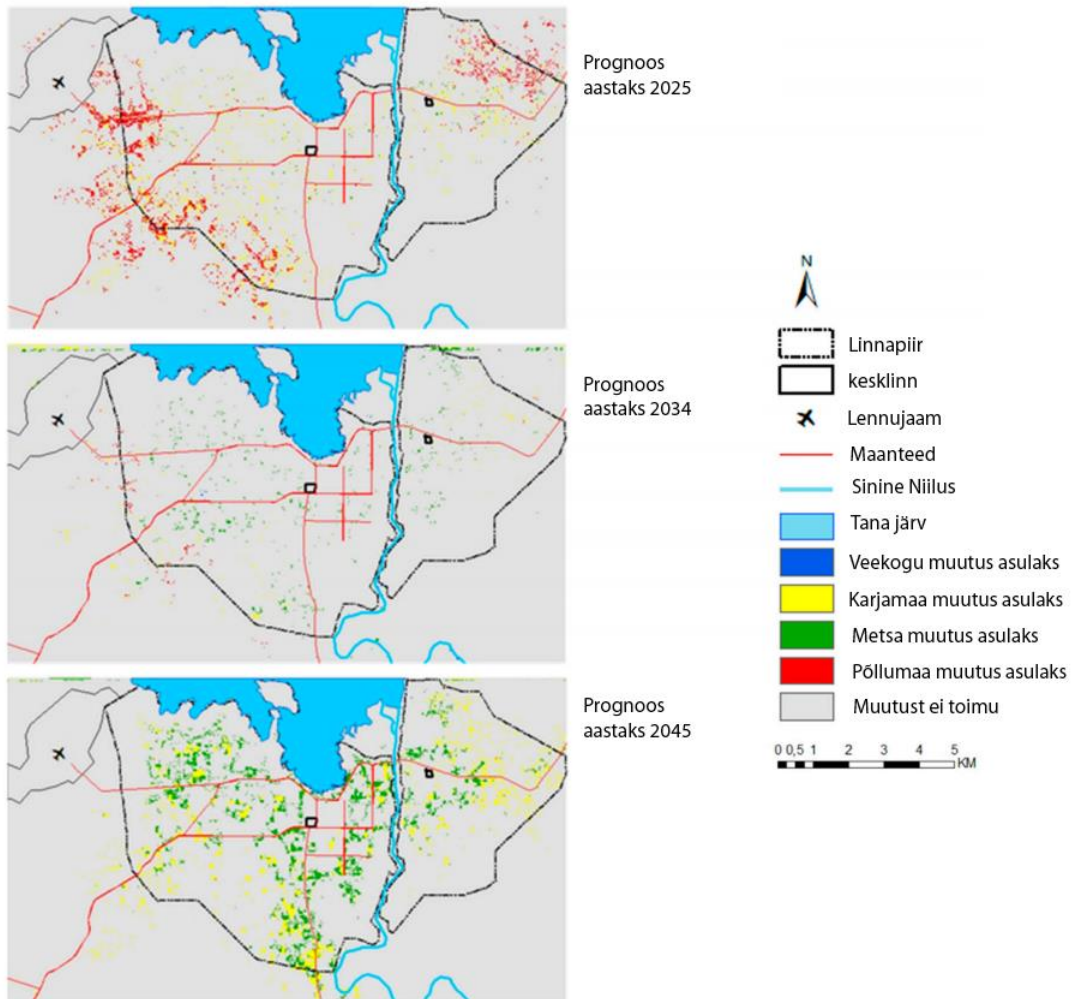
**Joonis 1.** Maakasutuse modelleerimine aastate 2013 ja 2019 kohta Indoneesias Banda Acehi linnas (Achmad *et al.*, 2018).

Tajbakhsh *et al.* (2016) uurisid Iraanis CA-Markovi mudeliga Mashhadi linna maakasutust, kus võrreldi muutusi ajavahemikul 1967–2015 ning tehti prognoos aastaks 2025. Tulemustest leiti, et linn on arenenud ja jätkab arenemist rohkem põhja ja loode suunas ning 2025. aastaks on prognoositud maa-asulate drastilist vähenemist (joonis 2). Vahemikus 2015–2025 on prognoositud linnaala 4251 hektarilist suurenemist. Linna-ala suurenemise tõttu vähenes põllumajandusmaa ja karjamaa, mistõttu väheneb muldade läbilaskvus ja suureneb üleujutuste arv. Kuna linna areng toimub kõige rohkem loode suunas, siis Mashhadi loodeala vajab suuremat keskkonnakaitset.



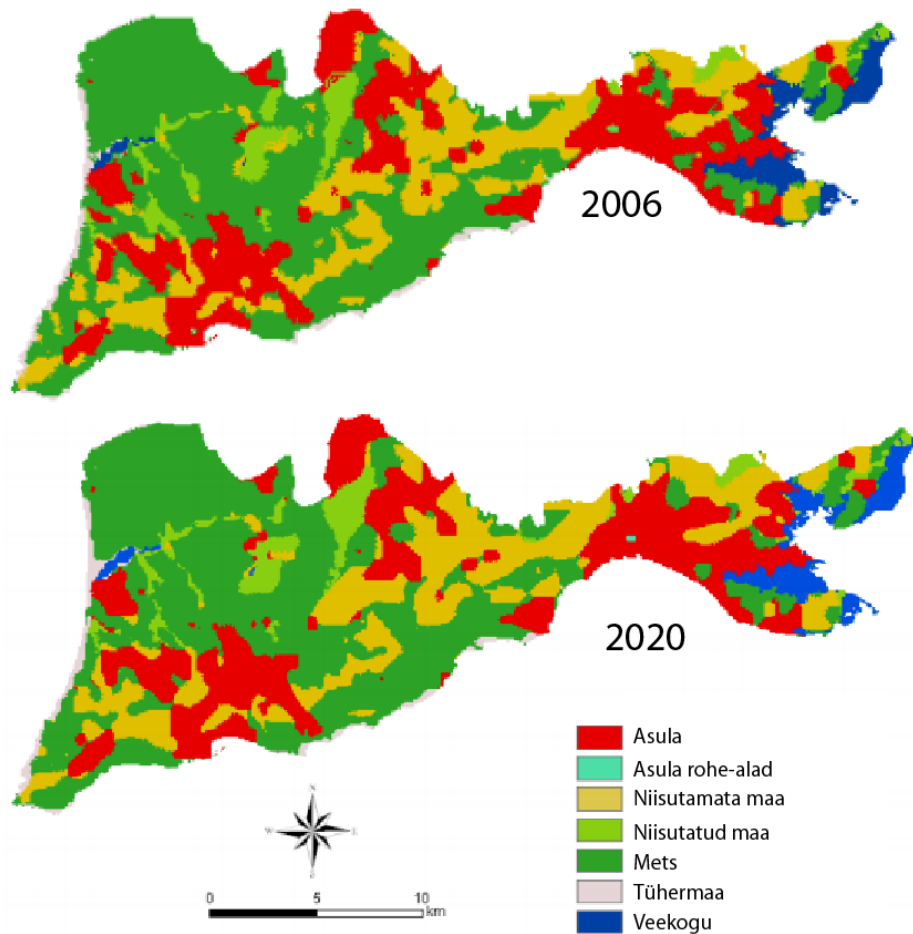
**Joonis 2.** 2015. aasta maakasutuse ning 2025. aasta prognoosi võrdlus Iraanis Masshadi linnas (Tajbakhsh *et al.*, 2016).

Fitawok *et al.* (2020) uurisid Etioopas CA-Markovi mudeliga Bahir Dar linna maakasutusmuutusi, kus võrreldi muutusi ajavahemikul 1991–2018 ning tehti prognoosid aastateks 2025, 2034 ja 2045. Tulemustest selgus, et vahemikus 1991–2018 suurenes linnaala 1246 hektarilt 4343 hektarile ning 2045. aastaks prognoositakse 5276 hektari suurust linnaala. Kui vahemikus 2018 kuni 2025 prognoositi peamiselt põllumaade muutust asulateks, siis vahemikus 2025–2045 prognoositi karjamaa ja metsade muutust asulateks (joonis 3). Järgnevate dekaadide jooksul prognoositakse ala tihestumist ja valglinnastumist. Ühtlasi selgus, et linnaala on aastakümnete jooksul arenenud mööda põhilisi teid, ärikeskusi ja veekogusid, seejuures sõltudes reljeefist.



**Joonis 3.** Proгноositud maakasutusmuutused aastatel 2025, 2034 ja 2045 Etioopias Bahir Dar linnas (Fitawok *et al.*, 2020).

Araya ja Cabral (2010) uurisid Portugalis CA-Markovi mudeliga Lissabonis Setúbal ja Sesimbra omavalitsusüksust, kus võrreldi maakasutusmuutusi ajavahemikus 1990–2006 ja tehti proгноос aastaks 2020. Andmetena kasutati satelliidipilte ja erinevaid kaarte maakatte, kõrguste ning teede võrgu kohta. Valideerimisel saavutati 87%-line Kapa kordaja täpsus. Tulemustest leiti, et asulate ala on suurenenud 16 aasta jooksul 103% (1990. aastal 3487.5 ha ning 2006. aastal 7087.73 ha). 2020. aastaks proгноосiti asulate ja metsade suurenemist ning põllumaa vähenemist (joonis 4). Lisaks leiti kõrge valglinnastumise määr ja selle jätkumine tulevikus, mille põhjuseks on kliima ja lähedus rannikualadele.

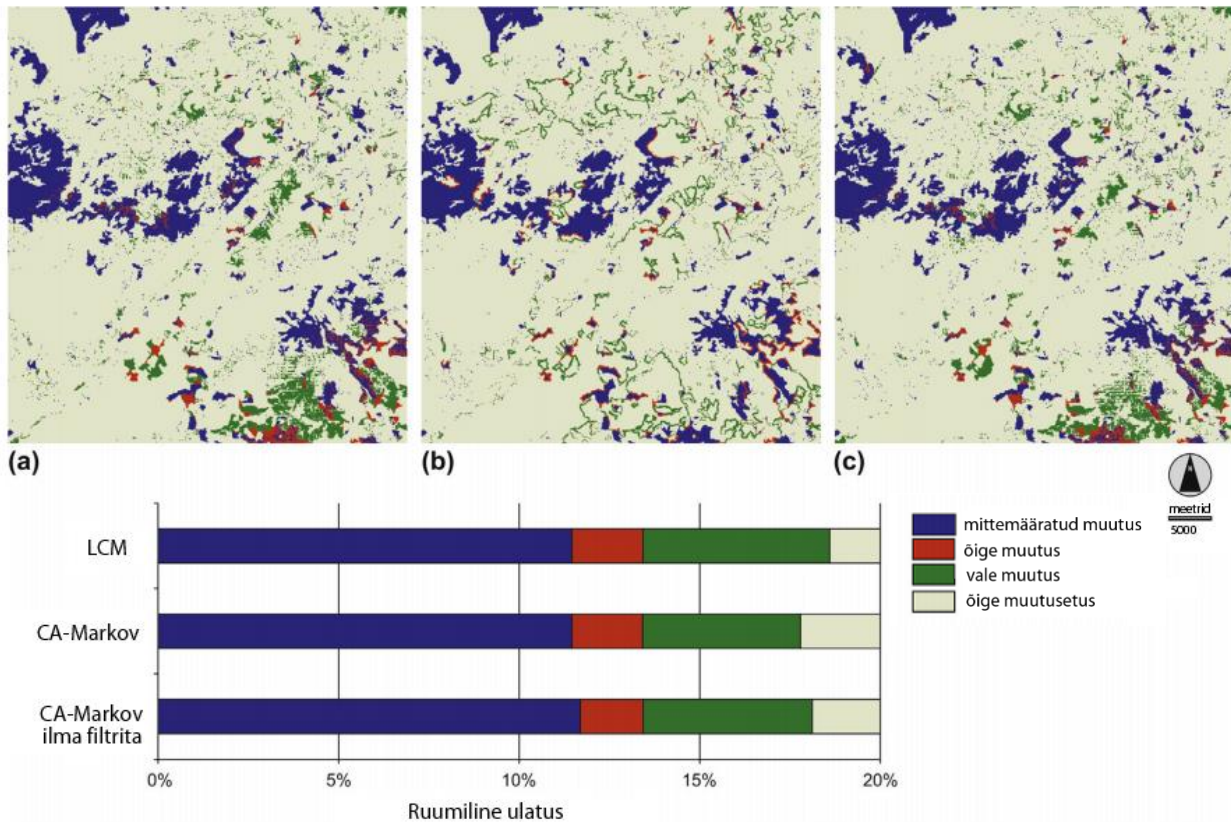


**Joonis 4.** 2006. aasta maakasutuse ning 2020. aasta prognoosi võrdlus Portugalis Lissaboni linnas (Araya ja Cabral 2010).

Pontius ja Malanson (2005) võrdlesid CA-Markovi ja GeoModi täpsust Massachusettsi piirkonna linnades, mille tulemustest selgus, et CA-Markov on parem valik kui uuritakse rohkem kui 2 erinevat kategooriat. GeoModi on võimalik sisendada ainult kahte kategooriat ja mudel uurib ainult kahe kategooria vahelisi muutusi, mistõttu CA-Markov on komplekssem (Pontius ja Malanson, 2005; Pontius, 2006).

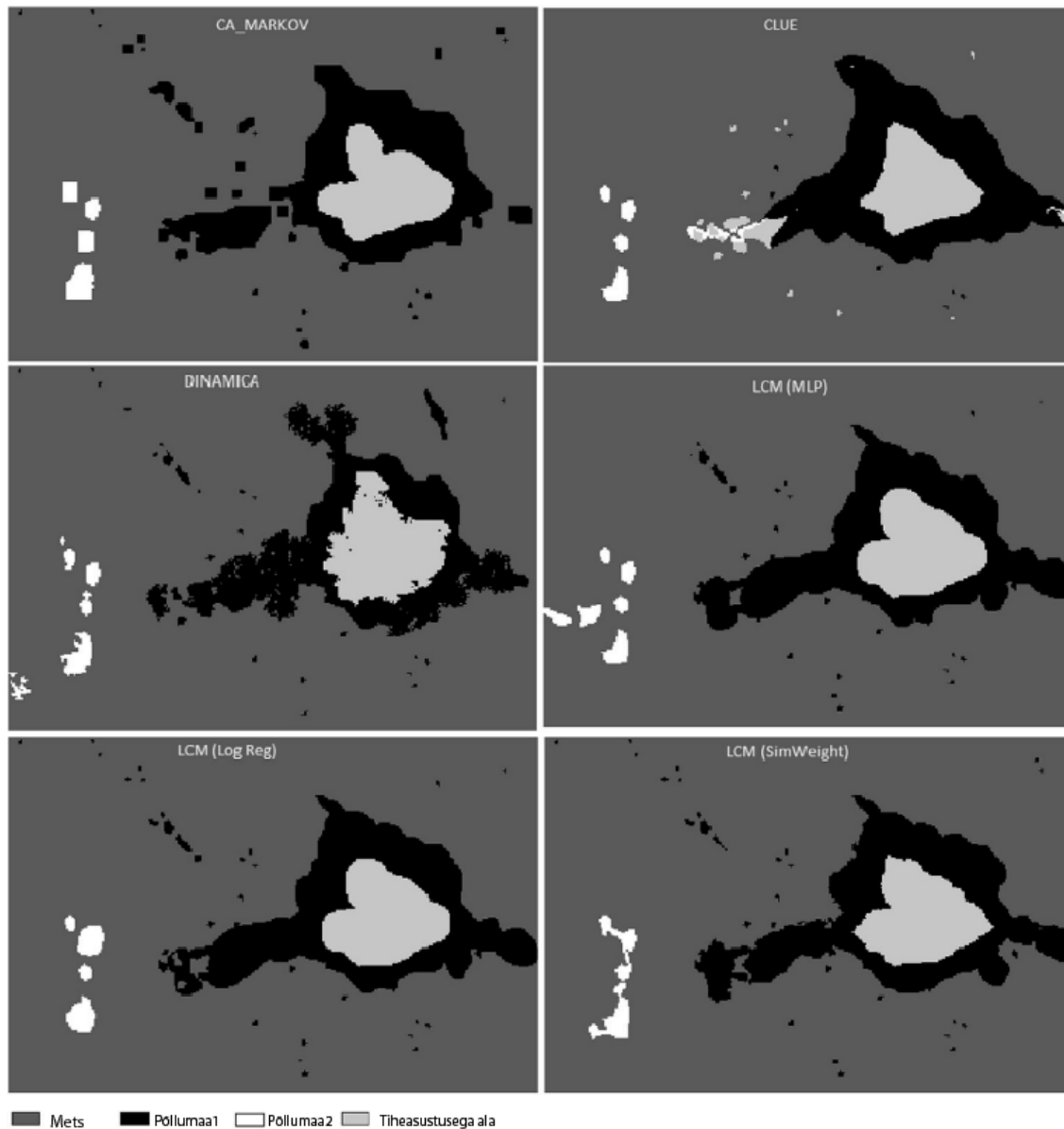
Olmedo *et al.* (2015) võrdlesid LCM-i ja CA-Markovi mudeleid, uurides Hispaania Segura jõe valgla ümbrust. Mudelite tulemusi võrreldi Corine maakatte kaardiga. Kuna CA-Markovil on olemas ruumiline filter, mis LCM-il puudub, siis võrreldi CA-Markovi ilma filtrita ja filtriga. Mudelid saavutasid sarnased tulemused mitmes uuringus – kvantitatiivsetes tulemustes ja ka ruumilistes uuringutes. Ühtlasi võrreldi mudelite täpsust (joonis 5), millest on näha mudelite

sarnaseid tulemusi. Mittemääratud muutus on koht, kus mudel jättis piksli samaks, kuid tegelikult muutus. Õige muutusetus on koht, kus mudel jättis õigesti piksli samaks. Mudelite võrdlemisel selgus, et tulemused olid LCM-iga sarnasemad, kui CA-Markovi filtrit ei kasutatud.



**Joonis 5.** Mittemääratud, õiged ja valed muutused ning õige muutusetus a) LCM-i, b) CA-Markovi ja c) CA-Markovi ilma filtrita puhul. Ruumiline ulatus tähistab protsentuaalselt ala, mis on muutunud (Olmedo *et al.*, 2015).

Mas *et al.* (2014) võrdlesid omavahel nelja erinevat maakasutuse mudelit – CA-Markov, CLUE, DINAMICA ja LCM. Mudelite võrdlemiseks loodi virtuaalne ala, mille maakasutus loodi aasta 2000 ja 2010 kohta. Tulemustest leiti, et kõigi nelja mudeli markovi maatriksi tulemused olid sarnased. Ruumilised tulemused olid mudelite vahel veidi erinevad, samas LCM-i ja CA-Markovi tulemused on kujult väga sarnased (joonis 6). Põllumaa 1 tähistab vastavat maakasutust kõrgustel alla 600 meetrit ning põllumaa 2 kõrgustel üle 600 meetrit.



**Joonis 6.** Nelja erineva mudeli maakasutusmuutuste tulemused aastaks 2020 (Mas *et al.*, 2014).

### 1.1.5 Analüütiliste hierarhiate meetod (AHP)

Sobivusanalüüs on linnade maakasutusmuutuste modelleerimisel üks tähtsamaid meetodeid, et leida erinevate kriteeriumite ja osakaaludega kõige sobilikumad kohad muutusteks (Alexander *et al.*, 2012; Aburas *et al.*, 2015). Üks parimaid sobivusanalüüsi meetodeid on analüütiliste hierarhiate meetod ehk AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Aburas *et al.*, 2015). AHP analüüsib ja võrdleb omavahel mitmeid tegureid, mistõttu kategoriseeritakse AHP mitme-kriteeriumi hindamismeetodite alla (Aburas *et al.*, 2015). Protsessi kasutamiseks leitakse eelnevalt tegurite

olulisus, kasutades tähtsuskalaat ja ekspertide arvamusi (Mohammad *et al.*, 2013). Mida rohkem on eksperte, seda objektiivsemad ja täpsemad on tegurite osakaalude väärtused, küllaga vähemalt 10 eksperti on piisav, et objektiivselt hinnata tegurite omavahelist tähtsust (Mohammad *et al.*, 2013; Aburas *et al.*, 2015). Tegurite tähtsust on võimalik hinnata ka Crameri V väärtustega (Fathizad, 2019). Mida suurem on Crameri väärtus, seda suurem on teguri mõju (Subiyanto ja Suprayogi, 2019). Tegurit peetakse piisavalt heaks, kui selle väärtus on üle 0.15 (Eastman, 2012). Olgugi et Crameri test on küllaltki robustne, annab see siiski piisavalt hea ülevaate tegurite potentsiaalsest mõjust (Eastman, 2012).

Tegurite omavahelisel võrdlemisel kasutab AHP paaripõhist võrdlust (*pairwise comparison*) (Bagheri *et al.*, 2013). Paaripõhisel võrdlemisel on kasutuses skaala ühest üheksani, kus 1 tähendab, et tegurid on sama tähtsad ning 9 tähistab teguri palju suuremat tähtsust võrreldavast tegurist (Aburas *et al.*, 2015; Morales ja De Vries, 2021). AHP kontrollib ka järjepidevust, kuna tegurite paaripõhisel võrdlemisel tekib teatud tasemel lahkeli (Akinci *et al.*, 2013). Tegurite osakaalud on edasisteks uuringuteks piisavalt head, kui järjepidevuse väärtus on alla 0.1 (Saha ja Roy; 2021). AHP tulemuseks on tegurite osakaalud vahemikus 0 kuni 1 ning osakaalude summa on 1 (Akinci *et al.*, 2013; Morales ja De Vries, 2021; Saha ja Roy, 2021). Mida suurem on teguri osakaal, seda rohkem mõju avaldab see sobivuskaardil (Morales ja De Vries, 2021). AHP tugevuseks on selle kasutajasõbralikkus ja lihtsus (Kumar *et al.*, 2017). Lisaks on võimalik võrrelda omavahel kvalitatiivseid ja kvantitatiivseid tegureid (Aburas *et al.*, 2015).

Ullah ja Mansourian (2015) analüüsisid AHP-ga võimalikke sobivaid alasid uute asulate rajamiseks Bangladeshis Dhaka linnas. Loodi 4 tegurite gruppi: maakate, kommunaalteenused (lähedus teedele ja elektriliinidele), kõrgus ja kogukonnateenused (kaugus koolidest, haiglatest, bussijaamadest, turgudest ja parkidest). Ekspertide hinnangute abil leiti AHP-ga tegurite osakaalud: maakasutus 0.5, kõrgus 0.34, kommunaalteenused 0.1 ja kogukonnateenused 0.05. Antud uuringust selgus, et maakate on kõige tähtsam tegur uue asustuse rajamisel.

Morales ja De Vries (2021) analüüsisid AHP-ga maakasutuse sobivust. Uuringu käigus hindasid 20 eksperti tegurite mõju uute asulate rajamisele ning tööstus- ja ärimaale. Uute asulate rajamisel hinnati nõlvakallet, kõrgust, mulla tüüpi, kaugust rannikust, jõest, teedest, kogukonnateenustest ja dreanaazist. Selgus, et uute asulate rajamisel avaldab kõige rohkem mõju kaugus teedest (osakaaluga 0.21) ja kaugus kogukonnateenustest (osakaal 0.2). Teguritele kaugus jõgedest ja

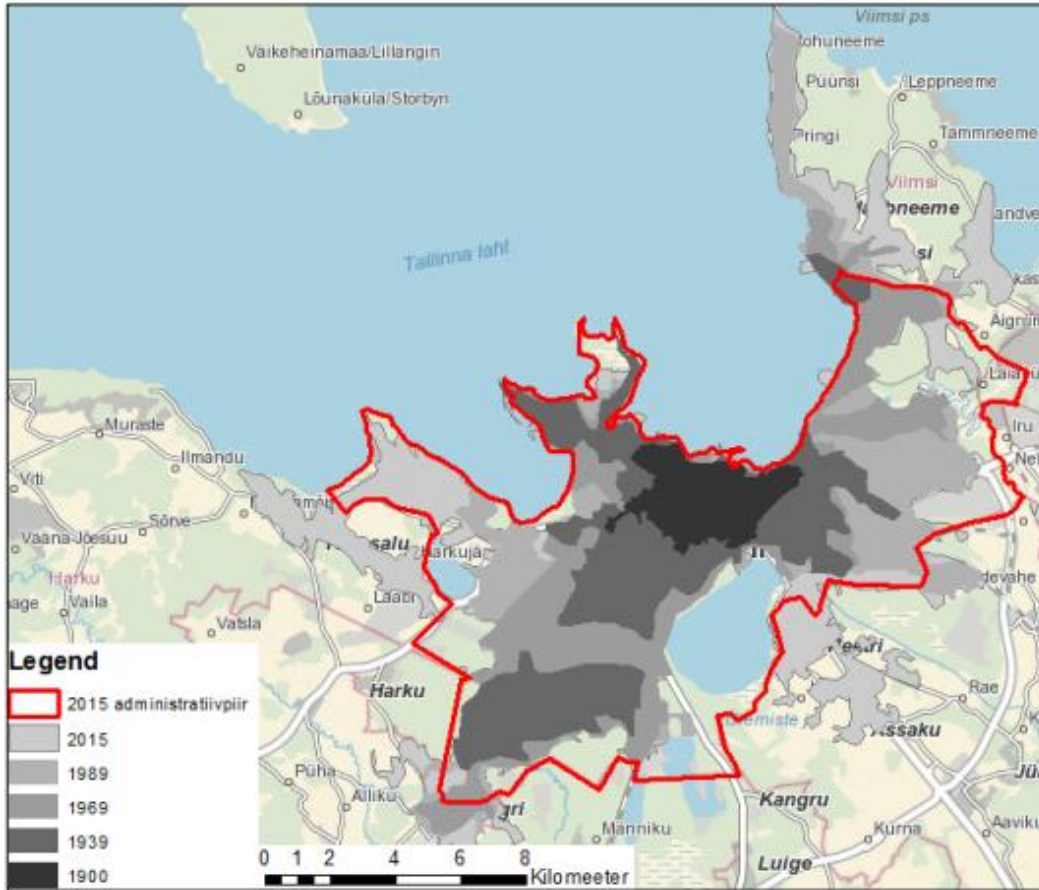
rannikust leiti osakaal 0.09 ning kõrguse ja nõlvakalle osakaaluks saadi 0.13. Uute tööstus- ja ärimaade rajamisel leiti, et kaugus teedest (vastavalt osakaalud 0.36 ja 0.25) on olulisem tegur kui nõlvakalle (vastavalt osakaalud 0.22 ja 0.09). Uute ärimaade rajamisel peeti tähtsaks teguriks ka kaugust sadamatest (osakaal 0.21).

