

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

**Tartu linna kolmemõõtmelise (3D) mudeli rakendamine
Esri CityEngine tarkvara abil Ränilinna üldplaneeringu näitel**

Viktor Kiik

Juhendajad: *PhD* Raivo Aunap

MSc Eveli Sisas

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2013

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1. KOLMEMÕÕTMELISTE LINNAMODELITE OLEMUS JA TÄHTSUS	5
1.1 3D-linnamudelite võimalikud klassifitseerimise lahendused	7
1.2 CityGML-i detailsuse klassifikatsioon	10
1.3 Levinumad kasutusviisid.....	11
1.4 3D-linnamudelite kasutamisega kaasnevad analüüsivõimalused	12
1.4.1 3D-lähedusanalüüs.....	13
1.4.2 3D-levikuanalüüs	13
1.4.3 3D-nähtavus- ja -varjuanalüüs	13
1.4.4 3D-jaotusanalüüs	14
1.5 3D-linnamudelid Eestis ja naaberriikides	14
1.5.1 Tartu linna avalik 3D-mudel	18
2. 3D-LINNAMODELITE ROLL PLANEERIMISPROTSESSIS.....	20
2.1 Planeeringudokumentide visualiseerimine	21
2.2 Ränilinna linnaosa üldplaneering.....	22
3. ESRI CITYENGINE	25
3.1 Tarkvara ülevaade	25
3.2 Protseduuriline modelleerimine	27
3.3 CityEngine Web Viewer	28
3.4 Esri CityEngine võimalused ja piirangud	29
4. ANDMED JA METOODIKA.....	32
4.1 Tartu 3D-mudeli alusandmed ja loomise protsess	32
4.2 Andmete ettevalmistus	34
4.3 Maapinna kõrgusmudeli loomine Tartu linna 3D-mudeli andmetest	35
4.4 Ränilinna uurimisala ettevalmistus	37
4.5 Andmete importimine Esri CityEngine keskkonda	39
4.5.1 Reljeefi ja aluskaartide importimine	40

4.5.2 Joon- ja punktobjektide importimine.....	40
4.5.3 Pindobjektide ja 3D-mudelite importimine	41
4.6 Imporditud staatiliste andmete visualiseerimine dunaamilises 3D-linnamudelis	41
4.6.1 3D-hoonete katuste drapeerimine ortofotodega.....	42
4.6.2 Võimalused 3D-hoonete seinte fototekstuurimiseks	44
4.6.3 Vektorkaardi joonobjektid	45
4.6.4 Vektorkaardi punktobjektid	47
4.6.5 Vektorkaardi pindobjektid.....	47
4.7 Ränilinna üldplaneeringu pind- ja joonobjektide visualiseerimine 3D-mudeli abil	48
5. TULEMUSED JA ARUTELU	53
5.1 Hinnang Tartu linna 3D-andmete kasutatavusele	53
5.1.1 3D-hooned ja -katused	54
5.1.2 Vektorkaardi punktandmed	56
5.1.3 Vektorkaardi joonobjektid.....	58
5.1.4 Vektorkaardi pindobjektid.....	61
5.2 Loodud dunaamilise 3D-linnamudeli rakendamine planeerimisprotsessis.....	62
5.3 Hinnang ajakulule	65
5.4 Kasutatud metoodika üldhinnang ja edasised võimalused.....	66
KOKKUVÕTE.....	69
SUMMARY	71
TÄNUAVALDUSED	73
KASUTATUD ALLIKAD	74
LISAD	78
Lisa 1. Ränilinna üldplaneeringu maakasutusplaan.....	78
Lisa 2. Dunaamilise Ränilinna 3D-mudeli illustratsioonid.....	79
Lisa 3. Töös kasutatud CGA-reeglifailide väljavõtted.....	81

SISSEJUHATUS

Planeeringuandmete visualiseerimisel ja nendega töötamisel on seni piirdunud valdavalt tasapinnaliste jooniste kasutamisega, mille kaudu on uueneva ruumilahenduse edasiandmine võrdlemisi keeruline ja kohati ka võimatu. Kõigi planeeringu osapoolte vaatenurgast on oluline kasutada üheselt mõistetavat visualiseeringut, mis sisaldab võimalikult realistlikult edasiantavat situatsiooni ning mille kohandamine vastavalt muutuvatele kriteeriumitele oleks suhteliselt paindlik ja vähe aeganõudev.

Üheks selliseks võimaluseks on kolmemõõtmelised (3D) linnamudelid - nende koostamise ja kasutamise temaatika on nii visualiseerimise kui planeerimise vaatenurgast kogu maailmas aina aktuaalsem. Seda kinnitavad ka Eesti tasandil valminud Tallinna ja Tartu hoonestuse kohta käivad 3D-mudelid. Kaasaegset planeerimisprotsessi võib pidada pikaks ja keeruliseks, kuid samas interdistsiplinaarseks ja interaktiivseks, mille erinevates etappides saab 3D-mudelite kasutamist lugeda nii toetavaks kui selgitavaks abinõuks.

Magistritöö uurimisobjektideks on Tartu Linnavalitsuse riigihanke „Tartu linna ja lähiala digitaalse aeropildistamise andmete ja ortofotode alusel M 1:2000 täpsusega digitaalse vektorkaardi ja hoonete 3D-mudeli koostamine ning Eesti topograafilise andmekogu (ETAK-i) väljavõtte täiendamine Tartu linna kohta 2 nähtusklassis“ tulemusena saadud reljeefi, hoonete ja nende katuste 3D-ruumikujud ning sama riigihanke käigus uuendatud vektorkaardi 2D-andmed.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on kontrollida ja anda hinnang Tartu linna 3D- ja vektorkaardi andmete kasutatavusele Ränilinna üldplaneeringu ala näitel lähtuvalt reeglipõhise modelleerimise loogikast ning välja pakkuda metoodika dünaamilise linnaruumi mudeli loomiseks.

Töö hüpoteesiks on, et olemasolevate Tartu linna 3D- ja vektorkaardi andmete põhjal on võimalik reeglipõhist modelleerimistehnikat kasutades luua dünaamiline virtuaalmudel, mida saaks planeerimisprotsessi abivahendina jooksvalt muuta ja täiendada.

Magistritöö koosneb viiest peatükist. Esimeses peatükis antakse teoreetiline ülevaade 3D-linnamudelite olemusest ja rakendamisest tänapäeval. Teises peatükis kirjeldatakse nende planeerimisalast rolli, antakse ülevaade planeeringudokumentide visualiseerimisest ning töös kasutatavast Ränilinna üldplaneeringust. Kolmas peatükk käsitleb töös kasutatavat tarkvara ja protseduurilise modelleerimise loogikat. Neljandas peatükis peatutakse lähteandmetel ning esitatakse ülevaade töös kasutatud metoodikast. Viimases, tulemuste ja arutelu peatükis, antakse hinnang Tartu linna 3D-andmete kasutatavusele tulenevalt reeglipõhise modelleerimises loogikast ning arutletakse dünaamilise 3D-linnamudeli loomise metoodika ja edasise kasutamise üle.

1. KOLMEMÕÕTMELISTE LINNAMUDELITE OLEMUS JA TÄHTSUS

Kolmemõõtmelistel (lüh 3D) linnamudelitel on tänapäeva kiiresti arenevas infoühiskonnas aina olulisem roll ning nende panus erinevates valdkondades, sh planeerimises, hoonete projekteerimisel, päästeteenistuses jpm on juba laialt tunnustatud. Suurenev rahvaarv ja valglinnastumine tingivad uute infrastruktuuride planeerimist, loomist ja haldamist sellisel moel, et see ei oleks vastuolus olemasolevate süsteemidega ning et vastuvõetavad otsused oleks kõigile seotud osapooltele võimalikult selged. Infrastruktuuride all on siin mõeldud kõike seda, mis kuulub linna kui terviksüsteemi hulka, s.o teede- ja kanalisatsioonivõrgustik, hoonestus, erinevad kommunikatsiooniahelad jpm (Fredericque & Lapierre, 2009). 3D-mudelid, mida võib lugeda reaalsuse teisenduseks geomeetrilisele ja abstraktsele kujule, on oluliseks abivahendiks eespool nimetatud linnasüsteemi osadega töötamisel ning võimaldavad teha kohalikul tasandil otsuseid kiiremini ja tõhusamalt. Lisaks erinevatele haldus- ja analüüsirakendustele võib 3D-linnamudelite üheks väljundiks olla ka 3D-turismiinfo edastamine kas Internetis või läbi spetsiaalselt selle tarbeks loodud kuvamisseadmete. Linnaplaneerimise seisukohalt saab turismirakendusi pidada juba pikemat aega üheks olulisemaks kõrvalproduktiks, mis kaasneb 3D-linnaruumi andmete kasutamisega, kui isegi mitte esmaoluliseks (Stoter & Zlatanova, 2003).

Kolmemõõtmelise linnamudeli tervik koosneb sellistest objektidest, mis kuuluvad ka reaalse linnasüsteemi koosseisu (Lancelle & Wellner, 2004). Nendeks võib lugeda:

- reljeefi ja sellest tulenevat kõrgusinfot;
- hooneid ja vaatamisväärsusi;
- taimkatet;
- teid ja muid transpordivõrgustikke;
- dünaamilisi ehk linnaruumis liikuvaid objekte.

Taolise informatsiooni kuvamiseks on tänapäeval mitmeid võimalusi, kõik oleneb sellest, mida soovitakse lõpptulemusena näha ja kasutada. Linn kui tervik on kõige tihedamini asustatud piirkond väga paljudest erinevatest aspektidest – rahvaarvult, majanduslikult, tehnoloogiliselt, info- ja infrastruktuuridelt. Kuna 3D-linnamudelite näol peab olema tegemist intuitiivse ja paljusid andmestikke korraga kuvamist võimaldava süsteemiga, on ka võimalused erinevateks analüüsideks suhteliselt head. Selle tõestuseks on ka jõudsalt suurenev taolisi ruumilisi mudeleid kasutatavate rakenduste hulk. Lisaks eespool nimetatutele leiavad need rakendamist ka erinevates asukoha-, aga turustamis- ja reklaamiteenustes (Zhu & Li & Zhang, 2011).

Seega võib öelda, et kolmemõõtmeliste linnamudelite üheks tähtsaimaks ülesandeks on otsuste tegemise protsessi toetamine ning sellest tulenevalt olla hiljem ka oluliseks abivahendiks ruumiinfo haldamisel ja sellega opereerimisel.

3D-mudeli rakendamise võimalused võib suuresti jagada kolme peamisse ja üksteisest sõltuvuses olevasse etappi (Fredericque & Lapierre, 2009):

- 3D-modelleerimine ja -kvaliteedikontroll;
- loodud andmete säilitamine, haldamine ja kättesaadavana hoidmine;
- 3D-visualiseerimine ja sellest tulenevad analüüsivõimalused.

3D-mudelite kasutamine kiirendab olulisel määral planeeritavate objektide sobitamist linnakeskkonda ning nende visuaalse mõju hindamist olemasolevale linnaruumile. Kuna linnaplaneerimises on oluliseks kriteeriumiks alati ka täpsus, siis 3D-mudelitest tulenev kõrguse dimensioon on heaks lisaatribuudiks, mille abil saab planeeritavat tegevust paremini hinnata ja seda võimalikult üheselt mõistetavalt kõigile protsessis osalejatele teha. Näitena võib tuua kasvõi võimaliku uue ruumikasutuse hindamise Tartu vana kaubamaja hoonestusalal (vt joonis 1). Kuna ala on piiratud nii ümbritseva hoonestuse kui tänavavõrgustiku poolt (Riia, Turu, Aleksandri ja Soola tn), siis planeeritava hoonestuse mahtude hindamisel annab 3D-andmete kasutamine oluliselt selgema pildi nii hoone kõrguse seadmisel, väljapakutava hoone varjuanalüüsil, aga ka näiteks kõnnitee laiuse määramisel. Kombinatsioon olemasolevatest Tartu linna 3D-andmetest ja planeeritavast hoonestusest annaks oluliselt selgema pildi uuest ruumilahendusest ja -mahtudest.



Joonis 1. Tartu vana kaubamaja piirkond, kus planeeritava uushoonestuse sobivuse hindamisel võiks olla oluline roll ka olemasoleva Tartu 3D-mudeli andmetel (fotod: Margus Ansu (Postimees) ja Eesti Arhitektide Liit).

Kolmemõõtmeliste ruumiandmete kasutamise tähtsus on tänapäeval aina keerulisemas ja läbipõimunumas linnakeskkonnas üha suurenev ning võib isegi öelda, et teatud tulevikuetapis vältimatu. Vajadus täpsemate andmete ja ruumilahenduste järele kasvab ning 3D-linnamudelite abil on võimalik seda teha nii, et soovitud tulemus oleks võimalikult üheselt mõistetav nii ametnikele, planeerijatele, inseneridele kui linnakodanikele (Merlet & Larnier, 2011). Tartu linna praegu kasutuses oleva avaliku 3D-rakendusega on astunud juba esimesi samme, kus linnakodanikele on antud võimalus planeeritavat hoonestust olemasoleva linnakeskkonnaga kolmemõõtmelises ruumis sobitada ja vajadusel planeeringudokumentidele lisada (vt ptk 2.1).

3D-linnamudelite eeliseid osatakse tänapäeval mitmete riikide näitel juba hinnata – head kommunikatsioonivõimalused nii planeerimisprotsessi siseselt kui väliselt, tänu paremini läbimõeldud ehitustegevusele ja avalikkusega suhtlemisele on võimalik planeerimistegevusest tingitud riskid viia miinimumini. Linnad nagu Helsingi, Montreal ja Rotterdam on antud eeliseid aktiivselt rakendanud ning teinud 3D-linnamudelid endale prioriteetseks valdkonnaks. Suurenenud avalikkuse tähelepanu linnaruumi avastamise vastu ning planeeritava hoonestuse sobitamine 3D-mudelite abil ja viimaste kaudu avalikkuse informeerimine on ainult mõned näited sellest, kuidas ruumiliste mudelite kasutamine on kasu toonud nii linnakodanikele kui otsusetegijatele (Vries & Zlatanova, 2011).

Võib öelda, et läbimõeldud ja toimiv kombinatsioon täpsest andmestikust ning optimaalsest ja efektiivsest 3D-visualiseerimise, -haldamise ja -analüüsi tehnikast on juba praegu suuresti abiks nii linnaplaneerimises, ressursside haldamisel kui ka linnakodanike informeerimisel ning selle võimalusi on viimastel aastatel aina enam hakatud väärtustama ja kasutama. Kuigi ruumiline visualiseerimine ise lubab planeerijate tegevusest paremini aru saada, siis tegelikult suuremas plaanis ei ole antud võimalused kõigile veel selged ning 3D-linnamudelite kasutamise valdkond vajaks selles osas enam tähelepanu ja populariseerimist. Seda eelkõige just avalikkuse vaatenurgast lähtuvalt (Ross, 2010).

1.1 3D-linnamudelite võimalikud klassifitseerimise lahendused

Erinevate riikide praktika 3D-linnamudelite kasutamise koha pealt näitab seda, et kasutusvaldkondade arv sõltub suuresti sellest, mida mudelitest oodatakse, mis formaadis andmetega on tegu, milline on kasutatavate andmete detailsus jne. Seega on 3D-linnamudelite klassifitseerimiseks mitmeid võimalusi – seda saab teha tulenevalt nende loomise protsessist, kasutatavast esituskeskkonnast, aga ka lähtudes 3D-linnamudelile seatavast esmasest eesmärgist (Jazayeri, 2012).

Lähtudes 3D-linnamudelile seatavast eesmärgist on need võimalik jagada järgnevalt (Shiode, 2006):

- **3D CAD-mudelid** – (ingl *computer-aided design*) realistlikud, eelkõige visualiseerimise ja esitlusfunktsioon;
- **mängusuunitlusega 3D-mudelid** – realistlikud, kitsamale kasutusvaldkonnale suunatud;
- **GIS-põhised 3D-mudelid** – (ingl *geographical information system*) ruumianalüüsi võimalustele suunatud;
- **internetipõhised 3D-mudelid** – eelkõige andmete jagamise funktsiooniga.

Eelnevat klassifikatsiooni on samas võimalik jagada veel omakorda tarkvaralistest võimalustest ja valikutest lähtuvalt, kuna olenevalt tarkvarast on erinevad ka kasutatavad ruumilise modelleerimise algoritmid ning nende tulemused. Siinkohal tasub veel ära märkida n-ö 3D CAD- ja GIS-mudelite sünteeslahendust BIM-mudelprojekteerimist (ingl *building information modeling*), mille abil luuakse kogu ehitusteavet (sh kasutatavad materjalid, detailid, energiatõhususe arvutused jne) sisaldav virtuaalne infomudel ning see võimaldab väljapakutavat lahendust kolmemõõtmelises ruumis näitlikustada, teostada erinevate infrastruktuuride simulatsioone ja mahtude arvutusi (Riigi Kinnisvara AS, 2009).

Arvestades erinevate modelleerimis- ja visualiseerimiskeskondade 3D-mudelite loomise põhialgoritme, võib öelda, et saadavad tulemused nõuavad erinevat lähenemist ja töövõtteid. Kasutatava modelleerimis- ja presentatsioonimetoodika põhjal on võimalik tarkvarati eristada seda, kas tegemist on polügooni-, kurvi- või parameetrilise modelleerimistehnikaga (Kolbe, 2005):

- **Polügoonipõhist** 3D-modelleerimist võib lugeda kõige algupärasemaks tehnikaks, mille puhul soovitatavate ruumiobjektide ja nende osade loomiseks kasutatakse polügoone.
- **Kurvide** abil interpoleeritakse punktidevahelisi ühendusi, mille tulemusena luuakse sujuvad mudelipinnad, mis tekitavad mulje realistlikumast 3D-mudelist.
- Kolmandaks võimaluseks polügooni- ja kurvipõhise modelleerimise tehnikate kõrval on **parameetriline meetod**, kus eelnevalt paikaseatud parameetrite ja reeglistike abil on võimalik suhteliselt kiiresti luua olemasolevate andmete põhjal täiesti uued 3D-andmed. Mudeli andmete haldamine käib samuti vastavaid parameetreid täpsustades ja muutes.

Modelleerimistehnikate hulk on aastatega kasvanud ning polügoonipõhisest modelleerimisest on saanud eelkõige üks osa ja võimalus komplitseeritumast loomisprotsessist (Kolbe, 2005). Tuan (2013) on oma hiljutises uurimistöös välja pakkunud ka kolmemõõtmeliste geoinfosüsteemide (lüh 3D GIS) andmete kategoriseerimise vastavalt sellele, kas linnamudeli 3D-objektide esitamiseks kasutatakse nende väliskontuure, voksleid ehk n-ö kolmemõõtmelisi piksleid, 3D-blokke või eespool nimetatute kombinatsioone.

3D-linnamudeleid on võimalik eristada ka selle põhjal, kuidas on neis andmete esitamine realiseeritud ning kui suures ulatuses on 3D-andmete visualiseerimise meetodeid mudelis kasutatud. Nele Jäetma on oma magistritöös (2010) 3D-linnamudelite visualiseerimise võimalusi jaotanud vastavalt esitamise viisile. Tulenevalt sellest on võimalik eristada sõrestik-, varjutus- ja tekstuuritud esitust, millest viimast võib pidada enamkasutatavaks. Vastavalt dimensionaalsusele on eristatavad täielikud (3D) ja osalised (2,5D) linnamudelid, kus viimaste puhul on kasutatud üksikuid kolmemõõtmelisi interaktiivseid või staatilisi objekte.

Samamoodi on uuritud ja välja pakutud erinevaid klassifitseerimise võimalusi kasutatavate visualiseerimise tehnikate alusel, mida 3D-ruumiandmete kuvamisel rakendada. Näiteks seda, mis kujul on õhukvaliteedi näitajad kõige paremini 3D-mudelis loetavad või kuidas oleks otstarbekam navigatsioonikaartides kuvada tänavate nimesid, et need oleksid linnamudeliselgemini nähtavad. Kuigi visualiseerimine on üheks paljudest 3D-linnamudelite rakendamise võimalustest, siis aina enam on need aluseks erinevate linnaruumi analüüside läbiviimisel ning oluliseks lisaväärtuseks alustatavate või pooleliolevate planeerimisprotsesside juures. Levinumad ülesanded hõlmavad elukvaliteeti erinevatest aspektidest hindamist, uute projektide linnaruumi sobitamist ja nende mõju olemasolevale hoonestusele, seda läbi nt muutuvate õhu kvaliteedi-, müra- jm näitajate visualiseerimise (Mètral & Ghoula & Falquet, 2012).

3D-mudeleid saab lisaks detailsusele ja rakendamisvõimalusele kategoriseerida ka selle põhjal, mis kaardistusmeetodit on kasutatud nende valmistamiseks. Võib eristada pildipõhist modelleerimist, kus aluseks on võetud aero- või satelliitpildid, aga ka tavalised fotod (Takase & Sho, 2003). Reeglina on taoline lähenemine olnud töömahukaim, kuna nõuab palju modelleerija või kaardistaja sekkumist. Kuid sellegipoolest on olnud tegemist seni kõige levinuma töömeetodiga.

Lisaks eelmainitule on modelleerimisel võimalik kasutada LiDAR-i (ingl *light detection and ranging*) tehnoloogiat (sh maapealset ja lennuki pealt) ning olemasolevate kahemõõtmeliste (lüh 2D) kaardikontuuride põhjal digitaliseerimist (Rodriguez, 2007). Taoline lähenemine võimaldab viia 3D-modeli genereerimise suhteliselt automatiseerituks, kuid sellegipoolest nõuab veel suurel määral modelleerijapoolset sekkumist. Seda eelkõige erinevate anomaaliatega (nt valesti genereeritud katuste) likvideerimiseks, mille on tinginud puudulikud lähteandmed, aga ka kasutatava kaardi ja LiDAR-i andmete ajaline nihe. Laserandmete kasutamine on eraldiseisvast aeropildistamisest kulukam ning annab tulemuseks ainult hoonete jms objektide struktuuri, samas kui fotogramm-meetrilise järeltöötuse abil on eelmainitule täiendavalt võimalik lisada ka fototekstuure. Samamoodi on kulukas ka 2D-vektorkaardi põhjal hoonete n-ö tõstmine (Kiik, 2008), mida tuleb teha käsitsi ja millele võib kuluda üsna palju aega.

1.2 CityGML-i detailsuse klassifikatsioon

Tulenevalt eespool kirjutatust võib öelda, et hoolimata sellest, kas 3D-linnamudelite eristamisel lähtuda dimensioonist, modelleerimistehnikast või koosteelementide geomeetriast, aga ka 3D-linnamudelite standardiks kujunenud CityGML-i (ingl *city geography markup language*) andmemudeli viiest detailsusastmest (vt tabel 1), ei ole linnamudelites kasutatavate andmete seisukohalt veel ühtne jaotussüsteem lõplikult välja kujunenud.

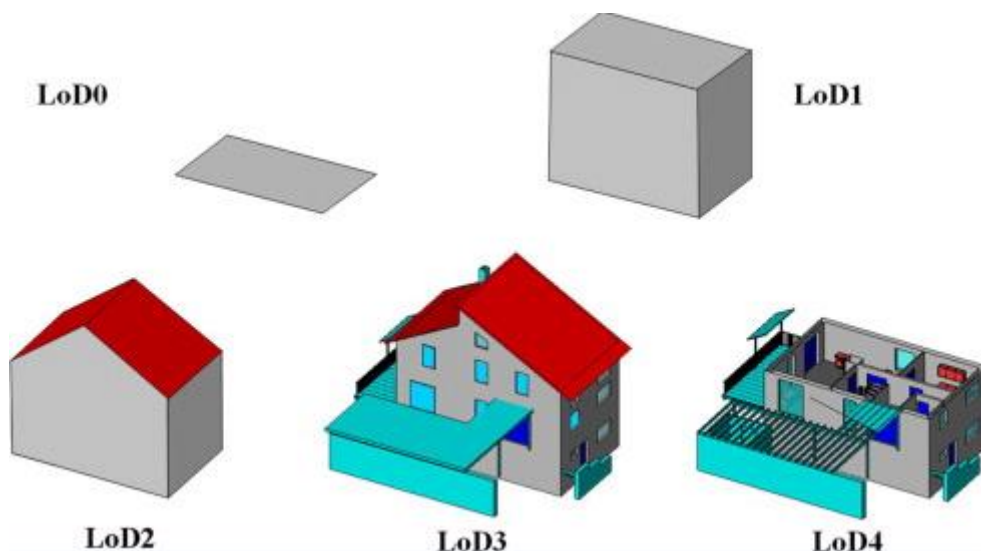
Tabel 1. CityGML-i detailsusastmed (LoD0-LoD4) ja nendele seatavad kriteeriumid Albert (2003) järgi (allikas: Open Geospatial Consortium, 2012).

	LoD0	LoD1	LoD2	LoD3	LoD4
Mudeli mõõtkava kirjeldus	Regioon	Linn	Linnaosa	Arhitektuuriline mudel (ainult välisfassaad)	Arhitektuuriline mudel (interjööri)
Täpsusklass	Madalaim	Madal	Keskmine	Kõrge	Kõrgeim
Objekti 3D-täpsus (asukoht/kõrgus)	Madalam kui LoD1-s	5/5 m	2/2 m	0,5/0,5 m	0,2/0,2 m
Generaliseerimise aste	Suurim	Hoonete blokid	Hooned	Hoonete detailid objektidena	Täpne hoone konstruktsioon
Hoonete detailid	-	-	-	Realistlikud välisfassaadid	Täpne hoone konstruktsioon
Katusekujud	-	Lamekatused	Vastavalt katusetüübile	Realistlikud	Realistlikud
Katusedetailid	-	-	-	-	Realistlikud
Linnaruumi objektid	-	Üksikud	Korduvad	Realistlikud	Realistlikud
Üksikud taimkatte objektid	-	Üksikud	Korduvad, kõrgus >6 m	Korduvad, kõrgus >2 m	Korduvad, realistlikud
Taimkate	-	>50*50 m	>5*5 m	<LoD2	<LoD2

Võrreldes kahemõõtmeliste geoinfosüsteemidega (lüh 2D GIS), kus informatsioon esitatakse üldiselt teatud tüüpi teemakaardina, on kolmedimensioonilise esitluse juures raskem arvesse võtta abstraktsustasandite erinevust. Nii palju, kui on inimesi, on ka tajumisaistinguid, mistõttu 3D-andmete abil informatsiooni esitamine võib osutuda keerulisemaks kui kahemõõtmeliselt. Seniste arengu- ja kasutustrendide põhjal on 3D GIS andmeid võimalik jagada kahte põhikategooriasse, s.o 3D-pinnamudeliteks (raster- ja TIN-formaadis) ja 3D-vektorobjektideks. Viimaste hulka võib lugeda kolmemõõtmelisi punkt-, joon- ja pindobjekte ning 3D-ruumis reaalselt mahtu omavaid kehasid nagu antud töös kasutatud *Multipatch*-objektid (Sisas, 2009).

3D-linnamudelid koosnevad enamasti digitaalsest kõrgusmodelist ehk DEM-ist (ingl *digital elevation model*), mille peale on lisatud realistlikud hoonemudelid ja erinevad infrastruktuurid. Linnamudelite standardiks kujunenud CityGML infomudeli detailsusastmete (lüh LoD) alusel on

võimalik neid jagada viieks alajaotuseks (vt joonis 2), kus LoD0 on kõige lihtsam ja koosneb DEM-ist, millele on täiendavalt lisatud rektifitseeritud aerofoto, satelliitpilt, kaart vms (Rodriguez, 2007). LoD1 lisab eelnimetatule lihtsad hoonete kastid ehk tegemist on nn kastmudeliga, kus on esindatud hoonete lihtsustatud ruumikujud (Kiik, 2008).



Joonis 2. LoD0-LoD4 detailsusastmed CityGML-i standardi järgi (allikas: Open Geospatial Consortium, 2012).

LoD2 taseme mudeliks, milleks on käesolevas töös käsitletav Tartu linna 3D-mudel (vt ptk 1.5.1) loetakse aga sellist 3D-linnamudelit, mis sisaldab ka hoonete katuseid. Antud taseme mudelid on ühed kõige levinumad ning neid võib leida üsna suurel määral erinevatest virtuaalgloobustest nagu Google Earth, Bing Maps jt (Jahne & Krisp, 2011). Samuti on need eelnevatest tasemetest oluliselt detailsemad ning võivad sisaldada hoonete fassaaditekstuure. Kaheks kõrgemaks tasemeks loetakse LoD3 ja LoD4, kus viimase puhul on lisaks võimalik ka hoonete interjööri külastada ja seestpoolt vaadelda (Open Geospatial Consortium, 2012). Taolise detailsusastme üheks näiteks võib tuua LoD3 taseme 3D-detailmudelit Tallinna vanalinna piirkonna kohta (vt ptk 1.5). Tasub muidugi ära märkida, et detailsusaste ja sellest tulenevad klassifitseerimise võimalused sõltuvad suuresti ka kasutatava modelleerimistarkvara võimekusest.

1.3 Levinumad kasutusviisid

3D-linnamudelite kasutamise üks eeliseid on see, et neid on võimalik oma mitmekülgse tõttu rakendada üsna erinevate sihtgruppide tarvis. Lisaks eespool kirjeldatud eelistele planeerimisprotsessi läbiviimisel on terve hulk teisi valdkondi, kus 3D-linnamudelite kasutamist on juba rakendatud.

Järgnev loetelu ei ole lõplik ning on ainult osa sellest, kus 3D-mudeleid kasutatakse (Biljecki (2012) ja Kolbe (2005) järgi):

- **treeningsimulatsioonid**, kus virtuaalse linnakeskkonna abil on võimalik silmuleerida autoõppesõitu, aga ka nt politsei-, kiirabi- ja tuletõrjeüksuste läbipääsetavust (Despine & Baillard, 2011);
- **riskianalüüsid**, mille hulka võib lugeda üleujutusosalade ja linna kanalisatsioonivõrgustiku modelleerimist kolmemõõtmelises linnaruumis (Merlet & Larnier, 2011);
- **linnaruumi planeerimise** erinevate etappide (alates planeeringu eskiislahenduse loomisest ja sobitamisest olemasoleva hoonestusega kuni lõpliku planeeringulahenduse avalikkusele esitlemiseni) visualiseerimine 3D-linnamudelite abil;
- erinevad linnakeskkonda puudutavad **elukvaliteedi analüüsid** nagu saastehinnangud, võimalike tuulekoridoride modelleerimised ja varjuanalüüsid;
- 3D-katastrisüsteemid, telekommunikatsioonide paigutamise **BIM-süsteemid**;
- hoonete, linnaruumi ja sealsete objektide **mahuanalüüsid**.

3D-tehnoloogiate võidukäiguga viimasel aastakümnel on välja töötatud terve rida erinevaid 3D-rakendusi ja -töömeetodeid – spetsiifiliste ruumandmete omandamine, töötlemine ja visualiseerimine on ainult osa 3D-geoandmete valdkonnast (Moser, 2010). Loodud on mitmed 3D rakendamise tehnoloogiaid ja standardeid nagu W3DS (ingl *Web 3D Service*) ja WVS (ingl *Web Viewer Service*), mis olles OGC (ingl *Open Geospatial Consortium*) poolt juba heaks kiidetuna toetavad 3D-linnamudelite edaspidist arendamist (Lanig & Zipf, 2010).

3D-andmeid kasutavate erialade loetelu täieneb samuti pidevalt, kuna mida rohkem erinevat tüüpi andmeid ja neile vastavat tarkvara turul on, seda enam on ka rakendusalasid ja võimalusi. Linnaplaneerijad, kaevandusspetsialistid, insenerid, korrakaitseorganid, kaitsevägi, keskkonnakaitsjad jpt on ainult väike osa erialadest, kus 3D-andmete kasutamist on juba aktiivselt teostatud (AlphaGIS, 2012).

1.4 3D-linnamudelite kasutamisega kaasnevad analüüsivõimalused

Nagu eespool mainitud, on 3D-mudeleid seni kasutatud eelkõige visualiseerimise eesmärgil linnaplaneerimises või turisminduses. Samas on juba loodud või on loomisel meetodid ja töövõtted 3D-andmete kasutamiseks ka ruumianalüüsides läbiviimiseks, nt mürataseme mõõtmine 3D-linnaruumis. Taolise näite puhul on kolmanda lisamõõtmise kasutuselevõtt üsna vajalik, kuna seeläbi on saadavad tulemused oluliselt täpsemad (Moser, 2010).

Paraku hakatakse antud potentsiaali enamuse 3D-linnamudeleid omavate linnade poolt alles märkama ja väärtustama, seda tõenäoliselt valdkonna uudsuse ja näilise keerukuse tõttu. Seetõttu peab käesoleva töö autor oluliseks välja tuua Moseri (2010) järgi järgmised näited, mis võiksid olla potentsiaalsemad ruumianalüüsi võimalused linnaplaneerija seisukohast lähtuvalt ning mida

saaks 3D-linnamudelite abil rakendada. Samas peab arvestama ka seda, et taolisi standardiseeritud 3D-analüüsimetodeid on praegu veel suhteliselt vähe. Üsna tihti tuleb vajalikud mudelid töö käigus ise luua, mistõttu järgnevalt kirjeldatavad meetodid on ainult valik sellest, kuidas on võimalik 3D-linnamudeleid kasutada.

1.4.1 3D-lähedusanalüüs

Üheks võimaluseks on lähedusanalüüs, kus vahemaade mõõtmist ja puhvreid kasutades saab kolmemõõtmelises ruumis hinnata, kas ja kuidas planeeritavad hooned või muud infrastruktuurid sobivad olemasolevasse linnaruumi nii maa peal kui maa all (Moser, 2010). Kolmemõõtmeliste puhvrite abil on võimalik hinnata, kas planeeritava hoone maa-aluse parkla ehitamisega ei satuta vastuollu territooriumil paiknevate tehnovõrkudega. Võrreldes võimalustega kahemõõtmelises ruumis saab 3D-lähedusanalüüsi abil palju täpsemalt sellised piirkonnad ja objektid valikust välistada. Siinkohal on sobilikuks näiteks Helsingi linna poolt igapäevaselt kasutatav 3D-linnamudel, kus peale maapealsete on mudelis ka maa-alused struktuurid (nt metroo, kanalisatsiooni- ja kommunikatsioonivõrgustik jmt), mida lisaks visualiseerimisele kasutatakse ka antud analüüsimetodi rakendamisel.

1.4.2 3D-levikuanalüüs

Teiseks potentsiaalseks analüüsimetodiks 3D-andmetega töötamisel oleks levikuanalüüs, mille abil on võimalik hinnata ja visualiseerida õhukvaliteedinäitajaid, sh ka mürataset kolmemõõtmelises linnaruumis (Kurakula, 2007). Antud analüüsitüüp võib osutada kasulikuks suure liikluskoormusega piirkondades, kus ümbritseva hoonestuse tõttu on puhta õhu ligipääs piiratud. Tuleb muidugi silmas pidada, et analüüsi läbiviimiseks on vajalik lisaks traditsioonilistele ruumipäringute atribuutidele arvesse võtta ka mitmeid füüsikalisi mudeleid ja protsesse, mis kirjeldavad täpsemalt õhusaaste liikumise trajektoore (Moser, 2010). Taolise analüüsimetodi potentsiaalse rakendamise näiteks võib tuua Tartu linna vana kaubamaja uue hoone ehitamise planeerimisest. Olenevalt hoone mahust ja kõrgusest saab modelleerida seda, milline oleks puhta õhu juurdepääs külgedelt üsna suletud ruumis (ühel pool Tartu uus Kaubamaja, teisel pool Tasku keskus ja planeeritav uusehitus) ning mis oleks oluliseks abimaterjaliks õhusaaste mõju hindamisel antud piirkonnas liiklevate ja töötavate inimeste tervisele.

1.4.3 3D-nähtavus- ja -varjuanalüüs

Võib-olla kõige levinumaks 3D-analüüsimetodiks võib pidada nähtavuse hindamist kolmemõõtmelises ruumis. Selle järgi on võimalik hinnata, kas väljavalitud punktist on soovitud objektid nähtavad või kättesaadavad. Saadud andmete põhjal saab valida, kas planeeritav asukoht (nt kommunikatsioonimasti paigutamiseks) on sobiv ning mis saaksid olema suuremad

ümbruskonna takistused (sh hooned, reljeef jmt) sellelt signaali edastamisel. Nähtavusanalüüsi läbiviimiseks vajalikud tööriistad on varasemalt juba olemas enamikul GIS-analüüse võimaldavatel tarkvaradel (sh Esri ArcGIS, Bentley Microstation jt).

Teiselt poolt saaks varjuanalüüsi abil hinnata, mis mõju avaldab planeeritav hoonestus juba ehitatud hoonetele ning kui suurel määral võivad uued hooned päikesevalgust varjata olenevalt kellaajast või aastaajast. Siinkohal on taas kohaseks näiteks Tartu vana Kaubamaja asemele planeeritav uushoonestus. Kuna käesoleval ajal on antud piirkond suuresti päikesevalguse eest varjatud ning 3D-mudeli abil oleks rajatava hoone mõju ümbruskonnale võimalik juba enne ehitamist hinnata.

1.4.4 3D-jaotusanalüüs

Moseri (2010) järgi võib veel ühe eraldiseisva 3D-analüüsina käsitleda jaotusanalüüsi. See võimaldab hinnata kahemõõtmelisi statistilisi andmeid inimeste igapäevaste liikumiste ja paiknevuse kohta. Üheks rakenduseks on mobiilpositsioneerimise teel kogutud andmete visualiseerimine mitte ainult kahemõõtmelises ruumis, vaid võttes kasutusele ka kõrgusmõõtme, eraldada huvipakkuv info näiteks hoonete korruste kaupa. Igal juhul on tegemist ühe viisiga 3D-ruumianalüüsi läbiviimiseks.

1.5 3D-linnamudelid Eestis ja naaberriikides

Võib öelda, et peaaegu kõigil Eesti lähinaabritel on 3D-linnamudelite temaatika kajastust leidnud. Lisaks Google Earth-is leiduvatele avalikele kolmemõõtmelistele mudelitele, mida võib leida erinevates detailsusastmetes (vt ptk 1.2) Helsingist, Stockholmist, Riist kui Peterburist, tasub veel eraldi ära märkida fotopõhist Google Street View-d, mille avalike andmetega on kaetud nii Eestis kui meie lähinaabrite juures suur osa riikliku ja kohaliku tähtsusega teid. Selle näol on tegemist arvestatava alternatiiviga 3D-mudelite kasutamisele teede lähiümbruse kuvamiseks 360-kraadise panoraamse tänavataseme vaate kaudu. Samas tuleb silmas pidada seda, et kuigi panoraamvõtete kogumisel on asukoha määramisel kasutatud LiDAR-it, 3D-prillide olemasolu korral on võimalik kaadreid vaadata ka kolmemõõtmeliselt ning kaadrite vahetamisel kuvatakse n-ö pseudo-3D efekt, mis jätab 3D-mudelis liikumise mulje, siis sellest hoolimata ei ole tegemist 3D-linnamudeliga selle kõige otsesemas tähenduses. Samuti puuduvad panoraamvõtted teedest eemal olevate objektide kohta ning teiselt poolt on Street View tekitanud küsimusi seoses kaadrisse püütud inimeste ja situatsioonide privaatsusega. Seetõttu tuleb nentida, et Street View näol ei ole tegemist alternatiiviga 3D-linnamudelitele, vaid pigem pakub see lisavõimalusi linnamaastike ruumiliseks kuvamiseks.

Koostöös Google-iga on alates 2010. aastast avalik kolmemõõtmeline linnamudel olemas Stockholmi linnal (SketchUpdate, 2010). Mudel integreeriti Google Earth-i keskkonda ning oma olemuselt on fototekstuuridega kaetud LoD2 taseme mudel, mis valmis Google-i poolt linnadele pakutava projekti „*Cities in 3D*“ tulemusena (Kiik, 2008).

3D-linnaruumi visualiseerimise rakendustest võib esile tõsta ka praegu Helsingi linnavalitsuses ja eelkõige Bentley tarkvaraprojekte kasutades valmivat Helsingi linna 3D-mudelit (Bentley, 2010). Selle näol on tegemist ühelt poolt suuremahulise BIM-süsteemiga, kuid samas ka 3D GIS mudeliga, millel on oluline väärtus nii detail- kui üldplaneerimise aspektist. Esimene Helsingi kohta käiv 3D-mudel valmis linna katastriplaanide, ortofotode ja olemasolevate 2D-/3D-andmete põhjal juba 2002. aastal ning seda kahes peamises detailsusastmes – lihtsa LoD1 kastmodelina, millega sai liita olemasolevaid ja uusi kaardiandmeid, ning detailsema fototekstuuridega kaetud modelina. Lisaks tekstuuritud hoonetele sisaldas mudel ka maakatet, rohealasid ning teedevõrgustikku koos kõnniteede, ülekäiguradade ja muu sinna juurdekuuluvaga (Haw, 2007).

Valdavalt kahemõõtmelised baaskaardi 1:500 mõõtkavas andmed konverteeritakse järk-järgult terviklikuks 3D-andmestikuks, mida saaks edaspidi jooksvalt ja võimalusel automaatselt täiendada. Mudeli loomisel on rõhku pandud muuhulgas ka sellele, et mudeli täiendamine oleks tulevikus võimalikult kiire. Kogu tööprotsess ei koosneks töömahukast kahemõõtmeliste alusandmete (nt hoonete vundamendid ja katastriplaanid) loomisest, mis tuleb hiljem kolmemõõtmelisele kujule viia CAD-is, vaid et olemasolevasse andmestikku lisataks uuendusi juba kolmemõõtmelises ruumis, mida saab hiljem fototekstuuridega detailsemaks muuta. Valmiv 3D-mudel peab lõppkujul olema kõigile linnavalitsuse osakondadele kättesaadav, sisaldades nt linna geodeetilist võrgustikku, tehnovõrke ja muid linna alusandmeid mõõtkavas 1:500. Kõiki neid läheb tarvis linna planeerimisprotsessides, topograafiliste andmete, aga ka erinevate turismiobjektide visualiseerimiseks (Bentley, 2010).

Eesti lähinaabritest on 3D-andmed kasutust leidnud ka Riias, kus lisaks Euroopa Liidu LIFE+ programmi kaasfinantseerimisel ja GIS ettevõtte Metrum Ltd eestvedamisel tehtud professionaalsele ja LiDAR-i andmetel põhineva 3D-mudelile on valminud ka turistidele suunatud virtuaalse Riia vanalinna mudel (Vecriga, 2013). Kuigi viimane on erinevalt Tallinna mudelist siiski valdavalt kahemõõtmeline, sisaldab see olulisemate maamärkide kohta käivaid 3D-hoonete animatsioone.

Riia professionaalne 3D-mudel on sarnaselt valmivale Helsingi 3D-andmestikule mõeldud eelkõige planeerijatele ning LiDAR-i abil kogutud kõrgusandmed hüdrooloogiliste uuringute ja erinevate stsenaariumite läbimängimiseks. Saadud andmete põhjal plaanitakse luua ka hooneid, tänavaid, taimkatet ja muid linnaruumi objekte sisaldav ruumimudel, mis oleks sarnaselt teistele

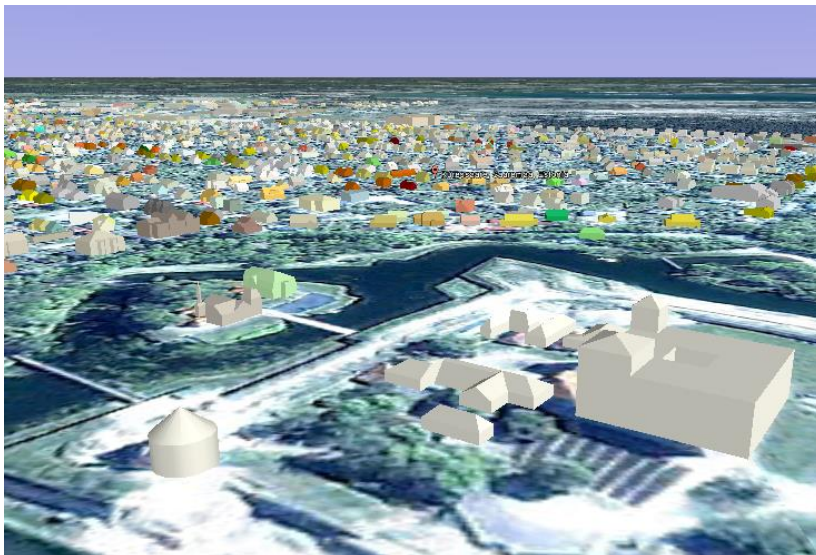
käesolevas töös kirjeldatud mudelitele lisaväärtuseks planeerimisprotsessi läbiviimisel (Metrum, 2010).



Joonis 3. Tallinna piirkonnas võib leida Google Earth-i keskkonnas suhteliselt palju tavakasutajate poolt loodud ja Google-i poolt aktsepteeritud 3D-hooneid.

Eesti kontekstis ei ole käesoleva magistritöö kirjutamise seisuga veel ühtegi linna, mis oleks Google Earth-is või mõnel muul avalikkusele kättesaadaval moel täielikult kaetud 3D-hoonetega. Selle asemel leidub näiteks Google Earth-is mitmeid üksikuid tavakasutajate poolt loodud ja üles laetud hooneid terve Eesti kohta (vt joonis 3). Samuti võib tuua näiteid, kus on loodud linna vaatamisväärsuste kohta animatsioonid või üksikud 3D-mudelid, mida on võimalik arvuti internetilehitsejas mängida (nt Valgamaa 3D-vaatamisväärsused) (Valgamaa Arenguagentuur, 2013).

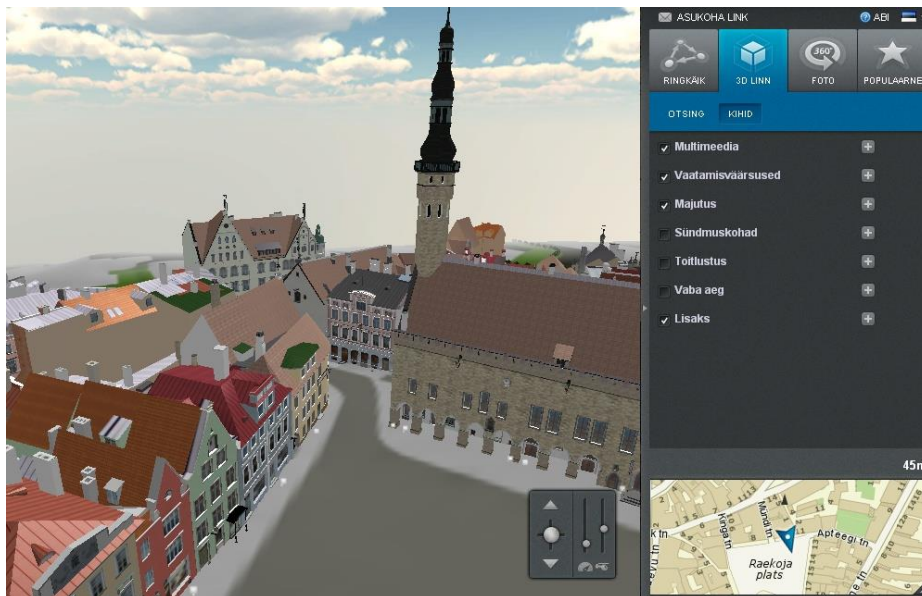
Üheks vanimaks erandiks võib pidada Kuressaare linna suuremate hoonete *LoD1* kastmudelit, mida on võimalik linna kodulehelt isiklikku arvutisse KMZ- (ingl *keyhole markup language*) failina alla laadida ja sealt omakorda läbi Google Earth-i rakenduse kuvada (Kuressaare, 2011). Olles valminud enne 2007. aastat võib Kuressaare mudelit lugeda ka üheks esimeseks taoliseks avalikuks mudeliks Eestis. Kuressaare 3D-mudel valmis Kuressaare linnavalitsuse geoinformaatikute poolt muude tööde kõrvalt ning selle esialgne DGN-formaadis versioon valmis Microstationi tarkvara kasutades (vt joonis 4).



Joonis 4. Väljavõte Kuressaare 3D-linnamudelist Google Earth-i keskkonnas.

Hoonete modelleerimiseks vajalikud andmed saadi fotomaterjalide põhjal ja projektide arhiividest, kust võeti ka vajalikud mõõdud. 3D-hoonetest, mis kõik asuvad ühel nulltasapinnal, on loodud ainult suuremad (puuduvad kõrval- ja abihooned). Kuna arvesse ei ole võetud õiget paiknemist maapinna reljeefi suhtes, siis võib öelda, et mudelil on pigem skemaatiline väärtus ja läbinisti realistlikuks 3D-linnamudeliks seda pidada ei saa. Kuressaare mudel on rakendust leidnud eelkõige olemasolevate ja planeeritavate hoonete mahtude võrdlemisel ning kuigi 3D-mudeli kohustust planeeringute ja projektide puhul ette nähtud ei ole, on see planeerijatele kättesaadavaks tehtud.

Sarnane 3D-mudel on samast ajaperioodist välja panna ka Tallinnal, kuid avalikuks kasutamiseks see ette nähtud ei olnud. Eesti esimeseks avalikuks kasutamiseks mõeldud 3D-linnamudeliks võib lugeda Tallinna vanalinna 3D-mudelit (Kargaja, 2011). Erinevalt 2003. aastal valminud ja kogu linna pindala hõlmavast lihtsast LoD1 kastmudelist katab uus ja detailsem mudel 121 ha suurust piirkonda Tallinna vanalinnas ning võimaldab visualiseerida hoonestust selleks spetsiaalselt loodud veebirakenduses (Virtual Tallinn, 2013) LoD3 detailsusastmes. Kui eelmine Tallinna 3D-mudel oli pigem professionaalse suunitlusega ja koosnes DGN-formaadis kaardifailidest (üleminekul ArcGIS-i tarkvarale konverteeriti need 2008. aastal ühtsesse ja ligikaudu 60 000 hoonet sisaldavasse geoandmebaasi) (Tamm, 2010), siis uus mudel on eelkõige turismisuunitlusega ja on sarnaselt Riia vanalinna mudeliga kättesaadav eraldiseisva veebirakendusena. Mudel sisaldab valdavalt kõiki objekte, mida 121 ha suuruselt kaardistusalt reaalsuses leida võib – vanalinna hoonestus, sisehoovid, tänavalaternad, skulptuurid jm väikeobjektid (vt joonis 5).



Joonis 5. Väljavõte Tallinna vanalinna 3D-kaardirakendusest, kus lisaks modelile endale on võimalik kuvada mitmeid täiendavaid infokihte.

Hoonete modelleerimisel on arvestatud reljeefimudeliga, mistõttu erinevalt Kuressaare mudelist võib tulemust lugeda usaldusväärsemaks ja tõepärasemaks. Usaldusväärsust tõstab ka see fakt, et mudeli loomiseks vajalike alusandmete kogumisel on kasutatud võimalikest kaardistusmeetoditest ühte täpseimat, s.o laserskaneerimist ehk LiDAR-i meetodit, mida teostati nii lennukilt kui maapinnalt. Hoonete fassaadi- ja katusetekstuuride kogumisel kasutati 5 cm pikslisuurusega ortofotosid ja maapinnal tehtud hoonete fotosid (Kargaja, 2011).

Oma detailirohkuse tõttu on Tallinna vanalinna 3D-mudel arvutiressursside koha pealt suhteliselt nõudlik, mistõttu selle sujuvam kuvamine tagasihoidlike näitajatega laua- või sülearvutis on üsna aeganõudev. Samuti on mudeli kasutamiseks vajalik esimesel korral Unity Web Player lisaprogrammi installeerimine. Võrreldes Google Earth-is tavakasutajate poolt loodud 3D-hoonetega samas piirkonnas on viimaste kuvamine optimeeritum. Seda tuleks tulevikus arvestada ka olemasoleva Tartu LoD2 taseme mudeli edasiarendamisel detailsemasse astmesse.

1.5.1 Tartu linna avalik 3D-mudel

Käesolevas magistritöös uuritava Tartu 3D-linnamudeli avalik rakendus tehti kättesaadavaks 2011. aastal ning võimaldab kasutajal kas otse veebilehitsejas või isiklikku arvutisse alla laadides kuvada Tartu linnavalitsuse tellimusel ning Eesti Kaardikeskuse poolt valminud virtuaalset mudelit (Tartu, 2012). Rakenduse esimene (proovi-) versioon hõlmas korraga ühe ruumilise kaardilehe kuvamist kesklinna kohta neljast võimalikust ning 2012. aasta seisuga on rakenduses võimalik näidata peaaegu kogu Tartu linna piirkonda (vt joonis 6). Tegemist on suhteliselt interaktiivse rakendusega, mis tähendab, et kuigi mudeli näol ei ole tegemist geoinfosüsteemiga, on kasutajale lisaks visualiseerimisele võimalus vastavate tööriistade abil sisestada omapoolseid

hoonete mudeleid otse rakenduse aknas. Tartu linnavalitsuse poolt on aktsepteeritud ka ehitussoovi illustreerimine antud rakenduse abil.

Erinevalt Tallinna vanalinna 3D-mudelist on Tartu veebirakendus lahendatud LoD2 mudelina ning hoonetele ei ole lisatud mingeid tekstuure. Samas ei ole Tallinna vanalinna mudeliga võrreldes taoline lähenemine arvutiressursside kasutamise koha pealt oluliselt optimaalsem ning ka antud mudeli kuvamine võtab keskmiste näitajatega süle- või lauaarvutil aega.

Tartu veebirakenduse mudel ei hõlma veel siiski kogu Tartu territooriumi ega Tartu linna hoonestuse viimast seisust ning ei sisalda peale kahe alusplaani vahetamise mingeid lisakihte, mis võimaldaks kasutajal linnaruumi kohta täiendavat informatsiooni saada.



Joonis 6. Väljavõte Tartu linna avalikust 3D-mudelist.

Üheks võimaluseks oleks Tartu linna 3D-mudeli hoonetele fotofassaadide ja generaliseeritud tekstuuride lisamine, mis annaks mudeli visuaalsele poolele olulist lisaväärtust ja realismi. LoD1 kastmudeli fotofassaadidega katmist uuris magistr töö autor enda bakalaureusetöös (Kiik, 2008), kus jõudis järeldusele, et selle näol on tegemist optimaalseima variandiga võimalikult realistliku ruumilise mudeli visualiseerimisel. Taolist lähenemist on uurinud ja edukalt rakendanud ka Ingrid Järve (2012) oma magistr töö FME (ingl *Feature Manipulation Engine*) tarkvarakeskkonna näitel.

2. 3D-LINNAMUDELITE ROLL PLANEERIMISPROTSESSIS

Eesti Planeerimisseadus (2003) sätestab, et planeering on planeerimise käigus valmiv dokument, mis koosneb tekstist ja joonistest ning mis üksteist täiendades moodustavad ühtse terviku. Planeeringu dokumentides esitatakse planeeritava maa-ala ruumilise arengu analüüsile tuginevad ruumilise arengu eesmärgid ning planeeringulahenduste kirjeldused ja põhjendused, ning mis võivad koosneda planeeringu koostamise käigus tehtud menetlustoimingute ja koostöö kohta käivast teabest, planeeringu lähteandmetest, olemasoleva olukorra analüüsist, vaheotsustest, tegevuskavast ning muust konkreetse planeeringuga seotud vajavast teabest. Kuigi 3D-eskiislahenduste kasutamine on planeeringute visualiseerimisel üsna levinud, siis otsest nõuet nende kasutamise kohta ei ole ning lõppkokkuvõttes on see eelkõige planeerija enda otsustada, kas antud lisainfo koostatakse ja planeeringudokumentide hulka lisatakse. Kuna aga planeerimise protsess peab olema kõigile osapooltele avalik, selle läbiviimisega kaasneb kohustus huvitatud isikuid kaasata ja õigeaegselt informeerida, siis on oluline, et osapooli teavitataks nii institutsioonilistest kui protseduurilistest küsimustest arusaadavalt ja põhjalikult planeerimisprotsessi kõikides faasides.

Tabel 2. Planeeringute liigid Eesti Planeerimisseaduse järgi (allikas: Lass, 2000).

Planeeringu liik	Planeeringu objekt	Koostamis-kohustus, iseloom	Põhiülesanne, iseloom	Kehtestaja	Õigusmõju	Planeeringu finantseerija	Läbivaatamis-kohustus
ÜLERIIGILINE PLANEERING	- kogu riik	vajadusel suunav	- riigi territoriaalse arengu strateegia kujundamine - asustuse suunamine	valitsuse heakskiit	aluseks maakonna-planeeringute koostamisel	riik	Riigikogu valimiste järel, ühe aasta jooksul
MAAKONNA-PLANEERING	- maakond või - maakonna osa	vajadusel suunav	- majandusliku ja füüsilise planeerimise sidumine - määratleb üldised maakasutuse suunad - asustuse suunamine	maavanem	aluseks üld-planeeringute koostamisel	(riik) maavalitsus	kohaliku omavalitsuse valimiste järel, ühe aasta jooksul
ÜLD-PLANEERING	- vald või - valla osa - linn või - linna osa	kohustuslik suunav	- üldiste maakasutus ja hoonestustingimuste määramine - funktsionaalne tsoneerimine - (ehitus)maade varumine - piirangute kehtestamine hajasustuses	valla/ linna volikogu	aluseks detail-planeeringute koostamisel	vald / linn	kohaliku omavalitsuse valimiste järel, kuue kuu jooksul
DETAIL-PLANEERING	- väiksem territooriumi osa	kohustuslik ehitus-tegevuse aluseks	- detailsete (ja lõplike) maakasutus- ja ehitustingimuste kehtestamine (kinnisvaraomanikele) - kruntimine - määrab krundi ehitusõiguse	valla/ linna valitsus või volikogu	siduv kõigile, ehitusprojektide koostamise ja kruntimise aluseks	vald / linn või huvitatud isikud lepingu alusel	

Üldplaneeringu näol on tegemist Eestis ühe rakendatava planeeringu liigiga (vt tabel 2), mis koostatakse kogu valla või linna territooriumi või selle osade kohta. See võimaldab vaadelda linna kui linnaehituslikku tervikut ning sel teel sätestada nõudeid ja tingimusi, mis aitavad

parandada linnade ja asulate arhitektuurset ilmet. Üldplaneeringuga tutvumise võimalus on tavaliselt planeeringut läbiviivas kohalikus omavalitsusasutuses või maavalitsuses ning enamasti on see väljas ka valla või linna ametlikul kodulehel (Lass, 2000). Planeerimisseaduse järgi on avalikkuse planeerimistegevusest teavitamise kohustus vähemalt üks kord kuus ilmuvas valla- või linnalehes ja linnaosadega linnades regulaarselt ilmuva linnaosa lehes või mu lehekandjas (Planeerimisseadus, 2003).

Üldplaneering arvestab kõikide üldisema täpsusega planeeringute eesmärgi, millest võib välja tuua linna või valla ruumilise arengu põhimõtete kujundamise, maa- ja vee-ala ehitustingimuste määramise, miljööväärtuslike hoonestusalade, haljasalade, maastiku üksikelementide määramise ja kasutamistingimuste seadmise jmt. (Planeerimisseadus, 2003).

Üldplaneeringu koostamine on kohustuslik ka siis kui tuleb valida asukohta olulise ruumilise mõjuga objektile. Üldplaneering võimaldab vaadelda linna kui linnaehituslikku tervikut ja sel teel sätestada nõudeid ning tingimusi, mis aitavad parandada linnade ja asulate arhitektuurset ilmet. Siinkohal on oluline rõhutada 3D-visualiseerimise tähtsust, kuna see annab hea ülevaate olemasoleva ja planeeritava elukeskkonna sobivusest enne konkreetse ehitustöö algust (Kiik, 2008).

2.1 Planeeringudokumentide visualiseerimine

Planeeringudokumentidega tutvumiseks on vajalik suhteliselt suure hulga tekstilise ja graafilise materjali läbitöötamine. Tavaliselt koosneb dokumentatsioon seletuskirjadest, joonistest, menetlusedokumentidest ja kooskõlastustest, mida tuleb alati vaadelda kui tervikut. Dokumentide visuaalse poole pealt on olulised joonised ja illustratsioonid, kus antakse ülevaade kavandatavast lahendusest sealhulgas ka kolmemõõtmeliste arvutigraafika ja jooniste abil. Samas ei ole taoline informatsioon seaduslikult siduv ning kujutab vaid üht võimalikku viisi lahenduse realiseerimiseks (Linnalabor, 2012). Sellegipoolest on võimalik tõepärase ja kvaliteetse visualiseeringu abil anda planeeringu osapooltele ning avalikkusele selge pilt selle kohta, mis on planeerimistegevuse eesmärgid.

Nagu detailplaneeringute eskiislahendustele esitatavate nõuete puhul, on ka üldplaneeringu juures oluline see, et visualiseerimisega tuleks välja planeeritava muudatuse mõju (nt ehitustegevuse tulemusel linnaruumi kaugvaadete muutumine), uute hoonete mahud ja korruselisus võrrelduna olemasolevaga. Samuti on vajalik näidata hoonete pikemaperspektiivilisi kujundamise põhimõtteid, teerajatiste paigutust ja liikluskorraldust ning hoonestustihedusest tulenevat hoonete ja neid teenindavate rajatiste asukohast tingitud mõju planeeringuala elanike tervisele (Siim & Põllumaa, 2001). Planeeringutega kaasaskäivate visuaalide ja eskiiside abil,

olgu need 2D- või 3D-joonised, tahetakse näidata eelkõige seda, kuidas hakkaksid välja nägema vaatekoridorid, hoonestusmahud ja -laadid ning valguse-varjude mõju loodavale ja olemasolevale elukeskkonnale. Tavaliselt luuakse selle tarvis staatiline üldvaade või vaated kindlatest ilmakaartest, samas kui 3D-mudelite abil on võimalik planeeringuinfot dünaamiliselt ja soovitud vaatenurkadest reaalselt kuvada.

Üldplaneeringu protsessi juurde kuuluvate eskiiside koostamisel lähtutakse põhimõttest, et visualiseering peab olema täpsem kui planeeritava ala ruumilise arengu põhimõtted, kuid samas üldisem kui planeering ise. On oluline näidata erinevaid maakasutuse variante tulenevalt planeeringuala objektide asukoha valikust, alade suuruselt ja funktsioonist. Eskiisi visualiseerimise vormi osas piiranguid seatud ei ole – need tuleb visualiseerida lihtsalt ja kõigile osapooltele arusaadavalt (Hendrikson & Ko, 2004).

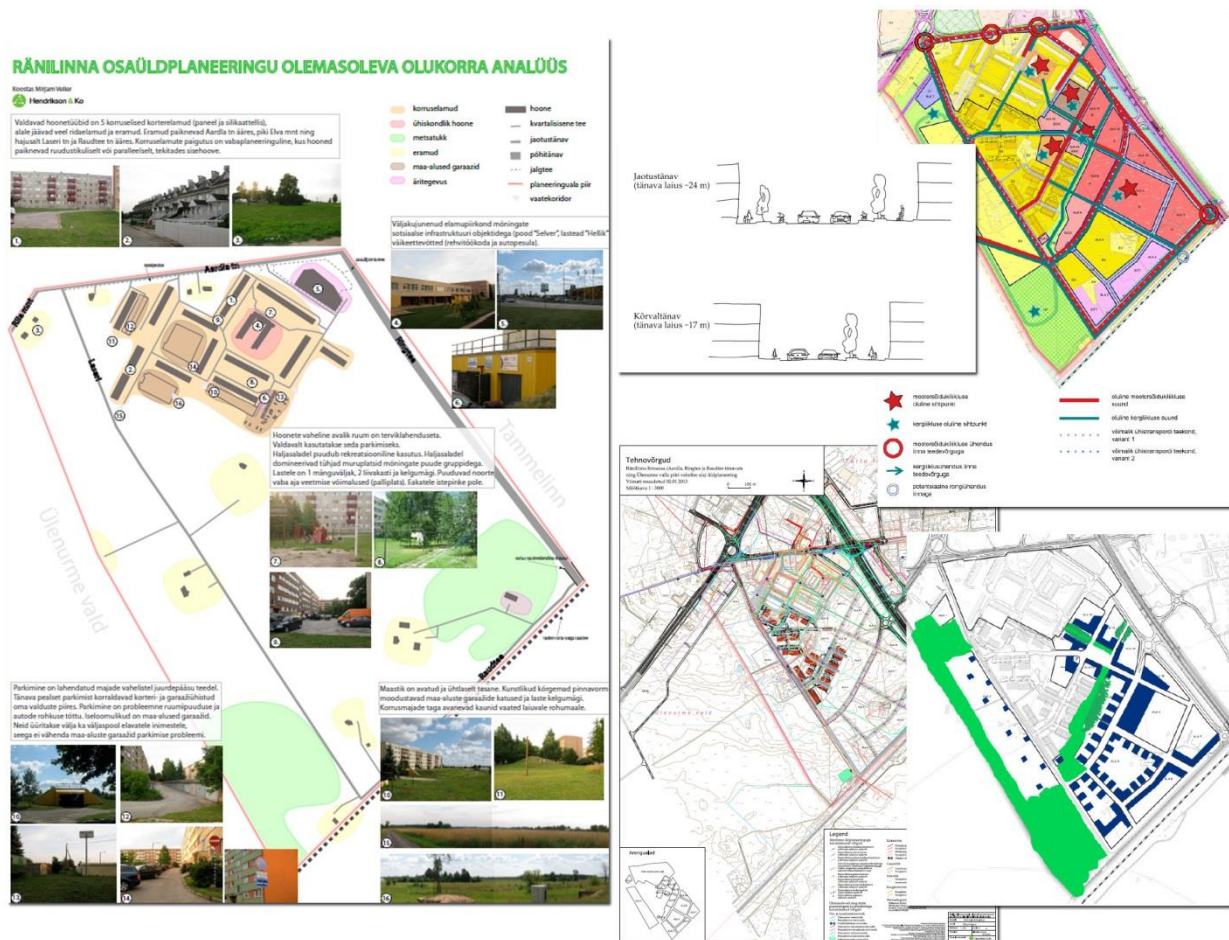
Planeeringukaart, mida võib lugeda planeeringu kõige tähtsamaks maakasutuse põhimõtteid kajastavaks dokumendiks, peab sisaldama väljapakutavaid ideid võimalikult selgelt ja loetavalt (Hendrikson & Ko, 2004). Tihtipeale on aga seda kahemõõtmeliselt teha suhteliselt keeruline, mistõttu siinkohal ongi sobilik kasutada 3D-visualiseerimist – dünaamiliste ja interaktiivsete 3D-mudelite abil on erinevate arengustsenaariumite läbimängimine võimalik nii eskiisi kui ka lõppdokumendi etapis.

Eespool toodu põhjal võib öelda, et planeerimisprotsessi etappe on igati võimalik siduda ka 3D-linnamudelitega. Seda aga on Eesti tasandil seni tehtud vähe ning olemasolevad eksperimendid on jäänud pigem 3D-valdkonna katsetamise ja kompileerimise piirimaile. Valdavalt luuakse planeeringu jaoks eraldiseisev 3D-disain, mille tarvis on olemasoleva ruumilahenduse objektid loodud ise. Need on küll sarnased tegeliku hoonestusega, kuid omavad pigem taustafunktsiooni. Planeerimisseaduses väljatoodud erinevaid planeeringu koostamise etappe, seda alates planeeringu algatamisest kuni avaliku väljapanekuni, on suures ulatuses võimalik siduda 3D-linnamudelite kasutamisega. Selle tulemusena suureneb nii linnakodanike informeeritus kui ka planeerijatele endile laekuv informatsioon osapoolte vastukaja näol.