Saha ja Roy (2021) analüüsisid AHP-ga ala sobivust uue asustuse rajamiseks Indias Siliguri linnas. Erinevad eksperdid hindasid 9 mõjutegurit: maakate, nõlvakalded, geoloogilised tegurid, rahvastikutihedus, kaugus teedest, raudteejaamadest, lennujaamast, jõgedest ja kanalist. Ekspertide hinnangul avaldab kõige rohkem mõju kaugus teedest (osakaal 0.3). Tegurile kaugus lennujaamast arvutati osakaal 0.186, kaugus raudteejaamast 0.135, maakasutus 0.13, rahvastikutihedus 0.11, nõlvakalle 0.05, kaugus jõgedest 0.04, kaugus kanalist 0.035 ja geoloogilised tegurid 0.017.

Bagheri *et al.* (2013) uurisid maakasutuse sobivust uueks asulaks kasutades AHP tööriista. Uuringualaks on rannikuäärne Malaisia linn Kuala Terengganu. Uuringus hinnatud tegurid ja nende arvutatud osakaalud on järgnevad: nõlvakalle osakaaluga 0.34, maakasutus osakaaluga 0.22, olemasolev asula osakaaluga 0.2, kaugus teedest osakaaluga 0.15 ning kaugus jõest osakaaluga 0.09.

## **1.2 Tallinn ja valglinnastumine**

Tallinna pindala oli 1900. aastal 10,45 km<sup>2</sup> ning 2015. aastaks oli pindala kasvanud 158,27 km<sup>2</sup>, laienedes igas suunas (joonis 7) (Kirsimäe, 2015). Viimase 26 aastaga on Tallinna hoonestatud ala suurenenud ligikaudu 70% (9417 hektarit) (Kirsimäe, 2017). 2003. aastal oli Tallinna elanike arv 1. jaanuari seisuga 377 890 elanikku ning 2015 ja 2020 aastatel vastavalt 434 426 ja 443 932 (Tallinna linna ametlik koduleht, i.a). Linna suurele kasvamisele on kaasa aidanud nii eeslinnastumine kui ka valglinnastumine (Gauk ja Roose, 2013).



**Joonis 7.** Tallinna linna tajutav administratiivpiir aastatel 1900, 1939, 1969, 1989 ja 2015 ning 2015 (Kirsimäe, 2015).

Valglinnastumine on linna planeerimata areng ja laiuli valgumine aladele, kus on madal asustustihedus ning eeslinnastumine on inimeste elukohtade valik linnade tagamaal, mistõttu kaob selge piir linna ja maapiirkonna vahel (Gauk ja Roose, 2013). Eeslinnastumise ja valglinnastumise laialdase levikuga liikusid linnaelanikud elama linna tagamaale, kuid jätkus igapäevane seos linnaga, moodustades linnaregiooni, mis koosneb linnast ja selle tagamaast (Leetmaa, 2004). Kõige ulatuslikum valglinnastumine Eestis leiab aset Tallinnas, kus linnaregioon ulatub 50 kilomeetrini (Gauk ja Roose, 2013). Tallinna lähitagamaaks peetakse Viimsi, Jõelähtme, Raasiku, Rae, Kiili, Saku, Saue ja Harku valdasid ning ühtlasi ka Maardu ja Saue linna (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001) (joonis 8). Üle poole lähitagamaa elanikest töötab ja kasutab Tallinna teenuseid, sealhulgas õppeasutusi (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001). Valglinnastumisel on mitmeid põhjuseid – suurem õhusaaste, ebaturvalisus, müra, odav maahind linnapiirist väljas, linnas elamine on muutunud liiga kalliks, autostumine ehk autode parem

kättesaadavus, parem keskkond peredele ja linnakeskkonna tihedast asustusest tekkinud ruumilised piirangud (Leetmaa ja Tammaru, 2007; Tammaru, 2009; Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010a; Gauk ja Roose, 2013). Üldjuhul liiguvad tagamaale elama suurema sissetulekuga ja keskmisest haritumad inimesed (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010a). Tagamaal elamise puuduseks on aga selle kaugus Tallinnast ja erinevatest teenustest (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010a). Valglinnastumisele aitas kaasa 1990ndatel toimunud maareform, kus maad tagastati ja erastati (Tammaru et al. 2009). Lisaks sellele muudeti 1990ndatel elamumajandus isereguleeritud vabaturusektoriks (Gauk ja Roose, 2013). Valglinnastumise arengut on mõjutanud Eesti majanduskasv – 1999–2007 aastatel suurenes sisemajanduse kogutoodang igal aastal 4% (Gauk ja Roose, 2013). See oli eelduseks ehitusbuumile 2000. aastatel, kus majanduskasvu tõttu tekkis suurem nõudlus linnade lähedal olevate elamispindade järele (Samarüütel *et al.*, 2010).



**Joonis 8.** Tallinna linnaregioon (Leetmaa, 2004).

Ajavahemikus 1991–2005 suurenes Tallinna lähiümbruse elanikkond 17 200 elaniku võrra, kuna rajati 171 uut asumit koos 3400 maja ja 5600 majapidamisega, millest enamus on kuni 20 km kaugusel Tallinna keskusest ehk Raekoja platsist (Tammaru *et al.*, 2009; Gauk ja Roose, 2013). 17 % uutest asumitest paiknes 0–10 km kaugusel Tallinna Raekoja platsist, 51% 10–15 km kaugusel, 20% 15–20 km kaugusel ning 11% üle 20 km kaugusel (Tammaru *et al.*, 2009). Ajavahemikus 1989–2000 olid kõige populaarsemateks elukohtadeks Maardu, Viimsi, Harku,

Saue, Rae ja Saku vallad (Leetmaa ja Tammaru, 2007), millest Viimsi, Saku, Rae ja Harku on kasvanud kõige kiiremini (Samarüütel *et al.*, 2010). Ühtlasi on enamik alates 1991. aastal ehitatud uutest asumitest merele lähedal – umbes pooled on kuni 5km kaugusel rannikust, millest 85% asuvad Viimsis (ida pool) ning Harkus (lääne pool), ja ligikaudu 75% kuni 10km kaugusel rannikust (Tammaru *et al.*, 2009).

Tallinna tagamaa uued asulad on koondunud mööda teid või nende lähedusse ja liitunud suuremate maa-asulatega ning kõige kaugemad asulad paiknevad ainult mööda riigimaanteid (Samarüütel *et al.*, 2010; Roose *et al.*, 2013). Tallinna uued asulad on rajatud mööda rannikut mere äärde (Tammaru *et al.*, 2009; Samarüütel *et al.*, 2010; Kirsimäe, 2017), näiteks Haabersti linnaosa on mööda ranniku äärt laienenud Kakumäe poolsaareni ja kokku kasvanud Tabasaluga (Kirsimäe, 2015). Lisaks eelnevale on näha Tallinna laienemist Tartu suunas (Kirsimäe, 2015).

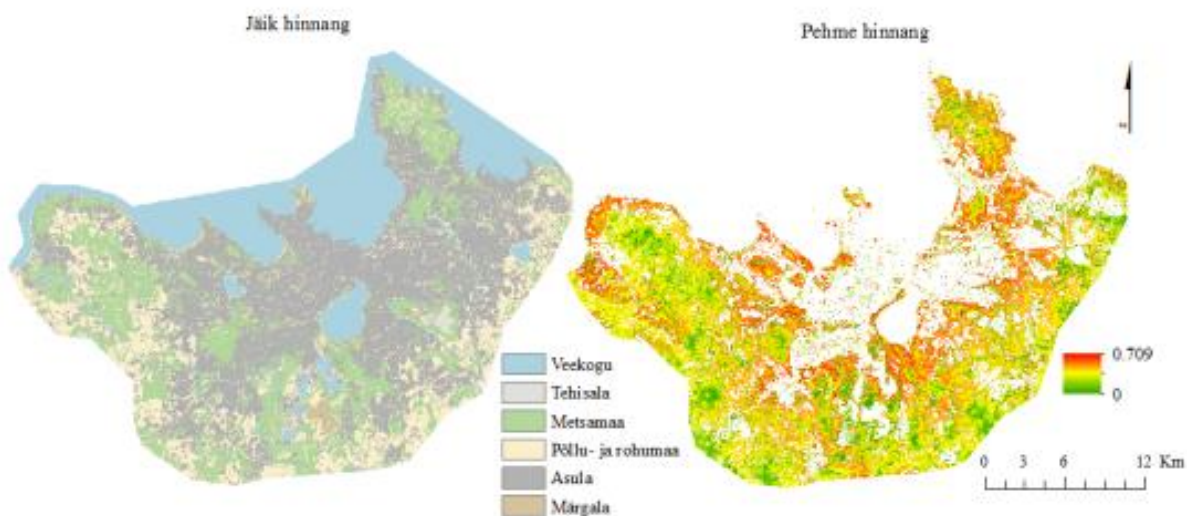
Uued asumid on rajatud põhiliselt endistele põllumaadele ja niitudele ning 2003–2007. aastatel ehitatud buumiaegne hoonestus rajati samuti linnalähedastele põllu- ja rohumaaadele ((Tammaru *et al.*, 2009; Kirsimäe, 2015). Liikudes kaugemale Tallinna keskusest, seda rohkem on uued asumid rajatud põllumaa ja niitude asemel olemasolevate elamute juurde või metsadele (Tammaru *et al.*, 2009). Metsadele on rajatud põhiliselt ka mereäärne hoonestus (Kirsimäe, 2015). Eeltoodud trendide põhjal on näha esialgset põllu- ja rohumaa vähenemist (vähenes 6450 hektarit) ning seejärel viimase dekaadi metsade muutust (vähenes 1254 hektarit) asulateks (tabel 1).

**Tabel 1.** Maakasutusmuutused Tallinnas ja selle lähiümbruses (Kirsimäe, 2017).

Maakasutus	1989		2007		2015		Suhteline muutus 1989-2015 %
	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	pindala (ha)	%	
Märgala	603.03	0.76	807.93	1.02	653.22	0.83	8.32
Asula	13453.38	17.00	20237.94	25.57	22869.59	28.90	69.99
Põllu- ja rohumaa	29210.40	36.91	22760.28	28.76	22243.59	28.11	-23.85
Metsamaa	18644.13	23.56	18769.23	23.72	17515.35	22.13	-6.05
Tehisala	353.43	0.45	268.74	0.34	243.09	0.31	-31.22
Veekogu	16873.38	21.32	16299.63	20.59	15619.05	19.74	-7.43

Kirsimäe (2017) on oma magistritöös modelleerinud nelja suurimat Eesti linna, sealhulgas Tallinnat. Modelleerimisel kasutati LCM-i ning tehti prognoos aastaks 2030. Modelleerimisel tehti jäik ja pehme hinnang. Jäik hinnang annab ühe kindla realiseerumisvõimaluse, mille tulemuseks

on maakasutusklassi kaart, kus igale pikslile on omistatud kindel maakasutuse väärtus. Pehme hinnang aga kujutab üleminekutõenäosusi, mille tulemuseks on tõenäosuskaart, kus pikslite tõenäosusväärtused on vahemikus 0–1. 2030. aastaks on näha pehme hinnangu puhul kõige suuremat tõenäosust muutumiseks rannikuäärsetel aladel ning teede ja olemasolevate asulate lähiümbruses (joonis 9). Jäiga hinnangu põhjal prognoositi 6875 hektarilist põllu- ja rohumaa ning 1245 hektarilist metsade muutust asulaalaks.



**Joonis 9.** Tallinna ja selle lähiümbruse jäik (vasakul) ja pehme (paremal) hinnang aastaks 2030 (Kirsimäe, 2017).

### 1.2.1 Tallinna linnaosad ja üldplaneeringud

Tallinna linn jaguneb 8. linnaosaks – Pirita (18.3 km<sup>2</sup>), Lasnamäe (27.5 km<sup>2</sup>), Kesklinn (30.6 km<sup>2</sup>), Põhja-Tallinn (15.2 km<sup>2</sup>), Kristiine (7.8 km<sup>2</sup>), Nõmme (29.2 km<sup>2</sup>), Mustamäe (8 km<sup>2</sup>) ja Haabersti (22.3 km<sup>2</sup>) (joonis 10) (Eesti Statistikaamet, 2018).



**Joonis 10.** Tallinna linnaosad (Tallinna linna ametlik koduleht, 2019).

Kõige rohkem on rahvaarv suurenenud Haabersti, Kesklinna ja Piritä linnaosades (tabel 2). Enamus linnaosade rahvastikuarv on aastate jooksul kasvanud, kuid viimase 4 aasta jooksul aeglustunud ja isegi vähenenud (Kristiines, Lasnamäel, Mustamäel, Nõmmel ja Põhja-Tallinnas) (tabel 2). See võib olla märk valglinnastumise kiirenemisest, mida Tallinna linn üritab üldplaneeringutega takistada (Tallinna linnaplaneerimise amet, 2001).

**Tabel 2.** Tallinna ja linnaosade rahvaarvu muutus ajavahemikus 2006-2022 (Tallinna linna ametlik koduleht, i.a)

Linna-osa	Haa-bersti	Kesk-linn	Kristiine	Lasna-mäe	Musta-mäe	Nõm-me	Piritä	Põhja-Tallinn	Kokku
2006	38 968	46 180	29 816	114 142	65 692	39 436	12 277	56 994	403 505
2007	38 956	46 041	29 511	112 306	64 500	38 856	13 235	55 691	399 096

2008	39 587	47 671	29 478	112 001	64 243	38 725	14 039	55 628	401 372
2009	40 454	48 158	29 221	113 332	64 339	38 428	14 595	55 478	404 005
2010	41 051	48 646	29 395	114 258	64 113	38 100	15 135	56 005	406 703
2011	41 549	50 182	29 810	115 654	64 597	38 275	15 567	56 346	411 980
2012	42 294	51 308	30 055	116 273	64 237	38 898	16 636	56 443	416 144
2013	42 839	52 820	30 274	116 490	64 425	39 049	17 019	56 914	419 830
2014	43 571	55 750	31 256	118 211	65 866	39 487	17 373	58 385	429 899
2015	43 996	57 908	31 770	118 437	66 194	39 501	17 694	58 926	434 426
2016	44 178	59 886	32 446	118 776	67 263	39 448	18 107	59 413	439 517
2017	44 687	61 646	32 996	119 180	67 707	39 357	18 353	59 697	443 623
2018	45 463	63 559	33 284	119 701	68 296	39 538	18 679	60 244	448 764
2019	46 279	65 224	33 606	120 408	68 405	39 422	18 894	60 795	453 033
2020	46 620	62 703	32 904	117 955	66 444	38 509	18 873	59 924	443 932
2021	47 344	64 091	32 999	118 047	66 305	38 044	19 001	59 857	445 688
2022	47 980	65 042	32 725	117 230	65 978	37 404	19 034	59 612	445 005

Üldplaneering on dokument, mis määrab territooriumi maakasutustingimused ja arengu põhisuunad, võttes arvesse kultuuri- ja looduskeskkonna säilitamise (OÜ Kootplaan, 2006; Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2013). Üldplaneeringu põhieesmärk on muuta territoorium atraktiivseks elupaigaks võimalikult paljudele inimgruppidele (OÜ Kootplaan, 2006). Üldplaneering seab ette territooriumi maakasutuse muutused vähemalt järgneva 20 aasta jaoks (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2015). Tallinna linna 2001. aasta üldplaneering andis aluse iga linnaosa üldplaneeringu koostamisele, seades linnaosade üldplaneeringute eesmärgiks Tallinna üldplaneeringut täpsustada ja täiendada (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001). Ajavahemikus 2006 kuni 2017 on valminud kõikidele linnaosadele üldplaneering, välja arvatud Kesklinn – 2006. aastal Mustamäe üldplaneering (OÜ Kootplaan, 2006), 2009. aastal Pirita üldplaneering (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2009), 2010. aastal Lasnamäe elamualade ja Nõmme üldplaneeringud (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010a; Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010b), 2013. aastal Kristiine ja Põhja-Tallinna üldplaneeringud (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2013a; Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2013b), 2015. aastal Lasnamäe tööstusalade üldplaneering (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2015) ja 2017. aastal Haabersti üldplaneering (Tallinna

Linnaplaneerimise Amet, 2017). Kesklinna üldplaneering ei ole veel valminud, kuid selle tegemine algatati 2019. aastal (Tallinna Linnavolikogu otsus nr 34, 2019).

Nii Tallinna linna üldplaneering kui ka linnaosade üldplaneeringud on seadnud põhieesmärgiks valglinnastumise pidurdamise. Tallinna peamiseks probleemiks lisaks valglinnastumisele on ka suur liiklussurve südalinnas, kuna kesklinnas on liigne töökohtade arv ja suur osa elanikkonnast on koondunud korterelamutesse. Seetõttu on iga linnaosa üldplaneering seadnud eesmärgid, mis lahendaksid järgnevate aastakümnete jooksul eeltoodud probleemid. Valglinnastumise takistamiseks on vajalik muuta linn atraktiivsemaks, et elamistingimused tagamaal ei oleks eelistatavamad (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010a, 2017). Linna liiklussurve vähendamiseks on iga linnaosa üldplaneering seadnud ülesandeks arendada linnaosade infrastruktuuri, ühistranspordivõrku ning ligipääsetavust, et tagada terve linna hea omavaheline ühendus. Lisaks on üldplaneeringud seadnud eesmärgiks arendada ja rajada rohealaseid ning säilitada loodus- ja muinsuskaitsealad. Väga oluline on iga linnaosa üldplaneeringus linna tihendamise peamiselt vaba maa või olemasoleva puuduliku hoonestuse arvelt – Põhja-Tallinna linnaosas võetakse kasutusele tühjad tootmis- ja sadamaalad, et luua uusi puhkealaseid (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2013b) ning Nõmme linnaosas hoonestatakse endised tööstus- ja sõjaväealad peamiselt ärimaaks (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2010b). Linnaosade atraktiivsuse tõstmiseks on üldplaneeringud seadnud eesmärgiks muuta linnaosad multifunktsionaalsemaks, rajades rohkem lasteaedu, kergliiklusteid, sportimise ja vaba aja veetmise kohti ja arendades teenindus ja kaubandussektorit. Atraktiivsust suurendatakse Nõmme, Kristiine, Pirita, Haabersti ja Lasnamäe linnaosades mitmekesisema elamuhoonete valikuga, mis pakuks ka privaatsemat elukeskkonda (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2009, 2010a, 2010b, 2013a, 2017). Uued elamupiirkonnad rajatakse olemasolevatesse ja kujunevatesse tõmbekeskustesse (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001). Üldplaneeringute kohaselt jätkub äritegevuse koondumine kesklinna, kuid üha enam hakatakse kaubandus- ja teenindusettevõtteid suunama teistesse linna piirkondadesse (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001, 2015). Üldplaneeringute alusel arendatakse piirkonna- ja linnaosakeskuseid, mis tagaks linna tihenemise ja transpordikoormuse vähenemise, kuna teenused viiakse elukohtadele lähemale. Suuremateks piirkonnakeskusteks kujunevad Haabersti ja Lasnamäe (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001). (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001, 2009, 2010a, 2010b, 2013a, 2013b, 2017; OÜ Kootplaan, 2006)

## 2. Andmed ja metoodika

### 2.1 Uurimisala ja andmed

Tallinna maakasutuse modelleerimiseks kasutatakse *Urban Atlas*-e maakasutuse vektorandmeid, kus maakasutus on juba eelnevalt satelliidipiltidelt klassifitseeritud (Land Copernicus, i.a). *Urban Atlas*-e andmed on saadaval aastate 2006, 2012 ja 2018 kohta, mis on pikslisuurusega 2-4 meetrit. 2006. aasta andmed on klassifitseeritud 20 erinevasse klassi ning 2012 ja 2018. aasta andmed 25. erinevasse klassi. *Urban Atlas*-e andmed on kättesaadavad Harjumaa piires, mistõttu lõigati andmetest välja Tallinn ja selle tagamaa. Uurimisalaks valiti ainult maismaad ja puhvriks valiti 15 km Tallinna administratiivpiirist, kuna enamuse 1991-2005. aasta asumitest rajati kuni 20 km kaugusele Tallinna Raekoja platsist (Tammaru et al. 2009; Gauk ja Roose, 2013). 2006. aasta andmetes on ühte maakasutusklassi kokku pandud 6 erinevat klassi (lisa 1, kood 20000), millest märkimisväärsemad on põllumaad, märgalad, karjamaad ja rohumaad. Kuna 2012 ja 2018 aasta andmetes on eeltoodud klassid määratud eraldi (lisa 2), siis *CORINE* 2006 aasta maakatte andmete abil tehti eraldi klassifitseerimine, millega viidi andmed 2012 ja 2018 aasta andmetega samale struktuurile. Lisaks on 2006. aasta andmetes ühele polügoonile määratud klass, kus andmed puuduvad (lisa 1, kood 91 000), mis samuti eemaldati eeltoodud protsessiga. Vektorandmed tehti 5 meetrise pikslisuurusega rasterandmeteks ning klassifitseeriti ümber 11. erinevasse klassi (lisa 3):

- Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%
- Hõreda asustusega asula, kus asustus on väiksem kui 30%
- Tööstus/äri ja üldkasutatav maa
- Asula rohealad
- Transport (raudtee, lennujaam, sadam ja põhilised teed)
- Muu tehisala
- Põllu- ja rohumaad
- Mets
- Märgalad
- Muu ala
- Veekogud

Lisaks on modelleerimisel kasutusel Tallinna linnavalitsuselt pärinevad üldplaneeringu maakasutuse ruumiandmed. Haabersti, Kristiine, Lasnamäe, Mustamäe, Pirit ja Nõmme linnaosade üldplaneeringud on kehtestatud vahemikus 2006-2017 ja nende andmed on jagunenud 32. klassi (lisa 4). Kuna kesklinnas ja Põhja-Tallinnas kehtib endiselt 2001. aasta Tallinna üldplaneering, siis selle üldistusaste ja struktuur on teistest linnaosadest veidi erinev (lisa 5).

## 2.2 Tegurite ja piirangute kaardid

Sobivuskaartide tegemisel on vajalik luua piirangu ja teguri kaardid, mis aitavad leida kõige sobilikumad alad muutusteks. Piirangu ja teguri kaartide valimisel ja loomisel tuginevi varasematele uuringutele (Araya ja Cabral, 2010; Kirsimäe, 2017).

Piirangu kaardid piiravad maakasutusmuutuste teket aladele, mis ei ole sobilikud. Piirangu kaartideks valiti veekogud, looduskaitsealad (sealhulgas Natura 2000) ja olemasolevad asulad ning tööstus/äri ja üldkasutatav maa. Lisaks on piirangu kaardiks klassid, mis vahemikus 2006-2018 ei ole läbinud olulisi muutusi. Need klassid selgitati välja maakasutusanalüüsi käigus. Piirangu kaartidele määrati väärtuseks 0 (ala ei sobi muutusteks) ning ülejäänud aladele 1 (ala sobib muutusteks). Veekogude puhul on ebasobiv ala 50 meetrit rannikust (Araya ja Cabral, 2010). Tallinn on Soome lahe äärselt rannikust mõjutatud, kuna linn on laienenud mööda rannikut (Tammaru *et al.*, 2009; Samarüütel *et al.*, 2010; Kirsimäe, 2017). Sellest lähtudes on mereäärsele rannikule ning maismaal olevatele veekogudele määratud 50-meetrine piirav puhvritsoon. Seaduste järgi on kaitsealadel 50 meetrine kaitsevöönd (Araya ja Cabral, 2010), mistõttu Natura 2000 ja looduskaitsealadele määrati 50-meetrine piirav puhvritsoon.

Töö eesmärkidest lähtuvalt loodi teguri kaardid järgnevale kolmele klassile:

- Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%
- Hõreda asustusega asula, kus asustus on väiksem kui 30%
- Tööstus/äri ja üldkasutatav maa

Tiheasustuse ja hõreda asutusega asula klassidele loodi järgnevad 8 teguri kaarti (lisa 6):

1. Kaugus teedest – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust teedest. Põhinedes varasematele uuringutele on kõige sobilikumad muutusteks teedest kuni 750 meetrini jäävad alad (Araya ja Cabral, 2010; Ullah, 2014). Vastav trend on esinenud ka

Tallinna linna laienemisel, kus uued asulad on koondunud mööda teid või nende lähedusse (Samarüütel *et al.*, 2010; Roosa *et al.*, 2013).

2. Kaugus Tallinn-Tartu maanteest – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust Tallinn-Tartu maanteest. Kirsimäe bakalaureusetööst (2015) selgus, et Tallinn on laienenud Tartu suunas.
3. Kaugus veekogudest – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust veekogudest. Tuginedes varasematele uurimustele on kõige sobilikumad muutusteks veekogudest 1000 kuni 1500 meetri kaugusel olevad alad (Tian ja Wu 2015; Fitawok *et al.*, 2020; Saha ja Roy, 2021).
4. Kaugus merest – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust mererannikust. Varasemad uuringud on leidnud, et uued asumid on rajatud mööda rannikut ning enamik uutest asumitest on rajatud 3-5 km kaugusele rannikust (Freire, 2009; Tammaru *et al.*, 2009)
5. Kaugus linna administratiivpiirist – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust Tallinna administratiivpiirist. Araya ja Cabral (2010) ja Hosseinali *et al.* (2012) uuringutest selgus, et alad, mis on linnale lähemal on sobilikumad muutusteks.
6. Kaugus 2006. aasta olemasolevatest asulatest – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust olemasolevatest asulatest. Tuginedes varasematele uuringutele on uued asulad rajatud olemasolevate asulate lähedusse (Tammaru *et al.*, 2009; Araya ja Cabral, 2010; Hosseinali *et al.*, 2012; Fitawok *et al.*, 2020).
7. Nõlvakalded – ArcMapis *Slope* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse nõlvakaldeid protsentides. Tuginedes varasematele uuringutele on uueks asustuseks kõige sobilikumad kuni 15% nõlvakaldegala alad ning üle 15% nõlvakaldegala alad ei ole sobilikud (Araya ja Cabral, 2010; Akinci *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2021). Fitawok *et al.* (2020) uuringust leiti linnaala laienemise sõltuvus nõlvadest.
8. Maakasutus – loodi kaart, mis näitab maakasutuse tõenäosust muutumaks asulaks. Maakasutuse trendide põhjal on kõige sobilikumad muutusteks põllu-, rohu-, karja- ja tühermaa (bare land), kus 90% alal puudub taimkate (Araya ja Cabral, 2010; Tajbakhsh *et al.*, 2016). Vastav trend on esinenud ka Tallinna linna laienemisel, kus uued asulad on ehitatud endistele põllumaadele ja niitudele (Tammaru *et al.* 2009; Kirsimäe, 2017). Lisaks on uusi asulaid rajatud ka metsadele, eelkõige Tallinnast kaugemad ja mereäärsed alad

(Tammaru *et al.*, 2009; Kirsimäe, 2015). Maakasutuskaardi loomisel arvestatakse maakasutusmuutustega ajavahemikus 2006-2018 ning varasemate uurimustega.

Tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassile loodi järgnevad 4 tegurite kaarti (lisa 7):

1. Kaugus 2006. aasta tööstus/äri ja üldkasutatavast maast – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust olemasolevatest tööstus/äri ja üldkasutatava maa aladest.
2. Kaugus sadamatest – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust sadamatest. Peng *et al.* (2021) uuringu põhjal on enamus uutest tööstus ja üldkasutatava maa aladest rajatud kuni 5 km kaugusele sadamatest.
3. Kaugus lennujaamast – IDRISI *Distance* tööriistaga loodi kaart, kus kujutatakse kaugust Tallinna lennujaamast. Varasema uurimuse põhjal on enamik uutest tööstus ja üldkasutatava maa aladest rajatud 5-10 km kaugusel lennujaamast (Peng *et al.*, 2021)
4. Maakasutus – loodi kaart, mis näitab maakasutuse tõenäosust muutumaks tööstus/äri ja üldkasutatavaks maaks. Trendide põhjal on sobilikumad muutusteks põllu- ja tühermaa (Araya ja Cabral, 2010). Maakasutuskaardi loomisel arvestatakse maakasutusmuutustega ajavahemikus 2006-2018 ning varasemate uurimustega.

Lisaks kasutati eelnevalt asula klassidele loodud nelja teguri kaarti – nõlvakallete kaart, kaugus Tallinna administratiivpiirist, teedest ja Tallinn-Tartu maanteest.

### **2.3 Modelleerimise meetodika**

Enne modelleerimist viidi läbi maakasutuse analüüs vaadeldes muutusi nii visuaalselt kui ka kvantitatiivselt. Muutuste vaatlemisel kasutati IDRISI *LCM Change Analysis* tööriista, millega uuriti ajavahemikus 2006-2018 toimunud maakasutusmuutusi, et leida olulisemad maakasutuse muutuste trendid. Maakasutuse trendide abil loodi teguri kaartide alapeatükis kirjeldatud maakasutuse teguri kaardid ja piirangkaart klassidele, kus muutusi ei ole toimunud. Maakasutuse analüüsis uuriti detailselt ainult muutusi seoses asulate ja tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassidega.

Modelleerimiseks kasutatakse tarkvaras IDRISI tööriista CA-Markov, mis on rakk-automaadi ja Markovi ahelate integreeritud mudel. Rakk-automaat on väga tundlik sisendandmete suhtes, mistõttu tausta väärtus peab olema null ning koordinaatsüsteem, territoriaalne ulatus ja piksli

suurus peavad olema samad (Moreno *et al.*, 2009; Noszczyk 2019). Lisaks on oluline, et maakasutuse andmetes on klasside arv sama ja samas järjestuses. CA-Markov vajab kolme sisendit – maakasutuse kaarti, Markovi ahelate pindala tõenäosusmaatriksit ja sobivuskaartide kogumikku. Markovi ahelate tõenäosusmaatriks saadakse tööriistaga *Markov*, kus kahe maakasutuskaardi abil arvutatakse tuleviku võimalikud kvantitatiivsed muutused erinevate maakasutuskategooriate vahel (Mas *et al.*, 2014).

Enne modelleerimist on vajalik kokku panna teguri ja piirangu kaartidest sobivuskaardid, mis näitavad piksli sobivust muutuda teiseks klassiks. IDRISI mudeli *MCE Decision Wizard* abil loodi sobivuskaardid asulate ja tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassidele. Mudelis viidi teguri kaardid *Fuzzy* tööriistaga õigele skaalale (0-255), sealhulgas hõlmates teguri kaartide alapeatükis kirjeldatud trende. Seejärel kasutati *AHP Weight* tööriista, millega loodi AHP abil teguri kaartide osakaalud (*Weight*), mis näitavad teguri mõju sobivuskaardil. AHP kasutamisel vaadeldi varasemaid uurimusi ning *LCM Test and Selection of Site and Driver Variables* tööriistaga saadud tulemusi, millega mõõdeti tegurite seosekordaja Crameri V väärtused. Sobivuskaart tehti ka AHP kaaludeta, mis tähendab, et igal teguril on samaväärne mõju maakasutusele. Modelleerimiseks on oluline, et kõigi klasside kohta on olemas sobivuskaart. Kuna eesmärgiks on vaadelda tiheda ja hõreda asustusega asulate ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa muutusi, on detailsed sobivuskaardid loodud just eeltoodud kolme klassi kohta. Klassidele, mis on läbinud maakasutusmuutusi eeltoodud kolme klassi arvelt, on sobivuskaardile määratud väärtus 255 (sobib muutumiseks) ning klassidele, mis ei ole läbinud muutusi, on määratud väärtus 1 (ei sobi muutuseks). Need klassid, mis muutuvad ja ei muutu, selgitatakse välja maakasutuse analüüsi käigus.

Modelleerimine viidi läbi kaks korda – esmalt mudeli kalibreerimine ning seejärel lõplik modelleerimine 2050. aastaks. Mudeli kalibreerimisel võeti aluseks 2006 ja 2012 aasta *Urban Atlas*-e maakasutuse kaardid, et teha modelleerimine aastaks 2018. *Markov* tööriistaga leiti 2006 ja 2012 aasta maakasutuse kaartide põhjal võimalikud kvantitatiivsed muutused aastaks 2018. Seejärel loodi teguri ja piirangu kaartide abil vajalikud sobivuskaardid AHP kaaludega ja ilma. Kahe erineva sobivuskaardiga tehti 2018. aasta mudelid, et võrrelda mudelite täpsust. 2018. aasta mudelid valideeriti olemasoleva 2018. aasta maakasutusega. Valideerimiseks kasutati IDRISI tööriista *Validate*, mis hindab mudelite täpsust Kapa indeksiga.

Seejärel tehti modelleerimine aastaks 2050, kus võeti aluseks 2006 ja 2018 aasta maakasutusandmed. *Markov* tööriistas kasutati 2006 ja 2018 aasta andmeid, et leida võimalikud kvantitatiivsed muutused aastaks 2050. Mudeli kalibreerimisel kasutatud sobivuskaarte kasutati ka 2050. aasta mudelil. Valideerimise käigus otsustatakse, kas 2050. aasta mudelil kasutatakse AHP kaalude või kaaludeta sobivuskaarte.

## 2.4 Mudeli kalibreerimine

### 2.4.1 Tiheda ja hõreda asustusega asulate AHP

AHP kasutamisel pandi tegurid järjestusse nende mõju alusel. Mõju hindamisel tugineti varasematele uurimustele ja seosekordaja Crameri V väärtustele. Vaadeldes tiheda ja hõreda asustusega asula klasside tegurite mõju, selgus, et kõige suurem mõju tuleneks maakasutusest (0.545) ja olemasolevatest asulatest (0.4384) (tabel 3). Lisaks selgus, et test peab kaugust Tallinn-Tartu maanteest ebaoluliseks teguriks, kuna Crameri V väärtus on alla 0.15.

**Tabel 3.** Tiheda ja hõreda asustusega asula tegurite Crameri V väärtused.

Tegur	Crameri V väärtus
Maakasutus	0.545
Kaugus olemasolevatest asulatest	0.4384
Kaugus teedest	0.4165
Kaugus Tallinna linna administratiivpiirist	0.2978
Kaugus mere rannikust	0.2607
Nõlvakalle	0.2234
Kaugus veest	0.1507
Kaugus Tallinn-Tartu maanteest	0.1297

Varasemad uuringud on pidanud kõige tähtsamateks teguriteks maakasutust ning kaugust teedest ja olemasolevast asulast (Bagheri *et al.*, 2013; Ullah ja Mansourian, 2015; Morales ja De Vries, 2021). Uuringutes, milles on hinnatud nii maakasutust kui ka kaugust teedest, on peetud maakasutust tähtsamaks teguriks (Bagheri *et al.*, 2013; Ullah ja Mansourian, 2015). Bagheri *et al.* (2013) pidasid olemasolevat asulat tähtsamaks teguriks kui kaugust teedest. Mitmes uuringus on nõlvakallet hinnatud tähtsama tegurina kui kaugust jõgedest ja rannikust (Morales ja De vries,

2021; Saha ja Roy, 2021). Kombineerides Crameri V väärtuseid (tabel 3) ja eeltoodud uuringuid, on Tallinna linna ja selle lähipiirkonna tegurite olulisuse järjestus järgmine:

1. Maakasutus
2. Kaugus olemasolevatest asulatest
3. Kaugus teedest
4. Kaugus Tallinna administratiivpiirist
5. Nõlvakalle
6. Kaugus mere rannikust
7. Kaugus veekogudest
8. Kaugus Tallinn-Tartu maanteest

Lähtudes eelnevast tegurite mõju järjestusest viidi läbi AHP, millega leiti tegurite mõju osakaalud. AHP tugineb maatriksile, kus kasutatakse paaripõhist võrdlust (tabel 4). Maatriksi tegurite olulisuse väärtuste leidmisel tugineti Crameri V väärtustele ja varasematele uuringutele (Bagheri *et al.*, 2013; Ullah ja Mansourian, 2015; Morales ja De Vries, 2021; Saha ja Roy, 2021).

**Tabel 4.** AHP paaripõhine maatriks, kus KTT – Kaugus Tallinn-Tartu maanteest, KV – kaugus veekogudest, KMR – kaugus mererannikust, N – nõlvakalded, KTA – kaugus Tallinna administratiivpiirist, KT – kaugus teedest, KA – kaugus olemasolevast asulast ja MK – maakasutus. 7 - palju tähtsam, 5 - tähtsam, 3 - veidi tähtsam.

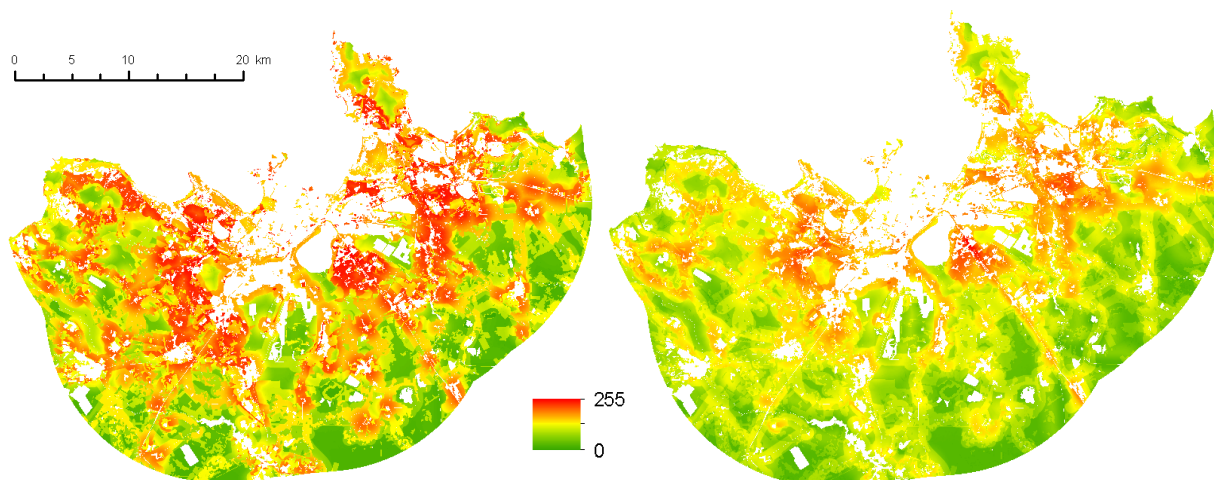
tegur	KTT	KV	KMR	N	KTA	KT	KA	MK
KTT	1							
KV	3	1						
KMR	3	3	1					
N	5	5	3	1				
KTA	7	7	5	3	1			
KT	7	7	5	5	1	1		
KA	7	7	7	5	3	3	1	
MK	7	7	7	5	3	3	3	1

AHP maatriksi abil arvutati tegurite osakaalud, mille summa on 1. Mida suurem on teguri osakaal, seda rohkem mõju avaldab see sobivuskaardil. Kõige olulisemad tegurid on uuringu alusel maakasutus (osakaal 0.3205) ja kaugus olemasolevatest asulatest (osakaal 0.2417) ning kõige ebaolulisem on kaugus Tallinn-Tartu maanteest (osakaal 0.0199) (tabel 5). Tulemuse järjepidevus saavutati 0.08 ehk tegurite osakaalud on edasisteks uuringuteks piisavalt head (Akinci *et al.*, 2013; Saha ja Roy; 2021).

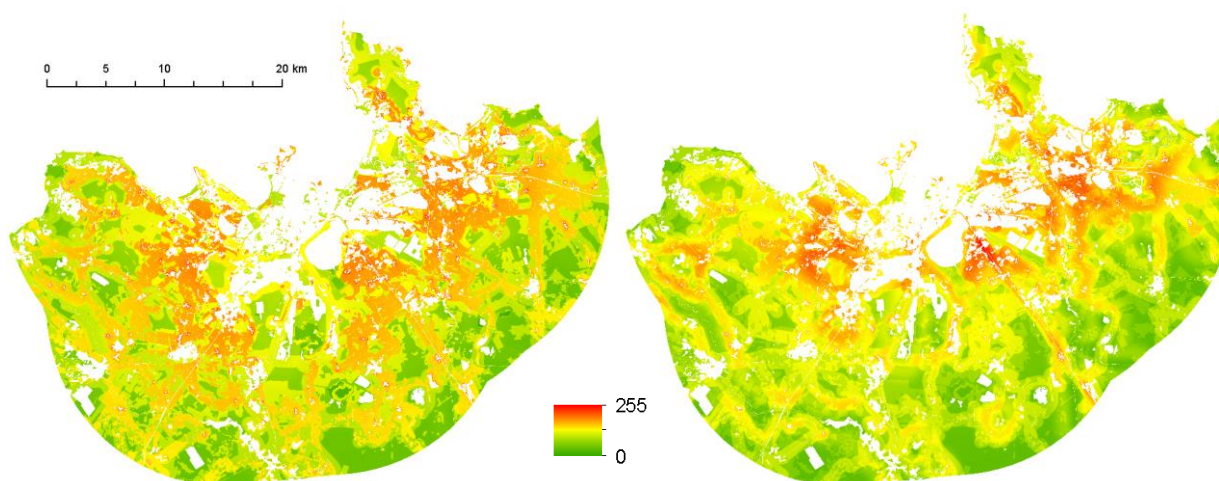
**Tabel 5.** Tiheda ja hõreda asustuse asulate tegurite AHP osakaalud.

Tegur	AHP osakaal
Maakasutus	0.3205
Kaugus olemasolevatest asulatest	0.2417
Kaugus teedest	0.1503
Kaugus Tallinna linna administratiivpiirist	0.1349
Nõlvakalle	0.0681
Kaugus mere rannikust	0.0382
Kaugus veest	0.0264
Kaugus Tallinn-Tartu maanteest	0.0199

Teguri kaardid liideti *MCE Decision Wizard* mudelis kokku ning tehti AHP kaaludega ja kaaludeta sobivuskaart. Piirangu kaardid määrasid ebasobilikele alale sobivusväärtuse 0. Asulaklasside sobivuskaartidelt on näha, et AHP kaalusid kasutades on suuremal osal alast kõrgem tõenäosus muutuda asula klassideks (joonised 11 ja 12). Sobivuskaartidelt selgub, et alad, mis on Tallinna linnale, olemasolevate asula klasside ja teedele lähemal sobivad muutusteks rohkem. Ebasobilikud on Tallinnast kaugemad alad, kus puudub tihe teede võrgustik ja lähedus veekogudele.



**Joonis 11.** Tiheasustusega asula klassi AHP sobivuskaart (vasakul) ja kaaludeta sobivuskaart (paremal).



**Joonis 12.** Hõreda asustusega asula klassi AHP sobivuskaart (vasakul) ja kaaludeta sobivuskaart (paremal).

#### 2.4.2 Tööstus/äri ja üldkasutatava maa AHP

Sama meetodikaga viidi läbi tööstus/äri ja üldkasutatava maa AHP kaalude analüüs. Sarnaselt asulaklassidele on Crameri V alusel kõige olulisemateks teguriteks maakasutus (0.7534) ja kaugus olemasolevatest tööstus/äri ja üldkasutatavast maast (0.6011) ning kõige ebaolulisem kaugus Tallinn-Tartu maanteest (tabel 6).

**Tabel 6.** Tööstus/äri ja üldkasutatava maa tegurite Crameri V väärtused.

Tegur	Crameri V väärtus
Maakasutus	0.7534
Kaugus tööstus/äri ja üldkasutatavast maast	0.6011
Kaugus teedest	0.4067
Kaugus Tallinna administratiivpiirist	0.2954
Kaugus sadamatest	0.2665
Nõlvakalle	0.2175
Kaugus lennujaamast	0.1849
Kaugus Tallinn-Tartu maanteest	0.1545

Nii Peng *et al.* (2021) kui ka Morales ja De Vries (2021) uuringutes leiti, et kaugus teedest ja sadamatest on olulisemad tegurid kui nõlvakalle ning kaugus teedest on olulisem kui kaugus sadamatest. Peng *et al.* (2021) uuringus leiti, et kaugus lennujaamast on vähem olulisem kui kaugus sadamast ja nõlvakalle. Kombineerides Crameri V väärtuseid (tabel 6) ja eeltoodud uuringuid, on tööstus/äri ja üldkasutatavat maad mõjutavate tegurite olulisuse järjestus järgmine:

1. Maakasutus
2. Kaugus tööstus/äri ja üldkasutatavast maast
3. Kaugus teedest
4. Kaugus Tallinna administratiivpiirist
5. Kaugus sadamatest
6. Nõlvakalle
7. Kaugus lennujaamast
8. Kaugus Tallinn-Tartu maanteest

AHP maatriksis (tabel 7) olevad väärtused tuginevad eeltoodud järjestusele, eelnevatele uuringutele ja Crameri V väärtustele tabelis 6.

**Tabel 7.** AHP paaripõhine maatriks, kus KTT – Kaugus Tallinn-Tartu maanteest, KL – kaugus lennujaamast, N – nõlvakalded, KS – kaugus sadamatest, KTA – kaugus Tallinna administratiivpiirist, KT – kaugus teedest, KTÄ – kaugus tööstus/äri ja üldkasutatavast maast ja MK – maakasutus. 7 - palju tähtsam, 5 - tähtsam, 3 - veidi tähtsam.

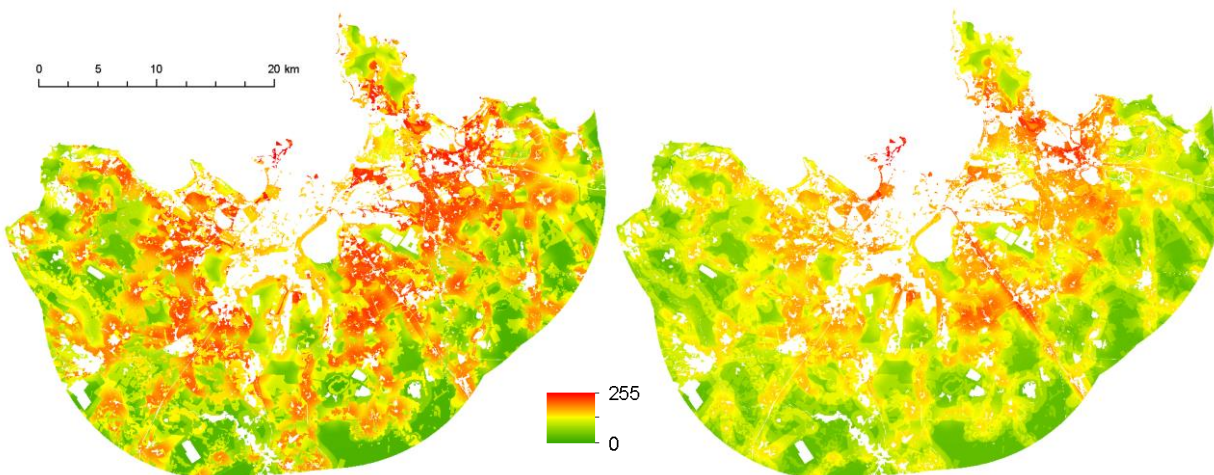
Tegur	KTT	KL	N	KS	KTA	KT	KTÄ	MK
KTT	1							
KL	3	1						
N	3	3	1					
KS	5	5	3	1				
KTA	5	5	5	3	1			
KT	5	5	5	3	1	1		
KTÄ	7	7	5	3	3	3	1	
MK	7	7	5	5	3	3	3	1

Kõige olulisemad tegurid on uuringu alusel maakasutus (osakaal 0.3225) ja kaugus olemasolevatest tööstus/äri ja üldkasutatava maa aladest (osakaal 0.2273) ning kõige ebaolulisem on kaugus Tallinn-Tartu maanteest (osakaal 0.0225) (tabel 8). Tulemuse järjepidevus saavutati 0.08 ehk tegurite osakaalud on edasisteks uuringuteks piisavalt head (Akinci *et al.*, 2013; Saha ja Roy; 2021).

**Tabel 8.** Tööstus/äri ja üldkasutatava maa tegurite AHP osakaalud.

Tegur	AHP osakaal
Maakasutus	0.3203
Kaugus tööstus/äri ja üldkasutatavast maast	0.2410
Kaugus teedest	0.1328
Kaugus Tallinna administratiivpiirist	0.1328
Kaugus sadamatest	0.0765
Nõlvakalle	0.0446
Kaugus lennujaamast	0.0296
Kaugus Tallinn-Tartu maanteest	0.0223

Sarnaselt asula klassidele, tehti ka tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassile 2 sobivuskaarti. Sobivuskaartide tulemused sarnanevad asula klasside sobivuskaartidega (joonis 13), kus Tallinna lähedastel aladel on muutusteks suurem tõenäosus kui Tallinna tagamaal.



**Joonis 13.** Tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassi AHP sobivuskaart (vasakul) ja kaaludeta sobivuskaart (paremal).

## 2.5 Üldplaneeringutega modelleerimine

Üldplaneeringute andmed klassifitseeriti ümber 7. maakasutuse klassi (lisa 8):

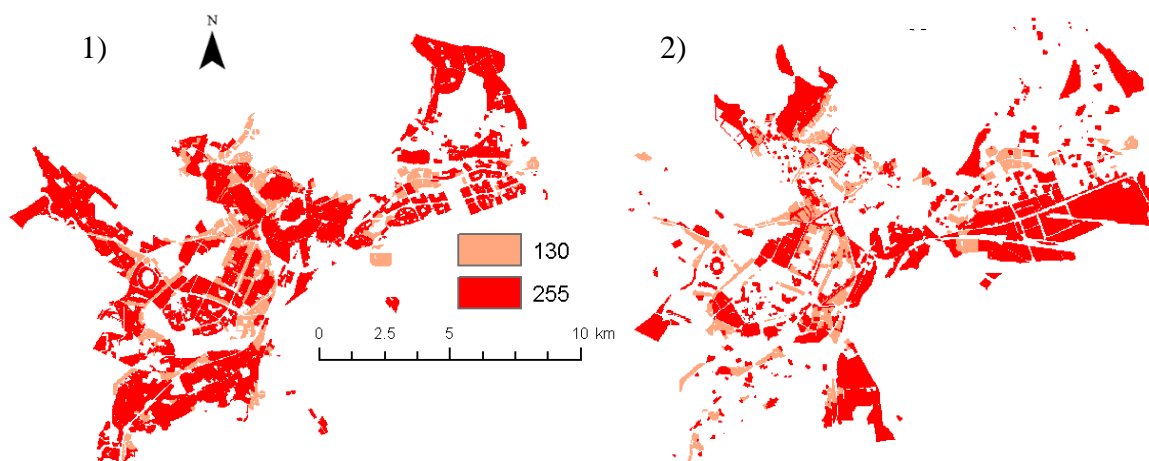
- Tiheasustusega asula
- Tööstus/äri ja üldkasutatav maa
- Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula
- Tiheasustusega asula ja asula rohealad
- Asula rohealad
- Transport
- Muu ala

Üldplaneeringutes määratud maakasutusklassid muu ala ja transport on *Urban Atlas*-e 2018. aasta andmetes juba vastava klassi all olemas, mistõttu edasiseks analüüsiks kasutatakse tiheasustusega asula, tööstus/äri ja üldkasutatava maa ning asula rohealade andmeid. Üldplaneeringu andmeid kasutatakse teguri kaardi loomiseks, kus vastavale alale on määratud väärtus 255 (kõige sobivam

muutuseks). Küllaga mitmel juhul on üldplaneeringu klassile määratud mitu otstarvet, mistõttu üldplaneeringu klassis on mitu maakasutusklassi:

1. Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula
2. Tiheasustusega asula ja asula rohealad

Sellistel juhtudel on andmeid kasutatud mõlema klassi teguri kaartidel ning määratud väärtus 130. Teguri kaardid loodi tiheasustusega asula ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassile (joonis 14). Tiheasustusega asula sobivuskaardi loomisel lisati piiranguks üldplaneeringutes määratud tööstus/äri ja üldkasutatav maa ning asula rohealad. Sarnaselt eelnevale määrati tööstus/äri ja üldkasutatavale maale piiranguks üldplaneeringutes määratud tiheasustusega asula ja rohealad.



**Joonis 14.** Üldplaneeringutes määratud tiheasustusega asula (1) ning tööstus/äri ja üldkasutatav maa (2).

Seejärel viidi läbi AHP analüüs, kus üldplaneeringute teguri kaartidele määrati kõige suurem AHP kaal (tabel 9 ja 10). Tiheasustusega asula ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa AHP järjepidevused saadi vastavalt 0.09 ja 0.08.