2.2 Ränilinna linnaosa üldplaneering

Käesolevas töös on keskendutud Tartu Linnavolikogu otsusega 17.03.2011 algatatud ja 24.01.2013 heaks kiidetud Ränilinna linnaosa üldplaneeringule ning sellele vastavale eskiislahendusele, mille põhjal jaotatakse planeeringuala 16-ks määratud juhtotstarbega ja üldiste maakasutustingimustega alaks (vt lisa 1). Planeeringuala suurus on ligikaudu 75 hektarit, mis asub Aardla, Ringtee ja Raudtee tänavate ning Ülenurme valla piiri vahelisel alal. Planeeringu eesmärgiks on mitmekesistada antud piirkonna maakasutust ja terviklikult siduda omavahel

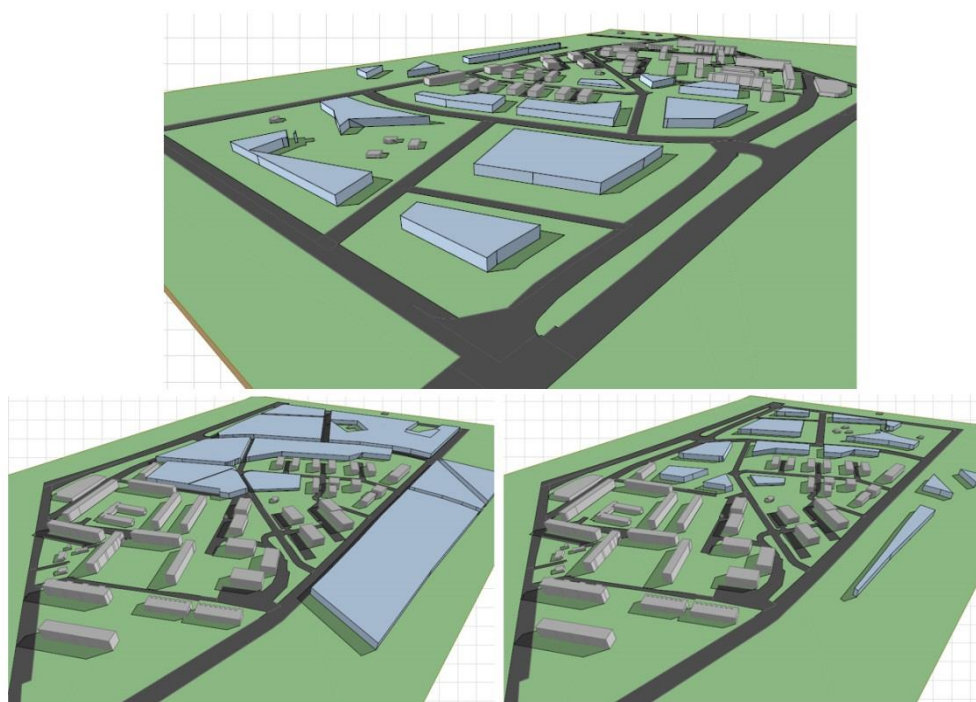
olemasolev ja kavandatav elu- ja ärikeskkond. Eskiislahenduses välja toodud tähtsamateks elementideks on linnaosa väljaku loomine, elamumaa paigutamine peamistest liiklussõlmedest eemale ja rohealade rohkus. Ärimaade paigutamisel on eesmärgiks seatud Ringtee tänavale lähemate alade seadmine laiema tagamaa teenindamiseks ning kohalikele elanikele mõeldud teenuste koondamise keskusalapiirkonda ja elamute lähedale (Tartu Linnavalikogu, 2013).



Joonis 7. Valik Ränilinna üldplaneeringus kasutatavatest visualiseeringutest.

Ränilinna linnaosa üldplaneeringu koostamises osales lisaks Tartu Linnavalitsuse spetsialistidele ja planeeringu koostajale OÜ Hendrikson & Ko ka linnaosas arendustegevust kavandav Tamme Arendus OÜ ning arhitektuurse kontseptsiooni väljatöötamisel Arhitektuuribüroo arhitekt Tanel Tuhal. Vastavalt OÜ Hendrikson & Ko ja Tartu Linnavalitsuse poolt koostatud Ränilinna planeerimisettepaneku seletuskirjale on planeeringulahenduses välja toodud ja määratletud linnaosa üldplaneeringu lahendus. Selle järgi on paika pandud ja üldplaneeringu andmete visualiseerimiseks kasutatavatel kaartidel (vt joonis 7) ära toodud linnaosa arhitektuurne kontseptsioon ja hoonestustihedus, planeeritava tänavavõrgu ja parkimiseeskorra kriteeriumid, rohevõrgustiku ja haljasalade paiknemine, tehnovõrgud ja maakasutuse juhtotstarve (vt lisa 1). Üldplaneeringu dokumentide hulka kuuluvad samuti Ränilinna linnaosa üldplaneeringu keskkonnamõjude strateegilise hindamise aruanne ja Ränilinna osaüldplaneeringu olemasoleva olukorra analüüs. Viimase näol on tegemist visuaalselt lahendatud kirjeldusega linnaosas praegu

valitsevale olukorrale, milles on kasutatud nii kaardialust kui sellega numbriliselt seostatud fotomaterjale (vt joonis 7 vasakul).



Joonis 8. Arhitektuurbüroo Luhse & Tuhala poolt loodud Ränilinna üldplaneeringu 3D-kavandid.

Visualiseeringud on lahendatud valdavalt kahemõõtmeliste kaartide näol, kuid eraldi tasub välja tuua arhitektuurbüroo Luhse & Tuhala poolt ArchiCAD-is loodud maakasutuse kolmemõõtmelisi kontseptsioone (vt joonis 8). Viimaseid tuleb küll käsitleda kavanditena, kuid samas saab öelda, et antud üldplaneeringu puhul on 3D võimalusi (seda küll staatilisel kujul) arvesse võetud ja katsetatud.

Kõik antud dokumentatsioonis kirjeldatud kriteeriumid ja parameetrid on aluseks käesolevas magistritöös linnaosa üldplaneeringu visualiseerimisele olemasolevate Tartu linna 3D-andmete põhjal ning dünaamilise planeerimiskeskse 3D-linnamudeli koostamisele Esri CityEngine tarkvara abil.

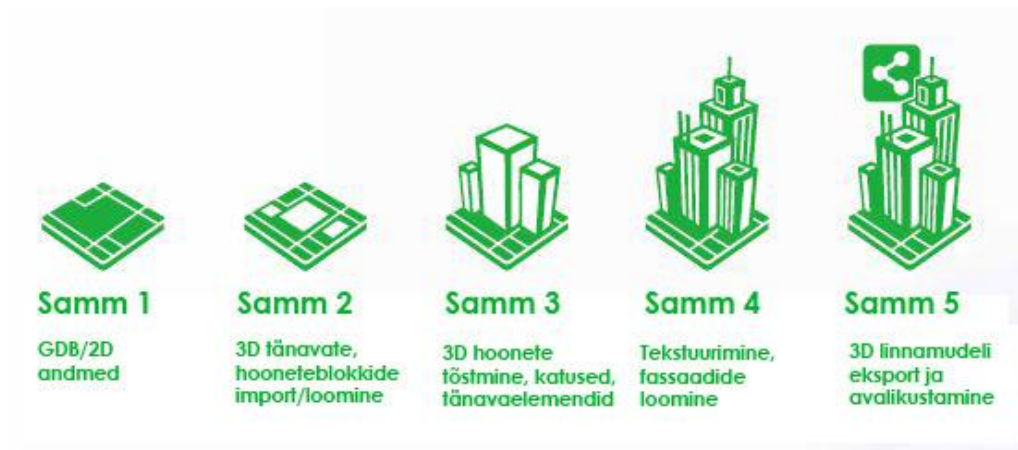
3. ESRI CITYENGINE

3.1 Tarkvara ülevaade

CityEngine (edaspidi CE) näol on tegemist Esri ArcGIS tarkvara lisarakendusega, mille eesmärgiks on pakkuda kasutajale võimalust tegeleda 3D-modelleerimise ja -kujundamisega reeglipõhises keskkonnas. Tulenevalt peatükkides 1.1 ja 1.2 välja toodud klassifitseerimise viisidest paigutub CE tihtipeale klassifikatsiooni piirimaile, võimaldades nii CAD-i kui GIS-i põhist 3D-modelleerimist, kuid sisaldades ka näiteks BIM-projekteerimise elemente (Jazayeri, 2012). Toetatavaid andmeformaate on palju, mille seast võib leida nii Esri, kuid ka Google, Collada, 3ds Max, Autodeski ja mitmete teiste GIS-i ja CAD-i valdkonna tarkvaratootjate formaate. Lisaks eelnevale võib pidada oluliseks ka CE Python-i programmeerimiskeele liidest, mille abil on võimalik korduvaid modelleerimise protseduure automatiseerida (Sisas, 2012).

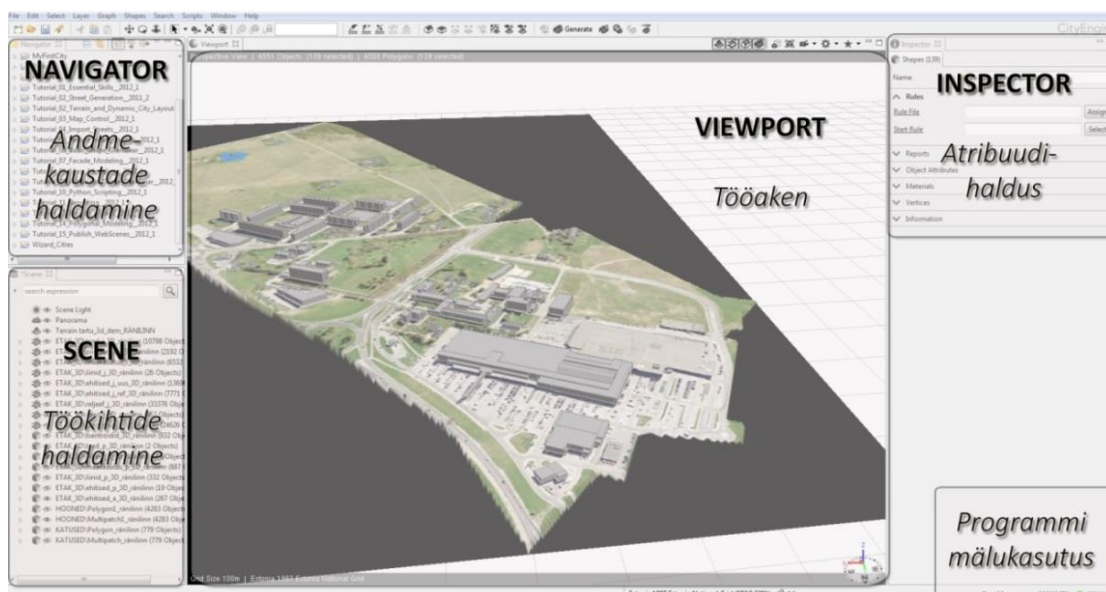
CE põhieripäraks ja -väärtuseks on parameetriliste komponentide baas, millele kõik tarkvara modelleerimiselemendid toetuvad. Süsteem pakub 3D-mudeli loomiseks avatud graafilist ja ka tekstipõhist kasutajaliidest ning mitmeid detailsemaid võimalusi linnaruumi nägemuse edasiandmiseks. Parameetrilisi komponente võib kasutada nii väga keeruliste ja viimistletud detailide kui ka ehitise peamiste ja lihtsakoelisemate elementide jaoks nagu näiteks seinad ja postid. Samas kõige selle tarvis puudub vajadus GML/XML-i põhise programmeerimise järele (Parish & Müller, 2001).

Kuigi tarkvara on algselt mõeldud olema eelkõige projekteerimis- ja modelleerimissuunitlusega, on igas uuemas versioonis lisatud selliseid funktsioone, mis teevad võimalikuks parema integreerimise teiste GIS analüüsile või visualiseerimisele keskendunud programmidega (Antunes, 2013). Viimane 2012. aasta versioon (ver. 2012.1) on suuresti ühildatav ja iga uuema versiooniga järjest enam ArcGIS Desktop tarkvaraga seotud, mis tähendab, et juba varasema Esri tarkvarakogemusega kasutajate õppimiskõver ei pea algama nullist, vaid saab ka varasemaid teadmisi CE-s ära kasutada ja rakendada (Esri, 2013a).



Joonis 9. CE kasutamise viis peamist sammude.

Protseduurilise modelleerimise protsessi üheks jaotamise võimaluseks on see jagada viieks peamiseks sammuks, mis on lihtsustatult välja toodud joonisel 9. Esimese sammuga imporditakse töökeskkonda huvipakkuvad kahe- või kolmemõõtmelised andmed, olgu need SHP-, GDB-, DXF- või mõnes muus andmeformaadis, ning jagatakse järgnevalt programmis kasutatavateks 3D-andmeteks (tänavavõrgustik, hoonete blokid ja maapinnaüksused). Kui andmetel puuduvad vastavad 3D-atribuudid (nt hoonete kõrgus, kastmudeli olemasolu jmt), siis on võimalik need järgnevalt ettemääratud reeglite abil hoonete vundamentide põhjal õigele kõrgusele tõsta. Kolmas samm näeb ette ka erinevate lisakihtide kasutuselevõttu ja realismi suurendatava info mudelisse sisestamist (nt puud, tänavavalgustite võrk, hoonete katuste tekstuurid jmt). Eraldi sammuks võib pidada hoonete katusetekstuuride ja fotofassaadide käsitsi või automaatset omistamist, samuti mudelile hoonete üksikhaaval juurdelisamist, mille järel on võimalik täpsustatud andmetega algset andmestikku täiendada või CityEngine Web Vieweri abil internetipõhise 3D-mudelina kättesaadavaks teha. Antud võimaluse põhjalikum ülevaade antakse alapeatükis 3.3.

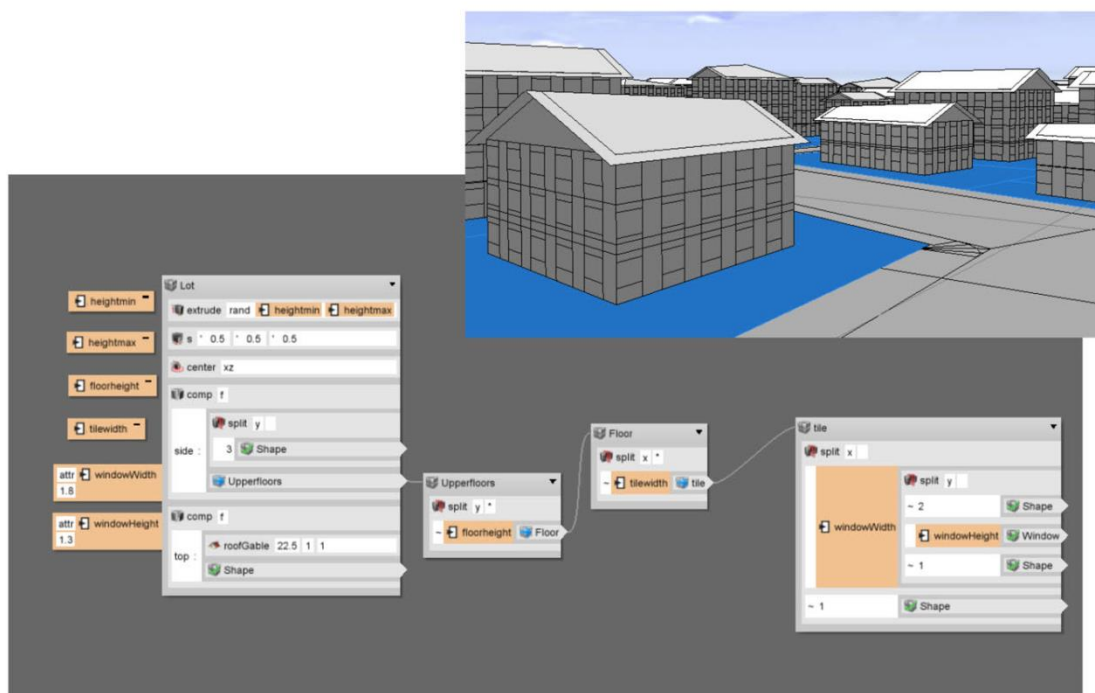


Joonis 10. CE töökeskkonna näide ja selle olulisemad komponendid.

Programmi töökeskkonda (vt joonis 10) võib oma ülesehituselt pidada pigem GIS- kui CAD-i suunitlusega, kuna võrreldes Trimble SketchUp-iga on esikohale seatud parameetrilised töövahendid, kuigi võimalused polügoonipõhiseks CAD-modelleerimiseks on samuti olemas.

3.2 Protseduuriline modelleerimine

CE tarkvara tutvustati esmakordselt 2008. aastal tarkvarafirma Procedural Inc. (alates 2011. aastast Esri R&D Center Zurich) poolt. Tarkvara kasutab suuresti selle kaasasutaja Pascal Mülleri väljatöötatud protseduurilise modelleerimise põhimõtteid, mille kohta pärinevad esimesed publikatsioonid juba 2001. aastast (Parish & Müller, 2001). Antud lähenemist võib nimetada teisiti ka massmodelleerimiseks, kuna erinevalt üsna aja- ja ressursikulukas polügoonipõhisest modelleerimisest CAD-is saab tõhusamalt genereerida suurema ala 3D-mudeleid, mida võib hiljem kasutada erinevates linnaruumi puudutavates analüüsid (Müller, 2006). Antud lähenemine näeb ette, et 3D-mudelid ja neid katvad tekstuurid luuakse eelnevalt paikapandud parameetrite ja reeglistike alusel (vt joonis 11). Reeglistike abil koostatakse protseduuriline linnaehituslik süsteem või n-ö geodisain, mida on võimalik dünaamiliselt etteantud parameetrite abil kiiresti modelleerija soovile kohandada ja muuta (Antunes, 2013). Antud aspektist sarnaneb metoodika BIM-süsteemides kasutatava parameetrilise modelleerimisega, kus samuti luuakse 3D-mudelid vastavalt etteseatud väärtustele.



Joonis 11. Näide protseduurilise modelleerimise reeglistikust ja selle graafilisest väljundist CE keskkonnas.

Protseduurilise modelleerimise näidetena võib tuua nii GML-i (ingl *generative modeling language*), kui ka fraktalite loomist, kuna need põhinevad samamoodi eelnevalt paikaseatud algoritmidel. Veel üks taoline lähenemine on bioloogias nn Lindenmayeri süsteem ehk L-süsteem, mida kasutatakse erinevate taimede kasvumodelite koostamiseks läbi sarnaste graafiliste struktuuride genereerimisele arvutigraafika abil. Taolise massmodelleerimise suunas on hakatud vaatama ka 3D GIS-i valdkonnas, kus CAD-is loodud (nt Trimble SketchUp, kuni 2012. aastani Google SketchUp) üksikute ruumimodelite suuremõõtkavalisse virtuaalsesse linnakeskkonda lisamine ei ole eriti tõhus ning vajab kõikide hooneobjektide üksikhaaval modelleerimist ja üleslaadimist (Müller, 2006). Ühe võimaliku lahenduse ja eeskujuna on hakatud aina enam vaatama 3D-arvutimängudes kasutatavate meetodite suunas, kus on tihti peale sarnane vajadus luua mängusiseseid linnakeskkondi võimalikult kiiresti ja tõhusalt. Mülleri väljapakutud protseduurilise modelleerimise meetod järgib neid põhimõtteid ning omab polügoonipõhise modelleerimise ees eeliseid suhteliselt väikese andmestiku olemasolu korral luua ulatuslik 3D-linnamudel.

Protseduurilise lähenemise üheks tugevuseks on seega võimalus vastavalt etteseatud reeglite ja parameetrite korrigeerimisele kiiresti ja dünaamiliselt 3D-mudelit muuta, seda nt korruste arvu või kõrguse, katusetüübi, seinamaterjali, aknatüübi jmt näol. Samas teiselt poolt on CE tarkvaras alles kõik võimalused ka interaktiivselt 3D-andmeid genereerida, mistõttu saab seda kasutada ka sarnaselt teiste levinud CAD-põhiste modelleerimistarkvaradega (Parish & Müller, 2001).

3.3 CityEngine Web Viewer

CityEngine Web Viewer näol on tegemist veebirakendusega, mis võimaldab vaadata CE 2012 versioonis loodud 3D-linnamudeleid otse arvuti internetilehitsejas (Esri, 2013b). Antud veebirakendus põhineb WebGL (ingl *web graphics library*) tehnoloogial, mis võimaldab kasutada ja kuvada 3D-sisu ilma lisatarkvara arvutisse installeerimata (Jazayeri, 2012). Riistvaraliselt piisab 3D-andmete kuvamiseks juba suhteliselt keskmiste näitajatega arvutist ning tarkvarast on toetatud kõik levinumad operatsioonisüsteemid. Toetatud veebilehitsejateks on Mozilla Firefox (alates 14. versioonist), Google Chrome (alates 20. versioonist) ning Internet Explorer, kui sellele on lisatud Google Chrome Frame-i lisamoodul.

Selle abil on võimalik eelnevalt ettevalmistatud andmeid kolmemõõtmelises ruumis kuvada, valida mudelis olevate objektide atribuute ning andmekihte sisse ja välja lülitada. Planeerimise ja planeeringute avalikkusele tutvustamise seisukohalt võib lugeda oluliseks võimalust erinevate planeeringustsenaariumite üheaegset kuvamist ja võrdlemist. Täpsemaid võimalusi kirjeldatakse joonisel 12, kus on välja toodud tüüpiline Web Vieweri visualiseerimisaken.



Joonis 12. Näide CityEngine Web Vieweri visualiseerimisaknast ja selle peamistest funktsioonidest.

3.4 Esri CityEngine võimalused ja piirangud

CE põhieeliseks teiste 3D-modelleerimist võimaldavate tarkvarade ees on eelkõige massmodelleerimise rakendamine suuremõõtkavaliste 3D-linnamudelite loomiseks etteseadud parameetrite abil. Taolise lähenemise eelised kerkivad esile ennekõike siis, kui modelleerimise tarvis on vaja luua mõnda ruumianalüüsi meetodit (vt ptk 1.4) toetav linnakeskkonna mudel ning alusandmetena on võimalik kasutada hoonete kõrgusatribuutidega varustatud aluskontuure. CE üheks tugevuseks võib lugeda ka seda, et see sisaldab lisaks traditsioonilisi modelleerimisvahendeid ning ei keskendu ainult reeglistikele.

Kuigi CE näol on tegemist pigem modelleerimistarkvaraga, siis tegelikult võimaldab see koostöös mõne muu GIS-i tarkvaraga teha ka erinevaid kolmemõõtmelise linnaruumi päringuid ja analüüse, sh mahu-, varju-, vaatevälja jm simulatsioone. CE üheks võtmefunktsiooniks on luua kiiresti GIS andmete põhjal 3D-linnamaastik, mille genereerimiseks piisab olemasolevatest atribuutidest ja eelnevalt kindlaks määratud reeglistikest. See tähendab seda, et 3D-linnamudeli loomiseks kindel vajadus olemasolevate staatiliste mudelite järele puudub ja hooned on võimalik genereerida ka ainult ehitiste 2D-andmetest.

Sarnaselt Trimble SketchUp veebikeskkonnale 3D Warehouse, kus sisaldub suurel hulgal professionaalide ja tavakasutajate 3D-mudeleid ning töövahendeid, omab ka CE tugevat

kasutajaskonna foorumit. CE veebikeskkonnas leidub lisaks olemasolevatele ruumiandmetele ka kasutajapoolseid nädisandmeid ning õppematerjale, mis annavad algajale võimaluse nende põhjal õppida iseseisvalt tarkvara paremini kasutama või siis olemasolevate andmete kohandamisel luua isiklikke 3D-mudeleid ja linnakeskkondi. Läbi CE foorumite on võimalik jagada omapoolseid lahendusi ja nädisandmeid, mistõttu on esimesed olulisel kohal ka kasutajaskonna edasisel laiendamisel.

Kuigi CE-s implementeeritud reeglistike põhine modelleerimistehnika kasutab üsna suures ulatuses ära programmeerimisega sarnaseid töövõtteid, siis tegelikult vajadus põhjalike programmeerimisoskuste järele puudub ning tarkvara on jõukohane ka eelneva programmeerimiskogemusteta kasutajatele (Edvardsson, 2013). Viimaste tarvis on reeglite koostamise tööaknas visuaalne Rule Editor haldusvahend, mis oma olemuselt sarnaneb ArcGIS-i töövoogude automatiseerimise abivahendiga ModelBuilder. Eelnimetatu kasutuskogemusega on võimalik CE-s kasutatav reeglistike loogika omandada suhteliselt kiiresti.

Samuti tuleb ära märkida CE ühilduvust ja teatavaid sarnasusi mudelprojekteerimise infomodelite ehk BIM-iga (Riigi Kinnisvara AS, 2009). BIM-i kasutamisel on mitmeid eeliseid alternatiivsete projektlahenduste võrdlemiseks ning erinevate valdkondade projektlahenduste omavaheliseks koordineerimiseks. Antud tehnoloogia abil teostatavad hoonesimulatsioonid võimaldavad paremini hinnata projekteeritava hoone või hoonestuste tulevase energiavajadusi, halduskulusid ja kasutusmugavust. CE-s saab koostada BIM-projekteerimises rakendatavaid reeglistikepõhiseid raporteid, mis võivad muuhulgas sisaldada automaatselt arvutatud tiheduseindeksit (lüh FAR, ingl *floor area ratio*), GFA-d (*gross floor area*) jmt. Mudelprojekteerimise tähtsus ja osakaal on hoonete projekteerimisele viimastel aastatel oluliselt suurenenud, kuna see võimaldab muuhulgas läbi projektlahenduste 3D-visualiseerimise ruumilist näitlikustamist, teha kiiremaid ja täpsemaid ehituslike mahtude arvutusi ja projektlahenduste vastuolude kontrolli tõhustamist (Riigi Kinnisvara AS, 2009). Kõik eelnevad aspektid on suuresti kooskõlas CE kasutamise põhivõimalustega, mis tähendab, et ka BIM-tehnoloogias ei tohiks selle rakendamise võimalusi alahinnata.

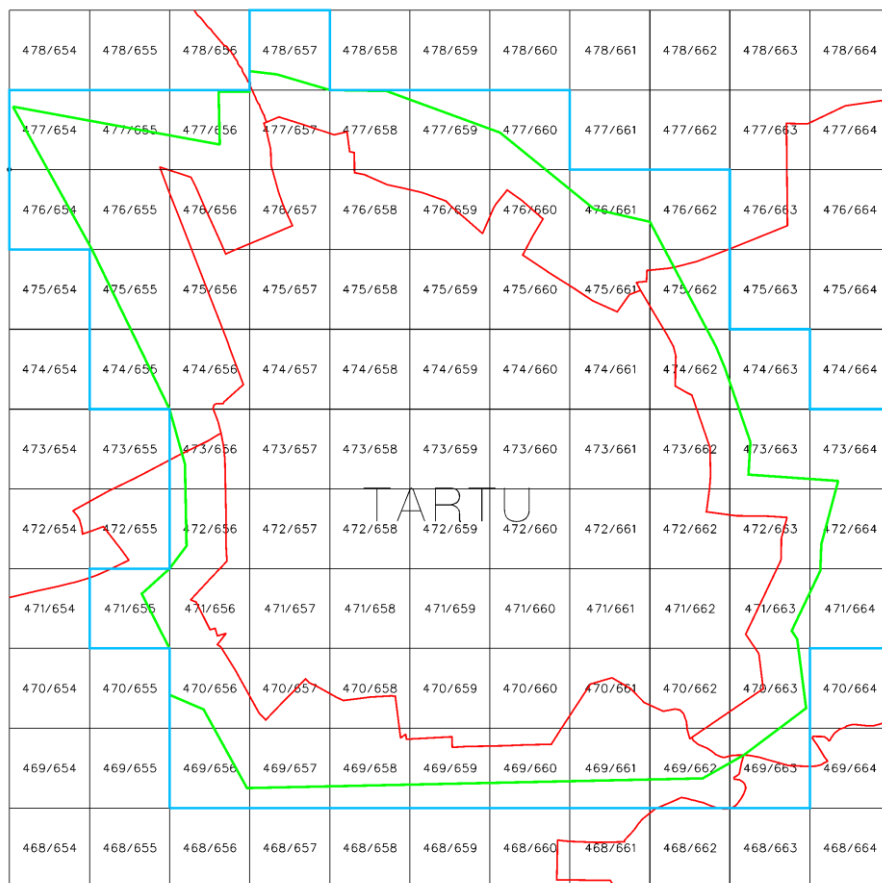
Samas tuleb CE-s arvestada puudujääkide ja kitsaskohtadega, mis võivad piirata 3D GIS-andmetega töötamist ja mille mitteamestamisel võib korrektse modelleerimistulemuseni jõudmine olla üsna aja- ja töökulukas. Üheks selliseks kitsaskohaks saab lugeda seda, et andmete importimisel geoandmebaasidest võib CE-l tekkida probleeme õige ruumikuju atribuutide andmisel, seda eelkõige joonobjektide korral. Arvestades seda, et CE-s luuakse teede telgjoontest dünaamilised teelade polügoonid, siis ei ole välistatud sellised olukorrad, kus väga väikese nurga all ristuvate joonobjektide põhjal loodavaid teede polügoone nihutatakse programmi vaikeväärtuste korral nii, et reaalne situatsioon jääb üsna kaugeks ning on vajalik käsitsi

korrigeerimine. Teiseks topoloogilise kitsaskohana tuleb arvesse võtta seda, et polügoonide loomisel puudub CE-s veel võimalus jätta neisse n -ö augud või vahed, mistõttu on soovitud tulemuse saavutamiseks vajalik käsitsi lõikamine. See aga võib osutuda üsna ajakulukaks ning algupäraseid andmeid moonutada. Viimase osas muidugi muret algandmete rikkumise osas ei ole, kuna imporditud algandmeid modelleerimise käigus otseselt ei muudeta. Loodavad või muudetavad ruumikujud salvestatakse programmisel eraldi andmekogudesse (Edvardsson, 2013). Samas oleks aga andmetega töötamine oluliselt kiirem ja tõhusam, kui oleks võimalus muuta juba algandmeid. Siinkohal on aga potentsiaalne ühilduvusprobleem algandmete ja neist tuletatavate modelleerimistulemuste vahel, mis peaksid dubleerimata esindama samu omadusi. Kõiki taolisi topoloogilisi ja sisulisi reeglipõhise modelleerimise kitsaskohti on arvesse võetud ka käesoleva töö metoodikas ning selle osas püütud neile nii tarkvara kui alusandmete seisukohalt välja pakkuda võimalikke lahendusi.

4. ANDMED JA METOODIKA

4.1 Tartu 3D-mudeli alusandmed ja loomise protsess

Antud magistritöö keskendub Tartu linnavalitsuse riigihanke „Tartu linna ja lähiala digitaalse aeropildistamise andmete ja ortofotode alusel M 1:2000 täpsusega digitaalse vektorkaardi ja hoonete 3D-mudeli koostamine ning Eesti topograafilise andmekogu (ETAK-i) väljavõtte täiendamine Tartu linna kohta 2 nähtusklassis“ tulemusena saadud maapinna reljeefi, ETAK-i ja hoonete 3D-andmetele. Käesolev andmete ülevaade põhineb Eesti Kaardikeskuse poolt koostatud aruandel (Eesti Kaardikeskus, 2009) ning Tartu linnavalitsuse riigihanke objekti nõuete tehnilisel kirjeldusel (Tartu Linnavalitsus, 2007). Samuti on kasutatud Nele Jäetma (Jäetma, 2010) ja Ingrid Järve (Järve, 2012) magistritöödes väljatoodud andmeid.



Joonis 13. Kaardistatava ala skeem.

Projektiga alustati 2007. aastal ning see anti tellijale lõplikul kujul üle 2009. aastal. Tööala hõlmas Tartu linna administratiivpiire, samuti 500-meetri laiust ala vahetult väljaspool linnapiiri (vt joonis 13). 3D-mudeli koostamisel käsitleti linna piirides olevat maa-ala ja 100 meetri laiust ala vahetult väljaspool piiri. Töö peamiseks teostajaks oli AS Eesti Kaardikeskus, kes Tartu linna hoonete 3D-mudeli valmistamisel ja ruumiandmete uuendamisel tugines Tartu linna ja selle lähiala digitaalse aeropildistamisel saadud andmetel (Eesti Kaardikeskus, 2009).

Töö aluseks olid Tartu linna ja lähiümbruse 15 cm piksli suurusega värvilised aerofotod ja 16 cm piksli suurusega ortofotod, aerotriangulatsiooni andmed, Tartu linna TIN-formaadis kõrgusmudel ning väljavõtte ETAK-i andmetest geoandmebaasina. Aeropildistamise projekti teostajaks oli Maa-ameti tellimusel Soome firma Blom Kartta Oy, kellelt pärines ka lähtematerjalina kasutatud 2007. aastal valminud digitaalne vektorkaart. Abimaterjalina kasutati Tartu linnavalitusest saadud digitaalseid andmekogusid ja krundiplaane mõõtkavas 1:500 (Jäetma, 2010).

Hoonete 3D-mudelile kehtestatud nõuded sisaldasid tingimusi, et hoonete katused ja seinad tuleb esitada eraldiseisvate objektidena ja eraldi kihtides, hoonete seinad peavad lõppema maastikumudelil ning hoonete külge ehitatud kõrvalhoonetel tuleb määrata kõrgus katust välja joonistamata ainult katuseharja kõrgema punkti järgi. Samuti tuli katustel mõõdistada kõik objektid, mille pikem külg on $\leq$ kui 3 meetrit, sh vintskapid, terrassid jm. Katusetüüpidest tuli eristada lame-, viil-, kelp-, mansard- ja hüparkatust (Eesti Kaardikeskus, 2009).

Riigihanke käigus loodud põhiaandmed on võimalik jagada järgmiselt (Eesti Kaardikeskus, 2009):

- **2D-vektorandmed**, mille hulka võib lugeda DGN-formaadis vektorkaarti ja täiendatud ETAK-i andmeid Esri geoandmebaasi formaadis;
- **hoonete 3D-mudelid**, mille all on mõeldud hoonete katuseid ja majade ruumimudeleid DGN-formaadis;
- vektorformaadis **reljeefiandmed** samakõrgusjoonte ja -punktide näol;
- TIN-formaadis **kõrgusmudel** ja rasteriseeritud **vektorkaart**.

Antud magistritöö seisukohast võib kõige olulisemaks pidada hoonete staatilisi 3D-mudeleid ja täiendatud 2D-vektorkaardi andmeid. Töö alusandmete hulgas on samuti olulisel kohal vektorformaadis kõrgusandmed, mis on edaspidi aluseks kõrgusatribuudita ETAK-i ja 2D-vektorkaardi punkt-, pind- ja joonobjektide õigele kõrgusele seadmisel ning mille metoodika kirjeldus antakse täpsemalt käesoleva töö järgnevates peatükkides.

Kuna Tartu 3D-mudeli andmed olid antud töö seisukohalt kesksel kohal, siis tuli arvesse võtta andmete kõikvõimalikke iseärasusi ja piiranguid ning seeläbi anda hinnang andmete kasutatavusele Esri CityEngine protseduurilise modelleerimise keskkonnas (vt ptk 3.1). 3D-ruumikujude vaatenurgast võib oluliseks pidada hoonete ruumilisuse saavutamiseks kasutatud metoodika omapära, mille järgi anti esmalt stereomõõdistamise käigus digitaliseeritud katuste objektidele kõrgusatribuudid ja mille abil seejärel genereeriti automaatselt katuste kõrguskoordinaadi ja kõrgusmudeli vahena hoonete seinad (Jäetma, 2010). Taolise lähenemise tulemusena moodustavad 3D-hoonete terviku mitmed eraldiseisvad seinte polügoonid, mitte ei

ole hoone 3D-mudel n-ö üks seest täidetud kast. See tähendab aga omakorda seda, et edaspidi rakendatavaid 3D-andmeid tuleb modelleerimiskeskondades käsitleda ettevaatlikkusega, kuna hoonete mudelite maht võib olla märkimisväärselt suur ning sisepindade olemasolu võib tekitada probleeme nii hoonete ümbermodelleerimisel kui teistesse tarkvarakeskkondadesse importimisel.

4.2 Andmete ettevalmistus

Käesolevas peatükis on kirjeldatud ettevalmistuslikke protseduure, mida rakendati Tartu linna 3D-mudelil enne reeglipõhisesse modelleerimiskeskonda importimist. Kuna Tartu 3D-mudeli andmestik on valdavalt DGN-formaadis, mille otsest importimist (erinevalt nt GDB-, SHP-, OBJ-, DXF- jt CE-i poolt toetatud andmeformaatidest) töökeskkonda ei toetata, siis konverteeriti andmed eelnevalt Esri geoandmebaasiks. Antud formaadi valikul lähtuti eelkõige sellest, et see võimaldas töö käigus erinevaid töökihte küllaltki lihtsalt hallata ning võrreldes näiteks SHP-formaadis failidega ühtsesse andmebaasi koondada. Samuti oli valdav osa alusandmeid 1:2000 mõõtkavas eraldiseisvates DGN-failides, mistõttu kogu linna andmete üheaegseks visualiseerimiseks ja analüüsimiseks tuli need enne töö järgmisi etappe liita ühtseks andmebaasiks.

Andmete koondamiseks ja restruktureerimiseks loodi töö käigus uus andmestruktuur, mis kohandati eelkõige andmete võimalikult üheaegset kuvamist silmas pidades. Restruktureerimine viidi läbi mitmes etapis, mille tulemusena koosnes ArcGIS-is kasutatav ja CE keskkonda imporditav andmebaas ***Tartu_3D.gdb*** järgnevatest, käesoleva magistritöö seisukohast olulistest andmekogudest (ingl *feature dataset*):

- hoonete DGN-formaadis andmed, mis korrastati ja imporditi andmekogusse ***Tartu_3D_hooned***;
- hoonete katuste DGN-formaadis andmed, mis korrastati ja imporditi andmekogusse ***Tartu_3D_katused***;
- reljeefiinfot kajastavad andmed, mis imporditi andmekogusse ***Tartu_3D_reljeef***;
- Tartu linna uuendatud ja 2D-formaadis vektorandmestik, mis korrastati ja liideti ühtseks andmekoguks ***Tartu_3D_vektor***.

Kuna 3D-hoonete seinte genereerimine arvutati Microstationi tarkvara loogikast lähtuvalt katuste ja digitaalse maapinna kõrgusmodeli Z-koordinaatide vahena (Jäetma, 2010), siis tekitati selle tulemusena suur hulk n-ö peidetud geomeetriat, mille kuvamine nõuab arvutiriistvaralt ArcGIS-i keskkonnas palju ressursse. Algselt DGN-formaadis 3D-hooned ja -katused optimeeriti ning imporditi modelleerimiskeskonda *Multipatch*-formaadis, et nendega töötamisel ei oleks probleeme ka jõudluselt vähevõimekamal arvutiriistvaral. *Multipatch*-i eelistati ka seetõttu, et

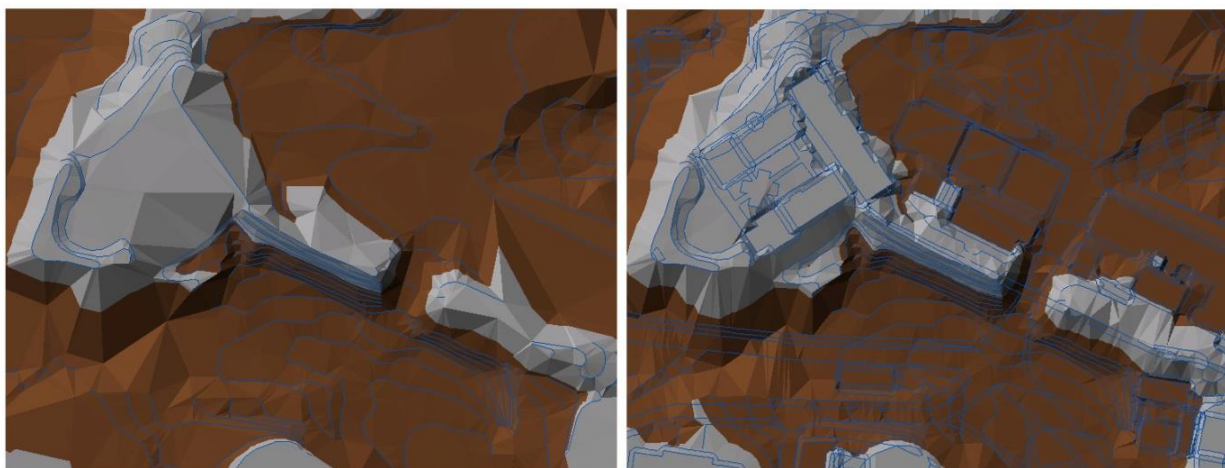
edasise modelleerimise käigus on võimalik objektielemente nii koos kui eraldiseisvalt käsitleda (Liu & Yu, 2011). Töö käigus kaaluti ka hoonete katuste ja vundamentide põhjal uute ning vähem mahukate 3D-hoonete genereerimist, kuid tulenevalt tööle seatud piirangutest ja võimalusest olemasolevaid andmeid optimeeritud kujul rakendada, otsustati jääda Eesti Kaardikeskuse poolt loodud andmete kasutamise juurde.

4.3 Maapinna kõrgusmodeli loomine Tartu linna 3D-mudeli andmetest

Realistliku linnaruumi mudeli loomisel on olulisel kohal ka võimalikult täpne maapinna kõrgusmodel. Tartu linna 3D-andmete seas on vajalik reljeefi kohta käiv info annotatsioonide, polügoonide, kõrgusjoonte ja -punktide näol olemas (Kaardikeskus, 2009). Kuna töö alusandmete seas riigihanke käigus valminud TIN-mudelit ei olnud, siis tuli olemasolevate andmete põhjal genereerida erinevad maapinna kõrgusmodelid, et analüüsida ja valida neist Tartu linna 3D-mudelile kõige sobilikum ja optimaalsem variant (arvestades alusandmestikku ning aja- ja arvutikulu).

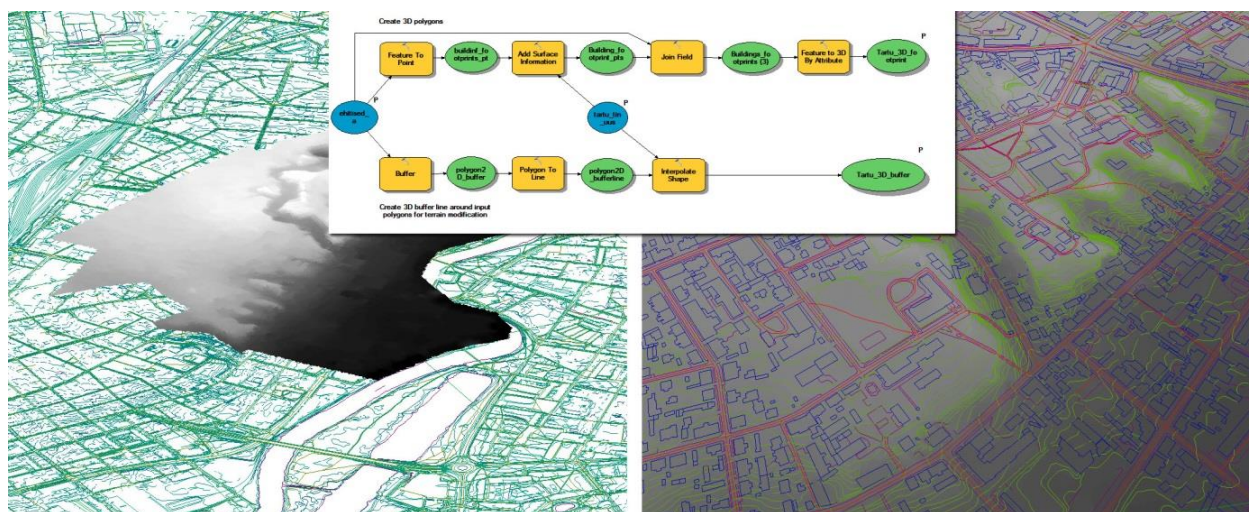
Kuna kasutada olid reljeefi joon- ja punktandmed, siis kõige sobilikumaks variandiks valiti TIN-mudeli loomine massipunktide (ingl *mass points*) ja kõrgusjoonte (ingl *hard line*) abil. Selleks genereeriti kolm erineva detailsusega TIN-mudelit, kus lisaks kõrguspunktidele ja -joontele võeti veel arvesse eelnevalt kõrgusatribuudiga varustatud hoonete vundamente, tänavaääri ning krundipiire. Sel moel loodi kõrgusmodel, mis vastaks kõige paremini reaalsuses valitsevale olukorrale. Eelnevalt nimetatud lisainfota ei pruugi linna 3D-andmed korrektselt reljeefiga sobitada ning et vältida imporditavate andmete n-ö reljeefi uppumist viidi see enne hoonete ja muu ruumiinfo lisamist korrektsele kujule.

Kuna hoonete vundamendid paiknevad teatavasti maapinnal võimalikult sirgjooneliselt, siis oli ilmselge, et neid otse kõrgusmodeli peale asetada ei oleks korrektne. Seetõttu valmistati hoonete vundamendid ette viisil, mille tulemusena need paigutuksid reljeefil õigele horisontaalpinna kõrgusele. Selleks loodi ArcGIS-i keskkonnas tööriistamudelid, mille abil paigutati hoonete vundamendid kõigepealt kõrgusmodelile ning seejärel n-ö põletati puhverkihi abil olemasoleva TIN-mudeli sisse. Tulemuseks oli reaalsusele lähedane kõrgusandmete kiht, mida saab kasutada Tartu linnaruumi mudeli kuvamiseks (vt joonis 14).



Joonis 14. Võrreldes ainult kõrgusjoonte ja –punktide põhjal genereeritud TIN-mudeliga (vasakul) annab hoonete vundamentide, teeala, maakasutuse ja piirjoontega arvestamine tõepärasema väljundi (paremal).

Pärast sobivaima TIN-mudeli genereerimist viidi see rasterkujule, kuna CE tarkvaral puudus töö kirjutamise ajal vektorformaadis kõrgusmodelite lisamise võimalus. Samas ei oleks see madalat andmemahutu ja ressursikulu arvestades ka mõistlik. Lõpliku rasterkujul kõrgusmodeli pikslisuuruseks jäi 4x4 meetrit, mis CE-sse imporditavate 3D-andmete täpsust silmas pidades osutus optimaalseimaks. ArcGIS keskkonnas tehtud rasterteisenduse tulemusel saadud TIFF-formaadis kõrgusandmed võeti edasise töö tarvis aluseks vektorkaardi kahemõõtmelistele punkt-, pind- ja joonandmetele kolmemõõtmelisuse lisamiseks. See tähendab, et kõigile Tartu 3D-mudeli 2D-andmetele lisati läbi varasemalt genereeritud kõrgusrastri kõrgusatribuut Z, et need virtuaalkeskkonnas ei paigutuks nulltasapinnale, vaid vastavalt eespool väljaarvutatud maapinna kõrgusandmetele. Tulenevalt sellest, kas tegemist oli polügoonide, joon- või punktandmetega, interpoleeriti lisatud kõrgusväärtusega 2D-andmed eelnevalt loodud kõrgusmodeli abil ArcGIS ModelBuilder modelleerimiskeskkonnas (vt joonis 15). Uuendatud vektorandmed paigutusid selle tulemusena kolmemõõtmelises keskkonnas õigele kõrgusele ka ilma täiendava kõrgusmodelile drapeerimiseta.



Joonis 15. Vektorkaardi andmed enne (vasakul) ja pärast (paremal) kõrgusmodeliga interpoleerimist.

Lisaks on Tartu 3D-mudeli katuste ja hoonete kihid juba varustatud mitmete atribuutidega, mis hõlbustavad linna hoonete kuvamist kolmemõõtmises ruumis. Esiteks, ETAK-i andmestik (hoonete kiht *ehitised_a*) sisaldas atribuuti Z, mis märgib hoonete kõrgust maapinnal. Samuti on olemas korruste kohta käiv informatsioon. Tartu 3D-majade ja -katuste andmebaas (*Tartu_3D_hooned*) oli aga varustatud kõrgusatribuudiga, mis näitab hoonete üldkõrgust maapinnast. Taoline info oli reeglipõhise modelleerimise keskkonnas edaspidi väga oluline.

4.4 Ränilinna uurimisala ettevalmistus

Uurimisala kohta eraldati ja georeferentseeriti ArcGIS-i tööriistade abil Maa-ameti ortofotod 472656, 472657, 471656, 471657, 470656 ja 470657 (vt joonis 16), mida töö järgnevatel etappidel kasutati reljeefi tekstuurimiseks ning hoonete katuste võimalikult tõepärase tekstuuridega katmiseks. 2012. aastast pärinevad ja 1:2000 mõõtkavale vastavad ortofotod liideti üheks pildiks, mis seejärel lõigati vastavalt Ränilinna linnaosa piiridele ning võttes arvesse failimahust ja pakkimistihedusest tulenevat optimaalseimat meetodit, konverteeriti PNG- ja JPEG-pildiformaatidesse. Taoline lähenemine lihtsustas ja kiirendas olulisel määral katuste tekstuurimiseks vajaliku fotomaterjali kogumise protsessi ning oli samas ka hiljem tervikliku 3D-mudeli kuvamisel arvutiressurssi silmas pidades käsitsi joonistatud tekstuuridest vähem ressursinõudlikum.

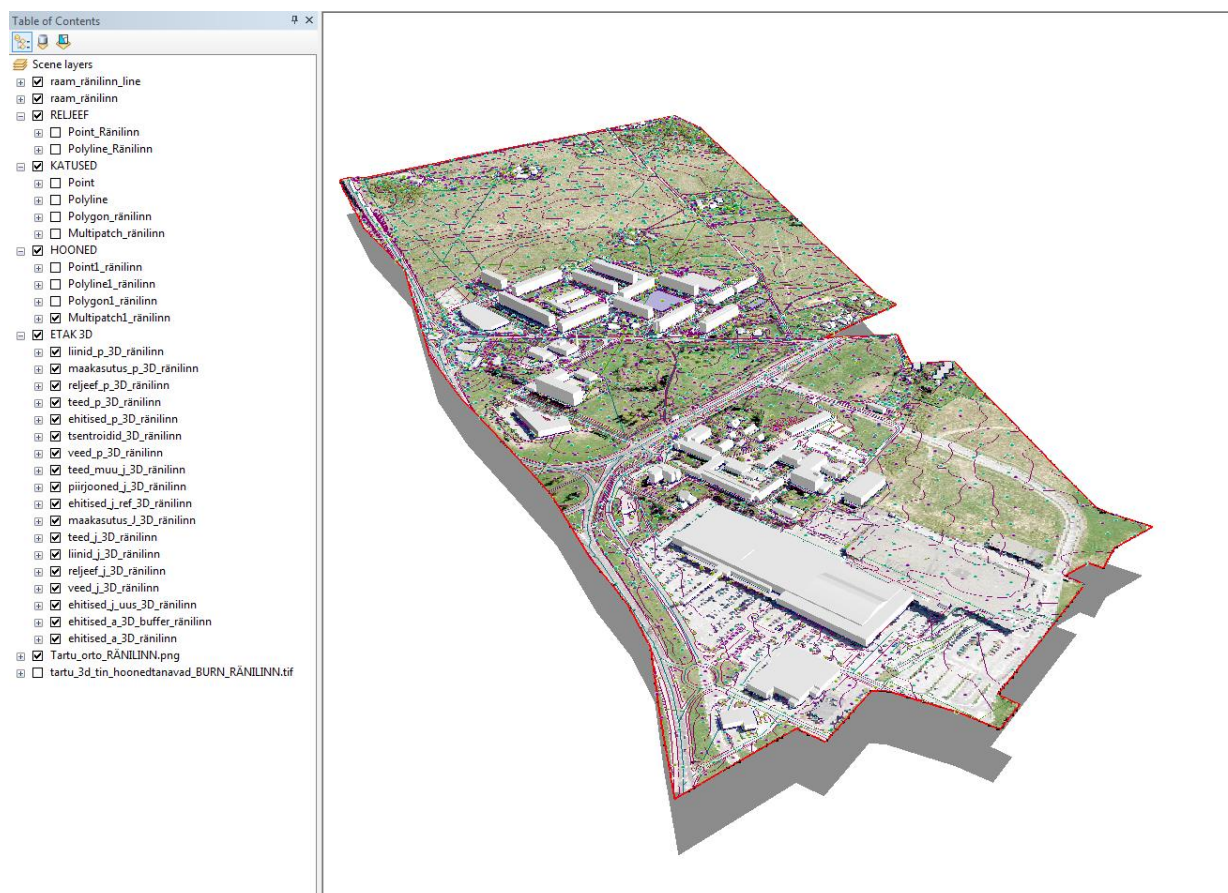


Joonis 16. Uurimisala skeem ja seda hõlmavate 1:2000 mõõtkavas kaardilehtede väljavõte.

Antud magistritöös keskenduti Ränilinna linnaosa üldplaneeringu kriteeriumitele (vt ptk 2.2), mistõttu eraldati eelnevalt loodud terviklikust andmebaasist samasuguse struktuuriga Ränilinna alamandmebaas. Lähtuvalt tööle seatud eesmärkidest võeti arvesse seda, et 3D-andmete esitamine oleks võimalikult realistlik, kuid samas optimeeritud, kavandatava hoonestuse visualiseerimine oleks dünaamiline ja ei vajaks suuremahulist käsitsi tööd ning kuidas saaks implementeerida peatükis 1.4 väljatoodud analüüsivõimalusi.

Uurimisala valikul lähtuti Tartu linnavalitsuse Ränilinna üldplaneeringu aktuaalsusest ja võimalusest antud linnaosa näitel visualiseerida väljapakutavat eskiislahendust kasutades reeglipõhise modelleerimise tehnikat. Selleks võeti arvesse Tartu linna kodulehel väljatoodud üldplaneeringute kohta käivat avalikku informatsiooni (Tartu koduleht, 2012).

Ränilinna iseloomustab ühetüübiliste hoonete rohkus ja teatud korrapärasus, mistõttu on antud linnaosa sobilik reeglipõhise modelleerimise rakendamiseks. Selle asemel, et kogu hoonestus n-ö ükshaaval üle käia, kuvatakse mudelis nii olemasolev kui planeeritav hoonestus ettemääratud modelleerimisreeglistike abil. Viimaseid rakendatakse tervel uurimisalal kas korraga või teatud hoonegruppidel eraldi. Teiselt poolt iseloomustab tulevikus üldplaneeringu järgi antud linnaosa aktiivne ehitustegevus, mistõttu on see sobilik erinevate ruumilahenduste ja -mahtude võrdlevaks visualiseerimiseks.



Joonis 17. Väljavõte ArcScene-i töökeskkonnast, kus vasakul on näha CE-sse imporditava andmebaasi algstruktuur ning paremal valik edasises töös kasutatavatest kihtidest.

Ränilinna linnaosa andmete eraldamiseks kasutati georeferentseeritud pildialust, mille välispiiride ulatuse põhjal loodi vastav linnaosa raami polügoon. Selle abil eraldati omakorda linnaosa andmed igast eelnevalt ettevalmistatud ruumiandmete geoandmebaasist ning kasutades ArcGIS-i töövahendeid korrastati eraldamise järgselt nii, et ühelgi kihil ei oleks n-ö rippuvaid geomeetriaid ega poolikuid hoonete ja hoonete katuste polügoone (vt joonis 17).

Antud tööetapi tulemusena koondati CE keskkonda imporditavad andmed ühtsesse andmebaasi *Tartu_3D_RÄNILINN.gdb*, mille algne struktuur ja kasutatavad kihid on osaliselt näha ka joonisel 17. Samas tuleb silmas pidada seda, et kõiki imporditavaid andmeid dünaamilise 3D-linnamudeli loomise protsessi ei kaasatud ning tuli anda hinnang nende kasutatavusele. Täpsemalt keskendutakse sellele järgnevates peatükkides, kus antakse ülevaade andmete CE-sse importimisest ja rakendamisest.

Ettevalmistusliku etapi tulemusena koosneb geoandmebaas eelnevalt DGN-formaadis olnud hoonete ja hoonete katuste andmestikust, samuti reljeefiandmete ning 3D-sse konverteeritud vektorandmestikust. Lisaks sisaldab andmebaas Ränilinna linnaosa eraldamiseks kasutatud raami, rasterformaadis kõrgusmodelit ning reljeefi ja hoonete katuste tekstuurimiseks vajalikke ortofotosid.

4.5 Andmete importimine Esri CityEngine keskkonda

Pärast eelmises peatükis kirjeldatud algandmete ettevalmistamist oli vajalik CE-sse sissetoodud ruumikujudest valida sellised andmed, mis on 3D-linnamudelis esitamise ja kasutamise seisukohalt kõige olulisemad. Samuti tuli edasise visualiseerimise käigus anda hinnang andmete kasutatavusele vastavalt sellele, kas ja kuidas on nende rakendamine CE-s võimalik ning millist olulist lisaväärtust need dünaamilise linnamudeli koostamise seisukohalt omavad. Sellele keskendutakse täpsemalt käesoleva magistritöö tulemuste ja arutelu peatükis (vt ptk 5). Siinkohal on oluline ära tuua need kihid, mida nii staatiliseks kui dünaamiliseks visualiseerimiseks kasutati. Nendeks olid:

- Tartu linna 3D-mudeli andmetest:
 - *Multipatch*-formaadis katuste 3D-ruumikujud;
 - *Multipatch*-formaadis hoonete 3D-ruumikujud;
- 3D-sse konverteeritud vektorandmetest:
 - teede punkt- ja joonobjektid (*teed_p*, *teed_j*);
 - maakasutust märkivad punkt- ja joonobjektid (*maakasutus_p*, *maakasutus_j*);
 - ehitiste punktobjektid ja pindobjektidena aluspinnad (*ehitised_p*, *ehitised_a*);
 - tehnovõrkude punkt- ja joonobjektid (*liinid_p*, *liinid_j*);
 - *Multipatch*-formaadis torujuhtmete 3D-ruumikujud (*liinid_j*);

- Ränilinna üldplaneeringu andmetest:
 - planeeritav teedevõrgustik joonobjektidena;
 - planeeritavate hoonete ehitiste aluskontuurid pindobjektidena;
 - planeeritav rohekoridor joonobjektina;
- ortofotoga drapeeritud kõrgusandmete rasterfail.

4.5.1 Reljeefi ja aluskaartide importimine

Pärast tööakende ülesseadmist on kõige tüüpilisem viis CE-s modelleerimisega algust teha reljeefi ja sellele drapeeritava ortofoto lisamisega. Nendeks võivad olla nii tavalised pildifailid, aga ka GEOTif formaadis asukohaandmeid sisaldavad DEM failid. Kuna töö kirjutamise ajal toetas CE ainult rasterformaadis reljeefifaile, siis kasutati antud tööetapis eelnevalt ArcGIS-is ettevalmistatud TIF-faili *RÄNILINN_DEM.tif*, millele on hiljem lisatud sama ulatusega ja failimahtu silmas pidades kõige optimaalsem, JPEG-formaadis tekstuurifail *RÄNILINN_ORTO.jpg*.

4.5.2 Joon- ja punktobjektide importimine

Järgmine tööetapp nägi ette valitud vektorkaardi joon- ja punktobjektide importimist CE-sse. Selleks selekteeriti CE keskkonnas GDB-importimise töövahendi abil eelnevalt korrastatud Ränilinna geoandmebaasist kõik vajalikud kihid ning viidi korraga tööaknasse.

Kõigil valitud joonobjektidel rakendati automaatset korrastamise töövahendit *Cleanup Graph Tool*, mis korrigeeris importimise käigus tekkinud konfliktid jooneverteksid, ning samuti reljeefimudeliga ühildamise tööriista (ingl *Align Graph To Terrain*). Selle näol on tegemist ühe variandiga kolmest võimalikust, mille tulemusena ühildatakse kas joonobjektid või staatilised 3D-mudelid (s.o mõnes teises modelleerimistarkvaras loodud täpsemad 3D-mudelid) reljeefiga. Teise lahendusena ühildatakse reljeef vastavalt seda katvate ruumiobjektidega (nt teelade servad jm).



Joonis 18. Väljavõtted imporditud punkt-, joon-, pind- ja 3D-objektidega CE-i tööaknas, millele ei ole täpsustavaid ruumikujusid veel omistatud.

Kuna aga kõik vektorandmed on valdavalt eelnevalt ArcGIS-is reljeefiga ühildatud, siis ka CE-sse importimise käigus programm suuremaid ruumilisi konflikte korrigeerima ei pidanud (vt joonis 18 vasakul).

4.5.3 Pindobjektide ja 3D-mudelite importimine

Lisaks andmete importimise viisarditele on võimalik ruumikujusid tööaknasse viia ka n-ö lohistamise (ingl *drag and drop*) meetodil. Selleks tuleb selekteerida soovitud geoandmebaas või kiht ning see CE-i tööaknasse ehk Viewporti lohistada. Antud viisil on Ränilinna modelleerimiskeskonda, kus on juba esindatud tekstuuritud reljeef, erinevad punkt- ja joonobjektid, lisatud korrastatud ETAK-i kiht *ehitised_a* ning 3D-hoonete ja -katuste mudelid. Kuna kiht *ehitised_a* on sarnaselt eespool imporditud joon- ja punktobjektidele eelnevalt reljeefiga ühildatud, siis täiendavalt korrigeeriti reljeefi suhtes ainult 3D-hooneid (vt joonis 18 paremal). Tööriista *Aling Shapes to Terrain* abil korrigeeriti hoonete 3D-mudeleid nii, et need paigutuksid reljeefile võimalikult täpselt. Sellega jõuti lõpule modelleerimise esimeste etappidega ning ArcGIS-is eelnevalt korrastatud Tartu linna 3D-mudeli andmed olid üle toodud CE keskkonda.

4.6 Imporditud staatiliste andmete visualiseerimine dünaamilises 3D-linnamudelis

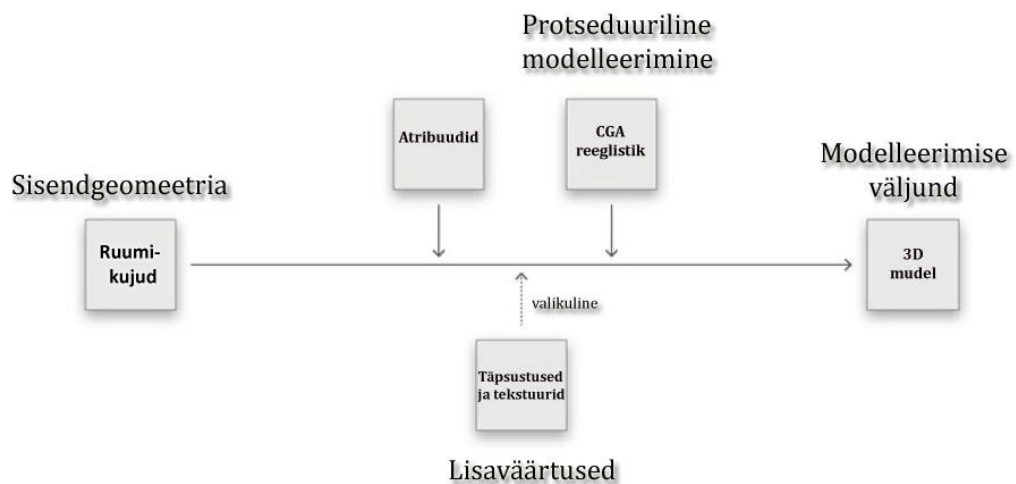
Kuna andmed on CE-s kasutamist silmas pidades eelnevalt ettevalmistatud, siis nende modelleerimiskeskonda importimisele kulunud aeg oli suhteliselt lühike. CE kasutatav andmekauastade haldus näeb ette seitset alamkausta, mille vahel loodava 3D-linnamudeli projekti andmed jaotatakse:

- **Assets** – erinevad lisaandmed, mis on vajalikud mudeli loomiseks (nt hoonete tekstuurid);
- **Data** – imporditavad andmed GDB- või SHP-andmeformaadis (sh *Tartu_3D_RÄNILINN.gdb*);
- **Images** – reljeefitekstuurid (aero- või ortofotod), millega kaetakse kõrgusandmed;
- **Maps** – rasterformaadis kõrgusandmed, aga ka nn takistuskaardid;
- **Models** – mõnest teisest modelleerimiskeskonnast pärit 3D-mudelid (nt DAE-, OBJ- või KMZ-formaadis);
- **Rules** – CGA-reeglifailid, mille abil defineeritakse imporditud objektide väljanägemine linnamudelis;
- **Scenes** – tööakna failid ehk nn stseenid, kus imporditavaid andmeid kuvatakse);
- **Scripts** – Python-i skriptid.

Tulenevalt andmekauustade loogikast paigutati ettevalmistatud Ränilinna piirkonna andmed vastavatesse programmile nähtavatesse kaustadesse.

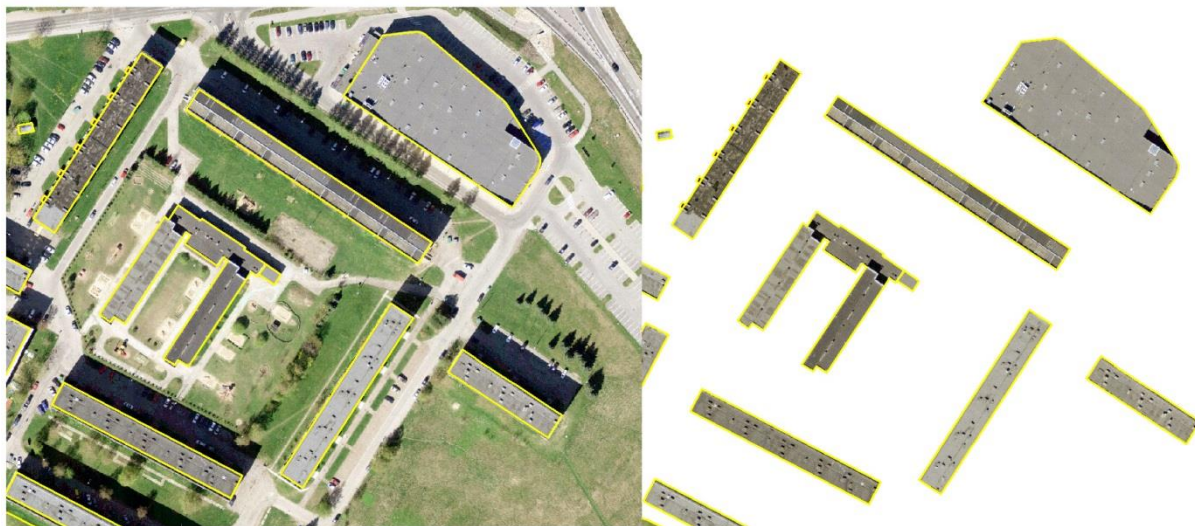
4.6.1 3D-hoonete katuste drapeerimine ortofotodega

Kuna pärast andmete importimist CE modelleerimiskeskonda näeb töövoog (vt joonis 19) ette Ränilinna LoD2 taseme mudeli varustamist erinevate mudeli tõepärasust suurendavate lisaatribuutidega, siis ühe täpsustava asjaoluna kasutati mudeli 3D-hoonete katuste drapeerimist vastava ortofoto põhjal saadud tekstuuridega.



Joonis 19. Protseduurilise modelleerimise protsessi skemaatiline ülevaade.

Valmiskujul hoonete katuste puudumisel võiks antud etapi alternatiiviks (vajalike lisaatribuutide olemasolu korral) olla ka katuste reeglipõhine modelleerimine, kus tulenevalt olemasolevatest katusetüüpi märkivatest atribuutidest (nt kas hoone puhul on tegemist viil-, lame- vm katusetüübiga) on võimalik suhteliselt vähese vaevaga katused modelleerida ja seejärel tekstuuridega katta. Kuna aga nii hoonete kui hoonete katuste 3D-ruumikujud olid eelnevalt olemas, siis täiendavalt ei olnud viimaseid tarvis luua ning piisas tekstuurimisest. Antud tööetapi tulemusena lisati kõigile hoonete katustele realistlikud tekstuurid, mille geograafiline asukoht ühtis drapeerimist vajavate objektidega. Selleks eraldati eelnevalt ArcGIS-i töövahendite abil töös kasutavast ortofoto rastrist katuste tekstuurid vastavalt Tartu 3D-mudeli loomise riigihanke käigus uuendatud ETAK-i *ehitised_a* kihile. Tulemuseks oli eraldatud katuseobjektide PNG ja JPEG-formaadis rasterkiht (vt joonis 20), mida järgnevalt kasutati reeglipõhisesse modelleerimiskeskonda importimiseks.



Joonis 20. Katuste drapeerimise tarvis ortofotolt (vasakul) vastavate hoonete kontuuride abil katusetekstuuride eraldamine (paremal).

Katuste drapeerimiseks loodi CE keskkonnas lühike CGA-reegel (vt ptk 3.2), kus vastavalt drapeeritava objekti ulatusele lisatakse eelnevalt ettevalmistatud katusetekstuuride rasterkiht. Olenevalt sellest, kas lähteobjektiks on hoone või selle katus, kleebitakse järgnevalt see soovitava 3D-mudeli peale. Tekstuurimiseks valiti hoonete katuste ruumikujude kiht, kuna edasise töö käigus võib osutuda vajalikuks hoonete 3D-mudelite eraldiseisev käsitlemine ja fotofassaadidega katmine ning taolise lähenemise abil on võimalik katuseteksture hoonetest sõltumatult modifitseerida.

Koostatud ja katustele rakendatud reegli ülesehitus on välja toodud joonisel 21, kus defineeriti drapeerimiseks kasutatud ortofoto nimetus ja faili asukoht. Samuti on määratletud ortofoto ulatus ja paiknemine vastavalt sellele kihile, millel seda rakendatakse. Antud atribuudid peavad olema nii tekstuuri- kui tekstuuritaval kihil samade väärtustega.

```
attr satellitePicture = "maps/Tartu_orto_RÄNILINN_katused.png"

attr sizeX          = 1156.625
attr sizeZ          = 1848.750
attr offsetX        = 656482.688
attr offsetZ        = -6472015.438

Lot -->
    setupProjection(0,world.xz,sizeX, -sizeZ, offsetX, offsetZ)
    projectUV(0)
    texture(satellitePicture)
```

Joonis 21. Väljavõte katuste drapeerimiseks koostatud CGA-reeglistikust.

Antud tööetapi tulemusena kuuluvad hoonete 3D-katuste juurde ka ortofotolt eraldatud katusetekstuurid, mis lisavad olemasolevate hoonete 3D-mudelile oluliselt realistlikkust ning pärast edasist fotofassaadidega katmist lubavad Ränilinna üldplaneeringu piirkonna LoD2 (vt ptk 1.2) mudelit käsitleda juba detailsemas astmes (vt joonis 22). Antud meetodit on edaspidi

võimalik vajadusel rakendada ka ülejäänud Tartu linna 3D-mudelil ning seeläbi suhteliselt kiiresti lisada tõepärasust olemasolevatele andmetele.