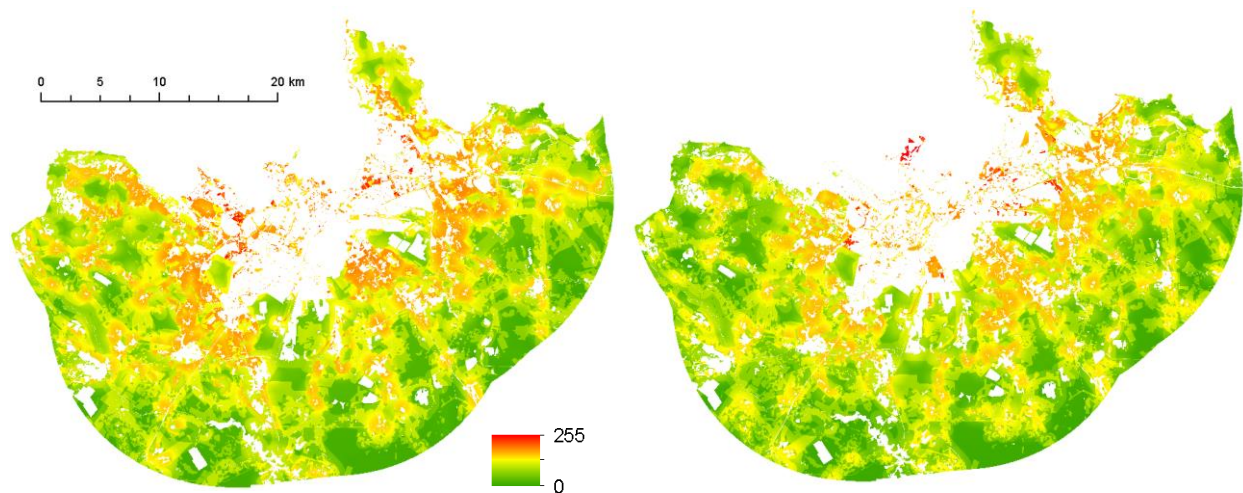
**Tabel 9.** Tiheasustusega asula tegurite AHP osakaalud üldplaneeringutega modelleerimisel.

Tegur	AHP osakaal
Üldplaneeringu tiheasustusega asula	0.2780
Maakasutus	0.2168
Kaugus olemasolevatest asulatest	0.1692
Kaugus teedest	0.1091
Kaugus Tallinna linna administratiivpiirist	0.1091
Nõlvakalle	0.05
Kaugus mere rannikust	0.0296
Kaugus veest	0.0215
Kaugus Tallinn-Tartu maanteest	0.0168

**Tabel 10.** Tööstus/äri ja üldkasutatava maa tegurite AHP osakaalud üldplaneeringutega modelleerimisel.

Tegur	AHP osakaal
Üldplaneeringu tööstus/äri ja üldkasutatav maa	0.2819
Maakasutus	0.2189
Kaugus tööstus/äri ja üldkasutatavast maast	0.1598
Kaugus teedest	0.1002
Kaugus Tallinna administratiivpiirist	0.1002
Kaugus sadamatest	0.0606
Nõlvakalle	0.0359
Kaugus lennujaamast	0.0240
Kaugus Tallinn-Tartu maanteest	0.0186

Uued sobivuskaardid loodi tiheasustusega asula ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassile (joonis 15). Hõreda asustusega asula klassi puhul kasutati mudeli kalibreerimisel loodud sobivuskaarti. Üldplaneeringud kujutavad eeldatavat tuleviku maakasutuse seisut, mistõttu üldplaneeringutega ei viidud läbi kalibreerimist ja tehti ainult 2050. aasta prognoos.

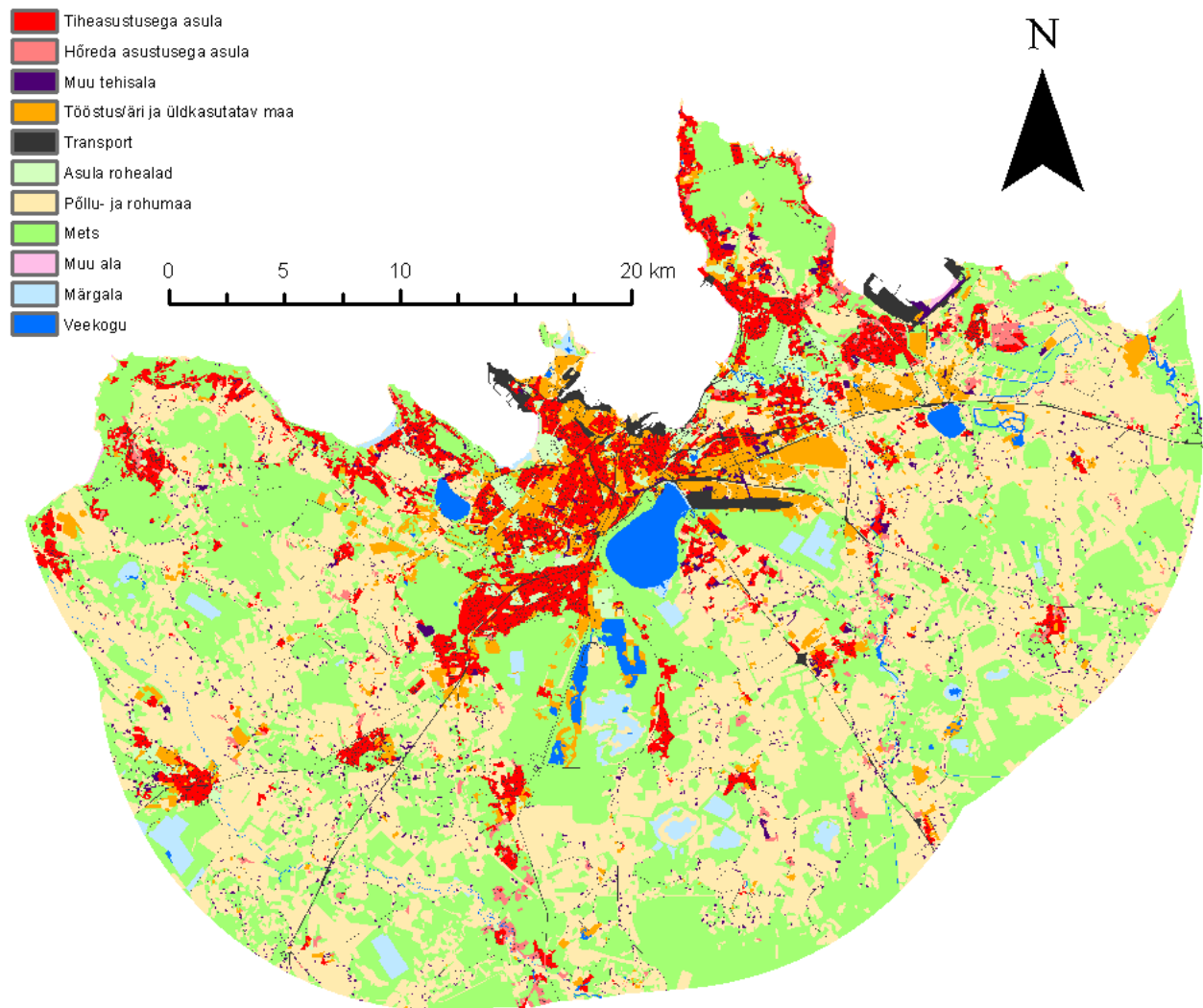


**Joonis 15.** Tiheasustusega asula üldplaneeringutega AHP sobivuskaart (vasakul) ja tööstus/äri ja üldkasutatava maa üldplaneeringutega AHP sobivuskaart (paremal).

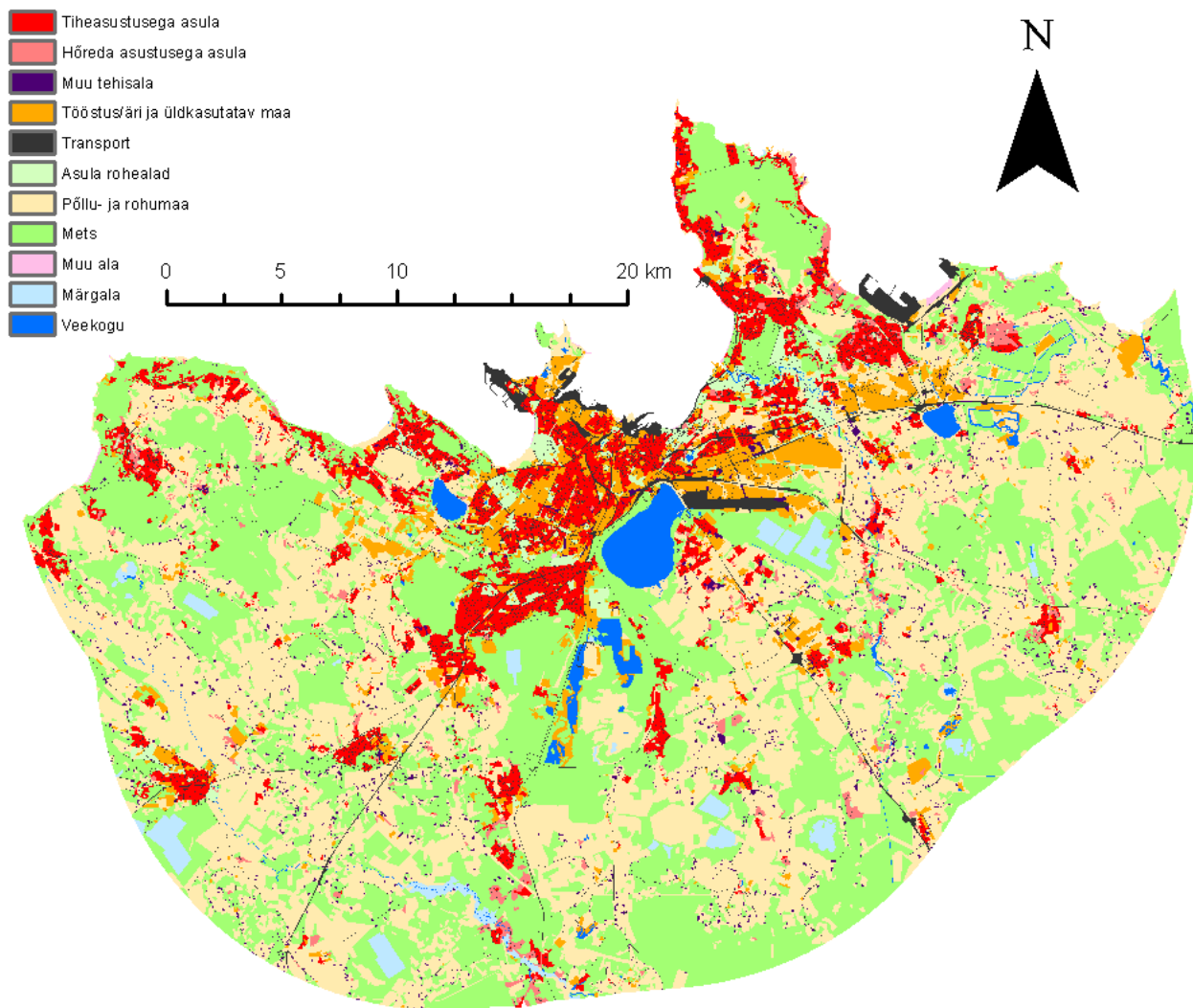
### 3. Tulemused

#### 3.1 Maakasutuse analüüs

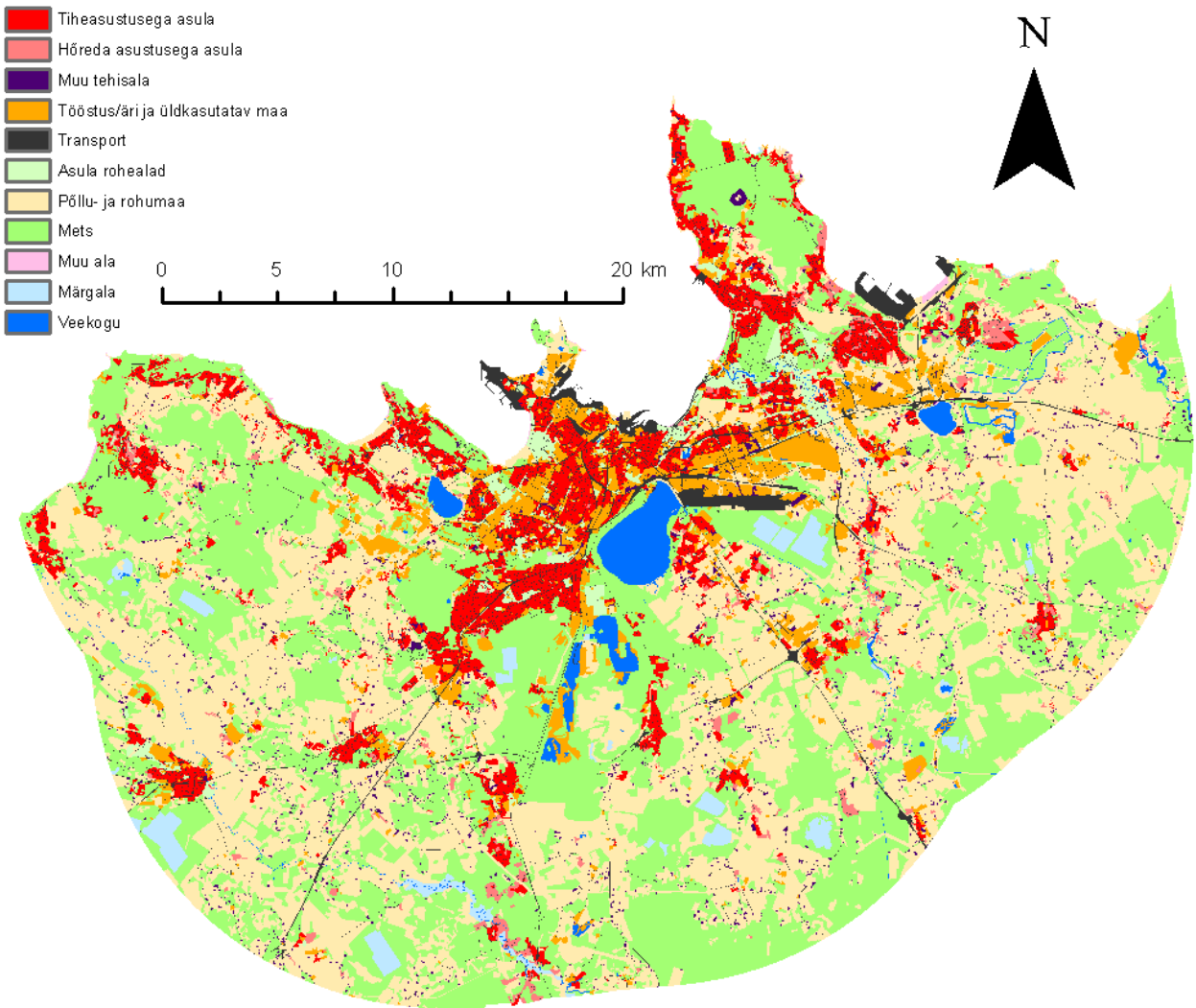
*Urban Atlas*-e andmestik klassifitseeriti ümber 11. klassi, millest 5 hõlmavad inimasustust: tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%, hõreda asustusega asula, kus asustus on väiksem kui 30%, tööstus/äri ja üldkasutatav maa, transport (raudtee, lennujaam, sadam ja põhilised teed) ja muu tehisala (joonised 16-18).



**Joonis 16.** Tallinna ja linna tagamaa ümber klassifitseeritud maakasutuse seis aastal 2006.



**Joonis 17.** Tallinna ja linna tagamaa ümber klassifitseeritud maakasutuse seis aastal 2012.



**Joonis 18.** Tallinna ja linna tagamaa ümber klassifitseeritud maakasutuse seis aastal 2018.

Uurimisala suuruseks kujunes 117 446.2 ha ala. Ajavahemikus 2006-2018 on kõige rohkem suurenenud tiheasustusega asula ning tööstus/äri ja üldkasutatav maa, vastavalt 595.7 ja 666.5 hektarit (tabel 11). Kõige rohkem on vähenenud põllu- ja rohumaa (1050.1 ha). Võttes arvesse kõiki tehisalaga seotud klasse, on Tallinna ja selle tagamaa asustus suurenenud 12 aasta jooksul 1745.1 hektari võrra. Aastate vältel on stabiilselt samaks jäänud veekogu, muu ala ja asula rohealade klassid.

**Tabel 11.** Tallinna ja linna tagamaa maakasutusmuutused aastatel 2006, 2012 ja 2018.

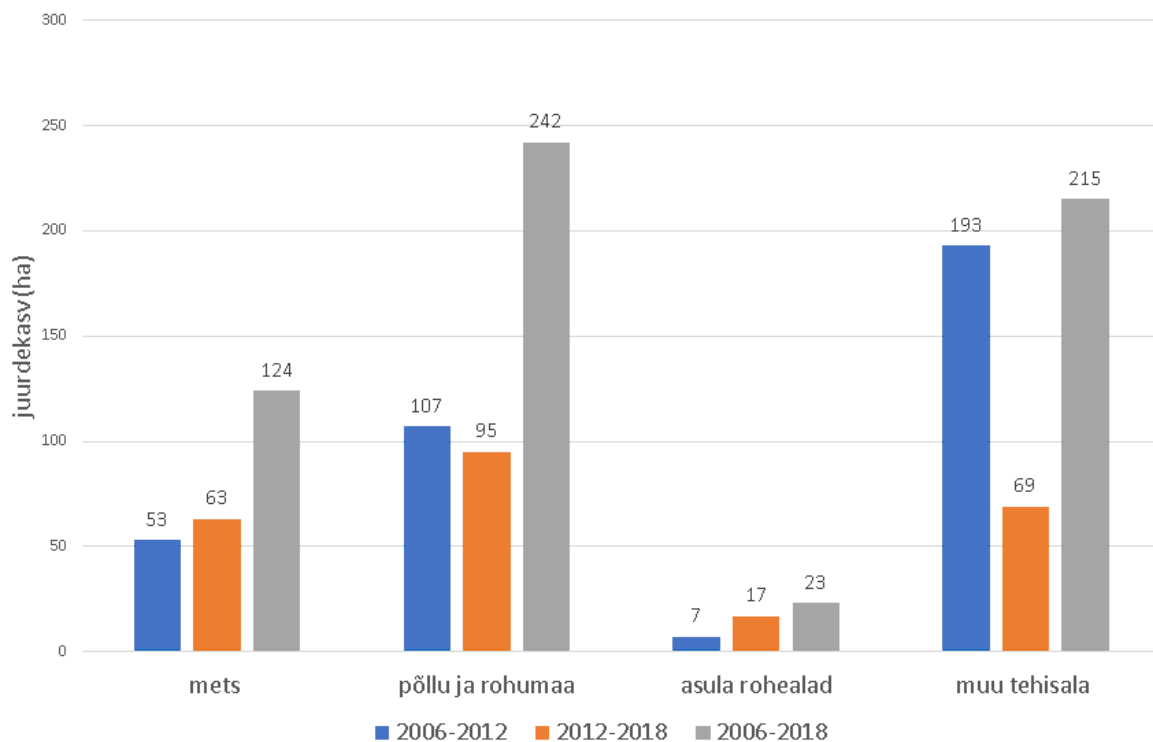
Maakasutus	2006. aasta pindala (ha)	2012. aasta pindala (ha)	2018. aasta pindala (ha)	Muutus 2006-2018 (ha)
Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	8737.2	9082.7	9332.9	595.7
Hõreda asustusega asula, kus asustus on väiksem kui 30%	1464.3	1853.2	1899	434.7
Muu tehisala	1665.9	1374.3	1464	-201.9
Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	5934.6	6305.9	6601.1	666.5
Transport	3519.2	3630.1	3769.3	250.1
Asula rohealad	2027.8	2015.1	1971.8	-56
Põllu- ja rohumaa	46020.6	45768.3	44970.5	-1050.1
Mets	43737.2	43420.6	43402.4	-334.8
Muu ala	81.6	86.8	84.7	3.1
Märgala	2045.2	1652.5	1688.6	-356.6
Veekogu	2212.6	2256.6	2261.8	49.2

Vaadeldes muutusi 6 aastaste vahemikega on näha, et asula klassid ja tööstus/äri ning üldkasutatav maa on 2006-2012 aastatel suurenenud rohkem kui ajavahemikus 2012-2018 (tabel 12). Kui 2006-2012 aastatel vähenes mets, põllu- ja rohumaa võrdsel hulgal, siis 2012-2018 aastatel on näha suurt põllu- ja rohumaa vähenemise trendi (797.8 hektariline kadu), samas metsamaa vähenes kõigest 18.2 hektarit. Anomaaliaks on andmetes 2006-2012 aastal toimunud märgalade 392.7 hektariline vähenemine. Anomaalia on tekkinud Raku järvest veidi lõuna pool oleval alal, kus 2006. aastal on alaks märgitud märgala, kuid 2012 ja 2018 aastatel on ala määratud põllu- ja rohumaaks (joonised 12-14). Kuna erisus ei hõlma tehisala klasse, siis modelleerimise täpsust anomaalia ei mõjuta.

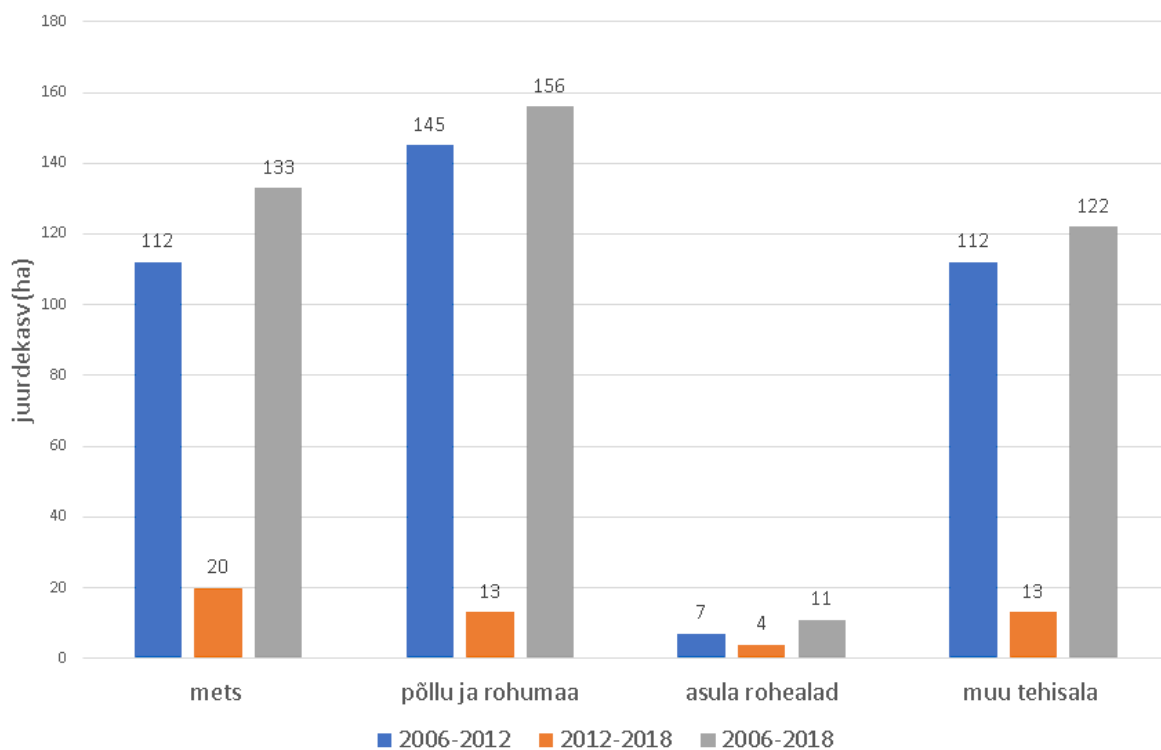
**Tabel 12.** Tallinna ja linna tagamaa maakasutusmuutused ajavahemikel 2006-2012 ja 2012-2018.

Maakasutus	Pindala (ha) muutus 2006-2012	Pindala (ha) muutus 2012-2018
Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	345.5	250.2
Hõreda asustusega asula, kus asustus on väiksem kui 30%	388.9	45.8
Muu tehisala	-291.6	89.7
Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	371.3	295.2
Transport	110.9	139.2
Asula rohealad	-12.7	-43.3
Põllu- ja rohumaa	-252.3	-797.8
Mets	-316.6	-18.2
Muu ala	5.2	-2.1
Märgala	-392.7	5.2
Veekogu	44	5.2

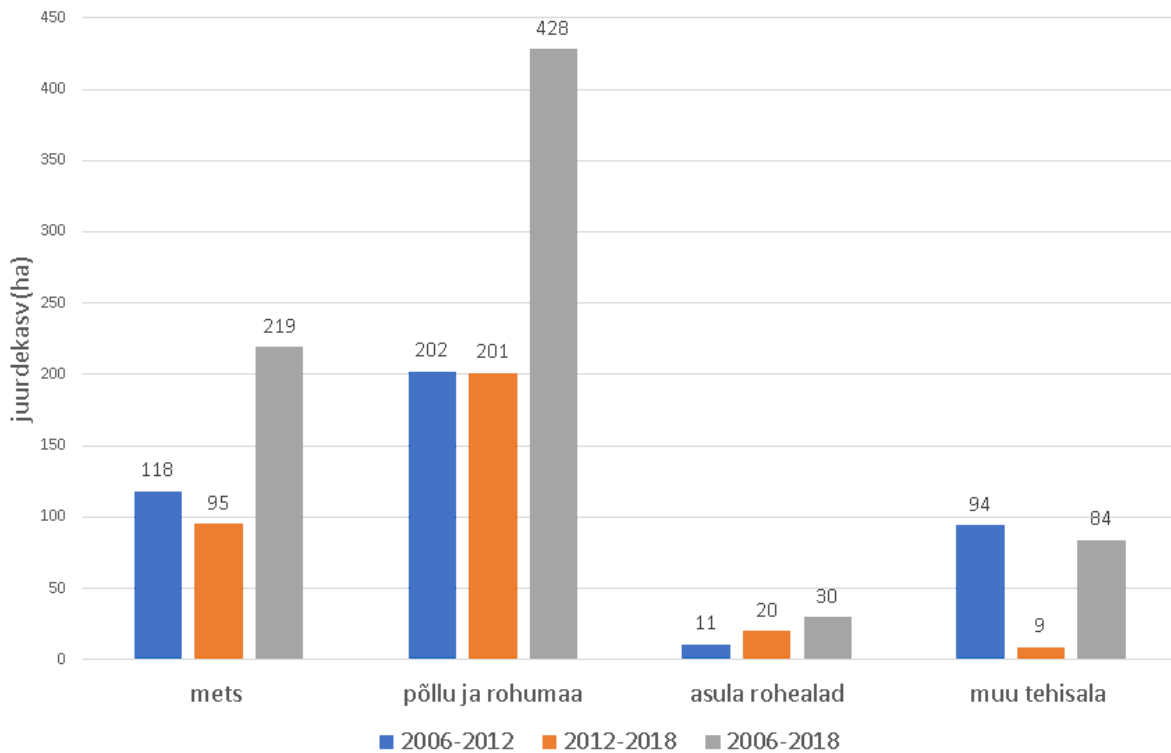
Vaadeldes asula ja tööstus/äri ning üldkasutatava maa maakasutusmuutusi, on võimalik näha kõigi puhul sarnaseid maakasutuse trende – juurdekasv on toimunud metsa, asula rohealade, muu tehisala, põllu- ja rohumaa arvelt (joonised 19-21). Kõikides eeltoodud klassides on kõige rohkem juurdekasvu toimunud põllu- ja rohumaal ning kõige vähem asula rohealadelt. Nii hõreda asustusega asula ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa klasside puhul on juurdekasv metsadelt suurem kui tehisalalt. Tiheasustusega asula klassi puhul on aga juurdekasv tehisalalt suurem kui metsadelt (joonis 15). Eeltoodud klasse ei ole mõjutanud transpordi, muu ala ja märgala klassid, mistõttu määrati need modelleerimisel piiranguks. Juurdekasvu tulemustega arvestatakse maakasutuse teguri kaartide loomisel, mis näitavad maakasutuse tõenäosust muutumaks uuritavaks klassiks.