Joonis 22. Drapeerimise etapi tulemusena kaeti olemasoleva LoD2 mudeli katused (vasakul) realistlike katusetekstuuridega (paremal).

4.6.2 Võimalused 3D-hoonete seinte fototekstuurimiseks

Üheks lisavõimaluseks 3D-linnamudeli realistlikkuse suurendamiseks võib pidada LoD1/LoD2 kastmudeli hoonete seinte drapeerimist fototekstuuridega. Samas tuleb märkida seda, et kuigi ortofotode abil on 3D-hoonete katustele tekstuuride lisamine suhteliselt lihtne ja automaatne protsess, siis hoonete seinte fototekstuurimiseks antud meetod ei sobi. Samas on CE-s olemas töövahend (ingl *Facade Wizard*), mis võimaldab nii enda tehtud fotode kui Google Street View andmete põhjal luua hoonetele reeglipõhised dünaamilised fotofassaadid, mida saab hiljem kasutada sarnastel ehitistel uuesti. Siinkohal on mõeldud eelkõige seda, et kuigi taoline võimalus on olemas, siis teksture lihtsalt n-ö ei venitata hoonete seintele, vaid järgitakse nende korruselisust ja korduvaid fassaadielemente. Tööriista abil kõigepealt rektifitseeritakse fassaadile drapeeritav tekstuur, mille järel eraldatakse korduvad fassaadielemendid. Viimaste mustrid defineeritakse vastavas reeglifailis (nt *TYYP_Ridaelamu.cga*), mida hiljem kas tulenevalt hoone mõõtmetest ja korruselisusest fassaadile lisatakse. Taoline lähenemine tuleb kasuks siis, kui hoone fassaadil võib leida korduvaid mustreid ja mõnda hoone osa ei ole võimalik mingil põhjusel täies mahu või osaliselt pildistada. Taolisel viisil loodi nt Aardla 154 ja 156 ridaelamute fassaadid, kus kummagi hoone ühe boksi Google Street View-st võetud fassaadielementide põhjal sai modelleerida kogu hoone fotofassaad (vt joonis 23 vasakul). Teiseks samaväärseks alternatiiviks võib pidada juba valmis olevate ja tekstuuridega varustatud 3D-mudelite n-ö taaskasutust. Viimane võib osutuda kasulikuks siis, kui on vaja lühikese aja jooksul lisada paljudele ühetüübilistele hoonetele fassaaditekstuurid – kõige paremaks sellekohaseks näiteks saab lugeda 5-korruselisi paneelilamuid (vt joonis 23 paremal).



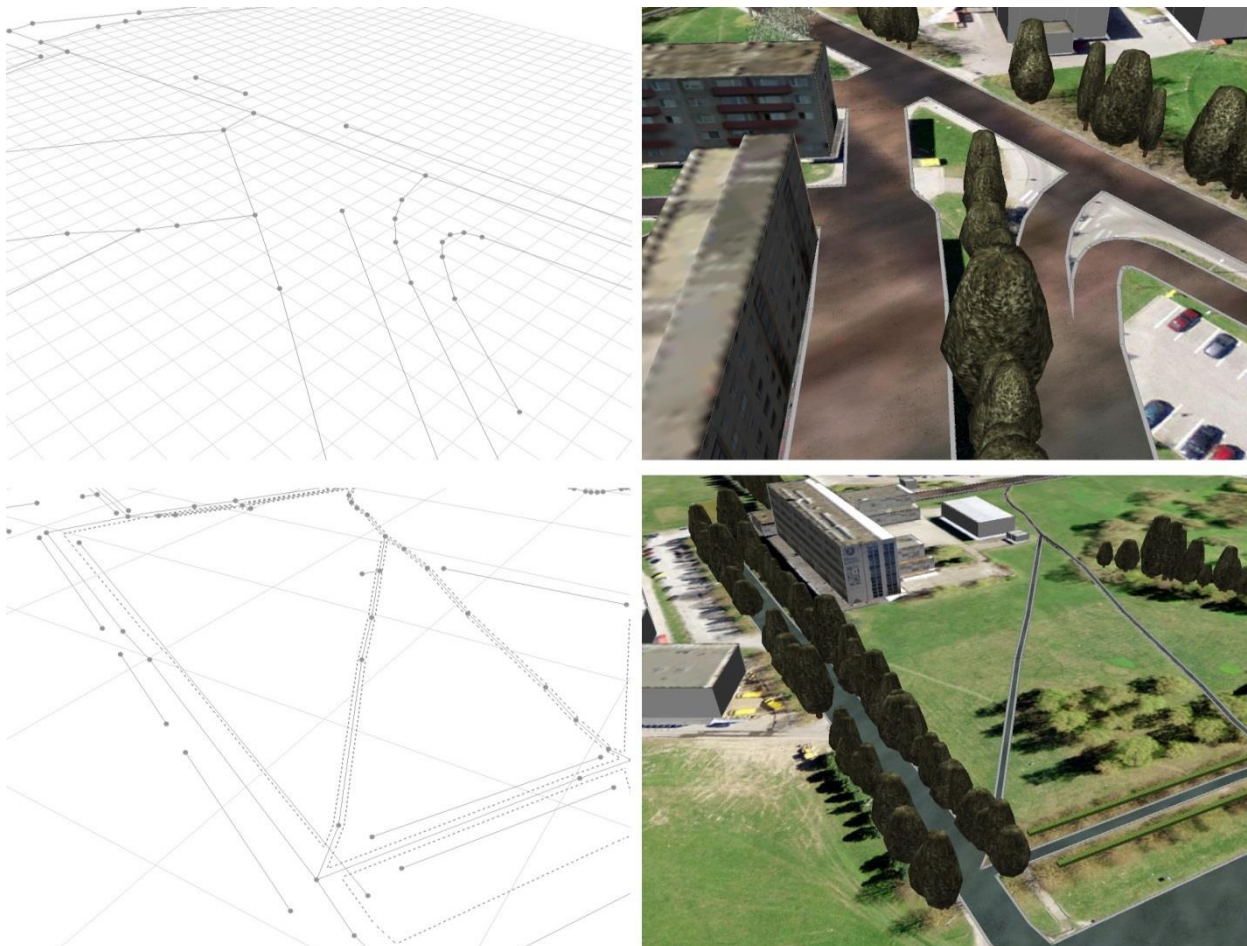
Joonis 23. Vasakul fotofassaadidega Aardla 154 ja 156 ridaelamud, kus on kasutatud ühe boksi fassaadielemente, ning paremal ühetüübilised paneelalamud, mille fassaadidega katmisel kasutati CE-s nii eespool kirjeldatud kordusmustrite loomise kui ükshaaval mudelile lisamise võimalusi.

4.6.3 Vektorkaardi joonobjektid

Kuna Tartu linna 3D-mudeliga kaasaskäivatel joon- ja punktoobjektidel puudusid CE-keskkonda importimise järgselt realistlikud 3D-leppemärgid, siis kasutades reeglipõhise modelleerimise võimalusi loodi kõigile peatükis 4.5 nimetatud vektorkaardi ja Ränilinna üldplaneeringu andmetele vastavad 3D-ruumikujud. Modelleerimiseks kasutati käesoleva töö andmete spetsiifikat silmas pidades nii CE näidismudelite kohandatud andme- ja reeglikogusid, aga ka töö autori enda poolt loodud modelleerimisreeglistikke.

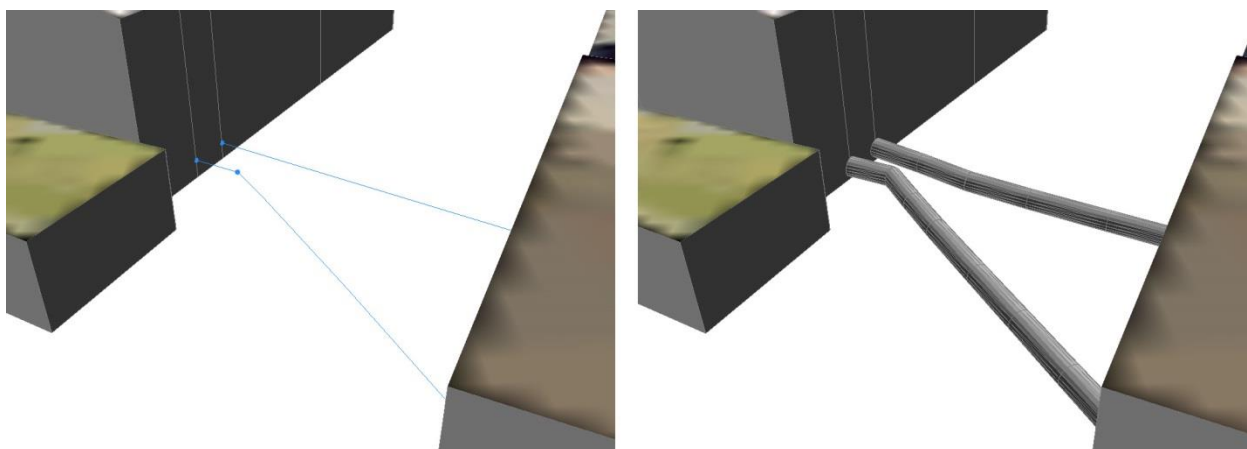
Võib öelda, et CE-modelleerimiskeskkonnas on joonobjektidel kõige olulisem väärtus, seda eriti teedevõrgustiku näol. Eelduseks on pidev ja hierarhiliselt õige teedevõrgustik (Despine & Baillard, 2011), kuid kuna importimise järgselt käsitletakse kõiki joonobjekte eraldi lõikudena (st, et kõik jooned on olenemata samast tüübist lõikumiskohtadest eraldatud), siis oli järgnevalt vajalik joonobjektide, s.o teed, liinid, maakasutus jt, topoloogiliselt korrekse võrgustiku loomine. Selleks, kasutades CE modelleerimisvahendeid *Cleanup Graph* ja *Intersect Segments*, korrastati imporditud joonobjektid ja loodi vastavalt joonte tüübile lõikumiskohad. Viimaste puudumisel ei oleks edaspidi võimalik modelleerida ka teede ristumiskohti.

Antud tööetapi tulemusena korrastati CE keskkonnas joonobjekte sisaldavad ja teedevõrgustiku modelleerimise seisukohast olulised kihid *teed_j* ning *maakasutus_j* (vt joonis 24). Maakasutuse joonobjektid täiendavat remodelleerimist ei vajanud ning neid võis CE-s rakendada olemasoleval kujul. Teedevõrgustiku korrastamisel kasutati võimalikult suures ulatuses CE automaatikat, mis üldises plaanis end küll õigustas, kuid sellest hoolimata vajasisid andmed ka kasutajapoolset käsitsi modelleerimist. Teede ruumiliseks kuvamiseks rakendati laiuse ja teekatte atribuute.



Joonis 24. Väljavõtted visualiseeritud staatilistest teede ja maakasutuse joonobjektidest (vasakul), mida on edaspidi võimalik reeglipõhise automaatika abil dünaamiliselt muuta (paremal).

Eraldi tasub välja tuua tehnovõrkude kihi (*liinid_j*) torujuhtmete visualiseerimise metoodikat (Brychtova & Vozenilek, 2011). ArcGIS 3D Analysti töövahendeid kasutades konverteeriti torujuhtmete joonobjektid 3D-sümboolikaga varustatud *Multipatch*-objektideks, mille tulemusena oli torujuhtmeid võimalik CE-s visualiseerida nagu hooneid ja nende katuseid juba importimise järgselt 3D-objektidena (vt joonis 25).



Joonis 25. Torujuhtmetele 3D-ruumikujude andmiseks on võimalik need eelnevalt *Multipatch*-formaati konverteerida ja seeläbi importimise järgselt ruumiliselt visualiseerida.

4.6.4 Vektorkaardi punktobjektid

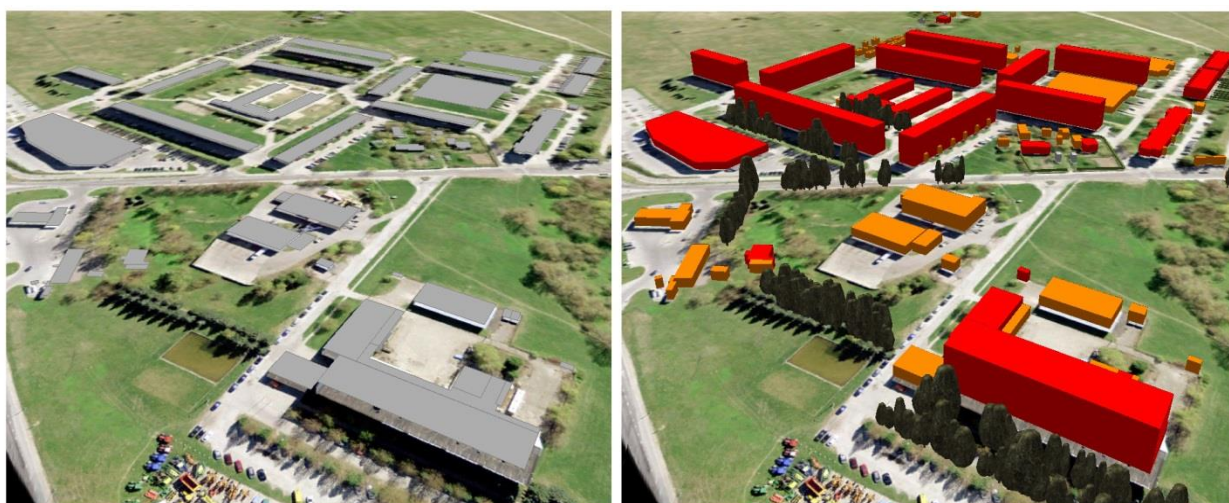
Kuna punktandmete näol on tegemist ühe lihtsaima ruumiandmete liigiga, siis võib lugeda ettevalmistatud punktobjektide CE keskkonnas visualiseerimist käesoleva töö üheks kõige kiiremaks tööetapiks. Sarnaselt eelnevalt kirjeldatud maakasutuse joonobjektidele ei vajanud imporditud punktobjektid täiendavat ruumilist ümberpaigutamist ega mõnel muul viisil modifitseerimist. Vastavalt vektorkaardi atribuudile KOOD anti CE-s staatilised 3D-ruumikujud kividele, üksikutele puudele, lipuvarrastele, prožektoritele ning elektri- ja valgustuspostidele (vt joonis 26). Visualiseerimiseks kasutati CE-s juba olemasolevate nädisandmete ruumikujusid, mida kohandati vastavalt käesoleva töö andmete spetsiifikale.



Joonis 26. CE-s genereeriti staatilistele punktobjektidele 3D-ruumikujud, mida on hiljem võimalik parameetriselt muuta, aga ka teiste 3D-objektidega asendada.

4.6.5 Vektorkaardi pindobjektid

Käesoleva töö käigus imporditi staatiliste ja olemasolevate 3D-hoonete kõrval ka 3D-sse konverteeritud vektorkaardi hoonete aluspinnad, mida kasutati dünaamiliste hoonete mudelite loomiseks vastavalt nende kõrgusele ja korruste arvule (vt joonis 27).



Joonis 27. ETAK-i hoonete aluspindadest (vasakul) genereeriti dünaamilised 3D-ruumikujud, mida on vastava reeglistiku abil võimalik vastavalt modelleerija soovile kohandada.

Hoonete visualiseerimiseks rakendati käesoleva töö tarvis CE nädisandmete põhjal koostatud ja kohandatud reeglistikku „*Hoonete planeerimine.cga*“ (vt lisa 3), mille eesmärgiks on võimaldada kiiresti parameetriselt muuta kõigi hoonete (aga ka üksikute ehitiste) ruumikujusid ning paigutust vastavalt modelleerija soovile. Kuna reeglistik on loodud eelkõige planeeringuandmete kuvamiseks, siis keskendutakse sellele peatükis 4.7, kus antakse täpsem ülevaade reeglistiku võimalustest 3D-linnamudeli dünaamiliseks visualiseerimiseks.

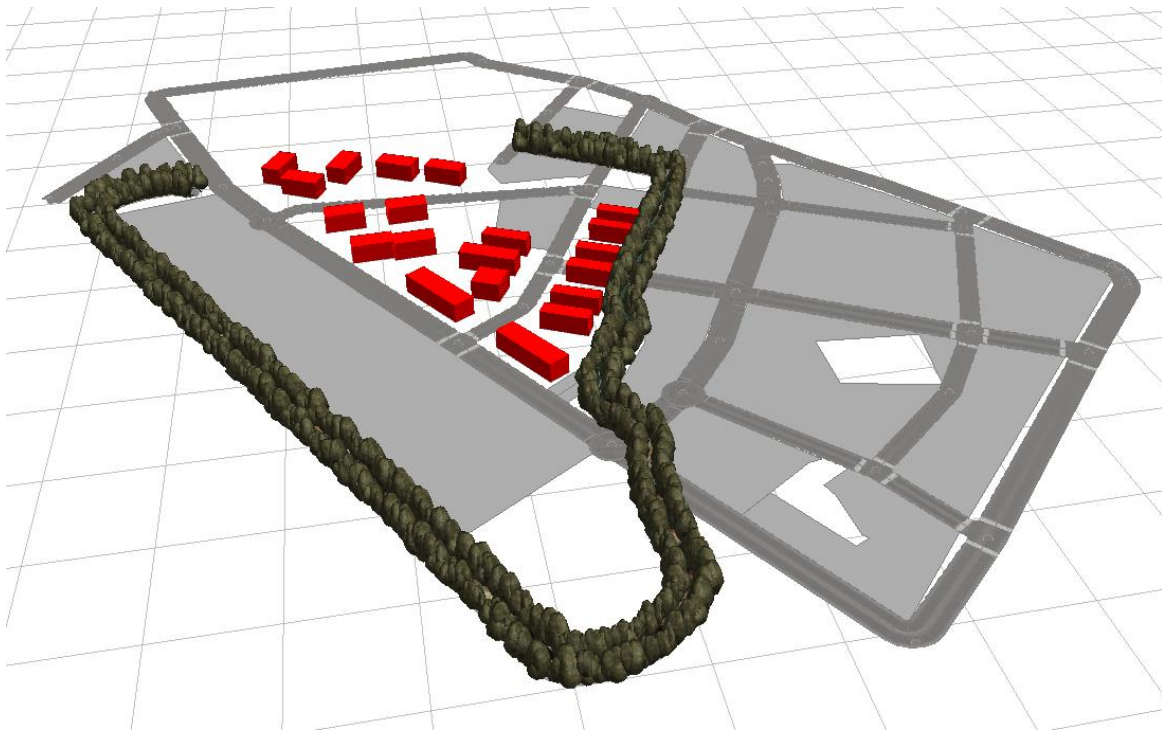
Vektorkaardi hoonete vundamentide põhjal on antud reeglistiku abil genereeritud hoonete 3D-mudelid vastavalt eespool seatud ja korrastatud korruste arvu atribuudile. Kuigi sel viisil saadud hooned on kohati üldisemad ning ei sisalda nii palju erinevaid katusegeomeetriaid, on tulemused võrreldes olemasolevate hoonete 3D-mudelitega siiski üsna sarnased ning erinevalt staatilistest mudelitest antud reeglistiku abil interaktiivselt muudetavad.

4.7 Ränilinna üldplaneeringu pind- ja joonobjektide visualiseerimine 3D-mudeli abil

Ränilinna üldplaneeringu andmete visualiseerimiseks loodi CE modelleerimiskeskonnas eeskirjad ja reeglistikud, mis võimaldasid imporditud planeeringuandmete parameetreid suhteliselt kiiresti ja lihtsalt muuta. Reeglistike loomise üheks eesmärgiks oli, et tehtud muudatused kajastuksid mudelis koheselt ning neid oleks võimalik kuvada koos eespool imporditud Tartu linna 3D-mudeli staatiliste andmetega.

Pärast olemasolevate Tartu linna 3D-andmete lisamist kasutati loodavas mudelis ära Ränilinna üldplaneeringu andmestikku (vt lisa 1), mille hulka võib lugeda planeeritavat maakasutusplaani ja teedevõrgustikku, hoonemahtude paigutamise põhimõtteid, maakasutuse juhtotstarbeid ning maa-alade üldiseid kasutamise- ja ehitustingimusi arengualade kaupa. Samuti võeti käesoleva magistr töö kirjutamise raames osa üldplaneeringu avalikest aruteludest 10. ja 26. aprillil 2013. aastal. Oluliseks abimaterjaliks oli ka Ränilinna linnaosa (Aardla, Ringtee ja Raudtee tänavate ning Ülenurme valla piiri vahelise ala) üldplaneeringu keskkonnamõjude strateegilise hindamise aruanne (Hendrikson & Ko, 2013).

Üldplaneeringu andmete visualiseerimiseks vajalikud alusandmed ning maakasutusplaanid saadi planeeringufirma Hendrikson & Ko kartograafia ja geoinformaatika osakonnast ning need viidi vastavusse CE-s kasutatava andmestruktuuriga. Töö eesmärgist ja CE modelleerimiskeskonna eripärast sõltuvalt oli kaheks peamiseks imporditavaks geomeetriatüübiks joon- ja pindobjektid, mis olid edaspidi aluseks maakasutusplaani arengualade ning planeeritava tänavavõrgustiku visualiseerimisel. Kuna sarnaselt Tartu linna 3D-mudeli andmetele olid need DGN-formaadis, siis rakendati neile samasuguseid andmetöötluse võtteid nagu Tartu linna 3D-mudeli joon-, ja pindobjektidel (vt ptk 4.2).



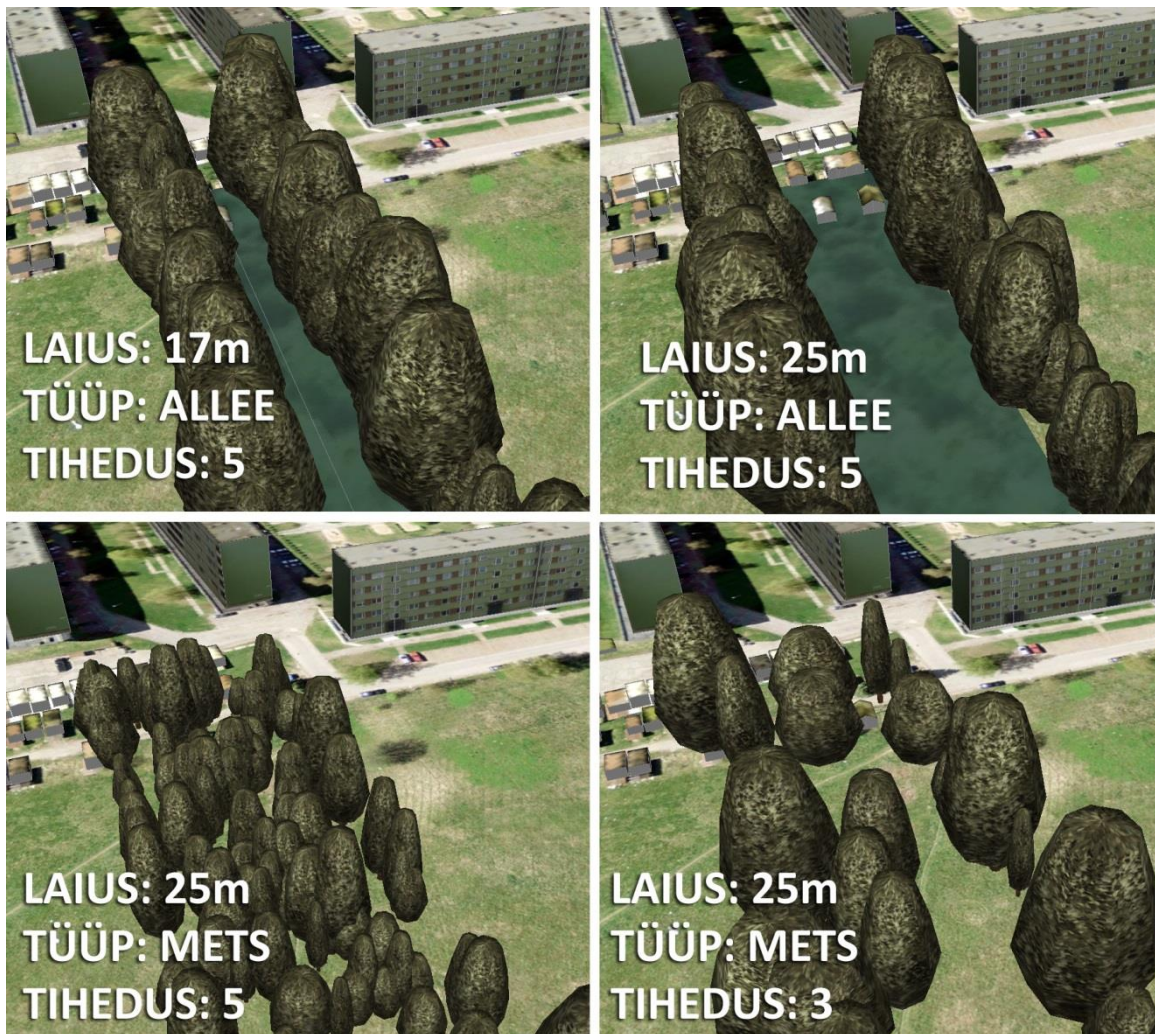
Joonis 28. Ränilinna üldplaneeringu dünaamilise 3D-mudeli alusandmed visualiseerituna CE keskkonnas.

Käesoleva töö raames koostatud reeglistike abil visualiseeriti järgnevad üldplaneeringu nähtused (vt joonis 28):

- planeeritav teedevõrgustik (jaotustänavad laius 24m ja kõrvaltänavad laius 17m);
- kavandatav rohekoridor;
- maakasutusplaani arengualad 1 kuni 16;
- 2004. aasta detailplaneeringu hooned.

Alusandmete visualiseerimiseks kasutati nii CE abifailides leiduvaid näidisreeglistikke kui ka antud töö käigus koostatud dünaamilist planeerimise reeglistikku „*Hoonete_planeerimine.cga*“ (vt lisa 3).

Teedevõrgustiku ja kavandatava rohekoridori modelleerimiseks rakendati samasuguseid reeglifaile, mida kasutati Tartu linna staatiliste 3D-andmete, s.o maakasutuse ja teede joonobjektide, visualiseerimiseks. Taolise lähenemise tulemusena on edaspidi võimalik nii teedevõrgustiku kui rohekoridori laiust jooksvalt muuta ning sarnasel meetodil manipuleerida ka rohevõrgustiku tihedusega. Kuna üldplaneeringu arutelude käigus on oluliseks vaidluskohaks planeeritava rohekoridori laius, siis sellest tulenevalt on alusandmetest imporditud joonobjektid konverteeritud 3D-sse nii, et nende vastavaid parameetreid (sh laius, kõrgus, tihedus ja tüüp) muutes oleks võimalik paremini hinnata sobivust olemasolevasse linnaruumi (vt joonis 29).



Joonis 29. Planeeritava rohekoridori visualiseerimine on lahendatud parameetrilise reeglistiku abil nii, et vastavaid atribuute muutes on võimalik selle väljanägemist dünaamiliselt muuta.

Üldplaneeringu maakasutusinfo visualiseerimiseks rakendati eespool nimetatud hoonete planeerimise reeglistikku, mis koostati CE nädisandmete eeskujul ning mille eesmärgiks oli luua planeerimise protsessi hõlbustav parameetiline abivahend arengualade, aga ka hoonete dünaamiliseks visualiseerimiseks. Reeglistiku abil muudetavad parameetrid on välja toodud joonisel 30 ning neid on olenevalt modelleerija soovist võimalik rakendada nii üldplaneeringu arengualadele, aga ka hoonete aluspindadele (nt ptk 4.6.5 loodud vektorkaardi pindobjektidele või 2004. aasta detailplaneeringu hoonetele).

Kuigi reeglifail on üks, siis mõnevõrra erineb, kuidas selle abil on võimalik üldplaneeringu arengualasid või üksikuid hooneid visualiseerida. Antud reeglifaili võib jaotada hoonete ruumikujude ja paigutuse, fassaadi modelleerimise ning hoonestusala juurde kuuluvate rohealade parameetriteks (vt joonis 30).

Esimesed, hoonete ja arengualade hoonestuse ruumikujude muutmise parameetrid, võimaldavad üksikhoonete puhul valida hoonete mahtusid nagu korruste arv ja selle vastavad atribuudid, aga ka LoD1 mudeli värvust ja läbipaistvust. Kui aga modelleerimise aluseks on arenguala, siis sel

puhul lisanduvad hoonestuse paigutuse ja nihutamise parameetrid. Viimase puhul on võimalik planeeritava hoonestuse juurde lisada ka rohealade komponendid nagu puud ja hekid ning neid muuta vastavalt omistatud kõrguse ja tiheduse atribuutidele.

The screenshot displays a complex parameter configuration interface for a 3D modeling application. It is organized into several vertical panels, each containing a list of parameters with corresponding controls:

- Hoone kõrgus (Building Height):** Includes parameters like *Korruste_arv_Min*, *Korruste_arv_Max*, *Varieeruvus*, *Korruse_kõrgus*, and *Esimese_korruse_kõrgus*, each with a rule-based dropdown and a slider.
- Hoone nihutamine (Building Offset):** Parameters include *Nihutamine_t2nav*, *Nihutamine_krundipiirist*, *Nihutamine_eest_tüüp*, and *Nihutamine_eest_kaugus*, with rule-based dropdowns and sliders.
- Hoone paigutus (Building Placement):** Parameters include *Paigutamise_viis*, *Paigutamise_orientatsioon*, and *Hoonetiiva_laius*, with rule-based dropdowns and sliders.
- Hoone jaotamine (Building Division):** Parameters include *Jaotus_laius*, *Offset_tüüp*, and *Offset_kaugus*, with rule-based dropdowns and sliders.
- Materjali valikud (Material Selection):** Parameters include *Mass_v2rv* (color picker) and *L2bipaistvus* (checkbox).
- Mudeli valikud (Model Selection):** A section for selecting specific model variants.
- Rohealade loomine (Landscape Creation):** Parameters include *Rohealade_loomine* (checkbox), *Hekid* (checkbox), *Heki_kõrgus*, *Hekkide_loomine* (checkbox), *Puud* (checkbox), *Detailsus* (checkbox), *Puu_kõrgus*, and *Puud* (checkbox).
- Hoonete planeerimisest (Building Planning):** Parameters include *Nihutamine_t2nav* and *Jaotus_laius*, with rule-based dropdowns and sliders.
- Mudeli valikud (Model Selection):** A section for selecting specific model variants.
- Fassaadi loomine (Facade Creation):** Parameters include *Fassaadi_loomine* (checkbox), *Detailsus* (checkbox), *Fassaadi disain* (checkbox), *Põhimuster_A*, *Põhimuster_B*, *Kyljemuster*, *Rõdu*, *Rõdu_muster*, and *Põhiparameetrid*.
- Aknad (Windows):** Parameters include *Akna_laius*, *Akna_kõrgus*, *Lae_kõrgus*, *Seina_paksus*, and *Rõdu_laius*, with rule-based dropdowns and sliders.
- Seinad (Walls):** Parameters include *Akna_asukoht*, *Paneeli_laius*, *Raami_paksus*, *Raami_sygavus*, *Raami_v2rv*, *Klaasi_materjal*, *Seina keskel* (checkbox), *1 (Rule)*, *0.1 (Rule)*, *0.2 (Rule)*, *#999999 (Rule)*, and *Peegelduv (Rule)*.
- Seina tekstuur (Wall Texture):** Parameters include *Seina_tekstuur*, *Seina_v2rvus*, *Paksus*, *Plaadi_paksus*, *Vlapiirde_kõrgus*, and *Rõdu*.
- Paneelid (Panels):** Parameters include *Paneelide_loomine* (checkbox), *Paneeli_suurus*, *Paneel_punktitihedus*, *Puudub (Rule)*, *5 (Rule)*, and *0.1 (Rule)*.

Joonis 30. Üldplaneeringu andmete visualiseerimise reeglistik, mille abil on võimalik hoonete 3D-mudeleid vastavate parameetrite kaudu dünaamiliselt muuta.

Teiseks oluliseks reeglistiku põhikomponendiks on võimalus hoonete ruumikujudele omistada vastavalt etteseadud parameetritele erinevaid fassaadi-elemente. Antud reeglistik toimib ühtemoodi arengualade kui üksikhoonete puhul, mis tähendab, et selle abil on võimalik visualiseerida nii vektorkaardi hoonete aluspindadest loodud LoD1 kastmudeleid, arengualade väljapakutavat ehituslahenduse hoonestust kui ka 2004. a detailplaneeringu hooneid. Kuna üldplaneeringu etapis ei ole hoonete täpsed ruumikujud veel kindlalt paika pandud, siis on reeglistiku abil võimalik jooksvalt läbi mängida alternatiivseid lahendusi.

Kasutades CE vaiketööriistu teede telgjoonte vahele jäävate blokkide jaotamiseks vastavalt etteantud krundi suurima ja väikseima pindala, aga suurima laiuse parameetritele, modelleeriti koos eespool nimetatud reeglistikuga Ränilinna üldplaneeringu arengualade hoonestused vastavalt maakasutusplaanile (vt lisa 1) ja üldplaneeringu keskkonnamõjude strateegilise hindamise aruandele. Selle tulemusena loodi suhteliselt vähese ajaga arengualade dünaamilised 3D-mudelid, mille parameetreid on vastava reeglistiku abil võimalik jooksvalt muuta.

Planeeritava teedevõrgustiku modelleerimisel võeti arvesse maakasutusplaanis väljatoodud Laseri, Kristalli, Kvartsi ja teiste tänavate uusi laiuse atribuute ning eristamist jaotus-, kõrval- ja kergliiklustänavateks. Samuti arvestati kavandatavate ringristmike ja võimalike Ülenurme valla kogujateedega Tartu linna tänavavõrguga liitumiskohtades, mis pannakse hiljem täpsemalt paika 2. arenguala detailplaneeringuga (Hendrikson & Ko, 2013).

Planeeringuandmete visualiseerimise tulemusena loodi staatilise Tartu 3D-mudeli kõrvale Ränilinna üldplaneeringu maakasutusplaani kriteeriume arvestav ning kavandatavat teedevõrgustikku, rohekoridori ja arengualade ehitusalast infot sisaldav dünaamiline 3D-andmestik (vt joonis 31), mille planeerimisalaseid võimalusi ja funktsioone käsitletakse põhjalikumalt käesoleva töö tulemuste ja arutelu peatükis.



Joonis 31. Planeerimise reeglistiku abil visualiseeritud 2004. a detailplaneeringu LoD3 (vasakul) ning Ränilinna üldplaneeringu arengualade LoD1 taseme hoonestus (paremal) koos Tartu 3D-mudeli eelnevalt visualiseeritud staatiliste 3D-andmetega.

5. TULEMUSED JA ARUTELU

Magistritöö tulemusena rakendati Tartu linna 3D-mudeli andmestiku väljavõtet Ränilinna linnaosa kohta, et seeläbi CE protseduurilise modelleerimise metoodika kontekstis hinnata olemasolevate staatiliste 2D- ja 3D-andmete sobivust dünaamilise linnaruumi mudeli koostamiseks. Järgnevalt antakse ülevaade töö käigus ilmnenud olulisematest probleemkohtadest, hinnatakse Tartu linna 3D-andmete kasutatavust tulenevalt CE reeglipõhisest modelleerimisest ning arutletakse dünaamilise 3D-linnamudeli loomise metoodika ja edasise planeeringuprotsessis rakendamise üle.

5.1 Hinnang Tartu linna 3D-andmete kasutatavusele

Antud töö metoodika seisukohalt oli Tartu linna 3D-andmetel keskne roll ning oli oluline, et olemasolevaid andmeid saaks rakendada võimalikult suurel määral. Võib öelda, et see valdavalt ka õnnestus ning imporditud 2D- ja 3D-andmetele sai CE abil anda nii staatilised kui dünaamilised ruumikujud. Samas leiti nii 3D-hoonete kui -katuste, 3D-sse konverteeritud 2D-vektorkaardi punkt-, joon- ja pindobjektide importimisel ja visualiseerimisel mitmeid probleemkohti tulenevalt CE-st, aga ka aluseks olnud andmetest.



Joonis 32. Uusima Maa-ameti ortofoto alusel drapeeritud katusetekstuuride abil on eristatavad sellised objektid, mida reaalses situatsioonis enam ei ole (vasakul) või on ruumilahendus märgatavalt muutunud (paremal).

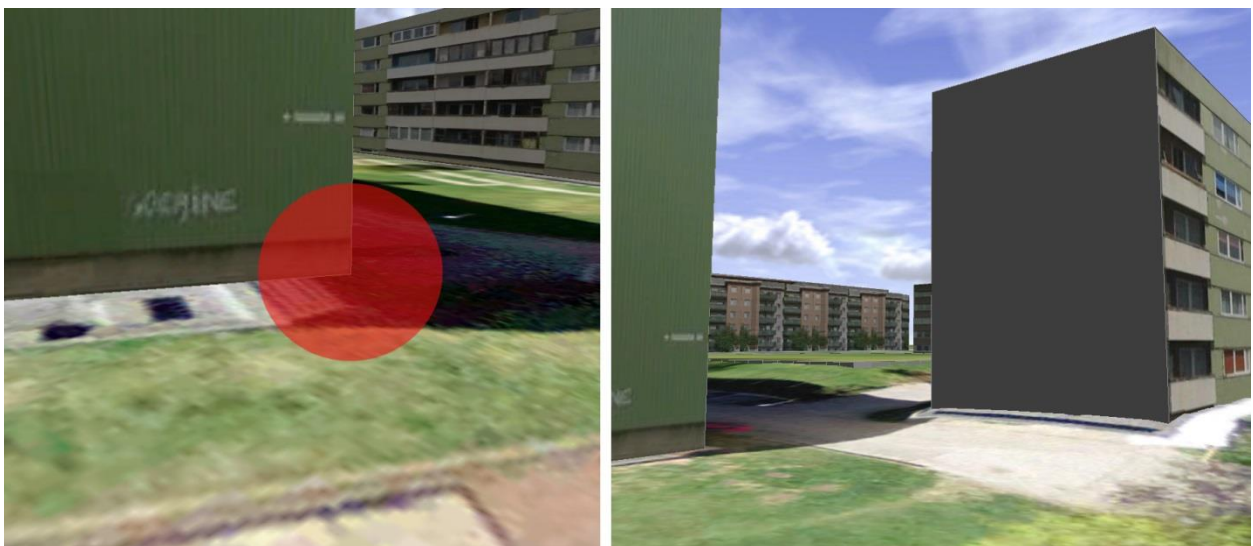
Tulenevalt töös kasutatud Tartu 3D-andmete ja Maa-ameti ortofotode ajalisest nihkest leidis 3D-hoonete ja -katuste erinevusi. Kuna alusandmete kaardistamiseks kasutati 2007. aasta seisuga ortofotot, siis oli igati mõisteta, et viie aastaga on hoonestus mõnevõrra muutunud. Samas võimaldas uusima ortofoto kasutamine muutunud situatsiooni paremini hinnata ning seeläbi selgemini eristada selliseid 3D-hooneid ja vektorkaardi aluspindu, mida käesoleval ajal enam ei eksisteeri (vt joonis 32). Kui kõrvale jätta aadressilt Aardla 111 kadunud erahooneid, mille

aselele kavandati töö kirjutamise ajal äri- ja büroohoonestust, ning viimaste aastate jooksul jõudsalt laienenud Lõunakeskuse piirkond, on ruumilahendus jäänud siiski valdavalt samaks. See kehtib ka Lõunakeskust ümbritsevate teede vektorandmestiku kohta, mida küll pidevalt uuendatakse, kuid antud mudeli kontekstis vajaksid kaasajastamist ning mille juures piisaks uuema seisuga ETAK-i andmete rakendamisest. Töö autori arvates antud piirkonna 3D-mudelid veel suuremahulist uuendamist ei vaja, kuid siiski tuleb silmas pidada, et planeeringuandmete ilmestamiseks võib keskeltläbi viie aastaseid andmeid pidada juba suhteliselt vananenuks. Eriti kui neid kasutatakse võimalike tulevikustsenaariumite visualiseerimiseks.

Järgnevalt antakse ülevaade nimetatud andmete integreerimisest lähtuvalt objektitüübist ning analüüsitakse võimalusi nende kasutatavuse parandamiseks dünaamilises virtuaalmudelis.

5.1.1 3D-hooned ja -katused

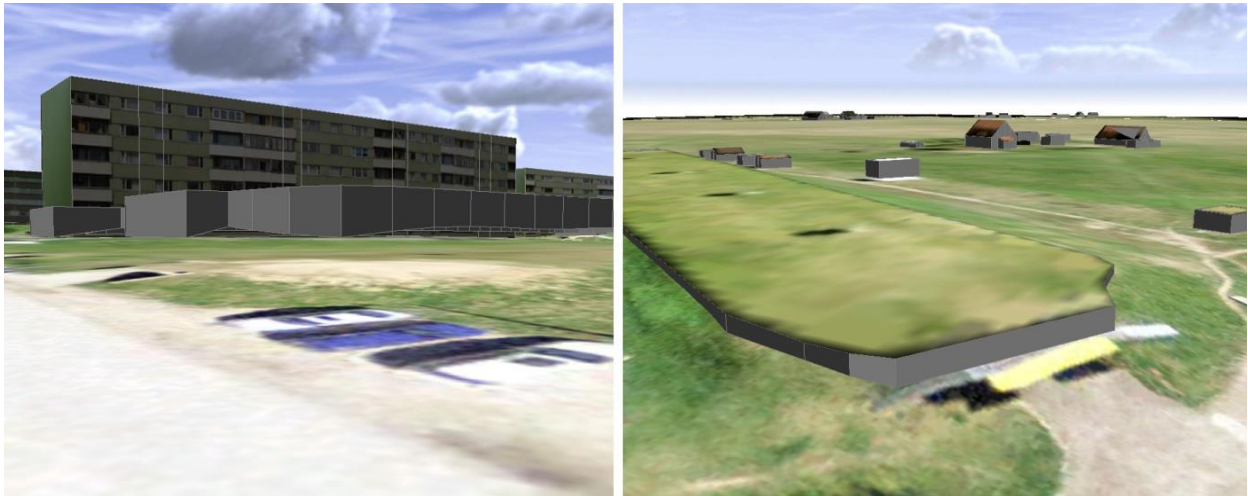
Algselt DGN-formaadis ning töö käigus *Multipatch*-formaati ümber konverteeritud 3D-hoonete ja katuste CE-sse importimisel mingeid olulisi probleeme ei esinenud. Kuna ruumikujude loomisel oli arvestatud kõrgusatribuudiga, siis ka antud töö käigus loodud virtuaalkeskonda paigutused need õigele kõrgusele. Üksikuid ebakõlasid reljeefi ja hoonete vahel küll esines, kuid need olid pigem tingitud rasterformaadis kõrgusmudeli optimaalseima piksliväärtuse valikust (vt joonis 33). Antud väärtust on võimalik hiljem reeglipõhises virtuaalmudelis korrigeerida.



Joonis 33. Vasakul 3D-hoone nurk, mis kõrgusmudeli valitud piksliväärtuse tõttu on jäänud n-õ hõngu rippuma, ning paremal reljeefi resolutsiooni suurendamisega parandatud tulemus.

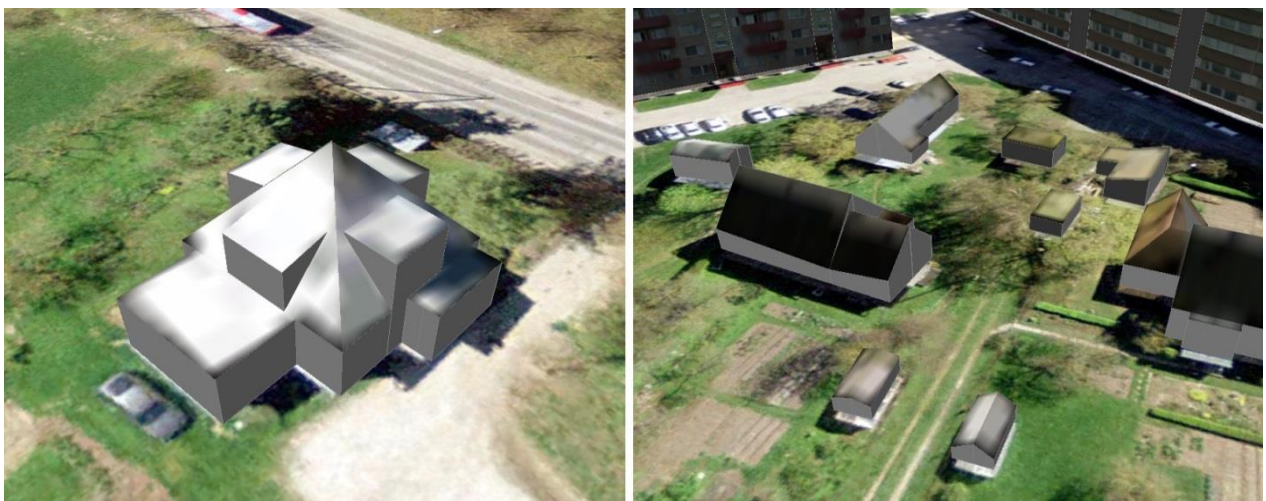
Enim tuli kõrguse erinevusi välja osaliselt või täielikult maapinna sisse süvendatud hoonetel, milleks on Ränlinna piirkonnas paiknevad kolm ulatuslikku maa-alust garaaži. Ühelt poolt on põhjus küll kasutatavas kõrgusmudeli resolutsioonis, kuid teiselt poolt võib antud erinevus olla tingitud 3D-hoonete kaardistajast, kes ei suutnud maa-aluse hoone alumist piiri selgesti eristada ja oli sunnitud paigutama hoone tegelikust kõrgemale (vt joonis 34). Hoonetel aadressiga Aardla

136, 140, 154 ja 156 korrastati 3D-ruumikujudes esinevad topeltseinad, mis väljendusid nn *z-värelusena* (ingl *z-fighting*) ning need võisid samuti olla tingitud kaardistajapoolsest tähelepanematusesest.



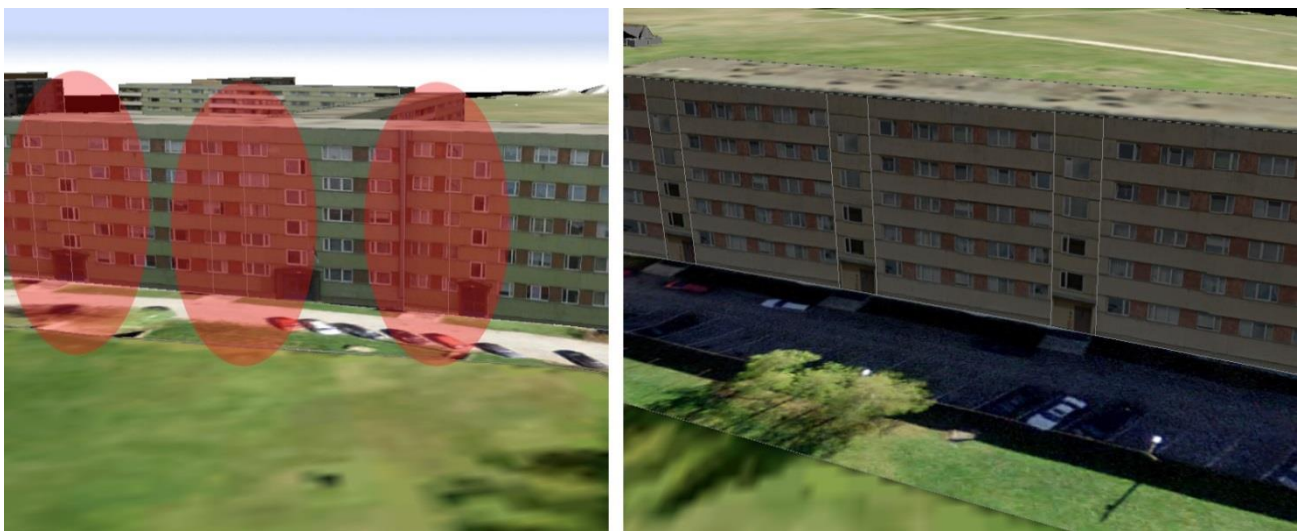
Joonis 34. Kaks erinevat maa-alust garaažikompleksi Ränilinnas, kus vasakul on näha tegelikust kõrgemal paiknev ja paremal liigselt maapinna sisse süvendatud 3D-ruumikuju.

Hoonete katuste tekstuurimisel ruumilisi nihkeid ei esinenud ja ortofotost eraldatud katusetekstuudid paigutusid loodud reeglistiku abil täpselt vastavatele katusepindadele. Antud meetod toimis ühtemoodi kõigil mudelis esindatud erineva keerukusega katusetüüpidel, mis tähendab, et taolist meetodit oleks võimalik kasutada ka kogu Tartu linna hoonestuse katmiseks ortofotodelt saadava info abil. Samas vajaks edasist uurimist CE-i poolne katusetekstuuride võrdlemisi madal resolutsioon, mis antud olukorras hoiab küll drapeerimist vajava kihi failimahtu võimalikult väikesena, kuid sellest tingituna on kohati raske eristada väiksemate erahoonete täpsemaid katuseelemente (vt joonis 35). Siinkohal oleks üheks võimaluseks sarnaselt hoonete planeerimise reeglistikule detailsusastme parameetri lisamine, mille abil saaks drapeeritud katusetekstuuuri kvaliteeti interaktiivselt muuta.



Joonis 35. Töös kasutatud reeglistiku abil drapeeritud eramajade katused, mille resolutsiooni tõstmisega paraneks ka 3D-mudeli realistsus.

Töös valitud hoonete seinte tekstuuridega katmiseks on CE keskkonnas võimalused suhteliselt head. Kuna meetodika käigus kasutati hoonetele seinatekstuuri omistamist nii käsitsi kui reeglipõhiselt, siis antud erinevaid töövõtteid võrreldes saab öelda, et kuigi esimene meetod võib tunduda esialgu lihtsam, siis reeglipõhise lähenemise abil saadav tulemus on täpsem. Samas, kuna tekstuuridega kaetakse staatilisi 3D-andmeid, mille muutmist edasises plaanis ei ole ette nähtud, siis antud olukorras võib rahulduda ka käsitsi eraldatud ja hoonetele kleebitud fototekstuuridega. Kuigi korduvate fassaadielementidega paneelmajad võivad esmapilgul tunduda suhteliselt lihtsad, tuleb ka nende puhul silmas pidada seda, et seinatekstuuri kleepimisel ei läheks kaduma olulisi elemente nagu trepikojad või rõdud (vt joonis 36). Siinkohal on tähtis võimalikult täpselt ette valmistada kleebitavad tekstuurid vastavalt drapeerimist vajavale pinnale, mida saab teha ka CE keskkonna siseselt, kasutades pildifaili lõikamise (ingl *Crop Image*) ja tekstuurimise (ingl *Texture Shapes*) tööriistu.



Joonis 36. Vasakul ühtivad drapereeritav fototekstuur ja 3D-hoone küll trepikodade arvu poolest, kuid nende paigutus on erinev. Paremal on fototekstuur ja 3D-ruumikuju omavahel vastavusse viidud.

5.1.2 Vektorkaardi punktandmed

Punktobjektide kasutatavuse analüüsimisel leiti, et ei oleks otstarbekas hinnata mudelis esindatud vektorandmete ajakohasust, kuna need on erinevalt 3D-hoonetest suhteliselt kiiresti asendatavad ning seetõttu eraldiseisvale ruumilisele ümberpaigutamisele olulist lisaaega ei vaja. Samas tuleb välja tuua, et visualiseerimise käigus jäi nii kaardistamise aluseks olnud, kui ka uuema ortofotoga võrdlemisel selgusetuks, mis aasta pildiandmeid oli punktobjektide uuendamisel kasutatud. Meetodika aluseks olnud andmed vastasid kohati korraga nii uuemale, 2010.-2012. aasta, kui ka vanemale 2007. aasta ortofoto situatsioonile. Sel moel olid punktandmed ajaliselt nihkes mitte ainult võrreldes uuemal ortofotol oleva situatsiooniga, vaid ka andmekihi siseselt. Üheks selliseks näiteks võib tuua Ringtee Selveri piirkonna, kus kaubandus- ja ärihoone ümbruse kaardistamiseks oli kasutatud uuemaid andmeid, kuid sellega külgneva parkimisala joon- ja

punktojektide ruumikujud pärinesid vanematelt ortofotodelt. Metoodiliselt on arusaadav, et uuendatav andmestik kaardistati teatud ajalise seisuga. Samuti kajastavad Tartu linna kodulehe vektorandmed praegusel ajal uusimat situatsiooni kogu kaardiala ulatuses. Kuid konkreetse töö käigus tekitas probleemi see, et hoolimata sellest, kas kasutada 2007. või 2012. aasta ortofotot, ei olnud võimalik seda kummalgi juhul kaardistatud algandmetega täielikult ühildada.

Punktandmete reeglipõhise visualiseerimise eelduseks on võimalus soovitavaid objekte vastava atribuudi alusel selekteerida. Seda saab CE-s teha vastavat reeglifaili kasutades või siis kõiki objekte korraga valides. Käesolevas töös kasutati visualiseerimiseks Python-i skripti (vt joonis 37 vasakul), mis võimaldas objekte valida tulenevalt nende tüübist ja seeläbi ühe kihi siseselt omistada erinevatele punktojektidele ka erinevad ruumikuju andvad reeglistikud. CE-s on valimine ennekõike reeglipõhine, kuid samas tuleb märkida, et vajadus atribuudipõhise valikutööriista järele on interaktiivse GIS-i aspektist ka siin igati olemas.

```
from scripting import *

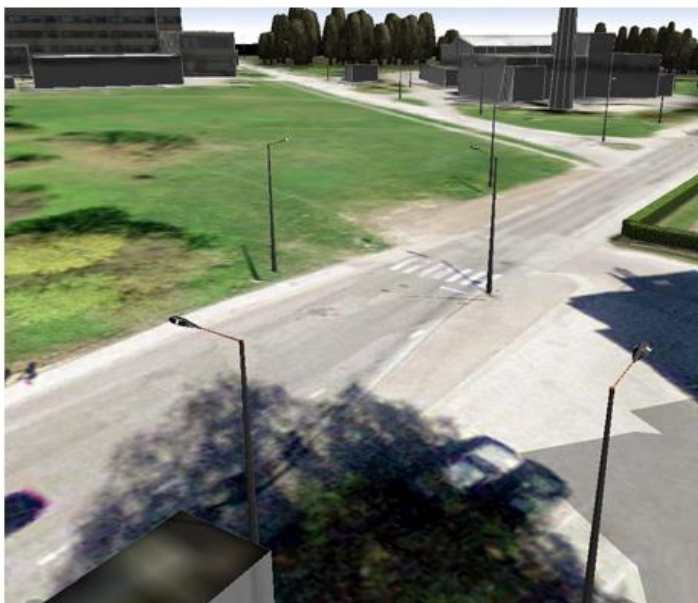
# get a CityEngine instance
ce = CE()

def selectByAttribute(attr, value):
    objects = ce.getObjectsFrom(ce.scene)
    selection = []
    for o in objects:
        attrvalue = ce.getAttribute(o, attr)
        if attrvalue == value:
            selection.append(o)

    ce.setSelection(selection)

def selectTypeObject():
    selectByAttribute("KOOD", 3)

if __name__ == '__main__':
    selectByAttribute("KOOD", 3)
    pass
```



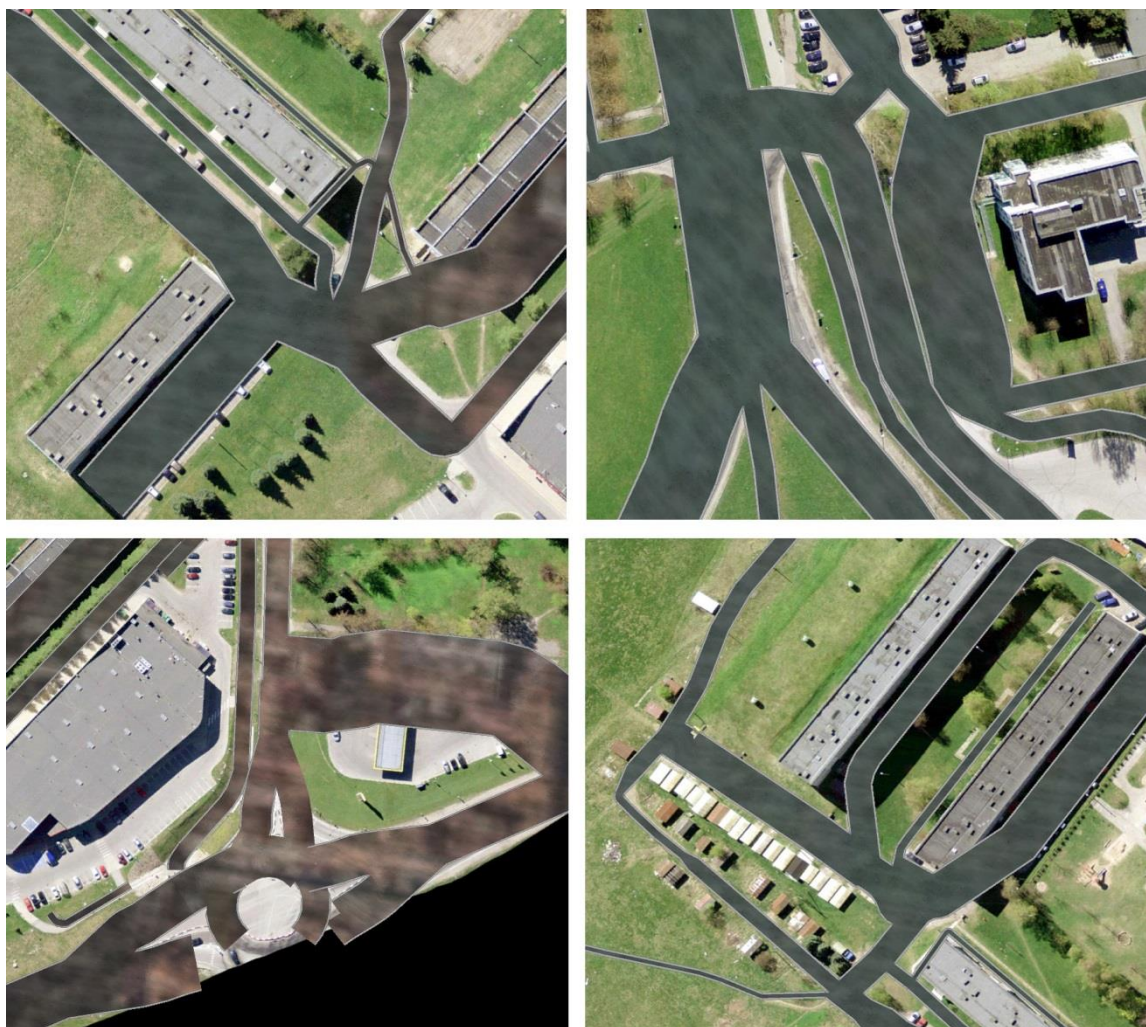
Joonis 37. Objektide atribuudipõhiseks valimiseks imporditud Python-i skript ja lähima tee telgjoonte järgi orienteeritud valgustuspostide punktojektid.

Punktojektide visualiseerimisel tuleb silmas pidada ka seda, et neil puudub orientatsioon. Töös visualiseeritud valgustuspostide puhul tähendas see, et kuigi nende asukoht on ruumiliselt õige, on need kõik orienteeritud põhja-lõuna suunaliselt, mis aga ei vasta reaalsuses olevale olukorrale. Valgustuspostide orienteerimist tehti esialgu käsitsi, kuid CE-i nädisandmete kohandamisel leiti võimalus reeglistiku abil neid paigutada lähima joonobjekti telgjoone suhtes (vt joonis 37 paremal). Reeglifaili kasutamine on ka antud olukorras käsitsi pööramisest oluliselt kiirem. Samas ei saa taolist automaatikat täielikult usaldada, sest punktojektide 3D-ruumikujusid võidakse orienteerida vale telgjoone suhtes. Eriti kui on tegemist parkla, ristmiku või mõne muu rohkete joonobjektidega alaga.

5.1.3 Vektorkaardi joonobjektid

Nagu peatükis 4.6.3 sai välja toodud, omistati staatilistest vektorkaardi joonobjektidest 3D-ruumikujud teede telgjoontele, puude ridadele, piirdehekkidele ja torujuhtmetele. Neist esimese kolme visualiseerimiseks kasutatud reeglitikeyga on sarnaselt punktobjektidega võimalik lisada staatilistele algandmetele parameetrite abil kontrollitavat dünaamilisust.

Kuna joonobjektidest võib teede telgjooni pidada kõige tähtsamaks, siis ka nende ruumiliseks visualiseerimiseks tuli kulutada rohkem aega. CE-i teede olulisemateks parameetriteks on vaikumisi tee kogulaius, parem- ja vasakpoolse kõnnitee laius ning teede ristumiskohtade tüüp. Vektorandmestiku teede telgjoonte 3D-visualiseerimisel võib laiuse atribuudi kasutamist pidada valdavalt heaks, kuna sel viisil saadakse 3D-mudeliks ka tõepärasem ruumikuju. Samas tuli pidevalt jälgida seda, et hierarhiliselt ühtse teedevõrgustiku ühendamisel ei kaotataks CE-i lihtsustamisalgoritmide kasutamisega iseloomulikke teede sõlmpunkte. Kui kergemate situatsioonidega sai CE hakkama ootuspäraselt ja hilisemat käsitsi korrigeerimist need ei vajanud, siis keerulisemate puhul (nt ringteed ja enam kui nelja tee ristumised) ei olnud automaatika usaldusväärne ning ruumikujud tuli hiljem käsitsi korrigeerida (vt joonis 38).



Joonis 38. Valik keerulisemaid teede ristumiskohtade situatsioone, kus CE-i automaatikat ei saa täielikult usaldada ja andmeid tuleb hiljem täiendavalt käsitsi parandada.

Visualiseerimise järgselt eeldati, et teede laiuse atribuudi rakendamise kitsaskohaks võib kujuneda teede omavaheline kattumine, kuna 2D-joonobjektide kasutamisel ei ole seda võimalik nii hästi tajuda. Antud väide loodud virtuaalmudelil siiski tõestust ei leidnud ning teede omavaheline hierarhiline paiknemine säilis 3D-ruumis ka väga lähedal asetsevate joonte puhul.

Töö käigus kaaluti ka vektorandmestiku teeservade joonobjektide kasutamist, kuid pärast teede telgjoonte põhjal modelleeritud ja laiuse atribuudi alusel visualiseeritud 3D-ruumikujudega võrdlemist leiti, et kahe kihi erinevused on liiga suured ning nende vastavusse viimiseks vajaksid mõlemad kihid märkimisväärset ümbermodelleerimist (vt joonis 39 vasakul). Antud erinevus on tingitud eelkõige sellest, et teeservi ja telgjooni kaardistatakse tavaliselt eraldi ning joonte kujul need sellist vastuolu ei tekita kui seda 3D-s. Siinkohal mängib olulist rolli ka CE-i tarkvaraloogika, mis ei oska erinevate kihtide vahelisi suhteid arvestada. Teeservade kasutamist võib kaaluda siis, kui ruumimudel sisaldab ainult teede telgjooni, kuna sel viisil ei teki objektikihtidel omavahelisi lõikumisi (vt joonis 39 paremal). Samuti tuleb ära märkida, et teeservade näol on tegemist hea potentsiaalse andmeallikaga, mida oleks 3D-mudelil võimalik kasutada haljasalade pindobjektide loomiseks, kuid selle tarvis vajaks kiht kindlasti lisatöötlust.



Joonis 39. Teeservade joonobjektide abil saaks 3D-mudelil visualiseerida selliseid objekte nagu kõnniteed ja äärekivid, kuid algsel kujul ei lähe need kokku teede telgjoonte 3D-ruumikujudega.

Kasulikuks ja täpsustavaks teede 3D-ruumikujude asjaoluks võib lugeda ka ETAK-i teekatte atribuuti, mille abil saab mudelis täiendavalt eristada püsi- ja kergkattega, kruusatud või pinnatud teid. Antud atribuudi kasutamisega tuli aga töö käigus välja, et CE-s visualiseeritakse teekatte üleminekud üsna järsult, mis paistab enam silma teravnurga all ristuvate teede puhul.

Teede telgjoonte hierarhilisse vastavusse viimisel ja ristumiskohtade modelleerimisel leiti algandmetest ka mõned üksikud topoloogiavead, mis võisid olla tingitud kaardistajapoolsest valest joonobjektide ühendamisest või tähelepanematusel (vt joonis 40). Vastavalt vahepeal muutunud liikluskorraldusele, seda eelkõige Lõunakeskuse ümbruse näitel, kogu

teedevõrgustikku aga dünaamilise mudeli kontekstis kaasajastama ei hakatud, kuna see ei olnud töö eesmärgiks ning piirduti kasutatavale andmestikule hinnangu andmisega.



Joonis 40. Vasakul ühendamata jäänud tee telgjoon Aardla ja Riia tänava ristumiskohas ning paremal CE automaatika poolt korrigeeritud 3D-ruumikuju.

Haljastuse joonobjektide visualiseerimine oli võrreldes teedega lihtsam, kuna nende puhul ei mängi joonte-vaheline hierarhia nii suurt rolli ning neid võib rakendada ka algsel kujul eraldiseisvate joonelõikudena. Käesoleva töö käigus visualiseeritud puuridade laiuks määrati vähimasti 1 meeter, kuid kasutatava reeglifaili vastavat parameetrit kohandades on edaspidi võimalik antud väärtust dünaamiliselt muuta. Lisaks laiusele võeti muudetavate parameetritena kasutusele ka puude tihedus ja kõrgus, mille tulemusena saaks kõrghaljastuse objekte dünaamiliselt visualiseerida ülejäänud Tartu vektorkaardi andmestikus. Sama võib öelda hekkide kohta, kus reeglipõhiste parameetrite abil sai staatilistele andmetele anda täiendavat dünaamilisust. 3D-visualiseerimist ei tasuks haljastuse juures alahinnata, kuna selle abil on võimalik linnamudelile lisada olulisel määral ruumilisust ja realistlikkust.



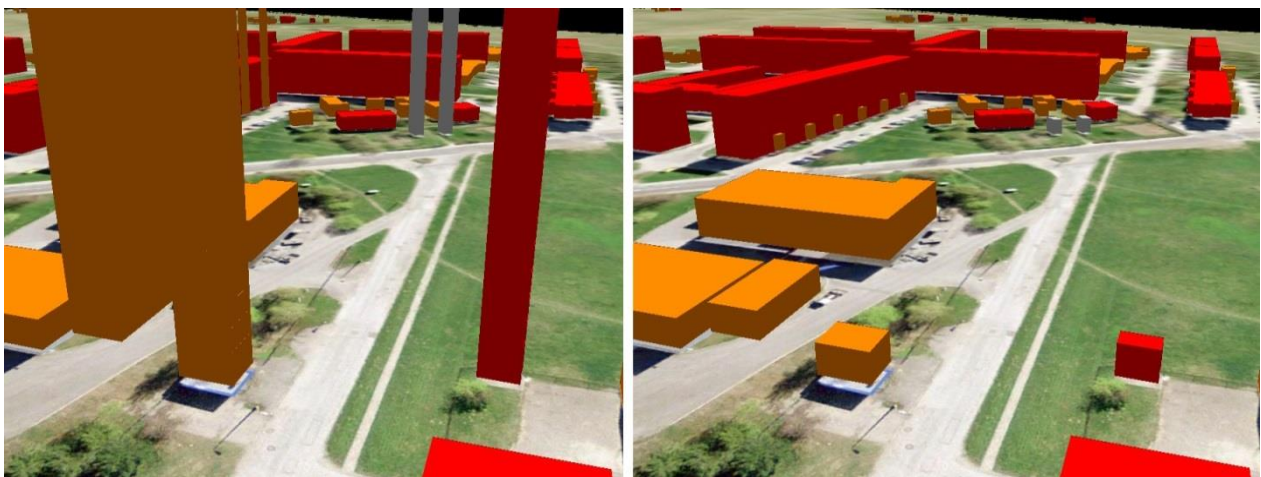
Joonis 41. Vasakul reaalne situatsioon ning paremal selle lihtsustatud ja käsitsi vastavale kõrgusele tõstetud 3D-ruumikuju.

Peatükis 4.6.3 kirjeldatud torujuhtmete visualiseerimise meetodika abil küll torujuhtmete joonobjektidele täiendavat dünaamilisust ei lisatud, kuid selle tulemusena oli võimalik suhteliselt

kiiresti neile omistada läbi *Multipatch*-formaadi 3D-leppemärgid (vt joonis 41). Taolise lähenemise tugevuseks saab pidada protseduuri lihtsust, kuid teiselt poolt tuleb arvestada sellega, et erinevalt teede ja haljastuse joonobjektidest võivad tehnovõrgud kulgeda maapinnast kõrgemal. Siinkohal ei ole ka otsest sõltuvust kõrgusmudelitest ning õige ruumilise paigutuse saavutamiseks tuleks antud joonobjektid juba stereokaardistamisel märkida nii, et need oleksid varustatud vastava kõrgusatribuudiga. Sel viisil on loodud andmed oma lihtsa kuju tõttu modelleerimise järgselt küll vähese vaevaga õigele kõrgusele nihutatavad, kuid edaspidi tuleks 3D-mudelisse integreerimise huvides kaaluda taoliste objektide kaardistamist koos vastava kõrgusatribuudiga.