**Joonis 19.** Tallinna ja tagamaa tiheasustusega asula juurdekaskv (ha) aastatel 2006-2018.

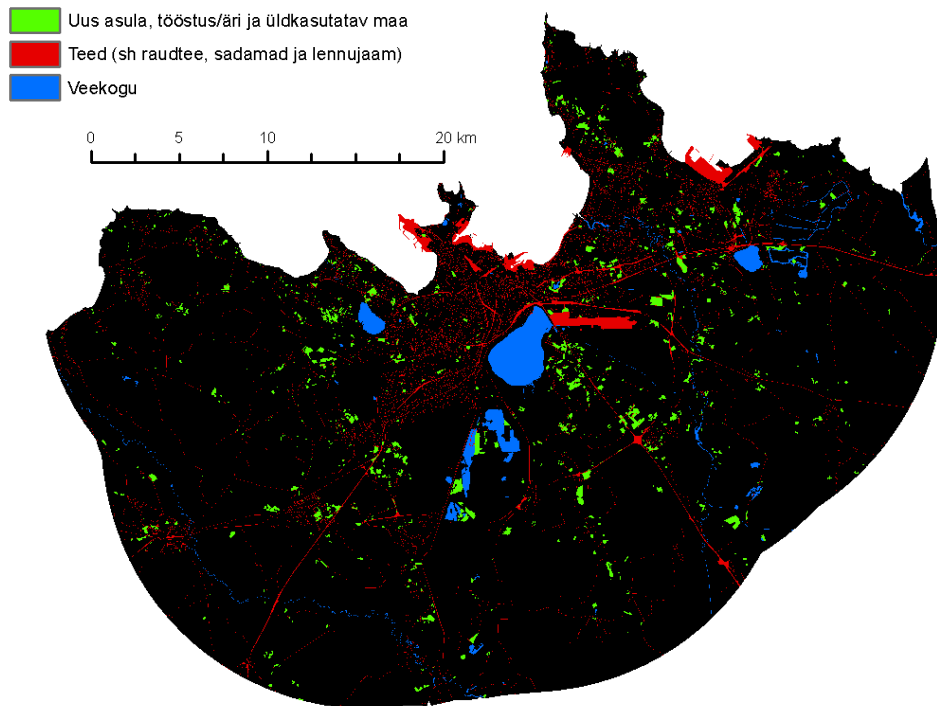


**Joonis 20.** Tallinna ja tagamaa hõreda asustusega asula juurdekaskv (ha) aastatel 2006-2018.

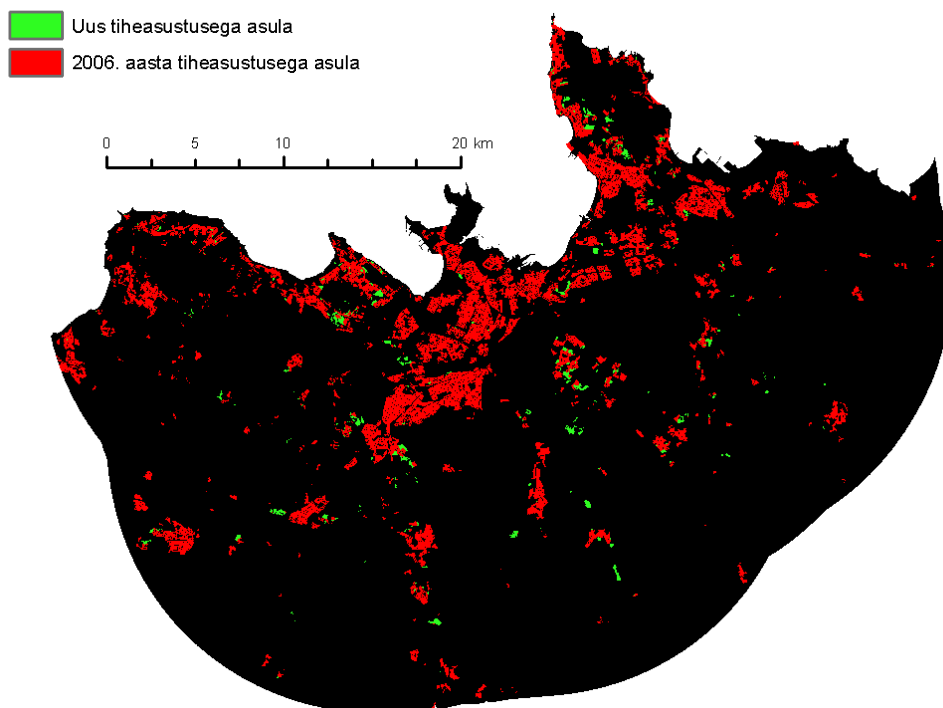


**Joonis 21.** Tallinna ja tagamaa tööstus/äri ja üldkasutatava maa juurde kasv (ha) aastatel 2006-2018

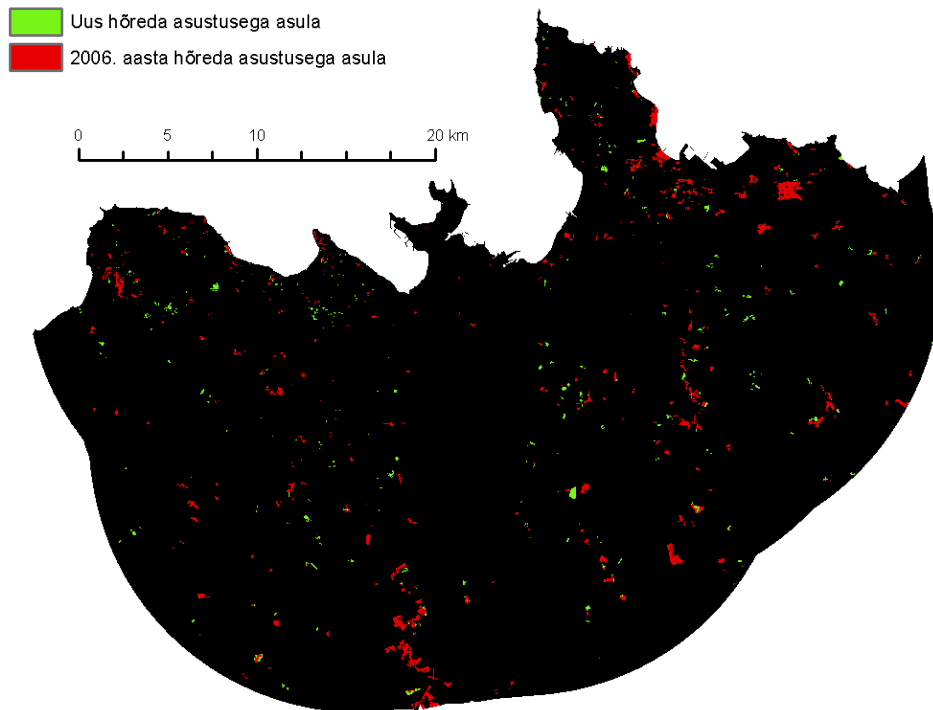
Vaadeldes eeltoodud klasside juurdekasvu visuaalselt, on märgata, et asustuse laienemine on leidnud aset peamiselt teede läheduses ning vähesemal määral ka veekogude juures (joonis 22). Lisaks on märgata suuremat juurdekasvu Viimsis ning Tallinna administratiivpiiri, ranniku ja Tallinn-Tartu maantee läheduses. Maakasutuse trendiks on ka uute asulate ja tööstus/äri ja üldkasutatava maa rajamine olemasolevate alade juurde (joonised 23-25). Seda on eelkõige märgata tiheasustusega asula ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa klasside puhul (joonised 23 ja 25).



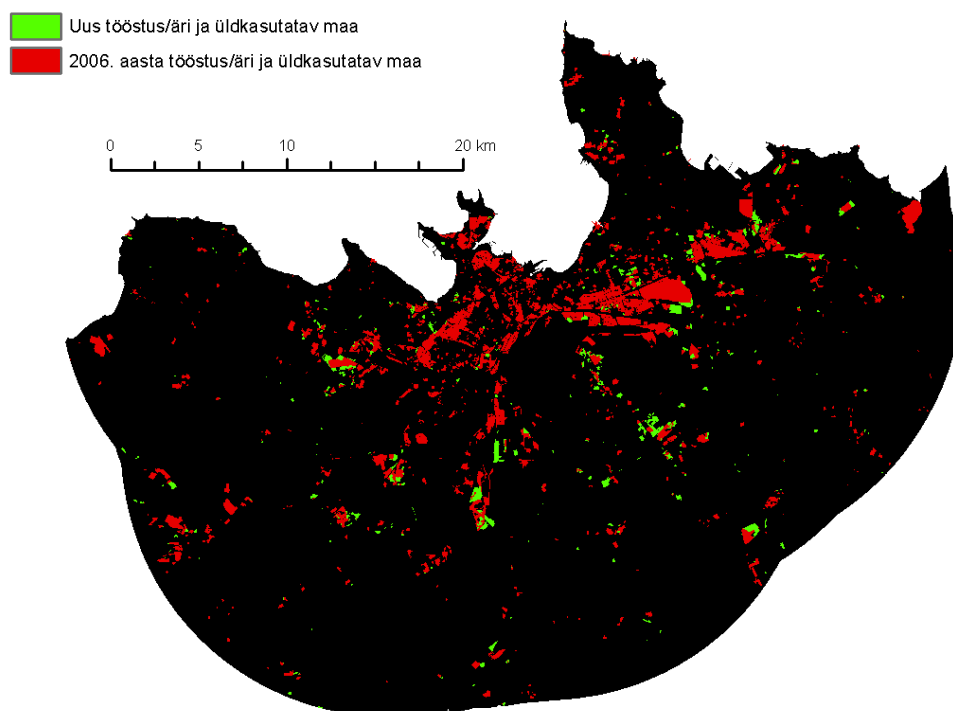
**Joonis 22.** Tallinna ja tagamaa uued asula ja tööstus/äri ning üldkasutatava maa alad ajavahemikus 2006-2018 ning 2018. aasta veekogud ja teedekiht, sh sadamad, raudtee ja lennujaam.



**Joonis 23.** Tallinna ja tagamaa uued tiheasustusega asulad ajavahemikus 2006-2018.



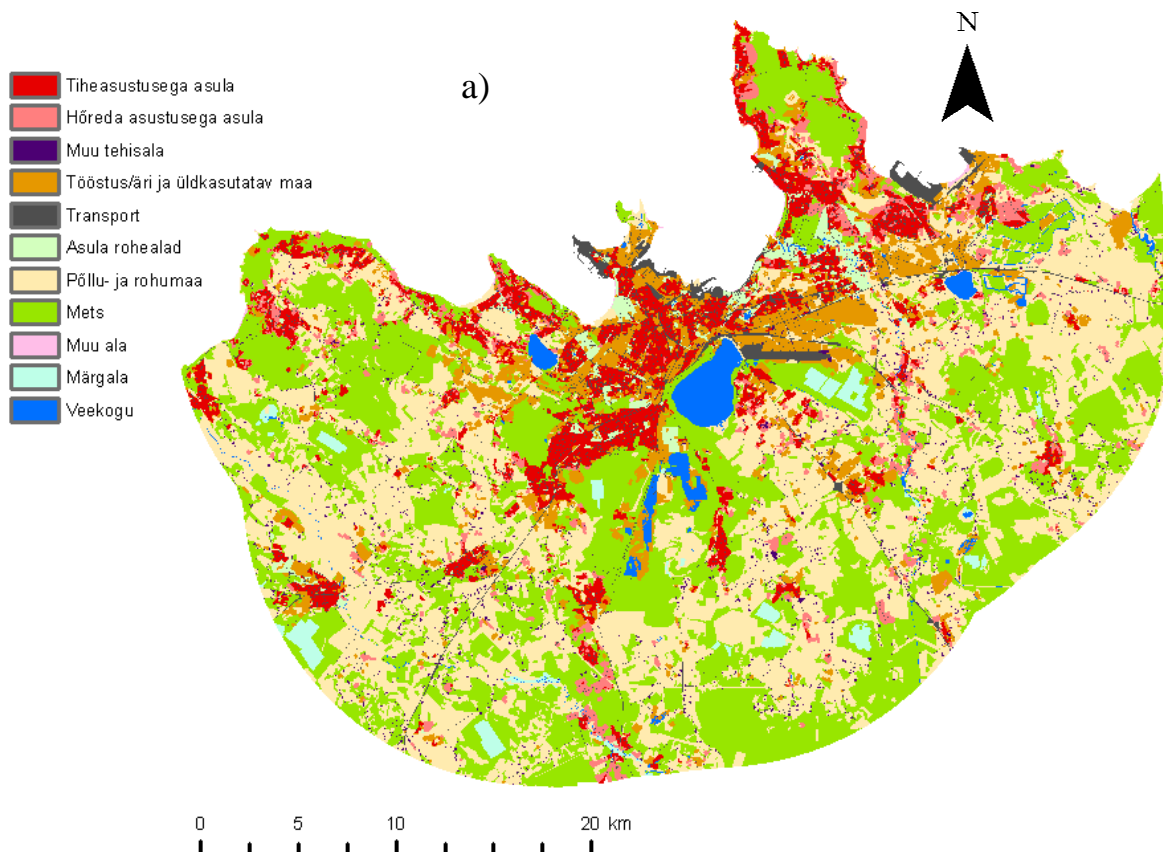
**Joonis 24.** Tallinna ja tagamaa uued hõreda asustusega asulad ajavahemikus 2006-2018.

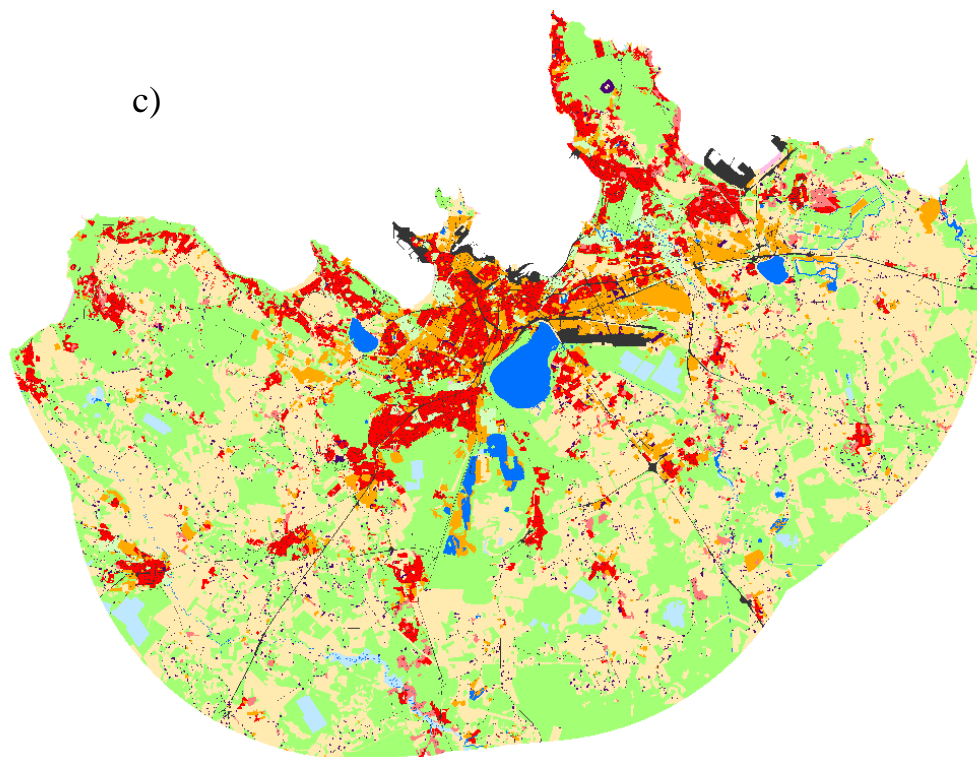
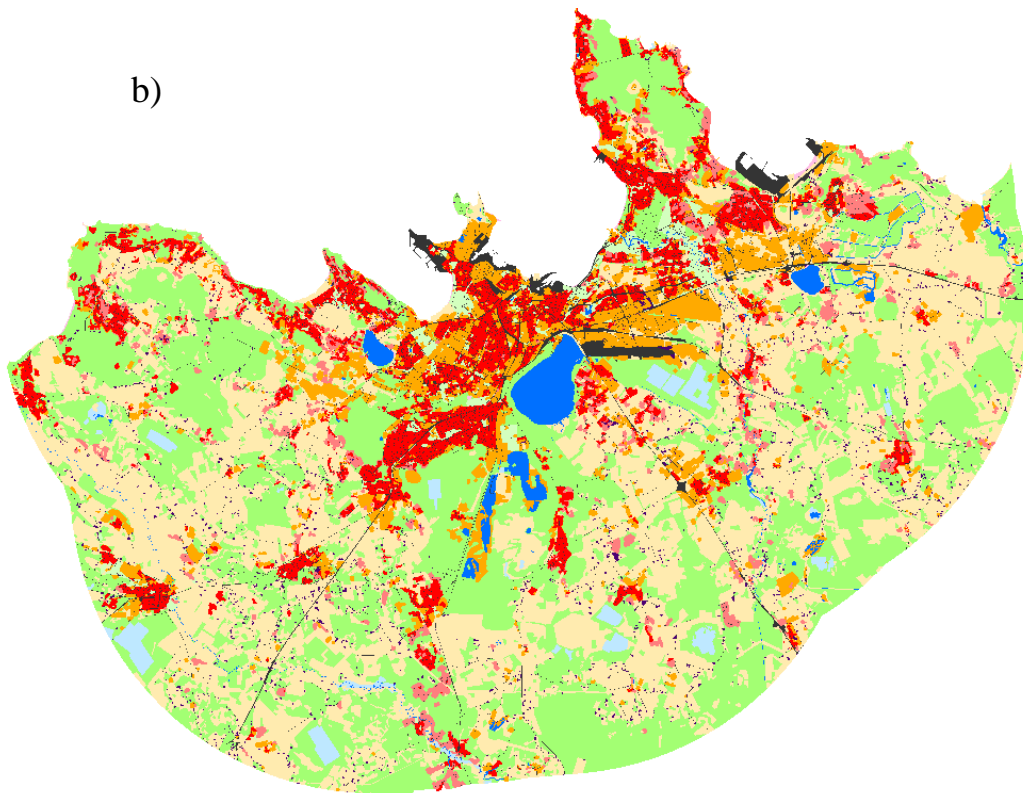


**Joonis 25.** Tallinna ja tagamaa uued tööstus/äri ja üldkasutatava maa alad ajavahemikus 2006-2018.

### 3.2 Mudeli kalibreerimine

Kolmele klassile loodud sobivuskaartide abil tehti 2 modelleerimist aastaks 2018 (joonis 26). Ühel mudelil kasutati AHP kaaludega sobivuskaarte ja teisel kaaludeta sobivuskaarte. Mõlema mudeli täpsus valideeriti kasutades IDRISI tööriista *Validate*, kus 2018. aasta prognoose võrreldi olemasoleva 2018. aasta referentskaardiga. AHP kaaludega mudeli valideerimisel saadi Kapa indeksi (Kstandard) tulemuseks 90.79%, üldise Kapa (Kno) ja asukoha Kapa (Klocation) tulemusteks saadi vastavalt 92.73% ja 97.13%. Kaaludeta sobivuskaartide abil tehtud prognoosi Kapa indeksiks saadi 89.87%, üldiseks Kapaks 91.81% ja asukoha Kapaks 96.21%. Valideerimisel selgus, et AHP kaaludega sobivuskaardid andsid modelleerimisel 0.92% täpsema tulemuse kui kaaludeta sobivuskaardid. Visuaalsel võrdlemisel on näha, et kaaludeta sobivuskaartidega tehtud prognoos on ebatäpsemalt hinnanud hõreda asustusega asula juurdekasvu. Kapa kordaja on üle 80%, seega mudelid on piisavalt täpsed, et teha tuleviku prognoose (Araya ja Cabral, 2010; Ozturk, 2015). Kuna AHP kaaludega mudel saavutas täpsema tulemuse, siis 2050. aasta maakasutuse mudelil tehakse prognoos AHP kaaludega.





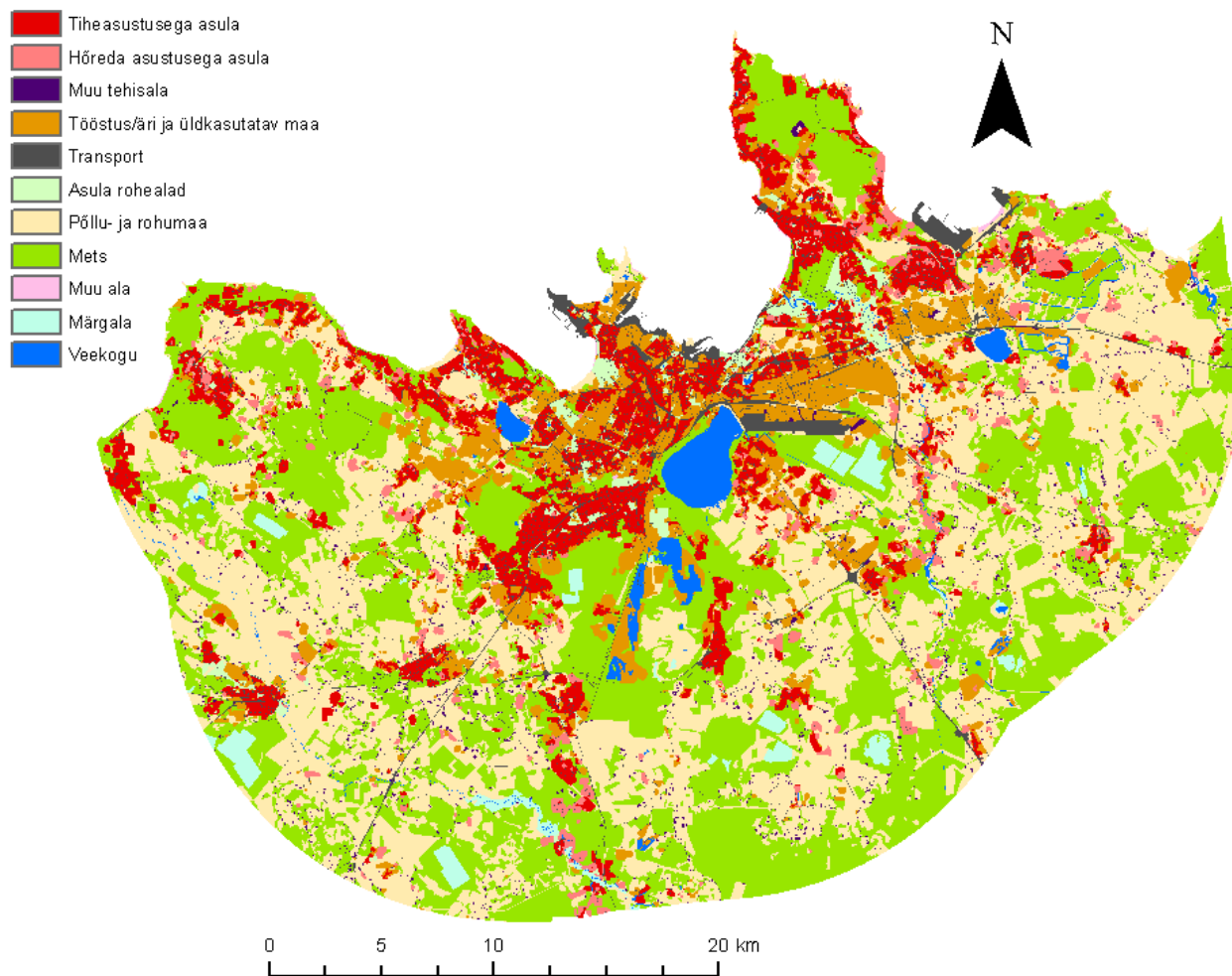
**Joonis 26.** 2018. aasta AHP sobivuskaartidega mudel (a), 2018. aasta kaaludeta sobivuskaartidega mudel (b) ja 2018. aasta maakasutuse referentskaart (c).