5.1.4 Vektorkaardi pindobjektid

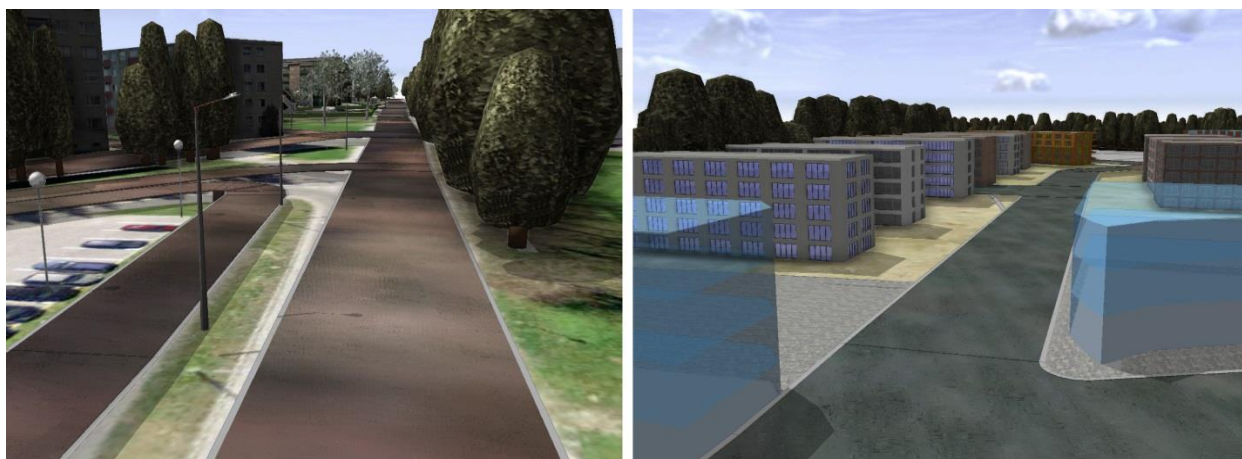
Kuigi suurem osa hoonete aluspindu oli varustatud korruste arvu atribuudiga, siis tulenevalt ETAK-i spetsiifikast, kus märgitakse konkreetse väärtuse puudumisel atribuudiväli arvuga 997 („täitmata“) või 998 („ei rakendu“), tuli asendada need arvuga 1, kuna CE-s (aga ka teistes modelleerimistarkvarades) võidakse antud väärtuseid ekslikult kasutada korruste arvuna (vt joonis 42). Pärast vastavat 3D-hoonetega võrdlemist ja välivaatlust selgus, et valdav osa antud atribuutidega varustatud hoonetest ja hooneosadest olid 1-korruselised ning tehtud otsust võis lugeda õigustatuks. Korrigeerimise käigus tuli välja ka hulk hooneid ja hooneosi, mille korruste arv ei olnud õigesti sisestatud või puudus üldse. Kuid võimalikult tõepärase 3D-mudeli huvides otsustati vajalikud parandused sisse viia. ETAK-i hoonete aluspindu võib 3D-mudeli loomise kontekstis pidada üsna sobivaks ka algsel kujul, mida saaks planeeringumahtude võrdlemisel edukalt kasutada olemasolevate 3D-hoonete asemel, kuid mille eelduseks on nii elu- kui kõrvalhoonete puhul korrektselt sisestatud korruse atribuut.



Joonis 42. Vasakul 3D-ruumikujudega ETAK-i aluspinnad, mille korruste arvu ei ole veel täpsustatud, ning paremal normeeritud väärtustega 3D-hooned ja hooneosad.

5.2 Loodud dünaamilise 3D-linnamudeli rakendamine planeerimisprotsessis

Tartu linna 3D-andmetega võrreldes tuleb töö käigus modelleeritud üldplaneeringu andmeid käsitleda veidi teisiti, kuna nende puhul ei ole tegemist reaalseste staatiliste objektidega, vaid planeeringuprotsessi käigus väljapakutavate lahendustega, mis võivad veel muutuda. Antud aspekti arvestamist võib planeeringuandmete visualiseerimisel pidada ka fundamentaalseks, kuna seetõttu saab võimalikke vaidluskohi dünaamilisse 3D-mudelisse koheselt sisse viia ning vastavalt nendele selle väljanägemist väheste ajakuluga muuta. Ränilinna üldplaneeringu keskkonnamõtjude strateegilise hindamise aruande järgi avanevad linnaosa alal valdavalt väheatraktiivsed ja organiseerimata vaated ning edasise arendustegevusega võiks kaasneda positiivne visuaalne mõju. Kuigi kujuneva linnaruumi väljanägemise kvaliteet sõltub siiski suuresti lõplikest detail-lahendustest, saab loodud 3D-mudeli abil kavandatava maakasutuse mõju ja võimalikke vaatekoridore hinnata koos olemasoleva ruumilahendusega (kasutades nt ka lähedus-, mahu-, vaate- või varjuanalüüsi) juba esimestes planeeringuetappides. Võrreldes kahemõõtmeliste joonistega on taoline lähenemine lihtsamini ja paremini arusaadav.



Joonis 43. Olemasolevate ja planeeritavate ruumilahenduste edasise võrdmise eesmärgil on visualiseerimiseks kasutatud võimalikult samasugust stiili.

Planeeringuandmete visualiseerimise protsess oli sarnane Tartu kahemõõtmelise vektorkaardi joon- ja pindobjektide puhul kasutatavaga, mille tulemusena saavutati 3D-mudelis võimalikult väike olemasolevate ja planeeritavate ruumiobjektide vaheline erinevus (vt joonis 43). Sel viisil saab neid omavahel kõrvutada nii, et tekiks visuaalne mulje ühtsest ja integreeritud 3D-andmestikust. Tartu staatiliste 3D-andmetega sarnaseid ruumikujusid on kasutatud nii teede kui kõrg- ja madalhaljastuse visualiseerimiseks. Teede puhul võimaldavad loodud 3D-ruumikujud täpsemalt hinnata, kuidas planeeritav teedevõrgustik praegusega sobitub, aga ka seda, millised on potentsiaalsed vastuolud olemasolevate linnaruumi objektidega (nt hooned, elektriliinid, haljastus jm). Üheks taoliseks näiteks võib pidada käesoleval ajal 6-meetri laiust kruusakattega Laseri tänavat. Üldplaneeringu järgi nähakse seda edaspidi kui 24-meetri laiust jaotustänavat, mida iseloomustab muuhulgas ka kõrghaljastuse kasutamine hoonestuse ja tänavaliikluse

eraldamiseks. Loodud dünaamilise linnamudeli abil annab olemasoleva ja planeeritava ruumikorralduse võrdlemine tunduvalt selgema pildi, kuna tasapinnaliste joonistega ei ole võimalik näidata tekkivaid vaate- ja liikumiskoridore (vt joonis 44).



Joonis 44. 3D-mudeli vaade Riia tänavalt Laseri tänava suunas - vasakul olemasolev ja paremal üldplaneeringu andmete abil illustreeritud ruumilahendus.

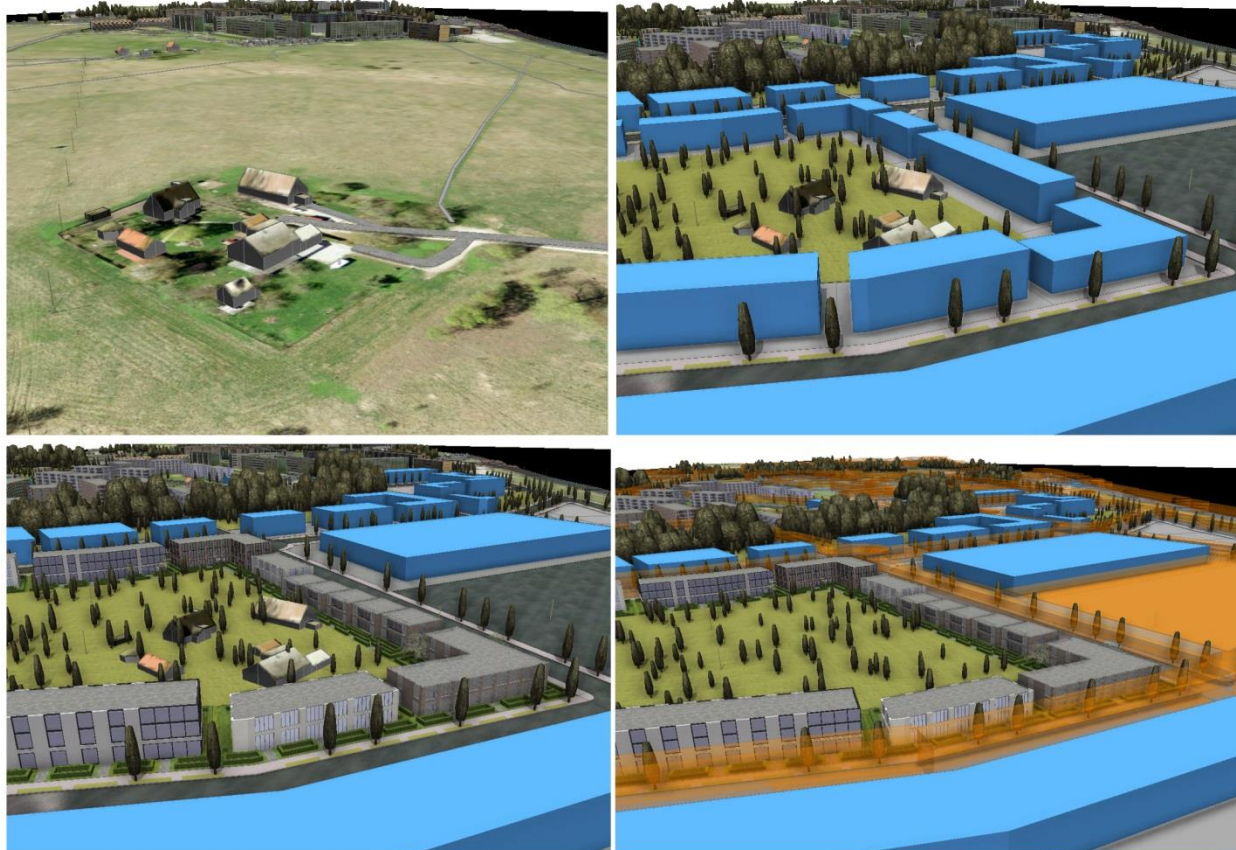
Samuti võib muutuvat teekorraldust illustreerivaks näiteks lugeda Aardla tänavast kuni Raudtee tänavani kulgevat planeeritavat 24-meetri laiust jaotustänavat (vt joonis 45). Sarnaselt rohekoridoridele saab ka siin 3D-mudeli eelseatud parameetreid (nt planeeritava sõidu- või kõnnitee laius, tüüp, haljastuse kasutamine jne) muutes erinevaid planeeringualaseid variante võrrelda ning seeläbi paremini näha võimalikku visuaalset mõju olemasolevatele linnaruumi objektidele.

Lähedusanalüüsi (vt ptk 1.4.1) kaudu saab 3D-puhvrite abil hinnata, kas uus liikluskorraldus ei hakka paiknema olemasolevatele hoonetele liiga lähedal. Nähtavus- ja varjuanalüüsi (vt ptk 1.4.3) kasutades saab paika panna uushoonestuse maksimaalse korruselisuse. Dünaamilise andmestiku puhul saab vastavaid muudatusi planeerimisprotsessi käigus jooksvalt kohandada.



Joonis 45. Loodud 3D-mudel annab võrreldes 2D-joonistega oluliselt selgema pildi ka planeeritavast Aardla ja Raudtee tänavat ühendavast jaotustänavast ja selle visuaalsest mõjust olemasolevale linnakeskkonnale.

Planeeritava teedevõrgustikuga sama oluliseks tuleb loodud 3D-mudelil lugeda ka arengualasid, mille kaudu oli eesmärgiks luua interaktiivselt muudetav terviklahendus, kus saaks võimalikke hoonete mahtusid ja paigutamise põhimõtteid visualiseerida, võrrelda ja edasistes ruumianalüüsides rakendada. Arengualade lähtekujud koostati küll üldplaneeringus väljatoodud maakasutuse juhtotstarvete kirjelduste, vastavate tihedusindeksite ja hoonemahtude paigutamise põhimõtete alusel, kuid neid saab dünaamilises linnamudelis muuta ja seeläbi juba detailplaneeringu kehtestamise eelselt võimalikke erinevaid stsenaariume kõrvutada.



Joonis 46. Sarnaselt teedevõrgustikuga annab 3D-linnamudeli kasutamine hoonemahtudest ja nende paigutamisest (üleval paremal), aga ka võimalikest vaatekoridoridest (all paremal) selgema ülevaate.

Mudeli dünaamilisuse näitena võib käsitleda üldplaneeringu viiendat arenguala, mida valdavalt nähakse kui korterelamumaa ja olemasolevate majapidamiste juurde kuuluvatel katastriüksustel pere- ja ridaelamumaa (vt joonis 46). Planeeritavaid hoonemahte 3D-mudeli abil visualiseerides on praeguse ja väljapakutava situatsiooni erinevuse hindamine oluliselt lihtsam kogu planeerimisprotsessi vältel, kuna hoonestuse täpsustusi viiakse mudelisse pidevalt sisse ning selle tulemusena saaks arenguala terviklikust lahendusest ülevaate enne ehitustegevuse algust.

Siinkohal võib kokkuvõtvalt öelda, et jooksvalt muudetavate parameetritega 3D-linnamudel on staatilisest oluliselt paindlikum ning viimasega kombineerides on võimalik luua realistlik virtuaalne linnakeskkond, mida saab kasutada nii planeerimisprotsessi siseselt kui väliselt (nt avalikkuse erinevatest planeeringulahendustest teadvustamine).

5.3 Hinnang ajakulule

Nii modelleerimis- kui planeerimisprotsessis on alati olulisel kohal võimalikult optimaalne ajakasutus, mis kulub andmete visualiseerimisele, viimistlemisele ja avalikkusele kättesaadavaks tegemisele. Käesoleva magistritöö metoodika käigus loodi 3D-mudeli andmed mitmes järgus, mis tähendab, et töö eri etappide juures oli võimalik hinnata andmetöötlusele kuluvat aega eraldi. Modelleerimisprotsessi hulka loeti ka programmi tundmaõppimisele kuluvat aega, kuna käesoleva töö käigus lähtuti seisukohast, et planeerijal puuduvad eelteadmised seoses protseduurilise modelleerimise ja CE-i programmi kasutamisega.

3D-linnamudeli loomine algas olemasolevate Tartu linna 3D-andmete ettevalmistusega, mille käigus konverteeriti ja eraldati algandmestikust töö seisukohalt olulised ruumiobjektid. Vastava geoandmebaasi loomisel ja sinna vajalike andmete koondamisel tuli käesoleva metoodika puhul arvestada orienteeruva ajakuluga 2-3 tundi. Selle hulka võib lugeda ka vajalike ortofotode eraldamisele kuluvat aega.

Kuna töö alusandmete hulgas ei olnud TIN-mudelit, mis oli vajalik 2D-ruumiandmete õigele kõrgusele seadmiseks, siis tuli see töö käigus ArcGIS-i kasutades ise luua. Antud protsess nägi ette ka sobivaima, kogu Tartut hõlmava TIN-mudeli valimist. Kuna selle käigus loodi mitu erinevat varianti, siis on mõistlik arvestada sobivaima kõrgusmudeli loomisele kulunud aega, mitte kõigi kolme alternatiivi loomise koguaega. Koos raster teisenduse ja ArcGIS ModelBuilderi abil 2D-andmete õigele kõrgusele seadmisega jäi antud etapi ajakulu 4-5 tunni vahele, millest suurima osa moodustab ArcGIS-i automaatikale kuluv aeg. TIN-mudeli olemasolu korral on ajakulu tunduvalt väiksem.

Võib öelda, et nii Tartu 3D-andmete kui Ränilinna planeeringuandmete importimise ajakulu oli antud töö kontekstis üks lühemaid ning oluliselt kauem aega kulus staatiliste ja dünaamiliste 3D-ruumikujude visualiseerimisele. Viimase hulka tuleb lugeda vastavate reeglistike koostamist ja imporditud andmetele kohandamist. Kõige kiiremini oli võimalik reeglipõhiselt visualiseerida 3D-hoonete katused, ajakulukamaks tuli lugeda aga 3D-hoonete seinte tekstuuridega katmist. Kui aga vajalikud seinatekstuuride reeglistikud olid ette valmistatud, ei kulunud ühe suhteliselt lihtsa ruumikujuga hoone tekstuurimiseks rohkem kui 3-4 minutit. Sel moel tekstuuriti suurem osa Ränilinna olemasolevast hoonestusest vähem kui tunniga. Planeeringuandmete hoonetele reeglipõhist fassaadide loomist võib pidada aga veelgi kiiremaks protsessiks, kuna see käib dünaamilises mudelis automaatselt.

Joon- ja punktobjektide visualiseerimise kõige ajakulukamaks osaks tuleb pidada ruumikujude andmist vastavalt nähtuse tüübile. Kuna CE-s puuduvad vaiketööriistad objektide atribuudipõhiseks valimiseks, siis käesoleva töö kontekstis võib etapi ajakulu hulka lugeda ka

vastava Python-i valikukäskluse koostamist ja modelleerimiskeskonda lisamist. Joon- ja punktobjektide ruumikujud loodi mudelis pärast valiku tegemist automaatselt ning antud visualiseerimise etappide ajakulu saab lugeda 3D-hoonetega võrreldes märkimisväärselt lühemaks. Veel väiksema ajakuluga oli võimalik hakkama saada ETAK-i hoonete aluspindade visualiseerimisel, kuna 3D-ruumikujud loodi vastavalt korruste arvu atribuudile automaatselt.

Koostatud dünaamilise 3D-linnamudeli ekspordile ja avalikustamisele kuluvat aega võib eelnevate tööetappidega võrreldes pidada impordiga samaväärseks, kuna kõik vajalikud andmed ja kihid on varem ette valmistatud. Avalikustamiseks piisas olemasolevate kihtide tööaknas märkimisest ja valitud kihtide detailsusastme määramisest, mille järel lõi CE-i automaatika WebGL-i toega veebibrauseris avatava internetipõhise 3D-mudeli. Olenevalt üleslaetavate kihtide hulgast, detailsusest ning maapinna tekstuurfaili suuruselt kulus veebipõhise mudeli loomiseks alla poole tunni (arvestamata üleslaadimise kiirust).

Võrreldes polügoonipõhise modelleerimisega, võib käesolevas töös kasutatud protseduurilise modelleerimise meetoodika ajakulu lugeda märkimisväärselt lühemaks. Ettevalmistatud andmestiku korral saaks ajakulu viia miinimumini ning seeläbi luua ka kogu Tartu linna hõlmav virtuaalmudel CE-s vähem kui päevaga.

5.4 Kasutatud meetoodika üldhinnang ja edasised võimalused

Käesoleva magistritöö käigus koostatud meetoodika ja selle tulemusena valminud Ränilinna piirkonna virtuaalmudeli põhjal võib öelda, et Tartu linna 3D- ja vektorkaardi andmed sobivad reeglipõhiseks modelleerimiseks suhteliselt hästi. Erinevalt võrdlemisi aeganõudvast CAD-modelleerimisest oli pärast ettevalmistuslikku etappi (vt ptk 4.4) võimalik algandmeid CE-i modelleerimiskeskonnas visualiseerida üsna kiiresti.

Valminud Ränilinna üldplaneeringu dünaamilist 3D-mudelit on edaspidi võimalik rakendada mitmel erineval viisil. Töös kasutatud Esri CityEngine-i ja ArcGIS-i tarkvara abil on mudel täiendatav ning muudetav. Modelleerimiskeskonna siseselt säilib ka visualiseeritud andmestiku dünaamilisus ning töö käigus kohandatud reeglifaile saab rakendada ülejäänud Tartu linna 2D- ja 3D-andmetel. Sel moel on tulevikus võimalik luua ühtne, kogu Tartu linna hõlmav 3D-geoinfosüsteem. Viimast saaks kasutada nii detail- kui üldplaneeringute tasemel linnaruumi muudatuste ning ettepanekute ilmestamisel ja analüüsil.

CE-i Web Viewer publitseerimistööriista (vt ptk 3.3) kasutades laeti üles ja tehti modelleerimiskeskonna väliselt kättesaadavaks kõik töö käigus valminud staatilised Tartu 3D- ja vektorandmestiku objektid ning üldplaneeringu maakasutusplaani põhjal genereeritud 3D-

objektid. Loodud avaliku näidismudeli struktuur vastab käesoleva töö käigus koostatud metoodikale ja mille kihid on grupeeritud järgnevalt:

- Reljeefikaart (koos ja ilma ortofotota);
- ETAK-i pind- ja joonobjektid;
- Maakasutuse joon- ja punktobjektid;
- Tehnovõrkude joon- ja punktobjektid;
- Osaliselt tekstuuritud Tartu 3D-mudeli hooned;
- Tekstuuridega kaetud 3D-mudeli katused;
- Planeeritav teedevõrgustik (koos ja ilma rohealadeta);
- Planeeritav rohekoridor (laiusega 17 m ja 25 m);
- 2004. a detailplaneeringu näidishooned (LoD1 kuni LoD3 detailsusastmega);
- Üldplaneeringu näidishooned (LoD1 ja LoD3 detailsusastmega).

Loodud näidismudel laeti üles eestikeelsesse ArcGIS Online keskkonda ja on kättesaadav „Ränilinna avalik 3D näidismudel“ nime all <http://www.arcgis.com/home> aadressil. Tuleb aga silmas pidada, et selle näol on tegemist ainult ühe võimalusega, kuidas saab planeeringuandmeid avalikkusele kättesaadavaks teha. Mudeli andmeid on võimalik vajadusel edasi eksportida mõnda muusse modelleerimis- või esituskeskkonda (nt AutoCAD, FME, Google Earth, Trimble SketchUp jmt).

Kuigi antud töö käigus suurendati olulisel määral olemasolevate staatiliste andmete funktsiooni, on autori arvates nii andmete kui tarkvara seisukohalt veel mitmeid edasisi arengusuundi. Kuna avalikku mudelit saab lisatarkvara alla laadimata avada otse arvuti internetilehitsejas, siis üheks potentsiaalseks suunaks võib pidada CE-s loodud virtuaalmudeli kasutamist mobiilseadmetes.



Joonis 47. Autori visioon augmenteeritud Ränilinna 3D-mudeli kasutamisest mobiilseadmes.

2D GIS andmete kasutamist nutitelefonides ja tahvelarvutites on juba edukalt implementeeritud ning 3D-mudeli kuvamiseks väljaspool personaal- või sülearvutit on nii tark- kui riistvaraliselt kõik eeldused olemas. Sisuliselt kõik nutiseadmed on varustatud kaamera, GPS-i, kompassi ja akseleromeetriga, millest tulenevalt võiks olla üheks tulevikusuunaks augmenteeritud 3D-mudeli vaade (vt joonis 47). Nutiseadme ekraanil kuvatakse korraga õige asukohaga planeeritavate objektide virtuaalmudelid ja nendega kaasaskäiv informatsioon. Mobiilseadme kaamera abil kasutatakse taustana aga reaalse keskkonna vaadet. Sel moel on võimalik 3D-mudeli abil kuvatavatest planeeringuandmetest arusaamist veelgi lihtsustada. Töö autori arvates oleks selle näol tegemist perspektiivika edasise uurimissuunaga seoses 3D-mudelite planeerimisprotsessis kasutamisega.

KOKKUVÕTE

3D-linnamudelite kasutamist võib pidada suhteliselt uueks valdkonnaks, kus täpsemad klassifikatsioonid ja rakendusviisid on veel välja kujunemas. Kuigi antud valdkonna üheks eeliseks on see, et 3D-mudeleid saab oma mitmekülgsuse tõttu rakendada erinevate sihtgruppide tarvis, ei ole need oma uudsuse tõttu veel Eestis eriti kasutust leidnud. Ühe kõige olulisema kasutusvaldkonnana on alates virtuaalmudelite kasutuselevõttust olnud otsuste tegemise protsessi toetamine ning ruumiinfo haldamise abivahendina rakendamine. Võib öelda, et 3D-mudelid kiirendavad planeeritavate objektide sobitamist linnakeskkonda.

Antud magistritöö käsitles olemasolevate staatiliste ja väljapakutavate planeeringuandmete rakendamist reeglipõhise modelleerimise keskkonnas. Uurimistöö tulemusena töötati välja metoodika Tartu linna 3D- ja vektorandmestiku ning Ränilinna üldplaneeringu andmete kasutamiseks Esri CityEngine protseduurilise modelleerimise tarkvaras. Koostatud metoodikat võib edaspidi arvesse võtta ka ülejäänud Tartu 3D-mudeli andmetega töötamisel. Töö käigus loodi Ränilinna üldplaneeringu piirkonda hõlmav dünaamiline ja interaktiivselt muudetav virtuaalmudel, mida saab avalikkusele kergelt kättesaadavaks teha ja mis võiks olla oluliseks abivahendiks erinevate planeeringustsenaariumite ilmestamisel. Ränilinna 3D-mudel sisaldab kõigi antud piirkonna hoonete tekstuuritud katuseid, valitud paneel- ja korruselamute fassaade. Samuti sisaldab see vektorkaardi ning üldplaneeringu maakasutusplaani joon-, punkt- ja pindobjektide 3D-ruumikujusid.

Kõigi planeeringu osapoolte seisukohalt tuleb kasutada võimalikult üheselt mõistetavaid visualiseeringuid. Tasapinnaliste jooniste abil on uueneva ruumilahenduse ilmestamine tihti peale aga suhteliselt keeruline. Jooniste üheks põhikriteeriumiks on see, et nende abil tuleks välja planeeritava muudatuse mõju ja et oleks võrdlus olemasoleva situatsiooniga. Levinuimaks viisiks on staatilised vaated paikapandud suundadest. 3D-linnamudelite abil on aga planeeringuandmete erinevate vaadetega ilmestamine dünaamiline ja interaktiivne protsess, mille tulemusena suureneb nii linnakodanike informeeritus kui ka planeerijatele endile laekuv informatsioon osapoolte vastukaja näol.

Magistritöö käigus anti hinnang olemasolevate Tartu 3D- ja vektorkaardi andmete kasutatavusele nii lähteandmete kui töös kasutatud reeglipõhise modelleerimise vaatenurgast. Võib öelda, et võrreldes CAD-põhise lähenemisega on tulemusteni võimalik jõuda kiiremini, kuid olemasolevad andmed tuleb esmalt viia sellisele kujule, mis võimaldaks nendega töötada 3D GIS keskkonnas. Geoandmebaasi puudujäägid nagu korruse ja kõrgusatribuudi puudumine, aga ka kaardistaja hooletusvead, on vaja eelnevalt parandada, et nende põhjal oleks võimalik linnamudelit genereerida ilma lisatööta. Protseduurilise modelleerimise eelduseks on

topoloogiliselt korrektsed lähteandmed, mistõttu on tarkvaraliselt keeruline arvesse võtta tõepäraseid objektide ja kihtide vahelisi suhteid kui neid algselt defineeritud ei ole.

Alusandmete kasutatavus sõltub suuresti sellest, kes on selle kasutajad ja mis eesmärgid seatakse. Tartu linna 3D-andmed on algselt DGN-formaadis, mis tähendab seda, et esmajärjekorras on nende kasutamiseks ette nähtud erinevad CAD-projekteerimistarkvarad ning 3D GIS võimekuse lisamiseks on vaja andmed eelnevalt ette valmistada ja konverteerida. Reeglipõhise modelleerimise tehnika on nii Tartu kui ka mõne muu suurema piirkonna 3D-mudeli loomisel õigustatud, kuna hoonete ning vektorandmete ükshaaval käsitlemine ja visualiseerimine on väga aeganõudev. Eelseatud reeglifailidega saab olemasolevale Tartu linna 3D-mudelile lisada olulisel määral dünaamilisust ja interaktiivsust, mis võib osutada tarvilikuks kõigi planeerimisprotsessi etappide ilmestamisel. Jooksvalt muudetavat linnamudelit saab edaspidi kasutada muuhulgas uushoonestuse paigutuse ja ehitusmahtude hindamisel ning sellest tulenevates nähtavus- ja varjuanalüüsides.

Võib öelda, et tööle seatud eesmärgid saavutati ning sissejuhatuses püstitatud hüpotees leidis kinnitust – reeglipõhist modelleerimistehnikat kasutades saab luua nii olemasolevaid andmeid kui planeeringudokumentides väljatoodud kriteeriume arvestav virtuaalmudel, mida on edaspidi võimalik planeerimisprotsessi abivahendina dünaamiliselt muuta ja täiendada.

The usability of Tartu 3D-model data using Esri CityEngine procedural modelling software (on the comprehensive plan example of Ränilinn)

Viktor Kiik

SUMMARY

3D city models can be considered as a relatively new area, where more accurate classifications and applications are still in development. Although virtual city environments can be used in the variety of fields, these still are not widely used in Estonia, particularly because of their novelty and apparent complexity. From the beginning of their introduction one of the most important uses for 3D models has been the visual support in the decision-making process and using these as a spatial information management tool. It is quite widely known, that 3D city models can speed up matching the newly planned objects with existing urban environment.

Current thesis examined the usage of existing static and proposable planning data in a rule-based 3D modelling environment. Existing 2D and 3D data of Tartu, but also criterias and land usages according to the comprehensive plan of Ränilinn, were used and as a result a methodology for using Esri CityEngine modelling software was proposed. This can be used and taken into account when working with the rest of the 3D and vector data of Tartu. As a result it was created an interactive and dynamic virtual model of this area, which easily can be made available for the public and used as an assisting tool when comparing different planning scenarios. The 3D urban model of Ränilinn includes most of the imported vector and 3D data: textured roofs for all of the buildings of the region, selected facades of the buildings, but also proposed planning data (such as roads, green corridors, buildings and land usages) that all are visualised in 3D rule-based modelling environment.

It is important for all of the participants, that the visualisation which illustrates proposed planning is understandable clearly for all of the persons who are connected with the planning (such as developers, decision-makers, citizens etc). Because if using planar drawings it is quite difficult to deliver revolving solutions in the realistic way. One of the main criterias for using planning visualisations are that these must realistically illustrate the impact of the change caused by redevelopment and also give a comparison to the existing situation. The most common way to illustrate is to create static views from defined directions, but when using 3D city models the illustration process is dynamical, where you can choose viewing angle interactively. In this way the visualised data is clearer and more flexible from the point of view of both the planners and the citizens.

During this master's thesis it is given the evaluation of the usability of the existing 3D and vector data of Tartu, especially in the perspective of rule-based modelling. As a result it can be said, that the results can be achieved with much less effort using Esri CityEngine procedural modelling software compared to quite time-consuming CAD-based approach. But it is crucial, that the base data is pre-processed into more GIS-usable format (for example Multipatch). The shortcomings of the used geodatabase, like absence of certain attributes or the mappers errors, should be eliminated first, so the city model could be generated without additional effort. The assumption of the procedural modelling is that the initial data is topologically correct, because it is rather difficult for the algorithms to consider spatial relationships of real objects when they are not previously defined at all.

The usability of the underlying data depends greatly on its target group and also what are the further applications. The 3D data of Tartu is initially in DGN-format, which means that it is primarily intended to use in various CAD-applications. It also means, that considering the 3D GIS capabilities are not available by default and these should be added later on.

Another aspect is that if we are valuing the time, then the rule-based approach has a clear advantage compared to polygonal approach, as the one-by-one modelling and visualisation of the city environment objects are rather time-consuming than time-saving. When using pre-set modelling rules it is possible to change the parameters interactively and also to change the appearance of the virtual environment consequently. That kind of dynamism is useful while visualising different stages of the planning process. Continuously variable 3D city model is even more efficient, while comparing different new constructions or volumes and processing the resulting visibility and shadow analyses.

In conclusion it can be said, that the main goals of this paper were achieved and the usability of the existing 2D and 3D data of Tartu and also the visualisation of the planning documents using the method presented in this thesis were confirmed. And it is also possible to apply the presented rule-based method, while visualising the remaining parts of existing vector data of Tartu or other proposed planning scenarios. The rule-based virtual model of the Ränilinn area could be further used during the planning process.

TÄNUAVALDUSED

Soovin tänada oma juhendajaid Raivo Aunapit ja Eveli Sisast edasiviivate märkuste ja nõuannete eest. Tänan AlphaGIS-i, kes võimaldas kasutada Esri CityEngine tarkvara, ning Maa-ametit ja Anu Kaljulat, kelle mõistev suhtumine aitas töö valmimisele oluliselt kaasa. Tänusõnad Pille Metspalule ja Ülli Reimetsale Hendrikson & Ko-st Ränilinna üldplaneeringuga seonduvate abimaterjalide ja kommentaaride eest ning Tanel Tuhale, kes leidis aega kokku saada ja 3D-mudelite teemal arutleda. Eriline tänu Eerikule ja Airiinile paranduste ja täpsustuse eest inglisekeelse kokkuvõtte koostamisel. Suur tänu mu perele ja lähedastele pideva toetamise eest. Eraldi suur tänu minu elukaaslasele, kelle keelelisi korrektuure ning lakkamatut tuge ja usku on autoril siinkohal raske sõnadesse panna.

KASUTATUD ALLIKAD

- Albert, J., Bachmann, M., Hellmeier, A. (2003).** Zielgruppen und Anwendungen für Digitale Stadtmodelle und Digitale Geländemodelle. Erhebungen im Rahmen der SIG 3D der GDI NRW. http://www.ikg.uni-bonn.de/fileadmin/sig3d/pdf/Tabelle_Anwendungen_Zielgruppen.pdf (17.05.2013)
- Antunes, S., C. (2013).** Virtual Campus for The University Jaume I, Castellón, Spain. 3D Modeling of the Campus Buildings using CityEngine. <http://run.unl.pt/bitstream/10362/9209/1/TGEO0099.pdf> (17.05.2013)
- Bentley Systems (2010).** City of Helsinki 3D City Model Supports Master Plan. Case Study. http://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/case_studies/cs_city-of-helsinki_local-government-3d-city-gis.pdf (17.05.2013)
- Biljecki, F. (2012).** The Concept of Level of Detail in 3D City Models. GIST Report No. 62.
- Brychtova, A., Vozenilek, V. (2011).** 3Discworld: automatic preparation and visualization of 3D spatial data with use of planar data. 25th International Cartographic Conference, Paris. Ettekanne. http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/Oral%20Presentations%20PDF/C4-Geovisualisation%20-%20graphical%20issues%20and%20proposals/CO-271.pdf (17.05.2013)
- Despine, G., Baillard, C. (2011).** Realistic Road Modelling for Driving Simulators using GIS Data. Advances in Cartography and GIScience. Volume 2, pp 431-448.
- Eesti Kaardikeskus (2009).** Tartu linna ja lähiala digitaalse aeropildistamise andmete ja ortofotode alusel M 1:2000 täpsusega digitaalse vektorkaardi ja hoonete 3D mudeli koostamine ning Eesti Topograafilise Andmekogu (ETAK-i) väljavõtte täiendamine Tartu linna kohta 2 nähtusklassis. Aruanne.
- Edvardsson, K., N. (2013).** 3d GIS modeling using ESRI's CityEngine. A Case Study from The University Juame I in Castellon de Plana Spain. <http://run.unl.pt/bitstream/10362/9198/1/TGEO0103.pdf> (17.05.2013)
- Fredericque, B., Lapierre, A. (2009).** 3D City GIS - A Major Step Towards Sustainable Infrastructure. A Bentley White Paper.
- Haw, L. (2007).** 3D Geospatial City – Developed Through Digital Photogrammetry & 3D Visualization. <http://www.gisdevelopment.net/technology/survey/ma07168.htm> (17.05.2013)
- Hendrikson & Ko (2004).** Soovitused planeerimisprotsessi ülesehitamiseks. Siseministeeriumi planeeringute osakond. Tallinn.
- Hendrikson & Ko (2013).** Ränilinna linnaosa (Aardla, Ringtee ja Raudtee tänavate ning Ülenurme valla piiri vahelise ala) üldplaneeringu keskkonnamõjude strateegilise hindamise aruanne.

- Jahne, M., Krisp, J. (2011).** How Many 3D City Models Are There? – A Typological Try. The Cartographic Journal. Vol. 48 (2), pp. 124-130.
- Jäetma, N. (2010).** Tartu linna kolmemõõtmelise (3D) mudeli valmistamine aeropildistamise põhjal ja selle täpsus. Magistritöö. Käsikiri Eesti Maaülikooli raamatukogus.
- Järve, I. (2012).** Tartu linna kolmemõõtmeliste (3D) andmete visualiseerimine Filosoofi miljööväärtusega hoonestusala näitel. Magistritöö. Käsikiri TÜ Geograafia osakonna raamatukogus.
- Jazayeri, I. (2012).** Trends in 3D land Information Collection and Management. A National Infrastructure for Managing Land Information. Research Snapshot Booklet, pp 81-87.
- Kargaja, A. (2011).** Tallinna vanalinn – 3D. Ettekanne.
http://www.estgis.ee/wp-content/uploads/2012/04/Ettekanne_3Dprojekt_A_Kargaja.pdf
 (17.05.2013)
- Kiik, V. (2008).** Geopositioneeritud kolmemõõtmeliste mudelite loomine Google tarkvara keskkonnas (Tartu linna näitel). Bakalaureusetöö. Käsikiri TÜ Geograafia osakonna raamatukogus.
- Kolbe, T., Gröger, G. (2005).** CityGML – A GML3 Application Profile for virtual City Models. Institute for Cartography and Geoinformation, Univ. of Bonn. OGC TC Meeting, New York.
- Kurakula, V. (2007).** A GIS-Based Approach for 3D Noise Modelling Using 3D City Models. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, Holland.
- Lancelle, M., Wellner, D. (2004).** Current Issues on 3D City Models. Proc. Image and Vision Computing, pp. 363-369.
- Lanig, S., Zipf, A. (2010).** Proposal for a Web Processing Services (WPS) Application Profile for 3D Processing Analysis. Second International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services.
- Lass, K., Palginõmm, V., Muiso, M. (2000).** Soovitud üldplaneeringu koostamiseks. Keskkonnaministeerium. Tallinn.
- Liu, G., Yu, D. (2011).** The Development of Intelligent 3D GIS Applications in Urban Space. 25th International Cartographic Conference, Paris. Ettekanne.
http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/Oral%20Presentations%20PDF/C3-Tools%20and%20infrastructures%20for%20spatial%20analysis/CO-255.pdf (17.05.2013)
- Mètral, C., Ghoula, N., Falquet, G. (2012).** An Ontology of 3D Visualisation Techniques for Enriched 3D City Models. Usage, Usability and Utility of 3D City Models, pp. 1-15.
- Merlet, N., Larnier, K. (2011).** Improving risk perception with real-time 3D visualization of flood scenarios at local scale. 25th International Cartographic Conference, Paris. Ettekanne.
<http://www.itolosa.fr/dl/icc2011/liveflood.pdf> (17.05.2013)

- Moser, J., Albrecht, F., Kosar, B. (2010).** Beyond Visualisation – 3D GIS Analyses for Virtual City Models. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences Vol. XXXVIII-4/W15.
- Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., Gool, L. V., Leuven, K. U. (2006).** Procedural Modeling of Buildings. ACM Transaction on Graphics, 25(3), pp. 614-623.
- Open Geospatial Consortium (2012).** OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium Inc. Ver. 2.0.0.
https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=47842 (17.05.2013)
- Parish, Y., Müller, P. (2001).** Procedural Modeling of Cities. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, pp. 301-308.
- Planeerimisseadus (2003).** Riigi Teataja I 2002, 99, 579.
- Riigi Kinnisvara AS (2009).** RKAS mudelprojekteerimise juhend (versioon 23.11.2009).
http://rkas.ee/files/bim_juhend_20091123.pdf (17.05.2013)
- Rodriguez, R., Alvarez, M., Miranda, M., Diaz, A., Papi, F. (2007).** Automatica Generation of 3D Virtual Cities from Lidar Data and High Resolution Images.
- Ross, L. (2010).** E-collaboration between the private and the civil sector: Support of long-term utilization and update of official 3D city models. 3D City Models in Urban Land Management. Technologies and Applications, pp. 39-52.
- Shiode, N. (2006).** A Spatial-Temporal 3D GIS City Models. A Case Study of Buffalo Downtown. Ettekanne.
http://www.ucgis.org/dynamics_workshop/presentations/UCGIS2006_Dynamics_nshiode-3D-compressed.pdf (17.05.2013)
- Sisas, E. (2012).** CityEngine ja E3De – uued võimalused 3D modelleerimiseks. Ettekanne.
http://www.alphagis.ee/data/img/esri12/esri_paevad12_sisas_2p.pdf (17.05.2013)
- Sisas, E. (2009).** 3D andmete haldamine ArcGIS 3D Analüüsi abil. Ettekanne.
http://www.alphagis.ee/data/img/esri09/ESRI_paevad_3D_Analyst.pdf (17.05.2013)
- Stoter, J., Zlatanov, S. (2003).** 3D GIS, Where Are We Standing. Spatial, Temporal and Multidimensional Data Modelling and Analysis. Joint Workshop.
- Takase, Y., Sho, N. (2003).** Automatic Generation of 3D City Models and Related Applications. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/W10.
- Tamm, T. (2010).** Tallinn 3D data. Ettekanne.
www.takk.ee/files/file/Dokumendid/2010_Tallinn_3D_data_v2.ppt (17.05.2013)
- Tartu Linnavalitsus (2007).** Riigihanke Tartu linna ja lähiala digitaalse aeropildistamise andmete ja ortofotode alusel M 1:2000 täpsusega digitaalse vektorkaardi ja hoonete 3D mudeli

koostamine ning Eesti Topograafilise Andmekogu (ETAK-i) väljavõtte täiendamine Tartu linna kohta 2 nähtusklassis. Tehniline kirjeldus.

Tuan, A. (2013). Overview of Three-Dimensional GIS Data Models. International Journal of Future Computer and Communication, 2., pp 270-274.

Vries, T., Zlatanova, S. (2011). 3D Intelligent Cities. Geoinformatics, April/May 2011, pp. 6-8.

Zhu, Q., Li, F., Zhang, Y. (2011). Unified Representation of Three Dimensional City Models. ISPRS Workshop on Service and Application of Spatial Data Infrastructure Vol. XXXVI(4/W6), pp. 237-242

Internetiallikad

AlphaGIS (2012). Kolmemõõtmeline maailm GIS-is.

<http://www.alphagis.ee/kolmemootmeline-maailm-gis-is> (17.05.2013)

Esri (2013a). Esri CityEngine brochure.

<http://www.esri.com/software/cityengine/~media/Files/Pdfs/library/brochures/pdfs/esri-cityengine.pdf> (17.05.2013)

Esri (2013b). What is CityEngine Web Viewer? ArcGIS Resources.

http://resources.arcgis.com/en/help/arcgisonline/index.html#/What_is_CityEngine_Web_Viewer/010q000000nw000000/ (17.05.2013)

Kuressaare koduleht (2011). 3D Kuressaare. <http://www.kuressaare.ee/uus/31548/> (17.05.2013)

Linnalabor (2012). Tallinna planeeringute juhend. <http://planeerimine.linnalabor.ee/> (17.05.2013)

Metrum (2010). Three-dimensional model of Riga's territory terrain developed by "Metrum" will help prevent flood risks. <http://www.metrum.lv/en/news---publications/news/?id=85> (17.05.2013)

SketchUpdate (2010). Stockholm is on the 3D Map.

<http://sketchupdate.blogspot.com/2010/05/stockholm-is-on-3d-map.html> (17.05.2013)

Tartu koduleht (2012). Tartu linna 3D mudel. http://www.tartu.ee/?page_id=24193 (17.05.2013)

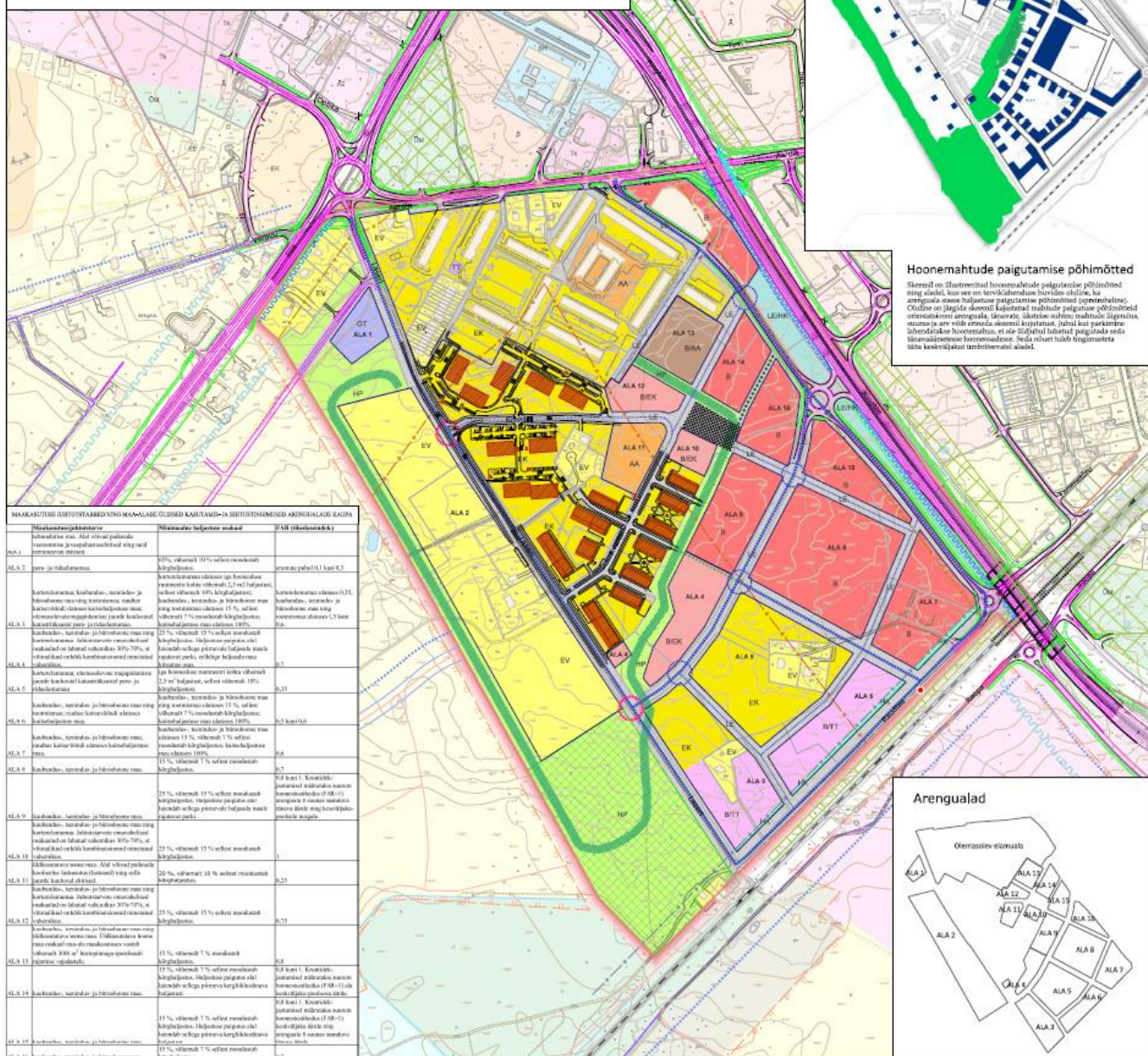
Valgamaa Arenguagentuur (2013). Valgamaa 3D vaatamisväärsused.

<http://www.arenguagentuur.ee/valgamaa-turismiveeb/335> (17.05.2013)

Vecriga (2013). Virtual Tour of Old Riga. <http://vecriga.info/index.html> (17.05.2013)

Virtual Tallinn (2013). Tallinna vanalinna 3D-rakendus. <http://3d.tallinn.ee/> (17.05.2013)

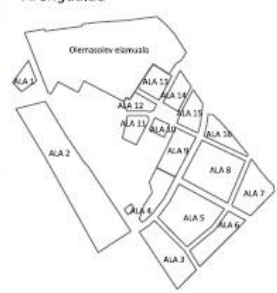
MAAKASUTUS
Viimati muudetud 04.01.2013
Mõõtkava 1 : 3000



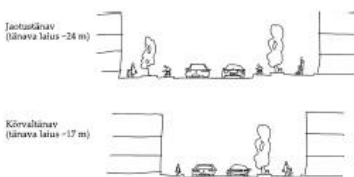
Hoonemahtude paigutamise põhimõtted

Skeemil on illustreeritud hoonerahvade paigutamise põhimõtted ning aladel, kus see on teraviljalistuseks huvitav, näidatakse ka arenguala asuuse hoonetute paigutamise põhimõtteid (sõnaraamat). Ouline on järgida skeemil kirjeldatud maade paigutuse põhimõtteid, orientatsiooni arenguala, täheval, liikumise suhtes; maade ligipääsu struktuuri ja vöö erinada skeemil kirjeldatud, juhul kui parkimise lehitamiseks hoonerahvade, si eelolevaid lubatud paigutada seda tähevaliseks hoonerahvade. Seda niuist võib tingimusteta tähevaliseks jätta tühjendatavale.

Arenqualad



Tänavaruum[võimal[kud lahendused*



 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv
 Keeglikuhoiuv

Legend

Rännilinna üldplaneeringuga kavandatavad maasõutuse kohtustartid ja arengud

- [illegible]

Liiklus

- Tee või tänaval sery
Kruusakattega tee või tänaval
Pinnastee
Jalgteed
Kilbitse
Kandteed
Kandteed kaitseviivd
Maantee kaitseviivd
Maantee sisseaakaitseviivd
- Tartu ümbrusel on järele - Tartu - Va
mist tehislinn projekt (2008)
- Sõidutee või -teja sery
Jalg- ja jalgrattate sery
Aarekivi
Lüüvdearvite mahadeit

Mund leppem

-  Planeeringuala püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri
-  Ornavaltstruktuurse püri

Kavandatav maakasutus pla

Tartu linna üldplaneering (2005)
(Näidatud väljaspool planeeringuala)

- [illegible]

guala ümbritsevatel aladel

Uuemurme valla lüdiplaneering (2009)

- Fluenteritidid eelkõige
- Fluenteritidid sagedamini
- Fluenteritidid toetamis- ja lõpmata
- Fluenteritidid loodustik rühma
- Fluenteritidid maastikuhoides
- Silma värvitulek pühkamine
- Fluenteritidid kergikõhase
- Fluenteritidid avalikult kasutata
- Juurepõõsist
- Fluenteritidid avalikult kasutata
- Avalikult kasutata see seadus 200
- Fluenteritidid teemata-ala kuu et tehi
- Ala peale-aga salu-0000
- Fluenteritid lastepõõsist
- Glennavet teemata-ala
- Kaasavet kooli-ala hoonetuse
- (teemata-ala)

Komisi	TARTU LIMAWATI, FIDUS	
Jenjang	Manajemen Strategis	
Materi	1. 2020	Juni 2018
Revisi	Fluorocarbono (2018)	Fluorocarbono (2018)
Kategori	Manajemen	Hendriks

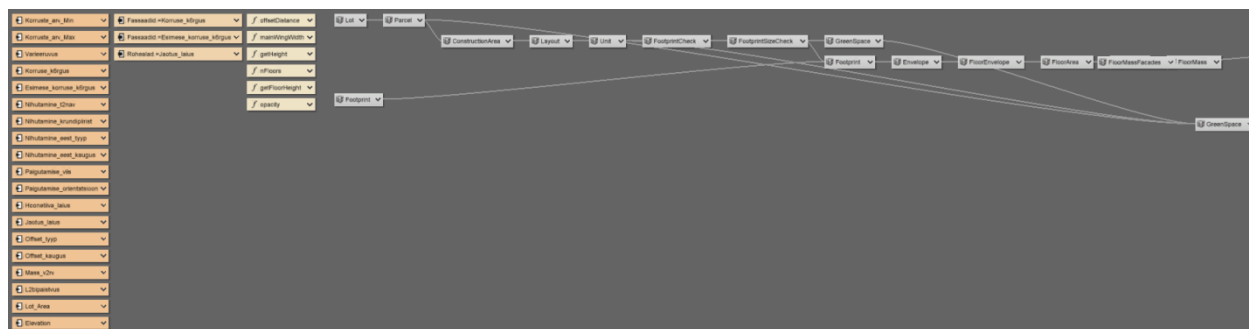
Lisa 2. Dünaamilise Ränilinna 3D-mudeli illustatsioonid



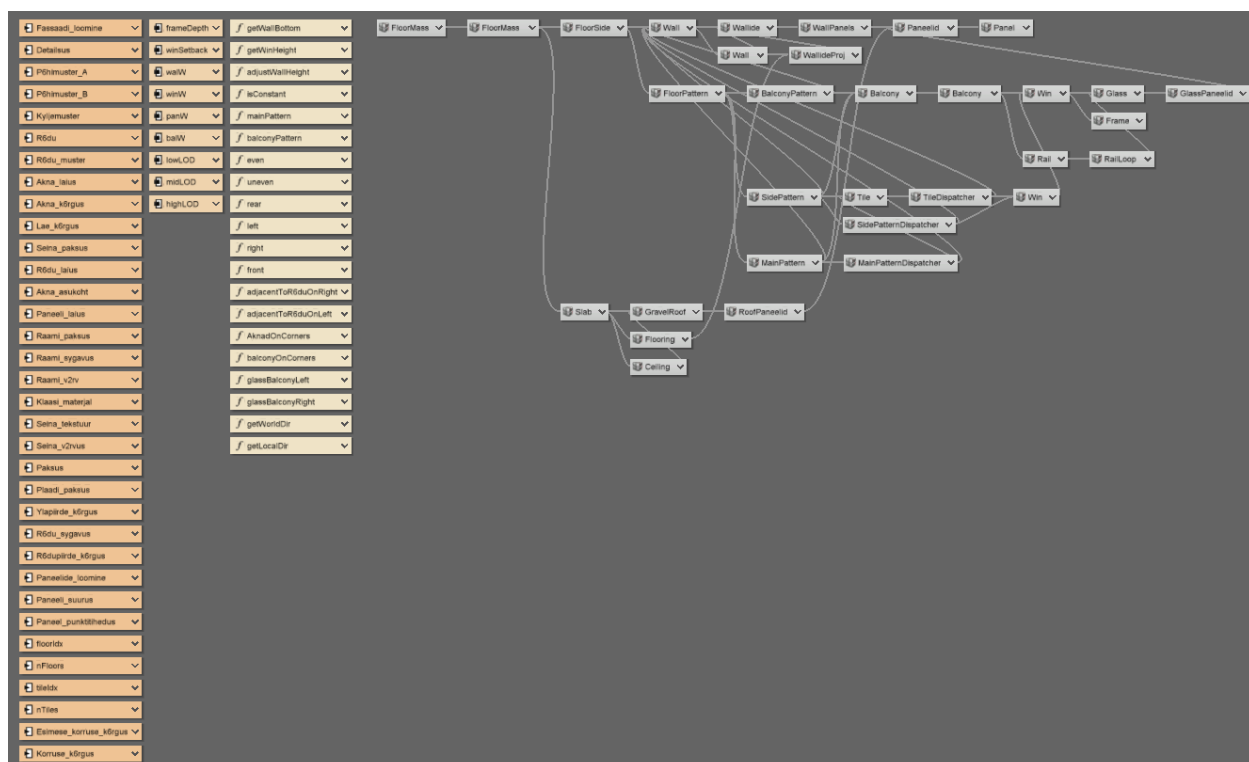


Lisa 3. Töös kasutatud CGA-reeglifailide väljavõtted

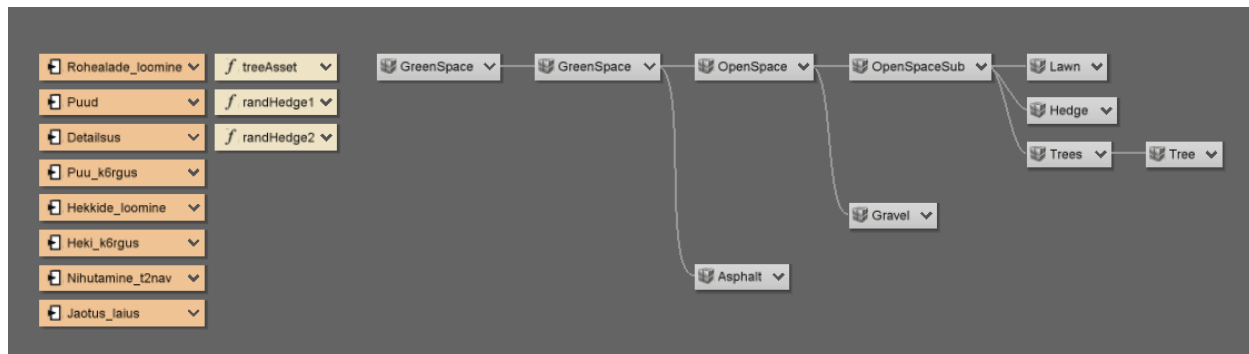
Hoonete planeerimise baasreeglistik:



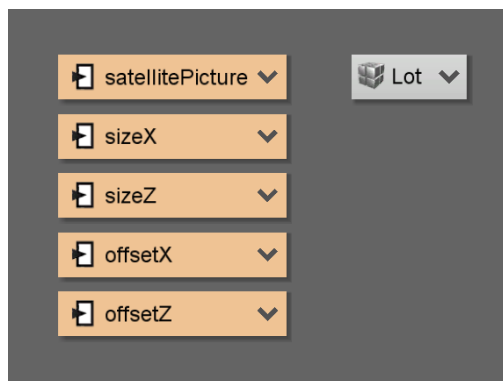
Hoonete planeerimise reeglistik (fassaadid):



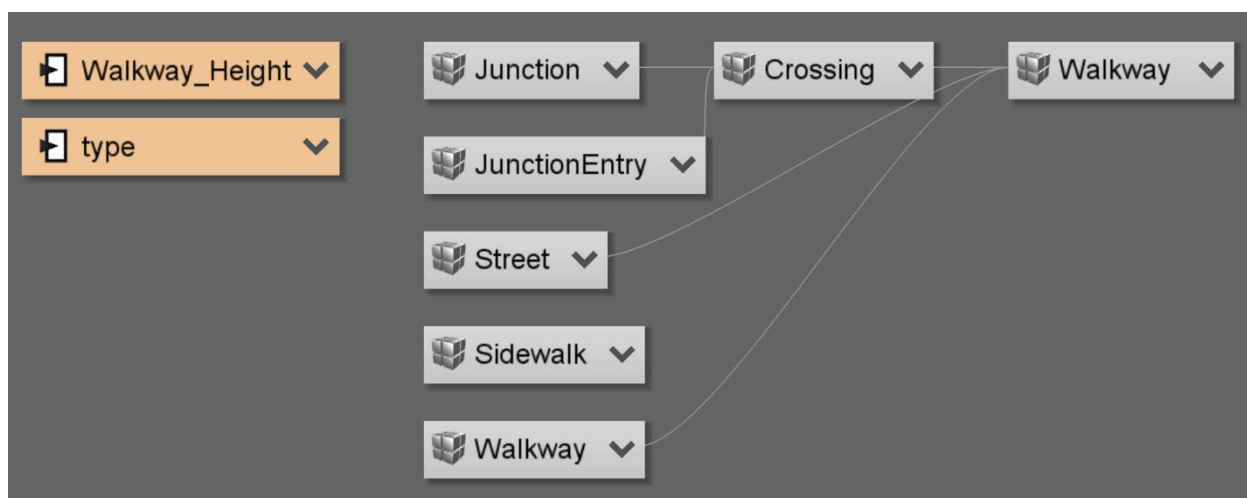
Hoonete planeerimise reeglistik (rohealad):



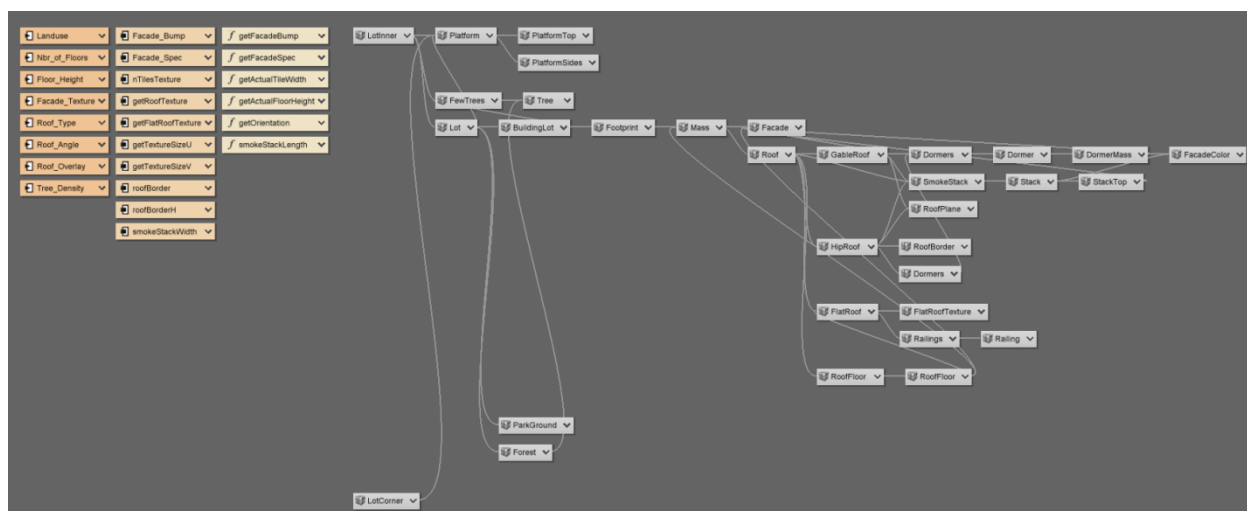
Katuste tekstuurimise reeglistik:



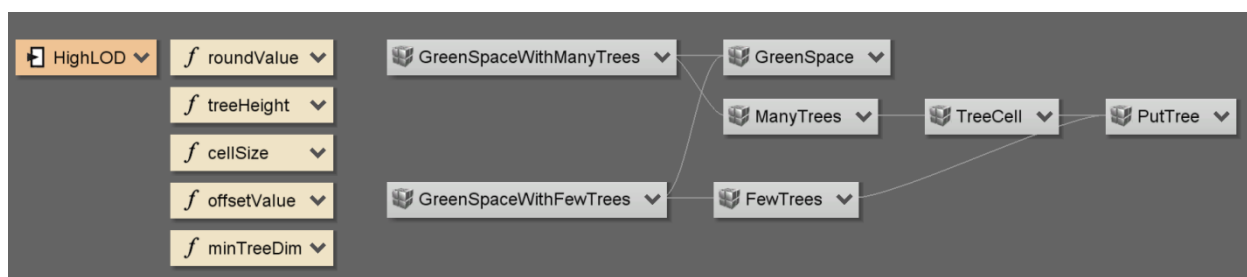
Teede visualiseerimise reeglistik I:



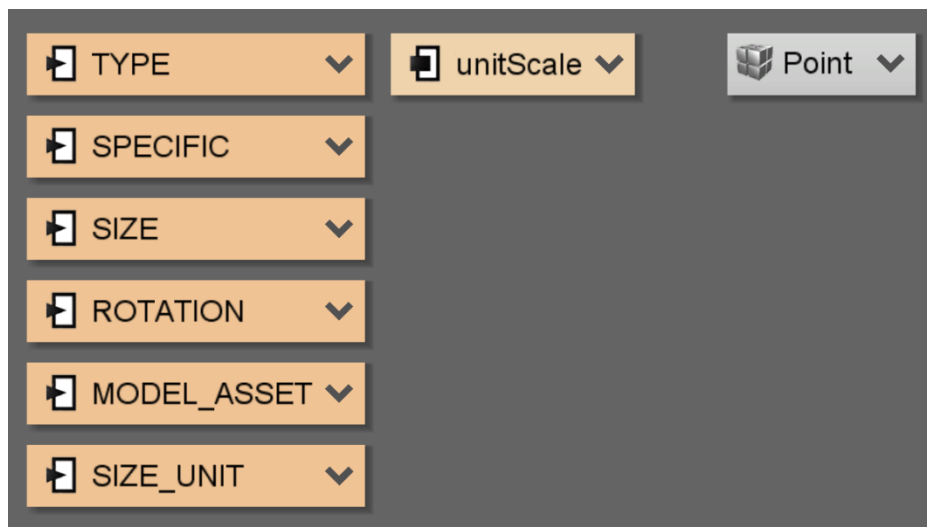
Teede visualiseerimise reeglistik II:



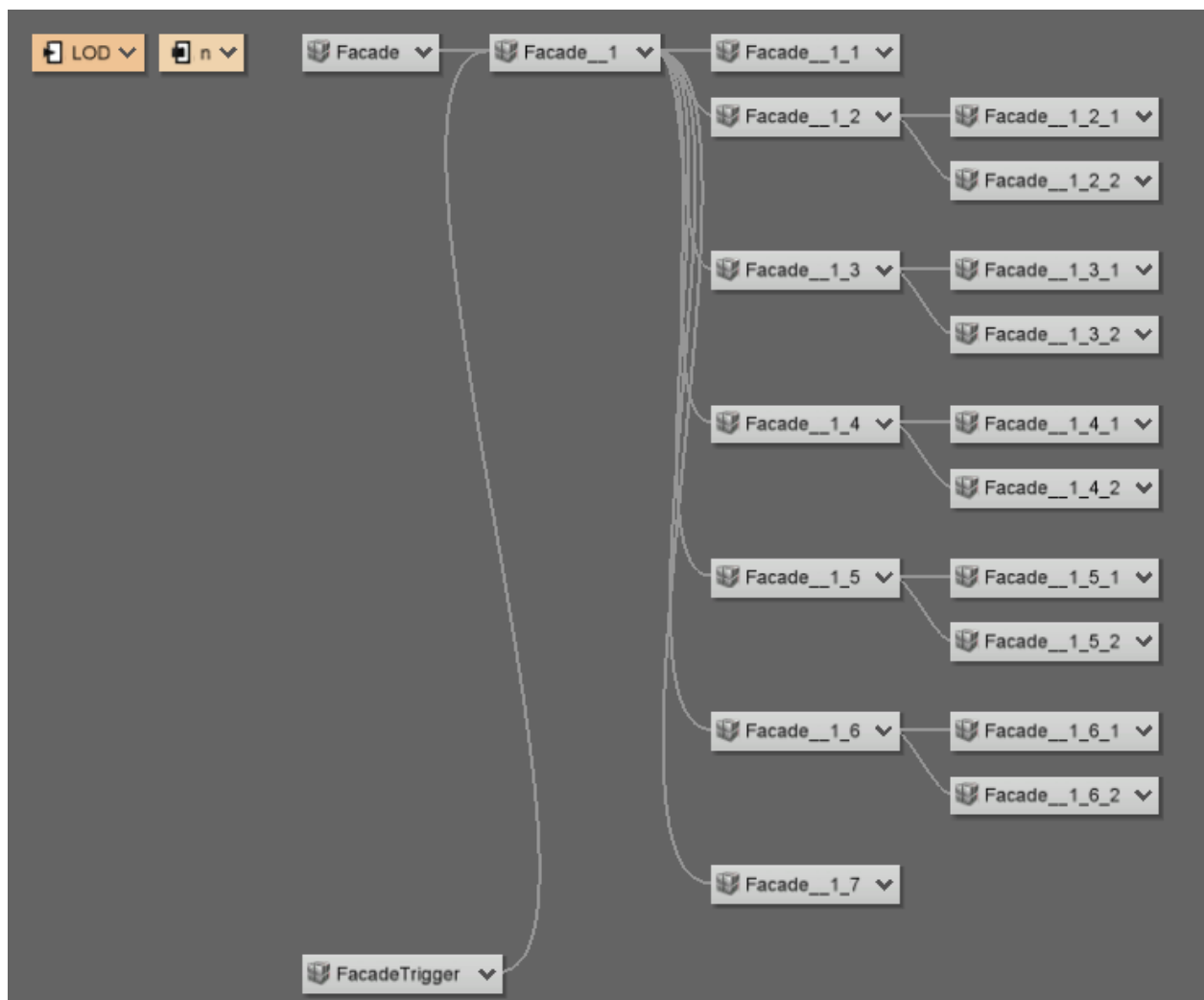
Planeeringu rohealade reeglistik:



Staatiliste punktobjektide visualiseerimise reeglistik:



Staatiliste 3D-hoonete visualiseerimise reeglistiku näide (Füüsika Instituut):



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina

Viktor Kiik

(autori nimi)

(sünnikuupäev: 14.08.1986)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Tartu linna kolmemõõtmelise (3D) mudeli rakendamine Esri CityEngine tarkvara abil
Ränilinna üldplaneeringu näitel
(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on

Raivo Aunap ja Eveli Sisask
(juhendaja nimi)

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

Tartus, 20. mail, 2013 *(kuupäev)*