### 3.3 2050. aasta mudel

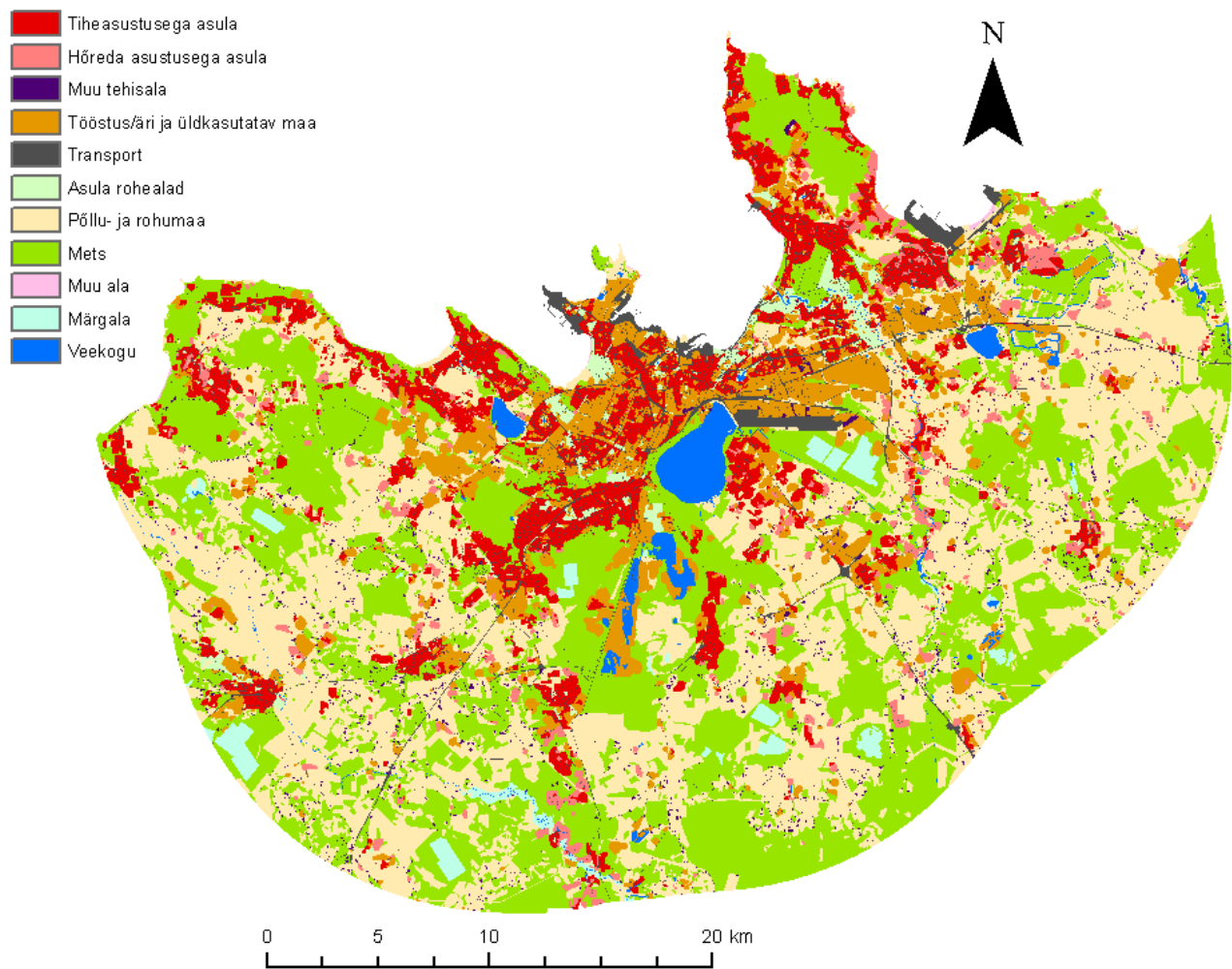
2050. aasta modelleerimisel ilma üldplaneeringuteta kasutati samu tegureid ja piiranguid, mis mudeli kalibreerimisel. Üldplaneeringutega modelleerimisel kasutati uusi sobivuskaarte, kus üldplaneeringute teguri kaardile sisendati kõige suurem osakaal.

Kvantitatiivsed muutused on leitud CA-Markovi mudelis Markovi ahelate meetodiga. Sobivuskaardid mõjutavad ainult asukohapõhiseid tulemusi, mistõttu kvantitatiivsed tulemused on mõlema modelleerimise puhul samad. Vaadeldes muutusi kvantitatiivselt, on näha kõige suuremat tehisala juurdekasvu tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassil (ligikaudu 6178.9 ha; 93.6%). Prognoosi alusel suureneb tiheasustusega asula ligikaudu 2772.2 ha (29.7%) ja hõreda asustusega asula 1403.6 ha (73.9%). Protsentuaalselt väheneb kõige rohkem tehisala (26.4%; 385.7 ha) ja asula rohealad (21.5%; 423.3 ha), küllaga kvantitatiivselt on kõige suurem kadu metsal (3547.5 ha; 8.2%) ning põllu- ja rohumaal (5900.8 ha; 13.2%). Tallinna tagamaa hõreda asustusega asula juurdekasv on prognoositud peamiselt metsadelt. Tiheasustusega asula rannikuäärsed ja Tallinnast kaugemad alad laienevad tõenäoliselt metsade arvelt ning Tallinna-lähedased alad põllu- ja rohumaal. Tööstus/äri ja üldkasutatava maa juurdekasv on samuti kaugematel aladel metsadelt ning Tallinna lähedal põllu- ja rohumaal. Aastaks 2050 prognoositakse Tallinna ja selle lähipiirkonna tehisalale ligikaudu 9969 ha juurdekasvu.

AHP kaaludega prognoosi alusel on aastaks 2050 näha Tallinna laienemist igas suunas (joonis 27). Tiheasustusega asula laieneb kõige tõenäolisemalt rannikuäärsetel aladel ja teisejärguliselt mööda Tallinn-Pärnu maanteed. Hõreda asustusega asula laieneb kõige rohkem Tallinna administratiivpiirist üle 10 km kaugusel aladel. Tööstus/äri ja üldkasutatav maa laieneb kõige rohkem mööda põhimaanteed ja Tallinnast idapoolsetel aladel Narva suunas. Üldplaneeringutega mudeli puhul on näha sarnaseid muutuste trende, kuid esinevad mõned erinevused (joonis 28). Üldplaneeringutega modelleerimise puhul on muutused toimunud rohkem linnalähedastel aladel ja Tallinna administratiivpiirist rohkem kui 10 km kaugused alad on vähem laienenud kui üldplaneeringuteta prognoosil. Lisaks on märgata suuremat tiheasustusega asula laienemist rannikuäärsetel aladel ja Tallinn-Tartu maantee läheduses. Üldplaneeringutega mudelil on näha linnasiseseid muutusi, kus tiheasustusega asulate juurde on tekkinud rohkem tööstus/äri ja üldkasutatavat maad.

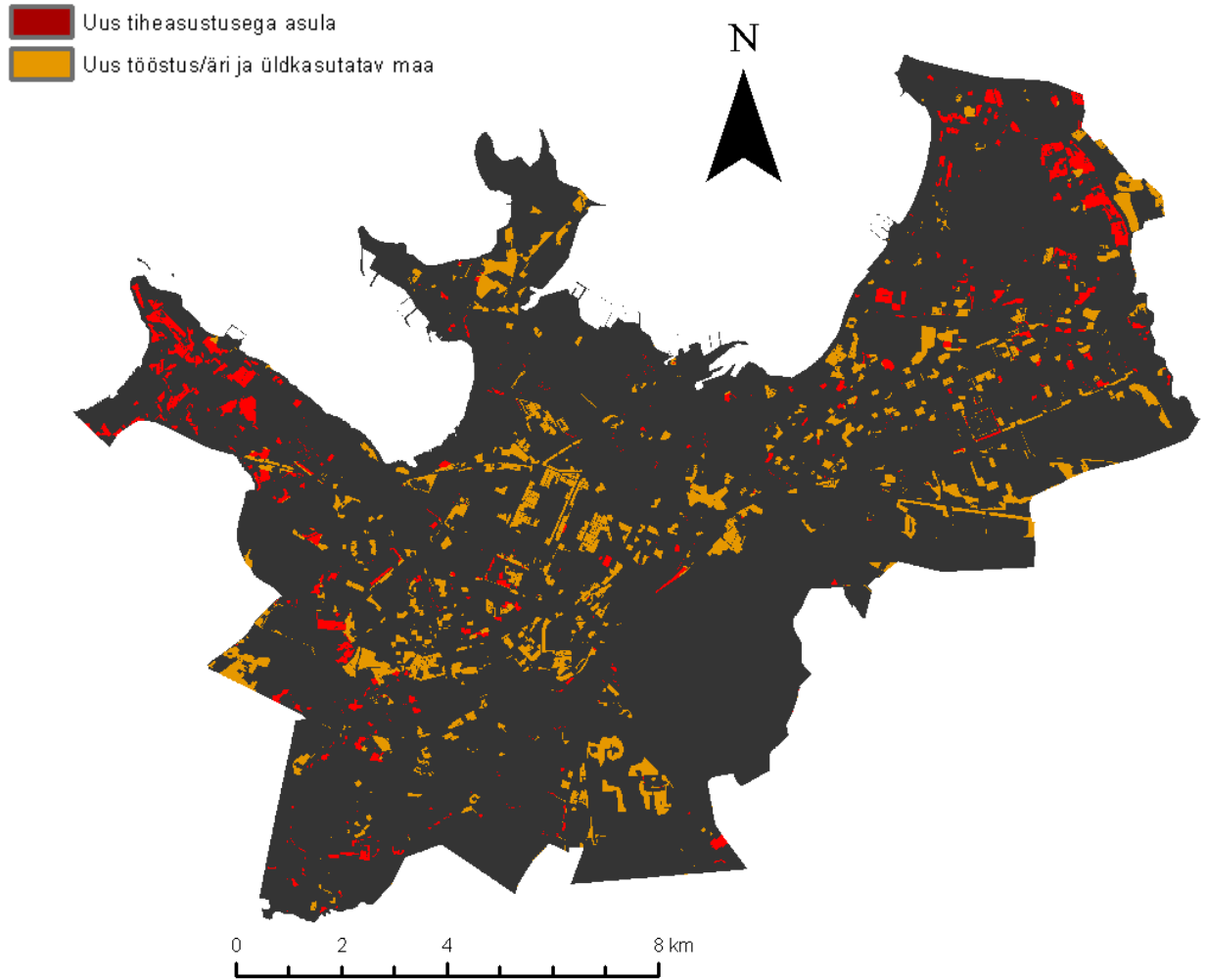


**Joonis 27.** Tallinna ja linna tagamaa 2050. aasta maakasutuse prognoos üldplaneeringuteta.



**Joonis 28.** Tallinna ja linna tagamaa 2050. aasta maakasutuse prognoos üldplaneeringutega.

Vaadeldes linnasiseseid muutusi, on üldplaneeringutega mudel prognoosinud tiheasustusega asula juurdekasvu peamiselt Tallinna administratiivpiiri lähedastel aladel (joonis 29). Kõige rohkem on uut tiheasustusega asulat prognoositud Haabersti ja Pirita linnaosadesse. Tööstus/äri ja üldkasutatava maa juurdekasv toimub tõenäoliselt kõige rohkem Põhja-Tallinna, kesklinn, Kristiine, Mustamäe ja Lasnamäe linnaosades. Üldplaneeringud on prognoosinud Tallinna linna muutumist multifunktsionaalsemaks ja tihedamaks, kus üha rohkem on tiheasustusega asula juures tööstus/äri ja üldkasutatavat maad.



**Joonis 29.** Tallinna linnasised muutused üldplaneeringutega mudelis aastaks 2050.

## 4. Arutelu ja järeldused

Modelleerimine on parim meetod uurimaks linnade maakasutusmuutuseid ja tehisala laienemist ning teha selle abil ratsionaalsemaid planeerimise otsuseid (Achmad *et al.*, 2018; Noszczyk 2019). Viimastel dekaadidel on suureks probleemiks olnud kiireloomuline valglinnastumine, mis leiab aset Eestis peamiselt Tallinnas, kus linnaregioon ulatub 50 kilomeetrini (Gauk ja Roose, 2013). Planeerimata valglinnastumine toob kaasa viljakate põllumaade kadu, surve infrastruktuurile, maksude suurenemise ning negatiivse mõju keskkonnale ja ökosüsteemidele, mistõttu linnade jätkusuutliku arengu tagamiseks on vajalik suunata valglinnastumist ja teha õigeid maakasutusotsuseid (Allen ja Lu, 2003). Maakasutusmuutuste tuleviku prognoosid aitavad ennetada valglinnastumisest tulenevaid probleeme (Noszczyk, 2019). Abiks on ka üldplaneeringud, mille eesmärkideks on tihti valglinnastumise vähendamine ning linna tihendamine (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001).

Maakasutuse analüüsisist selgus, et aastatel 2006-2018 toimub Tallinna laienemine, kus uued hõreda ja tiheasustusega asulad ning tööstus/äri ja üldkasutatav maa on tekkinud peamiselt olemasoleva asustuse, teede ja Tallinna administratiivpiiri lähedusse. Küllaga ajavahemikus 2012-2018 on tehisala laienenud vähem kui vahemikus 2006-2012. Antud trend on vastavuses Tallinna rahvaarvu muutustega, kus aastatel 2006-2012 suurenes rahvaarv ligikaudu 12 600 elaniku võrra ning vahemikus 2012-2018 peaaegu 3 korda rohkem, ligikaudu 32 600 elaniku võrra (tabel 2). Rahvaarvu muutused iseloomustavad trendi, kus rahvaarvu muutused on seoses linna lähipiirkonna laienemisega. Vaadeldes aga rahvaarvu muutusi viimase 5 aasta jooksul, on rahvaarv vähenenud ligikaudu 3500 elaniku võrra, mis võib olla märk valglinnastumise kiirenemisest ja Tallinna lähitagamaa eelistamisest.

Varasemad Tallinna asumid ja 2003-2007 aastate buumiaegne hoonestus rajati peamiselt põllu- ja rohumaadele (Tammaru *et al.* 2009; Gauk ja Roose, 2013; Kirsimäe, 2015). Sarnane trend esines maakasutusmuutuste analüüsis, kus selgus, et 2006-2018 aastatel on asula ja tööstus/äri ning üldkasutatava maa klasside juurdekasv peamiselt põllu- ja rohumaalt. Varasematest uuringutest on samuti leitud, et asulad on laienenud peamiselt põllu- ja rohumaal arvelt (Araya ja Cabral, 2010; Tajbakhsh *et al.*, 2016; Fitawok *et al.*, 2020). Lisaks on trendiks muu tehisala, metsade ja vähemal määral ka asula rohealade muutus asulateks ning tööstus/äri ja üldkasutatavaks maaks. Muu tehisala klass hõlmab endast ehitusplatse ja eraldatud hooneid, mistõttu on loogiline, et antud klass

on muutunud peamiselt tiheasustusega asulaks. Asustuse juurdekasv metsadelt on toimunud rannikuäärsetel aladel ja linnadest kaugematel aladel. Sarnane trend esines ka varasematest uurimustes (Tammaru *et al.*, 2009; Kirsimäe, 2015). Maakasutusmuutuste analüüsist saab järeldada, et varasemad maakasutuse muutuste trendid Tallinnas ja linna lähipiirkonnas on jätkunud aastaks 2018.

Vaadeldes muutusi asukohapõhiselt, leiti trendideks uue asustuse rajamine Tallinna administratiivpiiri, veekogude, ranniku, teede ja olemasoleva asustuse lähedusse. Sarnased trendid leiti ka varasematest Tallinna uuringutest (Tammaru *et al.*, 2009; Samarüütel *et al.*, 2010; Roose *et al.*, 2013; Kirsimäe, 2017). Lisaks on näha Tallinna laienemist Tallinn-Tartu maantee läheduses. Sarnast trendi on näha Kirsimäe bakalaureusetöös (2015), kus leiti Tallinna laienemine Tartu suunas. Eeltoodud trendid on esinenud ka uuringutes väljaspool Eestit. Fitawok *et al.* (2020) uuringust selgus, et linnaala arenes mööda põhilisi teid, veekogusi ja olemasolevate ärikeskuste läheduses. Achmad *et al.* (2018) uuringust leiti, et asustus laienes linnakeskuse, teede ja olemasoleva tiheasustusega asula lähedal. Hosseinali *et al.* (2012) ja Tajbakhsh *et al.* (2016) uuringutes toimusid muutused peamiselt olemasoleva asustuse lähedal.

Sobivusanalüüs viidi läbi IDRISI mudeliga *MCE Decision Wizard*, mis lubab hägusloogika abil sisendada teguri kaartidele erinevaid trende. Lisaks kasutati modelleerimisel analüütiliste hierarhiate meetodit (AHP), mis aitab suunata sobivuskaardil erinevate teguri kaartide osakaalude abil maakasutuse sobivust muutumiseks. AHP täpsuseks on vajalik piisav ekspertide arv, et objektiivselt hinnata tegurite olulisust (Mohammad *et al.*, 2013; Aburas *et al.*, 2015). Antud uuringus aga kasutati varasemaid uurimusi ja Crameri V seosekordaja väärtusi. Mudeli kalibreerimisel kasutati 2006 ja 2012 aasta maakasutuse andmeid, millega tehti modelleerimine aastaks 2018. 2018 aasta mudel valideeriti 2018. aasta maakasutuse andmetega, kasutades IDRISI tööriista *Validate*. Valideerimisel saavutati nii AHP kaalude kui ka kaaludeta sobivuskaartidega väga täpne tulemus, mistõttu mudelid on piisavalt head, et teha 2050 aasta maakasutuse prognoos. AHP osakaaludega saavutati 0.92% täpsem tulemus kui kaaludeta, mistõttu võib lugeda AHP kaalude metoodikat piisavalt heaks maakasutuse modelleerimiseks. Kuna esinevad sarnased muutuste suunad ja saavutati täpne valideerimise tulemus, võib *Urban Atlas*-e andmestikku pidada piisavalt täpseks, et teha maakasutusmuutuste modelleerimisi.

2050. aasta mudelite alusel on trendiks asulate ning tööstus/äri ja üldkasutatav maa juurdekasv peamiselt metsa-, põllu- ja rohumaa. Muutuste trendid sarnanevad varasematele trendidele – 2050. aasta uued asulad on rannikuäärsetel ja Tallinnast kaugematel aladel laienenud metsade arvelt ning kõige rohkem on põllu- ja rohumaa muutunud tehisalaks Tallinna administratiivpiiri lähedal. Kvantitatiivselt on kõige suurem juurdekasv põllu- ja rohumaa (5900.8 ha) ja teisejärguliselt metsadelt (3547.5 ha). Varasemates uuringutes on samuti prognoositud kõige rohkem asula juurdekasvu põllu- ja rohumaa (Araya ja Cabral, 2010; Tajbakhsh *et al.*, 2016; Fitawok *et al.*, 2020) Muutuste trend on vastavuses ka Kirsimäe magistriterritoos (2017) saadud tulemustega, kus 2030. aastaks prognoositi peamiselt põllu- ja rohumaa muutust asulaks. Küllaga Kirsimäe magistriterritoos prognoositi palju suuremat põllu- ja rohumaa kadu (6875 ha) ning palju väiksemat metsade kadu (1245 ha). 2050. aasta mudelite põhjal on üha rohkem uut asustust rajatud metsadele. Mudelites on uus asustus rajatud peamiselt teede, olemasoleva asustuse ja ranniku lähedale. Sarnane tulemus esines Kirsimäe (2017) 2030. aasta prognoosil. Lisaks on näha linna laienemise aeglustumist – 2050. aasta mudelil suurenes tehisala 9969 ha ning Kirsimäe (2017) 2030. aasta mudelil 8120 ha. Üldplaneeringutega modelleerimisel on 2050. aasta mudelis Tallinna lähipiirkond laienenud veidi vähem kui 2050. aasta üldplaneeringuteta mudelis. Sellest hoolimata esinevad mõlemal mudelil samad maakasutusmuutuste trendid.

Üldplaneeringute mudeli prognoosist selgus, et tiheasustusega asula juurdekasvuks on kõige sobilikumad linnaosad Haabersti ja Pirita ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa puhul Põhja-Tallinna, kesklinna, Kristiine, Mustamäe ja Lasnamäe linnaosad. Linnaosade üldplaneeringute eesmärgiks on muuta linn atraktiivsemaks, viies teenuseid elukohtadele lähemale, tihendades linna ja vähendades liikluskoormust (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001, 2009, 2010a, 2010b, 2013a, 2013b, 2017; OÜ Kootplaan, 2006). Eesmärgi täitmist on näha üldplaneeringute mudelis, kus Tallinn on muutunud multifunktsionaalsemaks ja tihedamaks ning üha rohkem on omavahel kõrvuti tiheasustusega asula ja tööstus/äri ja üldkasutatav maa. Linnaosade üldplaneeringute kohaselt suunatakse jätkuvalt äritegevust kesklinna, kuid üha enam viiakse kaubandus- ja teenindusettevõtteid teistesse linna piirkondadesse (Tallinna Linnaplaneerimise Amet, 2001). Üldplaneeringute mudelis on samuti näha tööstus/äri ja üldkasutatava maa juurdekasvu peamiselt linna keskel ning üha rohkem ka Tallinna äärealadel, Lasnamäe, Nõmme, Mustamäe ja Kristiine linnaosades.

Rakk-automaadiga pole võimalik vaadelda linnade tihenemist ja linnasiseseid muutusi (Liu *et al.*, 2019). Selle limiteeritust on näha AHP kaaludega mudelis, millega on võimalik hinnata ainult oletatavat linna laienemist. Üldplaneeringute mudel on aga võimaldanud modelleerida Tallinna linnasiseseid muutusi, muutes mudelit kompaktsemaks ja realistlikumaks. Üldplaneeringutest tulenevad linnasisesed muutused on mõjutatud erinevatest teguri kaartidest, mistõttu mudelis on võimalik näha kõige sobivamaid kohti asulatele või tööstus/äri ja üldkasutatavale maale. See on kasulik informatsioon planeerijatele, kuna prognoos võimaldab teha paremaid maakasutuse otsuseid. Ühtlasi võib üldplaneeringute mudeli prognoosi lugeda linnaväliselt täpsemaks kui üldplaneeringuteta mudelil, kuna see takistab linna laienemise ülehindamist. Eeltoodust lähtudes võib pidada üldplaneeringuid oluliseks vahendiks modelleerimisel, mis võimaldab prognoosida linnasiseseid muutusi ja hinnata linna tihenemist. 2050. aasta prognoosis esinevad maakasutuse mustrid ja linna laienemise suunad aitavad teha paremaid maakasutuse otsuseid ning takistada valglinnastumist.

Olgugi et antud magistritöös saavutati täpne valideerimise tulemus, on võimalik mudelit veelgi täiustada ja muuta täpsemaks. Edasisteks uuringuteks saab kaasata rohkem sotsiaalmajanduslikke tegureid, näiteks elanikkonna kasv, rahvastikutihedus ja maakasutusega seonduv poliitika. IDRISI mudel *MCE Decision Wizard* on maakasutuse tegurite aspektist väga paindlik, kuna mudelis on võimalik kombineerida omavahel nii kvalitatiivseid kui ka kvantitatiivseid tegureid (Aburas *et al.*, 2015). AHP kaaludega modelleerimist on võimalik muuta veelgi täpsemaks, kui kaasata uuringusse erinevate ekspertide arvamused ja hinnangud. Erinevad eksperdid on abiks ka rohkemate tegurite leidmisel, et saavutada võimalikult täpne tuleviku prognoos.

## Kokkuvõte

Linnade laienemine on loomulik protsess, kuid sellega võib kaasneda planeerimata valglinnastumine, millel on negatiivne mõju nii elanikkonnale kui ka keskkonnale. Maakasutusmuutuste modelleerimine aitab ennetada valglinnastumist ning suunab planeerijaid tegema läbimõeldud otsuseid, mis tagaks linnade jätkusuutliku arengu. Valglinnastumisest ei ole jäänud puutumata ka Tallinn, mistõttu Tallinna ja selle lähipiirkonna maakasutuse modelleerimine on vajalik. Antud uuring prognoosib Tallinna ja selle lähipiirkonna maakasutusmuutusi aastaks 2050, sealhulgas analüüsid üldplaneeringute ja analüütiliste hierarhiate meetodi (AHP) mõju mudelile ning maakasutuse muutusi vahemikus 2006-2018. Modelleerimisel kasutatakse CA-Markovi mudelit, *Urban Atlas*-e 2006, 2012 ja 2018 aasta andmeid ning Tallinna linnavalitsuselt saadud üldplaneeringute ruumandmeid.

Maakasutuse analüüsist selgus, et vahemikus 2006-2018 on kõige suurem juurdekasv tööstus/äri ja üldkasutataval maal ning teisejärguliselt tiheasustusega asulal. Kõige rohkem vähenes põllu- ja rohumaa, mis muutus asulaks ja tööstus/äri ja üldkasutatavaks maaks. Linnade laienemisel olid sobilikeks klassideks ka mets, asula rohealad ja muu tehisala (eraldatud hooned ja ehitusplatsid). Muu tehisala muutus aastaks 2018 peamiselt tiheasustusega asulaks. Ajavahemikus 2006-2018 rajatud uued asulad on tekkinud peamiselt Tallinna administratiivpiiri, ranniku, teede ja olemasoleva asula lähedusse. Sarnane trend leiab aset tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassi puhul. Lisaks on märgata linna laienemist Tartu suunas mööda Tallinn-Tartu maanteed.

Asulaklasside sobivuskaartide loomisel kasutati 8 teguri kaarti: nõlvakalle, maakasutus, kaugus teedest, Tallinn-Tartu maanteest, veekogudest, mererannikust, Tallinna administratiivpiirist ja olemasolevatest asulatest. Tööstus/äri ja üldkasutatava maa sobivuskaardi loomisel kasutati samuti 8 tegurit: nõlvakalle, maakasutus, kaugus tööstus/äri ja üldkasutatavast maast, sadamatest, lennujaamast, teedest, Tallinn-Tartu maanteest ja Tallinna administratiivpiirist. Sobivuskaartide tegemisel kasutati analüütiliste hierarhiate meetodit (AHP), mille kasutamisel on täheldatud ekspertide hinnangu vajadust. Antud uuringus aga leiti AHP kaalud varasemate uuringute ning Crameri V väärtuste abil. AHP uuringust selgus, et kõige rohkem avaldab mõju asulate ning tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassidele maakasutus ning teisejärguliselt kaugus olemasolevast uuritavast klassist. Mudeli kalibreerimisel tehti 2006 ja 2012 aasta andmetega prognoos aastaks 2018, mis valideeriti 2018 aasta referentskaardiga. Valideerimisel kasutati Kapa seosekordajat,

millega saavutati mõlema mudeli puhul väga kõrge täpsus. AHP kaaludega leiti aga 0.92% täpsem tulemus kui kaaludeta sobivuskaartidega.

2050. aasta prognoos tehti üldplaneeringutega ja ilma, kasutades 2006 ja 2018 aasta andmeid. Mudelitel leidsid aset sarnased trendid, mis vahemikus 2006-2018 – põllu- ja rohumaa muutus tehisalaks Tallinna lähedastel aladel ning Tallinnast kaugemate alade puhul muutus üha rohkem põllu- ja rohumaa asemel mets. Metsade kadu leiab aset peamiselt rannikulähedastel aladel, kuhu prognoositakse tiheasustusega asula juurdekasvu. Uued tööstus/äri ja üldkasutatava maa alad rajatakse peamiselt põllu- ja rohumaaadele. 2050. aastaks prognoositi endiselt kõige suuremat kadu põllu- ja rohumaaale, kuid üha rohkem suureneb metsade muutus asulaks ning tööstus/äri ja üldkasutatavaks maaks. Tehisala klassidest laieneb kõige rohkem tööstus/äri ja üldkasutatav maa ning teisejärguliselt tiheasustusega asula. Muutused leiavad aset peamiselt olemasoleva asustuse ja teede läheduses. Mudelid prognoosivad 9969 ha tehisala juurdekasvu aastaks 2050.

Üldplaneeringutega mudelil on linn laienenud veidi vähem kui üldplaneeringuteta mudelil, kuna osa muutustest toimub linnasiseselt. Üldplaneeringud muutsid mudeli kompaktsemaks ja täpsemaks, ennetades võimalikku linna laienemise ülehindamist ja võimaldades prognoosida ka linnasiseseid muutusi. Varasemad uuringud on täheldanud, et CA-Markoviga on võimalik analüüsida ainult lihtsamaid linnade protsesse nagu linna laienemine ja valglinnastumine. Üldplaneeringud võimaldavad CA-Markoviga prognoosida ka keerulisemaid protsesse nagu linna tihenemine, mis varasemalt on olnud piiratud.

Nii AHP kui ka üldplaneeringud osutusid modelleerimisel väga oluliseks vahendiks. Üldplaneeringutega modelleerimisi pole CA-Markoviga veel tehtud, kuid selle potentsiaal on suur ja vajab uurimist. Mudeli detailsuse suurendamiseks on tulevikus võimalik lisada mitmeid sotsiaalmajanduslikke tegureid. Järgnevatel uuringutel on võimalik kaasata AHP analüüsil ekspertide hinnanguid, mis muudaks mudeli veelgi täpsemaks.

## **Modeling urban land use of Tallinn by using cellular automata and general plans**

Kermo Kaio

### **Summary**

Modeling is the best way to analyse urban sprawl and growth. It is necessary to prevent urban sprawl due to its negative effects on inhabitants and the environment. Model predictions provide useful information to policymakers and urban planners about potential future land use conditions. This helps to make rational urban planning decisions and ensure sustainable urban development to prevent urban sprawl. The aim of this thesis is to model the land use changes in Tallinn and make a prediction for the year 2050. Modeling was carried out using functional zoning data from general plan of Tallinn, Copernicus Urban Atlas 2006, 2012 and 2018 land cover data and IDRISI CA-Markov modeling tool. Analytic Hierarchy Process (AHP) was used for creating the suitability maps, in order to increase the accuracy of the model.

CA-Markov requires suitability maps which were created using IDRISI extension *MCE Decision Wizard*. Suitability maps were created for urban fabric and industrial/commercial and public land categories. Urban fabric was divided into two categories – more than 30% density and under 30% density. AHP weights were calculated using previous studies and Cramer's V coefficient.

Land use change analysis for 2006-2018 showed that industrial/commercial and public land increased the most. Results indicated that agricultural land and grassland were the most suitable for transitioning to urban areas. Forests have also quite significantly transitioned to urban area. Construction sites and isolated structures transitioned mostly to urban fabric. Urban growth can be mostly seen along roads, coast, near pre-existing urban area and close to Tallinn's administrative boundary.

Before 2050 prediction, calibration was made using 2006 and 2012 land use data to make a prediction for year 2018. Calibrated model was validated with the 2018 reference map using IDRISI tool *Validate* which measures the accuracy of the model with Kappa coefficient. 2018 prediction with AHP weighted suitability maps were 0.92% more accurate than suitability maps with no AHP.

Prediction was made for the year 2050 using AHP and 2006 and 2018 land use maps. For one of the predictions, functional zoning data from general plan was used. Functional zoning data was

used as a factor for urban fabric and industrial/commercial and public land suitability maps, and it was given the highest AHP weight. Prediction results showed the continuation of urban expansion near pre-existing urban areas and roads. Even though agricultural and grassland still transitioned the most to urban areas, the prediction showed an increase in forest loss for urban areas. Urban area is predicted to grow 9969 ha by year 2050. Prediction with functional zoning data showed similar land use changes and patterns, however, urban area expanded less than in the prediction without functional zoning data. Functional zoning data allowed to model changes inside the city, which also prevents the overestimation of urban growth. Previous studies have found that CA-Markov can only be used to analyse simple urban expansion processes like urban growth and sprawl. However, functional zoning data offers a possibility to model changes inside the city and to predict the densification of cities, making the CA-Markov model more complex for modeling urban land use changes.

AHP and functional zoning data increased the accuracy of the model and were found to be useful tools to model urban land use changes and to make accurate predictions for the future. However, this model can be improved even further by implementing socio-economical factors and by calculating AHP weights with the help of various experts. Functional zoning data offers many possibilities for urban land use change modelling, especially for predicting urban densification. This thesis provides useful information about urban growth and areas most likely to transition into urban area in the future. Urban planners and policymakers can use this information to ensure sustainable urban development in Tallinn.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma juhendajat Evelyn Uuemaad magistritöö idee ja mitmekülgse abi eest.

Ühtlasi soovin tänada oma peret motiveerimise eest.

## **Kasutatud kirjandus**

1. Aburas, M., Ho, Y., Ramli, M., Ashaari, Z. (2015). A Review of Land Suitability Analysis for Urban Growth by using the GIS-Based Analytic Hierarchy Process. *Asian Journal of Applied Sciences*, 3 (6).
2. Achmad, A., Irwansyah, M., Ramli, I. (2018). Prediction of future urban growth using CA-Markov for urban sustainability planning of Banda Aceh, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126.
3. Akinci, H., Özalp, A., Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97.
4. Alexander, K.W., Benjamin, M., Grephas, O. P. (2012). Urban landuse suitability assessment using geoinformation techniques for Kisumu municipality in Kenya. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 13
5. Allen, J. ja Lu, K. (2003). Modeling and Prediction of Future Urban Growth in the Charleston Region of South Carolina: A GIS-Based Integrated Approach. *Conservation Ecology*, 8 (2).
6. Araya, Y. ja Cabral, P. (2010). Analysis and Modeling of Urban Land Cover Change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. *Remote Sensing*, 2.
7. Arsanjani, J. J., Helbich, M., Kainz, W., Bolorani, A. D. (2013). Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265–275.
8. Bagheri, M., Sulaiman, W. N. A., Vaghefi, N. (2013). Application of geographic information system technique and analytical hierarchy process model for land-use suitability analysis on coastal area. *Journal of Coastal Conservation*, 17(1), 1-10.
9. Bert, F., Podesta, G., Rovere, S., Menéndez, A., North, M., Tatara, E., Laciana, C., Weber, E., Toranzo, F. (2011). An agent based model to simulate structural and land use changes in agricultural systems of the argentine pampas. *Ecological Modelling*, 222, 3486-3499.

10. Bonabeau, E. (2002). Agent-Based Modeling: Methods And Techniques for Simulating Human Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 (3), 7280-7287.
11. Bockerhoff, M. P. (2000). An urbanizing world. Achieving urban food and nutrition security in the developing world. *Population Bulletin*, 55 (3), 3-4.
12. Castella, J. ja Verburg, P. (2007). Combination of Process-Oriented and Pattern-Oriented Models of Land-Use Change in a Mountain Area of Vietnam. *Ecological Modelling*, 202, 410-420.
13. Coffey, R. (2013). *The difference between "land use" and "land cover"*. Kasutatud 20.12.2020, [https://www.canr.msu.edu/news/gilthe\\_difference\\_between\\_land\\_use\\_and\\_land\\_cover](https://www.canr.msu.edu/news/gilthe_difference_between_land_use_and_land_cover).
14. Dalla-Nora, E., Aguiar, A. P., Lapola, D., Woltjer, G. (2014). Why have land use change models for the Amazon failed to capture the amount of deforestation over the last decade?. *Land Use Policy*, 39, 403–411.
15. Dang, A. N. ja Kawasaki, A. (2016). A Review of methodological integration in land-use change models. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 7, 1-25.
16. Ding, W. J, Wang, R. Q., Wu, D. Q., Liu, J. (2013). Cellular automata model as an intuitive approach to simulate complex land-use changes: an evaluation of two multi-state land-use models in the Yellow River Delta. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27, 899–907.
17. Eastman, J.R. (2006). *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*. Worcester, Clark Labs.
18. Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva Tutorial*. Manual Version 17
19. Eesti Statistikaamet. (2018). *RV0291U: RAHVAARV, PINDALA JA ASUSTUSTIHEDUS, 1. JAANUAR. HALDUSJAOTUS SEISUGA 01.01.2018*. Kasutatud 28.03.2022, [https://andmed.stat.ee/et/stat/rahvastik\\_rahvastikunaitajad-ja-koosseis\\_rahvaarv-ja-rahvastiku-koosseis/RV0291U](https://andmed.stat.ee/et/stat/rahvastik_rahvastikunaitajad-ja-koosseis_rahvaarv-ja-rahvastiku-koosseis/RV0291U)

20. Farmer, J. D. ja Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460, 685–686.
21. Fathizad, H., Hakimzadeh, M., Sodaiezadeh, H., Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2019). Modeling Land Use Change Process Using Integrating the MLP Neural Network Model in Central Desert Regions of Iran.
22. Fitawok, M., Derudder, B., Sewnet, A., M., Passel, S., Adgo, E., Nyssen, J. (2020). Modeling the Impact of Urbanization on Land-Use Change in Bahir Dar City, Ethiopia: An Integrated Cellular Automata–Markov Chain Approach. *Land*, 9, 115.
23. Freire, S., Santos, T., Tenedório, J. (2009). Recent urbanization and land use/land cover change in Portugal – the influence of coastline and coastal urban centers. *Journal of Coastal Research*.
24. Gauk, M. ja Roose, A. (2013). Miks linnad valguvad laiali - eeslinnastumisprotsessidest Eestis. A. Roose (toim), *Peatükke planeerimisest: protsesse, meetodeid ja näiteid* (lk 170–191). Tartu: Tartu Ülikool.
25. Hosseinali, F., Alesheikh, A., Nourian, F. (2012). Agent-based Modeling of Urban Land-use Development, Case study: Simulating Future Scenarios of Qazvin City. *Cities*, 31.
26. Huigen, M. (2003). *Agent Based Modeling in Land-Use and Land-Cover Change Studies*. IIASA Interim Report. IIASA, Laxenburg, Austria.
27. Javadian, M., Shamskooski, H., Momeni, M. (2011). Application of sustainable urban development in environmental suitability analysis of educational land use by using AHP and GIS in Tehran. *Procedia Engineering*, 21, 72- 80.
28. Kirsimäe, P. (2015). *Eesti maakonnakeskuste kasvamise suunad ja põhjused ajalooliste kaartide põhjal*. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
29. Kirsimäe, P. (2017). *Eesti nelja suurima linna maakasutusmuutuste analüüs ja modelleerimine aastaks 2030*. Magistritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
30. Kumar, S., Radhakrishnan, N., Mathew, S. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics*, 5.

31. Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609.
32. Lagarias, A. (2012). Urban sprawl simulation linking macro-scale processes to micro-dynamics through cellular automata, an application in Thessaloniki, Greece. *Applied Geography*, 34, 146–160.
33. Lambin, E. F., ja Geist, H. (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
34. Land Copernicus. (i.a). *Urban Atlas*. Kasutatud 10.02.2020, <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>.
35. Lantman, J., Verburg, P. H., Bregt, A., Geertman, S. (2011). Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review. E. Koomen ja J. Borsboom-van Beurden (toim), *Land-Use Modelling in Planning Practice* (lk 35-57). Springer, London.
36. Leetmaa, K. (2004). Eeslinnastumine Tallinna linnaregioonis sotsialismijärgsel perioodil.
37. Leetmaa, K. ja Tammaru, T. (2007). Suburbanization in countries in transition: destinations of suburbanizers in the tallinn metropolitan area. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 89 (2), 127-146.
38. Liu, Y., Batty, M., Wang, S., Corcoran, J. (2019). Modelling urban change with cellular automata: Contemporary issues and future research directions. *Progress in Human Geography*.
39. Lo, C. P. ja Choi, J. (2004). A hybrid approach to urban land use/cover mapping using Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) images. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2687-2700.
40. Louca, M., Vogiatzakis, I., Moustakas, A. (2015). Modelling the combined effects of land use and climatic changes: Coupling bioclimatic modelling with Markov-chain Cellular Automata in a case study in Cyprus. *Ecological Informatics*, 30.

41. Mas, J., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T., Houet, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, 94 - 111.
42. Matthews, R., Gilbert, N., Roach, A., Polhill, J., Gotts, N. (2007). Agent-Based Land-Use Models: A Review of Applications. *The Centre for Research in Social Simulation*, 22.
43. Moghadam, S. H. ja Helbich, M. (2013). Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140–149.
44. Mohammad, M., Sahebgharani, A., Malekipour, E. (2013). Urban Growth Simulation Through Cellular Automata (CA), Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS; Case Study of 8th and 12th Municipal Districts of Isfahan. *Geographia Technica*, 18(2), 57-70.
45. Morales, F. ja De Vries, W. T. (2021). Establishment of Land Use Suitability Mapping Criteria Using Analytic Hierarchy Process (AHP) with Practitioners and Beneficiaries. *Land* 10(3), 235.
46. Moreno, N., Wang, F., Marceau, D. (2009). Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 44-54.
47. Murray-Rust, D., Rieser, V., Robinson, D., Milicic, V., Rounsevell, M. (2013). Agent-based modelling of land use dynamics and residential quality of life for future scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 46, 75–89.
48. National Research Council. (2013). *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. The National Academies Press, Washington, DC, USA
49. Noszczyk, T. (2019). A review of approaches to land use changes modeling. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(6), 1377-1405.
50. Olmedo, M. T. C., Pontius, R., Paegelow, M., Mas, J. (2015). Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environmental Modelling & Software*, 69.

51. OÜ Kootplaan. (2006). *Mustamäe linnaosa üldplaneering*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Mustamae-linnaosa-uldplaneering-Kehtestatud>
52. OÜ Alkranel. (2010). *Nõmme linnaosa üldplaneeringu keskkonnamõju strateegilise hindamise aruanne*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/keskkond/Nomme-linnaosa-uldplaneeringu-keskkonnamoju-strateegiline-hindamine>
53. Ozturk, D. (2015). Urban Growth Simulation of Atakum (Samsun, Turkey) Using Cellular Automata-Markov Chain and Multi-Layer Perceptron-Markov Chain Models. *Remote Sensing*, 7(5).
54. Palang, H.(1998). *Landscape changes in Estonia: the past and the future*. Doktoritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
55. Parker, T., Berger, S., Manson, W., Mcconnell, d'Aquino, P., August, P., Balmann, A., Berger, T., Bousquet, F., Brondízio, E., Brown, D., Couclelis, H., Deadman, P., Goodchild, M.,
56. Gotts, N., Gumerman, G., Hoffmann, M., Huigen, M., Irwin, E., Warren, K. (2001). Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change.
57. Peng, Y., Yang, F., Zhu, L., Li, R., Wu, C., Chen, D. (2021). Comparative Analysis of the Factors Influencing Land Use Change for Emerging Industry and Traditional Industry: A Case Study of Shenzhen City, China. *Land*, 10(6), 575.
58. Perez, L. ja Dragicevic, S. (2012). Landscape-level simulation of forest insect disturbance: coupling swarm intelligent agents with GIS-based cellular automata model. *Ecological Modelling*, 231, 53–64.
59. Peterson, U. ja Aunap, R. (1998). Changes in agricultural land use in Estonia in the 1990s detected with multitemporal Landsat MSS imagery. *Landscape and Urban Planning*, 41, 193–201.
60. Pontius, R. ja Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19, 243-265.
61. Pontius, R. (2006). GEOMOD Modeling.

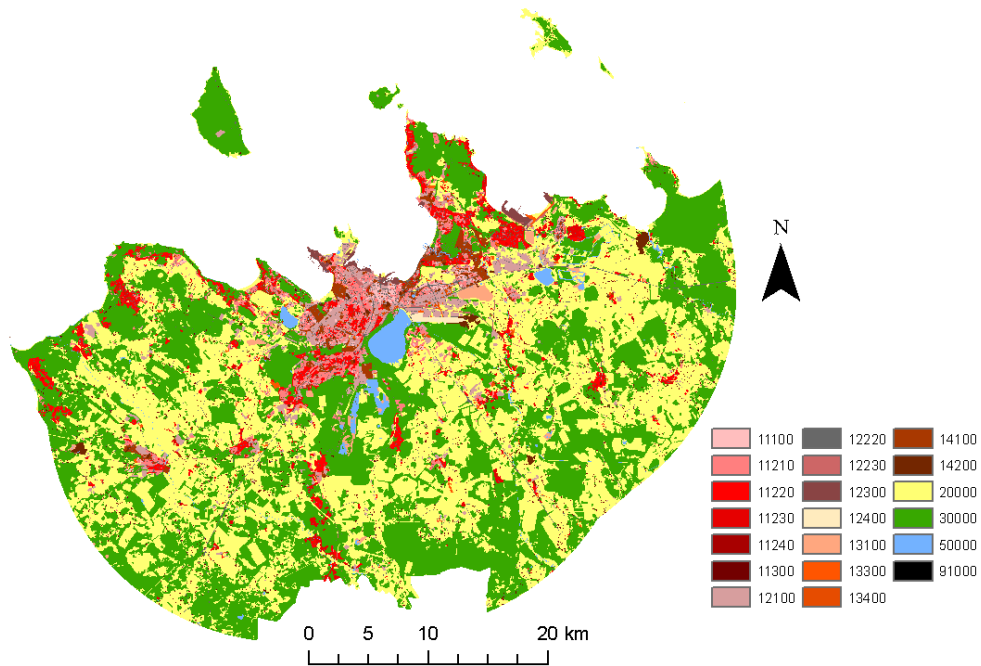
62. Poska, A., Sepp, E., Veski, S., Koppel, K. (2007). Using quantitative pollen-based landcover estimations and a spatial CA\_Markov model to reconstruct the development of cultural landscape at Rõuge, South Estonia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 17, 527–541.
63. Rawat, J. S. ja Kumar, M. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 1.
64. Roose, A., Kull, A., Gauk, M., Tali, T. (2013). Land use policy shocks in the post-communist urban fringe: A case study of Estonia. *Land Use Policy*, 30, 76-83.
66. Saha, A., Roy, R. (2021). An integrated approach to identify suitable areas for built-up development using GIS-based multi-criteria analysis and AHP in Siliguri planning area, India. *SN Appl. Sci.* 3, 395.
67. Samariüitel, A., Selvig, S. S., Holt-Jensen, A. (2010). Urban sprawl and suburban development around Pärnu and Tallinn, Estonia. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 64, 152–161.
68. Schweitzer, C., Priess, J., Das, S. (2011). SITE- a generic land-use modelling framework. *Environmental Modelling and Software*, 26, 1052-1055.
69. Singh, S., Srivastava, P., Szabo, S., Islam, T., Mustak, S. (2015). Predicting Spatial and Decadal LULC Changes Through Cellular Automata Markov Chain Models Using Earth Observation Datasets and Geo-information. *Environmental Processes*, 2(1).
70. Sisas, E. (2008). *Maakasutuse muutused Eestis aastatel 1900–2000 ja prognoos aastaks 2050*. Magistritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
71. Subiyanto, S. ja Suprayogi, A. (2019). Modeling And Spatial Analysis Of Change Settlement And Fair Market Land Price Using Markov Chain Model In Banyumanik District. *KnE Engineering*.
72. Tajbakhsh, M., Memarian, H., Shahrokhi, Y. (2016). Analyzing and modeling urban sprawl and land use changes in a developing city using a CA-Markovian approach. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2, 397-410.

73. Tallinna linna ametlik koduleht. (2019). *Linnaosad*. Kasutatud 21.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/Linnaosad>.
74. Tallinna linna ametlik koduleht. (i.a). Tallinna elanike arv. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/Tallinna-elanike-arv>.
75. Tallinna Linnaplaneerimise Amet. (2001). *Tallinna üldplaneering*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Tallinna-uldplaneering>.
76. Tallinna Linnaplaneerimise Amet. (2009). *Pirita linnaosa üldplaneering*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Pirita-linnaosa-uldplaneering-Kehtestatud>.
77. Tallinna linnaplaneerimise amet. (2010a). *Lasnamäe elamualade üldplaneering*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Lasnamae-elamualade-uldplaneering>.
78. Tallinna linnaplaneerimise amet. (2010b). *Nõmme linnaosa üldplaneering*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Nomme-linnaosa-uldplaneering>.
79. Tallinna linnaplaneerimise amet. (2013a). *Kristiine linnaosa üldplaneering*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Kristiine-linnaosa-uldplaneering>.
80. Tallinna Linnaplaneerimise Amet. (2015). *Lasnamäe tööstusalade üldplaneering*. Kasutatud 28.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Lasnamae-toostusalade-uldplaneering>.
81. Tallinna Linnaplaneerimise Amet. (2017). *Haabersti linnaosa üldplaneeringu seletuskiri*. Kasutatud 26.03.2022, <https://www.tallinn.ee/est/ruumiloome/Haabersti-linnaosa-uldplaneering>.
82. Tallinna Linnavolikogu otsus number 34 (21.02.2019). *Kesklinna linnaosa üldplaneeringu ja keskkonnamõju strateegilise hindamise algatamine*. Kasutatud 28.03.2022, [https://oigusaktid.tallinn.ee/?id=3001&aktid=140569&fd=1&leht=1&q\\_sort=elex\\_akt.akt\\_vkp](https://oigusaktid.tallinn.ee/?id=3001&aktid=140569&fd=1&leht=1&q_sort=elex_akt.akt_vkp).
83. Tammaru, T., Leetmaa, K., Silm, S., Ahas, R. (2009). Temporal and Spatial Dynamics of the New Residential Areas around Tallinn. *European Planning Studies*, 17, 423-439.
84. Tang, J. ja Di, L. (2019). Past and Future Trajectories of Farmland Loss Due to Rapid Urbanization Using Landsat Imagery and the Markov-CA Model: A Case Study of Delhi, India. *Remote Sensing*, 11, 180.

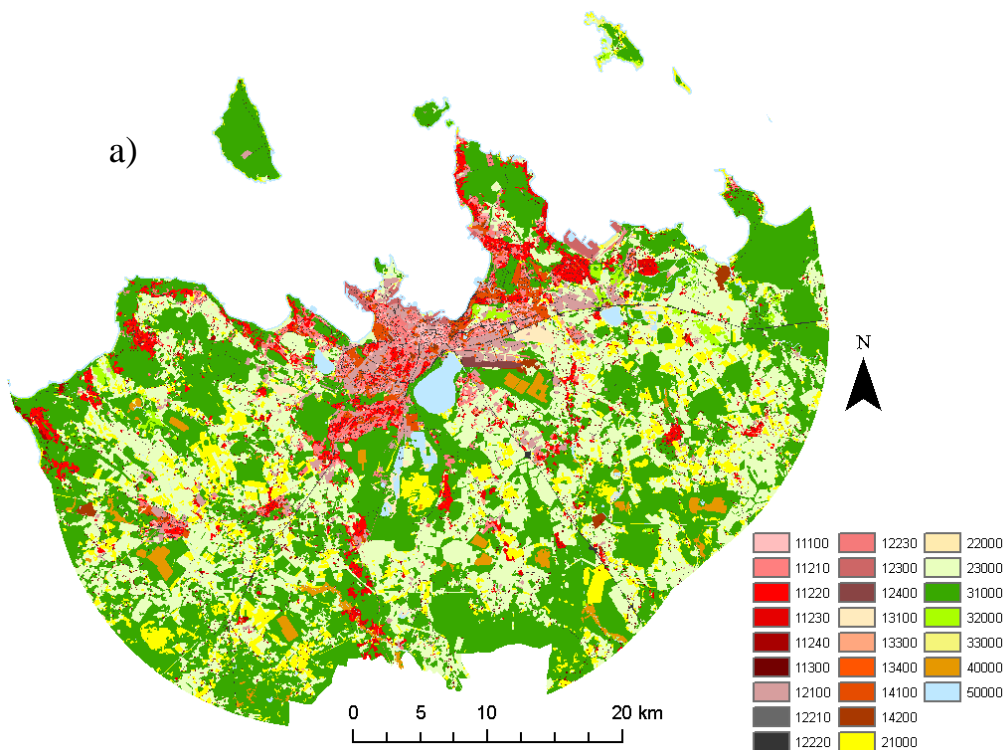
85. Thapa, R. ja Murayama, Y. (2011). Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, 25-34.
86. Tian, G. ja Wu, J. (2015). Comparing urbanization patterns in Guangzhou of China and Phoenix of the USA: The influences of roads and rivers. *Ecological Indicators*. 52, 23– 30.
87. Ullah, K. ja Mansourian, A. (2014). Evaluation of Land Suitability for Urban Land-Use Planning: Case Study Dhaka City. *Transactions in GIS*, 20.
88. United Nations Sustainable Development Goals. (i.a). *Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable*. Kasutatud 20.01.2021, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>.
89. Valbuena, D., Bregt, A., Mcalpine, C., Verburg, P., Seabrook, L. (2010a). An agent-based approach to explore the effect of voluntary mechanisms on land use change: A case in rural Queensland, Australia. *Journal of environmental management*, 91, 2615-2625.
90. Valbuena, D., Verburg, P., Bregt, A., Ligtenberg, A. (2010b). An agent-based approach to model land-use change at a regional scale. *Landscape Ecology*, 25, 185–199.
91. Van Paassen, A., Roetter, R. P., Van Keulen, H., Hoanh, C. T. (2007). Can computer models stimulate learning about sustainable land use? Experience with LUPAS in the humid (sub)tropics of Asia. *Agric Syst* 94, 874–887.
92. Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst M. J., Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61, 309–324.
93. Zhou, R., Zhang, H., Ye, X., Wang, X. J., Su, H. L. (2016). The Delimitation of Urban Growth Boundaries Using the CLUE-S Land-Use Change Model: Study on Xinzhuang Town, Changshu City, China. *Sustainability*, 8, 1182.

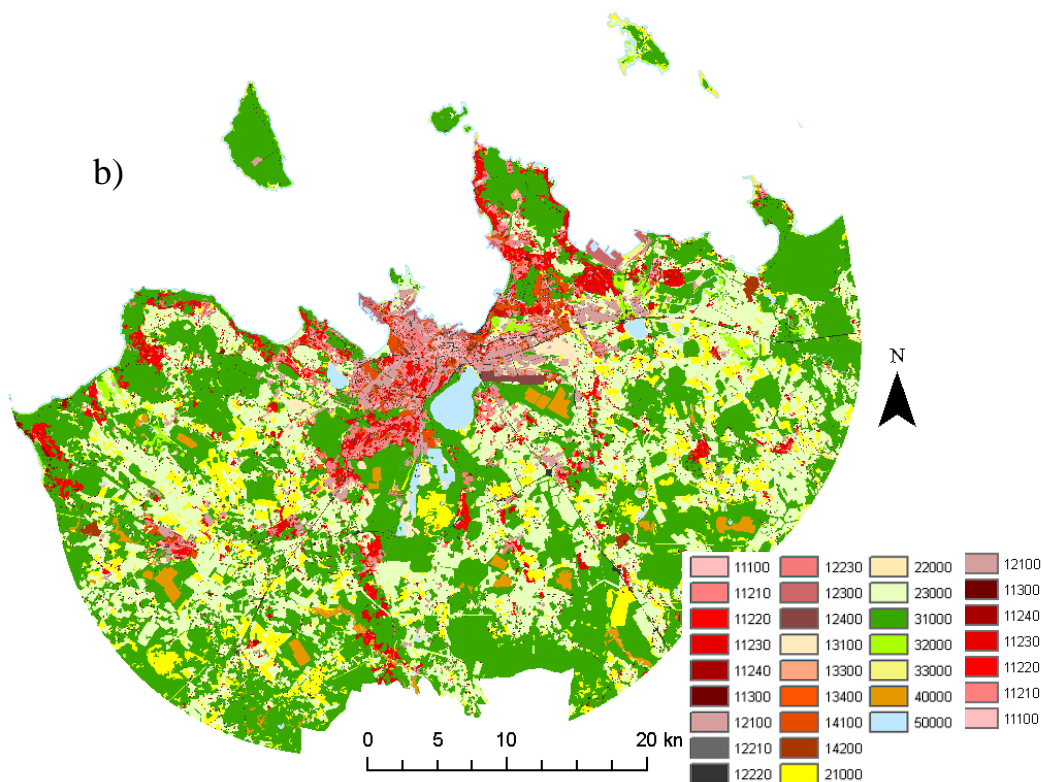
## Lisad

**Lisa 1.** Tallinna linna ja tagamaa 2006 aasta Urban Atlase andmed (Land Copernicus, i.a).



**Lisa 2.** Tallinna linna ja tagamaa 2012 (a) ja 2018 (b) aasta Urban Atlase andmed (Land Copernicus, i.a).



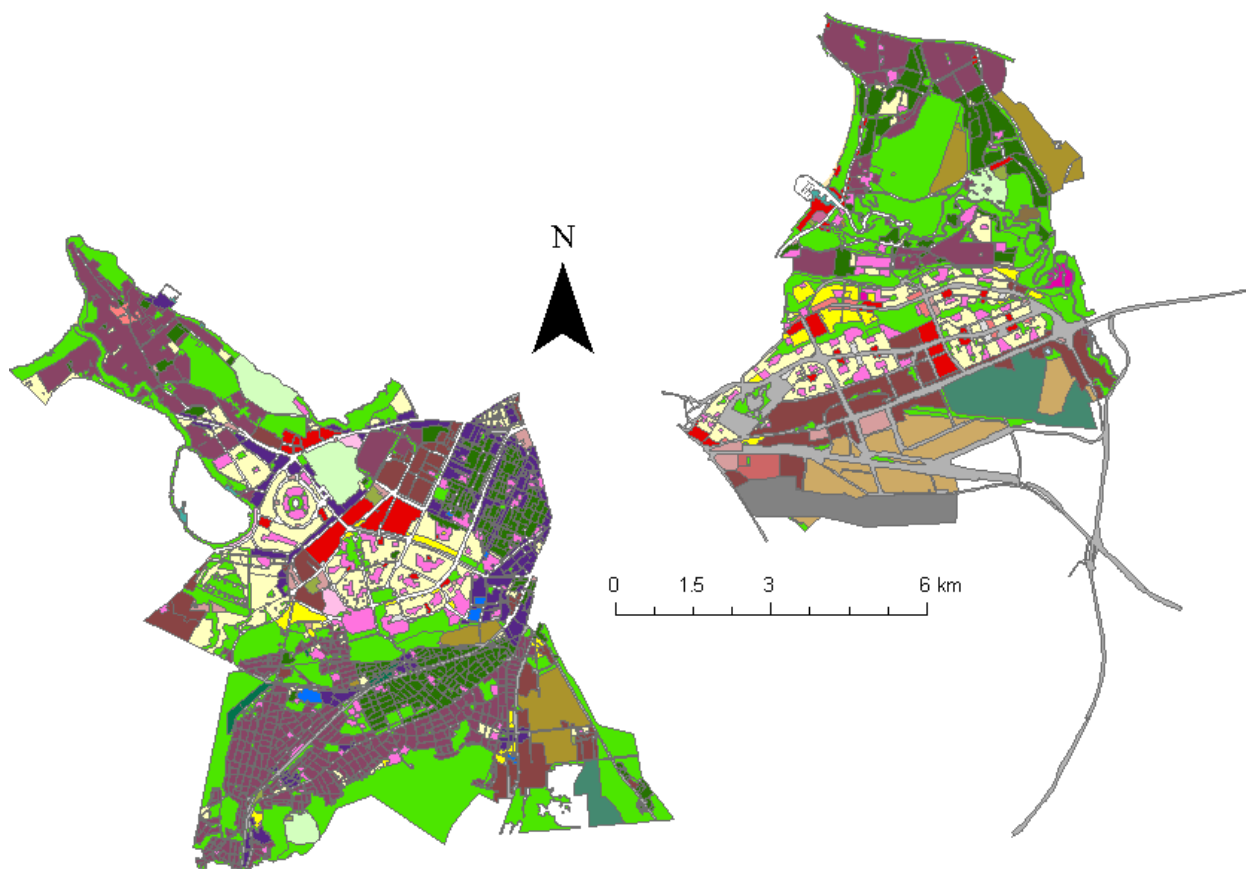


**Lisa 3.** *Urban Atlas*-e ümberklassifitseerimine

Urban Atlase klass	Urban Atlase kood	Uus klass
Tiheasustusega asula, kus üle 80% alast on tehislik	11100	Keskmise ja kõrge asustusega ala (>30%)
Tiheasustusega asula, kus 50-80% alast on tehislik	11210	Keskmise ja kõrge asustusega ala (>30%)
Keskmise tihedusega asula, kus 30-50% alast on tehislik	11220	Keskmise ja kõrge asustusega ala (>30%)
Madala tihedusega asula, kus 10-30% alast on tehislik	11230	Hõreda asustusega ala (<30%)
Väga madala tihedusega asula, kus alla 10% on tehislik	11240	Hõreda asustusega ala (<30%)
Eraldatud ehitised	11300	Muu tehisala
Tööstus, ettevõtlus, avalik, militaar ja privaatne ala	12100	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa
Maanteed ja sellega seostunud alad	12210	Transport
Teised teed ja sellega seostunud alad	12220	Transport
Raudteed ja sellega seostunud alad	12230	Transport
Sadamad	12300	Transport
Lennujaamad	12400	Transport
Kaevandused ja prügilad	13100	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa
Ehitusplatsid	13300	Muu tehisala

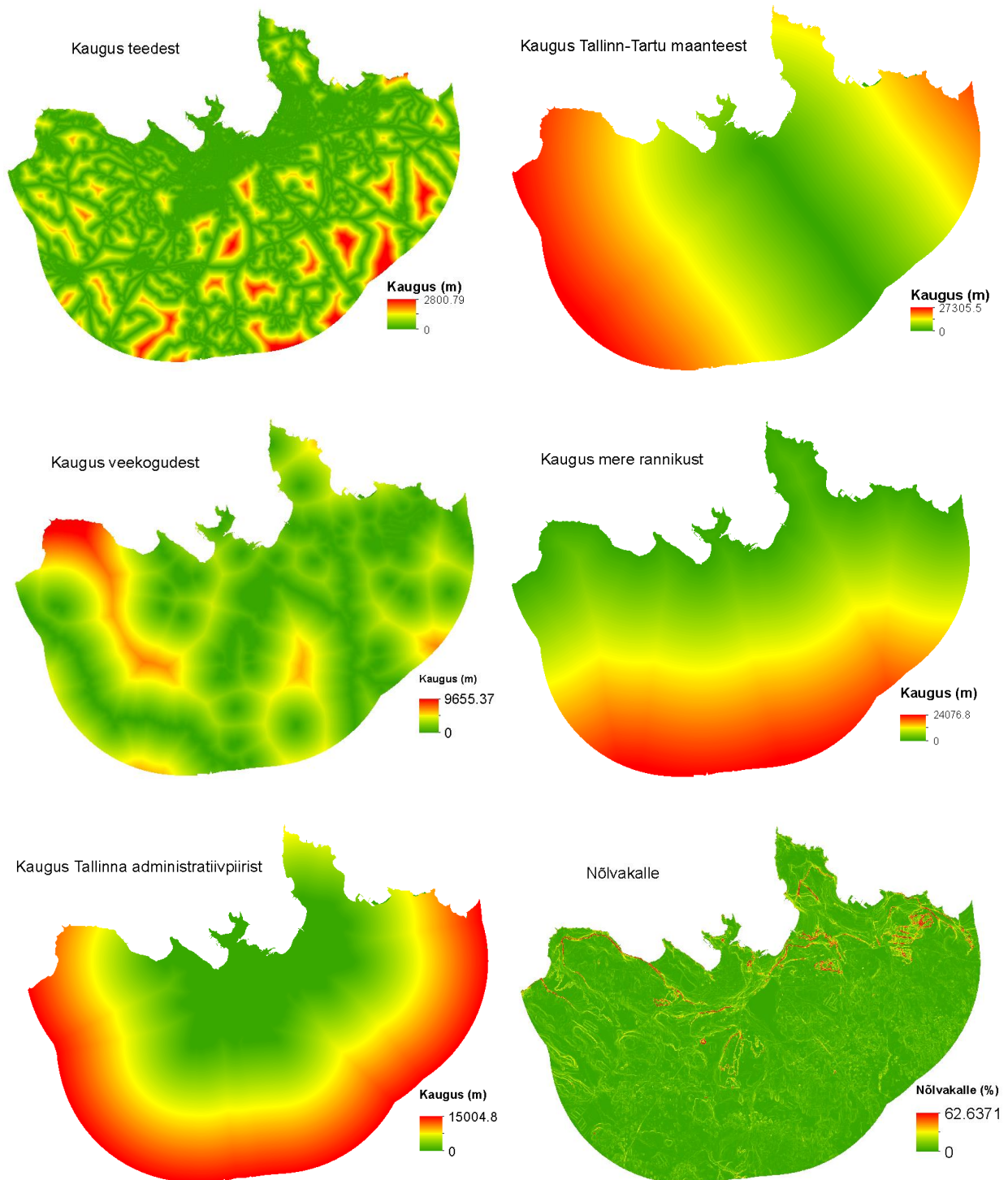
Maa, millel ei ole kasutust (läheb ehitusplatside alla)	13400	Muu tehisala
Asula rohealad	14100	Asula rohealad
Spordi- ja meelelahutusehitised	14200	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa
Põllumaa	21000	Põllu- ja rohumaa
Alatiseid põllukultuurid (istandused, viljapuud)	22000	Põllu- ja rohumaa
Karjamaa	23000	Põllu- ja rohumaa
Metsad	31000	Mets
Rohumaa	32000	Põllu- ja rohumaa
Avatud alad, kus on vähe või puudub taimkate (rannad, luided, liustikud, kivid jne)	33000	Muu ala
Märgalad	40000	Märgalad
Veekogud	50000	Veekogud

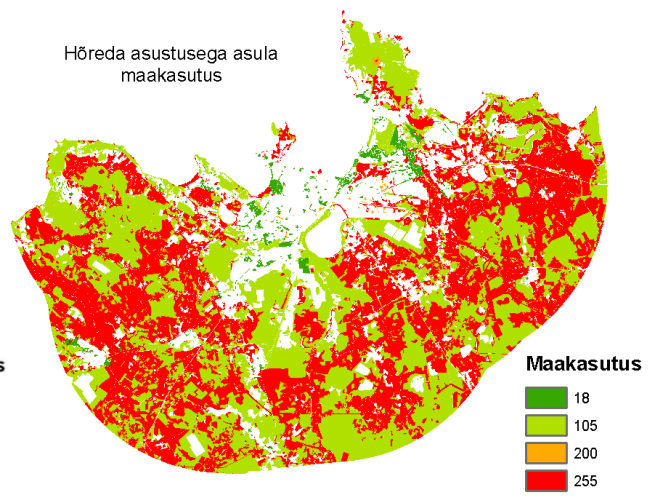
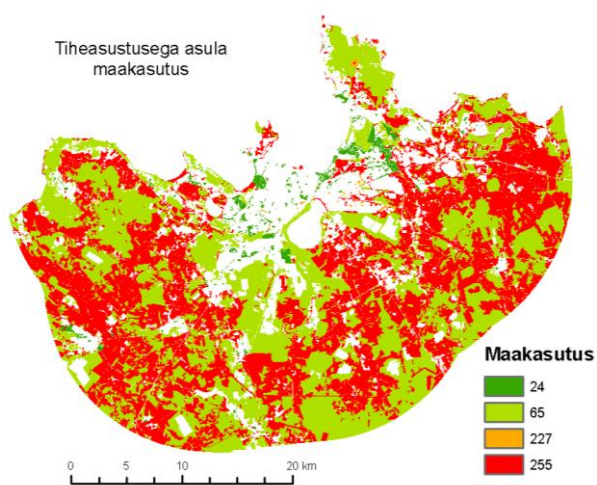
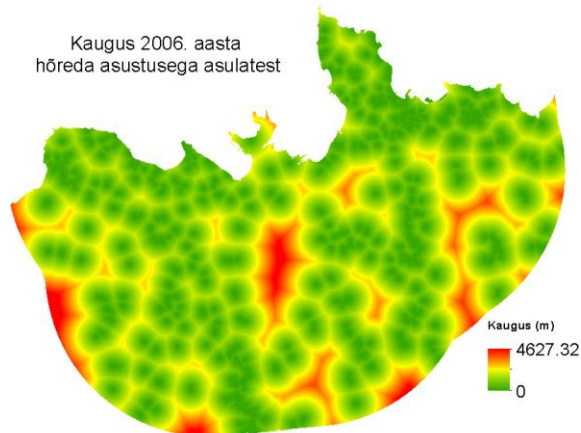
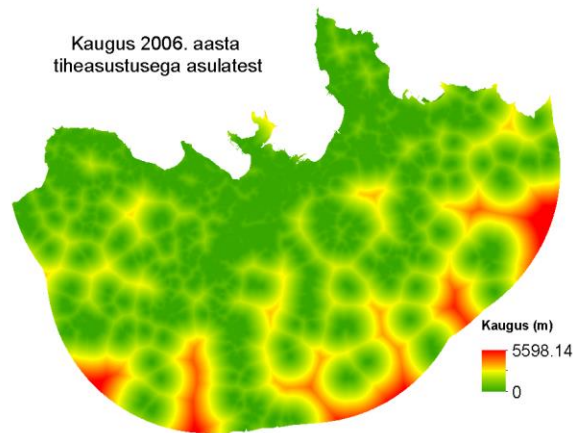
**Lisa 4.** Haabersti, Kristiine, Lasnamäe, Mustamäe, Pirit ja Nõmme linnaosade üldplaneeringute maakasutusandmed.



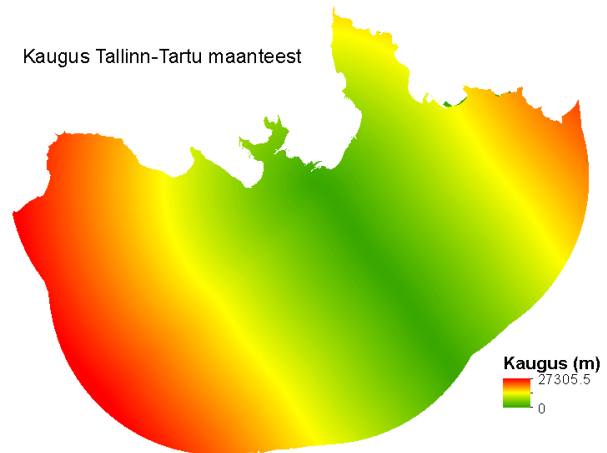
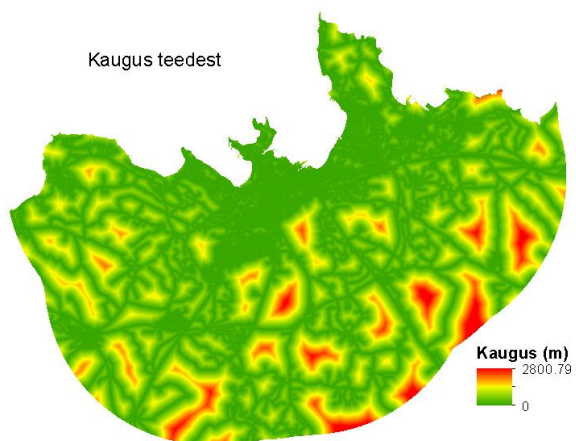


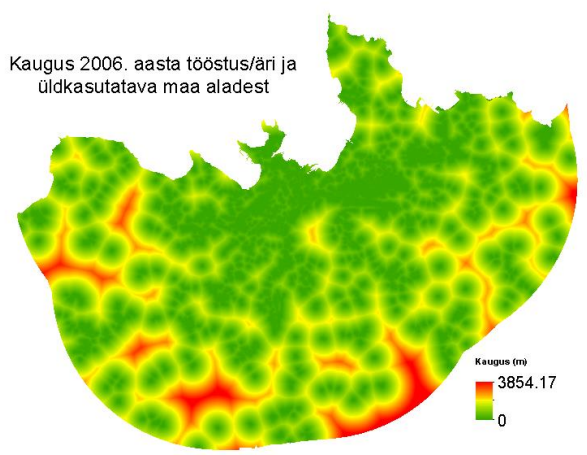
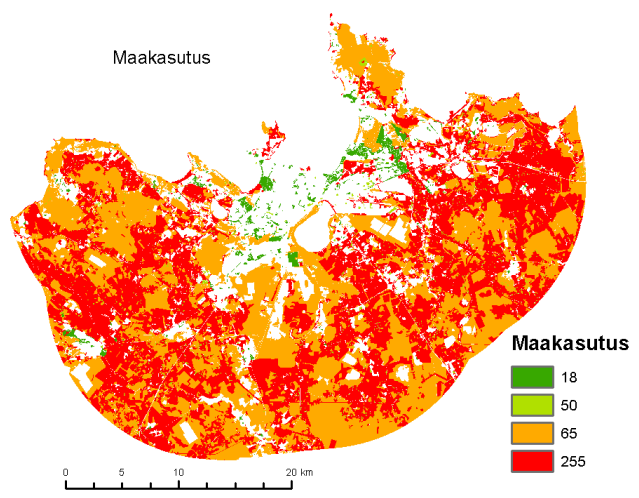
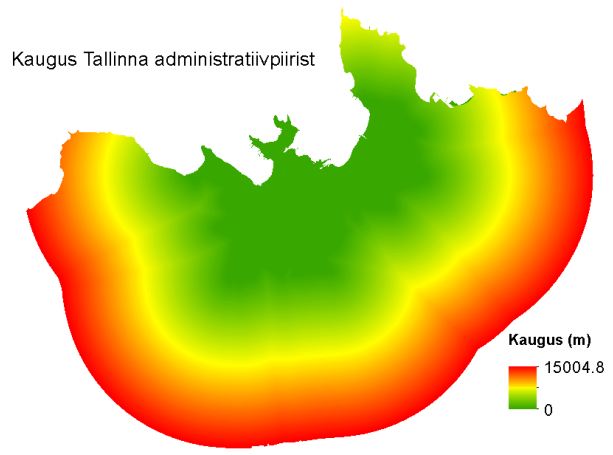
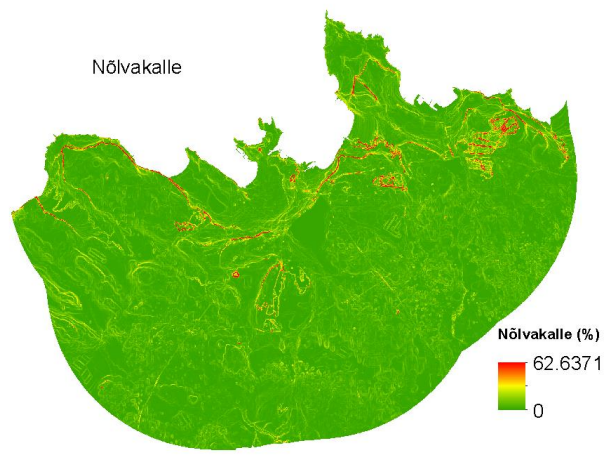
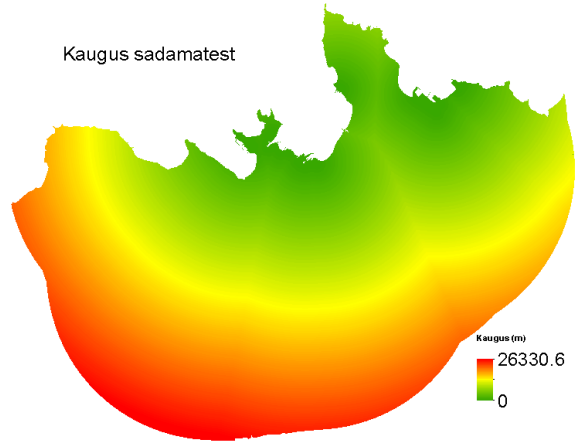
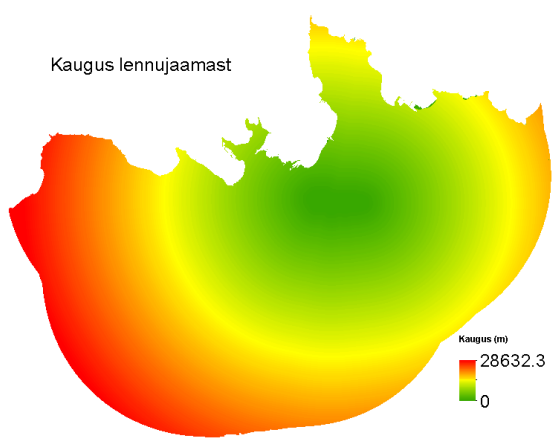
**Lisa 6.** Tallinna ja selle tagamaa tiheda ja hõreda asustusega asulaklasside tegurite kaardid.





Lisa 7. Tallinna ja selle tagamaa tööstus/äri ja üldkasutatava maa klassi tegurite kaardid.





## Lisa 8. Üldplaneeringu andmete ümberklassifitseering

Üldplaneeringu klass	Uus klass	Maakasutuse väärtus
Avalikult kasutatavate- ja sotsiaalobjektide ala ning ettevõtlusala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Avalikult kasutatavate- ja sotsiaalobjektide ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Avalikult kasutatavate- ja sotsiaalobjektide ning korterelamute ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	130
Eriotstarbeline roheala	Asula rohealad	255
Ettevõtlus- ja korterelamute ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	130
Ettevõtlus- ja tootmis ning korterelamute ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	130
Ettevõtlus- ja tootmisala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Ettevõtlusala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Garaazide ja parklate maa	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Kalmistute maa-ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Keskuse ala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Konfliktala, reservala	Kuna alale pole määratud juhtotstarvet, siis antud alale jääb kehtima Urban Atlase andmed.	
Korterelamute- ja ettevõtlusala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	130
Korterelamute ala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Korterelamute ning avalikult kasutatavate- ja sotsiaalobjektide ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa ja tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	130
Lennuvälja ala	Transport	255
Mäetööstusala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Magistraaltänavaa äärne ärivöönd	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Pereelamute ala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Pereelamute ja korterelamute ala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Riigikaitseliste ehitiste maa	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Roheala	Asula rohealad	255
Sadama ala	Transport	255
Segahoonestusala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30% ja tööstus/äri ja üldkasutatav maa	130
Supelranna ala	Muu ala	255
Tehnoehitiste ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Tootmis- ja ettevõtlusala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Tootmisala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Väikeelamute ala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255

Väikeelamute ja ettevõtlusala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30% ja tööstus/äri ja üldkasutatav maa	130
Veeala	Veekogud	255
Eriotstarbeline ala (tehnohitised)	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Ettevõtluse segahoonestusala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Kesklinna segahoonestusala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Korruselamute ala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Metsad, pargid ja looduslikud haljasalad	Asula rohealad	255
Piirkonna või linnaosa keskuse segahoonestusala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Tööstusettevõtete ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Ühiskondlike ja puhkehitiste ala	Tööstus/äri ja üldkasutatav maa	255
Vanalinn	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Elamu- ja ärihoone maa	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30% ja tööstus/äri ja üldkasutatav maa	130
Elamu- ja haljasala maa	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30% ja asula rohealad	130
Elamumaa	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30%	255
Ettevõtluse segahoonestusala	Tiheasustusega asula, kus asustus on suurem kui 30% ja tööstus/äri ja üldkasutatav maa	130

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kermo Kaio.

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Tallinna maakasutuse modelleerimine rakk-automaadi ja üldplaneeringute info abil“,

mille juhendaja on Evelyn Uuema,

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Kermo Kaio*

**30.05.2022**